

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Ljubljana, 2023

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Magistrsko delo št.:

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK:	551.583:556.51(043.3)
Avtor:	Matej Lahne, dipl. inž. ok. grad. (UN)
Mentor:	doc. dr. Nejc Bezak
Somentor:	prof. dr. Mojca Šraj
Naslov:	Analiza vpliva podnebnih sprememb na hidrološke procese v porečju Save do vodomerne postaje Litija.
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	81 str., 72 sl., 13 preg., 36 en.
Ključne besede:	podnebne spremembe, scenariji RCP, hidrološki modeli, konceptualni model GR6J Cema Neige, simulirani pretoki, nizki pretoki, visoki pretoki

IZVLEČEK

V magistrskem delu smo proučevali uporabnost konceptualnega hidrološkega modela GR6J za analiziranje hidroloških procesov v povezavi s podnebnimi spremembami, pri čemer smo upoštevali različne scenarije podnebnih sprememb RCP. Raziskavo smo omejili na območje porečja reke Save do vodomerne postaje Litija. V teoretičnem delu so opisane podnebne spremembe ter njihov vpliv na družbo, gospodarstvo in vse pogostejše pojavljanje ekstremnih vremenskih pojavov. Ob tem je poudarjena človekova odgovornost za pojav tovrstnih sprememb, navedene pa so tudi njihove posledice, kot so taljenje večnega ledu in snega, dvig morske gladine, poplave in suše. Drugi del se navezuje na hidrološke modele, s katerimi upravljamo vodne vire in hidravlične objekte ter proučujemo, vrednotimo in ocenjujemo možnosti pojavljanja omenjenih pojavov. Praktični del magistrskega dela se osredotoča na ovrednotenje vpliva podnebnih sprememb na hidrološke procese do leta 2100. Osredotočili smo se na identifikacijo morebitnih sprememb v pretoku reke Save na vodomerni postaji Litija na podlagi količine padavin in temperature zraka. Dodatno smo analizirali vpliv na poplavne dogodke v različnih scenarijih podnebnih sprememb RCP. Z uporabo koeficientov NSE, KGE in KGE2 smo preverili uspešnost umerjenega hidrološkega modela. Na podlagi rezultatov smo analizirali količino presežnih pretokov, absolutne in relativne razlike presežnih pretokov ter analizirali nizke pretoke Q95 in MAM7. Ugotovili smo, da se bo število presežnih pretokov nad 1514 m³/s v prihodnosti povečevalo, kar pomeni pogostejše poplavljanje reke Save na vodomerni postaji Litija. Rezultati pa so pokazali tudi trend naraščanja nizkih pretokov za strožja scenarija RCP 2,6 in RCP 4,5.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	551.583:556.51(043.3)
Author:	Matej Lahne, B.Sc.
Supervisor:	Assist. Prof. Nejc Bezak, Ph.D.
Cosupervisor:	Prof. Mojca Šraj, Ph.D.
Title:	Analysis of climate change on hydrological processes in the Sava River catchment up to the gauging station Litija
Document type:	Master Thesis
Scope and tools:	81 p., 72 fig., 13 tab., 36 eq.
Key words:	climate change, RCP scenarios, hydrological models, conceptual model GR6J Cema Neige, simulated flows, low flows, high flows

ABSTRACT

This master's thesis investigates the applicability of the conceptual hydrological model GR6J for analyzing hydrological processes in relation to climate change, considering various RCP scenarios. The study was limited to the Sava River catchment up to the Litija gauge station. The theoretical part describes climate change and its impact on society, the economy, and the rising frequency of extreme weather occurrences. Emphasis is placed on human responsibility for such changes, and their consequences – melting of glaciers and snow, sea level rise, floods, and droughts. The second part relates to hydrological models used to manage water resources and hydraulic structures, examining, evaluating, and assessing the possibilities of the mentioned events occurring. The research part of the master's thesis focuses on evaluating the impact of climate change on hydrological processes until the year 2100. We focused on identifying potential changes in the flow of the Sava River at the Litija gauge station based on precipitation and air temperature. We also examined the impact on flood events in different RCP scenarios. Using NSE, KGE, and KGE2 coefficients, we verified the performance of the calibrated hydrological model. Based on the results, we analyzed the number of excess flows, absolute and relative differences in excess flows, and examined Q95 and MAM7 low flows. We discovered that in the future, there will be more excess flows above 1514 m³/s, indicating that the Sava River will flood more frequently at the Litija gauge station. The findings also revealed a growing tendency of low flows for the stricter RCP 2,6 and RCP 4,5 scenarios.

ZAHVALA

Najlepša hvala mentorju doc. dr. Nejcu Bezaku za strokovno pomoč, usmeritve, odzivnost in potrpljenje ob pisanju magistrskega dela. Zahvala gre tudi somentorici prof. dr. Mojci Šraj za strokovne nasvete pri zaključnem delu in usmerjanje skozi celoten študijski proces.

Velika zahvala tudi sodelavcem Ivanu, Igorju in Boštjanu, ki so me tekom pisanja magistrskega dela bodrili in vzpodbujali. Hvala vam za ogromno novega znanja!

Najlepša hvala tudi mami in očetu, ki sta me na izobraževalni poti podpirala in nista obupala.

Ogromna zahvala pa gre tudi ženi Jerci, ki me je prenašala in vzpodbujala v dobrih in slabih časih na poti življenja. Pokazala je, da se trud splača. Hvala ti za vse!

VSEBINSKO KAZALO

1 UVOD.....	1
1.1 Cilj.....	1
1.2 Hipoteze.....	2
1.3 Pregled literature.....	2
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA IN METODE.....	4
2.1 Podnebne spremembe	4
2.1.1 Vzroki	4
2.1.2 Vplivi	6
2.1.3 Posledice	7
2.2 RCP scenariji	9
2.3 Hidrološki modeli	11
2.3.1 Klasifikacija hidroloških modelov	12
2.3.2 Model GR6J	14
2.3.3 Snežni modul Cema Neige.....	20
2.3.4 Evapotranspiracija.....	22
2.3.5 Učinkovitost modelov	22
3 PODATKI.....	25
3.1 Porečje reke Save do vodomerne postaje Litija.....	25
3.2 Hipsometrična krivulja.....	26
3.3 Priprava podatkov v programu R.....	27
3.4 Izračun potencialne evapotranspiracije	31
3.5 Izračun deleža snežnih padavin	33
3.6 Umerjanje modela	33
3.7 Izračun GR6J Cema Neige	34
4 ANALIZA REZULTATOV IN DISKUSIJA.....	41
4.1 Analiza presežnih pretokov	41
4.1.1 Scenarij RCP 2,6.....	46

4.1.2	Scenarij RCP 4,5	46
4.1.3	Scenarij RCP 8,5	47
4.1.4	Absolutna in relativna razlika	48
4.1.5	Analiza presežnih pretokov po letnih časih	50
4.2	Analiza nizkih pretokov	52
4.2.1	Analiza pretoka Q95	54
4.2.2	Analiza MAM7	64
4.3	Diskusija	74
5	ZAKLJUČKI.....	75
VIRI.....		77

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz izvora antropogenih izpustov CO ₂ [vir podatkov: IPCC, 2014].	4
Slika 2: Povprečne vrednosti koncentracij toplogrednih plinov med letoma 1850 in 2011 [vir podatkov: IPCC, 2014].	5
Slika 3: Vrednosti antropogenih izpustov CO ₂ in njihov izvor med letoma 1750 in 2011 [vir podatkov: IPCC, 2014].	5
Slika 4: Globalno povprečna sprememba nivoja morske gladine (barve predstavljajo različne vire podatkov) [vir podatkov: IPCC, 2014].	7
Slika 5: Prikaz vredosti sevalnega prispevka [vir podatkov: van Vuuren et al., 2011].	10
Slika 6: Kategorije izvora sevalnega prispevka glede na RCP scenarij [vir podatkov: van Vuuren et al., 2011].	11
Slika 7: Vodni krog (povzeto po: European Commission, 2015).	12
Slika 8: Klasifikacija hidroloških modelov (povzeto po: Singh, 2018).	13
Slika 9: Shematični prikaz modela GR6J (povzeto po: Sezen in Partal, 2022).	15
Slika 10: Shematični prikaz snežnega modula Cema Neige (povzeto po: Valéry et al., 2014b).	21
Slika 11: 3D prikaz evklidske razdalje med idealno in optimalno točko (povzeto po: Gupta et al., 2009).	23
Slika 12: Zeleno obarvano porečje Save do vodomerne postaje Litija.	25
Slika 13: Hipsometrična krivulja porečja Save do vodomerne postaje Litija.	26
Slika 14: Karta povprečnih dnevni padavin za dan 4. marec 1985.	27
Slika 15: Karta povprečne dnevne temperature za dan 4. marec 1985.	28
Slika 16: Prikaz povprečnih dnevni padavin po mesecih med 1. januarjem 1981 in 31. decembrom 2010.	28
Slika 17: Prikaz povprečnih dnevni padavin po letih med letoma 1981 in 2010.	29
Slika 18: Prikaz povprečnih dnevni temperatur po mesecih med 1. januarjem 1981 in 31. decembrom 2010.	29

Slika 19: Prikaz povprečnih dnevnihi temperatur po letih med letoma 1981 in 2010.	30
Slika 20: Prikaz povprečnega dnevnega pretoka Save po mesecih na vodomerni postaji Litija med letoma 1981 in 2010.	30
Slika 21: Prikaz povprečnega dnevnega pretoka Save po letih na vodomerni postaji Litija med letoma 1981 in 2010.	31
Slika 22: Prikaz izračunane potencialne evapotranspiracije.	32
Slika 23: Primerjava pretoka ter padavin in potET.	32
Slika 24: Prikaz pretoka Save na vodomerni postaji Litija v mm/dan.	34
Slika 25: Rezultati umerjenega modela GR6J Cema Neige za porečje Save do vodomerne postaje Litija (1. del).	34
Slika 26: Rezultati umerjenega modela GR6J Cema Neige za porečje Save do vodomerne postaje Litija (2. del).	35
Slika 27: Primer zapisa kode za izračun simulacije št. 14 (RCP 8,5; simulacija 14).	38
Slika 28: Prikaz izračunane nove potencialne evapotranspiracije za simulacijo 14 (RCP 8,5).	39
Slika 29: Rezultati modela GR6J Cema Neige za porečje Save do vodomerne postaje Litija za simulacijo 14 (RCP 8,5).	39
Slika 30: Opis stopenj nevarnosti in možnih učinkov [vir podatkov: ARSO, 2023].	41
Slika 31: Grafični prikaz presežnih vrednosti dnevnihi povprečnih pretokov za posamezen scenarij podnebnih sprememb.	42
Slika 32: Prikaz števila presežnih vrednosti povprečnih dnevnihi pretokov za RCP 2,6 in vsa obdobja.	43
Slika 33: Prikaz števila presežnih vrednosti povprečnih dnevnihi pretokov za RCP 4,5 in vsa obdobja.	44
Slika 34: Prikaz števila presežnih vrednosti povprečnih dnevnihi pretokov za RCP 8,5 in vsa obdobja.	44
Slika 35: Prikaz števila presežnih vrednosti pretokov za posamezno obdobje in posamezen scenarij.	45

Slika 36: Prikaz minimalnih, maksimalnih povprečnih dnevni presežnih vrednosti pretoka ter prikaz vrednosti mediane, 1. kvartila ter 3. kvartila povprečnih dnevni presežnih vrednosti pretoka za scenarij RCP 4,5.	47
Slika 37: Prikaz minimalnih, maksimalnih povprečnih dnevni presežnih vrednosti pretoka ter prikaz vrednosti mediane, 1. kvartila ter 3. kvartila povprečnih dnevni presežnih vrednosti pretoka za scenarij RCP 8,5.	48
Slika 38: Grafični prikaz vrednosti absolutnih razlik med presežno vrednostjo in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka.	49
Slika 39: Grafični prikaz vrednosti relativnih razlik med razliko maksimalne vrednosti ter minimalne presežne vrednosti povprečnega dnevnega pretoka in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka.	50
Slika 40: Prikaz števila presežnih vrednosti povprečnih dnevni pretokov za posamezno obdobje in letni čas ter posamezen scenarij.	52
Slika 41: Prikaz hidrograma ter baznega odtoka za prvi model scenarija RCP 2,6.	53
Slika 42: Minimalna in maksimalna vrednost, vrednost mediane ter vrednost 1. ter 3. kvartila BFI za vse RCP in celotno obdobje 1981–2100.	54
Slika 43: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2100 in RCP 2,6.	55
Slika 44: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2020 in RCP 2,6.	56
Slika 45: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2021–2060 in RCP 2,6.	56
Slika 46: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2061–2100 in RCP 2,6.	57
Slika 47: Graf kvartilov za pretok Q95 in RCP 2,6 ter posamezno obdobje.	57
Slika 48: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2100 in RCP 4,5.	58
Slika 49: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2020 in RCP 4,5.	59
Slika 50: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2021–2060 in RCP 4,5.	60
Slika 51: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2061–2100 in RCP 4,5.	60
Slika 52: Graf kvartilov za pretok Q95 in RCP 4,5 ter posamezno obdobje.	61

Slika 53: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2100 in RCP 8,5.	61
Slika 54: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2020 in RCP 8,5.	62
Slika 55: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2021–2060 in RCP 8,5.	63
Slika 56: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2061–2100 in RCP 8,5.	63
Slika 57: Graf kvartilov za pretok Q95 in RCP 8,5 ter posamezno obdobje.....	64
Slika 58: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2100 in RCP 2,6.	65
Slika 59: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2020 in RCP 2,6.	66
Slika 60: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2021–2060 in RCP 2,6.	66
Slika 61: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2061–2100 in RCP 2,6.	67
Slika 62: Graf kvartilov za pretok MAM7 in RCP 2,6 ter posamezno obdobje.	67
Slika 63: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2100 in RCP 4,5.	68
Slika 64: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2020 in RCP 4,5.	69
Slika 65: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2021–2060 in RCP 4,5.	69
Slika 66: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2061–2100 in RCP 4,5.	70
Slika 67: Graf kvartilov za pretok MAM7 in RCP 4,5 ter posamezno obdobje.	70
Slika 68: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2100 in RCP 8,5.	71
Slika 69: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2020 in RCP 8,5.	72
Slika 70: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2021–2060 in RCP 8,5.	72
Slika 71: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2061–2100 in RCP 8,5.	73
Slika 72: Graf kvartilov za pretok MAM7 in RCP 8,5 ter posamezno obdobje.	73

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Parametri GR6J Cema Neige.	20
Preglednica 2: Parametri snežnega modula Cema Neige.	22
Preglednica 3: Izračunani parametri za umerjen model GR6J Cema Neige s kriterijem ujemanja KGE2.	35
Preglednica 4: Kontrola ujemanja glede na kriterij ujemanja KGE2 v modelu GR6J Cema Neige.	36
Preglednica 5: Izračunani parametri za umerjen model GR6J Cema Neige s kriterijem ujemanja KGE.	36
Preglednica 6: Kontrola ujemanja glede na kriterij ujemanja KGE v modelu GR6J Cema Neige.	36
Preglednica 7: Izračunani parametri za umerjen model GR6J Cema Neige s kriterijem ujemanja NSE.	37
Preglednica 8: Kontrola ujemanja glede na kriterij ujemanja NSE v modelu GR6J Cema Neige.	37
Preglednica 9: Število presežnih povprečnih dnevnih pretokov za posamezno simulacijo in scenarij podnebnih sprememb.	42
Preglednica 10: Mediana presežnih pretokov za posamezen scenarij: RCP 2,6, RCP 4,5 in RCP 8,5.	45
Preglednica 11: Tabelarni prikaz vrednosti absolutnih razlik med presežno vrednostjo in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka.	49
Preglednica 12: Tabelarni prikaz vrednosti relativnih razlik med razliko maksimalne vrednosti ter minimalne presežne vrednosti povprečnega dnevnega pretoka in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka.	50
Preglednica 13: Prikaz števila presežnih vrednosti povprečnih dnevnih pretokov za posamezno obdobje in letni čas ter posamezen scenarij.	51

1 UVOD

Podnebne spremembe predstavljajo velik problem za prihodnje generacije. Posledice lahko vidimo in občutimo že sami v obliki nepredvidljivih ekstremnih vremenskih dogodkov, ki vplivajo na naravo, družbo in gospodarsko dejavnost (European Commission, 2023).

Tali se večni led in s tem se dviguje gladina morja. Padavinski vzorci so manj predvidljivi, neurja pa so vse močnejša. Vse višje temperature postajajo nova realnost, zato se v nekaterih predelih sveta vedno pogostejše srečujejo z vročinskimi valovi in sušo, v drugih pa z nenavadnimi količinami padavin in obsežnimi poplavami (IPCC, 2023). V zadnjem obdobju smo opisane posledice občutili tudi v Sloveniji, zato se še toliko bolj zavedamo svoje odgovornosti in pomembnosti sprememb na področju poseganja v naravno okolje.

Poplave so ena najbolj pogostih naravnih nesreč, ki v kratkem času prizadene veliko število ljudi in povzroči ogromno gmotno škodo ter močno vpliva na gospodarstvo (Sun et al., 2022). Zato na tem področju poteka ogromno raziskav in analiz, ki skušajo pripomoči k napredku pri napovedovanju poplav.

Za namen proučevanja in vrednotenja vpliva poplav so v 19. stoletju začeli z razvojem hidroloških modelov (Todini, 2007). Zаметki le-teh so bili namenjeni zgolj ocenjevanju največjih pretokov za načrtovanje kanalizacijskih sistemov in odvodnjavanja (racionalna metoda), v današnjem času pa s hidrološkimi modeli, ki temeljijo na podatkovnih bazah, simuliramo številne naravne procese in vpliv človekovih dejavnosti nanje. Rezultati prikazujejo približke realnosti naravnega sistema, saj hidrološki modeli upoštevajo naključnost pojavljanja hidroloških procesov v prostoru in času (Singh, 2018).

Z uporabo različnih hidroloških modelov lahko med drugim načrtujemo, razvijamo, oblikujemo in upravljamo vodne vire ter hidravlične objekte, ocenjujemo možnosti poplav, suše ter erozije tal in vrednotimo rabo vode kot energetskega vira ter njeno onesnaženje.

1.1 Cilj

Glavni cilj magistrske naloge je ovrednotenje vpliva podnebnih sprememb na hidrološke procese v porečju reke Save do vodomerne postaje Litija. Z uporabo konceptualnega hidrološkega modela GR6J Cema Neige ter upoštevajoč različne RCP scenarije (*ang. Representative Concentration Pathways*) bomo analizirali podatke meritev padavin, pretokov in temperature zraka. Tako bomo ugotavljali vpliv podnebnih sprememb na padavine, površinski odtok, izhlapevanje in ostale hidrološke procese, ki jih zajema uporabljeni hidrološki model, do leta 2100.

V okviru naloge bomo z uporabo koeficientov NSE (*ang. Nash-Sutcliffe Efficiency*), KGE (*ang. Kling-Gupta Efficiency*) in KGE2 analizirali tudi uspešnost umerjenega hidrološkega modela.

Na podlagi rezultatov bomo predstavili scenarije podnebnih sprememb in opisali hidrološke procese, ki vplivajo na površinski odtok v porečju Save do vodomerne postaje Litija.

1.2 Hipoteze

Pred začetkom raziskave smo postavili tri raziskovalne hipoteze.

Hipoteza 1: V procesu umerjanja modela GR6J Cema Negie bomo s kriterijem KGE2, ki bolje upošteva nizke pretoke, dobili bolje umerjeni konceptualni model kot s kriterijem NSE.

Hipoteza 2: Število presežnih povprečnih dnevnih pretokov reke Save na vodomerni postaji Litija se bo v prihodnosti povečalo.

Hipoteza 3: Nizki pretoki reke Save na vodomerni postaji Litija se bodo v prihodnosti zmanjševali.

1.3 Pregled literature

Svetovna meteorološka organizacija (WMO) in Program Združenih narodov za okolje (UNEP) sta leta 1988 ustanovila Medvladni panel o podnebnih spremembah (IPCC), ki redno objavlja poročila o znanstvenih ocenah na področju podnebnih sprememb, njihovih vplivov, prihodnjih tveganj ter predlaga možnosti prilagoditev oziroma blaženja posledic. Ugotovitve podajajo v obliki dejstev, z določeno stopnjo zaupanja. IPCC poročila predstavljajo osnovo razvoja podnebnih politik in mednarodnih pogajanj o podnebnih spremembah (IPCC, 2023). Teoretične osnove magistrskega dela v povezavi s podnebnimi spremembami zato temeljijo na podatkih zadnjih dveh objavljenih poročil (peto in šesto), ki sta izšli leta 2014 in 2023.

Podnebne spremembe, ki so posledica človekovih dejavnosti, imajo številne katastrofalne posledice na naravo, družbo in gospodarstvo (European Commission, 2020). Strokovnjaki ugotavljajo, da so naravni vzroki k segrevanju ozračja od leta 1850 prispevali manj kot $0,1^{\circ}\text{C}$, uporaba fosilnih goriv, krčenje gozdov in intenzivno kmetijstvo pa povzročajo vse večje emisije toplogrednih plinov (IPCC, 2023). Tako se v Zemljinem ozračju povečuje učinek tople grede, s tem pa se pospešuje tudi globalno segrevanje (European Commission, 2020). Posledice se kažejo v obliki dviga morske gladine, taljenja večnega ledu, sprememb padavinskih vzorcev, vročinskih valov, ekstremnih vremenskih dogodkov in širjenja bolezni (European Commission, 2023). Svetovni voditelji si v sklopu Pariškega sporazuma do leta 2050 prizadevajo omejiti dvig temperature pod 2°C . Čeprav strokovnjaki dvomijo v uspešen doseg tega cilja (Bertalanich et al., 2018), je pomembno ozaveščanje in izobraževanje svetovnega prebivalstva ter celovit pristop k prilagajanju in blaženju teh sprememb (European Commission, 2023).

Dandanes socialno-ekonomski razvoj sveta močno vpliva na količino emisij toplogrednih plinov in s tem na potek podnebnih sprememb. Strokovnjaki različnih disciplin zato definirajo enotne scenarije

poteka le-teh, ki upoštevajo vpliv številnih spremenljivk. Van Vuuren s sodelavci (2011) v svoji raziskavi poudarja pomembnost uporabe enotnih sklopov scenarijev, saj le tako lahko dosežemo primerljivost podatkov med različnimi študijami (van Vuuren et al., 2011). Strokovnjaki so v petem poročilu IPCC (IPCC, 2014) definirali štiri RCP scenarije, ki opisujejo različne poteke emisij toplogrednih plinov in atmosferskih koncentracij v 21. stoletju, emisije onesnaževalcev in raba tal. Med seboj se razlikujejo glede na skupno vrednost sevalnega prispevka do leta 2100 ali po njem, v primerjavi z letom 1750 – od zmerno optimističnega (RCP 2,6) do pesimističnega scenarija visokih emisij (RCP 8,5) (ARSO, 2010). Bertalanič s sodelavci (2018) v svojem delu poudarja, da natančnih napovedi ni možno podajati, saj na podnebje vplivajo številni kompleksni parametri, hkrati pa ugotavljajo, da lahko na podlagi preteklih meritev, scenarijev in kompleksnih modelov izvedemo učinkovite simulacije, ki podajajo pričakovane vrednosti z določeno stopnjo uresničitve (Bertalanič et al., 2018).

Z razvojem hidroloških modelov smo razumevanje procesov, ki se dogajajo v naravi, poskusili spraviti v matematične enačbe (Singh, 2018). Prvi enostavni hidrološki modeli so se sicer pojavili že v 19. stoletju za namene odvodnjavanja padavinske in fekalne vode. Glavni procesi, ki se odvijajo v naravi oz. vodnem krogu, so: izhlapevanje oz. evaporacija, kondenzacija, padavine, infiltracija, transpiracija, površinski vodni tokovi, podpovršinski vodni tokovi, podzemni vodni tokovi ... Hidrološki modeli predstavljajo posamezne elemente vodnega kroga ter povezave med posameznimi elementi. Odkrili so, da univerzalnega hidrološkega modela ni, temveč je za posamezno specifično situacijo potrebno prilagoditi posamezne dele ter povezave znotraj hidrološkega modela (Singh, 2018). Leta 1983 je Claude Michael s sodelavci začel razvijati enovit konceptualni model (INRAE, 2019), ki je imel 9 parametrov. Pri razvoju konceptualnih modelov so stremeli k enostavnosti; postavitve modela s čim manj parametri, ki hkrati zagotavlja visoko stopnjo učinkovitosti. Z nadaljnjim razvojem je Perrin s sodelavci (2003) vpeljal nov model s štirimi parametri (GR4J), ki temelji na dnevni podatkih (Perrin et al., 2003).

GR6J je enovit konceptualni model, ki smo ga uporabili v praktičnem delu te magistrske naloge. Model so razvili Pushpalatha s sodelavci v letu 2011. Gre za nadgradnjo predhodnih modelov GR. Model GR6J je model, sestavljen iz šestih parametrov in temelji na dnevni vrednostih podatkov. Pri izračunih tovrstnega modela kot vhodni podatek potrebujemo podatke o padavinah v milimetrih, temperaturo v °C in pretok vodotoka na obravnavanem območju v milimetrih (Pushpalatha et al., 2011).

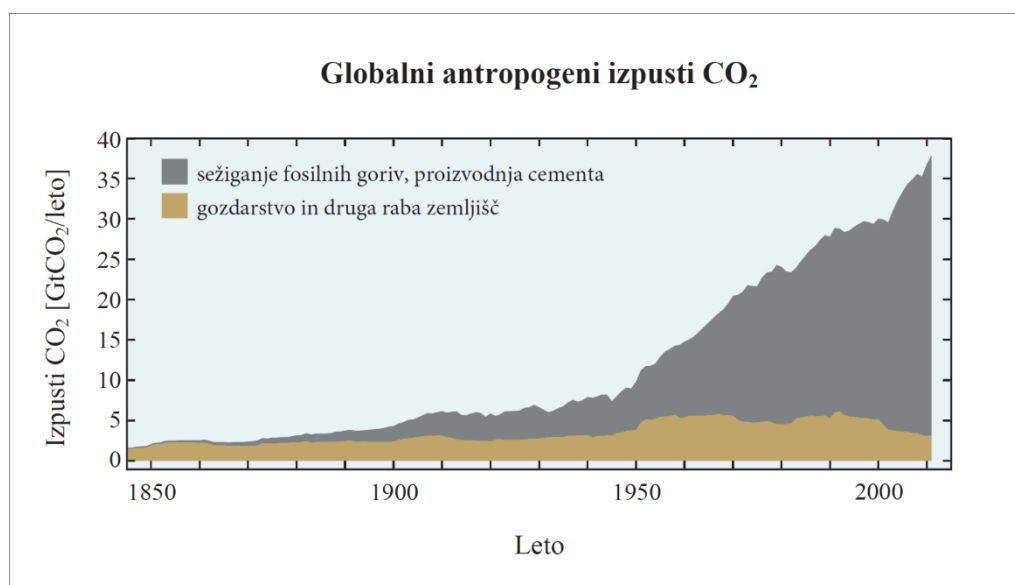
S snežnim modulom Cema Neige pri izračunu upoštevamo tudi snežne padavine, ki vplivajo na površinski odtok na posameznem porečju. Pri izračunu je potrebno uporabiti podatke o temperaturi zraka ter podatke o padavinah (Valéry et al., 2014b). Modul je bil pred vpeljavo testiran na 380 porečjih v Franciji, Švici, Švedski in Kanadi. Rezultati testiranja so pokazali, da so končni rezultati z uporabo navedenega modula optimalni.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA IN METODE

2.1 Podnebne spremembe

2.1.1 Vzroki

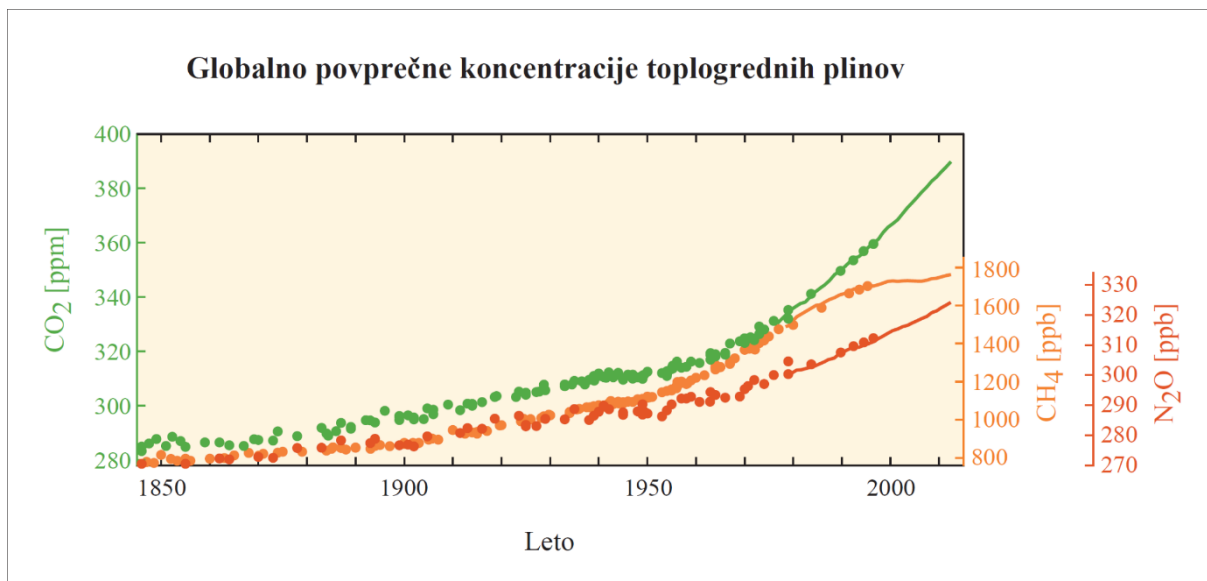
Vpliv človekovih dejavnosti na podnebje se vse bolj kaže v katastrofalnih posledicah, ki povzročajo spremembe v našem življenju in ekosistemu (European Commision, 2020). Strokovnjaki ocenjujejo, da so med letoma 1850 in 2019 naravni vzroki (npr. spremembe sončnega sevanja, vulkanska dejavnost ...) k temu prispevali manj kot $0,1^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2023). Z uporabo fosilnih goriv za pridobivanje energije, krčenjem deževnih gozdov, intenzivnim kmetijstvom in živinorejo ter proizvodnjo kemikalij pa se v ozračje sproščajo vse večje količine toplogrednih plinov (European Commision, 2020). V naravi so nekateri toplogredni plini že prisotni, ogljikov dioksid pa je največkrat antropogenega nastanka (slika 1) (IPCC, 2014).



Slika 1: Prikaz izvora antropogenih izpustov CO₂ [vir podatkov: IPCC, 2014].

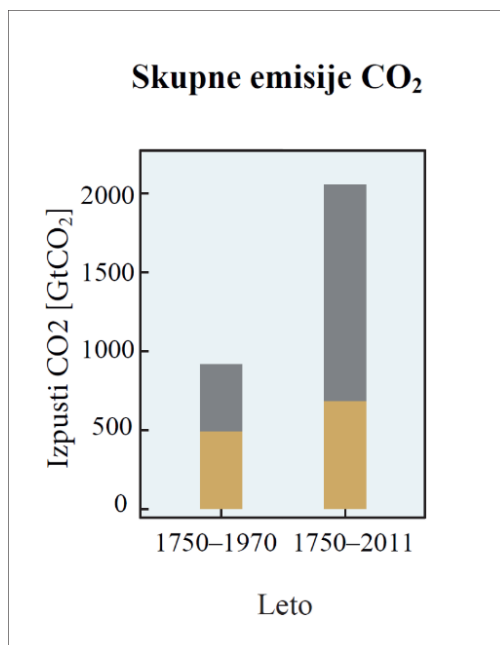
Ta dodatna količina plinov povečuje t. i. učinek tople grede, ki naj bi bil glavni dejavnik podnebnih sprememb. Nekateri plini zadržujejo sončno toploto znotraj naše atmosfere, ji onemogočajo, da bi prešla v vesolje, s tem pa se temperatura Zemljinega ozračja pospešeno zvišuje. Govorimo o globalnem segrevanju (European Commision, 2020).

Antropogeni izpusti toplogrednih plinov (TGP) so od časa industrializacije do sedaj v atmosferi povzročili veliko povečanje koncentracij ogljikovega dioksida (CO₂), metana (CH₄) in dušikovega oksida (N₂O) (slika 2). Med letoma 1750 in 2011 so skupne antropogene emisije CO₂ v ozračje znašale $2040 \pm 310 \text{ GtCO}_2$ in s tem tudi največ prispevale h globalnemu segrevanju. Nekaj manj kot polovica izpustov je ostala v atmosferi, preostanek pa je shranjen v rastlinah, tleh in oceanu. Slednji je absorbiral približno 30% izpuščenega CO₂, kar povzroča zakisanje (IPCC, 2014).



Slika 2: Povprečne vrednosti koncentracij toplogrednih plinov med letoma 1850 in 2011 [vir podatkov: IPCC, 2014].

Slika 3 nam kaže, da je približno polovica antropogenih izpustov CO₂ med letoma 1750 in 2011 nastala v zadnjih 40 letih (IPCC, 2014). Do leta 2020 se je njegova koncentracija v atmosferi povešala na 48% predindustrijske vrednosti (European Commision, 2020).



Slika 3: Vrednosti antropogenih izpustov CO₂ in njihov izvor med letoma 1750 in 2011 [vir podatkov: IPCC, 2014].

2.1.2 Vplivi

Meritve med letoma 2011 in 2020 so pokazale, da je bilo to najtoplejše desetletje, saj so povprečne temperature zraka ponekod presegle predindustrijske vrednosti za $1,1^{\circ}\text{C}$ (European Commission, 2020). Segrevanje ozračja se očitno kaže na različnih področjih, hitrost opazovanih sprememb zadnjih nekaj desetletij pa je glede na pretekla tisočletja, neprimerljiva (IPCC, 2023).

Človeške dejavnosti trenutno povzročajo povprečni desetletni dvig temperature za $0,2^{\circ}\text{C}$. V primeru, da se temperatura glede na leto 1750 (pred industrijsko revolucijo) dvigne za 2°C , bi to povzročilo nevarne in morebiti katastrofalne spremembe v našem okolju ter s tem pustilo ogrožajoče posledice na našem zdravju in družbi nasploh (European Commission, 2020).

Cilj Pariškega sporazuma je omejitev limita segrevanja ozračja pod 2°C do leta 2050, strokovnjaki pa ocenjujejo, da nam kljub različnim pristopom in podnebnim politikam to skoraj zagotovo ne bo uspelo (Bertalanich et al., 2018).

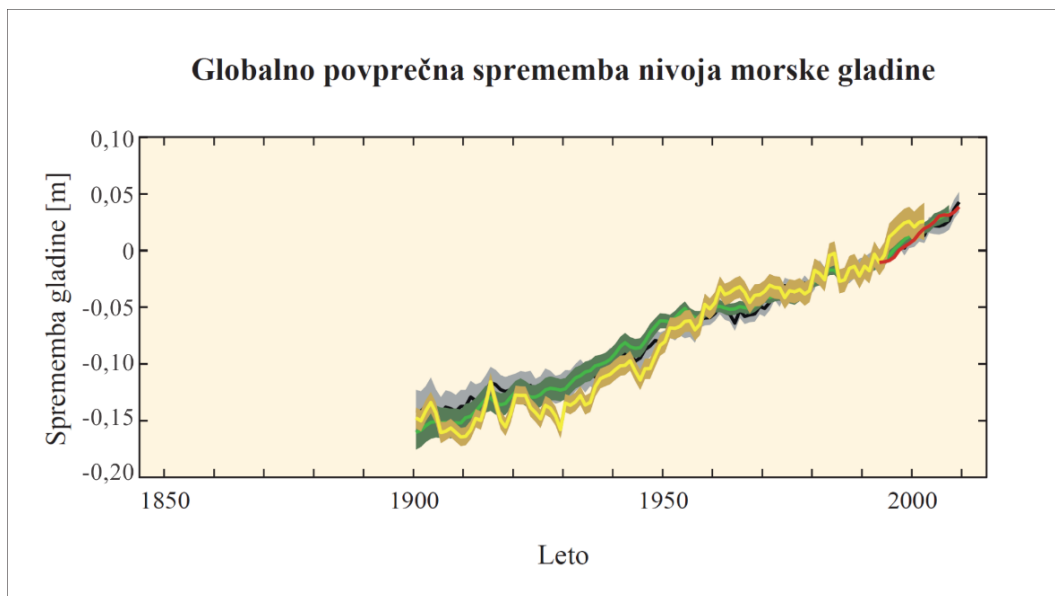
Poleg ozračja se segreva tudi ocean, talita se sneg in led, s tem pa se je dvignila gladina morja (IPCC, 2014).

Segrevanje oceanov zajema največje povečanje energije, shranjene v podnebnem sistemu (več kot 90% shranjene energije med letoma 1971 in 2010). Le odstotek te energije je shranjene v atmosferi. Sprememba temperature je najvišja blizu površja oziroma v zgornjih 75 metrih in v povprečju znaša $0,11^{\circ}\text{C}$ na desetletje med letoma 1971 in 2010 (IPCC, 2014).

Kot že omenjeno, izpusti CO_2 povzročajo zakisanje oceanov – kislost se je od začetka industrijske dobe povečala za 26% (glede na koncentracijo vodikovih ionov), pH vrednost pa se je znižala za 0,1 (IPCC, 2014).

Grenlandske in antarktične ledene plošče izgubljajo svojo maso. Od 80. let prejšnjega stoletja se količina ledu zmanjšuje v območju 3,5 do 4,1% na desetletje. Zmanjšuje se tudi obseg snežne odeje na severni polobli, ob tem pa se zvišuje temperatura permafrosta na teh področjih (IPCC, 2014).

Od začetka 20. stoletja se je zato povprečna gladina svetovnega morja dvignila za približno 0,2 m (slika 4). Strokovnjaki z visoko stopnjo zaupanja predvidevajo, da je stopnja dvigovanja gladine morja od sredine 19. stoletja večja od povprečne stopnje v prejšnjih dveh tisočletjih (IPCC, 2023).



Slika 4: Globalno povprečna sprememba nivoja morske gladine (barve predstavljajo različne vire podatkov) [vir podatkov: IPCC, 2014].

Slovenija je kljub svoji majhnosti pokrajinsko in podnebno zelo raznolika, zato so ocene o izraženosti in posledicah posameznega vpliva podnebnih sprememb še toliko bolj pomembne. Omenjena raznolikost pa je hkrati tudi razlog, da so podnebne projekcije bolj negotove kot ponekod drugod po Evropi in svetu (Bertalanich et al., 2018).

2.1.3 Posledice

Podnebne spremembe predstavljajo veliko grožnjo različnim aspektom našega življenja.

Naravne

Zaradi globalnega segrevanja se viša povprečna temperatura ozračja, ki povzroča pogoste temperaturne ekstreme, kot so vročinski valovi. Ti najbolj ogrožajo ranljivejše skupine prebivalstva, posledično je vse višja tudi smrtnost. Višje temperature vplivajo tudi na številne živalske in rastlinske vrste, saj prihaja do sprememb v razporeditvi podnebnih pasov. S tem se prilagaja tudi vedenje in življenjski cikel posamezne vrste, kar lahko vodi do vse večjega števila škodljivcev, invazivnih vrst in bolezni (European Commission, 2023).

Z višanjem temperature ozračja se povečuje tudi hitrost izhlapevanja vode iz naravnih vodnih virov in evapotranspiracije (iz tal in rastlin) (ARSO, 2023), vse pogostejše se srečujemo tudi s primanjkljajem padavin. Zato veliko škode povzročijo tudi hude, dolgotrajnejše suše, ki posredno močno vplivajo na kmetijstvo, gozdarstvo in biotsko raznovrstnost, otežujejo tudi nemoteno oskrbo s pitno vodo, zavirajo rast pridelka in vplivajo na pojavnost gozdnih požarov (European Commission, 2023).

Spet na drugih področjih pa se srečujejo z vse večjimi in obsežnejšimi padavinami, ki bodo v prihodnosti povzročale vedno več pluvialnih in fluvialnih poplav. Slednje so vse bolj pogoste v Evropi, kjer močno vplivajo na milijone ljudi, povzročajo smrtne žrtve in ogromne ekonomske izgube (European Commission, 2023).

Poplave bo v prihodnosti povzročal tudi dvig morske gladine, ki pospešeno narašča; do konca stoletja naj bi se gladina v povprečju dvignila za 60 do 80 cm. Taljenje ledu z ledenikov in arktične ledene plosče, bodo verjetno povzročili večji vdor slane vode v sladkovodne vire, kar bo močno vplivalo na biotsko raznovrstnost v obalnih ekosistemih, kmetijstvo in oskrbo ljudi s pitno vodo (European Commission, 2023).

Temperatura vode je zaradi intervala temperaturne tolerance vodnih organizmov eden glavnih parametrov za določanje stanja vodnih sistemov. Prihaja do zakisanja oceanov, sprememb vodnih tokov, cvetenja sladkovodnih jezer, ipd. (European Commission, 2023). Vsi ti procesi močno vplivajo na kakovost vodnih virov in življenja organizmov, ki so odvisni od njih (npr. beljenje koralnih grebenov) (WWF, 2015).

Družbene

Pričakovano je, da se v prihodnosti ne bomo spopadali z novimi grožnjami in nevarnostmi podnebnih sprememb, ki vplivajo na naše zdravje in okolico. Bodo pa posledice občutno izrazitejše ter obsežnejše:

- večja umrljivost in obolevnost zaradi poletne vročine;
- povečano tveganje za nesreče in posledice ekstremnih vremenskih dogodkov (poplave, požari, neurja);
- spremembe vplivov bolezni na človeka, ki imajo različne izvore (vektorske, zoonoze in bolezni, ki se prenašajo preko vode in hrane);
- spremembe v porazdelitvi alergenih vrst glede na območje razširjenosti in sezonsko pojavnost;
- ponovni pojav bolezni in rastlinskih škodljivcev, ki prizadenejo gozdove in pridelke;
- vse večja tveganja za naše zdravje, povezana s slabšanjem kakovosti zraka in razpadanjem ozona;
- splošno staranje prebivalstva povzroča vse večje število ogroženih oziroma ranljivih skupin (European Commission, 2023).

Gospodarske

Posledice višanja temperature, sprememb padavinskih vzorcev in dviga morske gladine bodo neposredno ali posredno vplivale tudi na delovanje različnih gospodarskih sektorjev, kar pa bo vplivalo tudi na trg dela:

- slabše zdravstveno stanje in posledično razpoložljivost delovne sile;

- težave pri zagotavljanju zdravega in varnega delovnega okolja (npr. višje temperature na delovnih mestih na prostem, poškodbe na infrastrukturi);
- onemogočen dostop do delovnega mesta zaradi pogostejših in intenzivnejših naravnih nesreč;
- večje potrebe po migracijah in preseljevanju;
- ranljivost nekaterih sektorskih proizvodenj (npr. kmetijstvo in turizem) (European Commission, 2023).

Priložnosti novih zaposlitev in dejavnosti pa se kot posledica naravnih sprememb kažejo v vse večji naravnosti k trajnostnemu izkoriščanju in upravljanju voda ter drugih naravnih virov in načrtovanju ter izvedbi zelene infrastrukture (European Commission, 2023). Za vnaprejšnje določanje morebitnih pozitivnih učinkov tovrstnih naložb potrebujemo temeljite projekcije oziroma scenarije poteka vplivov podnebnih sprememb (npr. RCP oziroma značilni poteki vsebnosti, SSP oziroma scenariji socialno-ekonomskega razvoja in poteka vplivov posledičnih izpustov toplogrednih plinov, ipd.) (IPCC, 2023). Hkrati pa je za obvladovanje posledic podnebnih sprememb, pomembno izobraževanje in ozaveščanje prebivalstva, s čimer bi se zmanjšali gospodarska ter splošna ranljivost (European Commission, 2023).

2.2 RCP scenariji

Socialno-ekonomski razvoj sveta močno vpliva na količino izpusta toplogrednih plinov in s tem na potek podnebnih sprememb. Zato se na področju podnebnih raziskav znotraj različnih disciplin nenehno pojavljajo nove potrebe po enotnih scenarijih, ki predvidevajo vpliv številnih spremenljivk. Med njimi so socialno-ekonomske in tehnološke spremembe, raba energije in zemljišč, onesnaževanje zraka ter emisije toplogrednih plinov. Scenariji omogočajo kratko- in dolgoročno izvajanje podnebnih modelov in ocenjevanje vplivov sprememb ter možnosti blaženja z njimi povezanih stroškov (van Vuuren et al., 2011).

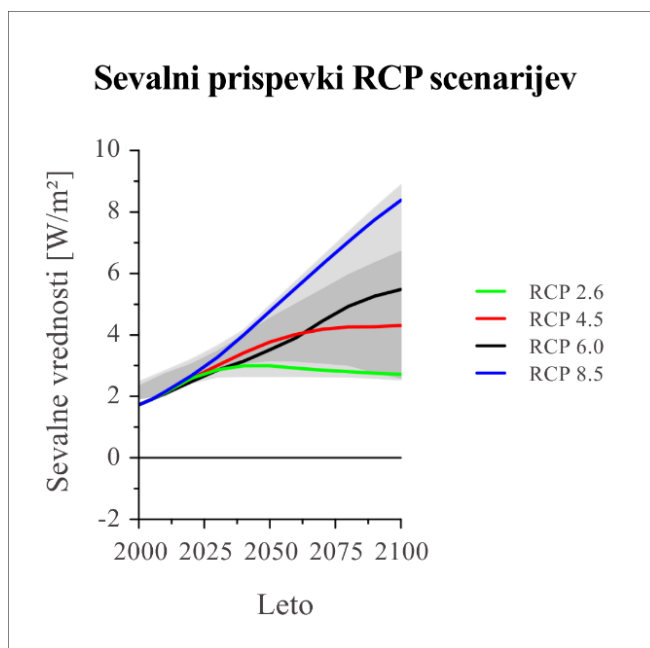
Zaradi primerljivosti podatkov med različnimi študijami in disciplinami je pomembno, da uporabljamo enotne sklope scenarijev (van Vuuren et al., 2011).

V preteklosti so bili v uporabi različni scenariji (npr. IS92, SRES ...) (van Vuuren et al., 2011). V letu 2014 pa je IPCC (Medvladni forum za podnebne spremembe) v sklopu petega letnega poročila (AR5) definiral štiri nove scenarije, ki opisujejo štiri različne scenarije emisij toplogrednih plinov in atmosferskih koncentracij v 21. stoletju, emisije onesnaževalcev zraka in rabo tal (IPCC, 2014). To so RCP scenariji oziroma značilni poteki vsebnosti emisij (ARSO, 2010). Nastali so v sodelovanju strokovnjakov s področja analiziranja emisij, ekosistemov, klimatskih sprememb in snovalcev različnih modelov (IPCC, 2014). Izjemno pomembni so za razvoj na področju podnebnih raziskav in hkrati zagotavljajo zanesljivo osnovo nadaljnjim klimatskim napovedim ter ocenam stroškov, povezanih z zmanjševanjem emisij glede na določeno pot koncentracije (van Vuuren et al., 2011).

Omogočajo visoko ločljivost prostorskega in sektorskega poročanja o rabi zemljišč, emisijah toplogrednih plinov in drugih onesnaževalcev zraka. Z razširitvami RCP scenarijev je možno izvajati projekcije do leta 2300 (van Vuuren et al., 2011). Uporabljajo se lahko tudi v kombinaciji z najnovejšimi SSP scenariji (*ang. Socio-economic Development, Scenarios, and Pathways*) oziroma scenariji socialno-ekonomskega razvoja in poteka vplivov posledičnih izpustov toplogrednih plinov. Ti temeljijo na analizi prebivalstva, tehnološke in gospodarske rasti ter vodijo do zelo različnih projekcij emisij in posledic segrevanja ozračja (IPCC, 2023).

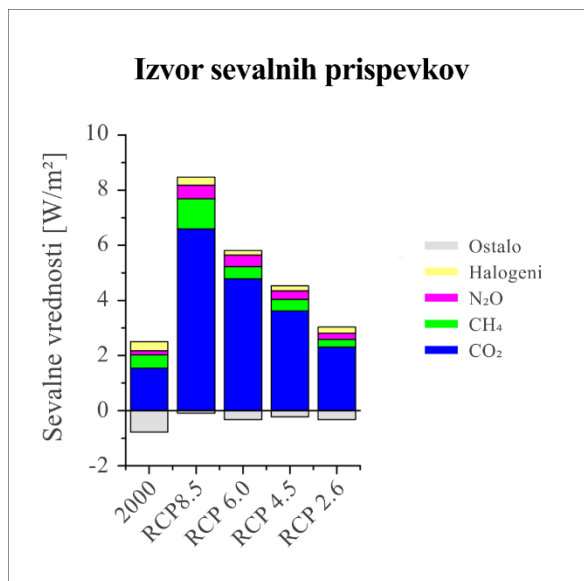
RCP scenariji se med seboj razlikujejo glede na skupno vrednost sevalnega prispevka do leta 2100 ali po njem v primerjavi z letom 1750 (2,6 do 8,5 W/m²):

- **RCP 2,6:** vrh sevanja pri približno 3 W/m², potem se do leta 2100 zmanjša na 2,6 W/m²;
- **RCP 4,5:** stabilizacija sevanja pri 4,5 W/m², brez prekoračitve po letu 2100;
- **RCP 6,0:** stabilizacija sevanja pri 6 W/m², brez prekoračitve po letu 2100;
- **RCP 8,5:** dvig sevanja na 8,5 W/m² do leta 2100 (Canada.ca, 2018).



Slika 5: Prikaz vrednosti sevalnega prispevka [vir podatkov: van Vuuren et al., 2011].

Na sliki 5 so prikazane vrednosti sevalnega prispevka za vsak RCP scenarij (sivo območje prikazuje interval podatkov različnih študij). Za izhodiščno leto je izbrano leto 2000, saj zanj obstaja popoln nabor podatkov o emisijah. Za obdobje do leta 2000 ti podatki niso dovolj dosledni in so bili za namen izdelave RCP scenarijev združeni iz različnih naborov podatkov (med drugim EDGAR in EDGAR-HYDE). Posamezen scenarij je povezan s predvidenimi kombinacijami ocene rasti prebivalstva, gospodarske dejavnosti, energetske intenzivnosti, podnebne politike in socialno-ekonomskega razvoja ter njihovega vpliva na izpuste toplogrednih plinov (slika 6) (Canada.ca, 2018).



Slika 6: Kategorije izvora sevalnega prispevka glede na RCP scenarij [vir podatkov: van Vuuren et al., 2011].

Zmerno optimistični scenarij, ki predvideva določene ublažitve trenutne situacije, je RCP 4,5 (ARSO, 2010). V primeru, da si ne bomo dodatno prizadevali za omejitev emisij, se bodo vrednosti v prihodnosti uvrščale med vrednosti RCP 6,0 in RCP 8,5. Slednji predstavlja scenarij visokih emisij, naš cilj pa je aktivna ublažitev sevanja oziroma scenarij RCP 2,6. Ta predvideva možnost ohranitve globalnega segrevanja pod 2°C nad temperaturami predindustrijskega časa (pred 1750) (IPCC, 2014).

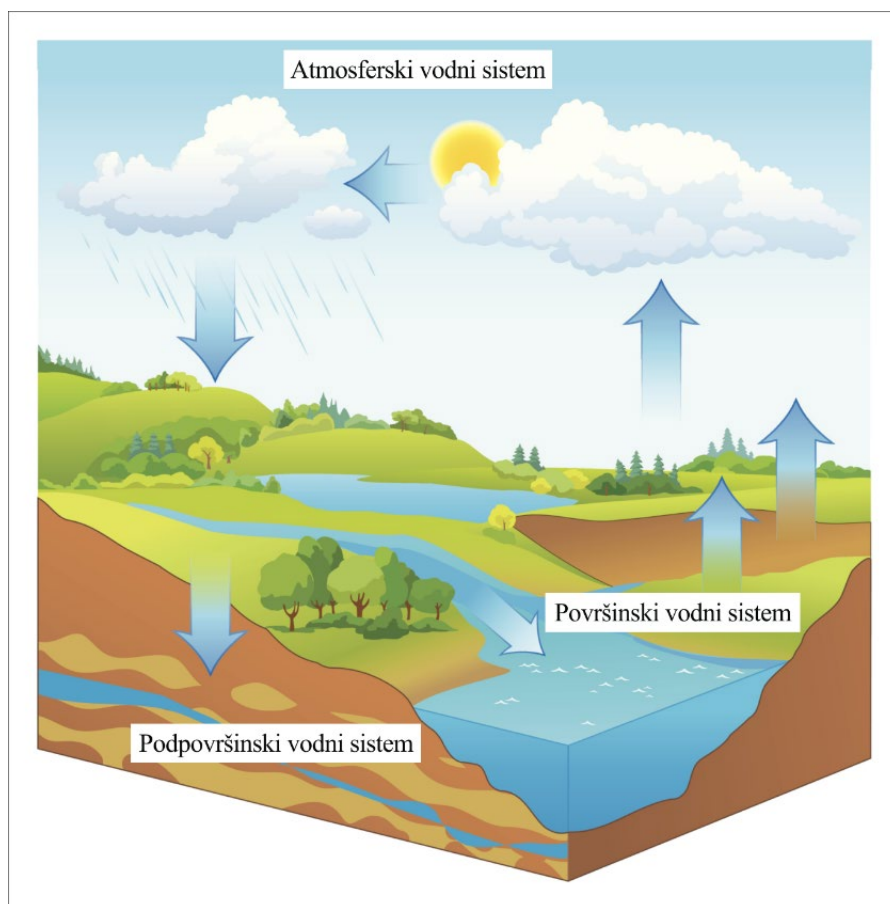
Nadaljnje emisije toplogrednih plinov bodo še naprej povzročale globalno segrevanje in imele dolgotrajne posledice na podnebje. S tem se bo še naprej večalo tveganje za ekstremne vremenske pojave velikih razsežnosti, ki vplivajo tako na ljudi kot tudi na ekosisteme. Da bi te spremembe omejili in predvsem ublažili njihov vpliv, je potrebno usmerjanje v trajno zmanjšanje emisij (IPCC, 2014).

Zaradi kompleksnosti in števila parametrov, ki vplivajo na podnebje, ni mogoče podati natančnih rezultatov. Lahko pa na podlagi preteklih podatkov, scenarijev in kompleksnih modelov izvedemo simulacije, ki podajo pričakovane vrednosti z določeno stopnjo verjetnosti uresničitve (Bertalančič et al., 2018).

2.3 Hidrološki modeli

Hidrološko modeliranje je močno orodje pri razumevanju povezav med različnimi deli vodnega kroga. Z njim lahko napovedujemo hidrološke spremembe tako, da uporabimo različne podnebne scenarije. Vodni krog je naravno kroženje vode, ki se začne z izhlapevanjem, nadaljuje s kondenziranjem, padavinami, z infiltracijo vode v tla, s površinskim, podpovršinskim in podzemnim odtokom, (evapo)transpiracijo. Vodni krog (slika 7) lahko dodatno delimo na tri podsisteme: atmosferski vodni sistem (padavine, evaporacija, prestrežanje padavin, transpiracija), površinski vodni sistem (površinski

odtok, vodotoki, oceani) in podpovršinski vodni sistem (infiltracija, podzemni tok, podpovršinski tok) (Singh, 2018).

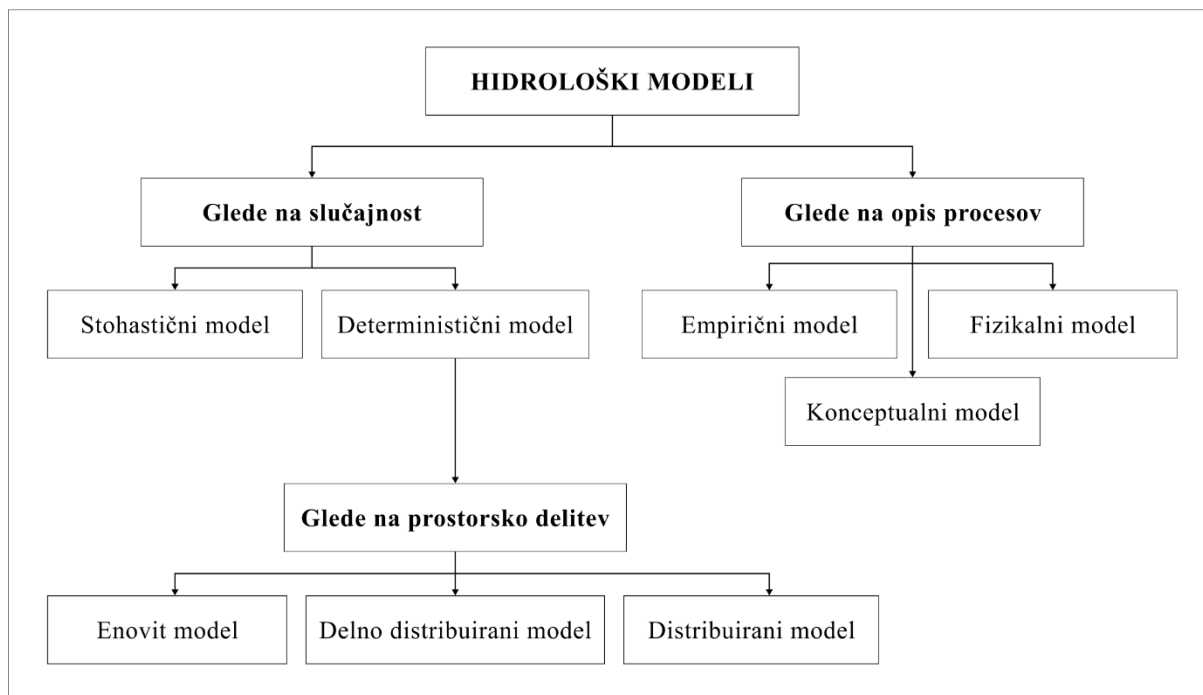


Slika 7: Vodni krog (povzeto po: European Commission, 2015).

Hidrološki model simulira eno ali več komponent hidrološkega kroga in je hkrati približek realnega sistema naravnega procesa. Komponente naravnega procesa so pretoki, sedimenti, kemikalije, hranila, mikroorganizmi in npr. ovrednotenje človeškega vpliva na te procese (Singh, 2018). Zaradi kompleksnosti napovedovanja okoljskih procesov ne obstaja enoten univerzalni hidrološki model, temveč ga je potrebno prilagajati. V preteklosti so hidrološki modeli preveč bazirali na matematičnih osnovah in niso vključevali izkustvenega znanja (Ogden, 2021). V zadnjem času je bilo razvitih veliko število hidroloških modelov, ki vrednotijo vplive različnih hidroloških procesov in z njimi povezanimi pojavi. Vsi modeli se v večini uporabljajo za napovedovanje obnašanja sistema in razumevanje različnih hidroloških procesov. Najboljši model je tisti, ki poda najbolj podobne rezultate izmerjenim vrednostim, s čim manj uporabljenimi parametri in s tem nizko stopnjo kompleksnosti modela (Singh, 2018).

2.3.1 Klasifikacija hidroloških modelov

Obstaja veliko klasifikacij hidroloških modelov. Največkrat se delijo na dva glavna razreda: fizični modeli in matematični modeli (slika 8).



Slika 8: Klasifikacija hidroloških modelov (povzeto po: Singh, 2018).

Fizične modele nadalje delimo na pomanjšane modele (scale model) in analogne modele. Pri analognih modelih gre za poustvaritev hidroloških pogojev kot v prvotnem problemu. Modeliranje površinskega odtoka definira matematični model kot reprezentativni model, preko katerega se omogoča simulacija sistema kopice matematičnih in logičnih izrazov. Matematične modele delimo na deterministične in stohastične modele ter empirične in konceptualne modele (Brilly in Šraj, 2018). V kategoriji determinističnih modelov prevladujejo konceptualni modeli, ki procese znotraj modela opisujejo z matematičnimi operacijami in enačbami. Stohastični modeli so uporabljeni pri znanstvenih raziskavah. Zaradi naključnega značaja spremenljivk so povezave med njimi opisane z verjetnostnimi zakoni. Kombinacija stohastičnega in determinističnega modela poda najboljše rezultate (Jajarmizadeh et al., 2012). Pomembne lastnosti hidroloških modelov so: natančnost, enostavnost, konsistentnost in občutljivost. Hidrološki model je približek naravnemu sistemu. Njegovi vhodni in izhodni podatki so merljive spremenljivke, struktura samega modela pa so povezave med enačbami in vhodnimi ter izhodnimi podatki (Singh, 2018).

Empirični modeli so poustvaritev realnih pogojev v sistemu z matematično razlago in uporabo eksperimentalnih podatkov brez neposredne povezave s fizikalnimi zakoni. Tovrstni modeli so razviti na podlagi enostavnejših serij podatkov. Mnogi empirični hidrološki modeli so izjemno pomembni pri načrtovanju protipoplavnih ukrepov za področja, kjer nimamo podatkov oz. so podatki z vodomernih postaj zelo omejeni (Jajarmizadeh et al., 2012). Večinoma so tovrstni modeli uporabni samo za specifično obravnavno območje (Singh, 2018).

Konceptualni model

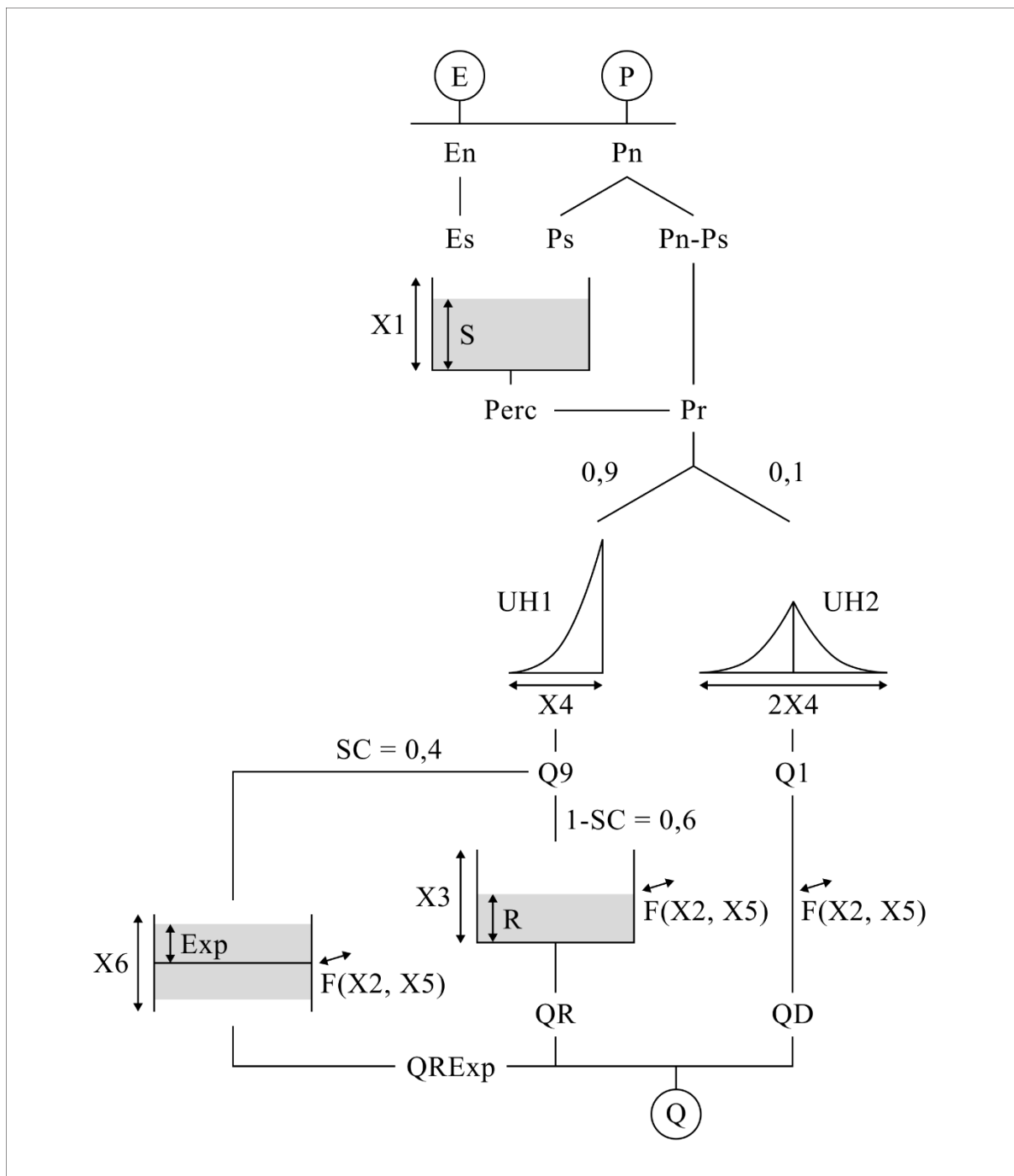
Modeli so konceptualni v kolikor matematični in logični izrazi temeljijo na podlagi naravnih zakonitosti, kar pomeni, da se spremembe znotraj modela odražajo v spremembah izhodnih rezultatov modela, kot na primer obsežnejše padavine povzročijo večji površinski odtok ob ostalih nespremenjenih parametrih (infiltracija, evapotranspiracija, itd). Na podlagi modela tako ugotavljamo vpliv spremembe parametra na rezultat (Brilly in Šraj, 2018). Konceptualni model je sestavljen iz številnih med seboj povezanih rezervoarjev, ki predstavljajo fizične elemente porečja, ki se polnijo ob padavinah, infiltraciji ter perkolaciji in se praznijo ob evaporaciji, odtoku, dreniranju itd. Pri izračunu se uporabljajo delno empirične enačbe. Parametri modela se ne določajo samo z izmerjenimi podatki, temveč tudi s kalibracijo modela. Za kalibracijo modela potrebujemo večje število podatkov. Razvitih je mnogo modelov z različno stopnjo kompleksnosti. Stanford Watershed Model IV (SWM) je bil prvi večji konceptualni model, ki je bil razvit v letu 1966 in je sestavljen iz 16 do 20 parametrov (Singh, 2018). Jasno je, da so ustrezni parametri pri konceptualnih modelih izjemnega pomena. Stopnja natančnosti modelov je močno odvisna od posameznega parametra. (Jajarmizadeh et al., 2012).

Modeli GR

Razvoj enovitih konceptualnih modelov se je začel v 80. letih prejšnjega stoletja, ko je Claude Michael razvil model padavinskega odtoka CREC, ki je obsegal 9 parametrov. Z dodatnimi poenostavitvami, tj. manjšanje števila parametrov brez zmanjševanja učinkovitosti delovanja modela pa je bil razvit model GR2 z dvema parametroma, vsak za svoj rezervoar, osnovan na dnevni vrednosti. Pri nadaljnjih nadgradnjah modela so upoštevali tudi izmenjavo podzemne vode, ki je upoštevana v modelu GR4. Perrin je v letu 2000 predstavil nadgrajeni model GR4J, ki omogoča tudi simulacije pri nizkih pretokih. Model vsebuje štiri parametre in upošteva vpliv perkolacije. Leta 2011 je Pushpalatha pripravila nov 6-parametrski model z dvema rezervoarjema, ki omogoča naprednejše in natančnejše simulacije nizkih pretokov. V zadnjem času so sistemi GR4J, GR5J in GR6J nadgrajeni s snežnim modulom Cema Neige, ki upošteva tudi snežne padavine. Tovrstne modele ponekod uporabljajo tudi za napovedovanje poplav (INRAE, 2019).

2.3.2 Model GR6J

Model GR6J je 6-parametrski enovit konceptualni model padavinskega odtoka (Pushpalatha et al., 2011), ki je posledica nadgradnje modelov GR4J in GR5J. Časovni korak modela znaša en dan (Perrin et al., 2003). Pri izračunih potrebujemo podatke o padavinah (P), evapotranspiraciji (E), za umerjanje modela pa potrebujemo tudi podatke o dnevnem pretoku (Q) (Sezen et al., 2018) (slika 9).



Slika 9: Shematični prikaz modela GR6J (povzeto po: Sezen in Partal, 2022).

Vsi vhodni ter izhodni podatki so podani v milimetrih [mm]. Po potrebi se rezultate poda tudi glede na površino oz. časovni korak kot npr. mm/dan. V nadaljevanju opisan postopek izračuna parametrov hidrološkega modela GR6J (preglednica 1) je povzet po delu Perrina in sodelavcev (Perrin et al., 2003).

Za določitev neto padavin (P_n) oz. neto potencialne evapotranspiracije (E_n) v modelu GR izvedemo naslednji postopek:

Če je $P \geq E$, potem velja $P_n = P - E$ in $E_n = 0$. (1)

Drugače je $P_n = 0$ in $E_n = E - P$. (2)

V primeru, da so padavine (P) večje ali enake evapotranspiraciji (E), potem velja enačba (1), kjer se neto padavine izračunajo kot razlika celotnih padavin in evapotranspiracije. V tem primeru je neto evapotranspiracija enaka 0.

V kolikor so neto padavine enake 0 in je hkrati evapotranspiracija večja od padavin, velja, da je neto evapotranspiracija enaka razliki evapotranspiracije in padavin (enačba (2)).

V modelu GR6J parameter $X1$ upoštevamo v enačbi (3):

$$P_s = \frac{X1 \left(1 - \left(\frac{S}{X1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{X1} \right)}{1 + \frac{S}{X1} \tanh \left(\frac{P_n}{X1} \right)} \quad (3)$$

V kolikor so neto padavine večje od nič, se preko spremenljivke P_s rezervoar za skladiščenje vode polni. Spremenljivka P_s je določena preko zgornje enačbe, kjer je $X1$ [mm] enak maksimalni kapaciteti rezervoarja za skladiščenje vode. Spremenljivka S predstavlja nivo vode v rezervoarju.

V primeru, ko neto evapotranspiracija ni enaka nič, je na podlagi nivoja vode v rezervoarju določena stopnja evaporacije. Spremenljivka E_s je količina vode, ki bo izhlapela iz rezervoarja (enačba (4)).

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X1} \right)} \quad (4)$$

Vsebnost vode S v rezervoarju za skladiščenje vode se izračuna z enačbo (5):

$$S = S - E_s + P_s \quad (5)$$

Jasno je, da vsebnost vode ne more nikoli preseči vrednosti $X1$ (slika 9).

Perkolacija oz. precejjanje se izračuna z enačbo (6):

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} \frac{S}{X1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (6)$$

Vrednost spremenljivke $Perc$ je vedno nižja od vsebnosti vode S v rezervoarju (enačba (7)).

$$S = S - Perc \quad (7)$$

Sama perkolacija na pretok nima velikega vpliva, je pa lahko pomembna pri simulaciji nizkih pretokov.

Spremenljivka Pr (enačba (8)) predstavlja vso količino vode, ki se zbere od perkolacije ter razlike med neto padavinami in vodo, ki se zbere v rezervoarju.

$$Pr = Perc + (Pn - Ps) \quad (8)$$

Spremenljivka Pr se deli na dve komponenti pretoka; 90% se usmeri na enotni hidrogram $UH1$, preostalih 10% pa se preusmeri na enotni hidrogram $UH2$. Z enotnima hidrogramoma simuliramo čas zakasnitve med padavinskim dogodkom in največjo vrednostjo pretoka. Oba hidrograma sta odvisna od istega parametra $X4$, ki je izražen v dnevih. $UH2$ se izraža kot $2X4$. Parameter $X4$ lahko zavzame vrednost iz intervala realnih števil, vendar morajo biti ta višja od 0,5. Brilly in Šraj definirata hidrogram enote kot površinski odtok, ki ga povzroči ena enota efektivnih padavin 10 mm, pri čemer je potrebno upoštevati tudi ostale lastnosti porečja, kot so: oblika porečja, padec porečja, poraščenost, trajanje efektivnih padavin, lastnosti tal (Brilly in Šraj, 2018).

Hidrograma enote $UH1$ in $UH2$ imata v svoji diskretni obliki ordinati n in m , kjer sta posamezni ordinati naslednje celo število $X4$ in $2X4$. To pomeni, da se odtok prerazporedi in je vrednost ordinate n vhodni podatek za $UH1$ in m vhodni podatek za $UH2$. Ordinati obeh hidrogramov enote sta izpeljani iz ustrezne S-krivulje in sta označeni kot $SH1(t)$ in $SH2(t)$. $SH1(t)$ je na podlagi časa definirana z enačbo (9):

$$\begin{aligned} &\text{Če je } t = 0, \text{ potem velja } SH1(t) = 0. \\ &\text{Če je } 0 < t < X4, \text{ potem velja } SH1(t) = \left(\frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}. \\ &\text{Če je } t \geq X4, \text{ potem velja } SH1(t) = 1. \end{aligned} \quad (9)$$

Podobno je definirana tudi $SH2(t)$ (enačba (10)):

$$\begin{aligned} &\text{Če je } t = 0, \text{ potem velja } SH2(t) = 0. \\ &\text{Če je } 0 < t < X4, \text{ potem velja } SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}. \\ &\text{Če je } X4 < t < 2X4, \text{ potem velja } SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}. \\ &\text{Če je } t \geq 2X4, \text{ potem velja } SH2(t) = 1. \end{aligned} \quad (10)$$

Ordinati $UH1(t)$ in $UH2(t)$ se izračunata z enačbo (11):

$$\begin{aligned} UH1(t) &= SH1(t) - SH1(t - 1) \\ UH2(t) &= SH2(t) - SH2(t - 1) \end{aligned} \quad (11)$$

Posledično se $UH1(t)$ oz. $Q9$ in $UH2(t)$ oz. $Q1$ izračunata na sledeč način (enačba (12)):

$$\begin{aligned} Q9(t) &= 0,9 \cdot \sum_{k=1}^l UH1(k) \cdot Pr(t - k + 1) \\ Q1(t) &= 0,1 \cdot \sum_{k=1}^m UH2(k) \cdot Pr(t - k + 1) \end{aligned} \quad (12)$$

Kjer sta $l = \text{int}(X4) + 1$ in $m = \text{int}(2X4) + 1$.

Izmenjavo podzemne vode znotraj porečja predstavlja spremenljivka F . Spremenljivka R predstavlja nivo in parameter $X3$ predstavlja kapaciteto rezervoarja. Parameter $X2$ predstavlja koeficient izmenjave vode. V kolikor je $X2$ pozitivna vrednost, voda prehaja v rezervoar (*ang. routing store*). V kolikor je $X2$ negativna vrednost, voda vstopa v rezervoar in če je vrednost 0, prehajanja vode ni. Čim višji je nivo vode v rezervoarju, tem večje je prehajanje vode (Perrin et al., 2003).

Z nadaljnjim proučevanjem in razvojem temeljnega modela GR je bila nadgrajena tudi enačba, ki predstavlja izmenjavo podzemne vode znotraj porečja (Pushpalatha et al., 2011).

Pretok $Q9$ je naknadno razdeljen na 60%, ki polni rezervoar $X3$, in 40%, ki polni rezervoar $X6$ (Sezen in Partal, 2022).

$$F = X2 \cdot \left(\frac{R}{X3} - X5 \right) \quad (13)$$

V enačbi (13) parameter $X5$ predstavlja brezdimenzijski prag, ki omogoča spremembo smeri izmenjave podzemne vode tekom leta na podlagi nivoja vode R v rezervoarju. Na podlagi te dodelave se model bolje odzove pri simuliranju nizkih pretokov (Pushpalatha et al., 2011). Vrednost spremenljivke F je lahko pozitivna, enaka nič oz. negativna. Ker vrednost R ne more biti negativna, je funkcija F ($AF1$) omejena na sledeč način (enačba (14)):

$$AF1 = \begin{cases} F, & \text{če je } R + 0,6 \cdot Q9 + F \geq 0, \\ \text{drugače,} & -R - 0,6 \cdot Q9 \end{cases} \quad (14)$$

Posledično lahko vrednost spremenljivke R pri rezervoarju $X3$ izračunamo z enačbo (15):

$$R = R + 0,6 \cdot Q9 + AF1 \quad (15)$$

Iztok QR iz rezervoarja $X3$ lahko izračunamo z enačbo (16):

$$QR = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (16)$$

Končna vrednost nivoja vode v rezervoarju R je izračunana po enačbi (17):

$$R = R - QR \quad (17)$$

Eksponentni rezervoar Exp (ang. *exponential store*) je »rezervoar brez dna«, tako da je lahko količina vode v rezervoarju tudi negativna. Vrednost spremenljivke Exp lahko izračunamo po enačbi (18):

$$Exp = Exp - 0,4 \cdot Q9 + F \quad (18)$$

Iztok ($QRexp$) iz rezervoarja Exp izračunamo z enačbo (19):

$$QRexp = X6 \cdot \log \left(1 + Exp \left(\frac{Exp}{X6} \right) \right) \quad (19)$$

$X6$ predstavlja koeficient zmanjševanja v eksponentnem rezervoarju. Kapaciteta eksponentnega rezervoarja se tako izračuna po enačbi (20):

$$Exp = Exp - QRexp \quad (20)$$

Pretok po drugi veji, ki ga napaja $Q1$, lahko zapišemo kot funkcijo F ($AF2$) (enačba (21)):

$$AF2 = \begin{cases} F, & \text{če je } Q1 + F \geq 0, \\ \text{drugače, } -Q1 \end{cases} \quad (21)$$

Z ozirom na zgornjo enačbo lahko izračunamo QD na podlagi enačbe (22):

$$QD = Q1 - AF2 \quad (22)$$

Končni simulirani pretok dobimo kot vsoto vseh delnih pretokov QR , $QRexp$ in QD (enačba (23)):

$$Qsim = QR + QRexp + QD \quad (23)$$

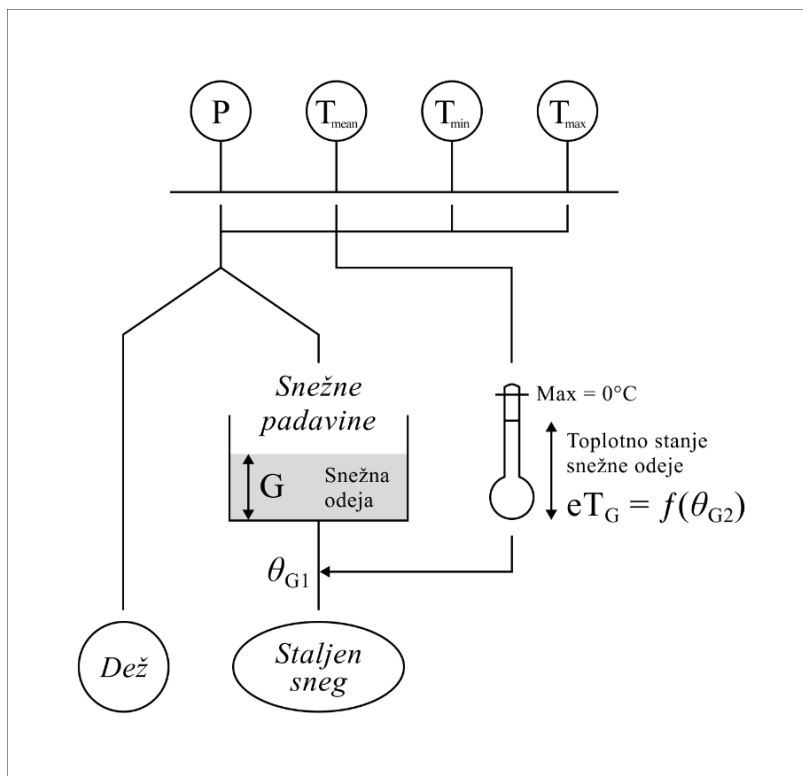
Preglednica 1: Parametri GR6J Cema Neige.

Parameter	Enota	Opis parametra
X1	[mm]	Kapaciteta konceptualnega rezervoarja za skladiščenje vode
X2	[mm/dan]	Koeficient izmenjave vode
X3	[mm]	Kapaciteta konceptualnega rezervoarja za propagacijo vode
X4	[dan]	Časovna konstanta hidrograma enote
X5	[-]	Brezdimenzijski prag izmenjave vode
X6	[mm]	Koeficient zmanjševanja v eksponentnem rezervoarju
X1 Cema Neige	[-]	Brezdimenzijski uteženi koeficient toplotnega stanja snežne odeje
X2 Cema Neige	[mm/°C/dan]	Faktor taljenja snega

2.3.3 Snežni modul Cema Neige

Da bi lahko natančneje podali vrednost rečnega odтока v porečjih, pri katerih na odtok vplivajo tudi snežne padavine, je bil v sklopu enovitega modela padavinskega odтока GR razvit dodatek Cema Neige (Riboust et al., 2019).

Valéry in sodelavci (Valéry et al., 2014a) in (Valéry et al., 2014b) v svoji študiji navajajo, da gre za temperaturno-dnevni model, kar pomeni, da pri izračunu uporablja temperaturo na določen dan v letu. Model omogoča natančnejše izračune rečnega odтока s porečij, ki se nahajajo v nekoliko hribovitejših predelih. Pri razvoju modela je bil cilj, da se za kalibracijo uporabi kar najmanjše možno število parametrov. Tako za ustrezen izračun potrebujemo kalibrirati samo dva parametra, vhodna podatka pa sta temperatura zraka (srednja dnevna vrednost ali min. oz. max. dnevna vrednost) ter padavine (slika 10). Snežni modul Cema Neige je bil testiran na 380 porečjih v štirih državah (Francija, Švica, Švedska in Kanada) z različnim vplivom snežnih padavin na padavinski odtok. Troin s sodelavci (Troin et al., 2015) (Troin et al., 2016) navaja, da je bil modul na področju Quebeca učinkovit in je pokazal dobre rezultate. V klimatskih pogojih kot so npr. v Nepal, kjer so območja ledenikov, je modul pokazal svoje omejitve (Riboust et al., 2019).



Slika 10: Shematični prikaz snežnega modula Cema Neige (povzeto po: Valéry et al., 2014b).

Količina snega, ki se stali v snežnem modulu Cema Neige, se obravnava kot padavine v sklopu modela GR6J. Da upoštevamo vpliv reliefa na padavine, je v snežnem modulu predvidena enakomerna površinska delitev obravnavanega porečja na pet višinskih pasov. Temperatura in padavine so v vsakem višinskem pasu ekstrapolirane (Valéry et al., 2014a). Vsaka višinska cona ima svoj rezervoar, ki predstavlja snežno odejo. Samo delež padavin v trdnem agregatnem stanju je upoštevan pri izračunu modela v modulu Cema Neige. Voda se iz procesa taljenja snežne odeje v modelu preusmeri k padavinam (Valéry, 2010).

V nadaljevanju so predstavljene ključne enačbe s parametri (preglednica 2), ki so uporabljeni v modulu Cema Neige znotraj konceptualnega modela GR6J (Valéry et al., 2014b).

Debelina snežne odeje se izračuna z enačbo (24):

$$eT_G = \theta_{G2} \cdot eT_G + (1 - \theta_{G2}) \cdot T_{mean} \quad (24)$$

Če je $eT_G = 0$, potem je $T_{mean} > 0$, zato velja: *Potencial taljenja snega* $= \theta_{G1} \cdot T_{mean}$

Skupna količina vode, ki napaja model GR6J preko modula Cema Neige, je izračunana po enačbi (25):

$$\text{Skupna količina vode} = \text{Dežne padavine} + \text{Staljen sneg} \quad (25)$$

Preglednica 2: Parametri snežnega modula Cema Neige.

Parameter	Enota	Opis parametra
eT_G	[°C]	Toplotno stanje snežne odeje
θ_{G2}	[-]	Brezdimezijski uteženi koeficient toplotnega stanja snežne odeje (Cema Neige X1)
T_{mean}	[°C]	Povprečna dnevna temperatura
θ_{G1}	[dan]	Faktor taljenja snega (Cema Neige X2)

2.3.4 Evapotranspiracija

Podatki o potencialni evapotranspiraciji so lahko izračunani po mnogo metodah, kot so npr. Penman-Monteith, Hargreaves, Oudin, and Thornthwaite. V našem primeru model GR6J Cema Neige uporablja metodo izračuna potencialne evapotranspiracije po Oudinu (Oudin et al., 2005), ki temelji na predhodnih modelih Jensen-Haise in McGuinnessa (Amoussou et al., 2015).

Tovrstni modeli pri svojem izračunu upoštevajo samo povprečno dnevno temperaturo zraka ter sončno radiacijo na podlagi zemljepisne širine (*ang. latitude*, v programu uporabljeno *lat.*).

Potencialno evapotranspiracijo izračunamo z enačbo (26) (Oudin et al., 2005):

$$PE = \frac{R_e T_a + 5}{\lambda \rho \cdot 100}, \text{ če je } T_a + 5 > 0, \text{ drugače je } PE = 0. \quad (26)$$

Kjer je PE vrednost potencialne evapotranspiracije [mm/dan], R_e je ekstraterestično sončno sevanje [MJ/m²/dan], λ predstavlja latentno toploto uparjenja [MJ/kg], ρ gostota vode [kg/m³] in T_a povprečna dnevna temperatura [°C].

2.3.5 Učinkovitost modelov

NSE

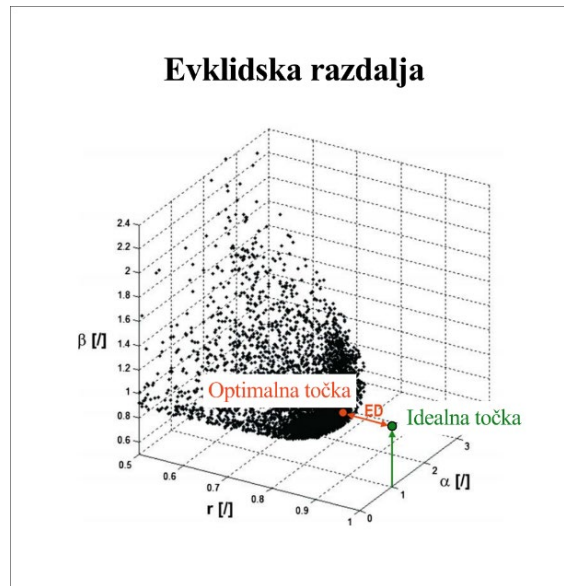
Nash–Sutcliffe koeficient učinkovitosti modela je namenjen za vrednotenje uspešnosti modelske napovedi (McCuen et al., 2006). Koeficient je pogosto uporabljen in je zanesljiv statistični podatek za kalibracijo in ocenjevanje ustreznosti hidroloških modelov z opazovanimi oz. merjenimi vrednostmi. Koeficient NSE je brezdimenzijski in se nahaja na intervalu od $[-\infty, 1]$ (Gupta et al., 2009).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (x_{s,t} - x_{0,t})^2}{\sum_{t=1}^n (x_{0,t} - \mu_0)^2} = 1 - \frac{MSE}{\sigma_0^2} \quad (27)$$

V enačbi (27) n predstavlja število vseh časovnih korakov, $x_{s,t}$ je simulirana vrednost v časovnem koraku t , $x_{0,t}$ je merjena vrednost v časovnem koraku t , μ_0 je srednja vrednost merjene vrednosti, σ_0 pa je standardna deviacija merjenih vrednosti (Gupta et al., 2009). Ko je vrednost NSE enaka 1, pomeni, da gre za popolno ujemanje med simuliranimi vrednostmi ter merjenimi vrednostmi. Ko je NSE vrednost 0, pomeni, da je natančnost modela na stopnji izmerjenih srednjih vrednosti. V kolikor je NSE manjši od 0, pomeni, da je postavljeni hidrološki model slabši od izmerjenih srednjih vrednosti (Knoben et al., 2019).

KGE in KGE2

Podobno kot koeficient NSE sta tudi koeficienta KGE (enačba (28)) in KGE2 uporabljena za namen kalibracije modela ter vrednotenja uspešnosti modelske napovedi. Z drugimi besedami si lahko razlagamo, da gre za razdaljo ED (slika 11) med idealno točko znotraj modela ter optimalno točko (O'Regan, 2023).



Slika 11: 3D prikaz evklidske razdalje med idealno in optimalno točko (povzeto po: Gupta et al., 2009).

$$KGE = 1 - ED \quad (28)$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (29)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (30)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_0} \quad (31)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_0} \quad (32)$$

V enačbah (29) in (30) r predstavlja koeficient korelacije med merjenimi vrednostmi odtoka in vrednostmi simulacije odtoka, α razmerje napake pretočne variabilnosti in β razmerje pristranskosti. μ_0 oz. μ_s (enačba (31)) sta srednji vrednosti merjenega oz. izračunanega odtoka v m³/s. σ_0 in σ_s (enačba (30)) sta standardna odklona merjenega oz. izračunanega pretoka v m³/s (Gupta et al., 2009).

KGE' oz. KGE2 (enačba (32)), kot je definiran koeficient v programskem paketu airGR, je modificiran osnovni brezdimenzijski KGE koeficient. Za razliko od predhodnega KGE se odvzame parameter α ter se ga nadomesti z γ , ki predstavlja variabilnostno razmerje. Pri izračunu variabilnostnega razmerja upoštevamo koeficient variacije CV . S tem zagotovimo, da razmerje pristranskosti ter razmerje napake pretočne variabilnosti med sabo nista povezana (Kling et al., 2012).

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (33)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_0} \quad (34)$$

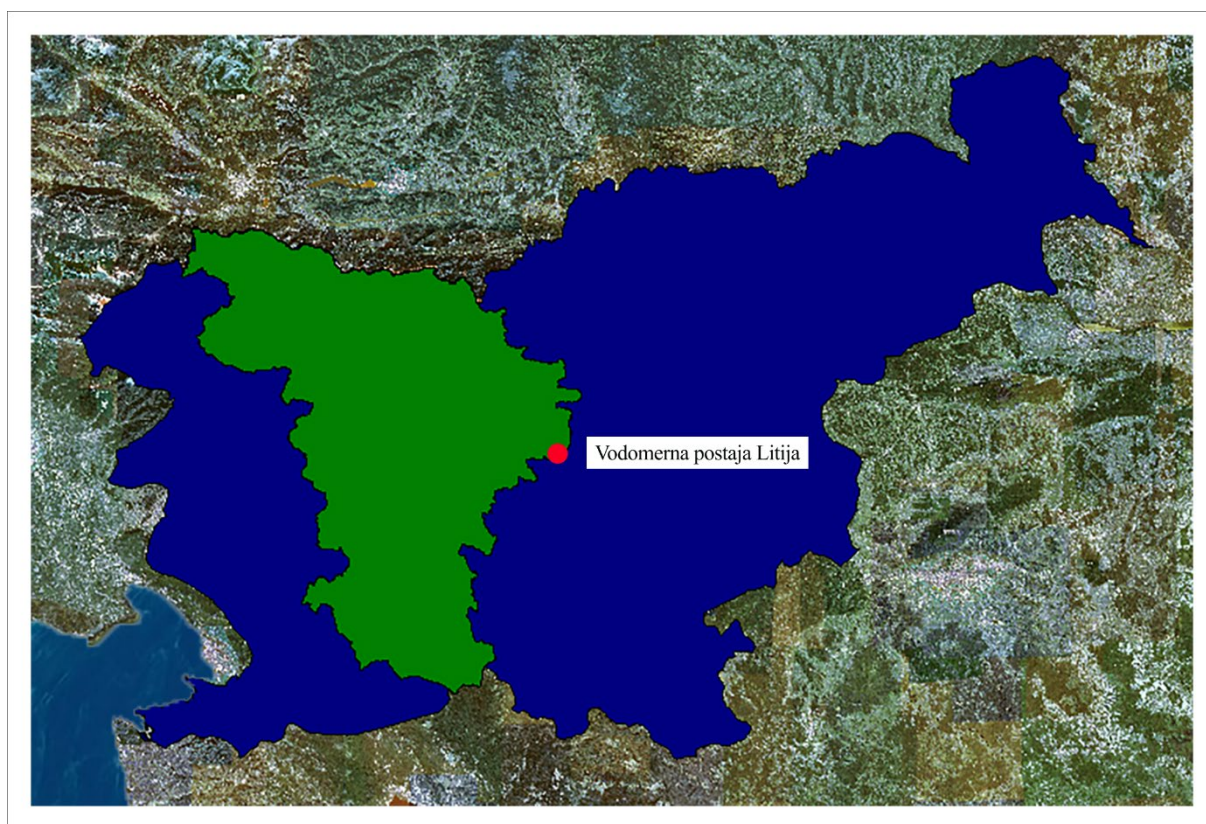
$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_0} = \frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_0/\mu_0} \quad (35)$$

V enačbi (33) r predstavlja brezdimenzijski koeficient korelacije med merjenimi vrednostmi odtoka in vrednostmi simulacije odtoka, β je razmerje pristranskosti (enačba (34)), γ je brezdimenzijsko variabilnostno razmerje (enačba (35)), μ je srednja vrednost odtoka v m³/s, CV je brezdimenzijski koeficient variacije, σ je standardni odklon odtoka v m³/s, oznaki s in 0 pa predstavljata simulirano oziroma merjeno vrednost v enačbi (Kling et al., 2012).

3 PODATKI

3.1 Porečje reke Save do vodomerne postaje Litija

Na sliki 12 je prikazano porečje Save do vodomerne postaje Litija, ki obsega 4821,8 km² (Šraj in Bezak, 2013). Je del črnomskega povodja (Bat et al., 2003). Vodomerna postaja je ena izmed najstarejših merilnih postaj v Sloveniji. Za to porečje je značilen dežno-snežni režim, ki ima ponavadi dva viška in dva nižka. Konica nastopi spomladi, ko se stali sneg v hribovitem predelu porečja. V poletnem obdobju so vodostaji načeloma nizki. Sledi mu jesenska konica pretoka. Pozimi je vodostaj zopet nizek. Dežno-snežni režim je sicer najpogostejši rečni režim pri nas (Šraj in Bezak, 2013).



Slika 12: Zeleno obarvano porečje Save do vodomerne postaje Litija.

Podatke o pretoku smo uporabili za časovno obdobje od 1. 1. 1981 do 31. 12. 2010. Pridobili smo jih s spletne strani Agencije Republike Slovenije za okolje. Obdobje na tem časovnem intervalu je bilo izbrano, ker ima ARSO za celotno obdobje za izbrano vodomerno postajo popolne podatke in dodatne interpolacije podatkov tako ni bilo potrebno izvajati (ARSO, 2023).

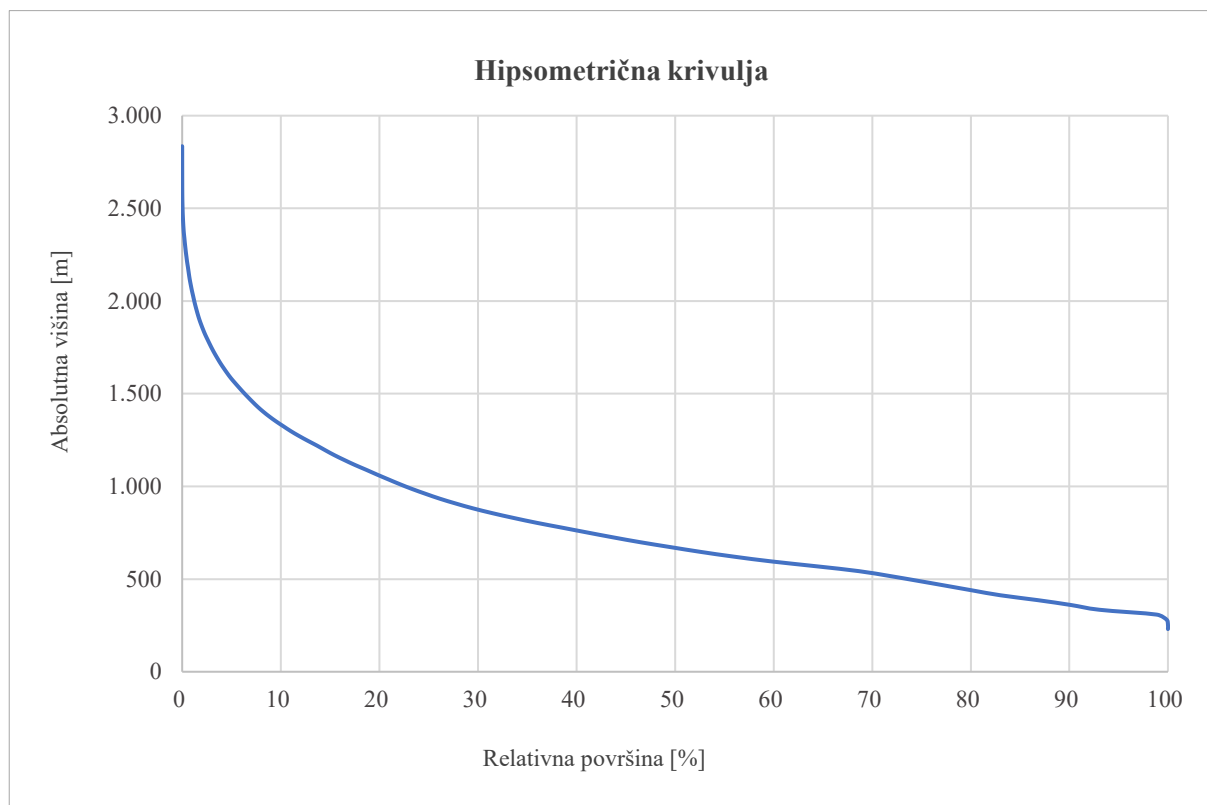
Tudi podatke o padavinah ter temperaturi smo pridobili s strani ARSO, ki je podatke pripravil na podlagi homogeniziranih dnevni nizov meteoroloških podatkov v obdobju med letoma 1961 in 2010. Uporabljeni so bili podatki slovenskih merilnih postaj, ki so zagotavljale vsaj polovico podatkov v izbranem časovnem obdobju. Morebitni manjkajoči podatki so bili interpolirani. Da bi se izognili

ekstrapolaciji podatkov na mejah države Republike Slovenije, so bili uporabljeni tudi podatki iz meteoroloških postaj sosednjih držav. Prostorska ločljivost podatkov znaša 1 km (ARSO, 2010).

3.2 Hipsometrična krivulja

Za potrebe izračuna modela GR6J smo potrebovali tudi podatek o hipsometrični krivulji (slika 13). Hrvatin in Perko (2006) hipsometrično krivuljo opišeta kot krivuljo kumulativne frekvenčne distribucije oziroma kumulativne verjetnostne distribucije. Hipsometrija je sicer veda, ki se ukvarja s proučevanjem površja Zemlje ter merjenjem nadmorskih višin. Iz grafa lahko razberemo, kakšen delež površja porečja se nahaja na neki izbrani nadmorski višini. Poznamo konvavne, konveksne, premočrtne ter konkavno-konveksne hipsometrične krivulje. V našem primeru gre za konkavno krivuljo, kar nakazuje, da gre za starejšo stopnjo razvoja Zemljinega površja. Na tem področju so v preteklosti potekali denudacijski procesi, kot so erozijski vodni tokovi, delovanje ledenika ter vetrovi (Hrvatin in Perko, 2006).

Podatke o hipsometrični krivulji smo v programu SAGA GIS dobili na podlagi predhodno pridobljenega digitalnega modela višin Slovenije, ki smo ga obrezali na področje porečja Save do vodomerne postaje Litija. Uporabili smo digitalni model višin DMV 100, katerega ločljivost znaša 100 m. (GURS, 2023). Hipsometrična krivulja predstavlja odvisnost med površino porečja ter njene pripadajoče absolutne višine (slika 13).



Slika 13: Hipsometrična krivulja porečja Save do vodomerne postaje Litija.

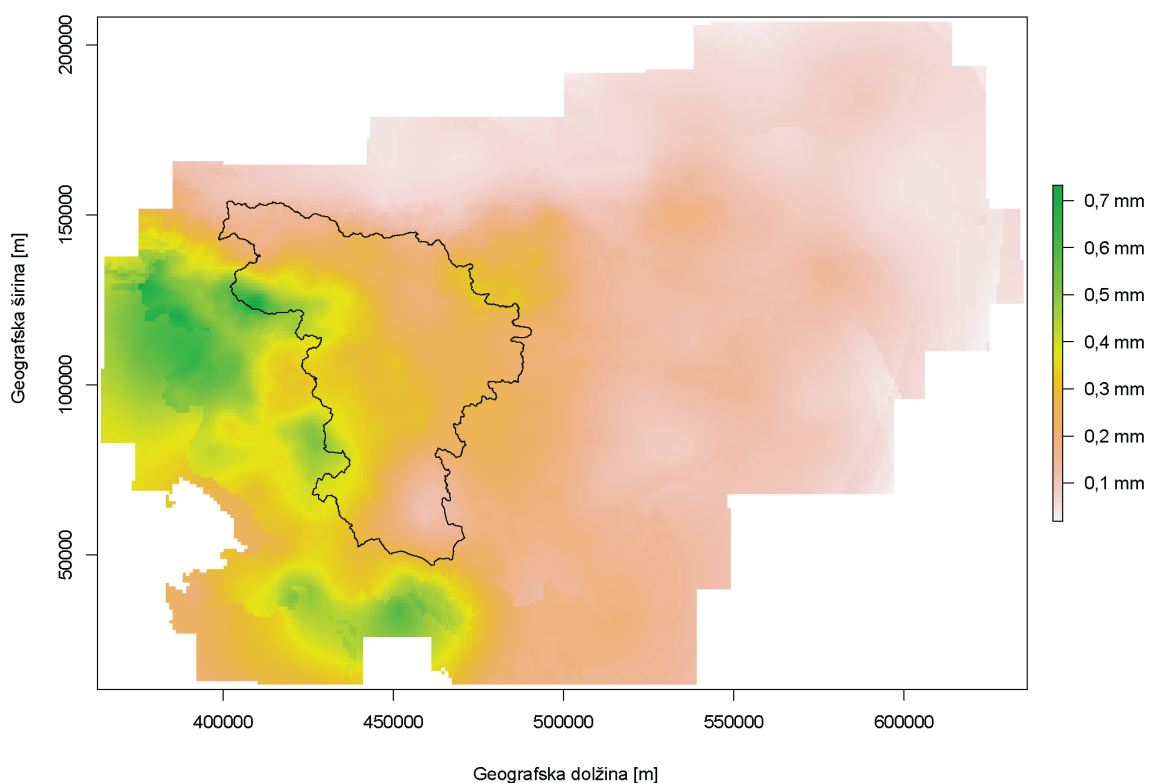
3.3 Priprava podatkov v programu R

V programu R smo pripravili podatke o padavinah (*pr-obs-1981-2010.nc*) in temperaturi (*tas-obs-1981-2010.nc*) za nadaljnjo uporabo. Gre za arhiv podatkov, ki jih hrani Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO, 2023).

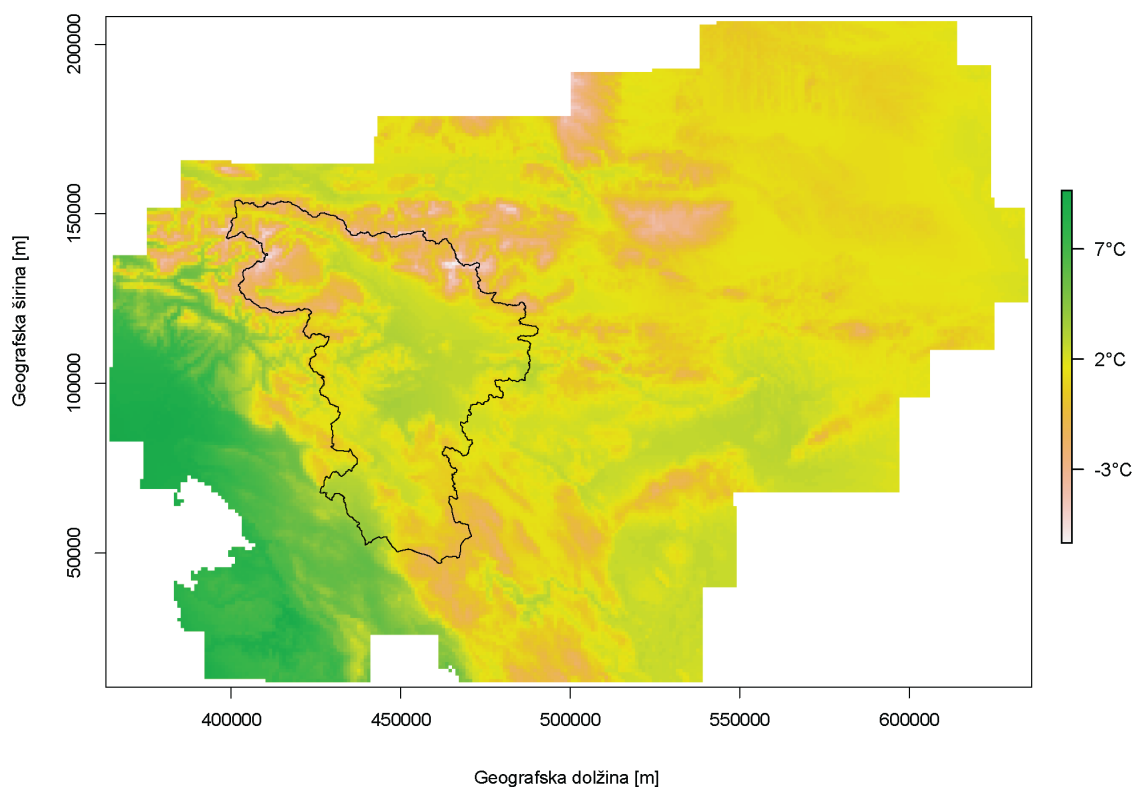
R je programski jezik, ki se uporablja za statistično analizo ter grafični prikaz izračunanih podatkov. Dodatno se uporablja tudi za rudarjenje podatkov, modeliranje in simuliranje procesov (Worsley, 2022).

V prvem koraku smo uvozili podatke o padavinah ter vektorske podatke oziroma poligon (*shapefile*) našega obravnavanega območja, ki smo jih nato obrezali na našo razvodnico, ki je vidna na slikah 14 in 15 (črna obroba). Uporabljen je slovenski Državni koordinatni sistem (D96).

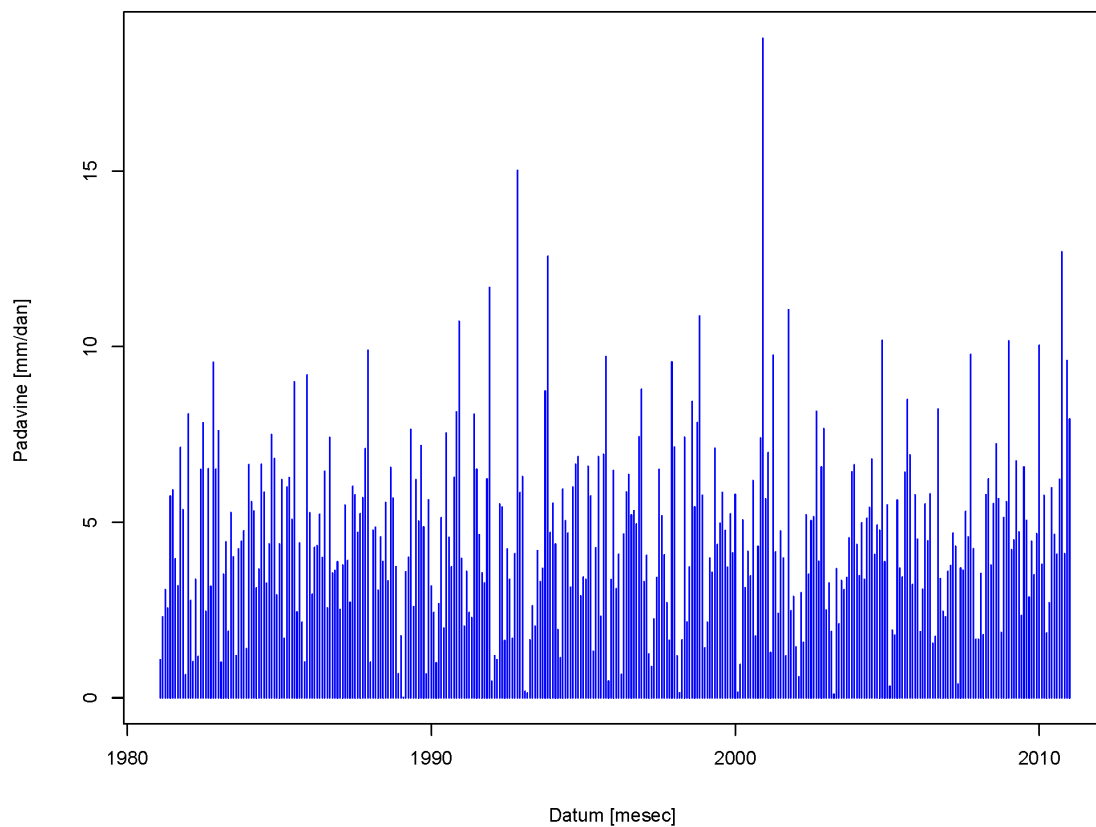
Na podlagi dobljenih podatkov smo izračunali povprečne dnevne padavine ter temperature po mesecih in letih od 1. 1. 1981 do 31. 12. 2010 (slika 16, 17, 18 in 19). Poleg tega smo izračunali tudi povprečni dnevni pretok po mesecih in letih (sliki 20 in 21).



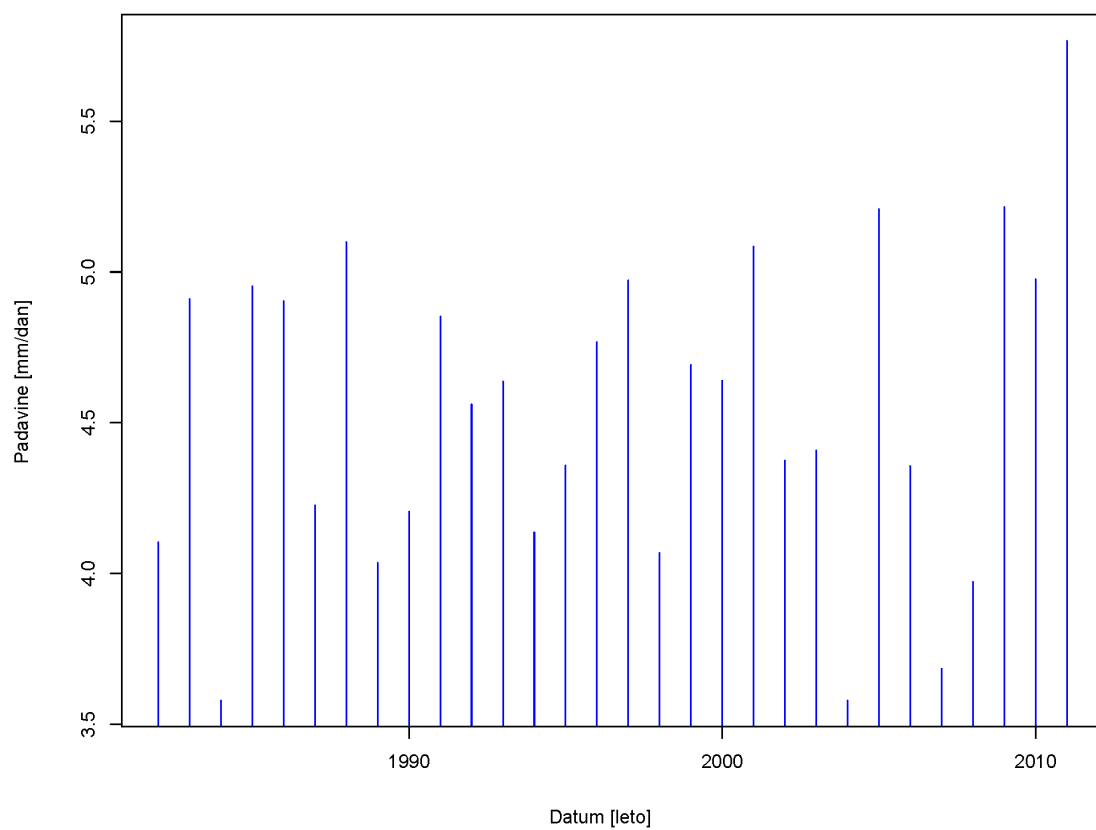
Slika 14: Karta povprečnih dnevnih padavin za dan 4. marec 1985.



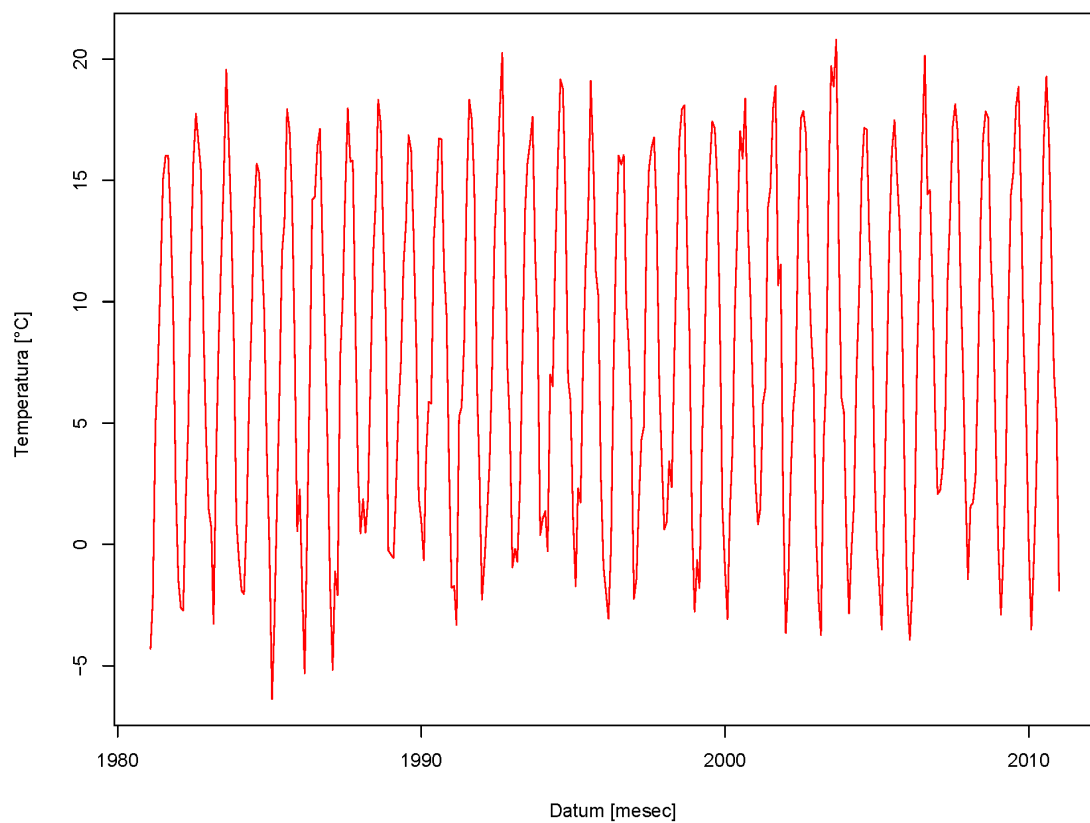
Slika 15: Karta povprečne dnevne temperature za dan 4. marec 1985.



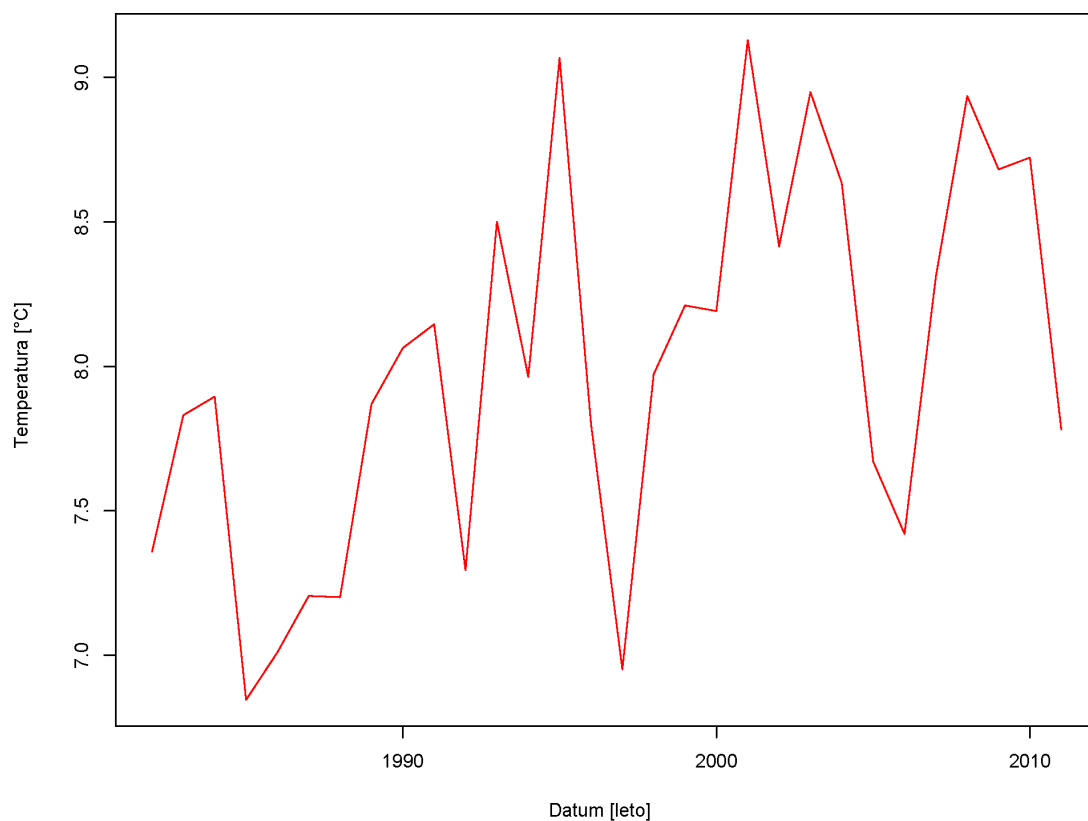
Slika 16: Prikaz povprečnih dnevnih padavin po mesecih med 1. januarjem 1981 in 31. decembrom 2010.



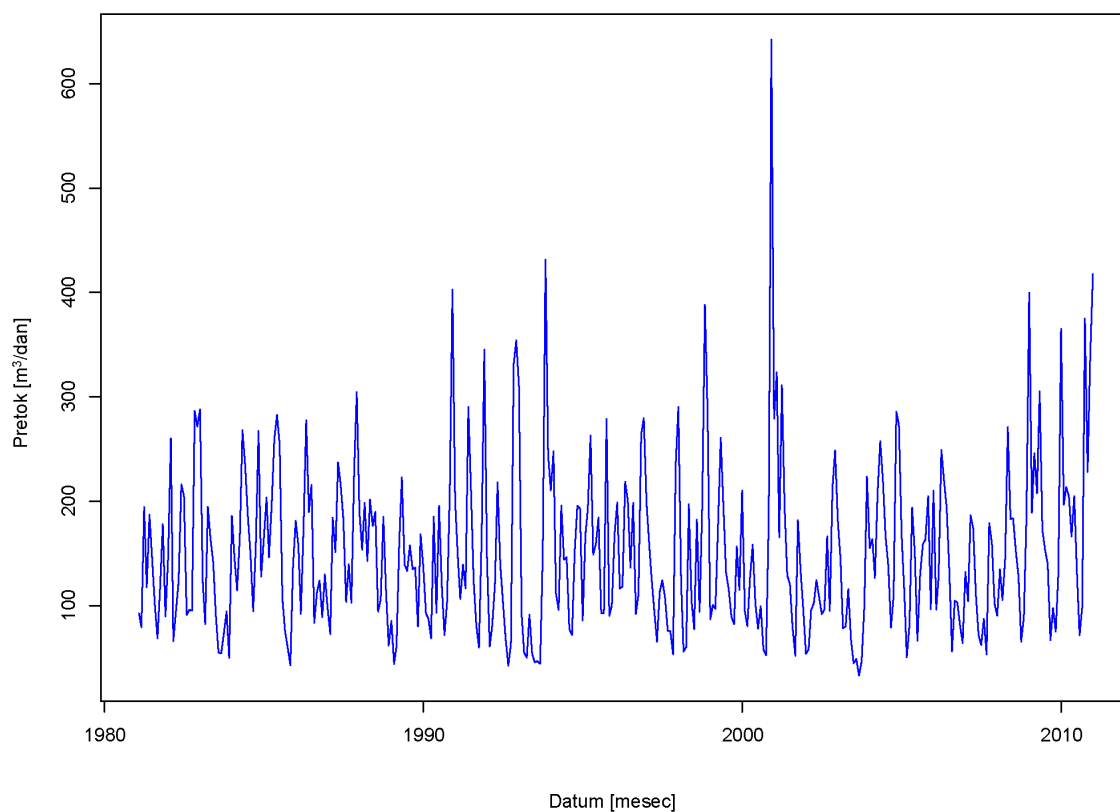
Slika 17: Prikaz povprečnih dnevnih padavin po letih med letoma 1981 in 2010.



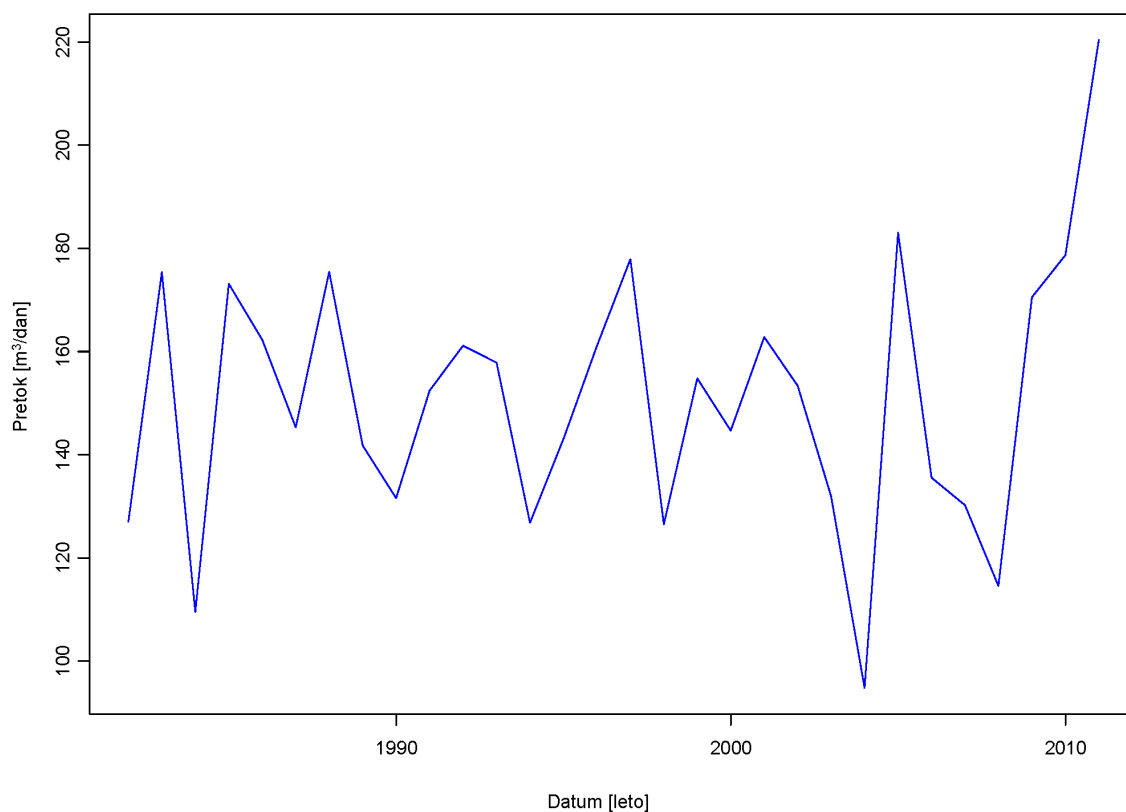
Slika 18: Prikaz povprečnih dnevnih temperatur po mesecih med 1. januarjem 1981 in 31. decembrom 2010.



Slika 19: Prikaz povprečnih dnevni temperatur po letih med letoma 1981 in 2010.



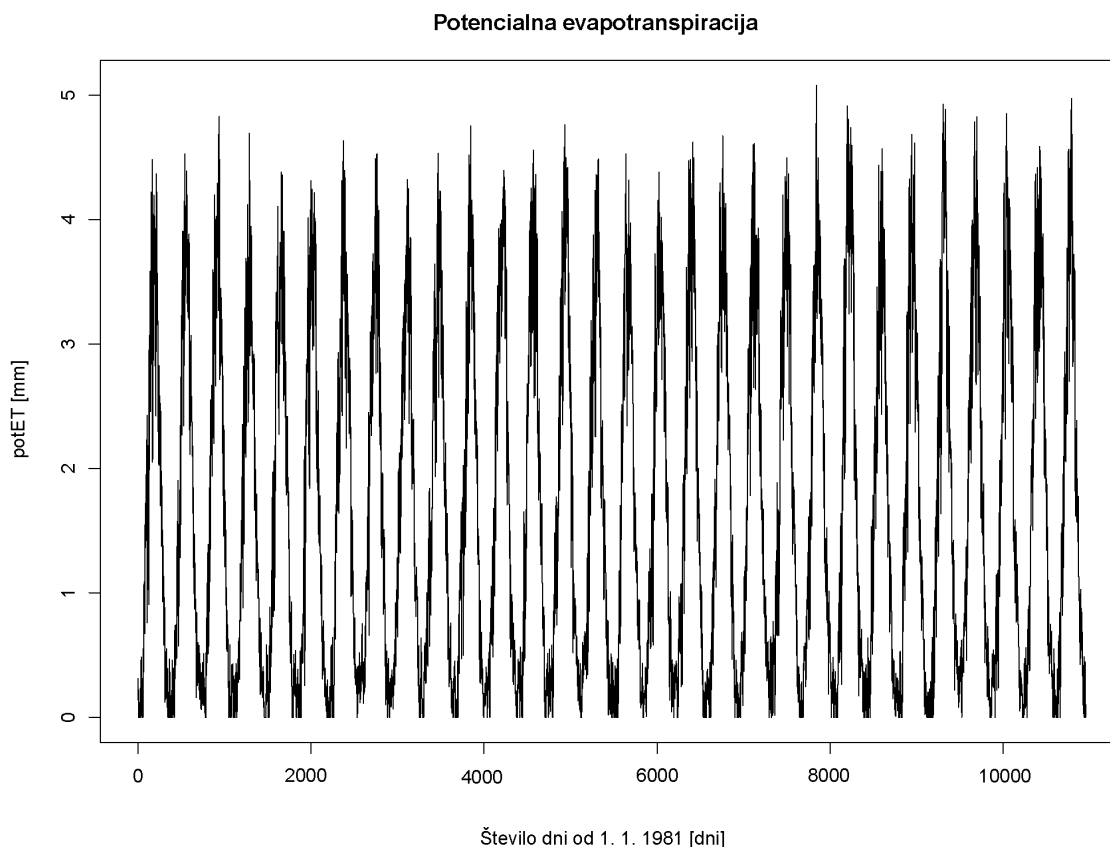
Slika 20: Prikaz povprečnega dnevnega pretoka Save po mesecih na vodomerni postaji Litija med letoma 1981 in 2010.



Slika 21: Prikaz povprečnega dnevnega pretoka Save po letih na vodomerni postaji Litija med letoma 1981 in 2010.

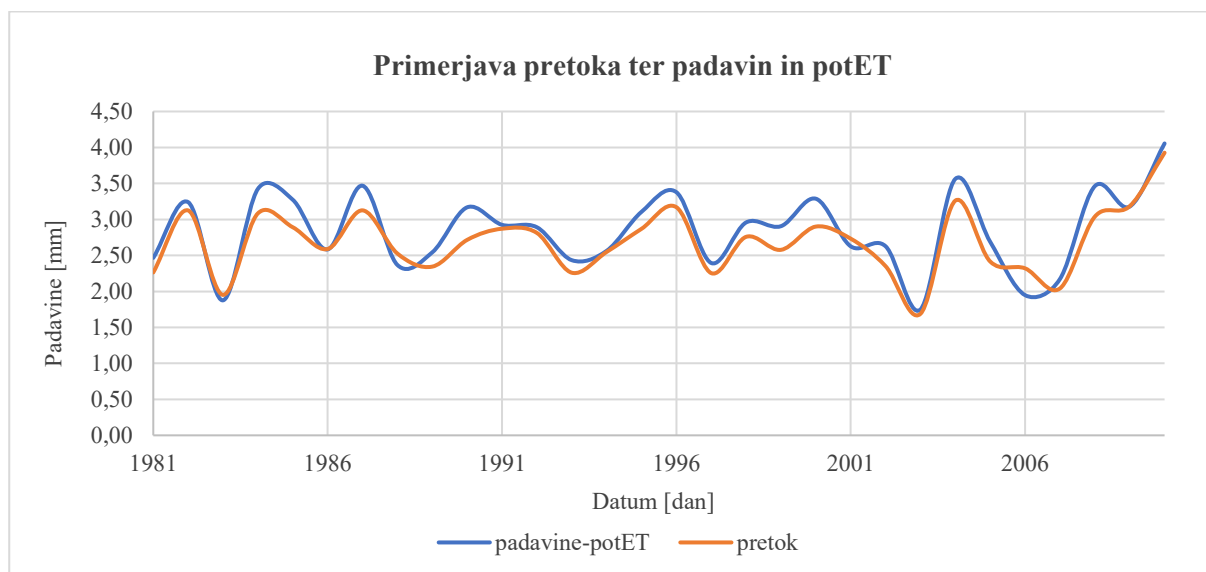
3.4 Izračun potencialne evapotranspiracije

Potencialno evapotranspiracijo smo v programskem okolju RStudio izračunali po predhodno predstavljeni enačbi (26) (slika 22). Pri izračunu je bil uporabljen dnevni korak ter povprečna dnevna temperatura predstavljena na sliki 18. Dodatno smo pri izračunu potrebovali podatek o zemljepisni širni. Vodomerna postaja Litija leži $46,03^\circ$ severno od ekvatorja, ki predstavlja izhodišče (0°).



Slika 22: Prikaz izračunane potencialne evapotranspiracije.

Potencialna evapotranspiracija je sicer količina vode, ki bi lahko izhlapela oz. bila uporabljena pri procesu dihanja rastlin, v kolikor bi bila ta količina vode na voljo. Dejanska evapotranspiracija je vedno enaka oziroma je nižja od potencialne, v kolikor v sistemu ni prisotne dovolj vode. Opazimo lahko, da vrednosti potencialne evapotranspiracije zavzamejo vrednosti, večje od 0. Mediana vrednosti potET znaša 1,39 mm, maksimum potET znaša 5,08 mm.



Slika 23: Primerjava pretoka ter padavin in potET.

Za bilančno kontrolo izračuna potET smo primerjali pretok ter razliko med padavinami in potencialno evapotranspiracijo na letni ravni. Ker je razlika med krivuljo pre-potET in krivuljo pretok majhna (slika 23), je bil izračun potencialne evapotranspiracije ustrezen.

3.5 Izračun deleža snežnih padavin

Za potrebo priprave funkcije *CreateRunOptions* smo pri parametru *MeanAnSolidPrecip* potrebovali podatek o deležu snežnih padavin. Parameter *MeanAnSolidPrecip* je vektor srednjih letnih padavin v trdnem stanju za pet določenih višinskih pasov. Parameter je podan v enoti mm/leto (Coron et al., 2020). Predhodno je bilo za namen izračuna v funkciji *InputsModel* določenih pet višinskih pasov.

Padavine v trdnem agregatnem stanju so izračunane kot produkt povprečnih letnih padavin na porečju in odstotek staljenega snega na porečju. Odstotek taljenja snega na porečju je izračunan na podlagi empirične enačbe (36), ki je bila postavljena na podlagi podatkov, zbranih na padavinskih postajah ARSO v letih med 2010 in 2016 (Alexopoulos et al., 2023).

$$\text{Odstotek staljenega snega} = 0,0168 \cdot ME + 3,5128 \quad (36)$$

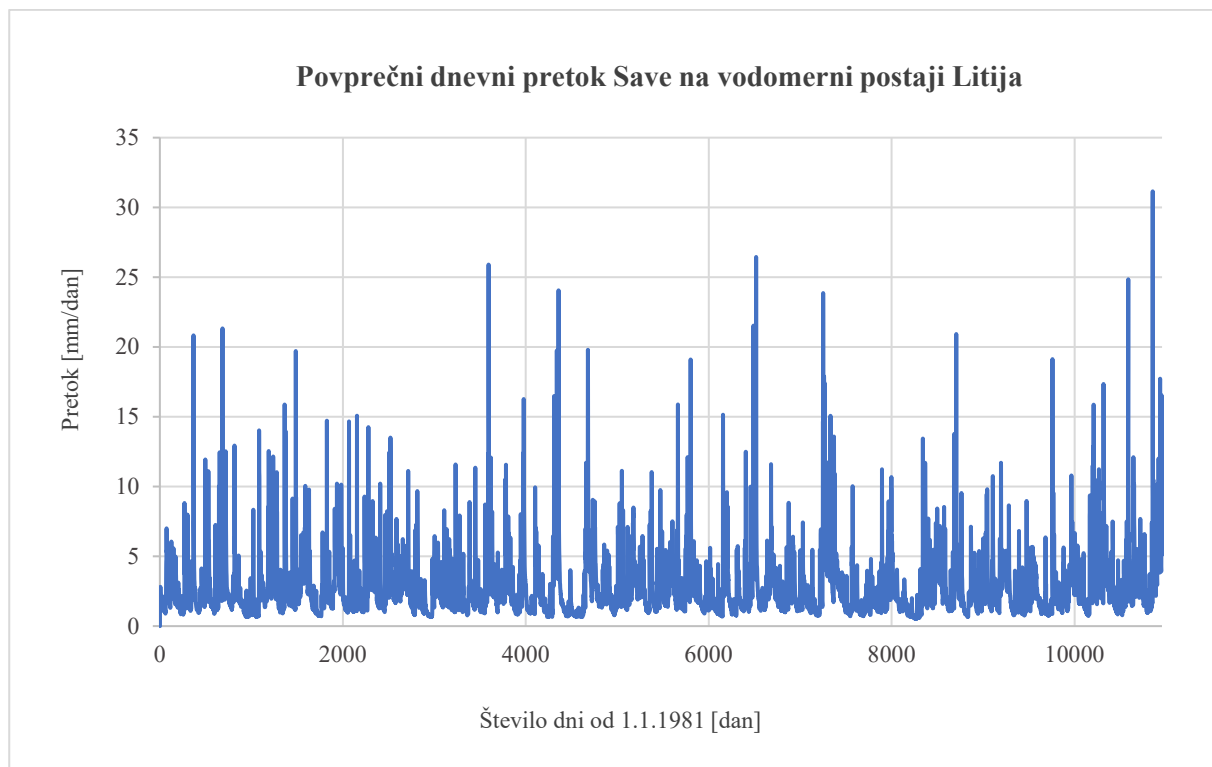
Kjer *ME* predstavlja višinsko koto posameznega pasu.

3.6 Umerjanje modela

Umerjanje modela pomeni, da določimo neznane parametre v izbranem modelu. S postavljenim modelom so določene povezave oz. odvisnosti znotraj matematičnega modela, poznamo pa tudi vhodne ter izhodne podatke. Pri določanju ustreznih parametrov najpogosteje uporabimo simulacijo, tako da vrednosti navedenih parametrov spreminjamo in se s tem napaka med simuliranimi in izmerjenimi vrednostmi manjša. Čim manjša je napaka oziroma razlika med simuliranimi in merjenimi vrednostmi, tem bolje je model umerjen (Vidmar, 2021).

Dodatno je bilo pred umerjanjem modela potrebno določiti obdobje, na katerega se bo model zagnal oziroma »ogrel« (*IndPeriod_WarmUp*). Določili smo, da se model ogreva na podlagi izmerjenih podatkov v prvem letu (od 1.1.1981 do 31.12.1981). Na podlagi zagona modela dobimo realne vrednosti spremenljivk v modelu, kot npr. količina vode v posameznem delu modela, in tako izločimo vpliv izbire začetnih pogojev. Preostalo obdobje izmerjenih podatkov (od 1. 1. 1982 do 31. 12. 2010) pa je bilo uporabljeno za umerjanje modela. Za umerjanje modela smo uporabili funkcijo *Calibration_Michel*, ki je kalibracijski algoritem.

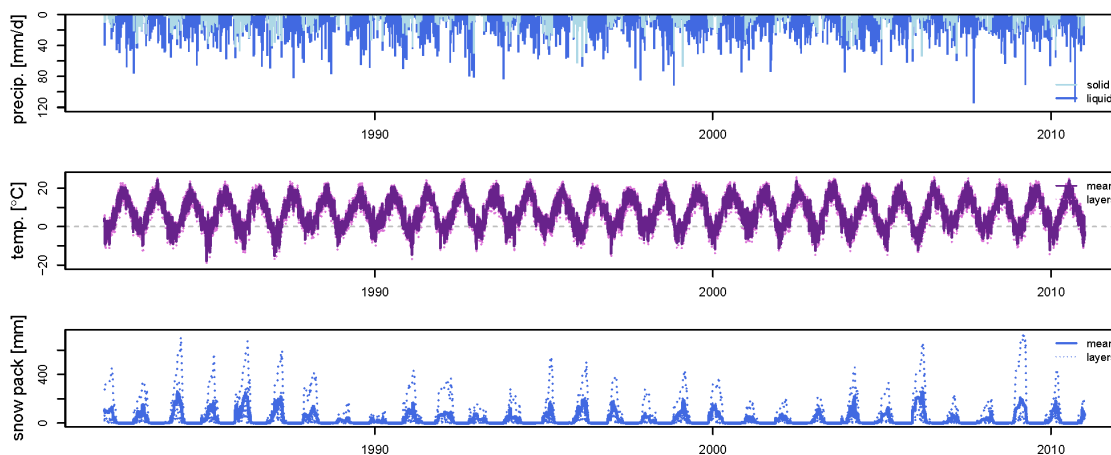
Dodatno je bilo potrebno merjeni pretok na vodomerni postaji Litija, pridobljen s spletne strani ARSO, ki je podan v merski enoti m³/s, pretvoriti v mm/dan (slika 24). To smo naredili tako, da smo pretok v m³/s delili s površino celotnega porečja v km² ter izvedli ustrezno transformacijo časovne ter prostorske komponente.



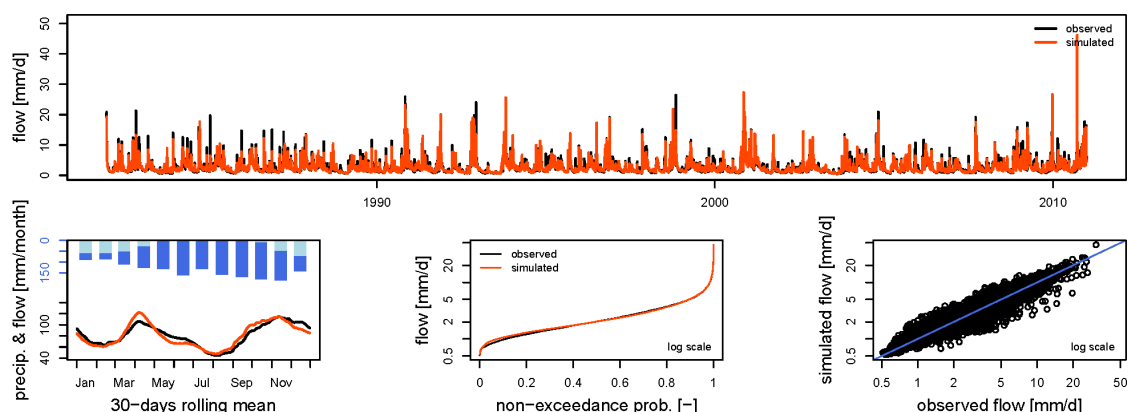
Slika 24: Prikaz pretoka Save na vodomerni postaji Litija v mm/dan.

3.7 Izračun GR6J Cema Neige

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati umerjenega modela GR6J Cema Neige za porečje Save do vodomerne postaje Litija za obdobje umerjanja med 1. 1. 1982 in 31. 12. 2010. Za umerjanje modela smo uporabili tri kriterije ujemanja, in sicer: KGE2 (preglednici 3 in 4), KGE (preglednici 5 in 6) in NSE (preglednici 7 in 8). Rezultati na slikah 25 in 26 predstavljajo umerjanje s kriterijem KGE2, ki bolje obravnava tudi nizke pretoke.



Slika 25: Rezultati umerjenega modela GR6J Cema Neige za porečje Save do vodomerne postaje Litija (1. del).



Slika 26: Rezultati umerjenega modela GR6J Cema Neige za porečje Save do vodomerne postaje Litija (2. del).

Na zgornjem grafu (slika 25) so predstavljene srednje dnevne padavine; s svetlo modro barvo so zabeležene snežne padavine, s temno modro barvo so označene padavine. Na srednjem grafu (slika 25) je predstavljena srednja dnevna temperatura. Na spodnjem grafu (slika 25) je predstavljena debelina snežne odeje po petih višinskih pasovih. Temno modra črta predstavlja povprečje snežnih padavin vseh petih pasov. Na zgornjem grafu na sliki 26 je prikazana primerjava med izmerjenim pretokom in simuliranim pretokom v modelu v mm/dan. Spodnji levi graf prikazuje 30-dnevni hidrogram drsečega povprečja, srednji graf spodaj predstavlja krivuljo trajanja v logaritemskem merilu, v desnem spodaj pa je predstavljen razsevni diagram v logaritemskem merilu, ki na ordinati prikazuje vrednosti simuliranega pretoka v mm/dan, na abscisi pa so prikazane vrednosti opazovanega pretoka v mm/dan.

Preglednica 3: Izračunani parametri za umerjen model GR6J Cema Neige s kriterijem ujemanja KGE2.

KGE2

Parameter	Enota	Vrednost parametra
X1	[mm]	63,890
X2	[mm/dan]	-0,521
X3	[mm]	148,413
X4	[dni]	0,954
X5	[-]	0,238
X6	[mm]	97,209
X1 Cema Neige	[-]	0,019
X2 Cema Neige	[mm/°C/dan]	9,753

Preglednica 4: Kontrola ujemanja glede na kriterij ujemanja KGE2 v modelu GR6J Cema Neige.

Kriterij	Ujemanje
Crit. NSE [Q]	0,8537
Crit. KGE [Q]	0,9270
Crit. KGE2 [Q]	0,9272

Preglednica 5: Izračunani parametri za umerjen model GR6J Cema Neige s kriterijem ujemanja KGE.

KGE		
Parameter	Enota	Vrednost parametra
X1	[mm]	63,879
X2	[mm/dan]	-0,521
X3	[mm]	149,965
X4	[dni]	0,954
X5	[-]	0,232
X6	[mm]	96,206
X1 Cema Neige	[-]	0,019
X2 Cema Neige	[mm/°C/dan]	9,753

Preglednica 6: Kontrola ujemanja glede na kriterij ujemanja KGE v modelu GR6J Cema Neige.

Kriterij	Ujemanje
Crit. NSE [Q]	0,8540
Crit. KGE [Q]	0,9271
Crit. KGE2 [Q]	0,9271

Preglednica 7: Izračunani parametri za umerjen model GR6J Cema Neige s kriterijem ujemanja NSE.

NSE		
Parameter	Enota	Vrednost parametra
X1	[mm]	264,558
X2	[mm/dan]	-1,730
X3	[mm]	82,902
X4	[dni]	1,042
X5	[-]	0,500
X6	[mm]	58,545
X1 Cema Neige	[-]	0,019
X2 Cema Neige	[mm/°C/dan]	9,822

Preglednica 8: Kontrola ujemanja glede na kriterij ujemanja NSE v modelu GR6J Cema Neige.

Kriterij	Ujemanje
Crit. NSE [Q]	0,8647
Crit. KGE [Q]	0,9059
Crit. KGE2 [Q]	0,9059

Na podlagi izračunov lahko opazimo, da je model najboljše umerjen, če uporabimo kriterij ujemanja ter kontrolo ujemanja KGE2. Podobno vrednost dobimo tudi pri kriteriju ujemanja KGE. Kriterij ujemanja NSE pa se izkaže kot najslabši od vseh treh.

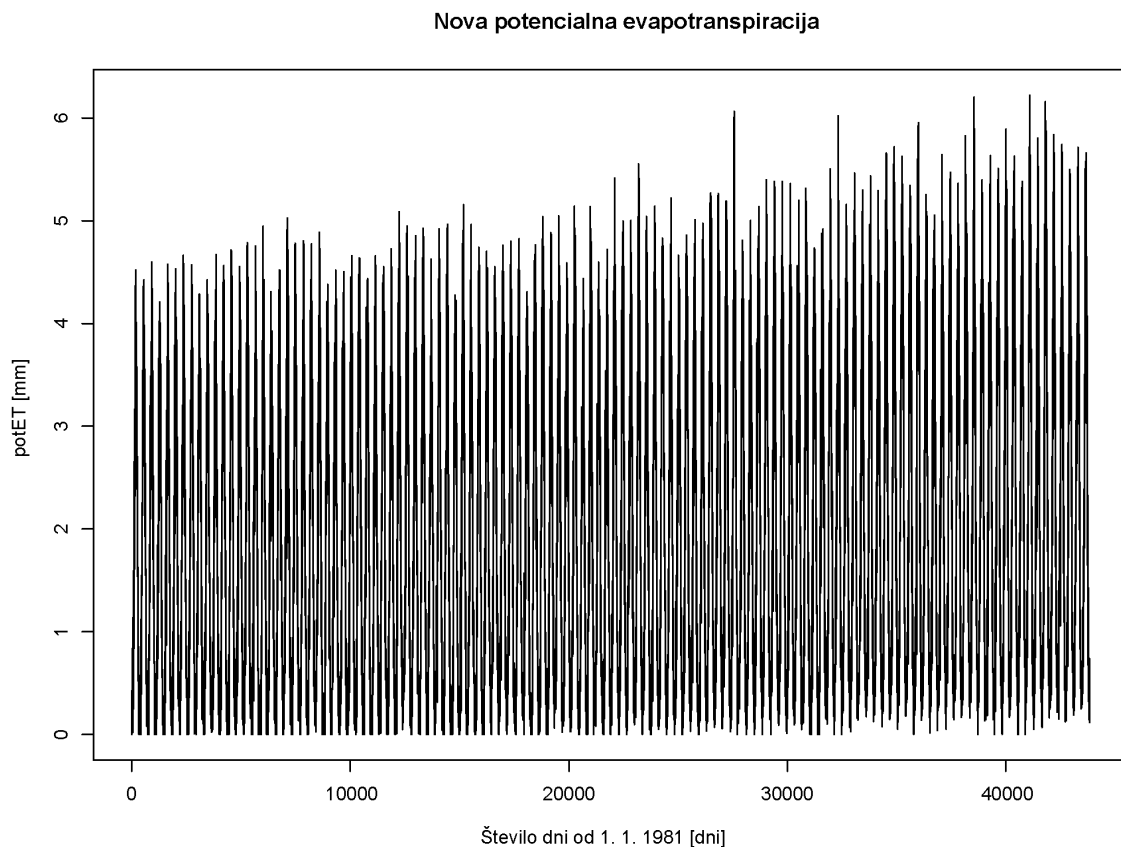
V nadaljevanju smo na podlagi predhodnih podatkov o podnebnih spremembah pripravili izračune o pretokih od leta 1981 do leta 2100. Pri izračunu smo uporabili 14 modelskih simulacij: dve za RCP 2,6, šest za RCP 4,5 in šest za RCP 8,5. Dodatno je bilo potrebno teh 14 modelskih simulacij upoštevati tudi pri izračunu padavin in temperature.

Za zagon modela GR6J Cema Neige smo uporabili funkcijo *CreateInputsModel* in pri izračunu uporabili predhodne podatke 14 modelskih simulacij za temperaturo in 14 modelskih simulacij za padavine. Dodatno je bilo potrebno pri izračunu določiti novo potencialno evapotranspiracijo. Na sliki 27 je

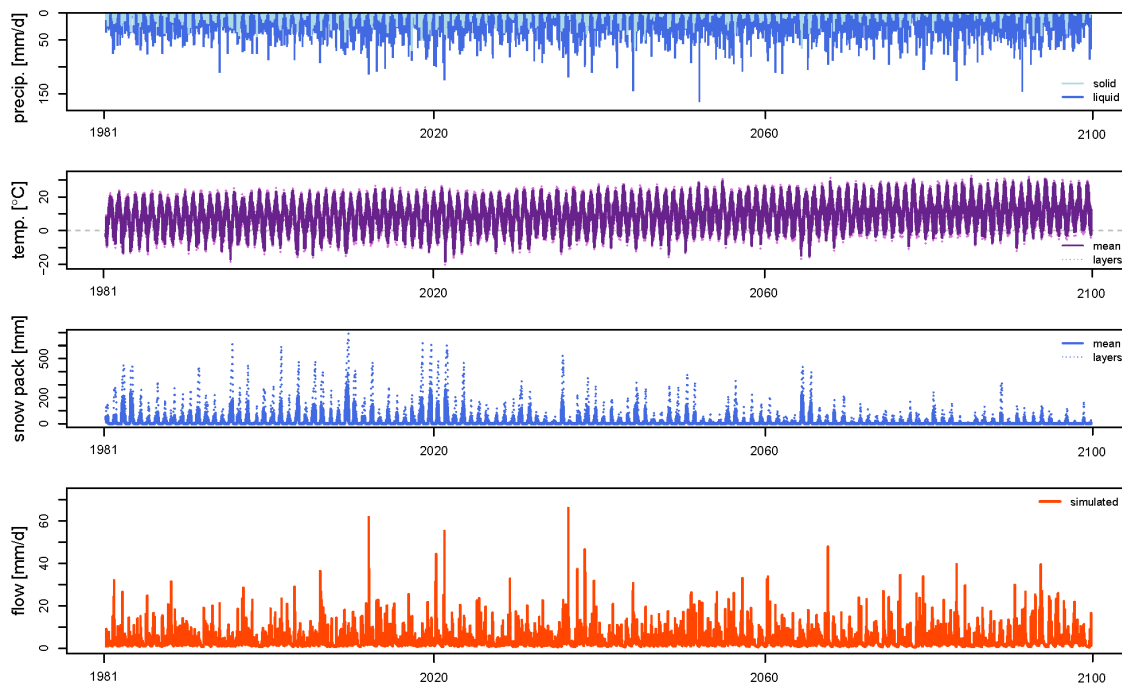
prikazan primer zapisa kode, pri zagonu katere smo dobili pretok za posamezen scenarij. Dobljeni pretok je tudi naš končni rezultat (slika 28) in je predmet analize.

```
InputsModel3 <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_CemaNeigeGR6J,  
                                  seq(strptime("1/1/1981", "%m/%d/%y"),  
                                    length=length(pad[,1]),by="day"),  
                                  Precip = pad[,1],  
                                  PotEvap = potET1,  
                                  TempMean = temp[,1],  
                                  ZInputs = median(hypso),  
                                  HypsoData = hypso,  
                                  NLayers = 5)  
Ind_Run3 <- seq(366, length(pad[,1]))  
RunOptions3 <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_CemaNeigeGR6J,  
                                InputsModel = InputsModel3,  
                                IndPeriod_Run = Ind_Run3,  
                                IndPeriod_WarmUp = 1:365,  
                                MeanAnSolidPrecip=sneg)  
OutputsModel3 <- RunModel_CemaNeigeGR6J(InputsModel = InputsModel3,  
                                          RunOptions = RunOptions3,  
                                          Param = ParamGR6JCemaNeige)
```

Slika 27: Primer zapisa kode za izračun simulacije št. 14 (RCP 8,5; simulacija 14).



Slika 28: Prikaz izračunane nove potencialne evapotranspiracije za simulacijo 14 (RCP 8,5).



Slika 29: Rezultati modela GR6J Cema Neige za porečje Save do vodomerne postaje Litija za simulacijo 14 (RCP 8,5).

Na sliki 29 so predstavljeni rezultati zagona modela GR6J Cema Neige za 14. simulacijo, ki prikazuje situacijo, da človeštvo pri zmanjševanju podnebnih sprememb ne bi ukrepalo (RCP 8,5). Iz zgornjega grafa za obdobje 1981–2100 lahko razberemo količino dnevnih padavin, tako dežnih kot tudi snežnih. Iz drugega grafa lahko razberemo, da se povprečna dnevna temperatura proti koncu stoletja postopoma dviguje. V kombinaciji prvega in tretjega grafa lahko razberemo, da se količina snežnih padavin proti koncu stoletja vztrajno zmanjšuje in s tem se zmanjšuje tudi debelina snežne odeje, kar sovpada s povišanjem povprečnih dnevnih temperatur. Na spodnjem grafu je predstavljen simulirani pretok v milimetrih na dan za obdobje 1981–2100.

4 ANALIZA REZULTATOV IN DISKUSIJA

Na podlagi podatkov med leti od 1981 do 2010 smo hidrološki model umerili in tako dobili vrednosti parametrov hidrološkega modela. V naslednjem koraku smo izvedli zagon hidrološkega modela za obdobje 1981–2100, s tem da smo upoštevali scenarije podnebnih sprememb. Rezultat je izračunan novi pretok na podlagi implementacije podatkov o podnebnih spremembah za posamezen scenarij za merilno postajo Litija.

4.1 Analiza presežnih pretokov

S strani ARSO smo dobili podatek (ARSO, 2023), da Sava na vodomerni postaji Litija začne poplavlјati pri pretoku 1514 m³/s. Glede na prikaz na sliki 30 gre za oranžno stopnjo nevarnosti. Pri tem pretoku lahko vodotok že poplavi posamezne objekte in lokalne ter regionalne ceste. Gre za nevarne hidrološke razmere, kjer so že ogroženi zdravlje, varnost ljudi in njihovo premoženje.

Oznaka stopnje	Opis stopnje nevarnosti	Možni učinki rečnih poplav, poplav na kraških poljih, morskih poplav	Možni učinki hudourniških poplav
ZELENA	Običajne hidrološke razmere – brez posledic. Posebna pozornost ni potrebna.	Brez učinkov.	Brez učinkov.
RUMENA	Razlivanje - pretok ali vodostaj presega vrednost, pri kateri se pričnejo razlivanja v bližnji ali širši okolici vodomerne postaje. Hidrološke razmere so potencialno nevarne. Nastopijo lokalno omejene težave. Potrebna je povečana pozornost ljudi pri gibanju in dejavnostih v obrečnem prostoru.	Možna so razlivanja. Nastopijo lokalno omejene težave. V manjšem obsegu so lahko poplavlјene kmetijske površine, posamezne ceste in infrastrukturni objekti. Promet je lahko oviran ali onemogočen. Plavlјe lahko zamaši posamezne objekte vodne infrastrukture in zajezi vodni tok.	Hudourniški vodotoki lahko hitro narastejo in se razlјejo na izpostavljenih mestih. Lokalno so lahko poplavlјene posamezne ceste in objekti. Plavlјe lahko zamaši posamezne objekte vodne infrastrukture in zajezi vodni tok.
ORANŽNA	Poplave - pretok ali vodostaj presega vrednost, pri kateri so poplavlјeni posamezni objekti in ceste lokalnega ali regionalnega pomena. Hidrološke razmere so nevarne. Ogroženo je zdravlje in varnost ljudi ter premoženja.	Možne so poplave posameznih objektov, odsekov lokalnih in regionalnih cest ter večjega obsega kmetijskih površin. Promet je lahko oviran ali onemogočen. Plavlјe lahko zamaši posamezne objekte vodne infrastrukture in zajezi vodni tok.	Hudourniški vodotoki lahko zelo hitro narastejo in poplavlјo na izpostavljenih mestih. Lokalno so lahko poplavlјene posamezne ceste in objekti. Plavlјe lahko zamaši posamezne objekte vodne infrastrukture in zajezi vodni tok.
RDEČA	Obsežne, silovite poplave - pretok ali vodostaj presega vrednost, pri kateri so poplavlјena večji strnjeni deli naselij ali cela naselja. Hidrološke razmere so zelo nevarne. Ogroženo je zdravlje in varnost ljudi. Nastaja večja gmotna škoda.	Možne so poplave večjih razsežnosti. Poplavlјena so lahko tudi območja, kjer poplave niso pogoste. Na širšem območju so poplavlјene in neprevozne številne ceste, poplavlјeni so deli ali celotna naselja, nastajajo večje težave z dostopnostjo do poplavljenih območij. Posamezni objekti vodne infrastrukture so lahko zamašeni, poškodovani ali porušeni. Verjetne so motnje pri oskrbi z energijo in pitno vodo.	Hudourniški vodotoki lahko silovito narastejo in poplavlјo na širšem območju. Voda se zato lahko razlјe na neobičajnih mestih, kjer ta pojav ni pričakovana. Lokalno je lahko poplavlјeno večje število cest in objektov. Posamezni objekti vodne infrastrukture so lahko zamašeni, poškodovani ali porušeni.

Opomba: Za vse oznake stopnje nevarnosti velja, da se lahko tekom dogodka zaostrijo in prehajajo iz rumene v oranžno ali rdečo, ob hudourniških poplavah tudi iz zelene ali rumene v rdečo stopnjo nevarnosti.

Slika 30: Opis stopenj nevarnosti in možnih učinkov [vir podatkov: ARSO, 2023].

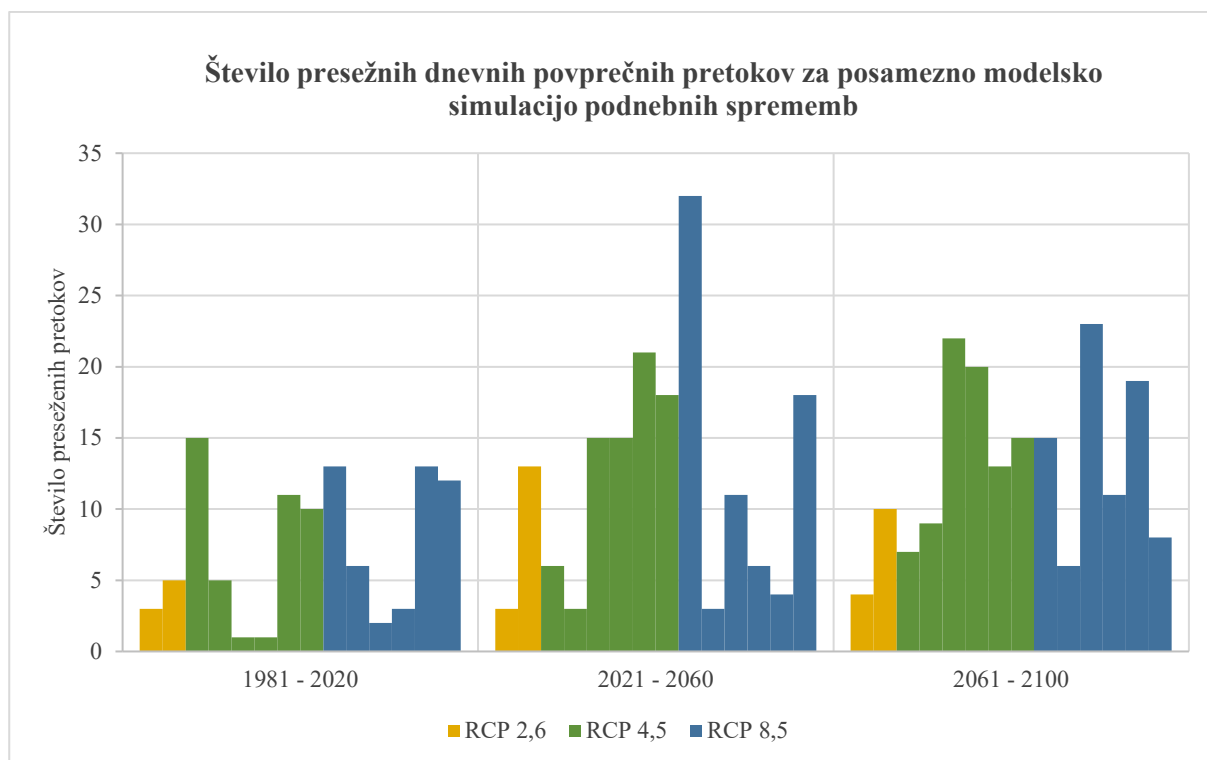
Na podlagi dobljenih rezultatov za posamezen scenarij in podatka, pri katerem pretoku Sava na vodomerni postaji Litija začne poplavlјati, smo analizirali presežne vrednosti povprečnih dnevnih pretokov, ki pomenijo poplavlјanje. Pred analizo smo preverili, kolikokrat se je ta dogodek dejansko zgodil v obdobju med letoma 1981 in 2010. Ugotovili smo, da se je v tem časovnem obdobju zgodil samo en dogodek, ki je presegel povprečno dnevno vrednost pretoka 1514 m³/s. V kolikor bi pri izračunu uporabili povprečne urne podatke, bi rezultati verjetno bili nekoliko drugačni vendar se razmerje med

posameznimi podnebnimi scenariji RCP ne bi spremenilo. Ekstremne urne vrednosti (konice) bi bile zagotovo višje.

Preglednica 9: Število presežnih povprečnih dnevni pretokov za posamezno simulacijo in scenarij podnebnih sprememb.

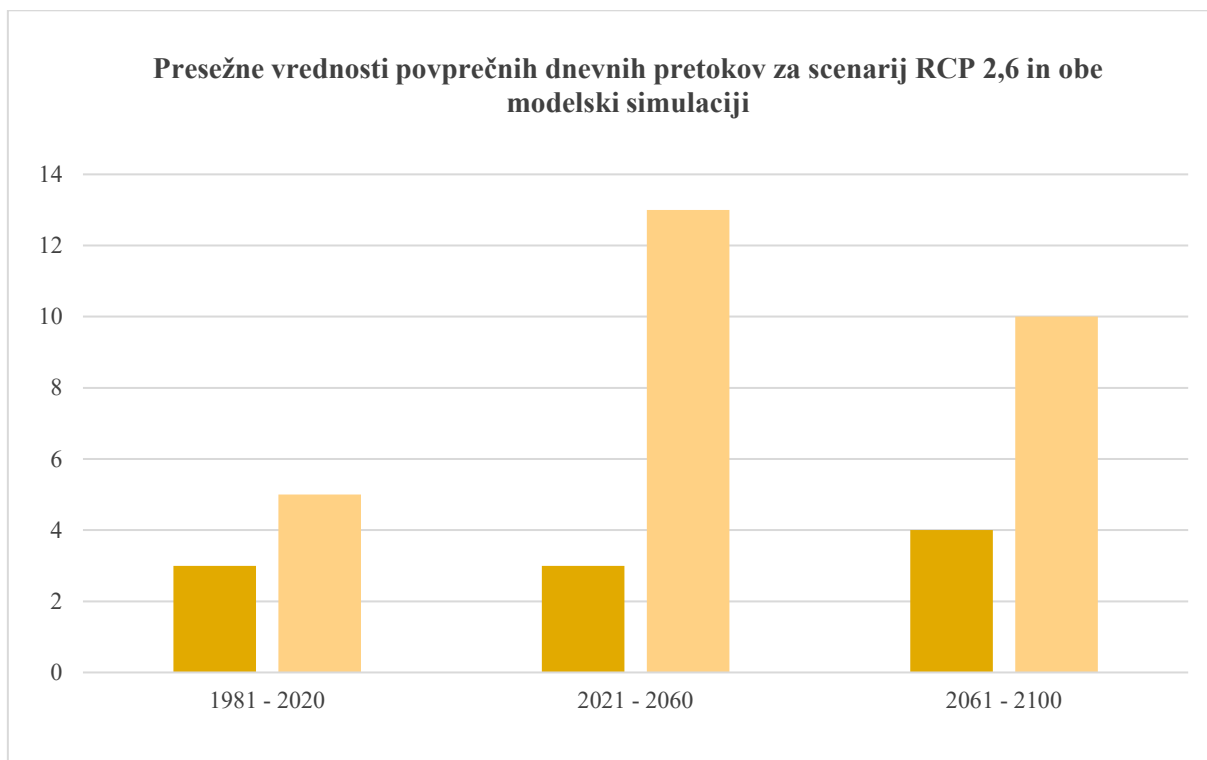
	RCP 2,6		RCP 4,5						RCP 8,5					
1981–2020	3	5	15	5	1	1	11	10	13	6	2	3	13	12
2021–2060	3	13	6	3	15	15	21	18	32	3	11	6	4	18
2061–2100	4	10	7	9	22	20	13	15	15	6	23	11	19	8

Preglednica 9 in slika 31 predstavljata presežne povprečne dnevne pretoke za posamezno obdobje in posamezno modelsko simulacijo. Rumeni stolpci predstavljajo scenarij RCP 2,6, zeleni predstavljajo scenarij RCP 4,5, modri pa scenarij RCP 8,5. Vsota presežnih vrednosti za posamezno obdobje ne predstavlja dejanskega števila presežnih pretokov, temveč je potrebno za vsak posamezen RCP scenarij izračunati mediano.

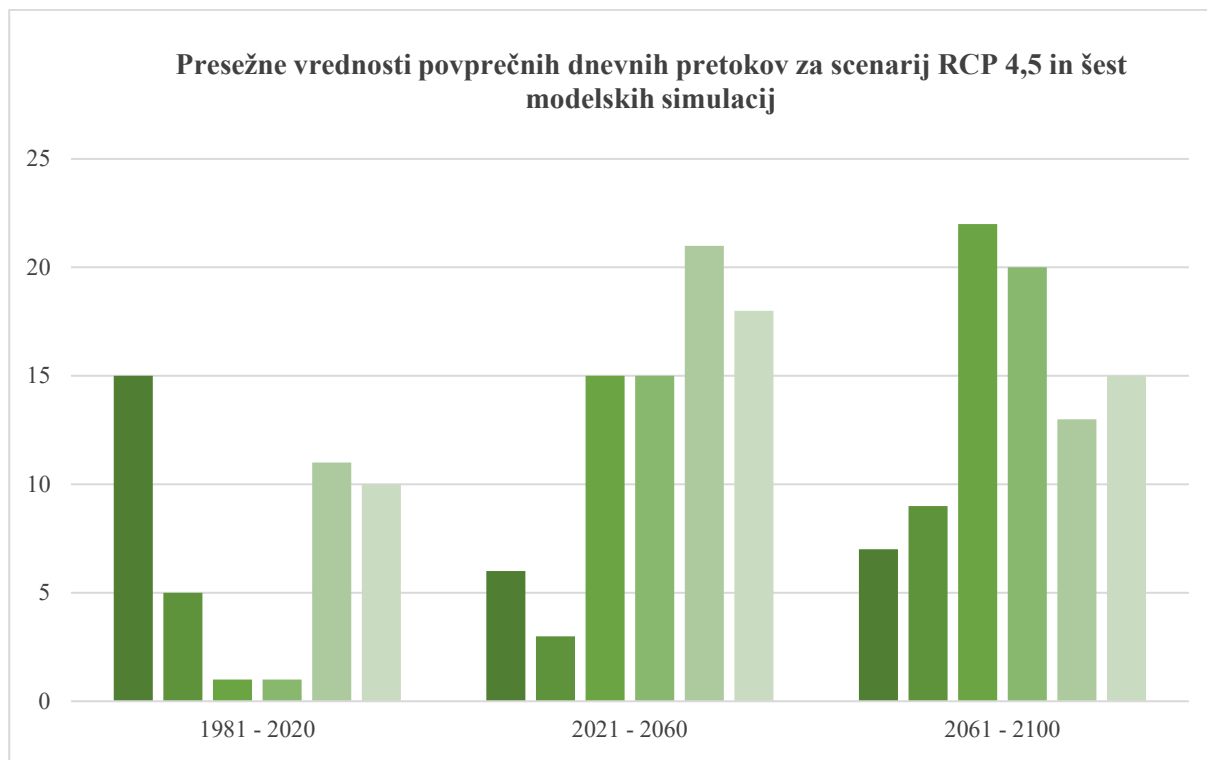


Slika 31: Grafični prikaz presežnih vrednosti dnevni povprečni pretokov za posamezen scenarij podnebnih sprememb.

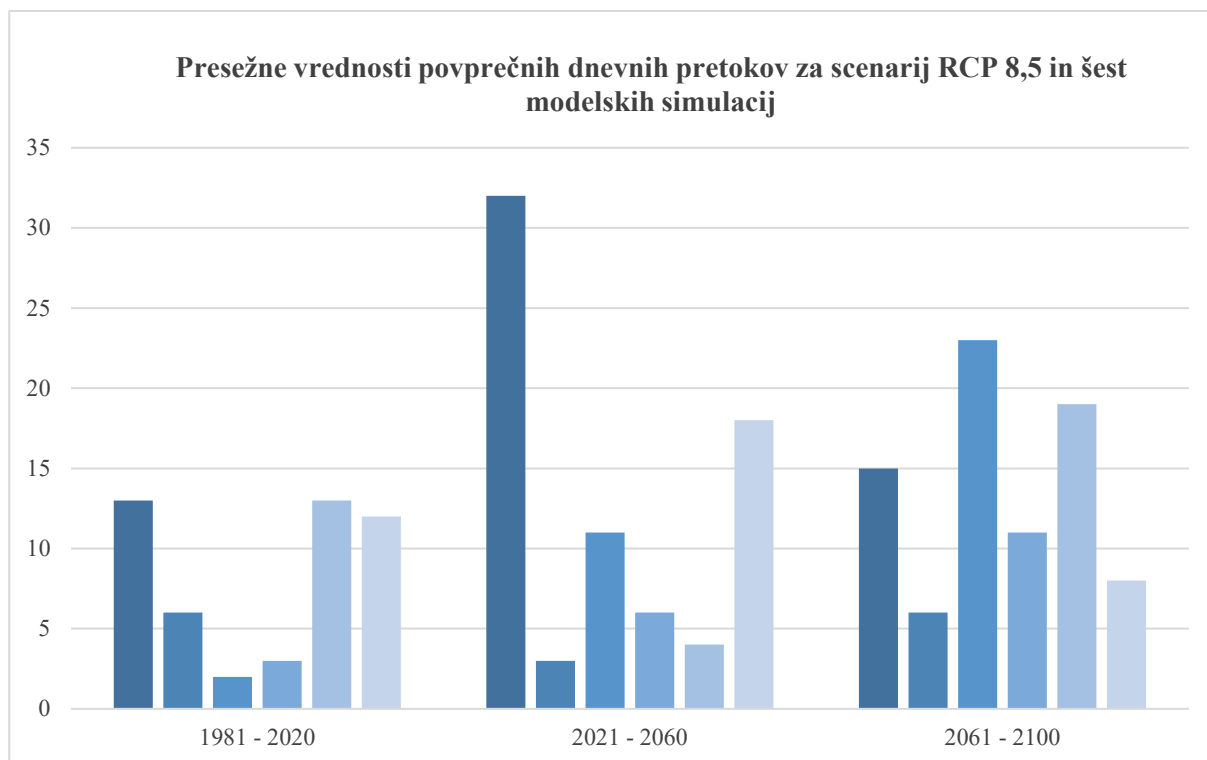
Izračun mediane je veliko bolj smiselno kot povprečna vrednost, saj z mediano ne upoštevamo ekstremnih vrednosti, tako minimalnih kot tudi maksimalnih. Pri izračunu povprečne vrednosti presežnega pretoka bi bilo visoko odstopanje upoštevano pri končni vrednosti. Na slikah 32, 33 in 34 so predstavljene presežne vrednosti povprečnih dnevnih pretokov za posamezen scenarij in vsa obdobja.



Slika 32: Prikaz števila presežnih vrednosti povprečnih dnevnih pretokov za RCP 2,6 in vsa obdobja.



Slika 33: Prikaz števila presežnih vrednosti povprečnih dnevnih pretokov za RCP 4,5 in vsa obdobja.

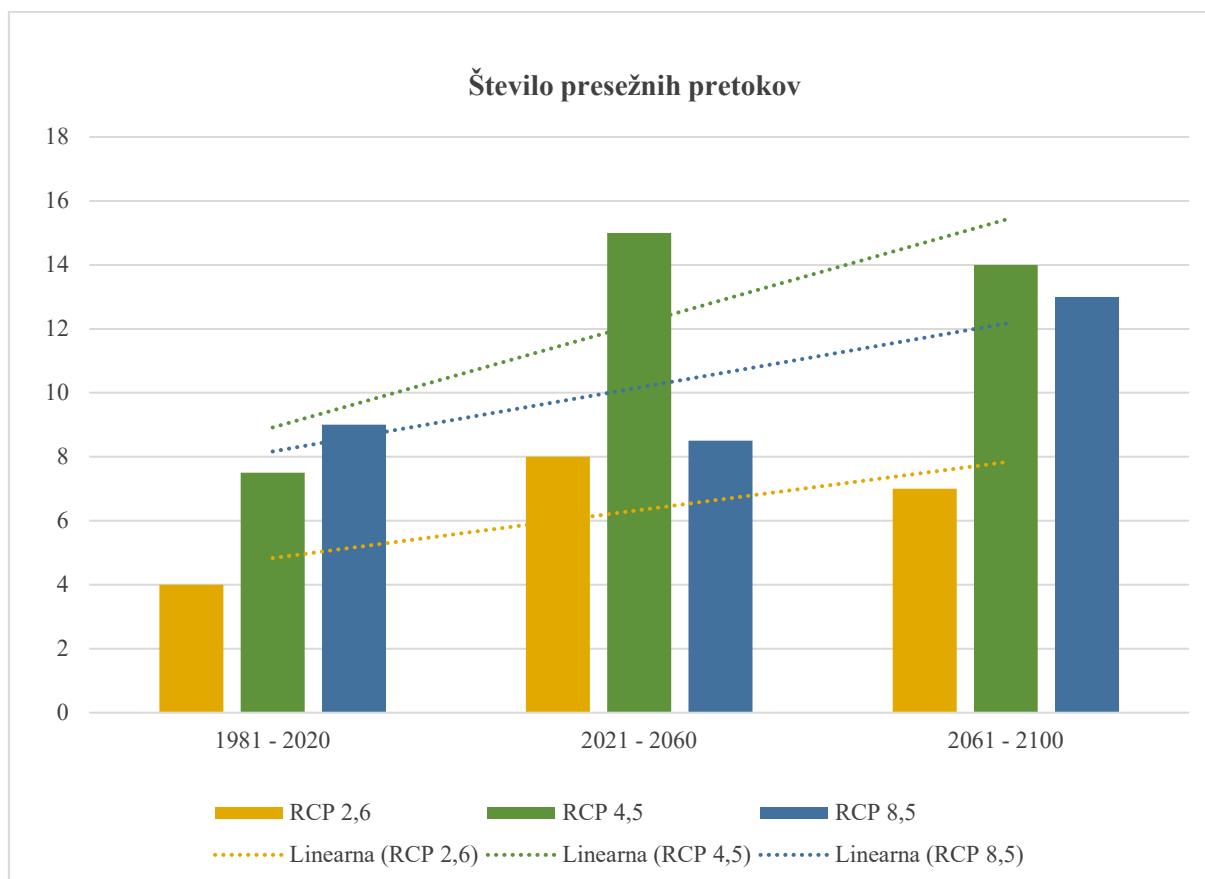


Slika 34: Prikaz števila presežnih vrednosti povprečnih dnevnih pretokov za RCP 8,5 in vsa obdobja.

Iz preglednice 10 in slike 35 je razvidno število pretokov, ki se pojavijo v določenem obdobju in presegajo vrednost $1514 \text{ m}^3/\text{s}$. Pričakovano je bilo, da se vsota presežnih pretokov po posameznih obdobjih povečuje. Tako vsota presežnih pretokov za obdobje 1981–2020 znaša 21, za obdobje 2021–2060 znaša 32 in za obdobje 2021–2060 znaša 34. Če pogledamo vsoto po scenarijih, opazimo, da se bo največ presežnih povprečnih dnevni pretokov za obdobje 1981–2100 pojavilo ob upoštevanju scenarija RCP 4,5, in sicer 37. Nekaj manj presežnih povprečnih dnevni pretokov se bo pojavilo ob upoštevanju scenarija RCP 8,5, in sicer 31, najmanj pa ob upoštevanju scenarija RCP 2,6, ki predvideva najstrožje omejevanje izpustov, in sicer 19. Vrednosti smo zaokrožili navzgor na celo število.

Preglednica 10: Mediana presežnih pretokov za posamezen scenarij: RCP 2,6, RCP 4,5 in RCP 8,5.

	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
1981–2020	4	8	9
2021–2060	8	15	9
2061–2100	7	14	13



Slika 35: Prikaz števila presežnih vrednosti pretokov za posamezno obdobje in posamezen scenarij.

4.1.1 Scenarij RCP 2,6

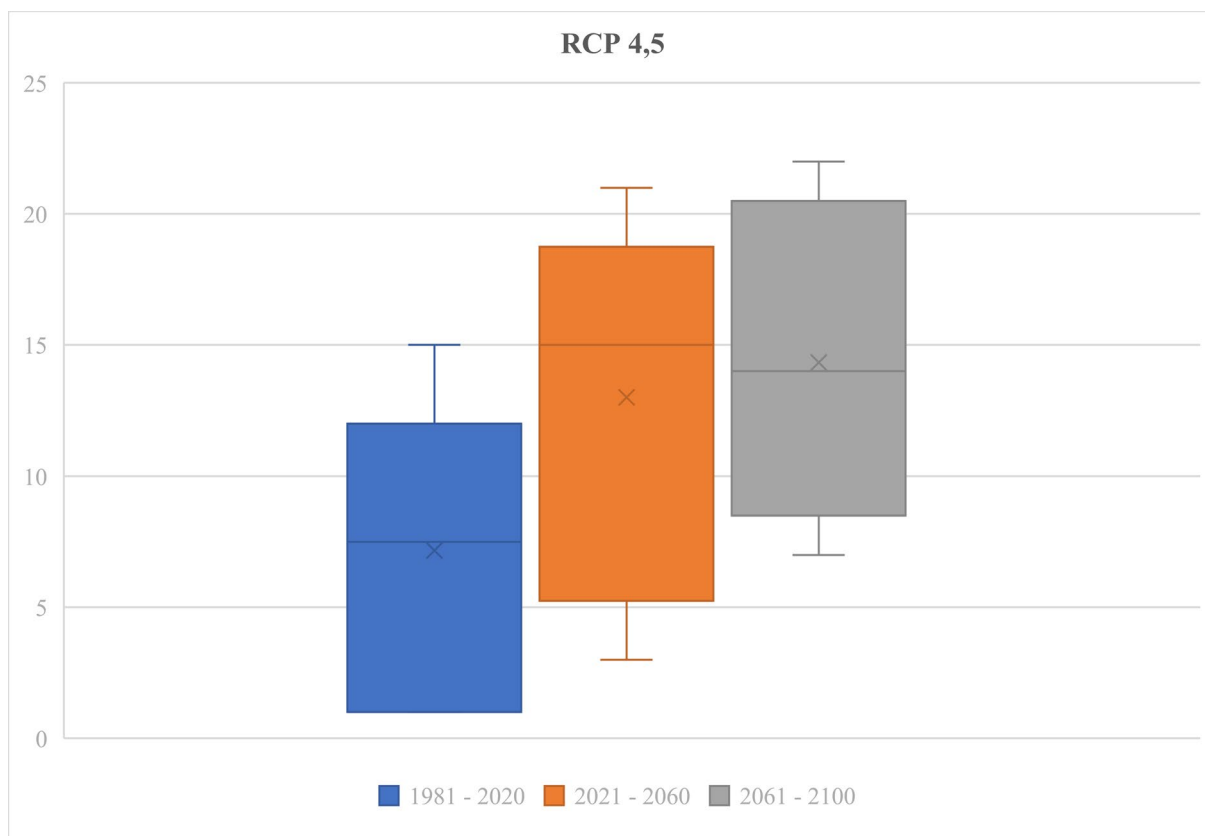
Pri scenariju RCP 2,6 smo končno število presežnih vrednosti dobili na podlagi dveh modelov. Za obdobje 1981–2020 mediana presežnih povprečnih dnevni pretokov znaša 4, kar pomeni, da se bo v povprečju tak pretok pojavil približno enkrat na 10 let. Za obdobje 2021–2060 mediana presežnih povprečnih dnevni pretokov znaša 8, kar pomeni, da se bo v povprečju tak pretok pojavil približno enkrat na 5 let. Za obdobje 2061–2100 mediana presežnih povprečnih dnevni pretokov znaša 7, kar pomeni, da se bo v povprečju tak pretok pojavil nekaj manj kot enkrat na 5 let.

4.1.2 Scenarij RCP 4,5

Pri scenariju RCP 4,5 smo končno število presežnih vrednosti dobili na podlagi šestih modelov, zato smo za predstavitev rezultatov uporabili okvir z ročaji, ki predstavlja minimalno vrednost, vrednost 1. kvartila, mediano, vrednost 3. kvartila ter maksimalno vrednost. Za obdobje 1981–2020 mediana presežnih povprečnih dnevni pretokov znaša 8, kar pomeni, da se bo v povprečju tak pretok pojavil približno enkrat na 5 let. Iz slike 36 lahko razberemo še, da sta v obdobju 1981–2020 minimalna vrednost ter vrednost 1. kvartila enaki in znašata 1. Vrednost 3. kvartila znaša 12, maksimalna vrednost pa znaša 15.

Za obdobje 2021–2060 mediana presežnih povprečnih dnevni pretokov znaša 15, kar pomeni, da se bo v povprečju tak pretok pojavil približno enkrat na 2,6 leta. Iz slike 36 lahko razberemo še, da v obdobju 2021–2060 minimalna vrednost znaša 3. Vrednost 1. kvartila znaša 5. Vrednost 3. kvartila znaša 19, maksimalna vrednost pa znaša 21.

Za obdobje 2061–2100 mediana presežnih povprečnih dnevni pretokov znaša 14, kar pomeni, da se bo v povprečju tak pretok pojavil nekaj manj kot enkrat na 2,8 leta. Iz slike 36 lahko razberemo še, da v obdobju 2061–2100 minimalna vrednost znaša 7. Vrednost 1. kvartila znaša 9. Vrednost 3. kvartila znaša 21, maksimalna vrednost pa znaša 22.



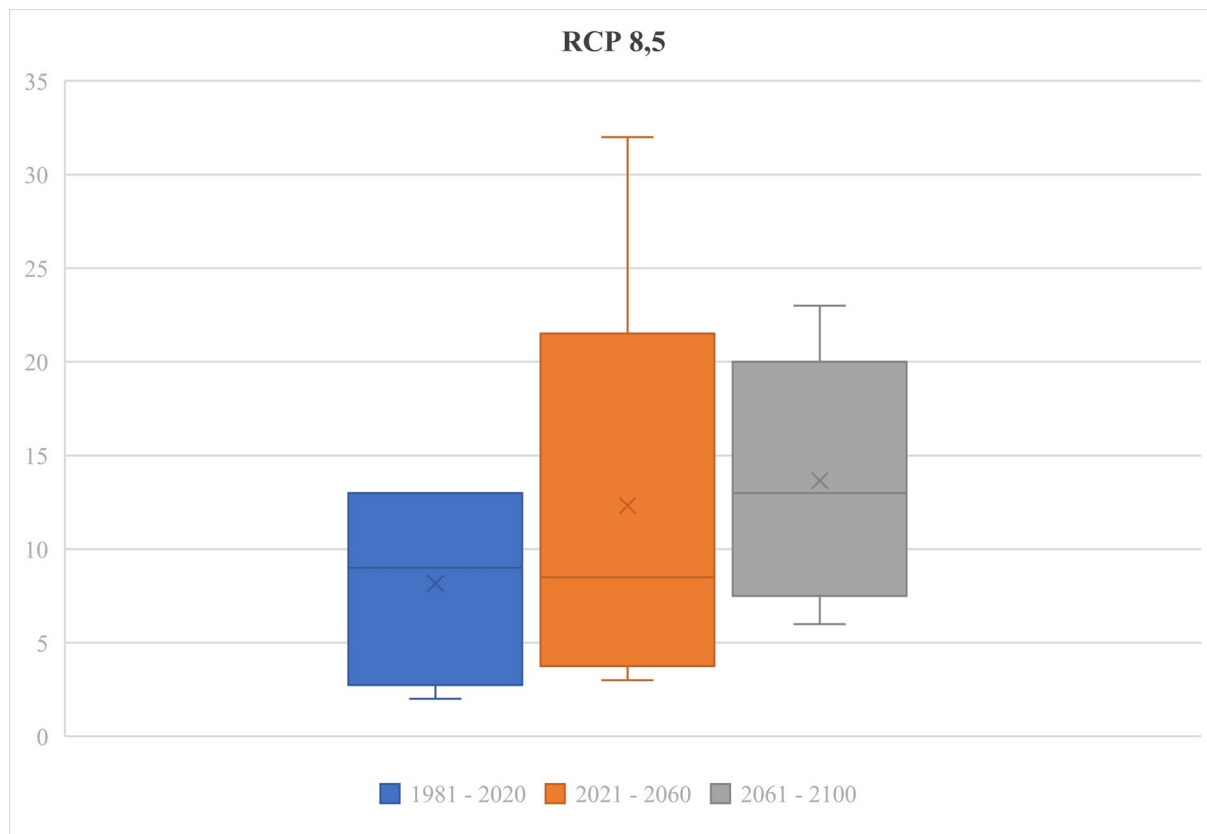
Slika 36: Prikaz minimalnih, maksimalnih povprečnih dnevni presežnih vrednosti pretoka ter prikaz vrednosti mediane, 1. kvartila ter 3. kvartila povprečnih dnevni presežnih vrednosti pretoka za scenarij RCP 4,5.

4.1.3 Scenarij RCP 8,5

Pri scenariju RCP 8,5 smo končno število presežnih vrednosti prav tako dobili na podlagi šestih modelov. Z uporabo okvirja z ročaji smo predstavili minimalno vrednost, vrednost 1. kvartila, mediano, vrednost 3. kvartila ter maksimalno vrednost. Za obdobje 1981–2020 mediana presežnih povprečnih dnevni pretokov znaša 9, kar pomeni, da se bo v povprečju tak pretok pojavil približno enkrat na 4,3 leta. Iz slike 37 lahko razberemo še, da v obdobju 1981–2020 minimalna vrednost znaša 2. Vrednost 1. kvartila znaša 3, vrednost 3. kvartila znaša 13, maksimalna vrednost pa znaša 13.

Za obdobje 2021–2060 mediana presežnih povprečnih dnevni pretokov znaša 9, kar pomeni, da se bo v povprečju tak pretok pojavil približno enkrat na 4,3 leta. Iz slike 37 lahko razberemo še, da v obdobju 2021–2060 minimalna vrednost znaša 3. Vrednost 1. kvartila znaša 4, vrednost 3. kvartila znaša 22, maksimalna vrednost pa znaša 32.

Za obdobje 2061–2100 mediana presežnih povprečnih dnevni pretokov znaša 13, kar pomeni, da se bo v povprečju tak pretok pojavil enkrat na 3 leta. Iz slike 37 lahko razberemo še, da v obdobju 2061–2100 minimalna vrednost znaša 6. Vrednost 1. kvartila znaša 8, vrednost 3. kvartila znaša 20, maksimalna vrednost pa znaša 23.



Slika 37: Prikaz minimalnih, maksimalnih povprečnih dnevni presežnih vrednosti pretoka ter prikaz vrednosti mediane, 1. kvartila ter 3. kvartila povprečnih dnevni presežnih vrednosti pretoka za scenarij RCP 8,5.

4.1.4 Absolutna in relativna razlika

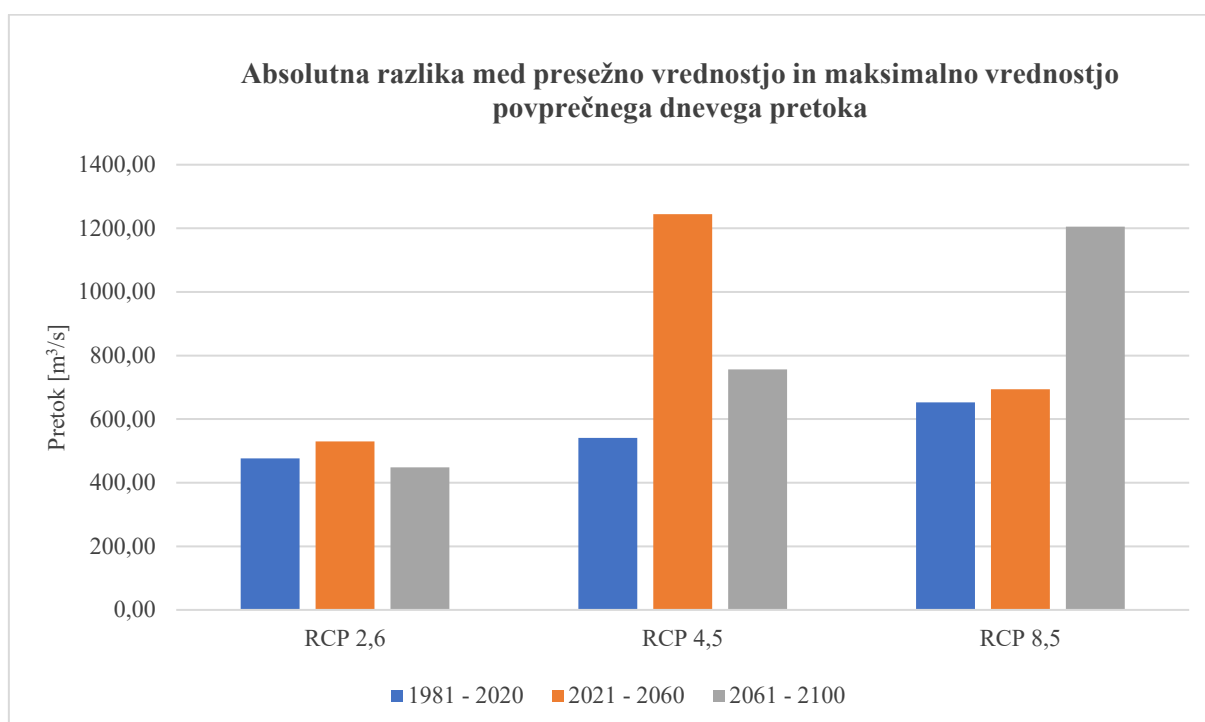
Dodatno smo analizirali tudi relativno in absolutno razliko povprečnih dnevni presežnih vrednosti pretoka. Za vseh 14 scenarijev in posamezno obdobje smo našli največji pretok, ki se pojavi. Drugi podatek, ki smo ga potrebovali, je minimalna vrednost pretoka nad presežno vrednostjo pretoka, ki znaša $1514 \text{ m}^3/\text{s}$.

Absolutna razlika

Absolutna razlika je vrednost razlike med presežno vrednostjo in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka. Izračunali smo mediano za vsak podnebni scenarij in obdobje posebej in dobili naslednje rezultate, prikazane v preglednici 11.

Preglednica 11: Tabelarni prikaz vrednosti absolutnih razlik med presežno vrednostjo in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka.

	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
1981–2020	476,91 m ³ /s	540,64 m ³ /s	652,63 m ³ /s
2021–2060	530,26 m ³ /s	1244,86 m ³ /s	693,84 m ³ /s
2061–2100	448,68 m ³ /s	755,84 m ³ /s	1205,56 m ³ /s



Slika 38: Grafični prikaz vrednosti absolutnih razlik med presežno vrednostjo in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka.

Na sliki 38 lahko opazimo, da se absolutna razlika med presežno vrednostjo in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka za posamezen scenarij povečuje, kar je pričakovano. Povečanje razlike pomeni, da se bodo ob poplavljanju reke Save na vodomerni postaji Litija pojavile višje povprečne dnevne konice, ki pomenijo še obsežnejše poplavljanje. Ob pretoku 1900 m³/s ARSO za vodomerno postajo Litija razglasi rdeči alarm, ki pomeni obsežne in silovite poplave. Hidrološke razmere so nad nivojem tega pretoka zelo nevarne. Na podlagi dodatne analize smo ugotovili, da se poplave s pretokom 1900 m³/s ali več v enem obdobju (npr. 2021–2060) pojavijo povprečno 3-krat.

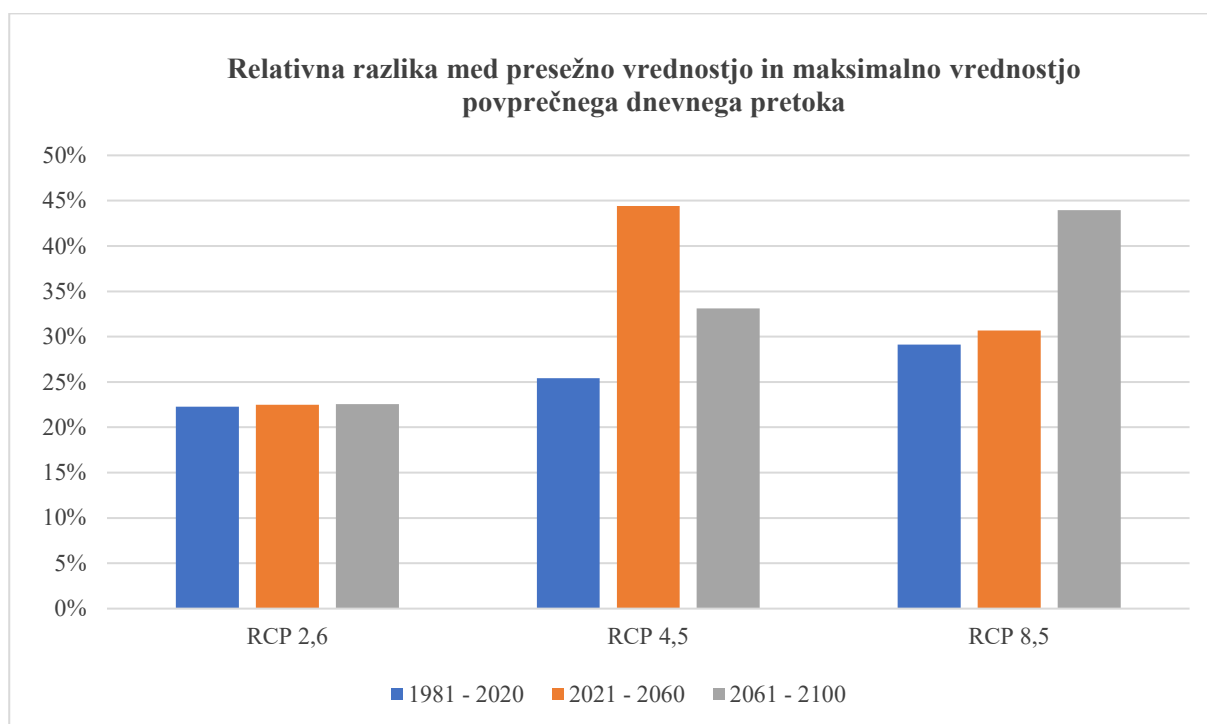
Hkrati pa lahko opazimo, da se povečanje absolutne razlike ne povečuje postopoma glede na različne podnebne scenarije, saj v obdobju 2021–2060 pri scenariju RCP 4,5 absolutna razlika presega absolutno razliko scenarija RCP 8,5 za obdobje 2061–2100.

Relativna razlika

Relativno razliko smo izračunali kot razmerje med razliko maksimalne vrednosti ter minimalne presežne vrednosti povprečnega dnevnega pretoka in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka (slika 39). Izračunali smo mediano za vsak podnebni scenarij in obdobje posebej in dobili naslednje rezultate (preglednica 12).

Preglednica 12: Tabelarni prikaz vrednosti relativnih razlik med razliko maksimalne vrednosti ter minimalne presežne vrednosti povprečnega dnevnega pretoka in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka.

	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
1981–2020	22%	25%	29%
2021–2060	22%	44%	31%
2061–2100	23%	33%	44%



Slika 39: Grafični prikaz vrednosti relativnih razlik med razliko maksimalne vrednosti ter minimalne presežne vrednosti povprečnega dnevnega pretoka in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka.

4.1.5 Analiza presežnih pretokov po letnih časih

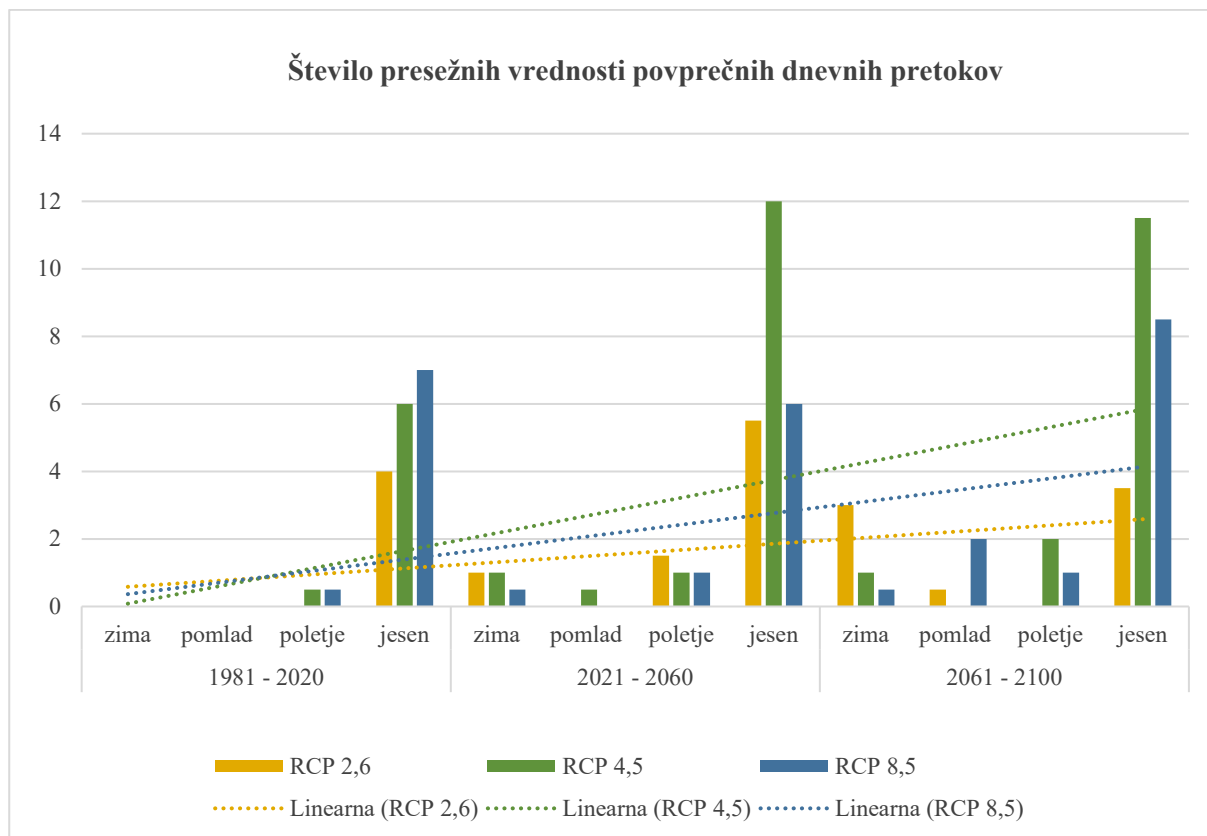
Podrobneje kot pri analizi presežnih pretokov smo želeli z dodatno razdelitvijo na letne čase ugotoviti frekvenco pojavljanja presežnih pretokov po letnih časih. Določitev najbolj nevarnega letnega časa z vidika poplav je lahko pomemben del pred pripravo na dejanske poplave. Organizacija pristojnih

institucij za zaščito državljanov pred naravnimi nesrečami ter informiranje vsesplošnega prebivalstva o prihajajočih nevarnostih ima lahko pozitivne družbene in tudi gospodarske vplive.

Podobno kot pri osnovni analizi presežnih pretokov smo na podlagi dobljenih rezultatov za posamezen scenarij in podatka o pretoku, pri katerem Sava na vodomerni postaji Litija začne poplavlјati, ter določenih letnih časih analizirali presežne vrednostni povprečnega dnevnega pretoka. Vsakemu dnevu za obdobje med 1981 in 2100 smo pripisali letni čas, v katerega spada. Uporabili smo astronomsko opredelitev letnih časov, ki se nanaša na enakonočja in solsticije. Zimsko obdobje tako traja od 21. decembra do 20. marca, spomladansko obdobje traja od 21. marca do 20. junija, od 21. junija do 22. septembra je poletno obdobje, jesensko obdobje pa traja od 23. septembra do 20. decembra. Podobno kot pri predhodni analizi smo pogledali, kolikokrat se je presežni pretok zgodil za določen RCP scenarij, s tem da smo mu sedaj pripisali še letni čas. Tako smo lahko dodatno razvrstili pojavnost presežnih pretokov tudi po letnih časih za posamezen scenarij in predhodno definirana obdobja, kot je razvidno iz preglednice 13.

Preglednica 13: Prikaz števila presežnih vrednosti povprečnih dnevnih pretokov za posamezno obdobje in letni čas ter posamezen scenarij.

		RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
1981–2020	zima	0	0	0
	pomlad	0	0	0
	poletje	0	1	1
	jesen	4	6	7
2021–2060	zima	1	1	1
	pomlad	0	1	0
	poletje	2	1	1
	jesen	6	12	6
2061–2100	zima	3	1	1
	pomlad	1	0	2
	poletje	0	2	1
	jesen	4	12	9



Slika 40: Prikaz števila presežnih vrednosti povprečnih dnevnih pretokov za posamezno obdobje in letni čas ter posamezen scenarij.

Na sliki 40 lahko opazimo, da se velika večina presežnih pretokov zgodi jeseni. Gledano sumarno za vsa obdobja in vse scenarije RCP se v jeseni pojavi 64 presežnih pretokov, poleti 8 presežnih pretokov, spomladi se pojavi najmanj presežnih pretokov, in sicer 3, 7 presežnih pretokov pa se pojavi v zimskem času.

Pri vseh scenarijih lahko opazimo tudi trend naraščanja presežnih pretokov, kar sicer sovпада z našimi pričakovanji. Nekoliko od pričakovanj odstopa dejstvo, da se presežni pretoki najbolj povečajo za scenarij RCP 4,5, ki sicer ni najslabši scenarij, ima pa predvidene ukrepe za zmanjševanje izpustov toplogrednih plinov.

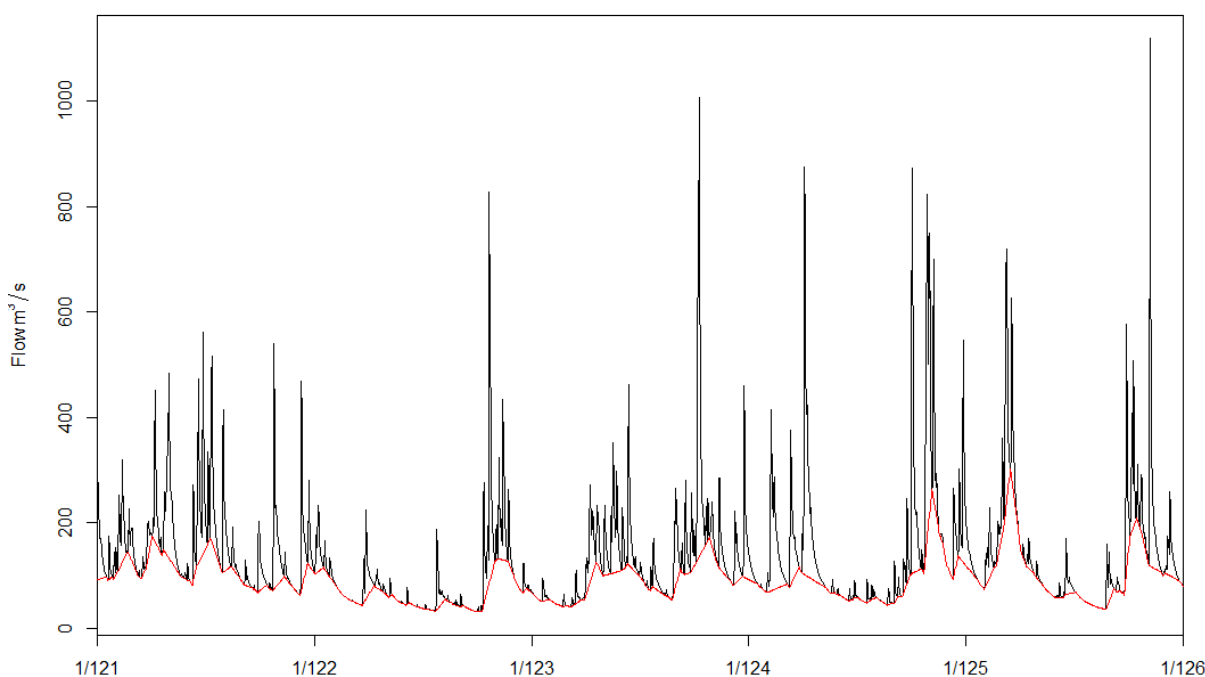
4.2 Analiza nizkih pretokov

Nizek pretok je v mednarodnem hidrološkem slovarju definiran kot pretok vode v strugi med daljšim časovnim obdobjem suhega vremena (WMO, 2012). Za opis nizkih pretokov se uporabljajo številni indeksi. Eden izmed mogočih indeksov je tudi kot najnižji 7-dnevni povprečni pretok (7Q10), ki se v povprečju pojavi enkrat na 10 let. Tovrstni podatek o pretoku se uporablja predvsem pri projektiranju urejanja vodotokov (EPA, 2023). Po navedbah Smakhtina je pretok 7Q10 močno povezan s pretokom Q95 (Smakhtin, 2001), ki je bil tudi eden izmed predmetov naše analize.

Poznamo več vrst suš, na primer meteorološko, kmetijsko, hidrološko sušo. Običajno je suša definirana kot pomanjkljiva razpoložljivost vode za različne uporabne namene. Na pretoke tako vplivajo padavine in taljenje snega, namembnost tal, vodni objekti, kot so jezovi, pregrade, vodni odvzemi in izpusti v vodotok, ter geološke značilnosti tal (EPA, 2023). Meteorološka suša je definirana kot dolgotrajna odsotnost oz. izrazito pomanjkanje padavin (WMO, 2012), hidrološka suša pa je pojmovana kot zniževanje gladin v jezerih, nižanje gladine podtalnice in zmanjšanje pretokov v vodotokih (Smakhtin, 2001).

Nizek pretok je običajno sezonski pojav vsakega vodotoka in je pomembna komponenta pretočnega režima. Po drugi strani pa je suša posledica odsotnosti ali pomanjkanje padavin v daljšem časovnem obdobju. V sušnih obdobjih imamo tako lahko nizke pretoke, sezonski ponavljajoči se nizki pretoki pa hkrati ne pomenijo tudi suše (EPA, 2023).

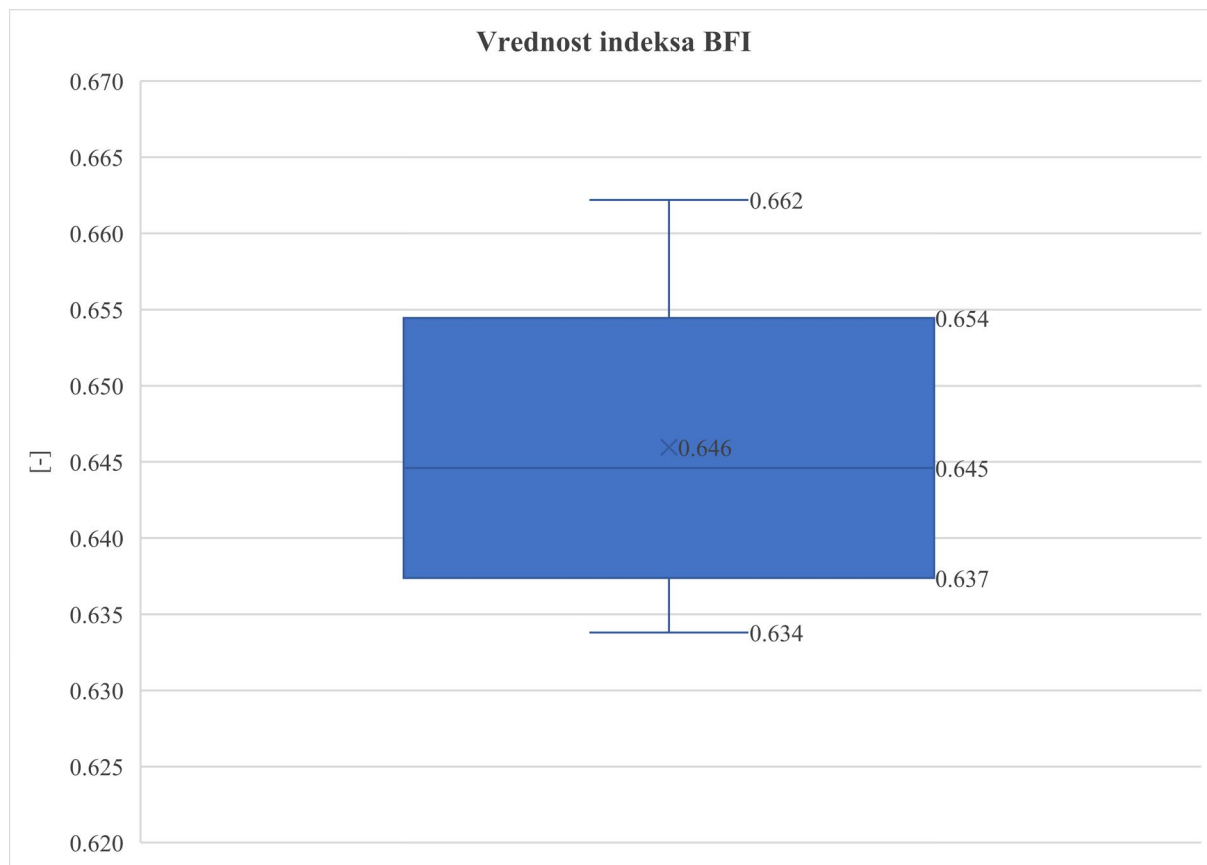
Pri analizi nizkih pretokov smo zopet uporabili program R ter programski paket *lfstat*, ki je v pomoč pri izračunu statistik nizkega pretoka na podlagi dnevnih podatkov o pretoku (vir: Package 'lfstat'). Podobno kot pri konicah povprečnih dnevni pretokov na reki Savi smo tudi tukaj analizo najprej opravili za vsak podnebni scenarij in model znotraj scenarija posebej. Z ukazom *as.POSIXct* in *zoo* smo določili način zapisa ter lokacijo datuma in podatka o pretoku v pripadajoči tabeli. V naslednjem koraku smo z ukazom *createlfobj* izbrali pripravljene vrednosti iz prejšnjega koraka ter jim določili čas začetka analize, hkrati pa smo določili tudi začetek hidrološkega leta. V našem primeru smo hidrološko leto začeli s 1. januarjem, čeprav je po navadi izbran interval od 1. 10. do 30. 9. naslednje leto.



Slika 41: Prikaz hidrograma ter baznega odtoka za prvi model scenarija RCP 2,6.

Na sliki 41 je prikazan hidrograma za obdobje med 1. 1. 2021 in 31. 12. 2025. Z rdečo je na hidrogramu označen bazni odtok, ki je bil ocenjen glede na metodologijo WMO (WMO, 2012).

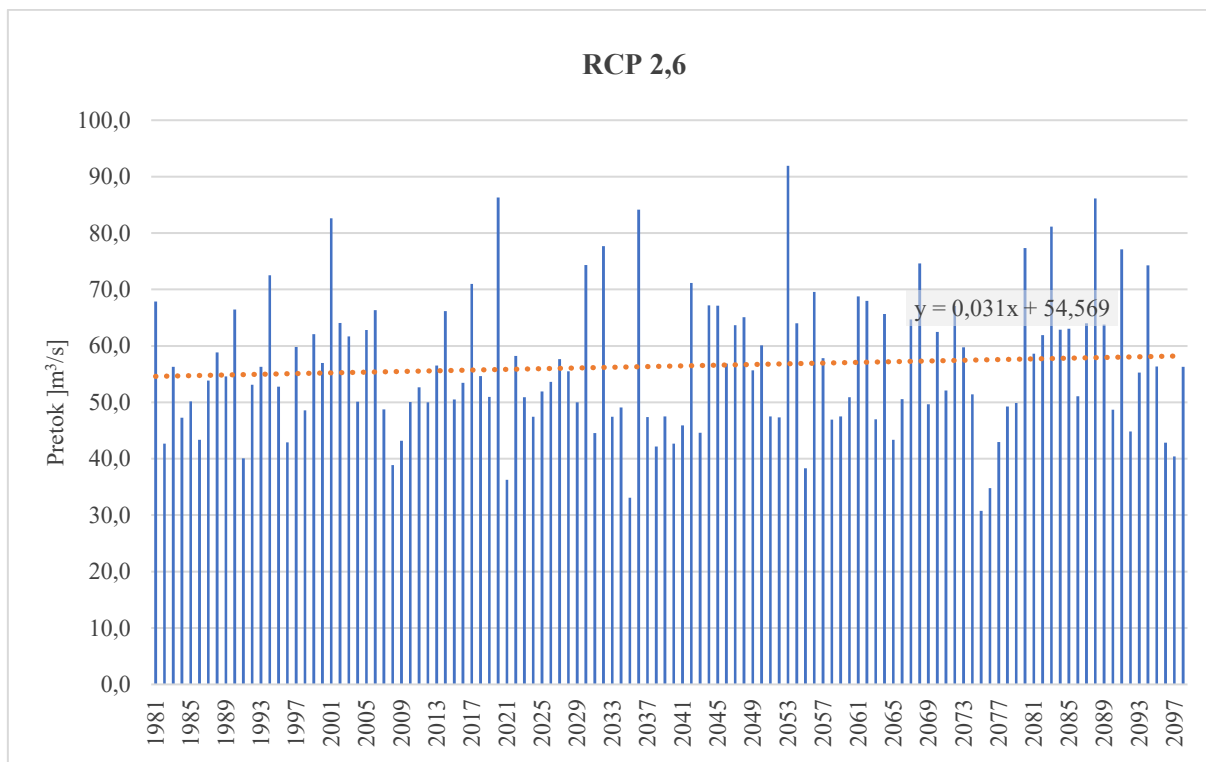
Bazni odtok je sestavni del površinskega odtoka in predstavlja del pretoka vode, ki teče po strugi vodotoka po daljšem obdobju brez dežnih ali snežnih padavin. Je tok, ki je v veliki večini napajan preko podtalnice, iztokov iz jezer ter taljenja snega in ledenikov (WMO, 2012). Indeks baznega odtoka (BFI) nam pove, kakšno je razmerje med baznim odtokom ter celotnim odtokom. V našem primeru je mediana povprečne vrednosti BFI za vsak posamezni model RCP in celotno obdobje 1981–2100 znašala 0,64 in ni pomembno odstopala od vrednosti prvega in tretjega kvartila ter minimalne in maksimalne vrednosti, (slika 42), zato nadaljnjih analiz nismo izvajali. V nadaljevanju smo se osredotočili predvsem na analizo dveh statistik; Q95 in MAM7.



Slika 42: Minimalna in maksimalna vrednost, vrednost mediane ter vrednost 1. ter 3. kvartila BFI za vse RCP in celotno obdobje 1981–2100.

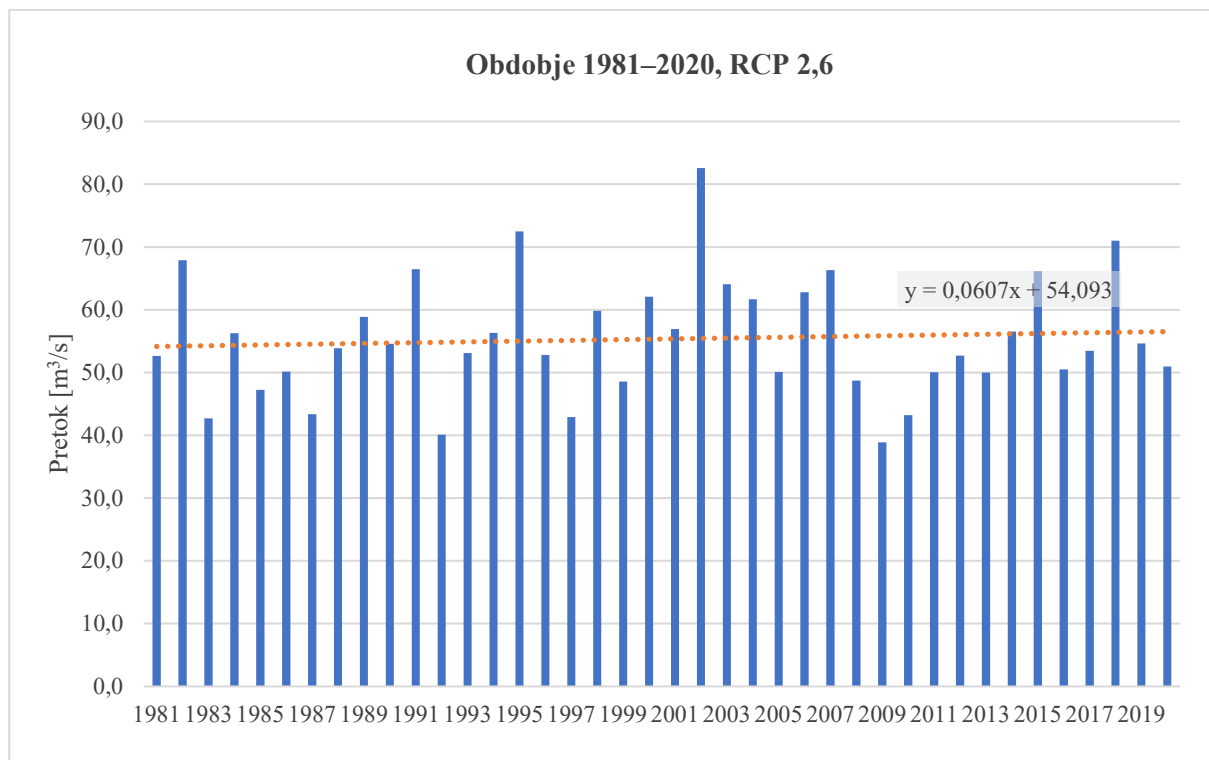
4.2.1 Analiza pretoka Q95

Q95 je pretok, ki je presežen 95% obravnavanega časa trajanja (Koch et al., 2018).

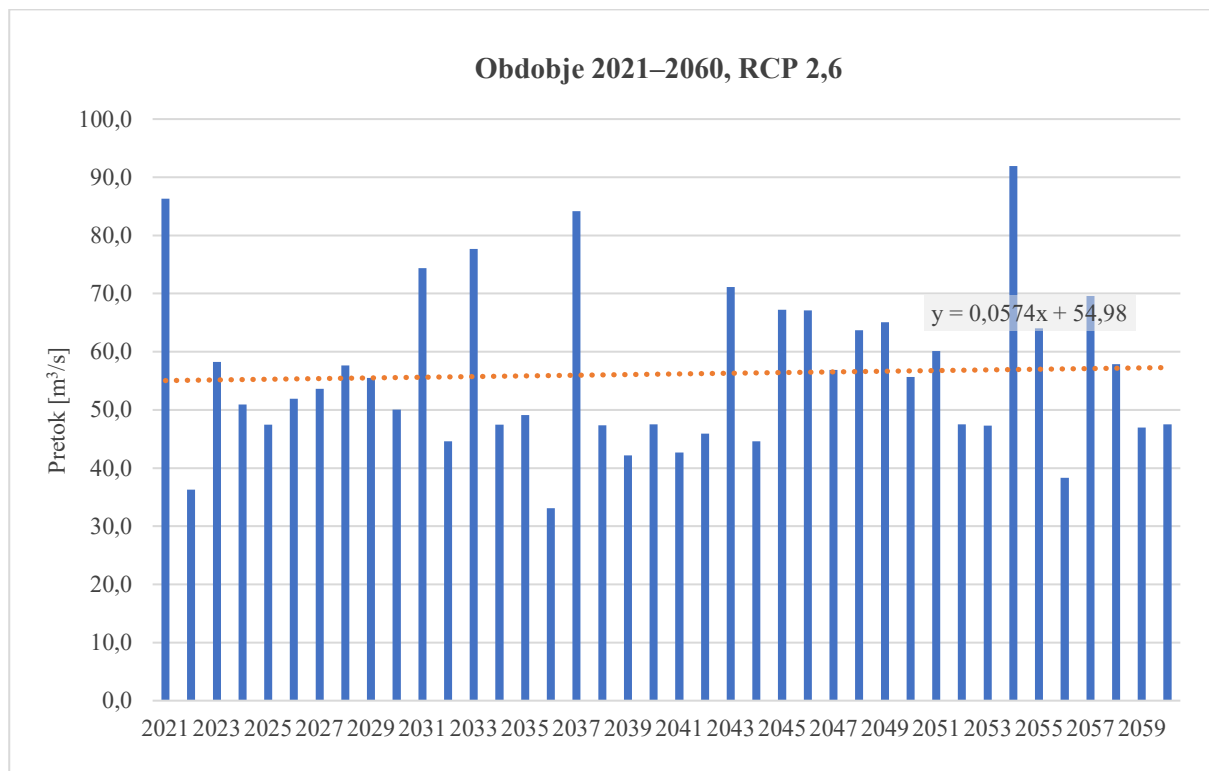


Slika 43: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2100 in RCP 2,6.

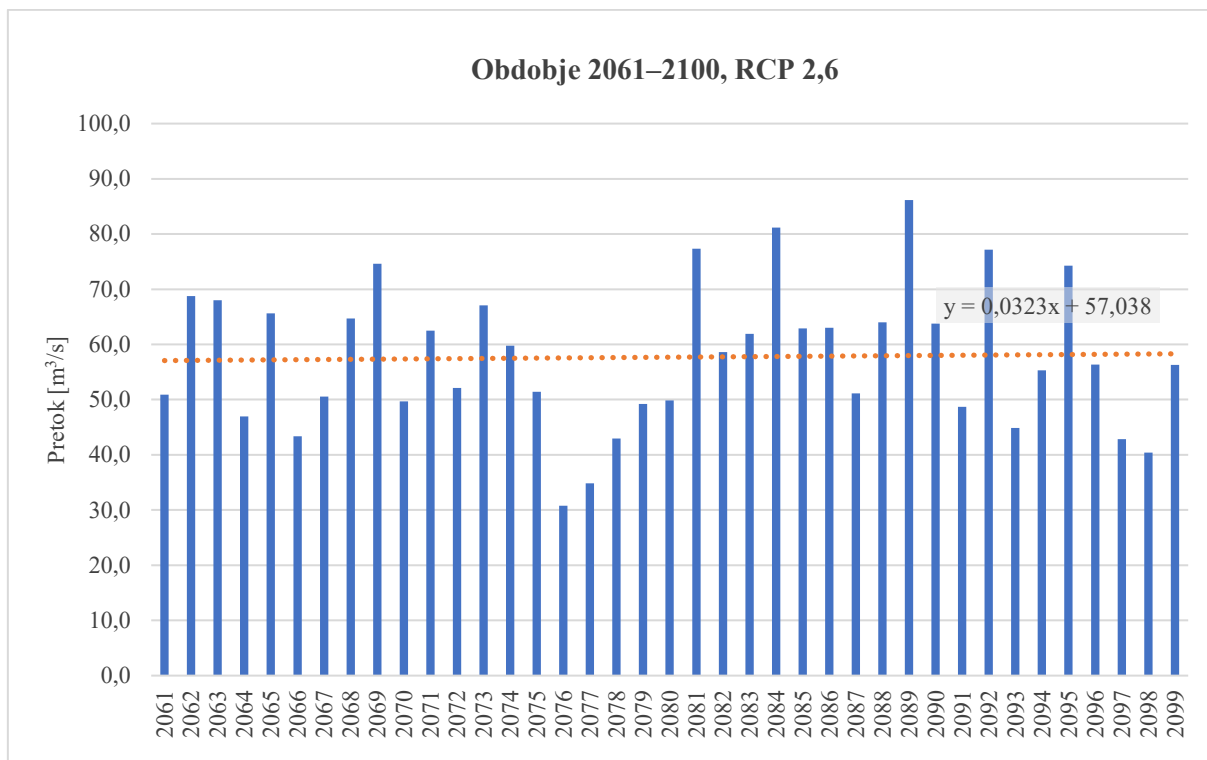
Pri scenariju RCP 2,6 smo rezultate na podlagi dveh modelov. Najprej smo se osredotočili na analizo povprečnega letnega pretoka Q95. Na sliki 43 je predstavljena povprečna letna vrednost pretoka Q95 v obdobju 1981–2100 in scenarij RCP 2,6. Opazimo lahko, da je trend nizkih pretokov v naraščanju, kar je sicer v nasprotju z našo hipotezo 2. Dodatno smo analizo naredili za posamezna obdobja, kot je razvidno na slikah 44, 45 in 46. Iz vseh treh grafov lahko opazimo, da je trend višanja nizkih pretokov Q95, kar v primeru RCP 2,6 ni presenetljivo, saj le ta predvideva takojšnje in drastično ukrepanje pri izpustih toplogrednih plinov.



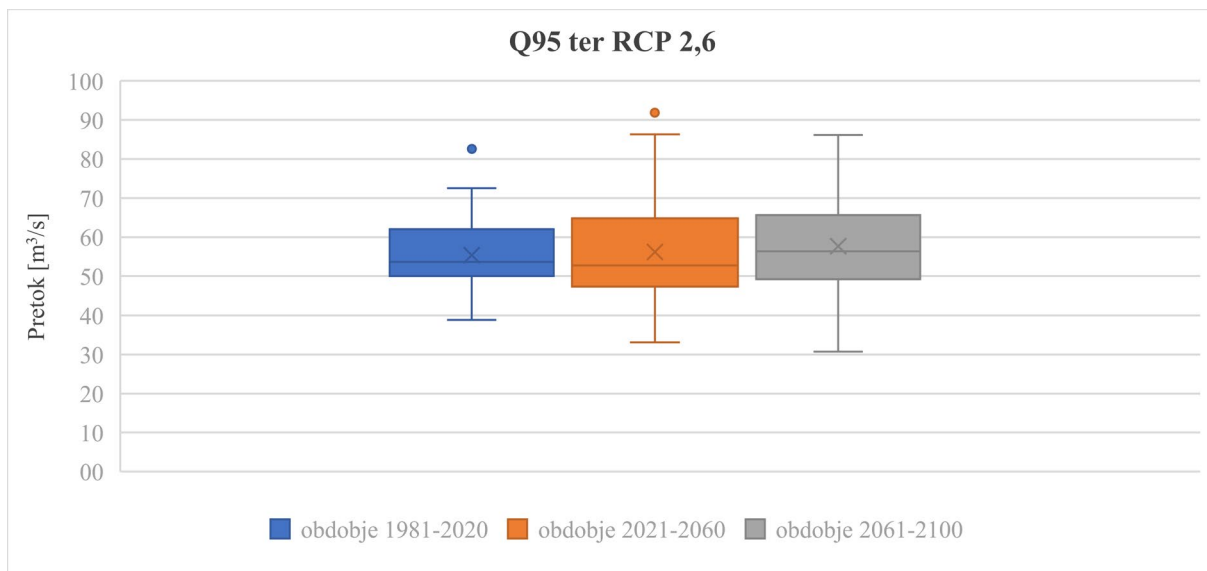
Slika 44: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2020 in RCP 2,6.



Slika 45: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2021–2060 in RCP 2,6.



Slika 46: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2061–2100 in RCP 2,6.



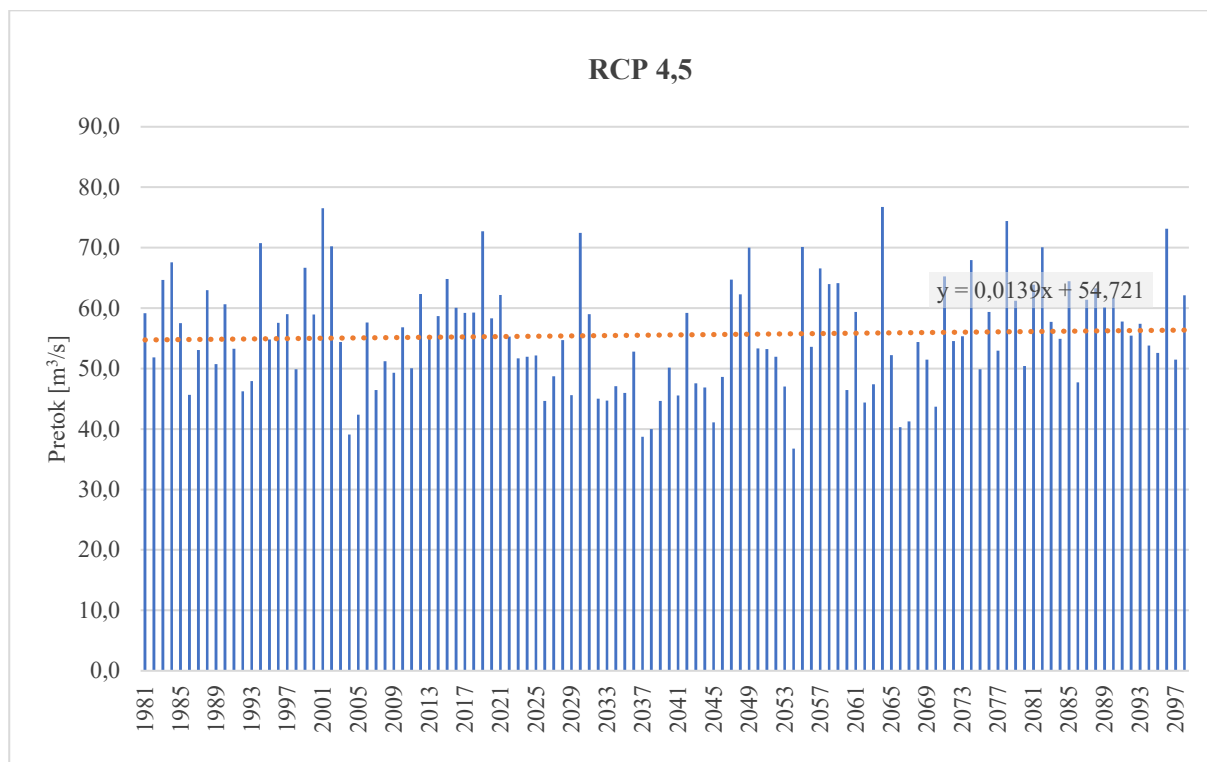
Slika 47: Graf kvartilov za pretok Q95 in RCP 2,6 ter posamezno obdobje.

Na sliki 47 lahko vidimo, da so mediane za posamezno obdobje v trendu naraščanja, kar potrdi sliko 43, da pretok Q95 skozi vsa obdobja narašča. Odstopanje mediane za obdobje 2021–2060 ne spremeni trenda. Hkrati lahko opazimo, da se vrednosti prvega in tretjega kvartila ter minimalne kot maksimalne vrednosti za posamezno obdobje večajo, kar pomeni večji raztros podatkov. Če primerjamo obdobji 1981–2020 ter 2021–2060 lahko opazimo, da je mediana obdobja 2021–2060 nižja za cca. 1 m³/s.

Absolutna razlika prvega in tretjega kvartila je v obdobju 2021–2060 večja od predhodnega obdobja. Opazimo lahko tudi, da imamo v obdobjih 1981–2020 in 2021–2060 dva osamelca (*ang. outliers*), ki izpadeta iz grafa kvartilov. Podatek izpade iz dosega okvirjev, v kolikor je njegova vrednost večja od 1,5-kratne vrednosti razlike tretjega in prvega kvartila.

Iz obdobj 1981–2020 in 2061–2100 lahko razberemo, da se mediana v zadnjem obdobju poveča za cca. 2,5 m³/s. Prav tako se poveča absolutna razlika prvega in tretjega kvartila.

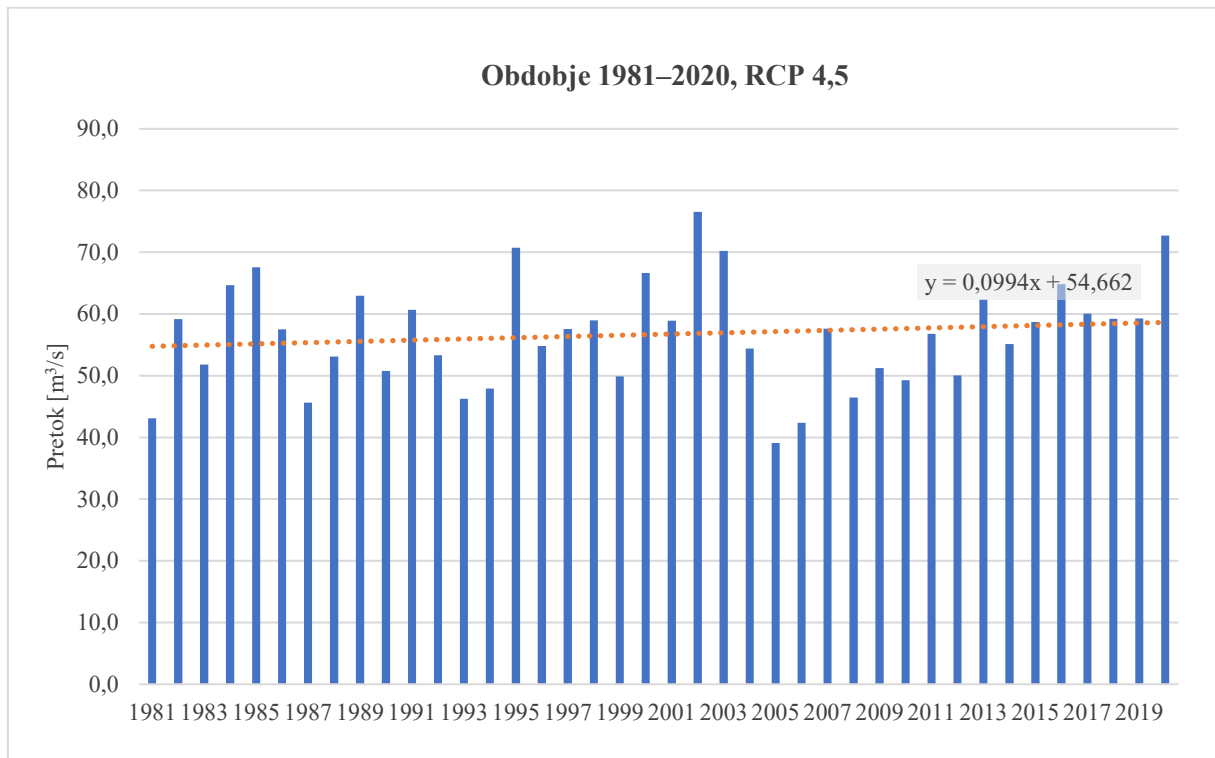
Glede na to, da je trend raztrosa podatkov v naraščanju, pomeni, da lahko z manjšo stopnjo verjetnosti napovemo, kako nizek pretok se bo zgodil v določenem obdobju. Ker sta znotraj scenarija RCP 2,6 samo dva modela, na katerih smo računali nove pretoke, so rezultati načeloma najmanj zanesljivi.



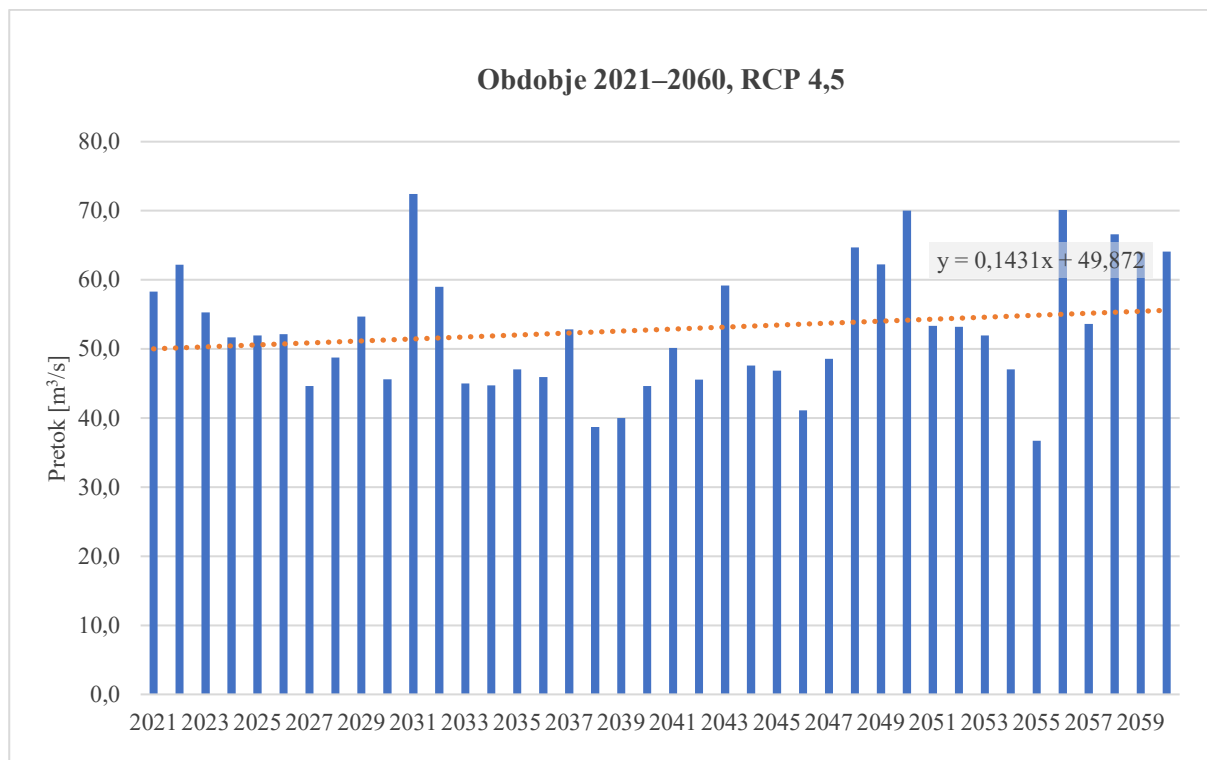
Slika 48: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2100 in RCP 4,5.

Pri scenariju RCP 4,5 smo rezultate dobili na podlagi šestih modelov. Na sliki 48 je predstavljena povprečna letna vrednost pretoka Q95 v obdobju 1981–2100 in scenarij RCP 4,5. Opazimo lahko, da je trend nizkih pretokov v naraščanju, podobno kot je bilo to v predhodnem primeru RCP 2,6. Dodatno smo opravili analizo za posamezna obdobja, kot je razvidno na slikah 49, 50 in 51. Iz vseh treh grafov lahko opazimo, da je trend višanja nizkih pretokov Q95. Na slikah 43 (RCP 2,6) in 48 (RCP 4,5) lahko opazimo, da je naklon trendne črte pri RCP 4,5 nekoliko manjši kot pri RCP 2,6. Smerni koeficient trendne črte pri RCP 2,6 znaša 0,031, pri RCP 4,5 pa znaša 0,0139, kar pomeni bolj strmo naraščanje

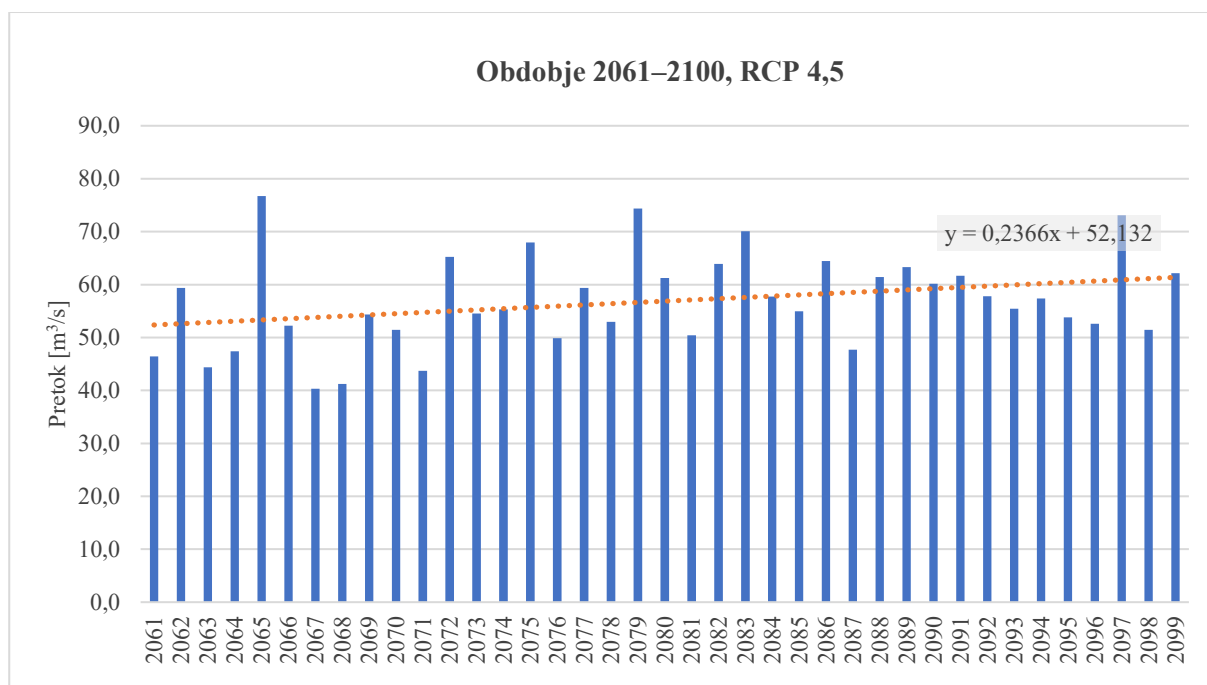
povprečnih letnih vrednosti pretoka pri scenariju RCP 2,6. Poleg tega pa lahko opazimo tudi podobne nivoje pretokov Q95 pri obeh scenarijih.



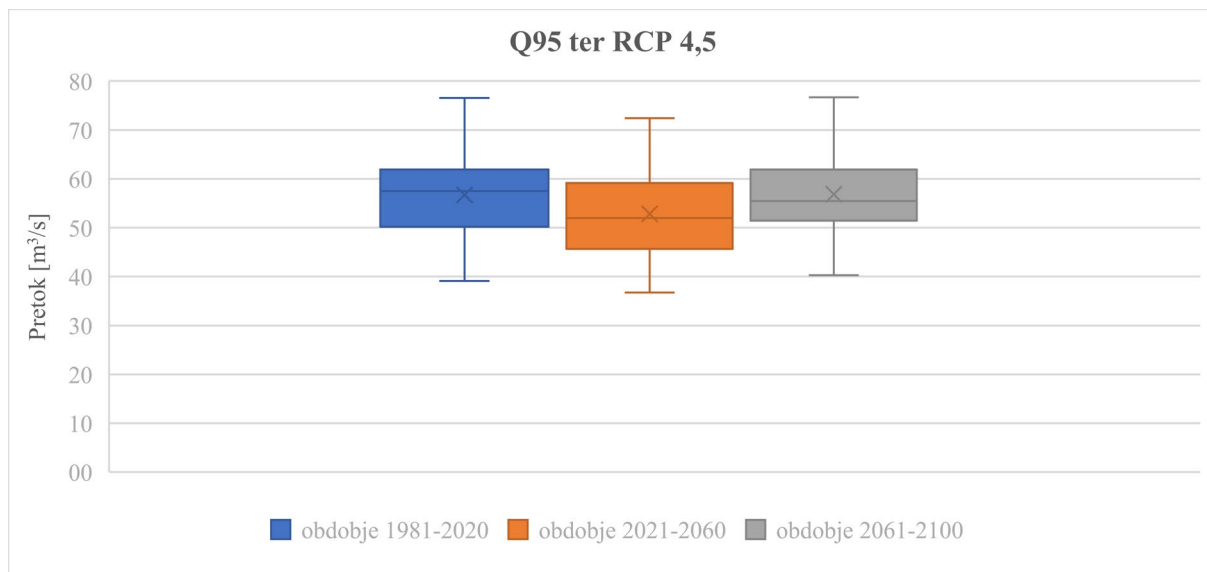
Slika 49: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2020 in RCP 4,5.



Slika 50: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2021–2060 in RCP 4,5.

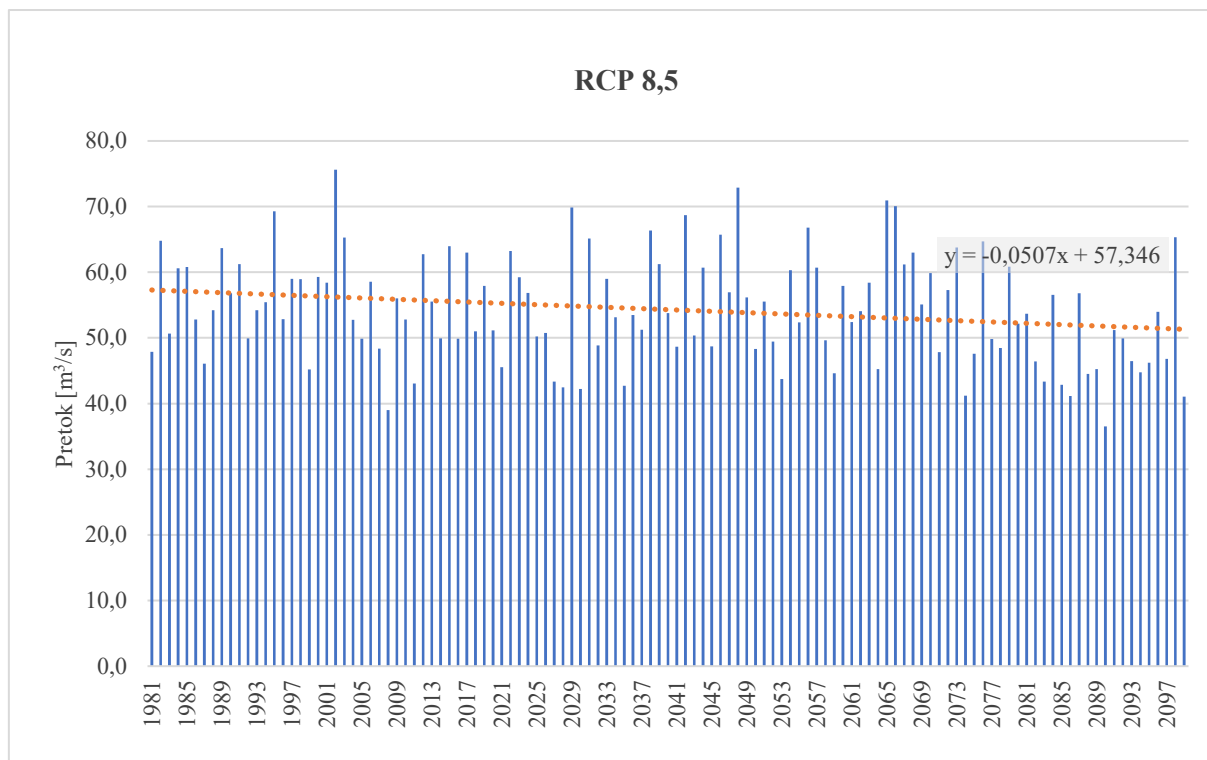


Slika 51: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2061–2100 in RCP 4,5.



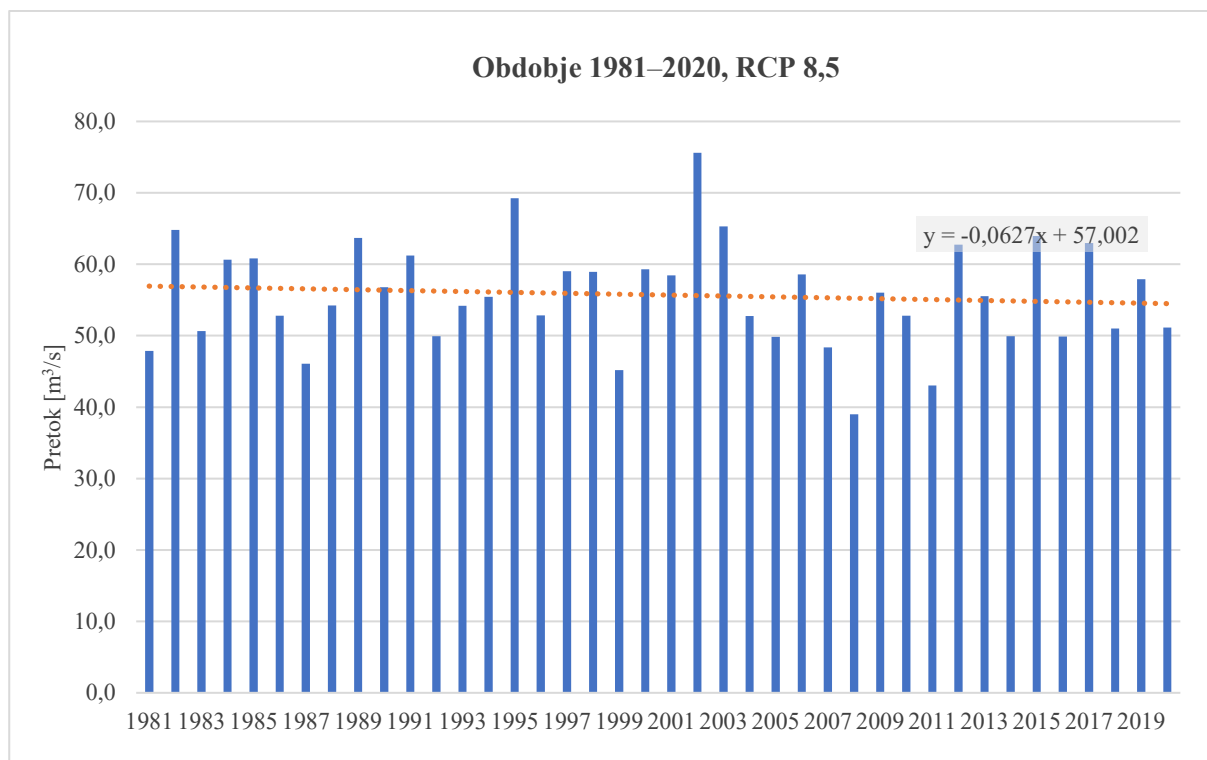
Slika 52: Graf kvartilov za pretok Q95 in RCP 4,5 ter posamezno obdobje.

Na sliki 52 lahko vidimo, da je mediana za obdobje 2021–2060 nižja kot za obdobje 1981–2020. Podobno velja tudi za mediano pri obdobju 2061–2100, ki je nižja od mediane obdobja 1981–2020. Če v tem primeru pogledamo trend median povprečnih letnih Q95 za posamezno obdobje, lahko opazimo, da so v padanju, kar ne sovпада s sliko 48, ki prikazuje pozitiven trend pretokov Q95. Raztros podatkov je za vsa obdobja približno enak. Pri izračunih Q95 za obdobje RCP 4,5 smo uporabili rezultate šestih modelov, zato so ti podatki zanesljivejši.

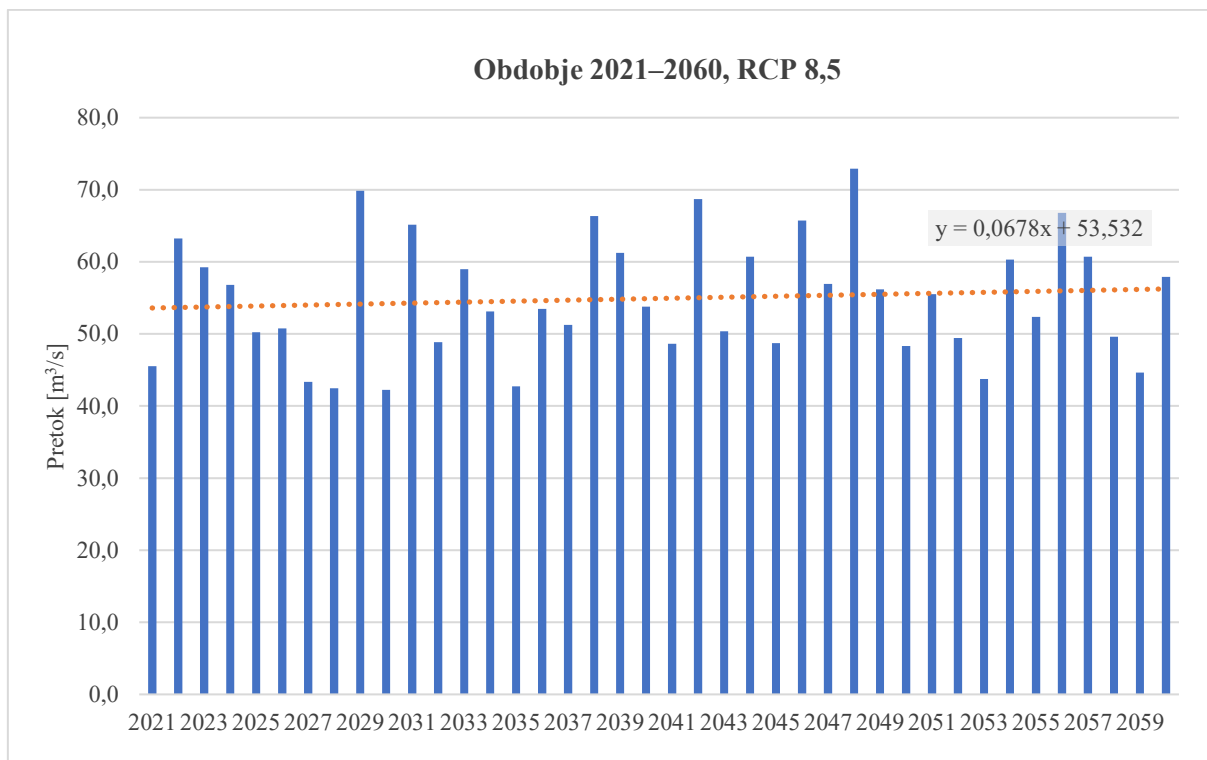


Slika 53: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2100 in RCP 8,5.

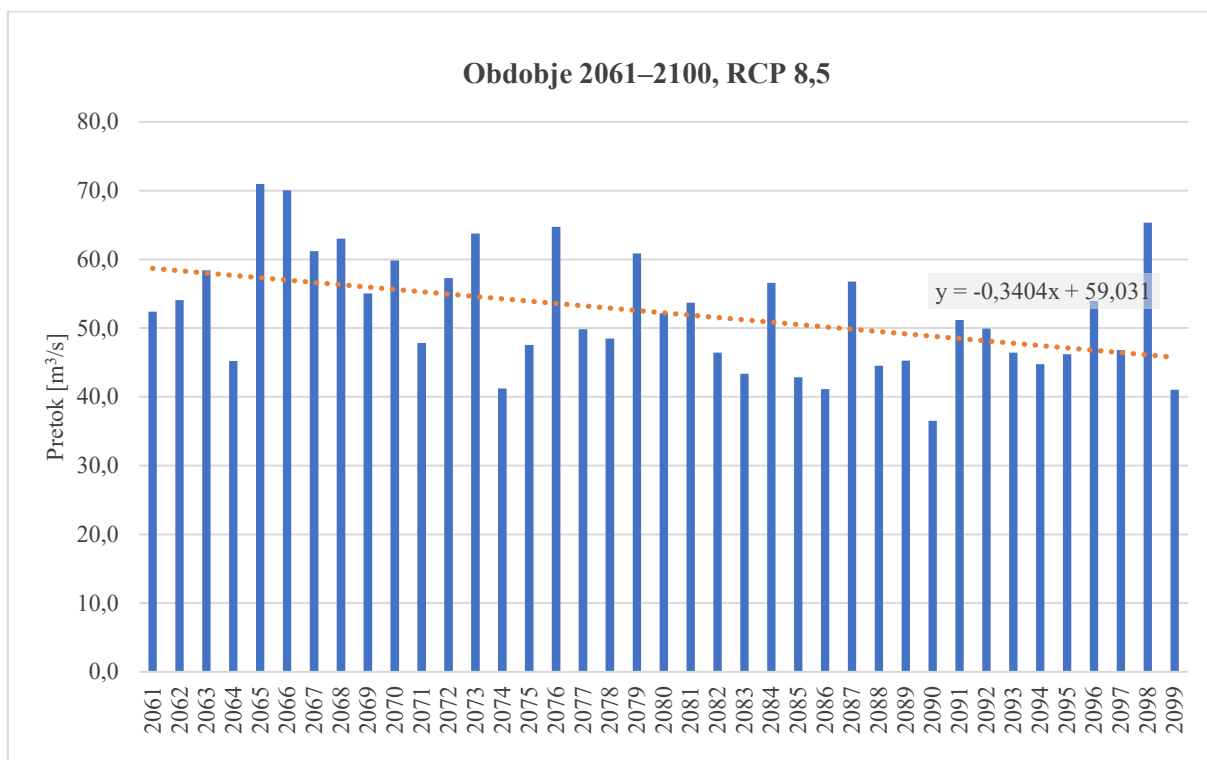
Pri scenariju RCP 8,5 smo rezultate dobili na podlagi šestih modelov. Na sliki 53 je predstavljena povprečna letna vrednost pretoka Q95 v obdobju 1981–2100 in scenarij RCP 8,5. Opazimo lahko, da je trend nizkih pretokov v padanju. Navedeni podatek si lahko interpretiramo na način, da v kolikor človeštvo ne bo izvedlo ukrepov glede podnebnih sprememb, kar govori RCP 8,5, se bodo nizki pretoki v povprečju zniževali. Iz rezultatov po obdobjih (slika 54, 55 in 56) lahko zasledimo, da v obdobju 2021–2060 ni zaznan trend padanja pretoka Q95, temveč naraščanje. Ker pa sta predhodno in naslednje obdobje v krepkem trendu padanja, saj je smerni koeficient trendne črte negativen, končna trendna linija rezultira v padanju skozi celotno obdobje. Kljub trendu padanja pretokov lahko opazimo, da so absolutni nivoji pretokov podobni scenarijema RCP 2,6 in RCP 4,5.



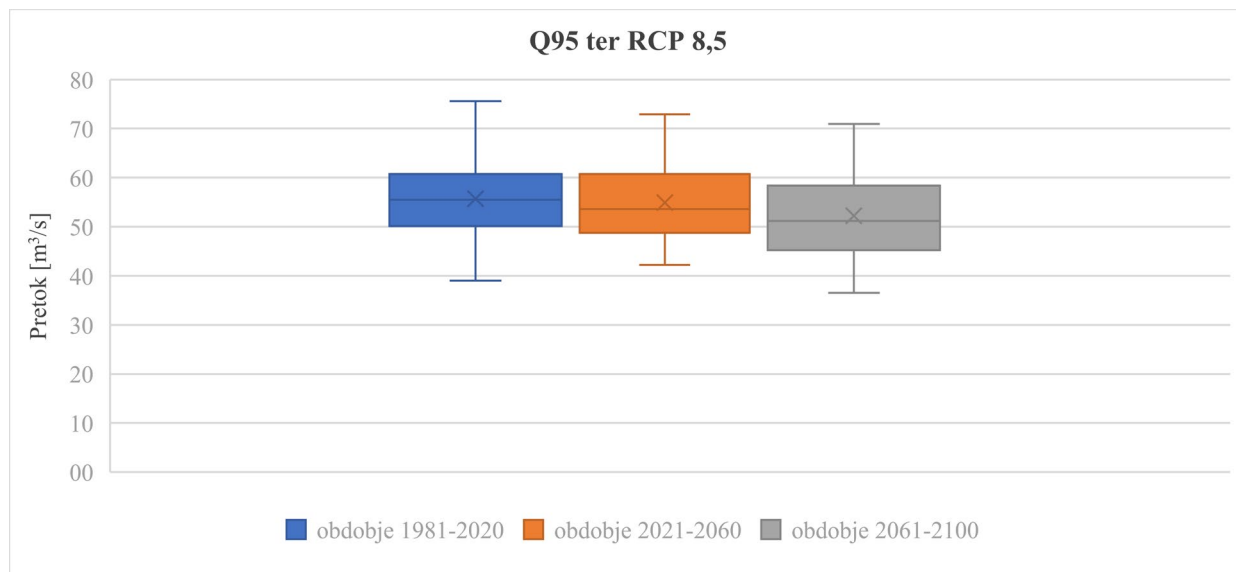
Slika 54: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 1981–2020 in RCP 8,5.



Slika 55: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2021–2060 in RCP 8,5.



Slika 56: Povprečna letna vrednost pretoka Q95 za obdobje 2061–2100 in RCP 8,5.

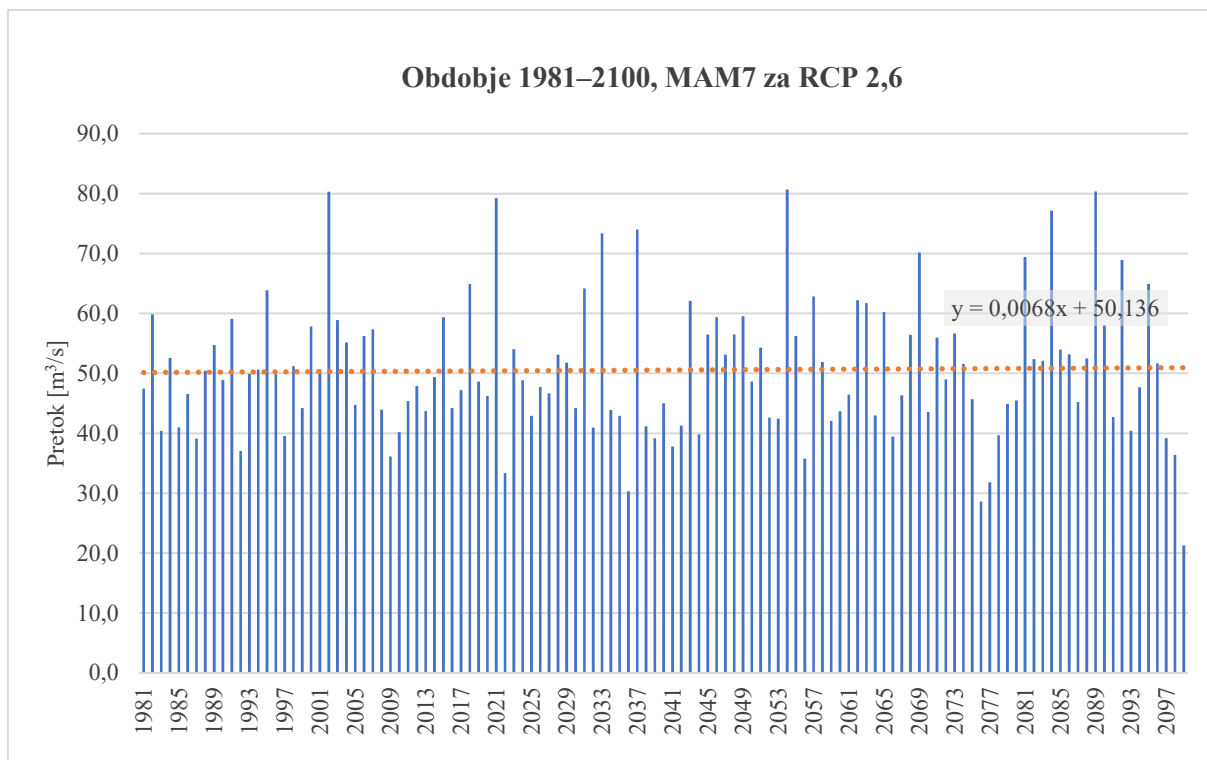


Slika 57: Graf kvartilov za pretok Q95 in RCP 8,5 ter posamezno obdobje.

Na sliki 57 lahko opazimo padajoči trend median, saj je mediana v vsakem naslednjem obdobju nižja. To sovпада tudi s sliko 53, kjer je prikazano, da pretok Q95 skozi celotno obdobje 1981–2100 pada. Opazimo lahko, da skozi vsa obdobja enako padajo maksimalne vrednosti. Podobno velja za obdobji 1981–2020 in 2061–2100: padajo tudi minimalne vrednosti pretoka Q95. Anomalija se pojavi pri minimalni vrednosti pretoka Q95 za obdobje 2021–2060, kjer nekoliko naraste glede na prejšnje obdobje. Ker je kvartilni razmik ($Q3-Q1$) z vsakim obdobjem večji, pomeni, da je trend raztrosa podatkov v povečevanju. Iz tega lahko sklepamo, da lahko z manjšo stopnjo verjetnosti napovemo, kako nizek pretok Q95 se bo zgodil v določenem obdobju. Pri izračunih pretokov Q95 za obdobje RCP 8,5 smo uporabili rezultate šestih modelov, zato so ti podatki zanesljivejši.

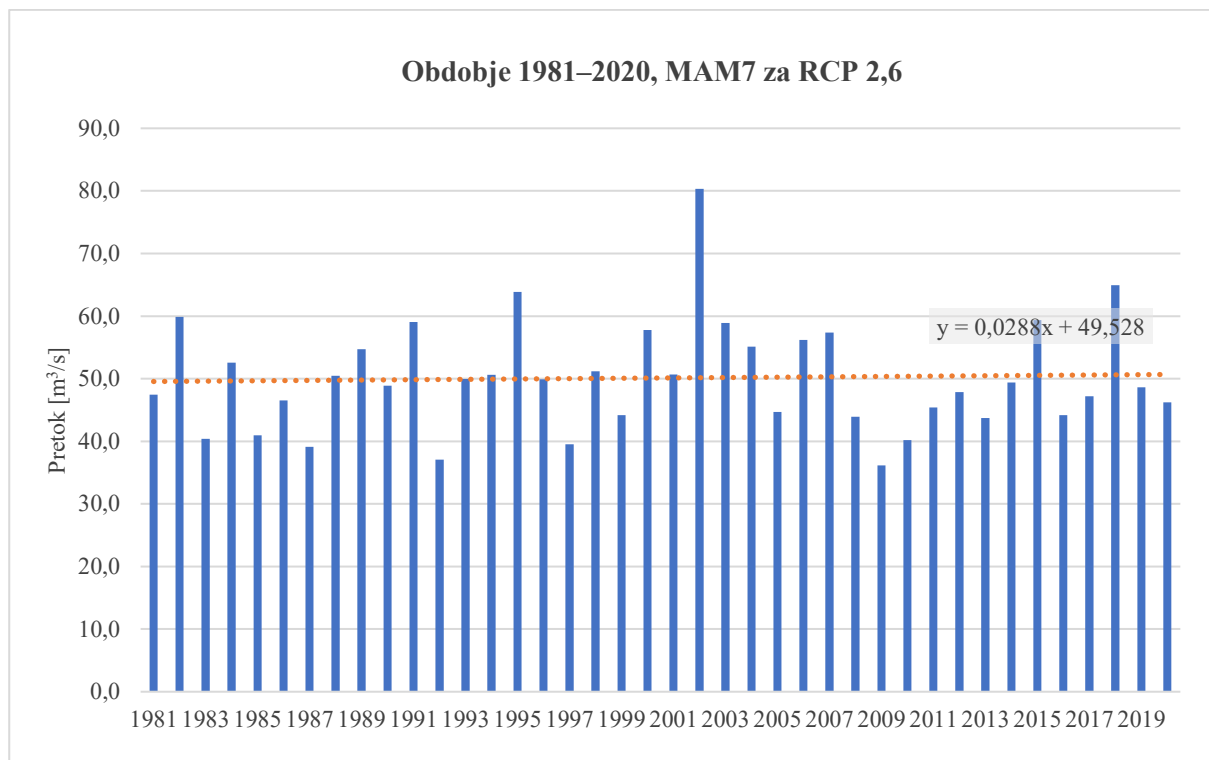
4.2.2 Analiza MAM7

Naredili smo tudi analizo najnižjih povprečnih letnih pretokov, ki se pojavijo v obdobju sedmih zaporednih dni v enem letu. Krajše te pretoke zapišemo s kratico MAM7 (*ang. mean annual 7-day minimum flow*).

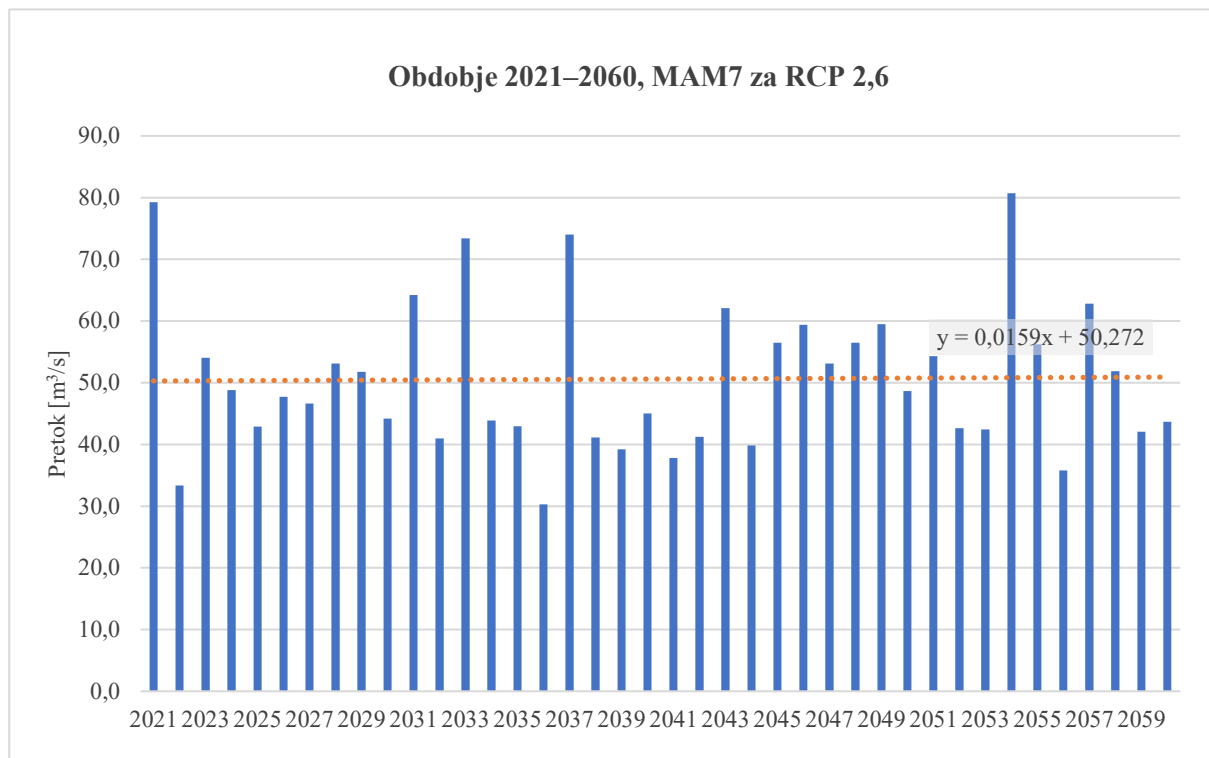


Slika 58: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2100 in RCP 2,6.

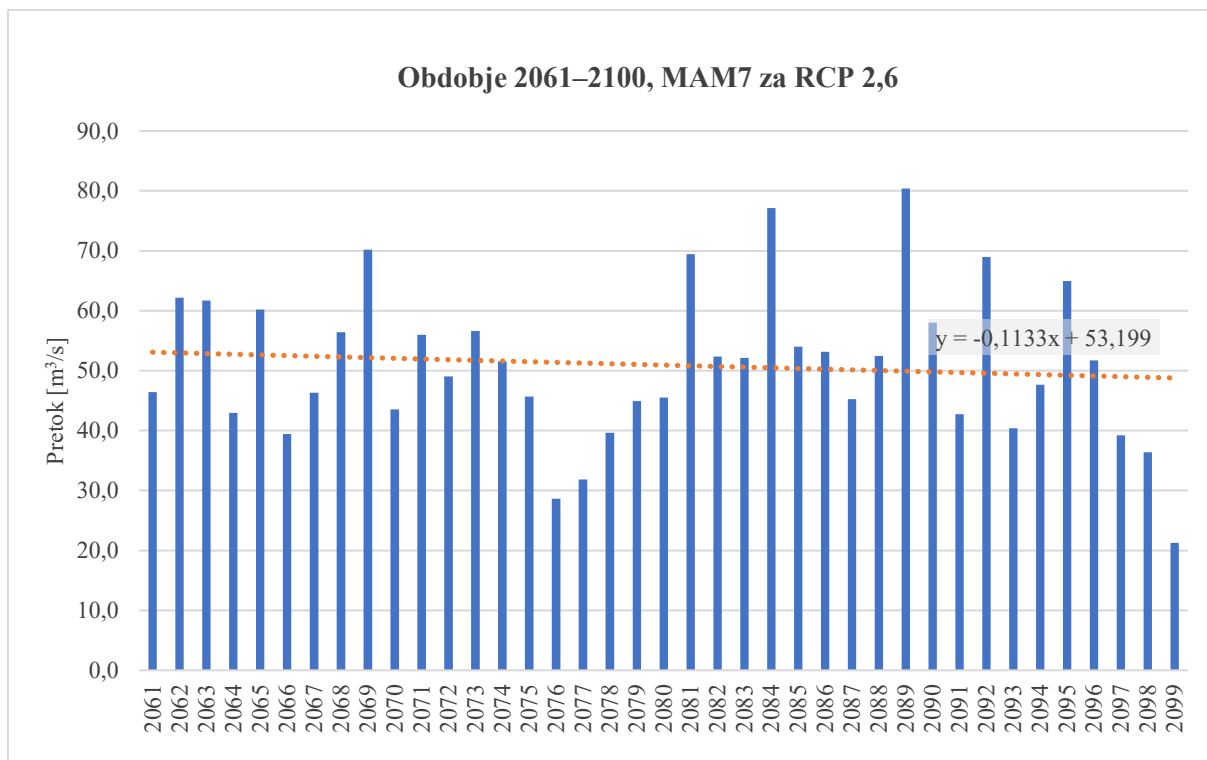
Pri scenariju RCP 2,6 smo rezultate dobili na podlagi dveh modelov. Na sliki 58 opazimo minimalen trend naraščanja pretoka MAM7 skozi celotno obdobje 1981–2100. Opazimo lahko tudi, da je trendna črta pretoka MAM7 glede na pretok Q95 za obdobje 1981–2100, precej bolj vodoravna oziroma ima manjšo vrednost smernega koeficienta trendne črte; smerni koeficient trendne črte za pretok MAM7 znaša 0,0068, za pretok Q95 pa 0,0607. Povprečna vrednost pretoka MAM7 se skozi celotno obdobje giblje okrog 50 m³/s. Na slikah 59 in 60 lahko podobno razberemo trend naraščanja v obdobjih 1981–2020 in 2021–2060. Trend navzdol pa se pojavi na sliki 61 v obdobju od 2061 do 2100 – trendna črta ima negativen smerni koeficient, ki znaša -0,113.



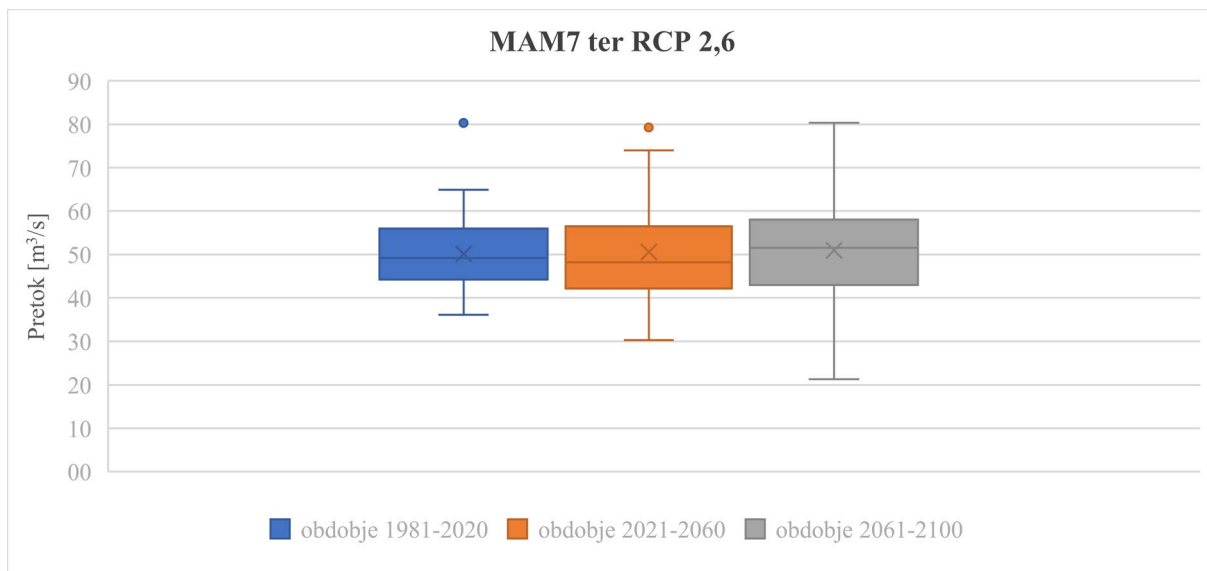
Slika 59: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2020 in RCP 2,6.



Slika 60: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2021–2060 in RCP 2,6.



Slika 61: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2061–2100 in RCP 2,6.

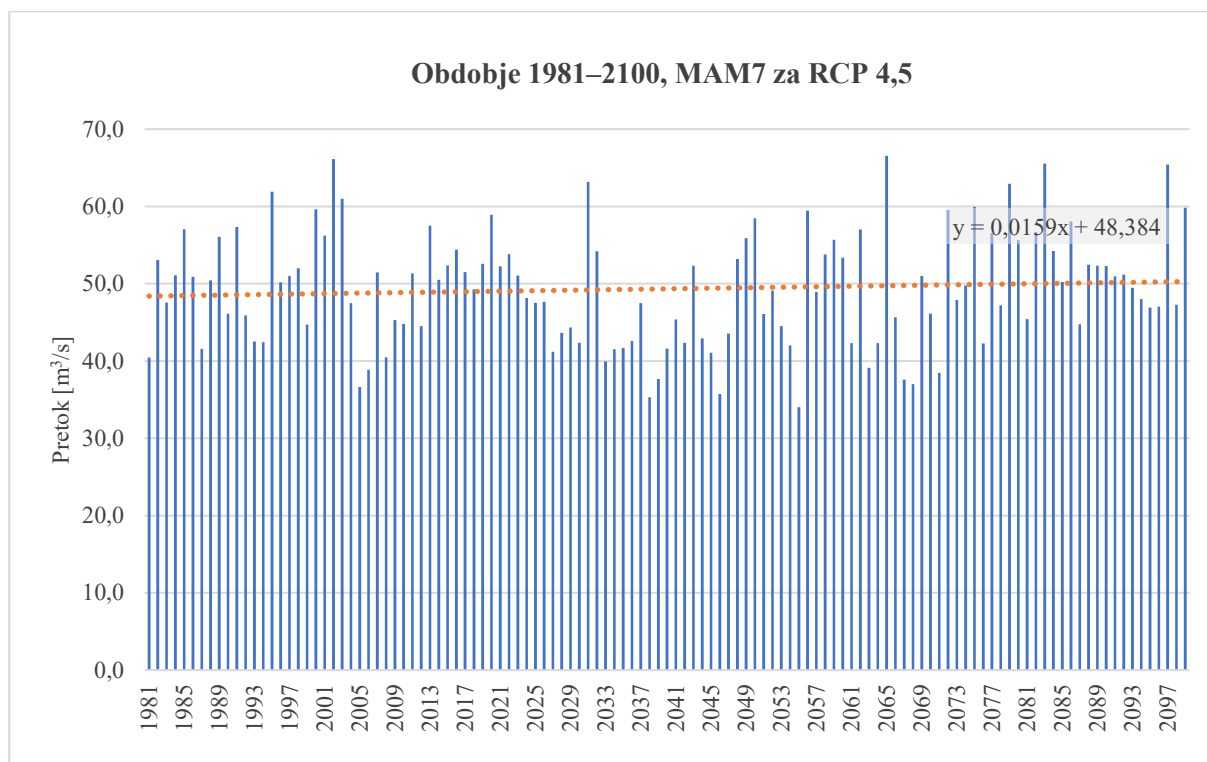


Slika 62: Graf kvartilov za pretok MAM7 in RCP 2,6 ter posamezno obdobje.

Na sliki 62 opazimo, da je trend naraščanja mediane za posamezno obdobje, čeprav je mediana obdobja 2021–2060 nekoliko nižja od mediane obdobja 1981–2020. Vzporednice lahko vlečemo s pretokom Q95 za scenarij RCP 2,6 (slika 47), saj so oblike grafov ter njihovi trendi izjemno podobni. Raztros podatkov se z vsakim obdobjem povečuje, kar nakazuje povečanje absolutne razlike tretjega (Q3) in prvega (Q1) kvartila glede na obdobje 1981–2020. Absolutna razlika tretjega in prvega kvartila splošno

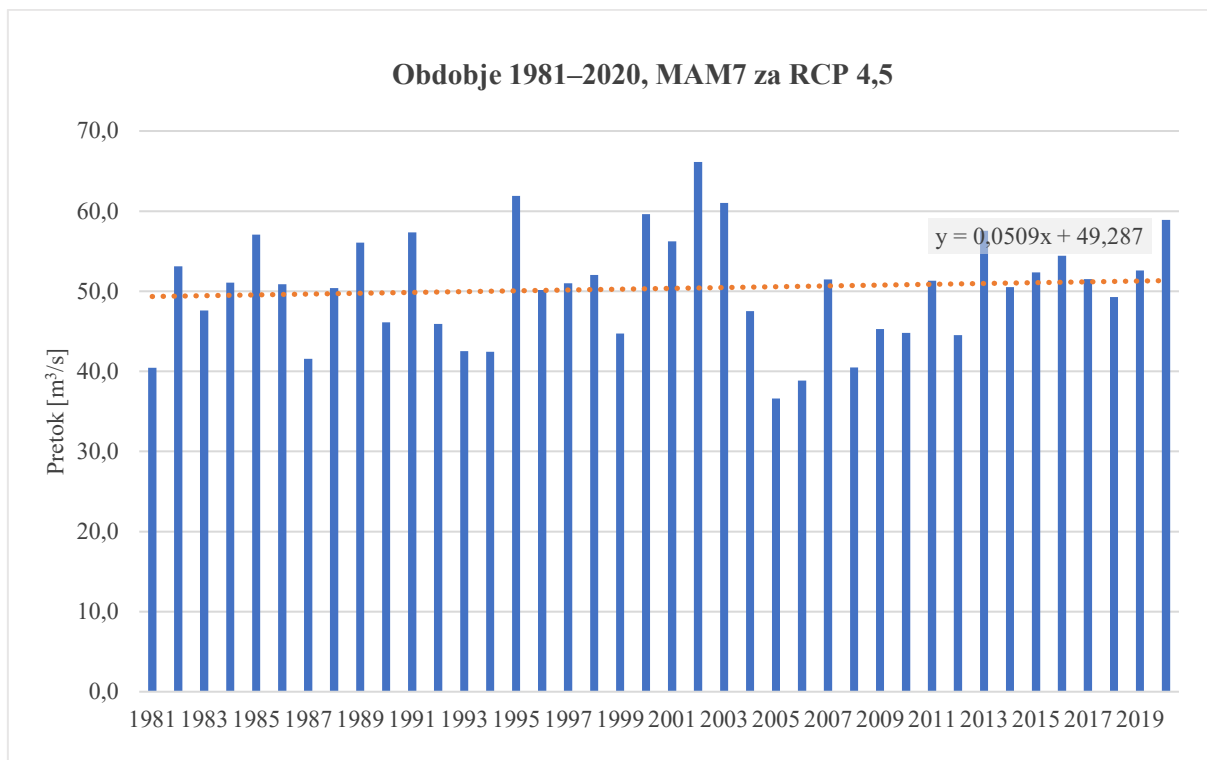
definira raztros podatkov. Podobno kot na sliki 47, imamo tudi v tem primeru dva podatka, ki sta izpadla iz dosega okvirjev, ker je njuna vrednost večja kot 1,5-kratna vrednost razlike tretjega in prvega kvartila.

Razlika med pretokoma Q95 ter MAM7 se najbolj odraža v absolutnem številu vrednosti pretoka. Povprečni letni pretok Q95 je približno za 11,5 % višji od pretoka MAM7.

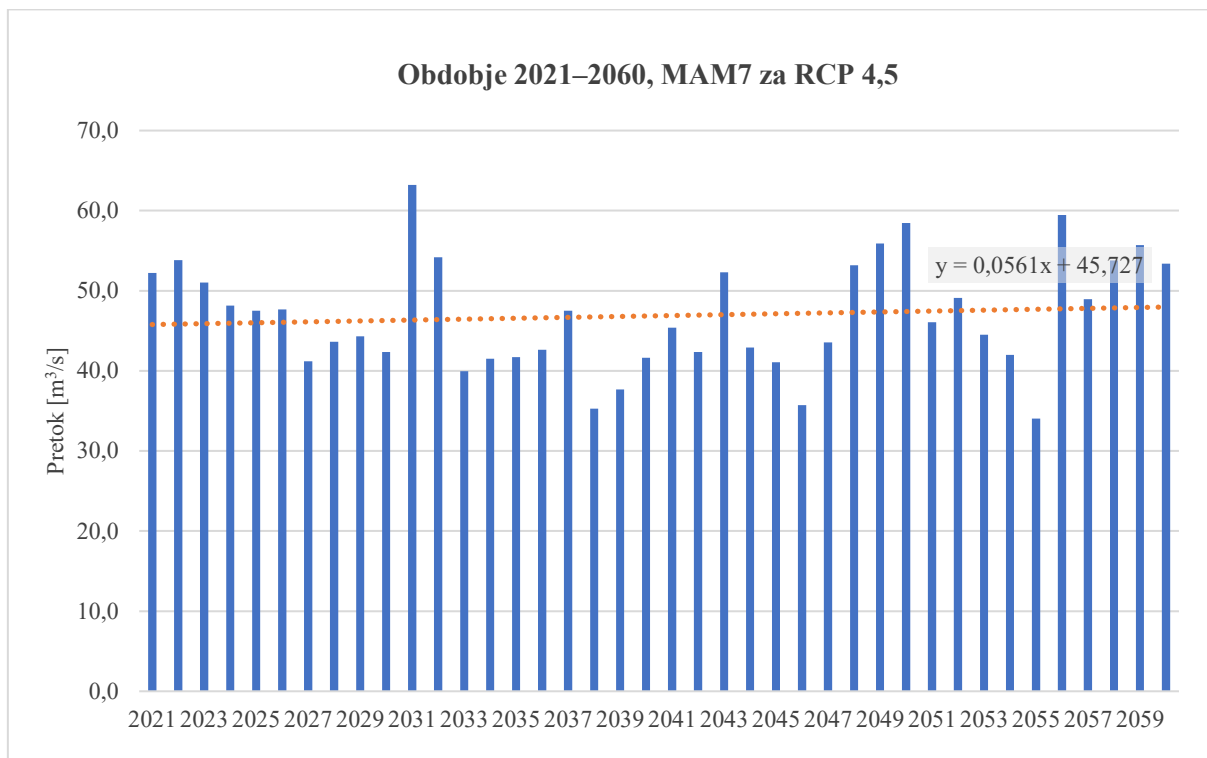


Slika 63: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2100 in RCP 4,5.

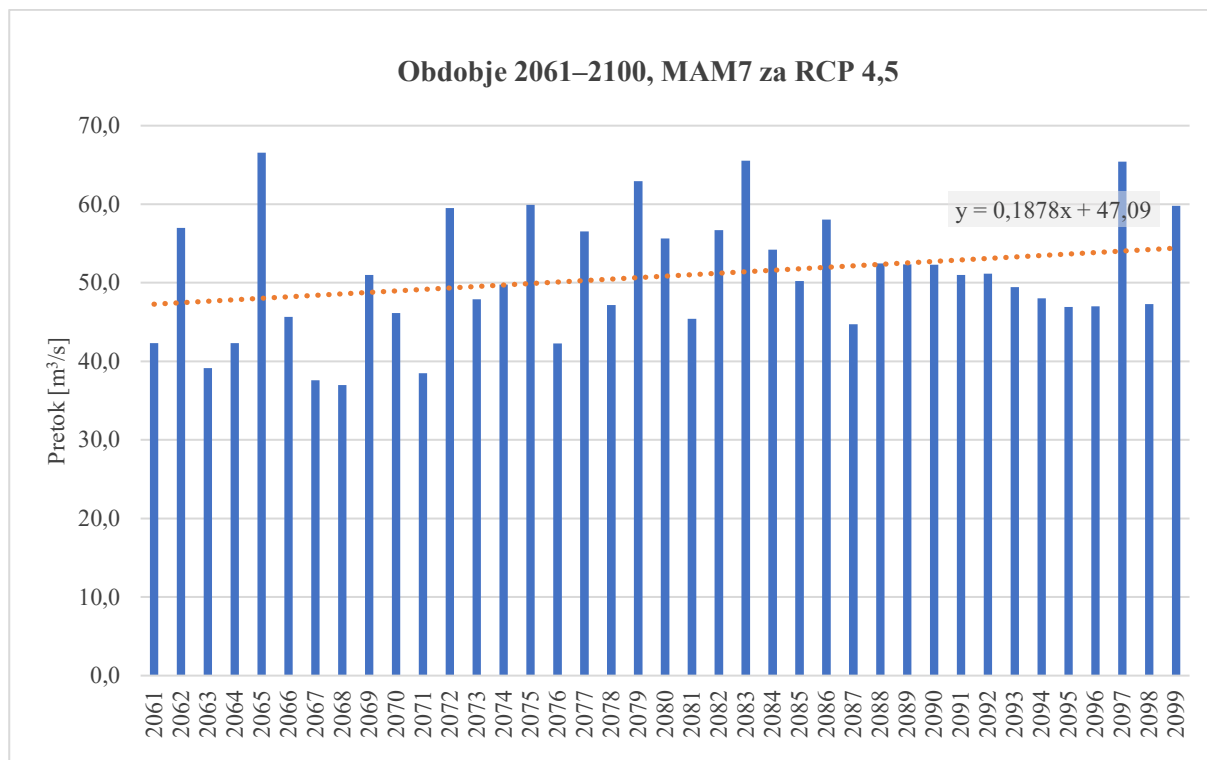
Pri scenariju RCP 4,5 smo rezultate dobili na podlagi šestih modelov. Na sliki 63 lahko razberemo trend naraščanja pretoka MAM7 za scenarij RCP 4,5 skozi celotno obdobje 1981–2100. Ko primerjamo graf Q95 (slika 48) in MAM7 (slika 63) za RCP 4,5 in celotno obdobje, lahko opazimo, da je naklon trendne črte večji, kar razberemo iz vrednosti smernega koeficienta posamezne trendne črte. Smerni koeficient trendne črte pretoka Q95 znaša 0,0139, smerni koeficient trendne črte pretoka MAM7 pa znaša 0,0159. Hkrati lahko opazimo, da so absolutne vrednosti pretokov pri Q95 višje kot pri MAM7. Na slikah 64, 65 in 66, ki predstavljajo povprečne letne MAM7 za vsako posamezno obdobje, opazimo, da je v vseh treh obdobjih trend naraščanja pretokov MAM7. Izrazitejše naraščanje pretoka MAM7 je v obdobju 2061–2100 (slika 66).



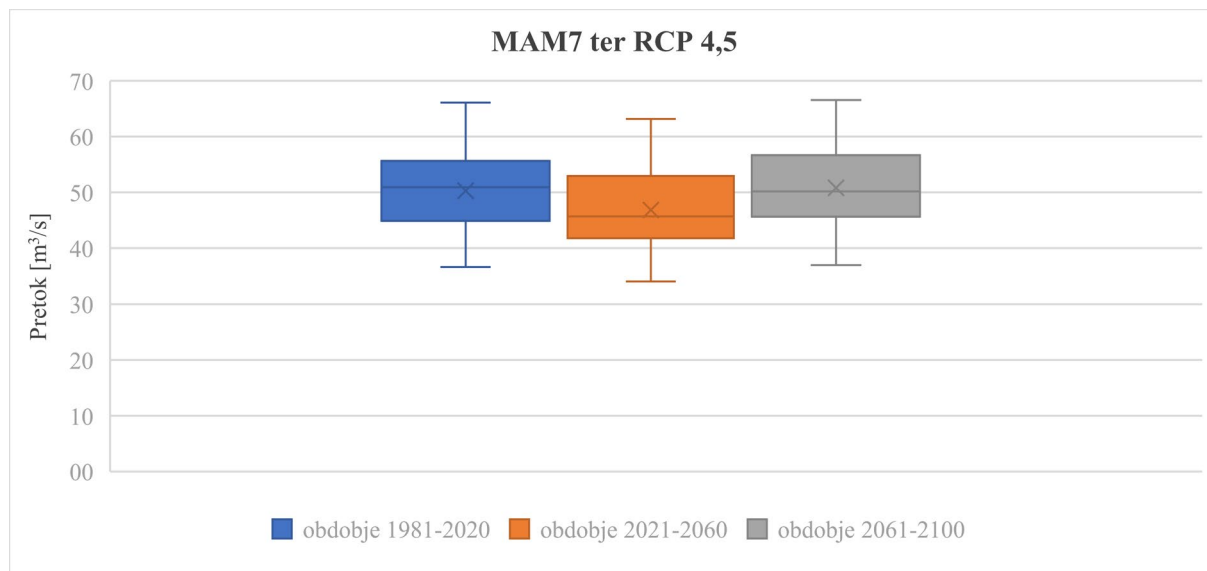
Slika 64: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2020 in RCP 4,5.



Slika 65: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2021–2060 in RCP 4,5.



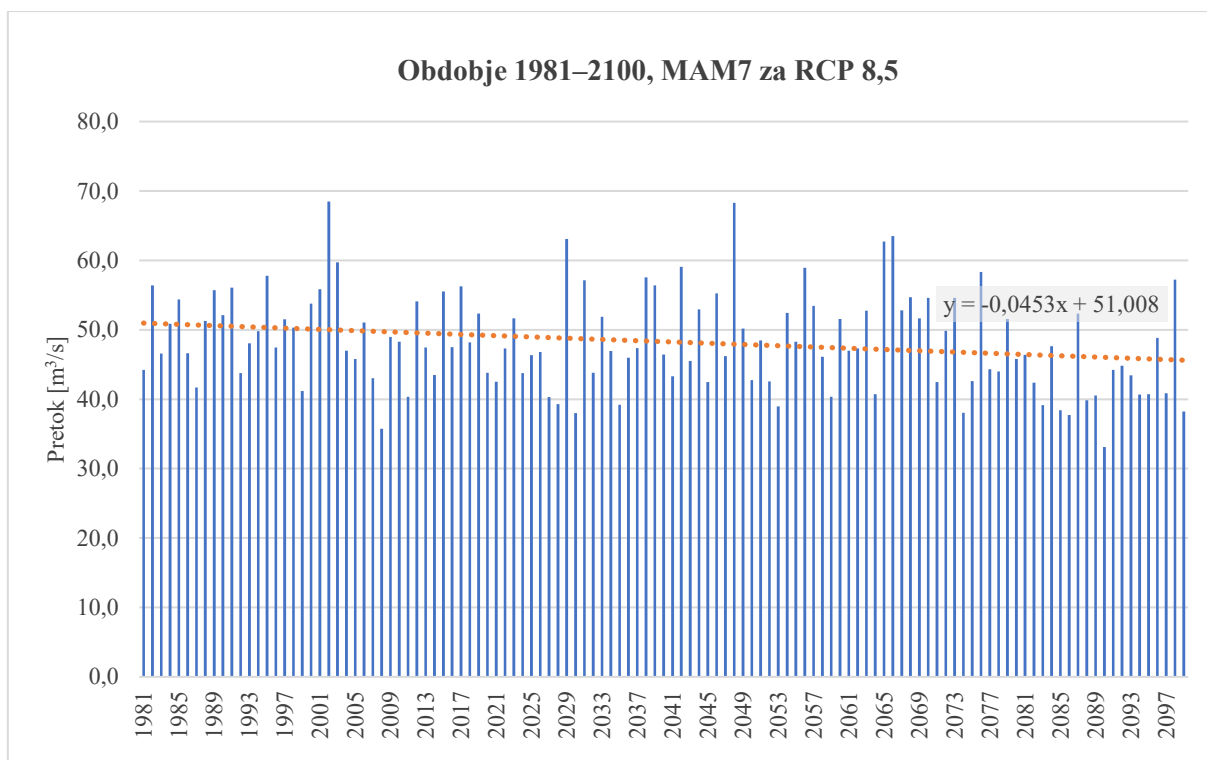
Slika 66: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2061–2100 in RCP 4,5.



Slika 67: Graf kvartilov za pretok MAM7 in RCP 4,5 ter posamezno obdobje.

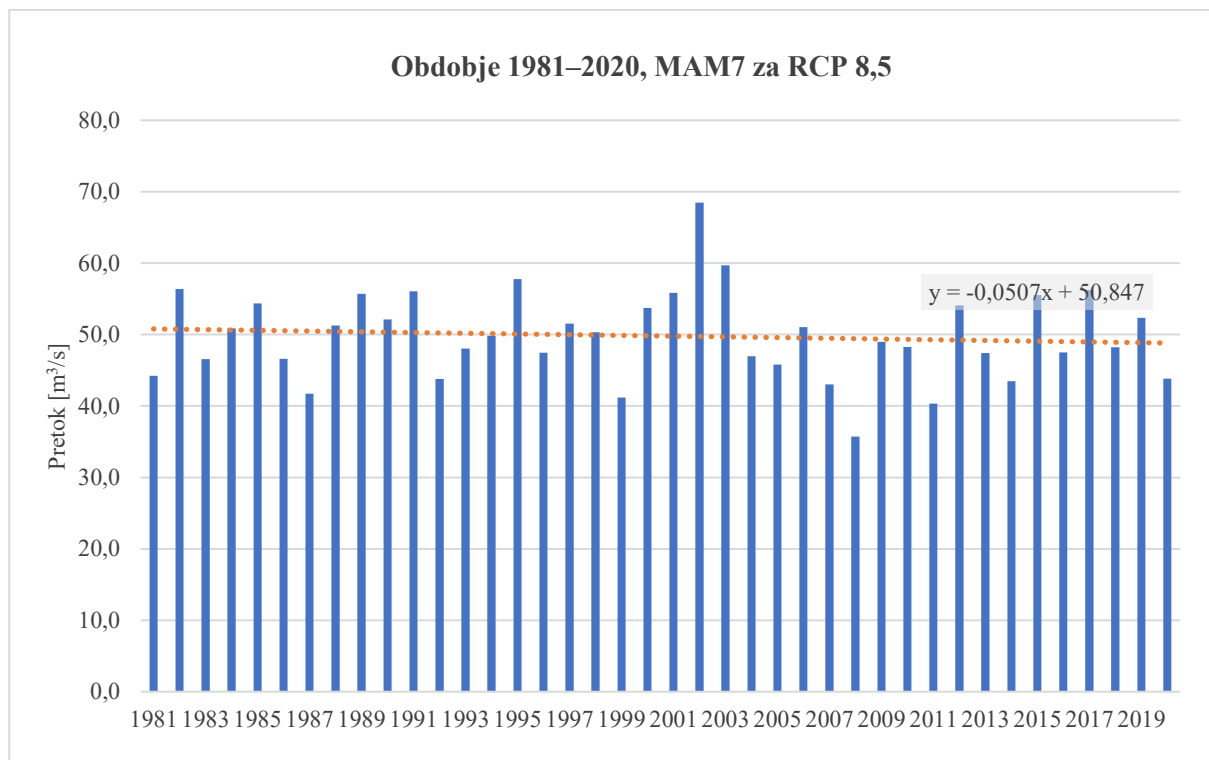
Na sliki 67 lahko razberemo, da je mediana za sredinsko obdobje 2021–2060 nižja od predhodnega obdobja 1981–2020. Mediani za prvo ter zadnje obdobje sta približno enaki. Podoben trend smo lahko opazili tudi na grafu pretoka Q95 za scenarij RCP 4,5 (slika 48). Glede na to da so za vsa obdobja razlike tretjega kvartila ter prvega kvartila približno enake, pomeni, da je raztros podatkov približno enakomeren.

Razlika med pretokoma Q95 ter MAM7 se najbolj odraža v absolutnem številu vrednosti pretoka. Povprečni letni pretok Q95 je približno za 12,4 % višji od pretoka MAM7.

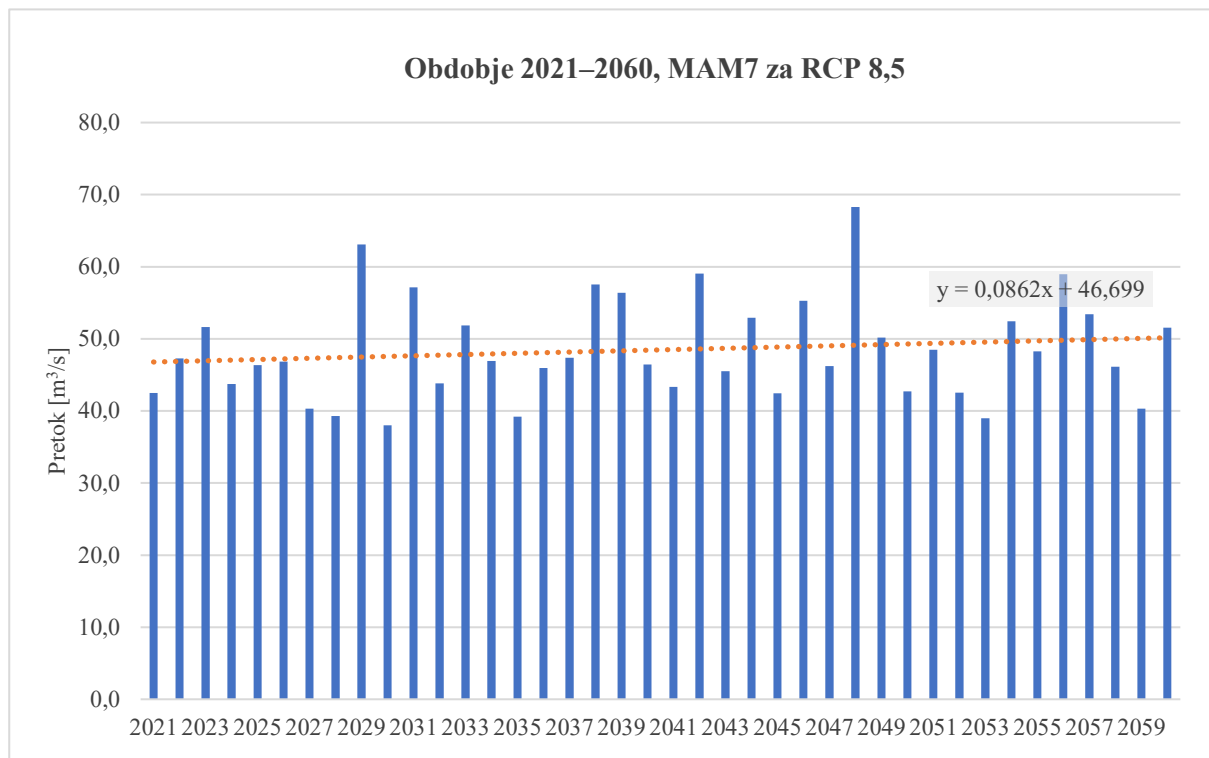


Slika 68: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2100 in RCP 8,5.

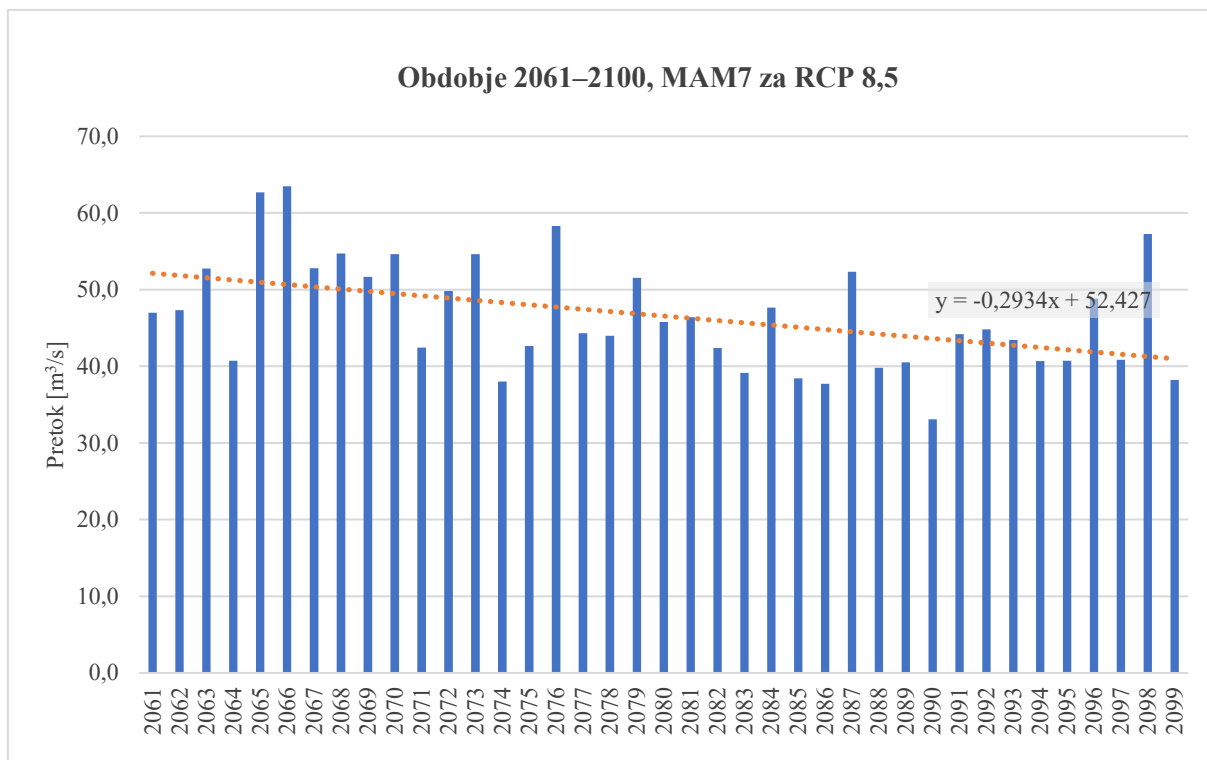
Pri scenariju RCP 8,5 smo rezultate dobili na podlagi šestih modelov. Na sliki 68 lahko opazimo izrazit trend padanja pretoka MAM7 v obdobju 1981–2100 za scenarij RCP 8,5. Na začetku obdobja vrednost letnega pretoka MAM7 znaša nekaj več kot 50 m³/s, medtem ko proti koncu obravnavanega obdobja ta vrednost znaša nekaj več kot 45 m³/s. Na slikah 69 in 71 lahko opazimo trend padanja nizkih pretokov. Bolj drastičen upad pretoka MAM7 je viden v obdobju 2061–2100 (slika 71), kjer pretok na začetku obdobja znaša cca. 52 m³/s, na koncu obdobja pa pretok znaša samo še nekaj več kot 40 m³/s. Smerni koeficient trendne črte v tem obdobju znaša -0,293. V obdobju 2021–2060 je sicer zaznana rast pretoka MAM7; smerni koeficient trendne črte znaša 0,086 (slika 70).



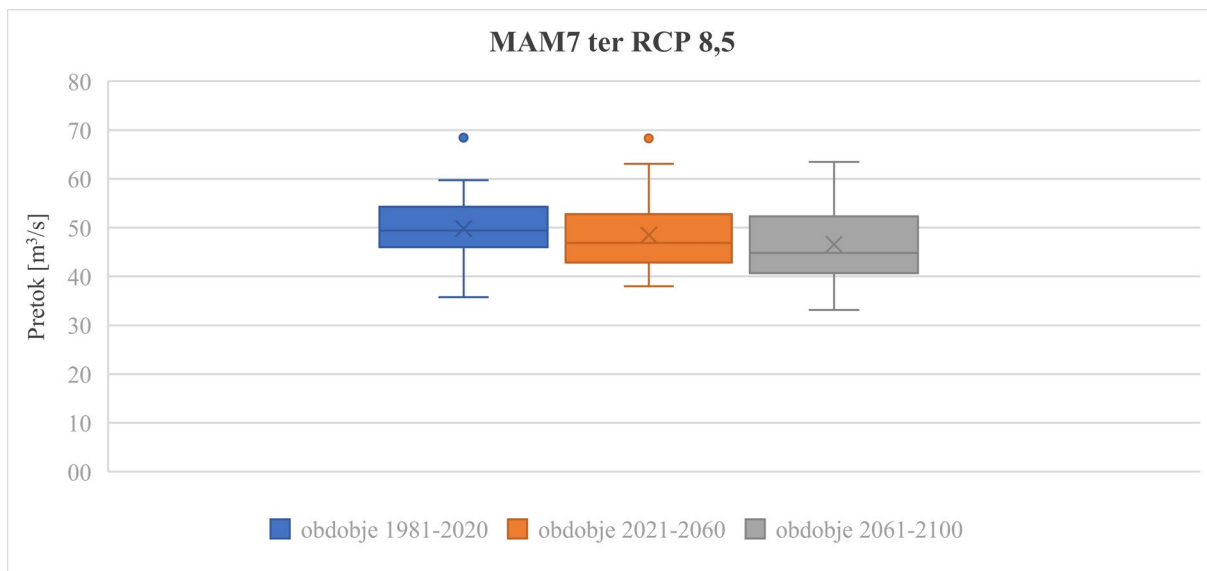
Slika 69: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 1981–2020 in RCP 8,5.



Slika 70: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2021–2060 in RCP 8,5.



Slika 71: Povprečna letna vrednost pretoka MAM7 za obdobje 2061–2100 in RCP 8,5.



Slika 72: Graf kvartilov za pretok MAM7 in RCP 8,5 ter posamezno obdobje.

Na sliki 72 lahko opazimo trend padanja vrednosti median s posameznim obdobjem. Raztros podatkov je za vsa obdobja sorazmerno majhen zaradi majhne absolutne razlike tretjega in prvega kvartila posameznega obdobja. Padanje pretokov MAM7 sovпада tudi s sliko 68, kjer so predstavljene letne vrednosti pretokov MAM7.

Razlika med pretokoma Q95 (slika 53) ter MAM7 (slika 68) za RCP 8,5 se najbolj odraža v absolutnem številu vrednosti pretoka. Povprečni letni pretok Q95 je približno za 12,4 % višji od pretoka MAM7.

4.3 Diskusija

Dobljene rezultate smo primerjali z raziskavami, ki so obravnavale podobno tematiko. Pri ARSO so v svojem poročilu (Bertalanič et al., 2018) zapisali, da so v vseh obdobjih zaznali povečanje srednjih letnih konic. V naši raziskavi smo sicer pregledovali število presežnih povprečnih dnevni pretokov in absolutne ter relativne razlike pretokov. Rezultatov povečanja srednjih letnih konic in števila presežnih dnevni pretokov tako ne moremo direktno primerjati, lahko pa ugotovimo, da je povečanje presežnih povprečnih dnevni pretokov skladno s povečanjem srednjih letnih konic. Podobne ugotovitve glede povečanja srednjih letnih konic pri scenariju RCP 8,5 je podala tudi Alič v svojem magistrskem delu (Alič, 2023). Alič iz rezultatov za scenarija RCP 2,6 in 4,5 ni mogla dokazati trenda naraščanja srednjih letnih konic.

Ko primerjamo nizke pretoke na podlagi rezultatov v poročilu ARSO (Bertalanič et al., 2018) ugotovimo, da so rezultati podobni. ARSO sicer rezultate za scenarij RCP 4,5 navaja v odstotkih odklona pretoka v intervalu od -5% do +5% glede na referenčno obdobje. V našem primeru zaznamo zelo nizko naraščanje nizkih pretokov, kar sovпада s predstavljenimi podatki v ARSO poročilu. Iz istega poročila lahko sklepamo pri scenariju RCP 8,5, da je trend nizkih pretokov v padanju, saj je zadnje obdobje (2071–2100) v intervalu od -20% do -5% vrednosti nizkega pretoka glede na referenčno obdobje. Podobno je tudi v našem scenariju RCP 8,5 trend nizkega pretoka v padanju.

5 ZAKLJUČKI

V magistrskem delu smo preverili, kako bodo podnebne spremembe vplivale na hidrološke procese v porečju Save do vodomerne postaje Litija. Na podlagi RCP scenarijev, ki predvidevajo način ukrepanja in s tem zmanjšanje vpliva na okolje, smo izračunali nove simulirane pretoke na vodomerni postaji Litija za obdobje 1981–2100. Pred izračunom smo model GR6J Cema Neige umerili in pri tem uporabili javno dostopne podatke o pretoku, temperaturi ter padavinah, ki so pri izračunu potrebni. Obdobje ogrevanja modela je trajalo od 1. 1. 1981 do 31. 12. 1981, obdobje umerjanja modela pa od 1. 1. 1982 do 31. 12. 2010. Na podlagi dobljenih rezultatov smo lahko preverili predhodno postavljene hipoteze.

Pred pričetkom raziskave smo postavili hipotezo 1, da bomo model GR6J Cema Neige najbolj umerili s kriterijem ujemanja KGE2, ki pri svojem izračunu upošteva tudi nizke pretoke. Pri izračunu koeficienta učinkovitosti modela smo uporabili tri metode, in sicer: NSE, KGE ter KGE2. Največja razlika med navedenimi metodami je ta, da KGE2 ter KGE pri izračunu bolje simulirata nizke pretoke kot NSE. Rezultati izračuna so pokazali, da kontrola ujemanja po KGE2 znaša 0,9272, v kolikor za kriterij ujemanja upoštevamo metodo KGE2. Če za kontrolo ujemanja izberemo KGE, koeficient kriterija ujemanja KGE2 znaša 0,9270, kar pomeni, da sta rezultata povsem blizu in je razlika zanemarljivo majhna. Podobno velja tudi za kontrolo ujemanja NSE, ki znaša 0,8537, če za kriterij ujemanja izberemo KGE2. Ker lahko kontrola ujemanja zavzame vrednosti do največ 1,00, ugotavljamo, da je model po vsakem kriteriju ujemanja umerjen zelo dobro. Tako lahko tudi potrdimo našo postavljeno prvo hipotezo.

V drugem delu naloge smo analizirali rezultate, ki so bili izračunani na podlagi modela GR6J Cema Neige in podnebnih scenarijev RCP. Pri izračunih smo uporabljali scenarije RCP 2,6, RCP 4,5 ter RCP 8,5. V prvem koraku smo analizirali število presežnih povprečnih dnevnih pretokov. Sava pri vodomerni postaji Litija začne poplavlјati, ko njen pretok preseže 1514 m³/s (ARSO, 2023). Po vseh pričakovanjih se število presežnih pretokov zvišuje. Nekoliko presenetljivo je dejstvo, da je vsota presežnih pretokov za celotno obravnavno obdobje najvišja pri scenariju RCP 4,5, ki delno upošteva ukrepe v korist podnebnim spremembam. Število presežnih pretokov v tem primeru znaša 37. Pričakovali bi sicer, da se bo najvišje število presežnih pretokov pojavilo ob upoštevanju najbolj pesimističnega scenarija RCP 8,5, ki sicer ne predvideva ukrepov v korist podnebnim spremembam. Število presežnih pretokov v tem primeru znaša 31. Število presežnih pretokov je tako v scenariju RCP 4,5 višje za približno 20% od števila presežnih pretokov pri scenariju RCP 8,5. Na te rezultate so vplivale padavine, evapotranspiracija ter ostali elementi v vodnem krogu, ki so spremenili vodno bilanco. Podobno kot naraščanje števila presežnih povprečnih pretokov je trend naraščanja zaznan tudi pri absolutnih ter relativnih razlikah pretokov. Pri scenariju RCP 2,6 bo povprečna absolutna razlika med presežno vrednostjo in maksimalno vrednostjo povprečnega dnevnega pretoka znašala 485 m³/s, pri scenariju RCP 4,5 bo ta vrednost znašala 847 m³/s, pri scenariju RCP 8,5 pa bo ta vrednost znašala 850 m³/s. Podnebni modeli tudi

nakazujejo, da se bo večina poplav zgodila v jesenskem času. Rezultati nam povejo, da bodo konice povprečnega dnevnega pretoka naraščale. Rezultati sovpadajo s predhodnimi navedbami o naraščanju presežnih vrednosti povprečnih dnevnih pretokov in kažejo, da v prihodnosti lahko pričakujemo večje število poplav, ki bodo tudi bolj obsežne. S tem smo potrdili hipotezo 2.

Analizirali smo tudi nizke pretoke, ki so pomembni z vidika zagotavljanja ustreznih količin vode za različne dejavnosti, kot npr. za kmetijsko dejavnost na bližnjih območjih, za ohranjanje biotske raznovrstnosti, za nemoteno oskrbo s pitno vodo in podobno. Analizirali smo pretok Q95, ki predstavlja vrednost pretoka, ki je presežena 95% celotnega časa, ter najnižji povprečni letni pretok, ki se pojavi v obdobju sedmih zaporednih dni v enem letu, MAM7. Ugotovili smo, da je trend pretokov Q95 in MAM7 zelo podoben. Razlikujeta se samo v absolutni vrednosti pretoka. Vrednosti pretokov Q95 so v povprečju višje za približno 12% od pretokov MAM7. Iz analiz je bilo potrebno ugotoviti tudi, ali se bodo nizki pretoki reke Save na vodomerni postaji Litija zniževali, kot smo to predpostavili v hipotezi 3. Ugotovili smo, da je trend naraščanja pretoka Q95 in MAM7 v celotnem obdobju od 1981 do 2100 za podnebna scenarija RCP 2,6 in RCP 4,5. Obratno pa smo pri obeh pretokih, Q95 in MAM7, ugotovili jasen trend padanja pretokov za podnebni scenarij RCP 8,5 skozi celotno obdobje od 1981 do 2100. Načeloma se hipoteza 3 lahko ovrže, v kolikor bo družba v celoti naredila dodatne korake k zniževanju izpustov toplogrednih plinov, kot se to predvideva v podnebnih scenarijih RCP 2,6 in RCP 4,5.

Namen in cilji zaključnega dela so bili izpolnjeni. Magistrsko delo bi se iz vidika uporabnosti dalo razširiti tako, da bi dobljene pretoke uporabili kot vhodne podatke pri izračunu hidravličnega modela. Tako bi dobili vizualno predstavo, kakšen vpliv ima povečan obseg pretoka z vidika poplavne ogroženosti območja.

VIRI

Alexopoulos, M. 2021. Use of the reanalysis products for the hydrological rainfall-runoff modelling: Slovenian case studies: master thesis.

<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=134156> (Pridobljeno 21. 9. 2023.)

Alexopoulos, M. J., Müller-Thomy, H., Nistahl, P., Šraj, M., Bezak, N. 2023. Validation of precipitation reanalysis products for rainfall-runoff modelling in Slovenia. *Hydrology and earth system sciences* 27, 13: 2559–2578.

Alič, M. 2023. Trendi pretokov v Sloveniji do konca 21. stoletja: magistrsko delo.

<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=150727&lang=slv> (Pridobljeno 6. 12. 2023.)

Amoussou, E., Vodounon, S. H., Houessou, S., Trambay, Y., Camberlin, P., Houndenou, C., Boko, M., Mahe, G., Paturel, J. E. 2015. Application d'un modèle conceptuel à l'analyse de la dynamique hydrométéorologique des crues dans un bassin-versant en milieu tropical humide : cas du fleuve Mono. *Modélisations & Variabilités*: 17–24.

ARSO. 2010. Spremembe podnebja v Sloveniji do sredine 21. stoletja.

https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/PSS/scenariji/letak_RCP45_2070.pdf

(Pridobljeno 16. 10. 2023.)

ARSO. 2023. Arhiv površinskih voda.

https://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php?p_vodotok=Sava&p_postaja=3650 (Pridobljeno 27. 5. 2023.)

ARSO. 2023. Hidro podatki.

https://www.arso.gov.si/xml/vode/hidro_podatki_zadnji.xml (Pridobljeno 8. 11. 2023.)

ARSO. 2023. Povprečne mesečne vrednosti evapotranspiracije v obdobju 1971–2000.

<https://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/etp/> (Pridobljeno 17. 10. 2023.)

ARSO. 2023. Vode - opozorila.

https://www.arso.gov.si/vode/opozorila/ARSO_Vode_Stopnje%20nevarnosti.pdf (Pridobljeno 10. 11. 2023.)

Bat, M., Dobnikar Tehovnik, M., Mihorko, P., Grbović, J. 2003. Tekoče vode. *Vodno bogastvo Slovenije*. Ljubljana: Narodna in univerzitetna knjižnica: 27–38.

Bertalanč, R., Dolinar, M., Draksler, A., Honzak, L., Kobold, M., Lokošek, N., Vertačnik, G., Vlahović, Ž., Žust, A. 2018. Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja: sintezno poročilo, Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje.

Bezak, N., Jemec Auflič, M., Mikoš, M. 2019. Application of hydrological modelling for temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides. *Landslides* 16: 1273–1283.

Bizjak, A. 1999. Podnebne spremembe, poplavna varnost in vodooskrba v Sloveniji. Urbani izziv, 10, 1: 25–29 in 117–119.

Brilly, M., Šraj, M. 2018. Modeliranje površinskega odtoka. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Canada.ca. 2018. Representative Concentration Pathways.

<https://climate-scenarios.canada.ca/?page=scen-rcp> (Pridobljeno 16. 10. 2023.)

Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Dorchie, D., Perrin, C., Michel, C. 2020. Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.7.4.

<https://cran.r-project.org/web/packages/airGR/index.html> (Pridobljeno 9. 9. 2023.)

Davie, T. 2008. Fundamentals of Hydrology: Taylor & Francis.

EPA. 2023. Definition and Characteristics of Low Flows.

<https://www.epa.gov/ceam/definition-and-characteristics-low-flows#low> (Pridobljeno 22. 11. 2023.)

European Commission. 2020. Causes of climate change.

https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en (Pridobljeno 17. 10. 2023.)

European Commission. 2015. Dilution and mixing in groundwater.

<https://cordis.europa.eu/article/id/166050-dilution-and-mixing-in-groundwater> (Pridobljeno 17. 10. 2023.)

European Commission. 2023. Consequences of climate change.

https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_en (Pridobljeno 17. 10. 2023.)

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., Martinez, G. F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology 377: 80–91.

GURS. 2020. Digitalni modeli višin.

<https://www.e-prostor.gov.si/podrocja/drzavni-topografski-sistem/digitalni-modeli-visin/?acitem=1212-1226> (Pridobljeno 27. 10. 2023.)

GURS. 2023. Digitalni model višin.

<https://ipi.e-prostor.gov.si/jgp/data> (Pridobljeno 22. 10. 2023.)

Hao, Y., Sun, F., Wang, H., Liu, W., Shen, Y. J., Li, Z., Hu, S. 2022. Understanding climate-induced changes of snow hydrological processes in the Kaidu River Basin through the CemaNeige-GR6J model. CATENA 212.

Hrvatina, M., Perko, D. 2006. Hipsografska analiza porečij z digitalnim modelom višin. In: Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2005-2006. Ljubljana: Narodna univerzitetna knjižnica: 43–51.

INRAE. 2019. A brief history.

<https://webgr.inrae.fr/models/a-brief-history/> (Pridobljeno 17. 10. 2023.)

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report, Geneva: IPCC.

IPCC. 2023. About the IPCC.

<https://www.ipcc.ch/about/> (Pridobljeno 24. 11. 2023.)

IPCC. 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report, Geneva: IPCC.

Jajarmizadeh, M., Harun, S. B., Salarpour, M. 2012. A review on theoretical consideration and types of models in hydrology. *Journal of Environmental Science and Technology* 5, 5: 249–261.

Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 424-425: 264–277.

Knoben, W., Freer, J., Woods, R. 2019. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences* 23, 10: 4323–4331.

Kobold, M. 2010. Pojavljanje ekstremnih hidroloških pojavov v povezavi s podnebnimi spremembami. *Naravne nesreče 1: Od razumevanja do upravljanja*. Ljubljana: Založba ZRC: 235–245.

Koch, H., Liersch, S., Gonçalves de Azevedo, J. R., Chaves Silva, A. L., Hattermann, F. F. 2018. Assessment of observed and simulated low flow indices. *Hydrology Research* 49, 6): 1831–1846.

Kohne, B. 2014. Uporaba programa R za hidrološko modeliranje: diplomska naloga.

<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=30891> (Pridobljeno 10. 5. 2023.)

Lavtar, K. 2019. Vrednotenje ustreznosti enovitih hidroloških modelov za primer porečja Save: magistrsko delo.

<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=110413> (Pridobljeno 21. 8. 2023.)

Lavtar, K., Bezak, N., Šraj, M. 2020. Rainfall-Runoff Modeling of the Nested Non-Homogeneous Sava River Sub-Catchments in Slovenia. *Water* 12, 1: 128.

Legat, B. 2013. Vpliv podnebnih sprememb na verjetnost poplav v porečju Save v Sloveniji: magistrsko delo.

<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=28142> (Pridobljeno 13. 10. 2023.)

McCuen, R. H., Knight, Z., Cutter, A. G. 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. *Journal of Hydrologic Engineering* 11, 6: 597–602.

Ogden, F. L. 2021. *Geohydrology: Hydrological Modeling*. D. Alderton & A. E. Scott, eds. *Encyclopedia of Geology* (Second Edition). Academic Press: 457–476.

O'Regan, K. 2023. EFAS hydrological model performance.

<https://confluence.ecmwf.int/display/CEMS/EFAS+hydrological+model+performance#:~:text=Hydrological%20model%20performance%20criteria&text=The%20KGE%20is%20an%20expression,agreement%20between%20simulations%20and%20observations> (Pridobljeno 19. 10. 2023.)

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. 2005. Which Potential Evapotranspiration Input for a Lumped Rainfall-Runoff Model? Part 2—Towards a Simple and Efficient Potential Evapotranspiration Model for Rainfall-Runoff Modeling. *Journal of Hydrology* 303, 1: 290–306.

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279, 1-4): 275–289.

Petek, M., Kobold, M., Šraj, M. 2014. Analiza nizkih pretokov vodotokov v Sloveniji z uporabo programa R in paketa lfstat. *Acta hydrotechnica* 27, 46: 13–28.

Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Mathevet, T., Andréassian, V. 2011. A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *Journal of Hydrology* 411, 1-2: 66–76.

Riboust, P., Thirel, G., Le Moine, N., Ribstein, P. 2019. Revisiting a Simple Degree-Day Model for Integrating Satellite Data: Implementation of Swe-Sca Hystereses. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 67, 1: 70–81.

Sapač, K., Medved, A., Rusjan, S., Bezak, N. 2019. Investigation of Low- and High-Flow Characteristics of Karst Catchments under Climate Change. *Water* 11, 5: 925.

Sezen, C., Bezak, N., Šraj, M. 2018. Hydrological modelling of the karst Ljubljana River catchment using lumped conceptual model. *Acta hydrotechnica* 31, 55: 87–100.

Sezen, C., Partal, T. 2022. New hybrid GR6J-wavelet-based genetic algorithm-artificial neural network (GR6J-WGANN) conceptual-data-driven model approaches for daily rainfall-runoff modelling. *Neural Computing and Applications* 34, 20: 17231–17255.

Sezen, C., Šraj, M., Medved, A., Bezak, N. 2020. Investigation of Rain-On-Snow Floods under Climate Change. *Applied sciences* 10, 4: 1242.

Singh, A. 2018. A Concise Review on Introduction to Hydrological Models. *GRD Journal for Engineering* 3, 10: 14–19.

Smakhtin, V. U. 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* 240: 147–186.

Šraj, M., Bezak, N. 2013. Analiza visokovodnih valov Save v Litiji / The analysis of flood waves on the Sava River in Litija. *Ujma* 27: 228–235.

Sun, Q., Mann, J., Skidmore, M. 2022. The Impacts of Flooding and Business Activity and Employment: A Spatial Perspective on Small Business. *Water Economics and Policy* 8, 3.

Todini, E. 2007. Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1): 468–482.

Troin, M., Arsenault, R., Brissette, F. 2015. Performance and Uncertainty Evaluation of Snow Models on. *Hydrology* 2: 289–317.

Troin, M., Poulin, A., Baraer, M., Brissette, F. 2016. Comparing snow models under current and future climates:. *Journal of Hydrology* 540: 588–602.

Valéry, A. 2010. Modélisation précipitations débit sous influence nivale : Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. In: Doctorat ParisTech Thèse. Paris: AgroParisTech: 187–216.

Valéry, A., Andréassian, V., Perrin, C. 2014a. 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 1 – Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments. *Journal of Hydrology* 517: 166–1175.

Valéry, A., Andréassian, V., Perrin, C. 2014b. 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology* 517: 1176–1187.

van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5: 5–31.

Vidmar, A. 2021. Umerjanje delno distribuiranih hidroloških modelov: doktorska disertacija. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=124693&lang=slv> (Pridobljeno 23. 11. 2023.)

WMO. 2012. International Glossary of Hydrology. Ženeva: WMO; UNESCO.

Worsley, S. 2022. What is R? - An Introduction to The Statistical Computing Powerhouse. <https://www.datacamp.com/blog/all-about-r> (Pridobljeno 3. 11. 2023.)

WWF. 2015. Svet brez koral?. https://livingplanet.panda.org/sl-SI/svet_brez_koral/ (Pridobljeno 17. 10. 2023.)