

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ

Џенита Ф. Идризовић

АНАЛИЗА УТИЦАЈА КЛИМАТСКИХ
ПРОМЕНА НА ВОДНЕ РЕСУРСЕ И
ОБЕЗБЕЂЕНОСТ УСЕВА И ЗАСАДА ВОДОМ
НА БРДСКО-ПЛАНИНСКОМ ПОДРУЧЈУ

докторска дисертација

Београд, 2022.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF AGRICULTURE

Dženita F. Idrizović

ANALYSIS OF CLIMATE CHANGE IMPACT
ON WATER RESOURCE AVAILABILITY AND
CROP WATER SECURITY IN A
MOUNTAINOUS CATCHMENT

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022.

МЕНТОР:

др Еника Грегорић, редовни професор

Универзитет у Београду
Пољопривредни факултет

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

др Невенка Ђуровић, редовни професор

Универзитет у Београду
Пољопривредни факултет

др Гордана Матовић, ванредни професор

Универзитет у Београду
Пољопривредни факултет

др Мирјам Вујадиновић Мандић, ванредни професор

Универзитет у Београду
Пољопривредни факултет

др Марија Ћосић, ванредни професор

Универзитет у Београду
Пољопривредни факултет

др Јасна Плавшић, редовни професор

Универзитет у Београду
Грађевински факултет

Датум одбране: _____

Првенствено се захваљујем менторки проф. др Еники Грегорић на стручној помоћи, посвећености, подршци и усмеравању током истраживања и писања дисертације. Захвална сам на уложеном времену, саветима и несебичном дељењу знања које сам током мастер и докторских студија добила од моје менторке, а која су у великој мери утицала на моје профилисање у области научно-истраживачког рада.

Неизмерну захвалност дугујем доц. др Весни Почучи, која је имала непроцењиву улогу у процесу мог академског и личног развоја. Захвална сам јој на огромном времену, стручним саветима и знању које је поделила са мном, а највише од свега на подршци и разумевању током тешких периода у студирању и писању дисертације.

Захваљујем се проф. др Невенки Ђуровић на помоћи и сугестијама у решавању проблема на које сам наилазила током истраживања и писања докторске дисертације и докторских студија. Професорки др Гордани Матовић захвална сам на свим саветима, сугестијама, разменама мишљења и помоћи које ми је пружила током истраживања и писања докторске дисертације. Захвална сам проф. др Мирјам Вујадиновић Мандић на саветима и стручној помоћи при учењу метеорологије, истраживању и писању дисертације. Захваљујем се проф. др Марији Ћосић на сугестијама и саветима при прегледавању рукописа. Професорки др Јасни Плавшић захваљујем се на сарадњи и корисним саветима који су унапредили квалитет ове докторске дисертације.

Захваљујем се Републичком хидрометеоролошком заводу Србије на сарадњи.

Од почетка мог академског образовања имала сам велику помоћ, подршку, савете и пријатељство од проф. др Драгана Ћирковића са Државног Универзитета у Новом Пазару, на чему сам му бескрајно захвална.

Дубоку захвалност дугујем мојој породици. Стога, ову дисертацију посвећујем мојим родитељима, Фадилу и Ибрими, у знак захвалности за усмерење и подршку коју су ми пружили, сестрама, Адели, Ајтани и Сумеји, као захвалност на институционалном сестринству, мужу Ахмеду, јер ми пружа огромну љубав и подршку и сину Тарику, највећој радости у мом животу.

Анализа утицаја климатских промена на водне ресурсе и обезбеђеност усева и засада водом на брдско-планинском подручју

Сажетак

У овој докторској дисертацији развијена је методологија за анализу утицаја климатских промена на расположивост водних ресурса и обезбеђеност водом најзаступљенијих култура, као и на агроклиматске услове на сливовима у брдско-планинским подручјима. Методологија је демонстрирана на пилот подручју слива реке Топлице, који је изабран као репрезентативан слив.

За потребе истраживања анализирани су пројекције: падавина (P), температуре ваздуха (T), потенцијалне евапотранспирације (PET), протицаја (Q), нивоа подземне воде у равничарском делу слива (NPZV), евапотранспирације култура (ETc), дефицита/суфицита воде и агроклиматских индекса. Пројекције обухватају период 2021-2100 и засноване су на RCP4.5 и RCP8.5 сценаријима, док је као референтни изабран период 1971-2000. За израду симулација P и T коришћени су резултати ансамбла (енг. *multi-model ensemble*) од 7 комбинација глобалних и регионалних климатских модела хоризонталне резолуције 12,5 km из EURO-CORDEX пројекта. Протицај је симулиран калибрисаним HBV-light моделом. Зависност NPZV од протицаја у реци Топлици моделирана је коришћењем *soft computing* технике вештачке неуралне мреже (енг. *Artificial Neural Networks*, ANN). Mann-Kendall тренд тестом испитано је постојање тренда и његова статистичка значајност, а применом Mann-Whitney теста испитивана је значајност промене у блиској (2021-2050) и далекој (2071-2100) будућности, у односу на референтни период (1971-2000).

На годишњем нивоу не очекују се значајне промене у доступности водних ресурса на проучаваном подручју. Међутим, резултати указују на израженију неуниформност месечне расподеле водних ресурса у будућности. У периоду април-септембар, када су највеће потребе за водом у пољопривреди, предвиђено је смањење протицаја и пораст дубине подземне воде до краја века по RCP8.5. Поменуто смањење у доступности водних ресурса може имати негативан утицај на пољопривреду, водоснабдевање, хидроенергетику, животну средину, рибарство и туризам овог подручја. У зимским месецима предвиђа се повећање P, T, Q, као и NPZV.

На анализираном подручју, у условима климатских промена у будућности, очекује се статистички значајно повећање потреба за водом на нивоу вегетационе сезоне свих посматраних култура, по оба RCP сценарија. Током вегетационе сезоне најзаступљенијих култура гајених на подручју округа Топлице потребе за водом се не могу задовољити предвиђеним количинама ефективних падавина (P_{eff}), на шта указује појава дефицита воде у референтном и периоду будућности. Највећем недостатку воде у будућности биће изложени воћарски засади јабуке, вишње и шљиве, као и засади паприке, парадајза и кромпира. Анализом података о промени предикованог дефицита изабраних култура у будућности у односу на референтни период уочава се да вредности дефицита имају тенденцију пораста у будућности, при чему је величина промене највећа у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију. Посматрано на месечном нивоу, највеће вредности дефицита воде за већину посматраних култура предвиђају се у летњим месецима, у јулу и августу. У том периоду већина пролећних усева пролази кроз фазе развића у којима су биљке веома осетљиве на недостатак воде који може имати изразити негативан утицај на висину приноса.

Процена утицаја климатских промена на агроклиматске индексе посматраног подручја указује да се у будућности може очекивати повећање дужине вегетационе сезоне, као и ранија појава позног пролећног и одлагање појаве раног јесењег мраза, а тиме и продужење периода

без мрза. Предвиђено смањење просечног броја мразних и ледених дана ($T_{\min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{\max} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) у будућности може допринети стварању погоднијих агроклиматских услова за производњу озимих усева, док повећање просечног броја летњих ($T_{\max} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) и тропских ($T_{\max} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) дана у летњем периоду може довести до повећања ризика од топлотног стреса код усева и засада.

Спроведена анализа показује да се на подручју слива Топлице у будућности могу очекивати повећани ризици од суше и екстремних климатских појава. Неке од предложених мера адаптације су наводњавање, померање датума сетве, узгој сорти и хибрида отпорних на сушу и температурни стрес, повећање површина под озимим усевима. За прилагођавање на измењене климатске услове потребно је ангажовање од стране надлежних институција у виду доношења стратешког и правног оквира за спровођење мера адаптације у пољопривреди, субвенционисање имплементације мера адаптације, едукација пољопривредника, као и спровођење истраживања у области утицаја климатских промена на биљну производњу.

Значај дисертације се огледа и у предложеној методологији која ефикасно комбинује *soft computing* технику и концептуални хидролошки модел са климатским моделима. Посебно је значајно да је предложена методологија применљива и на друге сливове. Резултати добијени применом предложене методологије могу послужити као основа за развој стратешких планова адаптације пољопривреде, али и других сектора који се ослањају на водне ресурсе.

Кључне речи: климатске промене; водни ресурси; HBV-light модел; ANN; евапотранспирација култура; обезбеђеност култура водом; агроклиматски индекси; адаптационе мере.

Научна област: Пољопривреда

Ужа научна област: Мелиорације земљишта

Analysis of climate change impact on water resource availability and crop water security in a mountainous catchment

Abstract

In this doctoral dissertation, a methodology was developed for the analysis of the impact of climate change on the availability of water resources and water security of the most grown crops, as well as on agroclimatic conditions in catchments located in mountainous areas. The methodology was demonstrated in the pilot area of the Toplice River Basin, which was selected as a representative catchment.

The research includes the analysis of the projections of: the precipitation (P), air temperature (T), potential evapotranspiration (PET), discharge (Q), groundwater level (GWL) variation in the lowland part of the catchment, crop evaporation (ET_c), water deficit/surplus as well as agro-climatic indices. The projection pertain to the period from 2021 to 2100, based on RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, while period 1971-2000 was selected reference period. Projections of P and T are based on the results of a multi-model ensemble of 7 combination global and regional climatic models of horizontal resolution of 12.5 km from the EURO-CODEX projects. Runoff is simulated by a calibrated HBV-light model. The correlation between GWL and river discharge was modeled by soft computing techniques of artificial neural networks (ANN). The Mann-Kendall trend test is used to check for a trend and its statistical significance, and the Mann-Whitney test to examine the statistical significance of a change in the mean ensemble median of time-series for the near future (2021–2050) and distant future (2071–2100), relative to the reference period (1971–2000).

No notable changes are expected on an annual scale in the study area. However, the results show that the current non-uniformity of the monthly water distribution is growing in the future. The decrease in discharge and the increase of groundwater depth, in the period from April to September, at the end of the century according to RCP8.5, when the water requirements in agriculture are the highest. Aforementioned decrease in the availability of water resources can have a negative impact of agriculture, water supply, hydropower, environment, fishery and tourism in this area. The increase in P, T, Q as well as GWL is expected in winter months.

The increase in water requirement in growing seasons of all analyzed crops is expected to experience a statistically significant growth in future in the conditions of the climate change, according to both RCP scenarios. During the growing season of the most grown crops cultivated in the the Toplica district, crop water requirement cannot be saturated by the predicted amount of effective precipitation (P_{eff}), which is indicated by the water deficit in the referent and future period. The greatest water deficit in future will affect the most apple, cherry, plum fruit plantations as well as paprika, tomato and potato plantations. The analysis of the data of predicted deficit of the analyzed crops in the future relative to the referent period shows the deficit values tend to increase in the future, whereas the greatest changes will be in the period of distant future according to the RCP8.5 scenario. Monthly observations predict the greatest water deficit in July and August for most of the observed crops. In that period, most of the spring corpses follow the growing phase when the plants are very sensitive and the water deficit can negatively impact the crop yield.

The estimation of the climate change effects on the agro-climatic indices of the observed region indicates that in the future it is to expect the increase in the duration of growing season as well as the earlier appearance of late spring frost and the delay of the first autumn frost, and therefore the prolongation the period without frost. It is estimated the decrease in the number frosty and icy days ($T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $T_{max} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) in future can contribute to more favorable agroclimatic condition for

the winter crop cultivation. However, the increased average number of summer ($T_{max} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) and tropical days ($T_{max} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) in the summer period can contribute to the higher risk of temperature stress on crops.

Спроведена анализа показује да се на подручју слива Топлице у будућности могу очекивати повећани ризици од суше и екстремних климатских појава. Неке од предложених мера адаптације су наводњавање, померање датума сетве, узгој сорти и хибрида отпорних на сушу и температурни стрес, повећање површина под озимим усевима. За прилагођавање на измењене климатске услове потребно је ангажовање од стране надлежних институција у виду доношења стратешког и правног оквира за спровођење мера адаптације у пољопривреди, субвенционисање имплементације мера адаптације, едукација пољопривредника, као и спровођење истраживања у области утицаја климатских промена на биљну производњу.

The conducted analysis indicates the increased risk of drought and extreme climatic conditions in the Toplica River catchment. Some of the proposed adaptation measures are irrigation, change of sowing dates, growing varieties and hybrids resistant to drought and temperature stress, increasing areas under winter crops. Competitive authorities are to be engaged in the adaptation to the altered climate conditions considering strategical and legal framework in the implementation of agricultural adaptation measures, subventions of implementation of adaptation measures, farmer education, as well as the research in the area of climatic changes on plant cultivation.

The significance of this dissertation is also in the proposed methodology that effectively combines soft computing technique and conceptual hydrological model with climate models. It is particularly important that the proposed methodology is applicable to other catchments as well. The results obtained by applying the proposed methodology can serve as a basis for the development of strategic plans for the adaptation of agriculture, but also other sectors that rely on water resources.

Key words: climatic changes, water resources, HBL-light model, ANN, crop evapotranspiration; crop water supply, agricultural indices, adaptation measures

Research field: Agriculture

Specific research field: Soil Science

Садржај

1.	Увод.....	1
2.	Преглед литературе.....	4
2.1	Клима, климатски систем, климатске промене.....	4
2.1.1	Осмотрене климатске промене.....	4
2.1.2	Климатске пројекције.....	7
2.1.3	Сценарији емисије гасова стаклене баште.....	7
2.1.4	Климатски модели.....	8
2.1.5	Резултати климатских пројекција.....	9
2.2	Хидролошке пројекције.....	10
2.2.1	Хидролошки модели.....	11
2.2.2	Хидролошки модел HBV-light.....	13
2.2.3	Моделирање подземних вода.....	14
2.3	Неизвесности у климатским и хидролошким пројекцијама.....	17
2.4	Утицај климатских промена на водне ресурсе.....	18
2.4.1	Утицај климатских промена на површинске воде.....	19
2.4.2	Утицај климатских промена на подземне воде.....	22
2.5	Утицај климатских промена на потребе усева и засада за водом.....	24
3.	Материјал и методе.....	28
3.1	Опис проучаваног подручја.....	28
3.1.1	Локација и величина слива.....	28
3.2	Топографске, геолошке, хидрогеолошке и педолошке карактеристике подручја.....	28
3.2.1	Топографија подручја.....	28
3.2.2	Геолошке карактеристике подручја.....	29
3.2.3	Хидрогеолошке карактеристике подручја.....	31
3.2.4	Педолошке карактеристике подручја.....	33
3.3	Подаци коришћени у истраживањима.....	34
3.3.1	Мерени подаци.....	34
3.3.2	Подаци из климатских и хидролошких пројекција.....	43
3.4	Методологија.....	44
3.5	Модели коришћени у истраживањима.....	46
3.5.1	Климатски модели.....	46
3.5.2	HBV-light модел.....	48
3.5.3	Вештачке неуралне мреже (Artificial Neural Networks, ANN).....	53
3.6	Процена утицаја климатских промена на обезбеђеност усева и засада водом.....	55
3.6.1	Потребе усева и засада за водом.....	56
3.6.2	Обезбеђеност усева и засада водом.....	58

3.7	Агроклиматски услови	59
3.8	Методологија обраде података	60
(20)	61
4.	Резултати и дискусија	64
4.1	Калибрација и валидација	64
4.2	Анализа утицаја климатских промена на водне ресурсе у сливу реке Топлице ..	68
4.2.1	Утицај климатских промена на климатолошке величине	68
4.2.2	Утицај климатских промена на хидролошке величине	77
4.2.3	Процена утицаја климатских промена на доступност водних ресурса	84
4.3	Анализа утицаја климатских промена на обезбеђеност усева и засада водом ...	86
4.3.1	Утицај климатских промена на климатолошке величине за подручје општина у Топличком округу	86
4.3.2	Утицај климатских промена на потребе усева и засада за водом	96
4.3.3	Утицај климатских промена на обезбеђеност усева и засада водом	106
4.4	Агроклиматски индекси	134
4.4.1	Дужина вегетационе сезоне	134
4.4.2	Појава позног пролећног и раног јесењег мраза	135
4.4.3	Просечан број мразних ($T_{min} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$) и ледених ($T_{max} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$) дана	137
4.4.4	Просечан број летњих ($T_{max} > 25 \text{ } ^\circ\text{C}$) и тропских ($T_{max} > 30 \text{ } ^\circ\text{C}$) дана	138
4.4.5	Сума ефективних температура (GDD)	139
4.4.6	Процена утицаја климатских промена на агроклиматске индексе	141
5.	Адаптационе мере	142
6.	Закључак	144
7.	Литература	149
	Биографија кандидата	171
	Изјава о ауторству	172
	Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	173
	Изјава о коришћењу	174

1. Увод

Данас су климатске промене, услед којих се током 21. века предвиђа пораст температуре ваздуха широм света (Kovats et al., 2014), препознате као озбиљан глобални проблем. У Шестом извештају (енг. *Sixth Assessment Report, AR6*) Међувладиног панела за климатске промене (енг. *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*), наводи се да је средња глобална површинска температура за период 2011-2020 већа за 1,09 °C у односу на период 1850-1900 (IPCC, 2021). Очекује се наставак тренда загревања и пораст просечне глобалне површинске температуре ваздуха у периоду 2081-2100 од 3,3 °C до 5,7 °C према сценарију веома високе емисије гасова стаклене баште (енг. *Green House Gas, GHG*), у односу на период 1850-1900 (IPCC, 2021). Према резултатима климатских симулација, предвиђају се промене и у учесталости појава и интензитета топлотних таласа, суше и интензивних падавина, што је већ и осмотрено у Европи и другим деловима света (Kovats et al., 2014). Загревање климатског система резултоваће променом у количини падавина и потрошњом воде на процес евапотранспирације, што ће условити промене у хидролошком циклусу и утицати на расположивост водних ресурса у будућности (IPCC, 2021). Резултати спроведених истраживања указују на то да ће климатске промене изменити хидролошки режим река у Европи (Lobanova et al., 2018). Са друге стране, очекује се повећање потражње за пијаћом и водом за потребе индустрије услед повећања броја становника, као и повећање потребе за водом пољопривреде и енергетике (Harding et al., 2014). Стога је посебно важно имати увид у потенцијалне утицаје климатских промена на доступност водних ресурса у будућности.

Организација за храну и пољопривреду (*Food and Agriculture Organization, FAO*) и IPCC истакле су пољопривреду као једну од најугроженијих привредних грана услед климатских промена. Почетком 21. века на глобалном нивоу потрошња воде пореклом из река, издани и језера у сектору пољопривредне производње само за потребе наводњавања износила је 70% (FAO, 2003). Према Srivastav et al. (2021), претпоставка је да ће се потрошња воде за наводњавање повећати за 14,7% до 2095. године. Промене климатских услова утицаће на смањење водних ресурса што ће се одразити на пољопривредну производњу (Srivastav et al., 2021).

Уобичајен метод процене утицаја климатских промена на водне ресурсе подразумева примену климатских пројекција и хидролошког моделирања (Seiller et al., 2012). Наведени приступ успешно је примењен у студијама на глобалном (Arnell и Gosling, 2013; He et al., 2021) и на регионалном нивоу (Langsholt et al., 2013; Lobanova et al., 2018; Xiang et al., 2021; Alehu et al., 2022; Ayalew et al., 2022; Sok et al., 2022; Tarekegn et al., 2022; Zhang et al., 2022).

Климатске пројекције добијају се помоћу глобалних климатских модела (енг. *Global Climate Models, GCMs*) и засноване су на различитим емисионим сценаријима GHG. Сценарији коришћени у Петом извештају о промени климе IPCC (2013), најчешће примењивани за климатске симулације, засновани су на концепту *Representative Concentration Pathways (RCP)* (Jacob et al., 2014). Просторна резолуција GCM није задовољавајућа за проучавање утицаја климатских промена на нивоу слива (Reshmidevi et al., 2018), зато се у те сврхе користе резултати симулација регионалних климатских модела (енг. *Regional Climate Models, RCM*). Ови модели имају финију просторну резолуцију, чиме обезбеђују прецизније резултате у простору. Међутим, климатски модели генерално, и глобални и регионални, у себи садрже одређене систематске грешке које утичу на њихове резултате. Резултати RCM пре даље употребе коригују се одговарајућим статистичким методама (Piani et al., 2010).

У циљу сагледавања утицаја климатских промена на хидролошки режим статистички кориговане климатске пројекције, добијених помоћу RCM, користе се као улазни подаци у хидролошки модел (Reshmidevi et al., 2018). Хидрограм на излазном профилу реке може се добити детерминистичким хидролошким моделима. За моделирање отицаја у сливу често се користе хидролошки модели падавине-отицај (енг. *rainfall-runoff model*), којима се

трансформишу падавине у отицај у зависности од параметара којима се описује слив. У овом истраживању симулација отицаја урађена је применом семидистрибутивног концептуалног модела HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) - light (Bergström, 1976), који је заснован на подацима о падавинама, температури ваздуха и потенцијалној евапотранспирацији (Seibert and Vis, 2012; Bhattarai et al., 2018).

Поред утицаја климатских промена на површинске водне ресурсе, могу се очекивати и промене у режиму подземних вода (Kløve et al., 2014). За симулације нивоа подземних вода најчешће су у употреби нумерички модели у којима се математичким једначинама описују физичке карактеристике слива (Tapolgou et al., 2014; Wunsch et al., 2018). Примена физичких модела отежана је због неопходности великог броја података о физичким карактеристикама слива и великог броја параметара неопходних за калибрацију модела и извођење симулација (Barzegar et al., 2017). Многи од тих података су обично скупи и / или их је тешко добити, посебно у земљама у развоју (Jha and Sahoo, 2015). Насупрот томе, вештачке неуралне мреже (енг. *Artificial Neural Networks*, ANN) посматрају систем као „црну кутију“ (енг. *black-box*), са циљем да пронађу везу између улазних и излазних података, не узимајући у обзир прецизну физичку карактеризацију подручја (Barzegar et al., 2017). Како су процеси везани за подземне воде у природи врло комплексни, ANN су нашле велику примену у њиховом моделирању (Djurovic et al., 2015; Wunsch et al., 2018). Вештачке неуралне мреже успешно су примењене у студијама утицаја климатских промена на подземне воде у свету (Chang et al., 2015; Jeihouni et al., 2019a). За предвиђање промене нивоа подземне воде у овом истраживању коришћен је ANN модел због тога што не захтева детаљну физичку карактеризацију подручја.

Досадашња истраживања утицаја климатских промена на водне ресурсе у Србији (Langsholt et al., 2013; Тодоровић и Плавшић, 2015) обухватила су неколико карактеристичних сливова на којима су анализиране промене просечних годишњих, максималних и минималних вредности протицаја, док су промене у нивоу подземних вода у доступној литератури веома мало анализиране. Пројекције протицаја заснивају се на резултатима симулација глобалних и регионалних климатских модела и углавном на емисионим сценаријима IPCC/SRES (Special Report on Emissions Scenarios, SRES), коришћеним у Трећем (енг. *Third Assessment Report, AR3*) и Четвртом извештају (енг. *Fourth Assessment Report, AR4*) IPCC.

Учешће пољопривредне производње у укупном бруто домаћем производу (БДП) Србије у 2020. години износило је 6,3% (Републички Статистички Завод - РСЗ, 2021). Екстремни климатски услови узроковани климатским променама изазвали су знатне губитке и штете у пољопривредној производњи у Србији током претходне две деценије (Vujadinovic Mandic et al., 2022a). Очекује се да ће повећање температуре ваздуха, промене у количини и дистрибуцији падавина и повећана учесталост и интензитет суше довести до повећања потреба усева за водом, како у целој Европи (Rio et al., 2018), тако и у Србији (Gregorić et al., 2020). Истраживања рађена у Србији показују да се током летњег периода очекује повећање температуре ваздуха и смањење количине падавина (Vuković et al., 2018). Овакви услови ће се одразити на потребе усева за водом, као и на њихову обезбеђеност водом. Очекивано је да ће дефицит воде, чему су биљке током лета већ изложене, у будућности бити још већи (Стричевић и сар., 2014; Gregorić et al., 2020). Потенцијални ефекти климатских промена на биљну производњу могу се проценити променом агроклиматских индекса (Hatfield et al., 2020; Arnell и Freeman, 2021).

Услед предикованог повећаног ризика од топлотних таласа и суше, Србија је означена као регион у коме се очекују изразито негативни утицаји климатских промена на пољопривредну производњу (Olesen et al., 2011). У условима осмотрених и предвиђених промена агроклиматских услова јавља се потреба за применом мера адаптације (Anderson et al., 2020), како би се избегли или ублажили негативни утицаји и искористили евентуални позитивни утицаји климатских промена на пољопривредну производњу. Прегледом литературе најчешће предложене мере односе се на промене у сетвеној структури (замена

култура које имају велике потребе за водом са културама које имају мање потребе), примену редукованог наводњавања и повећање ефикасности система за наводњавање, измене у датуму сетве, гајење сорти отпорних на сушу и температурни стрес (Iglesias et al., 2012; Donatelli et al., 2015; Јанчић; 2015; Makowski et al., 2020; Babaeian et al., 2021; Стричевић и сар., 2021).

На подручју западног Балкана налази се велики број мањих сливова, са сличним физичко-географским карактеристикама. Ови сливови су најчешће лоцирани у брдско-планинским подручјима, а карактерише их кишно-снежни режим, услед чега су осетљиви на промену температуре, а самим тиме и на климатске промене. Традиционално, брдско-планинска подручја су неразвијени, рурални региони у Србији, са пољопривредном производњом заснованом у равничарском делу слива. За велики број становника ових крајева, пољопривреда је основна делатност и једини извор прихода. Свако смањење обима пољопривредне производње могло би угрозити њихову егзистенцију. Зато је значајно проценити на који начин ће климатске промене, на овим подручјима, утицати на количине вода у будућности. Потенцијално смањење количина вода, поред тога што би отежало и смањило пољопривредну производњу, изазвало би и промену већ лоших социо-економских карактеристика, додатно би погоршало услове живота пољопривредног становништва, вероватно довело до већег иселавања и још већег осиромашења.

За истраживање је као репрезентативни слив брдско-планинских подручја одабран слив реке Топлице. Циљ истраживања обухваћених програмом ове докторске дисертације је квантификовање промена у расположивости водних ресурса слива реке Топлице и увид у величину промене обезбеђења водом најзаступљенијих биљних врста и агроклиматских индекса на анализираном подручју, у условима климатских промена. Сагледавање ових утицаја може имати велики значај за припрему стратегије очувања водних ресурса, као и предлагање мера за ублажавање неповољних климатских утицаја на пољопривредну производњу. Резултати истраживања употпуниће досадашња сазнања о могућим утицајима климатских промена на количине вода сливова брдско-планинских подручја Србије. Посебан значај дисертације је истраживање утицаја климатских промена на подземне воде, које је у иницијалној фази у нашој земљи, а релативно мало је проучавано и у свету. Важан допринос дисертације огледа се у приказаним могућностима примене методологије која успешно комбинује *soft computing* технику и концептуални хидролошки модел, што представља добар нумерички оквир за моделирање зависности хидролошких величина, које у комбинацији са резултатима климатских модела дају предвиђања у блиској и далекој будућности.

2. Преглед литературе

2.1 Клима, климатски систем, климатске промене

Клима се, у ужем смислу, може дефинисати као просечно стање временских услова, односно „средња вредност и варијабилност измерених метеоролошких елемената на одређеној локацији, током одговарајућег временског периода“ (Ђурђевић и Тошић, 2017). Према упутству Светске метеоролошке организације (енг. *World Meteorological Organization, WMO*) период који се користи за анализу климатских услова износи тридесет година. Сваки тридесетогодишњи период који почиње годином која има задњу цифру 1, а завршава годином која има задњу цифру 0 назива се стандардним нормалним периодом. Стандардни нормални период служи као референтна тачка на основу које се процењују тренутни или недавни климатски услови, односно климатски услови који ће се највероватније испољити на датој локацији (WMO, 2017).

У ширем смислу, клима се може описати као равнотежно стање климатског система. Климатски систем се састоји од пет засебних компоненти, које су међусобно повезане и утичу једна на другу: атмосфера, хидросфера, криосфера, литосфера и биосфера (Ђурђевић и Тошић, 2017). Иако се климатски систем непрестано мења због интеракције између компоненти, може се рећи да је он у енергетској равнотежи. Између количине долазног Сунчевог и одлазног зрачења Земље мора постојати баланс, те због тога не може доћи до бесконачног хлађења или загревања. При промени неког од спољашњих фактора, климатски систем се прилагођава, клима се мења, што може довести до енергетског дисбаланса и, последично, промене температуре. То прилагођавање изазива промену динамике појединих делова климатског система, односно преноси се утицај на његове друге делове. Међусобни утицај различитих делова система назива се повратна спрега (енг. *feedback mechanisms*) и она може бити позитивна или негативна и може довести до појачавања или смањења почетног ефекта (Le Treut et al., 2007). Делови климатског система функционишу по принципу позитивних и негативних повратних спрега, што условљава немогућност прецизног предвиђања одговора климатског система у будућности на факторе који доводе до промене равнотежног стања.

Међувладин панел за климатске промене дефинише климатске промене као промене у стању климе које могу бити идентификоване коришћењем статистичких тестова кроз промене у просечним вредностима климатолошких величина, као и у њиховој варијабилности, у току дужег временског периода (декада или дуже). За разлику од IPCC, који под климатским променама сматра промене климе током времена узроковане природном варијабилношћу климатског система или људским активностима, Оквирна конвенција Уједињених нација о променама климе (енг. *United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*), под климатским променама подразумева промене у клими које су директно или индиректно последица људских активности.

2.1.1 Осмотрене климатске промене

У Петом извештају о промени климе, IPCC (2013) наводи да су од 1950. године осмотрене до тада незабележене промене које указују на евидентно загревање климатског система. Примећено је загревање атмосфере и океана, смањење количине снега и леда и пораст нивоа мора (IPCC, 2013).

На загревање климатског система највећи утицај су имале људске активности и повећана емисија гасова са ефектом стаклене баште, што се одразило променама у температури, количини падавина, загревању океана и повећаној концентрацији гасова са ефектом стаклене баште (IPCC, 2013).

Према Петом извештају о промени климе (AR5), период 1983-2012 је највероватније најтоплији тридесетогодишњи период у последњих 1400 година на северној хемисфери.

Просечна температура ваздуха изнад копна и океана повећала се за 0,85 (0,65-1,06) °C у периоду 1880-2012 (IPCC, 2013).

Осмотрене промене падавина не показују статистички јасан тренд на глобалном нивоу. Изнад копнених области средњих географских ширина северне хемисфере подаци указују на повећање суме падавина од 1901. године (IPCC, 2013).

Загревање океана има велики удео у порасту укупне енергије ускладиштене у климатском систему у периоду од 1971. до 2010. године, више од 90%. Од тога 60% потиче из горњег дела океана до 700 m дубине. Највећи степен загревања океана од 0,11°C по декади примећен је до 75 m дубине. Повећање атмосферске концентрације угљен-диоксида, метана и азотног оксида узроковало је ацидификацију океана за 26%, односно смањење рН вредности за 0,1 од почетка индустријске ере (IPCC, 2013).

Током периода 1992-2011 смањиле су се масе леда на Гренланду и Антарктику, док се обим леда на Арктику смањило за 3,5-4,1% по декади, за период од 1979-2012. Глобални ниво мора порастао је за 0,19 m у периоду 1901-2010. године (IPCC, 2013).

Економски и технолошки развој, повећање популације и интензивно коришћење фосилних горива неки су од узрока повећања емисије гасова са ефектом стаклене баште од почетка индустријске ере. Гасови са ефектом стаклене баште саставни су део атмосфере и то су угљен-диоксид (CO₂), метан (CH₄), азот (I)-оксид (N₂O), стратосферска водена пара, стратосферски озон, тропосферски озон и тзв. F-гасови (хлоро-флуоро-угљеници (CFCs), хлоро-флуоро-угљоводоници (HCFCs), флуоро-угљоводоници (HFCs), бром-хлоро-флуоро-угљеници (BCFC), сумпор-хексафлуориди (SF₆) итд.). Антропогено повећање концентрације GHG препознато је као доминантан узрок глобалног загревања (IPCC, 2014). У периоду 1970-2010 примећен је значајан раст антропогених емисија GHG, посебно од 2000. до 2010. године, упркос глобалним напорима за ублажавањем климатских промена. Антропогена емисија GHG у 2010. години достигла је концентрацију од 49 (± 4,5) гига тона еквивалентног угљен-диоксида (Gt CO₂-eq) годишње, од чега је 78% удео емисије угљен-диоксида (CO₂) насталог при сагоревању фосилних горива и индустријским процесима (IPCC, 2014).

Према извештају IPCC из 2018. године, *Global Warming of 1.5°C*, средња глобална температура копна за декаду од 2006. до 2015. године већа је за 0,87 °C (0,75 °C-0,99 °C) у односу на просечну вредност за период 1850-1900, са процењеним трендом повећања од 0,2 °C по декади (IPCC, 2018).

Осмотрене промене температуре ваздуха у Европи карактерише повећање просечне температуре ваздуха, са највећим повећањем у северној Европи, уз чешиће и интензивније појаве топлих температурних екстрема. Осмотрене промене у падавинама указују на тренд повећања суме годишњих падавина до 70 mm по декади у северној Европи, док је у јужној Европи регистровано смањење падавина (Kovats et al., 2014). За подручје Србије рађене су анализе осмотрених промена климатских величина, које указују на јасан тренд повећања температуре ваздуха на целој територији Србије, док промене падавина показују сезонску и просторну варијабилност (Поповић и сар., 2009; Luković et al., 2014; Milovanović et al., 2017; Mimić et al., 2017; Ђурђевић и сар., 2018).

Ђурђевић и сар. (2018) извршили су анализу осмотрених промена температуре ваздуха и падавина на територији Србије у периоду 1998-2017 и 2008-2017. Промена је квантификована у односу на референтни период 1961-1990. Резултати указују да одступање средње годишње температуре у току периода 1998-2017, у односу на референтни период износи 0,5 до 1,5 °C, на целој територији. На највећем делу територије Србије током периода 2008-2017 примећено је повећање температуре више од 1,5 °C, док је повећање веће од 2 °C карактеристично за западне и источне делове земље. Уочен је тренд пораста средње годишње температуре у Србији од 0,36 °C по декади (1961-2017), односно 0,60 °C (1981-2017). За разлику од промене у температури, анализа промене падавина не показује изражен и

једнозначан тренд. У периоду 1998-2017 уочено је повећање просечне годишње количине падавина од 0 до 10% у односу на референтни период у највећем делу земље. У јужним деловима Србије у периоду 2008-2017 повећање просечне годишње количине падавина износи преко 10%. Анализе на сезонском нивоу указују на промене у унутаргодишњој расподели падавина. У току летњих месеци (јун-август) карактеристично је смањење падавина, које у централним и јужним деловима земље износи од -20% до -30%. Ови резултати у складу са истраживањем спроведеним од стране Поповић и сар. (2009), који су објавили да је на територији Србије у периоду 1951-2007 примећен изражен тренд раста температуре ваздуха. Анализа падавина не показују јасан тренд промене на годишњем нивоу. Уочено је да је од 1982. до 2000. године повећан интензитет суше, док се после 1984. године највећи број летњих сезона одликује дефицитом падавина (Поповић и сар., 2009).

Луковић et al. (2014) анализирали су тренд падавина у периоду 1961-2009 на основу података са 63 метеоролошке станице у Војводини. На годишњем нивоу није детектован статистички значајан тренд падавина, док су на сезонском нивоу примећене благе тенденције ка смањењу падавина у зимским и пролећним месецима, односно повећању у јесењим. Смањење падавина током зиме и пролећа у Војводини у периоду 1946-2006 уочено је и у истраживању спроведеном од стране Тошић et al. (2013).

Користећи различите методе мултиваријационе анализе, Гочић и Трајковић (2014) анализирали су просторне и временске варијације падавина у периоду 1946-2012, на основу података са 26 синоптичких станица у Србији. Резултати показују тренд повећања средњих годишњих падавина на територији Србије од $0,851 \text{ mm} \cdot \text{година}^{-1}$. У северним и североисточним деловима земље тренд повећања падавина износи $0,656 \text{ mm/годишње}$, у западним и југозападним $2,080 \text{ mm} \cdot \text{година}^{-1}$ а у централној, источној, јужној и југоисточној Србији повећање износи $0,383 \text{ mm} \cdot \text{година}^{-1}$.

Миловановић et al. (2017) објавили су да је у највећем делу Србије на годишњем нивоу у периоду 1961-2010 примећено статистички незначајно благо повећање падавина, у распону од -5 и +5 и +5 и +15 $\text{mm} \cdot \text{декада}^{-1}$. У источним деловима земље карактеристично је смањење падавина до $-15 \text{ mm} \cdot \text{декада}^{-1}$. Повећање падавина и до $+30 \text{ mm} \cdot \text{декада}^{-1}$ примећено је у неким деловима западне Србије.

У истом периоду (1961-2010) Румл et al. (2016) анализирали су временске и просторне промене температуре ваздуха и падавина у Србији на основу података са 26 метеоролошких станица. Статистичком методом најмањих квадрата анализиран је тренд промена за сваку станицу и за целу територију Србије за периоде 1961-2010 и 1986-2010. године. Резултати указују на значајно повећање минималне и максималне температуре ваздуха на територији Србије, док промена падавина није статистички значајна у периоду 1961-2010. Израженије промене примећене су у скорашњој прошлости, повећање минималне температуре од $0,52 \text{ }^\circ\text{C}$, односно максималне температуре $0,45 \text{ }^\circ\text{C}$ по декади. У периоду 1986-2010, просечно повећање падавина за Србију износи 65 mm по декади. Поред просечних годишњих вредности температуре ваздуха и падавина, Румл et al. (2017) анализирали су и промене у температурним екстремима у Србији у истом периоду. Топли и хладни температурни индекси указују на изражен тренд загревања после 1980. године, уз повећану учесталост појаве топлих дана и ноћи и појаве хладних ноћи.

Бурсаћ et al. (2022) испитивали су годишње и сезонске промене у температури и падавинама за две метеоролошке станице на подручју слива реке Топлице, Прокупље и Куршумлија и промене у протицају реке Топлице на хидролошким станицама Пепељевац и Дољевац. Испитивање је обухватило период 1957-2018, који је при анализи података подељен на периоде 1957-1987, 1988-2018 и 1975-1994. године. Током периода 1957-2018 уочено је повећање падавина и температуре за ове метеоролошке станице, при чему је тренд повећања знатно већи и статистички значајан у периоду 1988-2018. У периоду 1975-1994, примећен је статистички значајан негативан тренд протицаја на обе хидролошке станице. Током летњих

месеци повећање температуре ваздуха, а тиме и евапорације, условило је смањење протицаја од 20% (Пепељевац), односно 14% (Дољевац) за период 1988-2018.

2.1.2 Климатске пројекције

Климатске промене до сада су испољиле утицај на људско здравље, пољопривреду, копнене и водене екосистеме земље, као и резерве воде. Њихово деловање запажено је у целом свету, изложени су људи, друштва и екосистеми, а различити региони показују различит степен рањивости. Климатске промене утицаће на учесталост и интензитет појаве климатских екстрема, поплава и суша, као и на повећање евапотранспирације (Reshmidevi et al., 2018). Промене у режиму падавина, количини отопљеног снега и леда услед климатских промена условиће промене у хидролошком циклусу, што ће се одразити на количину и квалитет водних ресурса у будућности (IPCC, 2014). С друге стране, услед повећања броја становника, очекује се повећање потражње за пијаћом водом, водом за индустрију, за пољопривреду и енергетику (Harding et al., 2014).

Од тренда повећања емисије гасова са ефектом стаклене баште у будућности, зависиће даље загревање и промене свих компоненти климатског система. Пројекције климатских промена у будућности добијају се употребом климатских модела, а засноване су на различитим сценаријима емисије гасова са ефектом стаклене баште.

2.1.3 Сценарији емисије гасова стаклене баште

Улога емисионих сценарија у климатским истраживањима јесте оцена утицаја људског факора на будуће стање климе у неизвесним условима промене броја популације, економског и технолошког развоја. Сврха коришћења сценарија није предвиђање будућности, већ сагледавање могућих последица климатских промена. На основу емисионих сценарија дефинишу се могуће будуће концентрације CO₂ и осталих гасова са ефектом стаклене баште које се користе као улазне променљиве за климатске симулације.

Први емисиони сценарији формулисани су од стране IPCC 1992. године. У специјалном извештају IPCC о емисионим сценаријима (енг. *Special Report on Emissions Scenarios*, SRES) из 2000. године представљене су четири групе сценарија под називима А1, А2, В1 и В2. SRES сценарији коришћени су у Трећем (енг. *Third Assessment Report*, AR3) и Четвртом извештају (енг. *Fourth Assessment Report*, AR4) о промени климе IPCC.

Сценарија коришћена у Петом извештају о промени климе IPCC (2013), заснована су на концепту *Representative Concentration Pathways* (RCP), временски и просторно зависним путањама од концентрације гасова са ефектом стаклене баште и полутаната насталих као резултат људских активности. RCP сценарији дају податак о промени концентрације GHG у атмосфери у току времена, узимајући у обзир јачину радијационог форсирања. Радијационо форсирање се дефинише као разлика у количини енергије која уђе у атмосферу и оне која се враћа у свемир и изражава се у јединицама W·m⁻² (IPCC, 2013).

Главна разлика RCP сценарија у односу на SRES је та што нису везани за одређени тренд у друштву или индустрији. Различити социо-економски услови могу довести до истог нивоа радијационог форсирања. Још једна разлика је у томе што RCP користе резолуцију од 60 km, дајући просторну и временску информацију о емисији гасова и употреби земљишта на посматраној локацији. У AR5 коришћена су четири сценарија (Moss et al., 2010):

RCP8.5 (високи ниво емисије гасова - енг. *High emissions*) сценарио претпоставља да ће интензитет радијационог форсирања бити већи од 8,5 W·m⁻² до 2100. године, а концентрација GHG већа од 1370 CO₂-eq;

RCP6 (средњи ниво емисије гасова – енг. *Intermediate emissions*) сценарио претпоставља да ће интензитет радијационог форсирања износити око $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, а после 2100. године долази до стабилизације. Максимална емисија GHG се очекује у 2060. години (75% више него данас), а затим опада 25%. Очекивана концентрација GHG је око $850 \text{ CO}_2\text{-eq}$;

RCP4.5 (средњи ниво емисије гасова – енг. *Intermediate emissions*) претпостављени интензитет радијационог форсирања према овом сценарију износи око $4,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, да би после 2100. године дошло до стабилизације, због придржавања начела о смањењу емисије гасова. Очекивана концентрација GHG је око $650 \text{ CO}_2\text{-eq}$, а максимална емисија се очекује у 2040. години;

RCP2.6 (низак ниво емисије гасова - енг. *Low emissions*) према овом сценарију, интензитет радијационог форсирања достиже максимум од $3,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, након тога долази до пада на $2,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ од 2100. године. Трендови у емисији GHG су слични данашњим, да би након 2020. уследио пад, а након 2100. негативне вредности. Очекивана концентрација GHG је око $450 \text{ CO}_2\text{-eq}$.

Дефинисани сет емисионих сценарија користи се као улаз у климатски модел, а резултат су симулиране будуће вредности климатских величина у односу на изабрани сценарио будућих концентрација гасова са ефектом стаклене баште (климатске пројекције). Сценарија заснована на RCP концепту коришћена су у бројним студијама утицаја климатских промена (Shen et al., 2018; Vuković et al., 2018; Huang et al., 2020; Andrade et al., 2021; Doulabian et al., 2021).

2.1.4 Климатски модели

Климатски модели су основни алат за проучавање стања и еволуције климатског система и симулирање климе у будућности (Flato et al., 2013; Ђурђевић и Тошић, 2017). У основи, климатски модел је скуп математичких једначина које описују физичке процесе у климатском систему. Ефикасно решавање система сложених једначина система изводи се применом нумеричких метода и кроз компјутерске програме (Harvey et al., 1997). Данас се под климатским моделом сматра комплексни компјутерски софтвер, који систем једначина решава применом нумеричких метода. Сложеност климатског модела зависи од потреба истраживања. Најједноставнији су модели нулте димензије - модели енергетског биланса (енг. Energy Balance Models, EBM), а најсложенији тродимензиони, атмосферско-океански модели опште циркулације (енг. Atmospheric Ocean Global Circulation Models, AOGCM) (Schneider и Dickinson, 1974). Једнодимензиони модели су дефинисани дуж једне, одабране осе, најчешће вертикалне осе или географске ширине (нпр. Манабеов модел радијационо конвективне равнотеже; Manabe и Wetherald, 1967), док се као пример дводимензионог климатског модела може навести дводимензиони модел енергетског биланса Нортон и Кролија (North et al., 1981). Атмосферско-океански модел опште циркулације је најкомплекснији модел у хијерархији климатских модела, који представља физичке процесе у атмосфери, копну, океану, криосфери и биосфери и део је глобалног климатског модела (енг. Global Climate Model, GCM). Глобални климатски модели су нумерички климатски модели који се користе за испитивање одговора климатског система на пораст концентрације гасова са ефектом стаклене баште на глобалном нивоу. У нумеричким климатским моделима климатски систем је представљен тродимензионалном мрежом тачака, где се у свакој тачки модела решавају потребне једначине. Распоред тачака у простору назива се мрежа модела (Слика 1). Вредност променљиве у одређеној тачки је репрезентативна за област дефинисаних димензија (Слика 1, означено црвено). Удаљеност две тачке у хоризонталној равни назива се хоризонтална резолуција модела (Ђурђевић и Тошић, 2017). Типична хоризонтална резолуција GCM износи од 250-600 km, са 10-20 слојева у вертикалном правцу и до 30 слојева у океану. Због великог растојања између рачунских тачака резолуција оваквих модела је прилично груба и они не

могу довољно детаљно репродуковати климатске карактеристике на регионалном и локалном нивоу.



Слика 1: Хоризонтална и вертикална мрежа тачака глобалног климатског модела (модификовано према извору: WOM, 2003).

За добијање поузданих резултата на бољој хоризонталној и вертикалној резолуцији користе се регионални климатски модели (енг. *Regional Climate Models*, RCM), који имају финију просторну резолуцију у односу на GCM. За израду прецизнијих симулација и анализе климе у ужој, ограниченој области, односно одређеном географском региону користе се RCM модели (Laprise, 2008; Rummukainen, 2010; Flato et al., 2013). Резултати GCM-а дефинишу почетне и граничне услове за RCM. Процес добијања резултата боље резолуције применом RCM-а, користећи почетне и граничне резултате из глобалног модела, назива се динамичка регионализација (енг. *dynamical downscaling*). Тако се покривањем мањег подручја, са истим бројем рачунских тачака, омогућава да боље буду разложене поједине компоненте климатског система као и интеракције између њих, што резултује детаљнијим приказом процеса у климатском систему. Осим што су детаљнији, резултати регионалних климатских модела садрже додатну вредности (енг. *added value*), која побољшава симулације процеса. Хоризонтална резолуција RCM-а је од 50 km и мање (Jacob et al., 2014).

2.1.5 Резултати климатских пројекција

Пројекције IPCC указују на значајно глобално загревање и промене у свим компонентама климатског система, услед емисије GHG (IPCC, 2014). Према сценарију RCP4.5 (умерени ниво емисије GHG) предвиђа се пораст средње глобалне температуре ваздуха до 2,6 °C, док се према сценарију са најинтензивнијим емисијама, RCP8.5, предвиђа пораст средње глобалне температуре ваздуха и до 4,8 °C (IPCC, 2014). Поред пораста температуре ваздуха, предвиђају се учестале појаве, појачан интензитет и продужено трајање екстремних климатских догађаја (IPCC, 2014).

У извештају IPCC из 2014. године за Европу, наводи се да предвиђања указују на значајан пораст температуре ваздуха широм Европе, при чему се највеће повећање у летњим месецима очекује у јужној Европи, а у зимским месецима у северној Европи (Kovats et al., 2014). Интензивнији и чешћи топлотни таласи, суше и обилне падавине очекују се у Европи (Kovats et al., 2014). Резултати многих истраживања указују на јасан тренд повећања температуре ваздуха широм Европе (Paradimitriou et al., 2016; Lobanova et al., 2018; Didovets

et al., 2019; Leduc et al., 2019). За подручје западног Балкана очекује се повећање средње годишње температуре ваздуха за око 5,5 °C у периоду 2071-2100. (Djurđević et al., 2019). Предвиђене промене падавина карактерише изражена регионална и сезонска варијабилност. Повећање падавина може се очекивати у северној, а смањење у јужној Европи, док се у централној Европи не може детектовати јасан тренд промене (Kovats et al., 2014). Неравномерна унутаргодишња расподела падавина, са израженим смањењем у летњим и повећањем у зимским месецима примењена је за Европу као и у регионима којима припада Србија (Kovats et al., 2014; Navril et al., 2018; Lobanova et al., 2018).

Vuković et al. (2018) анализирали су будуће промене климе у Србији применом ансамбла климатских модела високе резолуције и сценарија RCP4.5 и RCP8.5. У поређењу са референтним периодом 1986-2005, до краја 21. века очекује се просечни пораст средње температуре ваздуха од 1,9 °C, према RCP4.5, односно 4,4 °C, према RCP8.5 сценарију за територију Србије. Према истраживању Vuković et al. (2018) просечно за територију Србије предвиђа се повећање годишње суме падавина од 3,5% (RCP4.5) и 6,8% (RCP8.5), до 2100. године. Територијална расподела очекиваних будућих просечних годишњих падавина указује на смањену доступност воде пореклом од падавина у јужним и централним деловима Србије. Анализа падавина на нивоу сезоне указује на смањење суме падавина од 3,2% (RCP4.5) до 4,5% (RCP8.5) у летњим месецима укупно за целу територију Србије.

Ђурђевић и сар. (2018) анализирали су будуће промене температуре и падавина у Србији коришћењем 9 регионалних климатских симулација EURO-CORDEX пројекта, заснованих на два емисиона сценарија, RCP4.5 и RCP8.5. Промене климатских услова праћене су у блиској будућности (2016-2035), средином века (2046-2065) и крајем века (2081-2100), у односу на референтни период (1986-2005. године). Симулације показују да ће просечно за територију Србије средња годишња температура порастати за 2°C (RCP4.5), односно 4,3°C (RCP8.5). Анализа промене средњих годишњих акумулираних падавина не показује изражен тренд осредњено за подручје Србије. Према сценарију RCP8.5, крајем века (2081-2100) очекује се смањење падавина на територији Србије од 20,5%, са израженим смањењем у јужним деловима, од скоро 40%. Анализа годишње расподеле падавина показује смањење падавина у летњим месецима јун-август, што је у складу са резултатима Vuković et al. (2018).

Промене у глобалном хидролошком циклусу јавиће се као одговор на глобално загревање. Главне карактеристике ових промена, према IPCC (2013) су неуниформност и велики контраст у падавинама између сувих и влажних региона, као и између влажних и сувих сезона.

2.2 Хидролошке пројекције

Климатске промене утицаће на доступност водних ресурса, односно површинских и подземних вода у будућности (IPCC, 2014). У техничком извештају IPCC, Климатске промене и вода (енг. *Climate change and water, IPCC technical paper VI*), наглашава се да досадашња мерења и пројекције климе указују на то да су ресурси слатке воде подложни јаком утицају климатских промена (Bates et al., 2008). Сагледавање тих утицаја важно је ради увида у будуће стање доступности водних ресурса и доношење одлука у процесима њима. Уобичајен метод процене утицаја климатских промена на водне ресурсе подразумева употребу климатских пројекција и хидролошког моделирања (Bae et al., 2011; Seiller et al., 2012; Al-Safi и Sarukkalige, 2017; Reshmidevi et al., 2018). Климатске пројекције добијају се употребом GCM, а засноване су на GHG сценаријима. Резултате симулација GCM одликује груба просторна резолуција која није адекватна за израду хидролошких пројекција на нивоу слива, стога је неопходно извршити регионализацију (енг. *downscaling*) симулираних климатских величина (Fowler et al., 2007; Reshmidevi et al., 2018). Након регионализације добијене вредности климатских величина користе се као улазни подаци у хидролошки модел, а резултати симулација

хидролошког модела су пројекције хидролошких величина. На овај начин добијене хидролошке пројекције представљају одговор хидролошког режима у сливу на информацију о будућим вредностима климатских величина из климатских пројекција.

2.2.1 Хидролошки модели

Хидролошки модели представљају погодне алате за симулацију хидролошких величина. Хидролошки модели користе се за израду хидролошких прогноза, пројектовање и анализу рада водопривредних система, процену стања водних ресурса, истраживања из области хидроекологије, процену утицаја климатских промена на водне ресурсе и итд. (Pechlivanidis et al., 2011; Todorović, 2015; Ерић и сар., 2019). Први хидролошки модели развијени су у 19. веку из потребе решавања проблема у управљању водним ресурсима, првенствено прогнозирање и заштита од поплава (Вујадиновић Мандић, 2015). Развој хидролошких модела започео је моделом рационалне функције (Mulvaney, 1851), помоћу кога се на основу количине падавина и величине слива одређивао максимални проток уз ограничење примене на веома мале сливове. Напредне компјутерске технике омогућиле су развој нумеричких хидролошких модела. Крајем 20. века развијени су комплексни детерминистички хидролошки модели у којима је водни биланс представљен једначинама физичких закона, а чије се решавање заснива на употреби компјутерских програма. Један од најчешће коришћених детерминистичких модела данас јесте савремена верзија *Systeme Hydrologique Europeen* (SHE) модела, MIKE-SHE модел (DHI, 2000).

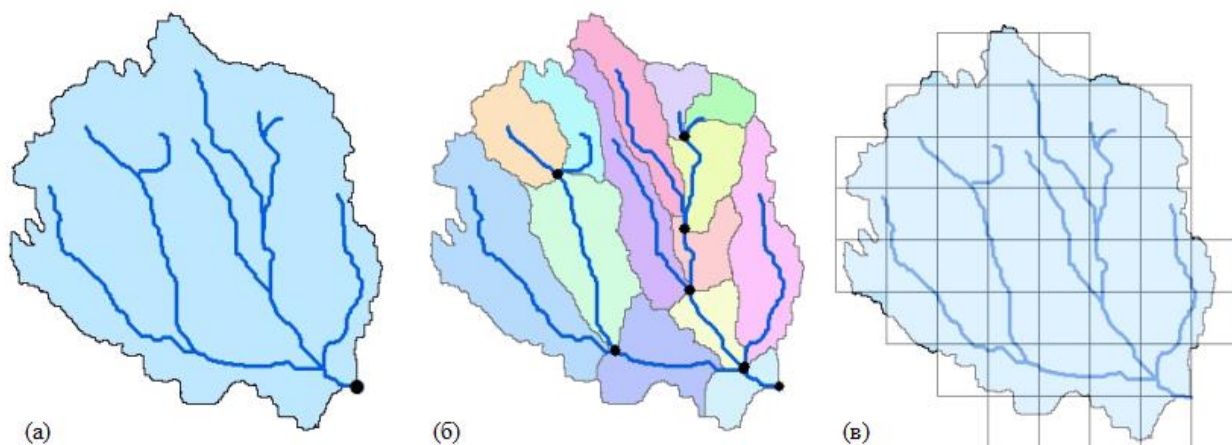
За симулирање отицаја у сливу, у употреби су хидролошки модели падавине-отицај (енг. *rainfall-runoff model*). Модел падавине-отицај је математичка репрезентација процеса трансформације падавина у отицај.

Подела хидролошких модела извршена је на основу више критеријума: описивања физичких процеса у сливу, на основу просторне дистрибуције и континуитета симулација (Devi et al., 2015).

Према начину описивања физичких процеса у сливу, хидролошки модели деле се на физичке, концептуалне и емпиријске моделе. Физички модели (механички; „бела-кутија“ (енг. *white-box*) модели) заснивају се на парцијалним диференцијалним једначинама које описују физичке процесе у сливу. Моделирање хидролошких процеса физичким моделом захтева велики број података који описују физичке карактеристике слива (нпр. садржај воде у земљишту, топографија, својства земљишта, димензије речне мреже) (Kokkonen и Jakeman, 2001; Devi et al., 2015). Веза између физичких карактеристика слива и параметара модела омогућава добијање прецизних излазних података, али велики број неопходних параметара, које је тешко математички дефинисати или измерити на терену, ограничава њихову употребу (Uhlenbrook et al., 2004). У концептуалним хидролошким моделима (параметарски; (енг. *grey-box*) модели) процеси хидролошког система представљени су међусобно повезаним резервоарима (енг. *reservoirs*) (Devi et al., 2015; Todorović, 2015). Модел функционише по принципу једначине водног биланса, при чему се падавине трансформишу у отицај, евапотранспирацију и подземне воде (Vaze et al., 2012; Sitterson et al., 2017). Пуњење резервоара (енг. *recharge*) врше падавине, инфилтрација и перколација, а пражњење резервоара представљају евапорација, отицај, дренажање воде кроз земљиште итд. (Devi et al., 2015). Хидролошки процеси у сливу описани су математичким једначинама. Концептуални модели захтевају мањи број улазних података у односу на физичке моделе. Параметри модела добијају се на основу података са терена и калибрацијом (Pechlivanidis et al., 2011; Devi et al., 2015). Емпиријски (метрички; модели „црне кутије“ (енг. *black-box*)) модели заснивају се на математичким једначинама којима се успоставља веза између улазних и излазних података, не узимајући у обзир физичке карактеристике процеса (Kokkonen и Jakeman, 2001; Jaiswal et al., 2020). Упркос једноставној структури и малом броју захтеваних улазних података, емпиријски

моделу дају поуздане симулације дугорочних временских серија, а посебно су погодни за моделирање неизучених сливова (Sitterson et al., 2017).

На основу просторне дистрибуције падавине-отицај, модели се деле на: просторно хомогене моделе (енг. *lumped*; Слика 2 (а)), делимично просторно дистрибуиране моделе (енг. *semi-distributed*; Слика 2 (б)) и просторно дистрибуиране моделе (енг. *distributed*; Слика 2 (в)).



Слика 2: Просторна дистрибуција у хидролошким моделима (модификовано према извору: Sitterson et al., 2017).

При моделирању хидролошких процеса просторно хомогеним моделом, просторна варијабилност карактеристика и процеса у сливу није узета у обзир (Beven, 2006; Devi et al., 2015). Модел посматра слив као једну јединицу и користи један сет параметара модела репрезентативних за цео слив. Улазни подаци, као и резултати из модела су просторно осредњени. У просторно дистрибуираном моделу, слив је подељен на мање јединице, најчешће квадратног облика. Моделирање процеса изводи се на нивоу сваке јединице, при чему се свакој јединици додељује засебан сет параметара (Вујадиновић Мандић, 2015). У делимично просторно дистрибуираном моделу, поделом слива на подсливове, просторна варијабилност је донекле узета у обзир. Кроз процес калибрације добија се јединствен сет параметара за сваки подслив и отицај се рачуна у излазној тачки сваког подслива (Вујадиновић Мандић, 2015; Sitterson et al., 2017).

Хидролошки модели могу симулирати један изолован догађај или продуковати континуиране симулације (Pechlivanidis et al., 2011; Devi et al., 2015).

Структура и методолошки приступ симулирања величина изабраног хидролошког модела условљавају потребне улазне податке. За изградњу хидролошких симулација неопходно је располагати метеоролошким подацима и захтеваним подацима о карактеристикама слива. Параметри који се заснивају на физичким карактеристикама слива могу се добити директним мерењем са терена. Међутим, већина параметара утврђује се процесом калибрације модела, односно оптимизације параметара. Сврха процеса калибрације јесте прилагођавање параметара тако да се добије што боље слагање између мерених и симулираних вредности. Калибрација модела може се изводити ручно путем покушаја и грешке (енг. *trial and error*) или аутоматски применом оптимизационог алгорита (Sitterson et al., 2017). Као критеријум за процену ефикасности калибрисаног хидролошког модела у изградњи симулација користе се вредности објективних функција. Преглед најчешће коришћених објективних функција у хидролошком моделирању дат је од стране Todorović (2015).

Концептуални модели коришћени су у бројним хидролошким анализама на нивоу слива (Lidén и Harlin, 2000; Apsite et al., 2008; Fowler et al., 2016; Mathevet et al., 2020; Saadi et al.,

2020). У концептуалним моделима компоненте хидролошког система представљене су једним или са више међусобно повезаних резервоара, а водни биланс је контролисан низом параметара у сваком резервоару. Оваква структура концептуалних модела представља компромисно решење између емпиријских модела, који не узимају директно у обзир физичке карактеристике процеса у сливу и комплексне структуре физичких модела. Комплексност модела не побољшава нужно перформансе хидролошког модела (Orth et al., 2015). Оправданост избора концептуалних модела у односу на физичке потврђена је у спроведеним студијама компаративних процена физичких и концептуалних модела од Te Linde et al. (2007), Kebede et al. (2014) и Jaiswal et al. (2020).

Избор хидролошког модела зависи пре свега од циља дате студије и доступности података неопходних за калибрацију модела и израду пројекција. Према Bergström и Lindström (2015), критеријуми при избору модела су:

- Да се модел заснива на физичкој карактеризацији подручја, али да није превише комплексне структуре и не захтева параметре који нису доступни у стандардним хидролошким и метеоролошким осматрањима;
- Број параметара модела који се користе за калибрацију треба да буде минималан;
- Валидација модела мора бити урађена на основу осматраних мерења, за период независан од калибрације;
- Лако разумевање и коришћење модела.

2.2.2 Хидролошки модел HBV-light

Хидролошки модел HBV (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*) развијен је 1970-их година у Шведском метеоролошком и хидролошком институту (*Swedish Meteorological and Hydrological Institute, SMHI*). Модел HBV коришћен је у бројним хидролошким студијама у циљу прогнозе поплава (Bergström et al., 1992), моделирања водног биланса на великим површинама (Bergström и Graham, 1998), проучавања ефекта климатских промена (Saethun, 1996) и коришћења земљишта (Brandt et al., 1988). Верзија модела HBV-light развијена је 1993. године на Универзитету у Упсали, Шведска (Seibert и Vis, 2012).

Семи-дистрибуирани хидролошки модел HBV-light намењен континуалним хидролошким симулацијама са дужином рачунског корака најчешће један дан. Карактеристике HBV-light модела су да је бесплатан софтверски пакет који не захтева велики број улазних података, намењен је континуалним симулацијама на часовном, дневном и месечном нивоу, калибрација модела врши се подешавањем сета параметара (ручно и аутоматски), коришћен је у бројним студијама у различитим климатским областима и у студијама утицаја климатских промена. Као такав, модел испуњава препоручене критеријуме одабира модела дате од стране Bergström и Lindström (2015) и погодан је за потребе овог истраживања.

Модел HBV као и верзија HBV-light коришћени су у бројним студијама утицаја климатских промена на хидролошки режим сливова локализованих у различитим климатским подручјима, нпр. у Европи (Cloke et al., 2013), Африци (Bekele et al., 2019) и Азији (Eregno et al., 2013; Bhattarai et al., 2018).

Могућност примене HBV-light модела у моделирању утицаја климатских промена у различитим климатским зонама тестирана је од стране Eregno et al. (2013). Модел је примењен за израду хидролошких пројекција три слива локализована на три континента, Азија, Африка и Европа. Калибрација модела урађена је применом *Monte Carlo* процедуре, а ефикасност модела процењена је преко *Nash-Sutcliffe* коефицијента. Резултати статистичке обраде мерених

и симулираних података указују да HBV-light модел може репродуковати историјске месечне серије података о протицају у свим тестираним климатским зонама.

Gädeke et al. (2014) применили су HBV-light верзију модела за процену утицаја климатских промена на хидролошки режим подслива реке Шпреје, Немачка, за период од 2031. до 2060. Модел је аутоматски калибрисан на основу три објективне функције. За калибрацију су коришћена историјска дневна мерења протицаја за период 1998-2001. Валидација модела урађена је у два корака, на основу дневних мерених вредности протицаја за период 2002-2006, а затим на основу месечних мерених вредности протицаја за референтни период 1963-1992. Хидролошке симулације рађене су на основу регионализованих климатских пројекција из GCM модела.

Модел је успешно примењен у анализи утицаја климатских промена на појаву хидролошких екстрема у сливу реке Плави Нил (Meresa и Gatachew, 2019), као и поплавних таласа у сливу реке Љобрегат (Velasco et al., 2013).

Студија процене доступности водних ресурса у будућности у условима климатских промена рађена је за слив реке Бенин, Африка, применом HBV-light модела (Alamou et al., 2017).

Teutschbein et al. (2018) применили су HBV-light модел да би истражили како карактеристике терена, као што су топографија, геологија, земљиште и покривеност тла утичу на хидролошки одговор слива у условима климатских промена у северној Шведској.

HBV-light модел коришћен је у изради студија утицаја климатских промена на хидролошки режим река у Србији (Langsholt et al., 2013; Тодоровић и Плавшић, 2015; Todorović et al., 2017).

2.2.3 Моделирање подземних вода

Подземне воде представљају значајан извор воде за пиће, индустријску производњу и пољопривреду. Са једне стране, растући број глобалне популације и развој привредних капацитета доводе до повећаних захтева за водом пореклом од овог ресурса, док је са друге стране примењен директан и индиректан утицај климатских промена на количину и квалитет подземних вода (Kjve et al., 2014). Израда поузданих пројекција подземних вода значајна је у процесу доношења одлука о одрживом управљању подземним водама и може спречити њихову прекомерну експлоатацију (Barzegar et al., 2017).

Проблематика моделирања подземних вода огледа се у комплексној вези између хидролошких и метеоролошких варијабли (падавине, температура, водостај, евапотранспирација) и подземних вода (Jha и Sahoo, 2015; Barzegar et al., 2017). Моделирање подземних вода најчешће подразумева употребу нумеричких модела који се заснивају на физичким карактеристикама слива (ASCE, 2000). Физички модели коришћени су у бројним студијама моделирања нивоа подземних вода (Kim et al., 2008; Xu et al., 2012; Gemitzi et al., 2017). Примена физичких модела захтева велики број података о физичким карактеристикама слива (нпр. хидрауличке особине, топографију, карактеристике земљишта и геолошке подлоге, начин коришћења земљишта и заступљеност вегетације, хидролошка и метеоролошка мерења) и велики број параметара неопходних за калибрацију модела и продуковање симулација. Симулације нивоа подземних вода применом физичких модела ограничена је због великог броја неопходних параметра које је тешко математички дефинисати или измерити на терену. Насупрот традиционалним физичким моделима, вештачке неуралне мреже (енг. *Artificial Neural Networks*, ANN), односно модели засновани на вештачкој интелигенцији (енг. *Artificial Intelligence*, AI) не захтевају детаљну карактеризацију подручја, већ функционишу са циљем да пронађу везу између улазних и излазних података којима се

обучавају (Barzegar et al., 2017). То су параметарски модели засновани на ткз. „*data driven*“ приступу. Вештачке неуралне мреже имитирају понашање људског мозга и показују способност учења и меморисања на основу података задатих у процесу обуке (енг. *training process*). Како су процеси везани за подземне воде у природи врло комплексни, ANN су нашле велику примену у њиховом моделирању (Coulibaly et al., 2001; Jha и Sahoo, 2015; Khalil et al., 2015; Barzegar et al., 2017; Kisi et al., 2017; Sahoo et al., 2017; Wunsch et al., 2018; Lee et al., 2019; Hasda et al., 2020; Javadinejad et al., 2020; Malik и Bhagwat, 2020; Ghazi et al., 2021).

Структуру неуралних мрежа чине бројни чворови (енг. *nodes*), а архитектура мреже осликава образац повезаности између чворова и њихову активациону функцију (ASCE, 2000). Детаљнији опис структуре неуралних мрежа може се наћи у радовима Caudill (1987, 1988, 1989).

Чворови су повезани у серије слојева (енг. *layers*). Неуралне мреже се могу класификовати на основу броја слојева на једнослојне, двослојне и вишеслојне мреже (ASCE, 2000). Неурони који се налазе у почетном или улазном слоју имају улогу да приме, односно „баферују“ улазни сигнал. Неурони који се налазе у крајњем, излазном слоју, генеришу излаз из мреже. Слој између улазног и излазног слоја назива се скривени слој (енг. *hidden*). Број скривених слојева може бити од нула до неколико, мада истраживања показују да је структура мреже са једним скривеним слојем оптимална за моделирање већине нелинеарних процеса (Coulibaly et al., 2000). Један скривени слој примењен је у структури ANN мреже од стране Daliakopoulos et al. (2005), Behzad et al. (2010) и Maheswaran и Khosa (2013). Број чворова у скривеном слоју најчешће се одређује путем процедуре покушаја и грешке (енг. *trial and error*) (ASCE, 2000). У литератури најчешће се сугерише структура са три чвора у скривеном слоју (Coulibaly et al., 2001; Daliakopoulos et al., 2005; Tsanis et al., 2008; Djurovic et al., 2015). У повезаној неуралној мрежи, сваки излаз из једног слоја повезан је са сваким чвором у следећем слоју.

Даље, категоризација неуралних мрежа може се извршити на основу правца кретања информације. У повезаној неуралној мрежи, информација пролази од улазног до излазног слоја. Чворови у једном слоју повезани су са чворовима другог слоја, али не и у оквиру истог слоја, што значи да је излазна информација из једног слоја зависна само од улазне информације коју прима од претходног слоја (ASCE, 2000). Овај вид мреже назива се мрежа пропагације унапред (енг. *feedforward network*). У повратним (енг. *recurrent*) мрежама, сигнал између чворова се може преносити у оба смера, дакле и из правца излазног ка улазном слоју мреже (ASCE, 2000). Једнослојна или вишеслојна *feedforward* мрежа успешно је примењивана за моделирање нивоа подземних вода у бројним студијама (нпр. Coulibaly et al., 2000; Daliakopoulos et al., 2005; Banerjee et al., 2009; Taormina et al., 2012; Chang et al., 2015; Djurovic et al., 2015).

Од избора улазних података зависи колико ће успешно ANN модел репродуковати хидролошки процес. Методе за избор улазних података се према Bowden et al. (2005) и Oyebode и Stretch (2018) могу категорисати у пет група:

- Методе које се заснивају на *a priori* познавању физичких процеса који се моделирају. Приликом одабира иницијалног сета улазних података неопходно је добро познавање хидролошког процеса који се моделира. ASCE (2000) истичу да је разумевање физичких законитости моделираног процеса неопходно ради поузданијег одабира одговарајућих улазних варијабли. Уколико би неке од тих варијабли биле изостављене, дошло би до губитка информација значајних за сам процес моделирања, док се са друге стране увођењем превеликог броја улазних варијабли доводи до ометања процеса обуке мреже;

- Методе корелационе анализе за одабир улазних података обухватају анализе линеарне корелације и нелинеарне корелације. Линеарна корелациона анализа укључује кроскорелациону, аутокорелациону и парцијалну аутокорелациону анализу. Кроскорелациона

анализа најчешће је употребљавана аналитичка техника у сврху одабира одговарајућих улазних варијабли (Bowden et al., 2005);

- Хеуристички приступ подразумева обучавање неколико ANN модела користећи различите комбинације улазних варијабли, све док се не издвоји модел са најбољим резултатима обуке;
- Методе које изводе закључке из тренираних ANN, а најчешће примењивани метод је сензитивна анализа (Dibike и Coulibaly, 2006);
- Композитне методе комбинују примену горе наведених метода.

Неке методе, као што су анализа главних компонентни, примена генетичког алгоритма и мултиобјективног генетичког алгоритма, такође су у употреби при одређивању улазних података, али се не могу сврстати у горе набројане категорије (Oyeboode и Stretch, 2018).

Обука (енг. *training*) неуралних мрежа је процес добијања оптималног сета параметара модела, а врши се са циљем добијања прецизне репрезентације везе између улазних података и излазне информације моделираног процеса (Oyeboode и Stretch, 2018). Процес обуке мреже еквивалентан је процесу калибрације хидролошког модела (ASCE, 2000). За обуку мреже најчешће су у употреби оптимизациони алгоритми пропагација уназад (енг. *Backpropagation*) и *Levenberg–Marquardt* (LM) метод пропагације грешке уназад (Oyeboode и Stretch, 2018). У истраживањима Coulibaly et al. (2000) и Taormina et al. (2012) успешно је примењен *Levenberg–Marquardt* метод за обучавање ANN мреже. Валидација модела односи се на процену ефикасности обучене мреже кроз израчунавање процентуалне грешке између моделираних и задатих вредности (ASCE, 2000). Препорука ASCE (2000) је да се процеси обука и валидација модела понови неколико пута, како би се добили задовољавајући резултати.

Модели ANN примењени су у студијама утицаја климатских промена на ниво подземних вода на различитим локалитетима. У доступним истраживањима дат је преглед коришћених структура са различитим бројем скривених слојева, алгоритма за обуку мреже и метода за избор улазних варијабли.

Jeihouni et al. (2019a) симулирали су флукуације нивоа подземних вода, на 5 пијезометара, применом ANN у зависности од климатских параметара у иранском округу Схабестар. Климатске пројекције добијене су применом GCM и три RCP сценарија за период 2020-2049. година. За регионализацију климатских пројекција коришћен је временски генератор *Long Ashton Research Station*. За обуку, тестирање и валидацију модела коришћени су подаци о температури, падавинама и протицају. Анализом осетљивости утврђено је да подаци о падавинама са кашњењем од једног месеца имају највећи утицај на излазну информацију. Структура модела установљена је применом *trial and error* процедуре.

Утицај климатских промена на ниво плитких подземних вода у Вукиао провинцији у северној Кини применом ANN модела који користи метод пропагација уназад (енг. *Backpropagation*) испитивали су Chen et al. (2010). Као улазне варијабле коришћени су подаци о падавинама, наводњавању и храњењу издани са слободном површином и под притиском. На основу статистичке анализе закључено је да је структура мреже са пет скривених слојева успешно моделирала нелинералну везу између годишње варијације нивоа подземне воде и изабраних улазних параметара. Климатске пројекције на основу којих је моделиран ниво подземне воде добијене су применом 20 GCM и три IPCC SRES сценарија. Закључили су да је примена ANN технологије оправдан приступ у моделирању подземних вода, као алтернатива физичким моделима.

Taroglou et al. (2014) користили су ANN модел за симулацију нивоа подземних вода у условима климатских промена у региону Агиа, Грчка. Падавине су коришћене као директан улаз у модел, док је евапотранспирација процењена индиректно, кроз температуру. Структуру примењеног модела чине два скривена слоја, први са 19, а други са 5 чворова. Обука мреже

извршена је применом три варијанте алгоритма оптимизације роја честица (*Particle swarm optimization*, PSO). Обучен ANN модел примењен је за израду пројекција за период од 2010 до 2020. године на основу три климатска сценарија.

Chang et al. (2015) применили су два ANN модела за симулацију подземних вода у условима климатских промена, један са две улазне варијабле (падавине, температура) и други са три улазне варијабле (падавине, температура и ниво подземне воде). За истраживање је коришћена *feedforward* ANN са једним скривеним слојем. Мрежа је обучена применом *Levenberg–Marquardt* алгоритма за обуку, а за одабир улазних варијабли коришћен је метод парцијалне аутокорељационе функције. Резултати указују да модел са три улазне варијабле продукује прецизније симулације, али да се у недостатку потребних података, модел са две улазне варијабле може успешно употребити за симулације подземних вода.

2.3 Неизвесности у климатским и хидролошким пројекцијама

При процени утицаја климатских промена на водне ресурсе неопходно је узети у обзир неизвесности (енг. *uncertainties*) које су својствене сваком процесу моделирања. Пројекције хидролошких величина у условима климатских промена карактеришу значајне неизвесности које потичу од сценарија емисије гасова са ефектом стаклене баште, глобалног климатског модела, метода регионализације и хидролошког модела (Shen et al., 2018). Испитивање извора неизвесности у студијама процене утицаја климатских промена на водне ресурсе предмет је бројних студија (Jiang et al., 2007; Maurer, 2007; Kay et al., 2009; Bastola et al., 2011; Dobler et al., 2012; Teng et al., 2012).

Глобални климатски модели представљају главни извор неизвесности у студијама утицаја климатских промена (Wilby и Harris, 2006; Kay et al., 2009; Bastola et al., 2011; Najafi et al., 2011; Dobler et al., 2012; Teng et al., 2012). Неизвесности услед GCM проистичу из разлике у одабиру нумеричког метода за решавање једначина модела, структуре, параметризације процеса подмрежних размера и резолуције модела (Ђурђевић и Тошић, 2017; Das et al., 2020). Поред GCM, емисиони сценарији GHG такође представљају значајан извор неизвесности (Minville et al., 2008; Nobrega et al., 2011). У овом случају, неизвесности у пројекцијама јављају се као резултат немогућности сигурног предвиђања развоја друштва ни будућих концентрација GHG (Ђурђевић и Тошић, 2017). Chen et al. (2011a) наводе да при процени утицаја климатских промена на хидролошки режим, различите методе регионализације пројекција GCM представљају значајан извор неизвесности. Методе статистичке корекције грешке (енг. *bias correction*) климатских пројекција такође представљају извор неизвесности са највећим утицајем на пројекције екстремних догађаја (Seaby et al., 2015; Refsgaard et al., 2016;). Унутрашња варијабилност климатског система такође се сматра једним од извора неизвесности у пројекцијама (Refsgaard et al., 2016; Ђурђевић и Тошић, 2017).

У процесу хидролошког моделирања, неизвесности у пројекцијама приписују се структури хидролошког модела, улазним подацима, параметрима модела и калибрацији (Deletic et al., 2012; Todorović, 2015; Refsgaard et al., 2016). Структура хидролошког модела представља значајан извор неизвесности при симулирању хидролошког режима у условима климатских промена (Jiang et al., 2007; Bastola et al., 2011; Najafi et al., 2011; Teng et al., 2012; Velázquez et al., 2013; Vansteenkiste et al., 2014). Bae et al. (2011) анализирали су утицај хидролошког модела и метода за прорачун потенцијалне евапотранспирације на неизвесности у процесу процене утицаја климатских промена на водне ресурсе у сливу Цхунгју, Кореја. Резултати показују да различити хидролошки модели продукују различите пројекције протицаја, при истим климатским условима. Разлика у моделираним протицајима нарочито је већа у току сушне сезоне, што указује да предикције протицаја у том периоду карактерише висок степен неизвесности услед различите структуре хидролошких модела. Поред тога, Bae et al. (2011)

указали су да на неизвесности у пројекцијама протицаја утиче и одабир методе за прорачун потенцијалне евапотранспирације.

Неизвесности услед параметара модела јављају се због квалитета и квантитета доступних мерених података који се користе за процену вредности параметара, објективне функције, оптимизационе методе и одабира калибрационог периода (Wilby, 2005; Bae et al., 2011; Deletic et al., 2012; Chiew et al., 2015; Todorovic и Plavsic, 2016).

Todorovic и Plavsic (2016) анализирали су утицај калибрационог периода на параметре и ефикасност хидролошког модела, као и на хидролошке пројекције у условима климатских промена. За калибрацију концептуалног хидролошког модела HBV-light одабрана су четири периода различита у погледу температурног и падавинског режима и пети, који се односи на целокупан период доступних података. Анализа је показала да параметри хидролошког модела зависе од изабраног калибрационог периода, те да одабир калибрационог периода значајно доприноси неизвесностима у хидролошким пројекцијама под сценаријима климатских промена.

Joseph et al. (2018) анализирали су допринос неизвесности услед оптимизације вредности параметара хидролошког модела у односу на неизвесности пореклом од климатских модела. Симулације хидролошких варијабли рађене су применом *Variable Infiltration Capacity* (VIC) модела, а засноване су на динамички и статистички регионализованим пројекцијама три GCM. Анализа осетљивости параметара модела рађена је Monte-Carlo методом. Резултати анализе указују да главни извор неизвесности у пројекцијама влаге у земљишту, евапотранспирације и протицаја представљају климатски модели, док су неизвесности услед оптимизационе методе значајно мање.

Dobler et al. (2012) квантификовали су изворе неизвесности у хидролошким пројекцијама у условима климатских промена рађеним за слив у подручју Алпа. У студији су испитиване неизвесности које потичу од структуре GCM и RCM, метода статистичке корекције грешке (енг. *bias correction*) и методе оптимизације вредности параметара хидролошког модела. Аутори наводе да хидролошке пројекције карактеришу значајне неизвесности, које пре свега потичу од одабира GCM и RCM, док су неизвесности везане за параметре модела знатно мање.

Wilby и Harris (2006), Kay et al. (2009) и Chen et al. (2011b) такође су закључили да у хидролошким пројекцијама под сценаријима климатских промена GCM представљају главни извор неизвесности, док су неизвесности услед емисионих сценарија као и параметара и структуре хидролошког модела мање значајне.

Наведене студије показују да GCM представљају доминантан извор неизвесности у хидролошким пројекцијама под сценаријима климатских промена. Вишемоделски приступ, у коме се користе и анализирају резултати више климатских модела, смањује удео укупне грешке у резултатима и пружа поузданије пројекције у односу на приступ коришћења једног модела (Seiller et al., 2012; Zhang et al., 2021). Приступ коришћења вишемоделског ансамбла климатских симулација коришћен је у многим студијама (Refsgaard et al., 2016; Reshmidevi et al., 2018; Shen et al., 2018).

2.4 Утицај климатских промена на водне ресурсе

Промене у режиму падавина и евапотранспирације услед климатских промена утицаће на доступност и унутаргодишњу расподелу водних ресурса (Arnell et al., 2011; IPCC, 2014). Arnell и Liu (2001) резимирали су последице климатских промена на водне ресурсе, при чему наводе да промене у режиму површинских и подземних вода рефлектују пре свега промене у режиму падавина, као и да их карактерише изражена регионална варијабилност.

2.4.1 Утицај климатских промена на површинске воде

Утицај климатских промена на хидролошки режим река предмет је истраживања студија на глобалном (Arnell и Gosling, 2013) и регионалном нивоу (Lobanova et al., 2018) из којих се може закључити да ће промене у клими изазвати промене у режиму површинских вода. Arnell и Gosling (2013) спровели су студију оцене потенцијалног утицаја климатских промена на хидролошки режим река на глобалном нивоу. Климатска сценарија добијена коришћењем технике скалирања узорака (енг. *pattern-scaling*) из 21 CMIP3 (енг. *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3*) климатског модела примењена су за израду симулација глобалног хидролошког модела. До 2050. године, предвиђају се значајне промене у хидролошком режиму река на глобалном нивоу, изузев на 17% испитиване површине где нису детектоване статистички значајне промене. Предикције указују на пораст просечног годишњег отицаја на 47% површине копна (Канада, Сибир, источна Европа), односно смањење на 36% (централна Европа, Медитеран, централна Америка, Бразил). Уочена је значајна просторна варијабилност у испитиваним хидролошким индикаторима, условљена пре свега променама у падавинама.

Према предикцијама IPCC-а из 2014. године, хидролошки режим река у Европи биће измењен услед климатских промена (Kovats et al., 2014). Ова проблематика обрађена је у бројним студијама, а резултати указују на неколико карактеристичних промена које се могу очекивати у Европи. Хидролошки режим у Европи значајно варира услед климатских услова и локалних фактора. Промене у количини, интензитету и фреквенцији падавина сматрају се водећим узроком промена у протицају, на глобалном и регионалном нивоу (Novotny и Stefan, 2007; Arnell и Gosling, 2013; Eregno, 2013; Sassi et al., 2019). Широм Европе предвиђене промене у протицају имају изражену регионалну и сезонску варијабилност. Тренд повећања протицаја у будућности уочен је у регионима северне и источне Европе, а тренд смањења у јужној Европи (Alfieri et al., 2015; van Vliet et al., 2015; Lobanova et al., 2018), што прати предвиђени будући тренд промена падавина (Kovats et al., 2014; Alfieri et al., 2015). Предвиђања указују на неравномерну унутаргодишњу расподелу протицаја, што је доведено у директну везу са променом у расподели падавина. Услед повећања зимских падавина на простору централне, северне и источне Европе, у периоду јануар-март очекује се повећање протицаја, док се смањење протицаја очекује у летњим месецима, када је предвиђено смањење суме падавина (Lobanova et al., 2018). Поред падавина, повећање глобалне температуре изазива изражене промене у просечном протицају (Donnelly et al., 2017) и промене у сезонском режиму протицаја (Lobanova et al., 2018). Осим промена у просечним вредностима протицаја, климатске промене изазваће значајне промене у екстремним појавама (максимални и минимални протоци), које такође карактерише изражена регионална варијабилност. Регион јужне Европе означен је као најугроженији са аспекта појаве хидролошке суше и смањења минималних протока (Forzieri et al., 2014; Alfieri et al., 2015), односно смањене доступности водних ресурса (Dezsi et al., 2018). Са друге стране, очекује се повећан ризик од појаве поплава у западној Европи (Dankers и Feyen, 2008; Rojas et al., 2012) и деловима централне Европе (Alfieri et al., 2015).

На основу пројекција ансамбла климатских модела из EURO-CORDEX пројекта, заснованих на RCP8.5 сценарију и хидролошког модела Lisflood, Alfieri et al. (2015) су закључили да промене у просечном протицају на територији Европе имају исти тренд као и промене у средњим годишњим падавинама: смањење средње годишње суме падавина и просечних вредности протицаја се очекује у јужној Европи, повећање у северној и источној, док се за западну и централну Европу не може утврдити јасан тренд промене. Смањење количине акумулираног снега и повећана евапотранспирација услед пораста температуре смањиће појаву максималних протока у јужној Шпанији, Скандинавији и Балтичким земљама, док се у централној Европи и Британским острвима очекује повећање интензитета и учесталости појаве великих вода.

Симулације максималних протока презентованих од стране Alfieri et al. (2015) у складу су са резултатима студија аутора Dankers и Feyen (2008) и Rojas et al. (2012) који наводе да је у регионима западне Европе и Британских острва повећан ризик од појаве великих вода у будућности. Са друге стране, Forzieri et al. (2014) наводе да се до 2100. године може очекивати осетан водни дефицит у рекама Европе. Симулације ансамбла хидролошких и климатских модела означавају јужне делове Европе као најугроженије са аспекта појаве хидролошке суше, уз смањења минималних протока и до 40% на Пиринејском полуострву, јужним деловима Француске, у Италији и југоисточном Балкану.

Schneider et al. (2013) анализирали су промене у режиму европских река употребом глобалног хидролошког модела WaterGAP3. Симулације су засноване на статистички коригованим климатским пројекцијама из три глобална климатска модела, за референтни (1971-2000) и будући период (2041-2070). На основу резултата, аутори истичу да ће климатске промене значајно утицати на режим река у Европи. Највећи утицај уочен је на Медитерану и субарктичком, односно бореалном појасу климе.

Van Vliet et al. (2015) указују на значајан утицај климатских промена на водне ресурсе и потребу за мерама адаптације у Европи. Хидролошке симулације добијене су применом два хидролошка модела, коригованих климатских пројекција ансамбла GCM и два сценарија, RCP2.6 и RCP8.5. На основу њихових резултата, смањење водних ресурса очекује се у јужним деловима Европе, док се у северним очекује повећање. Према сценарију RCP8.5, на великом делу територије Европе предвиђено је изражено испољавање екстрема, конкретно у овом случају смањење влаге у земљишту и учестала појава и појачан интензитет хидролошке суше.

Евапотранспирација се, поред падавина сматра једном од најважнијих компонената хидролошког циклуса и има директан утицај на водне ресурсе (Green et al., 2011; Pan et al., 2015). У циљу процене доступности водних ресурса у условима климатских промена у Европи, Dezsi et al. (2018) користили су приступ праћења промена у потенцијалној и актуелној евапотранспирацији. Промене у актуелној евапотранспирацији препознате су као један од водећих узрока промена у водним ресурсима. Процене су да ће потенцијална евапотранспирација бити у порасту од 75-125 mm, до краја 2070. године, за већи део Европе. Изузев у северним деловима Европе, ово повећање евапотранспирације условиће смањену доступност водних ресурса. Најугроженији регион је јужна Европа.

Испитивање утицаја климатских промена у Европи у већини студија везано је за одређене временске периоде, за разлику од Donnelly et al. (2017) који су испитивали утицај на одређеном степену глобалног загревања. За процену утицаја на 1,5, 2 и 3 °C глобалног загревања, коришћен је ансамбл 11 климатских пројекција (три RCP сценарија, четири GCM и четири RCM). Са порастом степена загревања, примећене су израженије промене у протицају (отицају). На степену глобалног загревања од 1,5 °C примећено је смањење просечног годишњег отицаја у Португалу, али са порастом температуре за 3 °C, смањење је евидентно на целом Пиринејском полуострву, обалама Балканског полуострва и Француске. Аутори сматрају да се изражени тренд смањења отицаја у јужној Европи може променити, уколико се пораст средње глобалне температуре задржи испод 1,5 °C.

Lobanova et al. (2018) спровели су опсежну регионалну студију испитивања тренда промене средњег годишњег протицаја на 8 репрезентативних европских сливова (Тахо, Пиринејско полуострво; Еман и Луле, Скандинавија; Рајна, централна Европа; Дунав, централна Европа; Тетерив, источна Европа; Теј, Велика Британија; Северна Двина, северноисточна Европа). Пројекције будућих климатских промена, засноване на умереном (RCP4.5) и сценарију интензивних емисија GHG (RCP8.5), коришћене су као улазни подаци у хидролошки модел SWIM (енг. Soil and Water Integrated Model). Тренд добијених промена протицаја показује просторну варијабилност примећену у горе наведеним сливовима: у сливовима Скандинавије и северне Европе протицај има тренд пораста, док је изражено смањење очекивано у сливу реке Тахо (јужна Европа). Осим на средње годишње вредности,

значајне промене се очекују и у унутаргодишњој расподели протока. Услед смањења падавина у летњим и касним пролећним месецима предвиђено је смањење протицаја реке Дунав у том периоду. Повећање зимских падавина у сливу Дунава доводи до повећања протицаја у периоду јануар-март. Такав тренд промена очекује се и у сливовима централне, северне и источне Европе. Повећање температуре изазваће раније топлење снега и повећање падавина у зимским и касним јесећим месецима, што ће за последицу имати појаву пролећних пикова (максималних) протицаја један месец раније, односно промену сезоналности.

На подручју Србије налази се велики број мањих сливова, са сличним физичко-географским карактеристикама, углавном локализованим у брдско-планинским подручјима. Сливови у брдско-планинским подручјима су осетљиви на промену температуре, а самим тим и на климатске промене. Dimkić и Despotović (2012) анализирали су промене у тренду протицаја на 8 хидролошких станица у Србији и установили јаку корелациону везу између годишње температуре и просечног годишњег протицаја. Уочено је да повећање годишње температуре од 1°C условава смањење просечног годишњег протицаја од 25-30% у сливовима малих река у Србији.

Досадашња истраживања утицаја климатских промена на површинске воде у Србији обухватила су неколико карактеристичних сливова на којима су анализирани промене просечних годишњих, максималних и минималних вредности протицаја. У до сада доступној литератури, пројекције протицаја су засниване на резултатима симулација глобалних и регионалних климатских модела и углавном на емисионим сценаријима IPCC/SRES (A1B и A2), док су RCP емисиона сценарија врло мало коришћена у ову сврху.

Пројекат Републичког хидрометеоролошког завода Србије (РХМЗ) и Норвешке управе за водне ресурсе и енергетику (енг. *Norwegian Water Resources and Energy Directorate*) обухватио је анализу утицаја климатских промена на хидролошки режим површинских вода у сливовима река Колубара и Топлица (Langsholt et al., 2013). За симулирање протицаја коришћене су пројекције 6 комбинација глобалних (GCM) и регионалних климатских модела (RCM), засноване на IPCC/SRES сценарију A1B и концептуални хидролошки модел, HBV (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*). Оцена утицаја добијена је поређењем симулираних вредности у блиској (2001-2030), односно далекој будућности (2071-2100) са симулираним вредностима у референтном периоду (1961-1990). Резултати спроведене анализе указују на смањење просечног годишњег протицаја од 30 до 40% до краја века, на подручју оба слива. Највеће смањење уочено је у пролећним месецима, што аутори објашњавају као последицу смањења складиштеног снега. Повећање температуре и смањење летњих падавина условиће повећану учесталост догађаја хидролошке суше у оба слива. На подручју слива Колубаре до краја века очекује се повећање вредности максималних протока, док у сливу Топлице није уочено значајно повећање.

Смањење количине воде у сливовима Колубаре, Топлице и Млаве до краја века, Тодоровић и Плавшић (2015) објашњавају као последицу будућег смањења количине падавина и повећања евапотранспирације услед повећања температуре. У односу на Langsholt et al. (2013), истраживање од стране Тодоровић и Плавшић (2015) обухватило је и слив реке Млаве, а хидролошке пројекције засноване су на два сценарија пораста концентрације гасова са ефектом стаклене баште, A1B и A2. Анализиране су промене у великим, средњим и малим водама у блиској будућности (2015-2040), средини 21. века (2040-2070) и далекој будућности (2070-2100), у односу на референтни период (1961-1990. године). Према резултатима њиховог истраживања, до краја 21. века може се очекивати пораст великих вода, али и изражени опадајући трендови у малим водама, што је у складу са резултатима истраживања van Vliet et al. (2015), где се наводи да се у великом делу Европе, између осталог и на Балкану, могу очекивати учестале појаве и поплавних таласа и хидролошке суше.

Todorović et al. (2017) анализирали су појаву поплавних таласа услед климатских промена у сливовима Колубаре и Топлице. Хидролошки HBV-light модел коришћен је за

израду симулација дневног протицаја, а на основу климатских пројекција добијених употребом интеграције климатих модела ECHAM5-EBU-ROM и емисионих сценарија А1В и А2. Праћене су промене у годишњем броју и опсегу пикова протока у блиској будућности (2015-2040) и средини 21. века (2040-2070), у односу на референтни период (1961-1990. године). У сливу реке Колубаре очекује се повећање броја појаве пикова протока средином 21. века, а опсег пикова зависи од изабраног емисионог сценарија. Према А1В сценарију, очекује се смањење, док сценарио А2 предвиђа повећање опсега пикова, до средине 21. века. Предвиђања под сценаријем А2 указују на изражен тренд повећања учесталости и опсега пикова у сливу реке Топлице, а смањење броја пикова се очекује према А1В сценарију.

На смањење вредности параметра водног биланса (падавина, евапотранспирације и отицаја) услед климатских промена, указују резултати анализе рађене за слив реке Нишаве. До краја века, очекује се смањење отицаја реке Нишаве до 24%, према А1В сценарију, односно 30% према А2 (Прохаска и сар., 2013).

2.4.2 Утицај климатских промена на подземне воде

Значајно глобално загревање и промене у количини и расподели падавина очекују се до краја 21. века према пројекцијама IPCC-а (Le Treut et al., 2007). У оваквим условима очекује се одговор режима подземних вода, у погледу промене нивоа и количине доступне подземне воде (Bates et al., 2008; Kløve et al., 2014). Прегледом доступне литературе примећено је да се мањи број истраживања фокусира на испитивање утицаја климатских промена на подземне воде у односу на површинске, како у развијеним тако и у земљама у развоју (Bates et al., 2008).

Досадашњим истраживањима утврђен је директан утицај промена у падавинама, пре свега у њиховој варијабилности и евапотранспирацији на промене у режиму подземних вода (Green et al., 2011). Резултати анализе утицаја варијабилности падавина на прихрањивање подземних вода указују да смањење падавина од 15% узрокује смањење прихрањивања до 45%, при чему промене у температури нису узете у обзир (Sandstrom, 1995). У условима климатских промена услед повећања температуре ваздуха очекује се повећање евапотранспирације (Green et al., 2011). Повећање температуре ваздуха утицаће на повећање евапотранспирације, што може резултовати смањењем превлаживања (Havril et al., 2018). Значајне промене у хидролошком циклусу сливова са доминантним снежним режимом очекују се као последица тренда загревања ваздуха (Green et al., 2011). Eckhardt и Ulbrich (2003) закључили су да се услед загревања ваздуха изнад планинских ланаца у централној Европи могу очекивати значајне промене у унутаргодишњој расподели прихрањивања и сезонском режиму подземних вода. Повећање температуре условиће смањење снежних падавина и смањење процеса смрзавања земљишта, што ће омогућити да се већа количина воде инфилтрира у земљиште. У зимским месецима очекује се да већи део падавина падне у облику кише, а мањи у облику снега, као и повећање укупних падавина. Ови процеси резултоваће повећаним прихрањивањем подземних вода. Комбиновани ефекат повећане евапотранспирације и смањења падавина у летњим месецима довешће до смањења прихрањивања подземних вода и до 50% (Eckhardt и Ulbrich, 2003). Jyrkama и Sykes (2007) такође су закључили да загревање у зимским месецима утиче на однос количине снега и кише у укупним падавинама и на количину воде која доспе у земљиште због смањења количине замрзнутог земљишта. Резултати симулација рађених хидролошким моделом *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance* (HELP3) показују да се услед ових процеса може очекивати пораст прихрањивања подземних вода у сливу Велике реке у Онтарију, Канада. Да температура и падавине имају значајан утицај на ниво подземне воде потврдили су Chen et al. (2004). Анализирајући везу између климатских варијабли и нивоа подземне воде, закључили су да ће тренд повећања температуре ваздуха значајно утицати на смањење количине и нивоа подземне воде у плитким аквиферима.

Hattermann et al. (2008) анализирали су утицај климатских промена на водне ресурсе у немачком делу слива реке Лаба. Студија показује да на прихрањивање подземних вода у овом сливу највећи утицај има повећање евапотранспирације. Такође је уочено да релативно мале и статистички незначајне промене у падавинама, праћене значајним повећањем температуре, узрокују значајне промене у прихрањивању подземних вода. Закључак студије је да ће промене у хидролошким и метеоролошким варијаблама у будућности условити смањену доступност водних ресурса у централној Европи.

Промене у хидролошком циклусу изазване климатским променама одразиће се на интеракцију између површинских и подземних вода (Green et al., 2011). Као последица смањења доступне површинске воде, интензивније ће се користити вода из подземних ресурса (Hsu et al., 2007). Највећи утицај очекује се у сушним периодима са ниским протицајима у рекама, када ће се због мање количине воде у рекама појачати експлоатација подземне воде (Kløve et al., 2014). Закључак да климатске промене директно утичу на резерве подземних вода преко промена у протицају донели су Stolz et al. (2018) анализирајући утицај климатских промена на водне ресурсе у сливу реке Дунава. Резултати студије део су Стратегије за адаптацију на климатске промене (енг. *Strategy on Adaptation to Climate Change*) донету од стране Међународне комисије за заштиту реке Дунав (енг. *International Commission for the Protection the of Danube River, ICPDR*). Ниски водостаји у летњим месецима изазвани варијацијама у падавинама узроковаће смањење количине подземних вода у том периоду у сливу Дунава (Stolz et al., 2018).

Промене у режиму подземних вода услед климатских промена показују велику просторну варијабилност. Глобалне пројекције прихрањивања подземних вода добијене применом два климатска модела (ECHAM4 и HadCM3), SRES емисионих сценарија А2 и В2 и глобалног хидролошког модела указују на: (1) повећање глобалног прихрањивања подземних вода од 2% до 2050. године; (2) повећање прихрањивања подземних вода од 30% до 2050. године у северној Кини, Блиском Истоку, Сибиру и западном делу САД; и (3) смањење прихрањивања подземних вода од 70% у другој половини 21. века у североисточном Бразилу, југозападној Африци и јужној обали Медитерана (Bates et al., 2008).

Константно исцрпљивање подземних вода услед климатских промена предвиђа се у Схабестар провинцији у Ирану (Jeihooni et al., 2019б). Ниво подземне воде моделиран је на основу пројекција климатских варијабли добијених применом четири GCM и емисионих сценарија RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5. Предвиђено смањење нивоа подземних вода износи 0,61 m (RCP2.6), 0,81 m (RCP4.5) и 1,53 m (RCP8.5), за период 2020-2024.

Применом ансамбла GCM и емпиријског хидролошког модела, Salem et al. (2018) проценили су ефекат климатских промена на подземне воде у северозападном Бангладешу. Резултати показују значајан пад нивоа подземних вода према свим сценаријима (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5), при чему се највећи пад, од 2,71 m до 2099. године, очекује према сценарију RCP8.5.

Ertürk et al. (2014) користили су *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) хидролошки модел за израду пројекција хидролошких варијабли у условима климатских промена у западном медитеранском региону Турске. Предикције указују на смањење количине подземне воде услед смањења прихрањивања подземних вода.

У сливовима европских река у јужној Италији (Senatore et al., 2011), Шпанији (Guardiola-Albert и Jackson, 2011), северној Француској (Ducharne et al., 2010) и источној Белгији (Goderniaux et al., 2011) према сценарију А2 очекује се значајно смањење прихрањивања и нивоа подземне воде до краја 21. века, док статистички значајна промена није уочена у Швајцарској (Stoll et al., 2011) и Енглеској (Jackson et al., 2011).

Nistor (2019) је испитивао степен утицаја климатских промена на подземне воде у Југоисточној Европи применом NISTOR–CEGW методе која комбинује Де Мартонеов индекс

суше и ефективне падавине. Два климатска модела коришћена су за симулације, а анализа је рађена за периоде 2011-2040 и 2041-2070. За потребе истраживања, аутор је класификовао утицај климатских промена у шест категорија: веома благ, благ, умерен, висок, веома виок и екстремно висок. Улазни параметри (Де Мартонеов индекс суше и ефективне падавине) такође су класификовани у шест категорија, у односу на уведену класификацију утицаја климатских промена. На основу климатских услова и орографије, аутор студије поделио је регион Југоисточне Европе на северни, у коме се очекује блажи ефекат климатских промена, и јужни са високим до веома високим ефектом. У планинским регионима са нижом температуром и већом годишњом сумом падавина у односу на остали део анализираниог подручја ефекат климатских промена је низак и веома низак. Резултати указују екстремно висок утицај на подземне воде у периоду 2011-2040 у регионима Панонске низије, источне и јужне Румуније, северне и јужне Бугарске, источне и централне Македоније, северне и јужне Грчке и европског дела Турске. У будућности (период 2041-2070) су очекивани екстремно високи утицаји климатских промена на подземне воде у северном, источном и југоисточном делу региона Југоисточне Европе. За територију Србије у периоду 2011-2040 предвиђен је екстремно висок утицај у јужним деловима земље, док је висок и веома висок ефекат примећен у северној Србији. Предвиђања за будућност указују на екстремно висок утицај климатских промена на подземне воде на територији Панонске низије, која заузима део наше земље.

Изворишта подземних вода у Европи значајно су погођена климатским променама, закључак је анализе рањивости подземних вода у Европи спроведене од стране Nistor-a (2020). Процена рањивости подземних вода праћена је преко NISTOR-GWV индекса. Велики и веома велики степен рањивости очекује се у Средњоевропској низији, Балканском полуострву, Панонској низији, северној Француској, Румунској низији и Падској низији. Планински региони показују мали и веома мали степен рањивости. У будућности се може очекивати пораст површина са високим степеном рањивости услед климатских промена.

2.5 Утицај климатских промена на потребе усева и засада за водом

Међувладин панел за климатске промене и Организација за храну и пољопривреду истакле су пољопривреду као једну од најугроженијих привредних грана у условима климатских промена. Очекује се да ће промене у температури, количини и дистрибуцији падавина и појаве екстремних климатских догађаја (суша, топлотни таласи, поплаве) услед климатских промена довести до повећања потреба усева за водом (Mizyed, 2009; Iglesias и Garrote, 2015; Ye et al., 2015; Mo et al., 2017; Rio et al., 2018; Li et al., 2020).

FAO дефинише потребе култура за водом као „количину потребне воде да надокнади губитак воде кроз евапотранспирацију код здравих биљака, гајених на великој површини у повољним условима земљишта, укључујући влагу у земљишту и плодност, а који достижу пун производни капацитет у датим условима“ (Doorenbos and Pruitt, 1977). Потреба биљака за водом дефинисана је преко референтне евапотранспирације (ETo) која садржи климатске карактеристике и коефицијента културе (Kc) који садржи карактеристике усева и засада.

На глобалном нивоу, услед климатских промена, очекује се повећање потреба биљака за водом (Döll, 2002; Li et al., 2020), док се на регионалном нивоу уочава просторна варијабилност промена, услед регионалних варијација климатских величина.

Студије рађене за подручје Грчке (Kotsopoulos et al., 2015), Саудијске Арабије (Chowdhury et al., 2016), Севернокинеске низије (Mo et al., 2017), јужне Кине (Ye et al., 2015), југозападног Ирана (Jahani et al., 2016) и Индије (Kaushika et al., 2019) указују на растући тренд у захтевима биљака за водом. Sun et al. (2018) објавили су статистички незначајан опадајући тренд евапотранспирације културе, као и потреба за наводњавањем у покрајини Шенси, централна Кина.

У условима аридне климе у централној Азији, Li et al. (2020) анализирали су потребе усева за водом услед глобалног загревања од 1,5 °C и 2 °C. Разлика у доступној води израчуната је у односу на референтни период 1976-2005, на основу резултата 10 GCM. Предикције за период 2016-2045 према сценарију RCP4.5 одговарају повећању средње глобалне температуре од 1,5 °C, односно период 2006-2035. према RCP8.5 загревању од 2 °C. Укупна вредност потребе усева за водом одређена је као сума евапотранспирације усева за цео вегетациони период, а дефицит/суфицит воде рачунат је као разлика добијених потреба усева за водом и ефективних падавина. Закључак анализе је да ће, због повећања температуре, потребе усева за водом бити у порасту 13 mm (1,5 °C), односно 19 mm (2 °C) годишње. Дефицит воде значајно је већи у случају повећања средње глобалне температуре за 2 °C, док се при повећању од 1,5 °C очекује да захтеви за водом буду задовољени повећањем падавина у будућности.

Rio et al. (2018) наводе да ће климатске промене у Европи довести до повећаних потреба усева за водом. Потребности усева за водом у Европи показују изражену регионалну и сезонску варијабилност, која прати промене климе. Према извештају Европске агенције за заштиту животне средине (енг. *European Environment Agency*) у деловима јужне Европе (Кипар, Грчка, Италија, Шпанија, Турска) очекује се смањење доступних водних ресурса, услед израженог пораста температуре и појаве екстремних временских догађаја (Jacobs et al., 2019). Са друге стране у централној и северној Европи очекује се повећање доступне воде на годишњем нивоу (Jacobs et al., 2019).

Iglesias и Garrote (2015) проценили су главне ризике у управљању водним ресурсима Европе у пољопривредном сектору услед климатских промена. Повећање температуре ваздуха од 2 до 4 °C и промене у падавинама од +10 до -50% предвиђени су за подручје Европе до краја века, што ће резултовати повећањем евапотранспирације и израженијим повећањем захтева за водом у пољопривреди. Аутори издвајају јужну Европу као један од најугроженијих региона, услед предвиђеног повећања температуре и до 5 °C и појаве температурних екстрема. Промене у сезонском режиму падавина, пре свега смањење суме летњих падавина резултоваће повећаним дефицитом воде. Cai et al. (2015) такође наводе да се у региону јужне Европе очекује да измењен режим падавина резултује смањењем доступне воде, што ће за последицу имати повећање потреба усева за водом и захтева за наводњавањем. За разлику од Jacobs et al. (2019), поред медитеранских земаља (Шпанија и Португал) и источне Европе, Cai et al. (2015) наводе да се и у деловима централне Европе очекује изражен дефицит воде. За регион западне Европе, предвиђено је смањење дефицита и потреба усева за водом.

Да на потребе усева за водом значајан утицај могу имати климатске промене закључак је истраживања рађених за нашу земљу (Стричевић и сар., 2017; Stričević et al., 2019a; Tovjanin et al., 2019).

У условима климатских промена, за подручје Србије предвиђено је повећање температуре ваздуха и смањење количине падавина током летњих месеци, што ће изазвати учесталу појаву суше (Lalić et al., 2011; Ђурђевић и сар., 2018; Vuković et al., 2018; Tovjanin et al., 2019).

Kresovic et al. (2014) испитивали су утицај наводњавања на принос и економичност производње кукуруза у Војводини, у условима осматраних климатских промена. Резултати указују да се у периоду од 2002-2010 у току вегетационе сезоне јављао дефицит воде, који је посебно изражен и јуну, јулу и августу.

Применом CROPWAT 8.0 модела и климатских пројекција заснованих на А2 емисионом сценарију, Lalic et al. (2013) анализирали су утицај климатских промена на потребе за водом кукуруза, шећерне репе и кромпира у Србији до 2030. године. Најизраженији пад суме ефективних падавина од 25% може се очекивати у јужном и југоисточном делу земље,

који праћен повећаном евапотранспирацијом условљава смањење количине воде за усеве пореклом од падавина у току вегетационе сезоне.

Стричевић и сар. (2014) проценили су AquaCrop моделом принос и потребе шећерне репе за водом у условима климатских промена применом резултата пројекција регионалног климатског модела EBU-POM за сценарија A1B и A2. Услед повећања температурних сума у вегетационом периоду шећерне репе до 700 °C и смањења падавина за 100 mm, јавиће се потреба за повећањем норми наводњавања.

Применом климатских пројекција 9 регионалних климатских модела из EURO-CORDEX пројекта, заснованих на RCP8.5 емисионом сценарију и AquaCrop модела, Стричевић и сар. (2020) анализирали су утицај климатских промена на принос и потребе за наводњавањем пшенице, кукуруза и сунцокрета на подручју Србије. Анализа је рађена за локалитете Римски Шанчеви, Ваљево, Крагујевац, Неготин и Лесковац. Промене посматраних величина праћене су у три будућа периода (2016-2035, 2046-2065, 2081-2100) у односу на референтни (1986-2005. године). Према предикцијама, уколико се сетва обави у оптималним роковима за културе пшеница, кукуруз и сунцокрет неће доћи до значајне промене дефицита воде у будућности у односу на садашње вредности.

Товјанин et al. (2019) испитивали су утицај климатских промена на принос и захтеве за водом кукуруза и соје на експерименталном пољу Римски Шанчеви, јужни део Панонске низије. Климатске пројекције добијене су помоћу ECHAM климатског модела и A2 емисионог сценарија. За моделирање производње кукуруза и соје коришћен је AquaCrop модел. Повећање потреба за наводњавањем услед повећања температуре и значајног смањења суме падавина резултат је симулација, што указује на повећање потреба кукуруза и соје за водом у будућности.

На подручју слива реке Топлице, на великом делу коришћеног пољопривредног земљишта биљна производња се одвија у условима природног водног режима, односно без наводњавања. Симулације климатских величина у сливу реке Топлице указују да се до краја 21. века очекује повећање температуре ваздуха и смањење суме месечних падавина у периоду мај - октобар (Langsholt et al., 2013), који се за већину усева поклапа са вегетационом сезоном. Такви климатски услови у комбинацији са повећаном евапотранспирацијом могу условити смањење доступне воде за усеве. Стога је значајно пратити потребе усева за водом и установити нето дефицит, односно суфицит воде ради предлагања евентуалних адаптивних мера.

Vujadinović Mandić et al. (2022b) анализирали су утицај учесталости екстремних временских догађаја условљених климатским променама на воћарску и виноградарску производњу у Србији. Промене у агроклиматским индексима у периоду 1998-2017 анализирани су у односу на стандардни климатолошки период 1961-1990. Процена ризика од мраза на почетку вегетације процењена је праћењем појаве $T_{min} < -2$ °C за време и након цветања најчешће гајених воћних врста. У највећем делу земље, ризик од мраза за воћке које најраније цветају (кајсија, бресква) порастао је више од 10% током 1998-2017 у односу на референтни период. Ризик од појаве високих летњих температура процењен је на основу фреквенције појављивања најмање два узастопна дана са максималном дневном температуром изнад 35 °C. Током периода 1998-2017, почетак појаве периода са високим температурама био је карактеристичан за другу половину јуна или прву половину јула, са просечном дужином период у коме се могу јавити од 20 дана. Примећена је статистички значајана промена у почетку појаве и дужини периода у коме се могу јавити у односу на референтни период. Процењени ризик од високих температура током лета је највиши у долинама Саве, Дунава, Велике и Јужне Мораве, источним, североисточним и југозападним деловима земље, а свуда где се овакви дани појављују је увећан за више од 10% у односу на период 1961-1990.

У условима осмотрених и предвиђених промена агроклиматских услова јавља се потреба за применом мера адаптације (Anderson et al., 2020), те је предлагање одређених мера и процена њихове ефикасности предмет великог броја истраживања (Iglesias et al., 2012; Donatelli et al., 2015; Ahmad et al., 2020; Markou et al., 2020; Babaeian et al., 2021; Funes et al., 2021). Према Iglesias et al. (2012), адаптационе мере могу се категорисати на техничке (нпр. узгој нових култура), мере које се односе на организацију (нпр. измена и увођење нових култура у плодореду) и мере које се односе на инфраструктуру (нпр. унапређивање постојећих и изградња нових система за наводњавање и одводњавање).

Група од 56 стручњака из различитих дисциплина проценила је ефикасност 35 мера предложених за адаптацију пољопривредне производње на Кипру (Markou et al., 2020). На основу добијене процене ефикасности посматраних мера, предложено је да стратегија прилагођавања пољопривредног сектора на климатске промене обухвата 12 мера које се односе на примену наводњавања, заштиту усева од болести и штеточина, мере добре пољопривредне праксе (гајење здружених усева и сорти отпорних на сушу и температурни стрес), примену система за рано упозоравање на екстремне временске догађаје и саветодавну подршку пољопривредним произвођачима од стране локалних институција.

Olesen et al. (2011) означили су Србију као један од региона у којима се очекују изразито негативни утицаји климатских промена на пољопривредну производњу услед повећаног ризика од топлотних таласа и суше.

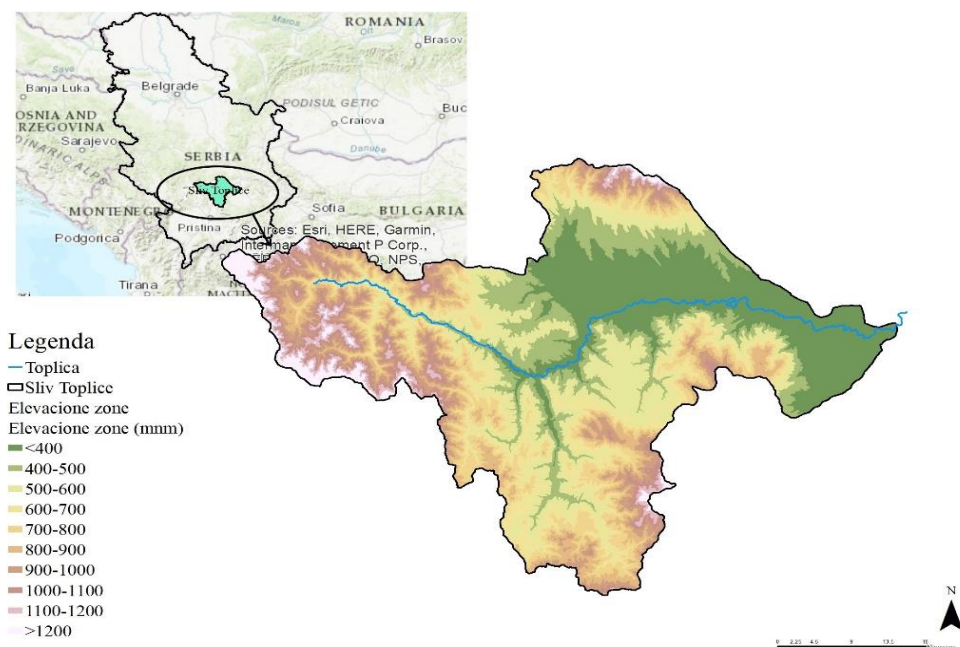
У оквиру Другог националног извештаја Републике Србије према Оквирној конвенцији о промени климе (енг. *Second National Communication*, SNC, 2017) и Извештају о утицају осмотрених климатских промена на пољопривреду у Србији и пројекције утицаја будуће климе на основу различитих сценарија будућих емисија (Стричевић и сар., 2019б), тим стручњака предложио је низ мера помоћу којих би се биљна производња у Србији прилагодила осмотреним и очекиваним променама у клими. Предложене мере адаптације на екстремне временске прилике обухватају употребу противмразних и противградних система, гајење култура отпорних на високе температуре и увођење више култура у плодореду, повећање површине под озимим усевима, померање датума сетве и примену редуковане обраде земљишта (Стричевић и сар., 2019б). Неке од мера које Стричевић и сар. (2019б) предлажу за прилагођавање на сушу су: примена наводњавања и повећање ефикасности система за наводњавање који су већ у употреби, акумулирање воде, гајење сорти отпорних на сушу, примена мрежа за засену. Поред метода добре пољопривредне праксе у које спадају плодоред, правилна обрада земљишта, избор сорти отпорних на сушу и топлоту, наводњавање, одводњавање, сузбијање корова и штеточина, пољопривредни произвођачи могу применити и алтернативне агротехничке мере за ублажавање утицаја климатских промена. Алтернативне агротехничке мере односе се на технику конзервацијске обраде земљишта, малчирање, гајење покровних и здружених усева (Стричевић и сар., 2019б).

3. Материјал и методе

3.1 Опис проучаваног подручја

3.1.1 Локација и величина слива

Испитивано подручје је слив реке Топлице, леве притоке Јужне Мораве (Слика 3). Слив је лоциран између $42^{\circ}62'$ и $43^{\circ}24'$ северне географске ширине и $20^{\circ}45'$ и $21^{\circ}54'$ источне географске дужине. Површина слива износи 2052 km^2 .



Слика 3. Локација и топографска мапа слива реке Топлице (Модификовано према извору: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=5421a40574914458892efe74f0149025>. Приступљено: 21. децембар, 2018. године).

Река Топлица настаје спајањем неколико притока на источним падинама планине Копаоник, од којих су највеће реке Луковска и Ђерекаруша које се спајају код места Мерћез. Дужина тока реке износи 130 km (Гавриловић и Ђукић, 2014). Ширина и дубина реке варирају дуж тока: узводно од Куршумлије река је широка од 10 до 12 m и дубока до $0,90 \text{ m}$; у делу између Куршумлије и Прокупља река се шири до 20 m а дубина расте до $1,50 \text{ m}$, док је кроз Добрич река најшира (до 25 m), а дубока од 1 до 2 m (Гавриловић и Ђукић, 2014). Водни режим Топлице показује изражену амплитуду осцилирања протицаја. Екстремне вредности протицаја забележене су 19. новембра 1979. године, када је протицај код Прокупља износио $688 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, што је 7 пута већа вредност од просечног протицаја Јужне Мораве, док је у септембру 1952. године количина воде у Топлици износила само $100 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ (Гавриловић и Ђукић, 2014).

3.2 Топографске, геолошке, хидрогеолошке и педолошке карактеристике подручја

3.2.1 Топографија подручја

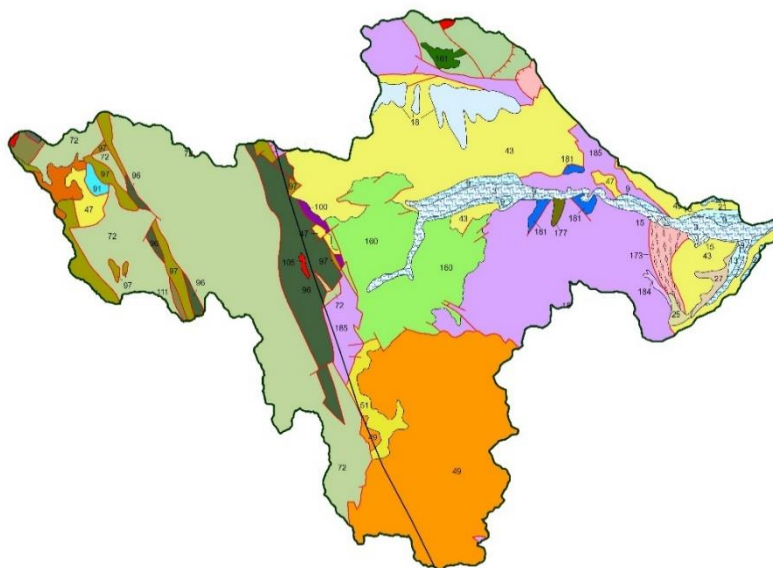
Рељеф подручја слива Топлице карактерише присуство тектонских и ерозивних облика. Раседањем старе Родопске масе створена је зона громадних планина и котлина. Слив је оивичен планинама Радан и Мајдан на југу, Соколовица, Видојевица, Арбанашка планина, Ргајска планина и Пасјача на североистоку и истоку, док планина Јастребац на северу одваја Топличку од Крушевачке котлине. У току алпске орогенезе формирана је Топличка котлина. Некадашње присуство залива Панонског мора на овом подручју условило је

таложее седимената и настанак Топличког неогеног басена. Композитна долина Топлице састоји се од клисурастог дела у горњем току реке који се простира од извора до села Влахиње, западно од Куршумлије. На потезу од Влахиње до села Губетина заступљена је Топличко-косаничка котлина, а затим између Губетина и Прокупља налази се клисурасто сужење. Долина доње Топлице усечена је у језерске седименте (Шево, 2015).

Распон надморске висине у сливу креће се од 190 до 2016 mnm. Обрада снимака дигиталног елевационог модела (енг. *digital elevation model*, DEM) указује да се око 48% укупне површине слива налази на надморској висини до 550 mnm (Слика 3).

3.2.2 Геолошке карактеристике подручја

Детаљан преглед геолошке грађе анализираниог подручја дат је у публикацијама Тумач за листове Ниш и Куршумлија, а који су штампани уз Основну геолошку карту за територију некадашње СФРЈ у размери 1:100000 (Група аутора, 1973; 1980). Основна геолошка карта подручја преузета је са националног геопортала „ГеоСрбија“ (Слика 4).



Легенда: 3. Фација корита: шљункови и пескови; горњи холоцен; 9. Тераца 7-12 (10-15 m): шљункови и пескови; 15. Конуси плавина у стварању: шљункови, пескови и алеврити; 18. Субаерапне делте и сложени конуси: агломерати, шљункови и пескови; еоплеистоцен; 21. Тераца 90-110 m: шљункови и пескови; 25. Пролувијално делувијални седименти: дробина, шљункови алеврити; еоплеистоцен; 27. Делувијални седименти: алверитични шљункови, алверити, пескови; млађи плеистоцен – холоцен; 43. Кластити, пелити и карбонати са туфовима; 47. Кластити, пелити и карбонати са пирокластитима; 49. Дацити, андезити и латити, са вулгнокластитима; 51. Кластити, пелити ређе карбонати, са пирокластитима; 72. Пешчари, ламинирани алевролити и глинци, ређе конгломерати; 96. Дијабази и спилити; јура; 97. Серпентинити и серпентинисани периодити; јура; 100. Кречњаци са рожнацима, цефалоподски кречњаци, глинци и рожнаци; 105. Гранитоиди и гнајстрани; 111. Серицитско-хлоритски и епидот-хлоритски шкриљци, кварцити, филити, мермери, метаморфни кварцни конгломерати; 160. Алевролити, лапорци, лапоровити кречњаци. Пешчари, конгломерати: флиш; 161. Габро: алпски (креда) Црна чука - В.Јастребац (у Вардарској зони); 173. Тракасти гнајсеви, окцаста гнајсеви и мигматити; капедон; 177. Кварцити са апатитом, капкшисти, црни кварцити, поиситски шкриљци; камбријум; 181. Калцитски и доломитски мермери; камбријум; 184. Амфиболити и амфиболитски гнајсеви; горњи протерозоик; 185. Гнајсеви, микашисти, кварцити; 186. Масивни и тракасти амфиболити.

Слика 4: Геолошка грађа терена подручја слива Топлице (Модификовано према извору: <https://a3.geosrbija.rs/>. Приступљено: 30.12.2020. године).

Подручје слива реке Топлице простире се на деловима две геотектонске јединице, вардарске зоне и српско-македонске масе (Гњато, 2018). Како је у Тумачу за лист Куршумлија наведено, кристални шкриљци доњег комплекса српско-македонске масе представљају најстарије откривене стене на истраживаном подручју, за које се претпоставља да припадају прекамбријуму (Група аутора, 1980). Кристални шкриљци на овом терену представљени су ситнозрним биотитским и дволискунским гнајсевима, док су мање заступљене стене лептинолити и микашисти, лискунске стене јабучевог типа, амфиболске стене и мигмати, сасвим ретко кварцити. У деловима доњег кристалног комплекса присутни су пегматити, око планине Видојевица, затим западно од села Музаће и код места Товрљане и аплити, североисточно од Прокупља и то западно од села Балиновца (Група аутора, 1973; 1980). Код села Арсића и Кричака откривене су масе нискометаморфисаних стена изграђених од мермерисаних кречњака, хлоритско-серицитских шкриљаца и филита. У подручју северозападно од Куршумлије, у Кречњачком потоку и Коњувској реци присутне су нискометаморфне стене које чине серицитски шкриљци, шкриљави лискунски пешчари, глинене шкриљци, масивни и песковити шкриљави кречњаци, а чија старост највероватније одговара периоду тријас (Група аутора, 1980). Централне и западне делове подручја Куршумлије карактерише присуство базичних и ултрабазичних метаморфита, дијабаз-рођњачке формације и магмата (серпентисани перидотити, серпентинити, габрови, дијабази), формираних у периоду горње јуре. У централном делу подручја Куршумлије распрострањени су титон-велендијски седименти у виду претежно светлосивих спрудних и ређе тамносивих плочастих кречњака (Група аутора, 1980). Седimente доње креде чине кречњаци, пешчари, конгломерати, флишеви и алевролити распрострањени у подручјима Батоте, Мерђеца, Ранковице, Тачевца и Преполца. Од Куршумлије до насеља Плочник налазе се седименти горње греде, представљени такође пешчарима, конгломератима, флишевима и лапорацима (Гњато, 2018). На посматраном подручју знатно су присутне творевине из периода терцијара. Горњи олигоцен представљен је вулканогено-седиментним творевинама које чине конгломерати у смени са пешчарима, глинцима и лапорцима. Песковито-лапоровите глине и лапорци код села Мекиша (на путу код моста на Топлици код Дољевца) творевине су доњег и средњег миоцена (Група аутора, 1973). Северозападно од Прокупља откривени су пескови, слабо везани пешчари и шљункови, који припадају млађем неогеном комплексу. У подручју североисточно од Прокупља, присутна су два хоризонта: доњи у коме преовлађују седименти глине, прашинасти и ситнозрни пескови, угљевите глине и горњи, изграђен претежно од пескова са ретким прослојцима песковитих глина и сочивима шљункова (Група аутора, 1973). Седименти у неогеном басену Топлице такође су творевине терцијара и могу се поделити у четири литофацијалне јединице (Група аутора, 1980):

1. Чучалска базална јединица почиње конгломератима и бречама образованим од комада кристалних шкриљаца и флишних пешчара, који прелазе углавном у крупнозрне и средњезрне пешчаре и песковите глинце;
2. Чучалска угљеносно-пелитско-туфогена јединица откривена је у западном делу басена, на подручју села Чучале, Сибница, Ђуровац и Рашица. Јединица почиње угљеним слојем, даље су присутни повлата угљеног слоја, вулканогени-седиментни члан и пелитско-глиновити-карбонатни члан;
3. Пребрешка кластична једница. Почетни нивои се развијају из завршних жутих песковитих глинаца и лапоровитих глинаца чучалске јединице, који се постепено обогаћују песковитом компонентом. У вишим деловима присутни су псамити;
4. Шљунковито песковита јединица значајно је распрострањена у околини Блаца и јужно од њега. Представља младе неогене творевине, дебљине око 100 m. На појединим местима састоји се од чистих кварчних шљункова.

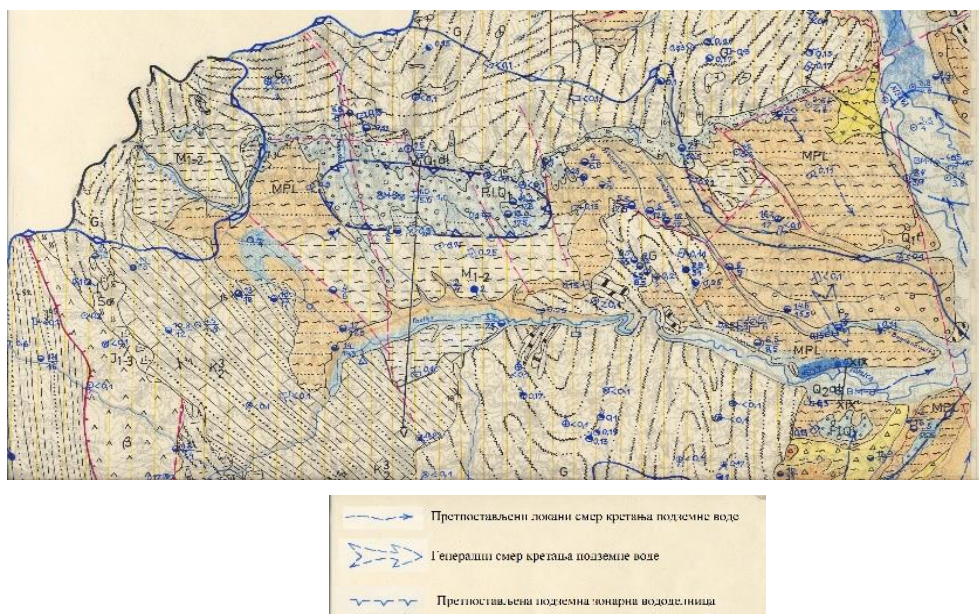
На косама између Пусте реке и Топлице и северозападно од Прокупља, у атарима села Рељинца и Бајчинца карактеристично је присуство творевина плиоцена, претежно сачињених од шљункова и пескова, а на појединим местима запажају се сочива или танки прослојци песковитих глина, глиновитих пескова, па чак и правих глина (Група аутора, 1973). Квартар је представљен талозима насталим акумулационим радом сталних или привремених токова и аблационим процесима на брдским падинама. Делувијалне творевине настају као последица сталног издизања Јастребачког масива и изграђене су од комада и блокова кристалних шкриљаца везаних супесковима и суглинама. Дуж долина река Топлице, Косанице и Бањске реке развијене су речне терасе претежно изграђене од шљункова, пескова, супескова и суглина. На ушћима потока који теку са Јастребца и уливају се у Топлицу присутан је пролувијум. Алувијалне равни изграђене су од шљунка, песка, супескова и суглина и присутне су дуж скоро свих већих речних токова на подручју слива (Група аутора, 1973; 1980).

3.2.3 Хидрогеолошке карактеристике подручја

Слив реке Топлице у највећем делу изграђен је од непропусних и слабо пропусних стена, што условљава слабо задржавање атмосферских падавина и интензиван површински отицај (Костадинов и сар., 2008; Гњато, 2018). Творевине мезозоика и терцијара доминирају у басену речног слива (Гњато, 2018). Састав водоносних средина зависи од геолошког састава околних планина. Серпентинити су карактеристични за предео око Куршумлије и узводно од Селове, док су кристални шкриљци и масивне метаморфне стене распрострањене на падинама Јастребца, Видојевце, Пасјаче, Копаоника и Сувог Рудишта (Гњато, 2018). За подручја кристалних шкриљаца карактеристично је да су сиромашна подземном водом, односно налазе се извори слабе издашности, који се прихрањују из издани разбијеног типа. Изузетак представљају подручја Бамбурека и Белих вода, у којима седименти кварцита и мермера условљавају јачу појаву подземних вода (Група аутора, 1973).

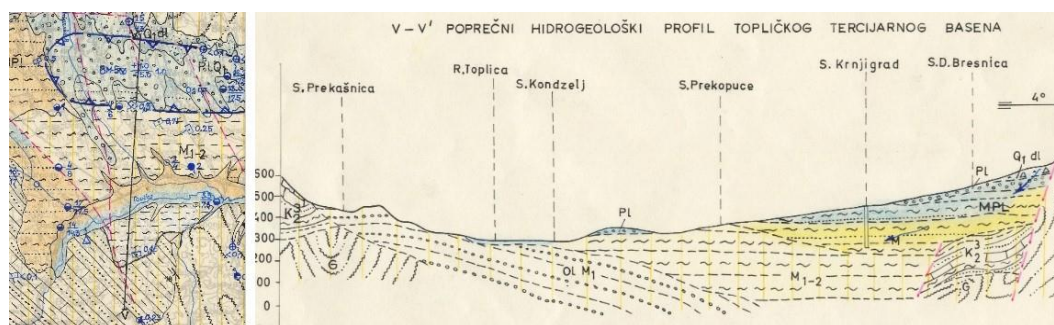
Костадинов и сар. (2008) категоришу терен слива Топлице на четири хидрогеолошке јединице према типу порозности и формираним изданима. Седименти квартара (алувијалне и делувијалне творевине) дуж реке Топлице и њених већих притока условљавају појаву издани у стенским масама са међузрнском порозношћу, карактеристичном за песковите и шљунковите седimente. На теренима са бречастим и мермерисаним кречњацима распрострањене су издани у стенским масама са дисолуционом (кавернозном) и дисолуционо-пукотинском порозношћу. Стенске масе у којима се јавља кавернозна порозност представљају значајне резервоаре подземних вода. У подручјима са лапоровитим кречњацима и серпентинитима јављају се издани у стенским масама са пукотинском порозношћу. Седиментно-вулканогени, флишни и флишколики седименти представљају широко распрострањену водонепропусну средину, односно терене условно без издани.

Хидрогеолошке карактеристике слива Топлице, као и попречних хидрогеолошких профила топличког терцијарног басена и Житорађе описане су на основу Хидрогеолошке карте слива Јужне Мораве у размери 1:200000 (Слика 5; 6; 7). Хидрогеолошке одлике издани и хидрогеолошка развођа подручја слива Топлице представљене су на слици 5.



Слика 5. Хидрогеолошке одлике издани слива Топлице (модификовано према извору: Хидрогеолошка карта слива Јужне Мораве 1:200000).

На слици 6 представљен је попречни хидрогеолошки профил топличког терцијарног басена, као и локација профила. Површине означене плавом бојом представљају веома издашне терене. Плиоцене (Pl) и квартарне (Q) творевине представљене су песковима и шљунковима, на неким местима плиоцене творевине изграђене су од песковитих глина, глиновитих пескова и правих глина. Стенски комплекси добре водопропусности у профилу су представљени миоценом (M) и миоплиоценом (MPl) творевинама ситнозрним и прашинастим песковима, глиновитим пешчарима и на неким местима песковитим и лапоровитим глинама. Са слике се уочава да се у највећем делу профила налазе практично безводни терени, означени жутим линијама. Водонепропусни слојеви углавном су изграђени од конгломерата, пешчара, глинаца, лапораца, флишних и вулканогено-седиментних комплекса, представљеним на карти ознакама OL M1, K₂³.



Слика 6: Локација и карактеристике попречног хидрогеолошког профила топличког терцијарног басена (Модификовано према извору: Хидрогеолошка карта слива Јужне Мораве 1:200000).

На хидрогеолошком профилу Житорађа (Слика 7) присутни су пескови, песковити шљункови, глиновити шљункови и шљунковите глине које граде веома издашне и добро

издашне терене. Дубљи слојеви представљају практично безводне терене, изграђене од глине. На одређеним местима присутан је глинени слој на површини профила.



Слика 7. Локација и карактеристике хидрогеолошког профила Житорађа (Модификовано према извору: Хидрогеолошка карта слива Јужне Мораве 1:200000).

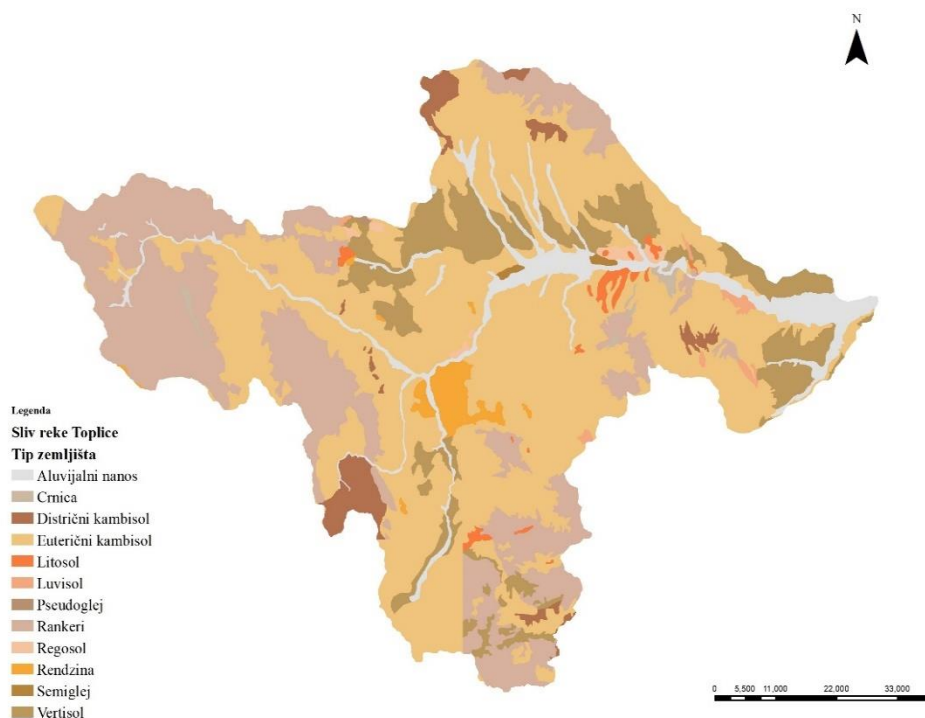
3.2.4 Педолошке карактеристике подручја

Преглед педолошких карактеристика слива Топлице урађен је на основу педолошке карте Србије Института за земљиште, Београд, у размери 1:50000 (Слика 8).

На подручју слива Топлице доминира присуство еутеричног смеђег земљишта (еутерични камбисол, гајњаче). Овај тип земљишта распрострањен је на око 50% укупне површине слива, примарно распоређен у широј долини реке Топлице и њених већих притока. Од подтипова и варијетета налазе се типично еутерично смеђе земљиште на језерским седиментима, затим на литосолу, флишу, габро-дијабазу и андезиту. Гајњаче карактерише добра плодност и повољне физичке карактеристике, услед чега се на заравњеним теренима користе као пољопривредна земљишта (Живковић и Ђорђевић, 2003). На вишим деловима терена дистрично смеђе земљиште (дистрични камбисол) на литосолу, андезиту и гнајсу заузима површину од око 3%.

Од хумусно-акумулативних земљишта у сливу су присутни типови хумусно-силикатно земљиште (ранкер), смоница (вертисол) и рендзина. Ранкери су распрострањени на око 25% површине слива и представљени су са два подтипа: доминатно присутни еутерични ранкер на литосолу, регосолу, гнајсу, флишу, серпентину, дијабазу, габро-дијабазу, шкриљцима и дистрични ранкер на андезиту, литослу, флишу и шкриљцима. Карактеристично за овај тип земљишта, ранкери се у сливу налазе на надморским висинама изнад 800 m. То су углавном плитка земљишта, што ограничава производне карактеристике земљишта (Живковић и Ђорђевић, 2003). Смоница (вертисол) представљена је карбонатним и бескарбонатним подтипом, на око 10% површине слива. На знатно мањој површини (око 1,6%) заступљена је рендзина на лапорцу и лапоровитом кречњаку и на серпентину.

У приобалном делу река формиран је карбонатни и некарбонатни алувијални нанос. У подножју падина, акумулацијом еродираних материјала са горњих делова падине настала су делувијална земљишта (дистрични и еутерични коловијум). Од осталих типова земљишта у сливу се налазе црница, литосол на андезиту, регосол, илимеризовано земљиште (лувисол) на гнајсу и андезиту, подзол, псеудоглеј, семиглеј, која заузимају мање површине.



Слика 8. Педолошка карта слива Топлице (Модификовано према извору: Педолошка карте Србије Институт за земљиште, Београд 1:50000).

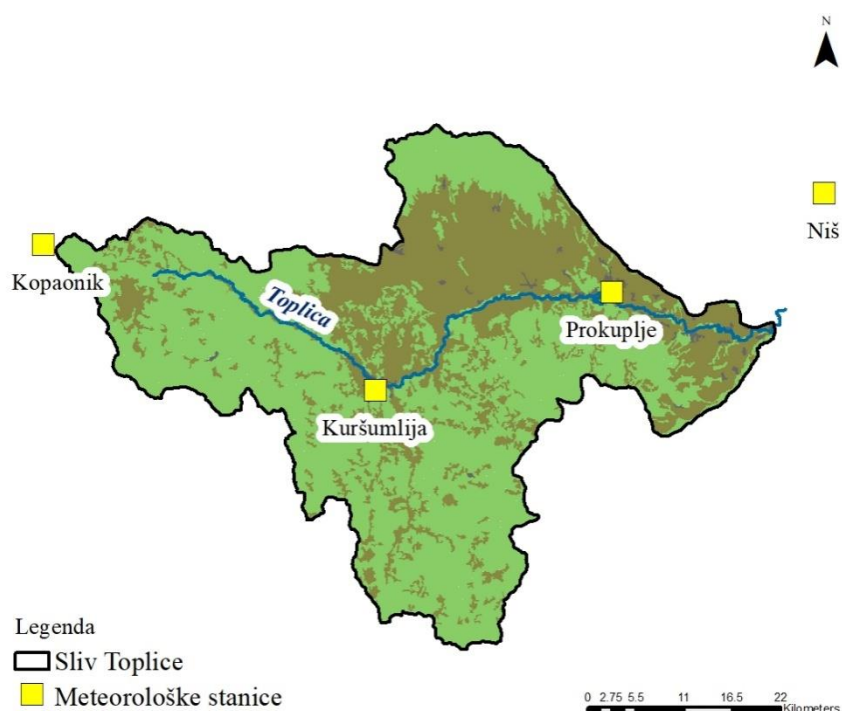
3.3 Подаци коришћени у истраживањима

У истраживањима су коришћени мерени метеоролошки и хидролошки подаци, као и резултати климатских и хидролошких модела под условима климатских промена.

3.3.1 Мерени подаци

Метеоролошки подаци

Мерени метеоролошки подаци за подручје слива Топлице прикупљени су са четири репрезентативне метеоролошке станице: Прокупље, Куршумлија, Ниш и Копаоник. Метеоролошке станице изабране су тако да се што веродостојније опишу климатски услови анализираниог подручја. Локације метеоролошких станица представљене су на слици 9, а општи подаци о станицама дати су у табели 1.



Слика 9. Локације метеоролошких станица на подручју слива Топлице.

Мерени дневни подаци о суми падавина (P) и температури ваздуха (максимална (Tmax), минимална (Tmin) и средња температура (Tmean)) за четири наведене станице за период од 1961. до 2010. године преузети су од Републичког Хидрометеоролошког завода Србије (РХМЗ).

Табела 1. Географски положај метеоролошких (извор: Метеоролошки годишњак, 2010. РХМЗ*, приступљено: 5. 3. 2021. године).

Станица	Надморска висина (mnm)	Географска ширина	Географска дужина
Прокупље	266	43° 14'	21° 36'
Куршумлија	383	43° 08'	21° 16'
Ниш	204	43° 20'	21° 54'
Копаноник	1711	43° 17'	20° 48'

*http://www.hidmet.gov.rs/data/meteo_godisnjaci/Meteoroloski%20godisnjak%201%20-%202010.pdf

Доступност података, конкретно климатских пројекција за будућност, био је услов за одабир методе за прорачун евапотранспирације. Трајковић (2007) и Идризовић и сар. (2018) закључили су да је у климатским условима Србије, уколико се располаже само подацима о температури ваздуха, оправдана примена модификоване *Hargreaves* методе за прорачун евапотранспирације. Предмет истраживања ове дисертације обухвата израду хидролошких симулација, а претходно рађена истраживања показују да методе за прорачун евапотранспирације засноване на температурним подацима омогућавају израду добрих симулација протицаја (Oudin et al., 2005).

Мерени подаци о дневним температурама са наведених метеоролошких станица (Табела 1) коришћени су за прорачун дневних вредности потенцијалне евапотранспирације (PET). За прорачун је коришћена модификована *Hargreaves* метода. Метода је настала регионалном калибрацијом *Hargreaves* једначине од стране Трајковић (2007). Регионална

калибрација извршена је изменом вредности *Hargreaves* експонента на 0,424 за климатске услове у Србији и просечну брзину ветра од $1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Једначина (1)).

$$PET = 0,0023 \cdot 0,408 \cdot Ra \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,424} \cdot \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 17,8 \right) \quad (1)$$

Где је: T_{max} – максимална температура ваздуха ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} – минимална температура ваздуха ($^{\circ}\text{C}$); Ra – екстратерестријална радијација ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{дан}^{-1}$).

Мерени дневни подаци о падавинама и температури ваздуха за период 1971-2000 коришћени су за статистичку корекцију резултата климатских модела. Даље, дневни подаци о T_{mean} , P и срачунатој PET са четири метеоролошке станице за период 1961-2010 коришћени су за калибрацију хидролошког модела коришћеног за симулације протицаја. Исти подаци за период јул 1988–децембар 2016. године прерачунати су на месечном нивоу и примењени у корелационој анализи одређивања улазних варијабли за моделирање нивоа подземних вода.

Измерени подаци о падавинама и температури ваздуха за период 1971-2000 на станицама Прокупље и Куршумлија пружају увид у климатске карактеристике подручја на коме се одвија пољопривредна производња. У ту сврху обрадом мерених података одређене су просечне месечне и годишње вредности падавина и температуре и екстреми за период 1971-2000.

Просечна годишња температура ваздуха за период 1971-2000 за подручја станица Прокупље и Куршумлија износи $11,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $10,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, респективно. Просечне средње (T_{mean}), максималне (T_{max}) и минималне (T_{min}) месечне температуре за период 1971-2000 за ове две станице дате су у табели 2. Апсолутни максимум дневне температуре за период 1971-2000 на станици Прокупље измерен је 4. јула 2000. и износио је $42,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, док је на станици Куршумлија измерен је 5. јула 2000. и износио је $41,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Апсолутни минимум дневне температуре у истом периоду на обе станице измерен је 13. јануара 1985. и износио је $-24,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Прокупље), односно $-25,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Куршумлија).

Табела 2. Подаци о просечним средњим (T_{mean}), максималним (T_{max}) и минималним (T_{min}) температурама на станицама Прокупље и Куршумлија, период 1971-2000.

	$^{\circ}\text{C}$	Јан.	Феб.	Мар.	Апр.	Мај	Јун	Јул	Авг.	Сеп.	Окт.	Нов.	Дец.
Прокупље	T_{mean}	0,2	2,5	6,6	11,2	15,9	19,2	21,0	21,1	17,0	11,8	5,8	1,7
	T_{max}	4,3	7,3	12,5	17,6	22,6	26,1	28,3	28,6	24,1	18,1	10,7	5,6
	T_{min}	-3,9	-2,3	0,7	4,7	9,3	12,4	13,6	13,5	10,0	5,5	1,0	-2,3
Куршумлија	T_{mean}	0,2	1,9	5,8	10,3	15,0	18,2	19,9	19,9	16,2	11,3	5,6	1,7
	T_{max}	4,7	6,8	11,6	16,7	21,7	25,0	27,2	27,5	23,2	17,6	10,6	5,9
	T_{min}	-4,2	-3,1	0,0	4,0	8,3	11,3	12,5	12,2	9,2	4,9	0,5	-2,6

За подручје слива реке Топлице карактеристични су услови хумидне и семи-хумидне климе. Просечна годишња сума падавина за период 1971-2000 износила је 539 mm , према подацима са станице Прокупље, односно 638 mm према подацима са станице Куршумлија. Посматрано на сезонском нивоу, већа количина падавина излучи се у току вегетационе сезоне (период април-септембар), у односу на ванвегетациону сезону (октобар-март). Најкишовитији месец је јун, док се најмања месечна количина падавина јавља у јануару и фебруару. Основне карактеристике падавинског режима на станицама Прокупље и Куршумлија дате су у табели 3. Највећа дневна количина падавина на станици Прокупље од $75,3 \text{ mm}$ регистрована је 14.

јула 1981. На станици Куршумлија 31. јула 1995. измерена је највећа дневна количина падавина од 67,8 mm.

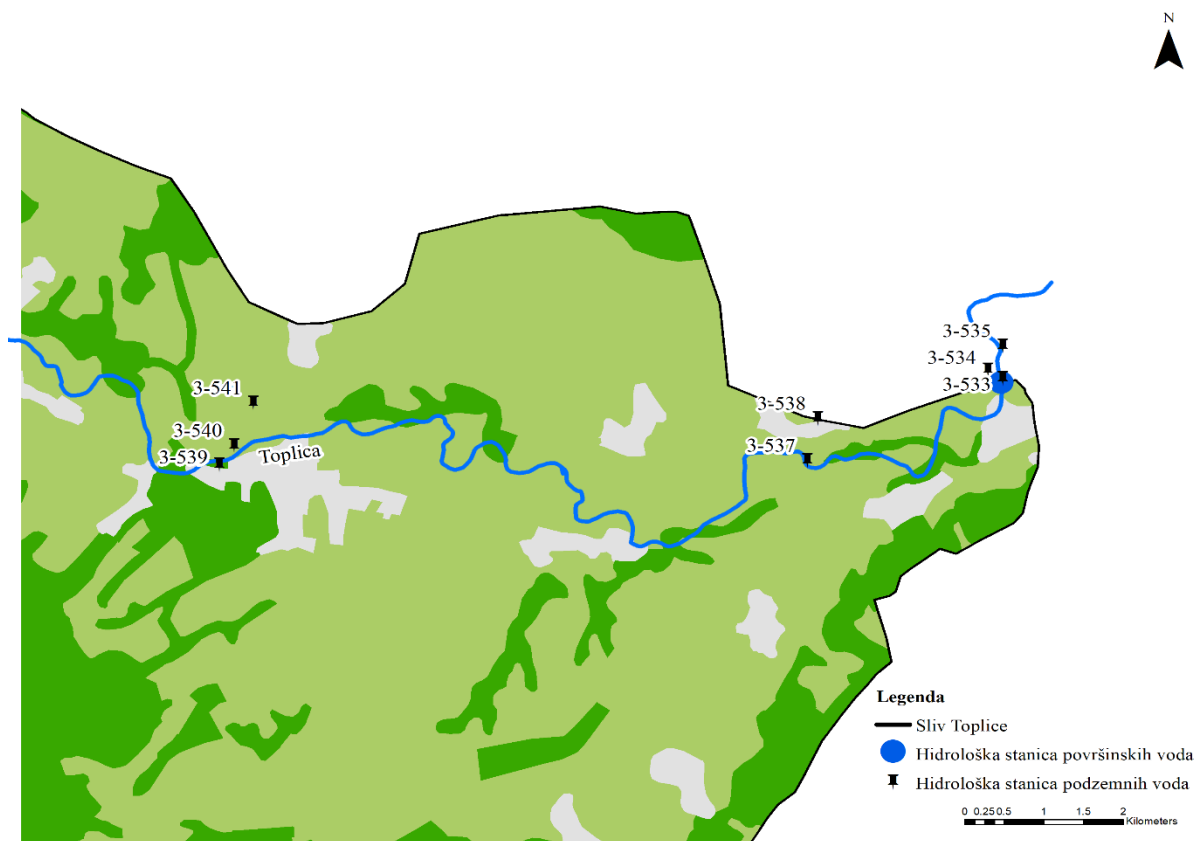
Табела 3. Подаци о падавинском режиму на станицама Прокупље и Куршумлија за период 1971-2000. година.

	P (mm)	
	Прокупље	Куршумлија
Просечна годишња сума	539	638
Просечна сума у току вегетационе сезоне	300	356
Просечна сума у току ванвегетационе сезоне	238	283
Просечна месечна сума	45	53
Просек по месецима		
Јануар	32	40
Фебруар	31	40
Март	34	42
Април	43	51
Мај	54	65
Јун	59	68
Јул	52	66
Август	45	50
Септембар	48	56
Октобар	38	44
Новембар	54	64
Децембар	49	52

Са метеоролошких станица Прокупље и Куршумлија прикупљени су мерени месечни подаци о минималној релативној влажности ваздуха (RH_{min}) и брзини ветра за период 1971-2013. година. Подаци су коришћени за потребе усклађивање коефицијента културе (K_c) за климатске услове на проучаваном подручју.

Хидролошки подаци

Од хидролошких података коришћена су дневна мерења протицаја (Q) на хидролошкој станици површинских вода Дољевац (Табела 4) за период 1961-2010 и месечна мерења нивоа подземне воде на 8 хидролошких станица подземних вода, пијезометара, за период 1988-2016. година (Слика 10). Хидролошки подаци преузети су од РХМЗ-а.



Слика 10. Локације хидролошких станица површинских и подземних вода на подручју слива Топлице.

Табела 4. Географске карактеристике станице површинских вода Дољевац.

Станица	Река	Слив	Географска ширина	Географска дужина	Год. оснивања	Кота "0"	Удаљеност од ушћа (km)
Дољевац	Топлица	Јужна Морава	43° 11'	21 °49'	1922.	190,41	2,5

Мерени дневни подаци Q за период 1961-2010 изражени у $\text{mm} \cdot \text{дан}^{-1}$ коришћени су за калибрацију хидролошког модела примењеног за симулације протицаја на станици Дољевац. За потребе корелационе анализе одређивања улазних варијабли за моделирање нивоа подземних вода, коришћени су измерени дневни подаци о протоцима Q за период јул 1988–децембар 2016. године, прерачунати у просечне месечне вредности.

На основу прикупљених мерених података дате су основне карактеристике протицаја на хидролошкој станици површинских вода Дољевац у периоду 1971-2000.

Просечна вишегодишња вредност Q за период 1971-2000 износила је $9,21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Максимална годишња вредност Q од $16,47 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ забележена је 1980. Минимална годишња вредност Q од $4,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ забележена је 1994. године. У хладном делу године, односно у току ванвегетационог периода, просечна вредност Q била је већа од просечне годишње вредности и износила је $9,89 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, а у току вегетационе сезоне вредност је $8,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Унутаргодишња расподела Q указује да су се најмањи просечни месечни Q јављали у месецима август ($2,95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) и септембар ($3,21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), а највеће вредности у марту ($17,65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) и априлу ($19,63 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Максимална вредност месечног Q износила је $49,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ и

забележена је у мају 1980. године, када је примећена и максимална годишња вредност Q . Минимална вредност месечног Q од $0,69 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ регистрована је у августу 2000. године.

Апсолутни дневни максимум на станици Дољевац измерен је 20. новембра 1979. и износио је $282 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Апсолутни дневни минимум од $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ измерен је узастопно од 26. до 29. августа 2000. године.

На подручју слива реке Топлице РХМЗ врши осматрања режима подземних вода на 8 хидролошких станица подземних вода, пијезометара, локализованих у равничарском делу слива (Слика 10). Станице су основане у јулу 1988. године на удаљености од реке од 10 до 520 m и дубини од 6,3 до 10 m. Мерења се врше углавном једном у 10 дана. За већину станица низови имају недостајуће податке. Основни и технички подаци о станицама, као и карактеристични нивои подземних вода у посматраним профилима од почетка мерења публиковани од стране РХМЗ-а, дати су у табели 5.

Табела 5. Подаци о хидролошким станицама (пијезометрима) у сливу Топлице (извор: РХМЗ**, приступљено: 22. 1. 2021. године).

Назив	Шарлинац – висећи мост	Дољевац	Дољевац – пут за Орљане	Житорађа	Житорађа	Дољевац – кланица	Шарлинац	Глашнице
Ознака	3-537	3-533	3-535	3-539	3-540	3-534	3-538	3-541
Датум оснивања	1.7.1988.	1.7.1988.	1.7.1988.	1.7.1988.	1.7.1988.	1.7.1988.	1.7.1988.	1.7.1988.
Ранг	II	I	II	II	II	I	II	II
Дубина	6,4	8	8,01	6,6	8,24	7,9	10	6,3
Географска ширина	43°11'34"	43°12'10"	43°12'24"	43°11'34"	43°11'43"	43°12'14"	43°11'53"	43°12'02"
Географска дужина	21°48'21"	21°50'10"	21°50'11"	21°42'53"	21°43'01"	21°50'02"	21°48'27"	21°43'12"
Удаљеност од реке (km)	0,01	0,03	0,04	0,05	0,09	0,13	0,49	0,52
Кота "0" (mm)	197,86	195,68	191,59	212,28	212,72	195,67	199,17	213,99
Кота терена (mm)	197,76	194,83	190,73	211,31	211,76	194,86	198,22	213,26
Максимални ниво (cm)*	потоп	293	437	133	265	183	304	328
Минимални ниво (cm)*	401	585	601	523	495	589	494	506
Интервал мерења (дан)	10	5	10	10	10	5	10	10
Надземни део (m)	0,1	0,85	0,86	0,97	0,96	0,81	0,95	0,73

* Карактеристични нивои подземних вода за период од почетка мерења до 2008. године.

** http://www.hidmet.gov.rs/ciril/hidrologija/podzemne/tabela.php?pd_pod_br=3np

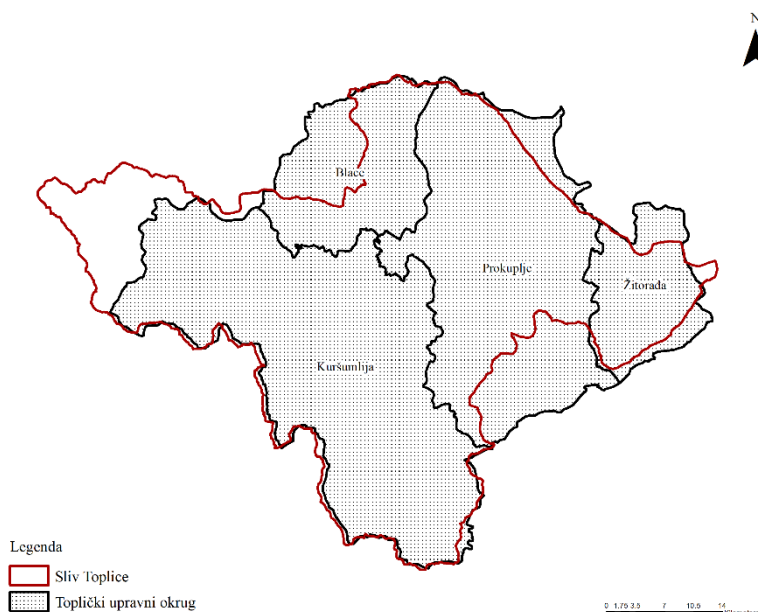
Мерени месечни подаци са наведених пијезометара коришћени су у корелационој анализи флукуација нивоа подземних вода (NPZV) између пијезометара. Циљ анализе је био да се одабере репрезентативан пијезометар, за који ће се моделирати NPZV. Мерени подаци NPZV примењени су и за испитивање јачине везе између NPZV и климатских и хидролошких величина, како би се одредили улазни подаци и припремио модел за моделирање NPZV.

На основу измерених архивских података са пијезометра Житорађа (3-540), нормална вредност нивоа подземних вода NPZV, односно просек средњих месечних вредности нивоа подземне воде за период јул 1988 – децембар 2016 износила је 207,88 mm. На посматраном профилу просечне годишње вредности нивоа подземне воде варираше су између коте 207,64 и 208,54 mm, у периоду јул 1988 – децембар 2016 на овом пијезометру. Ниске вредности

просечних месечних нивоа забележене су током августа и септембра, док се од марта до маја јављају повишени нивои подземне воде, до коте 208,24 mm на мерном месту Житорађа.

Подаци о сетвеној структури

За потребе испитивања утицаја климатских промена на обезбеђеност усева и засада водом, прикупљени су подаци о сетвеној структури на подручју слива реке Топлице. Подаци о сетвеној структури преузети су из публикација Републичког завода за статистику, Попис пољопривреде 2012. године и Општине и региони у Републици Србији, 2020.



Слика 11: Границе Топличког управног округа и слива Топлице.

Границе слива Топлице углавном се поклапају са границама Топличког управног округа, за који су доступни подаци о заступљености пољопривредних култура (Слика 11). Топлички управни округ обухвата општине Прокупље, Блаце, Житорађа и Куршумлија. Према Анкети о структури пољопривредних газдинстава спроведеној на територији Републике Србије 2018. године, површина коришћеног пољопривредног земљишта у Топличком округу износи 54484 ha (Општине и региони у Републици Србији, 2020). Највеће површине пољопривредног земљишта су у Прокупљу (18645 ha), затим у Житорађи (12726 ha), Куршумлији (11981 ha) и Блацу (11132 ha). Површина и структура коришћеног пољопривредног земљишта у округу и по општинама представљена је у табели 6 (Општине и региони у Републици Србији, 2020). Заступљеност категорија пољопривредног земљишта у Топличком округу условљена је природним карактеристикама подручја (конфигурацијом терена, климатским условима, земљишним и водним ресурсима). На равничарском делу слива, који обухвата доњи ток реке Топлице и њених притока, доминира присуство гајњача, док је у приобаљу река присутан алувијални нанос. Ова земљишта погодна су за њивске усеве, уз примену агротехничких мера. У том делу заступљене су ратарска, повртарска и производња крмног биља. На теренима са надморском висином до 350 m умерено стрмог нагиба заступљене су воћарска и виноградарска производња. У горњем току реке карактеристичан је брдско-планински рељеф, где значајне површине заузимају ливаде и пашњаци.

Табела 6. Површина и структура коришћеног пољопривредног земљишта у Топличком округу, према подацима из статистичког годишњака Општине и региони у Републици Србији, 2020.

	Укупна површ.	Број газди-нстава	Коришћено пољоприв. земљиште	Оранице и баште	Воћњаци	Виногради	Ливаде и пашњаци
	(ha)		(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)
Топлички округ	223100	14885	54484	28043	12599	424	12691
Прокупље	75900	5384	18645	7435	5904	155	4899
Блаце	30600	2832	11132	6533	3218	15	1164
Житорађа	21400	3700	12726	10006	1231	252	1043
Куршумлија	95200	2969	11981	4069	2247	3	5586

Заступљеност пољопривредних култура у укупном коришћеном пољопривредном земљишту у округу и по општинама представљена је у табели 7, према подацима из последњег пописа пољопривреде 2012. године (Попис пољопривреде, 2012). Према Попису пољопривреде (2012) укупна површина коришћеног пољопривредног земљишта износила је 51553 ha.

Најзаступљенија категорија земљишта јесу оранице и баште. Посматрано по општинама, ратарска и повртарска производња заузимају процентуално највећи удео у пољопривредном земљишту у Житорађи и Прокупљу, у општинама локализованим у претежно равничарском делу слива повољном за земљорадњу. Најзаступљенија култура је пшеница, на око 17% површине, односно 8555 ha. Кукуруз се гаји на око 15% површина, док је јечам заступљен на око 2% површине. Површине под крмним биљем најзаступљеније су у општини Блаце. Од крмног биља најзначајније су луперка и детелина. Луперка се гаји на 2,2% површина, највише у општинама Прокупље и Блаце, док је детелина заступљена на 2237 ha, односно 4,3% површине, од чега је 32,1 % у Прокупљу. Повртарска производња одвија се на 864 ha, од чега је 80% производње сконцентрисано у општини Житорађа. Од повртарских култура најзаступљеније су бостан и паприка, док се на мањим површинама гаје парадајз, купус, кел, црни и бели лук и остало поврће.

Према подацима из Пописа пољопривреде (2012), воћарска производња у Топличком округу заступљена је на значајном делу површине пољопривредног земљишта од 9829 ha, што чини 6% укупне воћарске производње у Србији. Засади воћа најраспрострањенији су у општини Прокупље, на скоро 45% површине. Од воћарских култура, најзаступљенија је шљива, затим вишња и јабука (10,8%, 5,4%, 1,5%, респективно). Поредећи податке о заступљености воћарских култура по општинама, уочава се да у Прокупљу доминирају засади шљиве, вишње, кајсије и брескве, док је у општини Блаце доминантна заступљеност засада шљиве (34% од укупне површине под засадама шљиве у округу). Засади малине, купине и осталог бобичастог воћа заступљени су на укупно 0,18% површине и сконцентрисани су у највећем проценту на подручју општине Куршумлија.

Ливаде и пашњаци заступљени су углавном на већим надморским висинама, на 27% површине. На нивоу Топличког округа, највеће површине под ливадама и пашњацима су у општини Куршумлија.

Табела 7. Заступљеност пољопривредних култура у укупном коришћеном пољопривредном земљишту у округу и по општинама. Коришћени подаци из Пописа пољопривреде (2012).

Усев/засад	Топлички округ		Блаце		Житорађа		Куршумлија		Прокупље	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Пшеница и крупник	8555	16,6	1724	20,2	2904	33,9	1353	15,8	2574	30,1
Раж	53	0,1	10	18,9	4	7,5	24	45,3	15	28,3
Јечам	1074	2,1	278	25,9	234	21,8	200	18,6	362	33,7
Овас	483	0,9	130	26,9	44	9,1	139	28,8	170	35,2
Кукуруз	7706	14,9	1657	21,5	2539	32,9	1073	13,9	2437	31,6
Остала жита	272	0,5	60	22,1	83	30,5	72	26,5	57	21,0
Грашак	10	0,0	5	50,0	0	0,0	1	10,0	4	40,0
Пасуљ	240	0,5	17	7,1	73	30,4	81	33,8	69	28,8
Ост. махунарке	2	0,0	1	50,0	0	0,0	1	50,0	0	0,0
Кромпир	368	0,7	16	4,3	114	31,0	163	44,3	75	20,4
Дуван	17	0,0	1	5,9	16	94,1	0	0,0	0,0	0,0
Уљана репица	1	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	100,0
Уљана тиква	1	0,0	1	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Сунцокрет	3	0,0	0	0,0	3	100,0	0	0,0	0	0,0
Соја	10	0,0	3	30,0	4	40,0	3	30,0	0,0	0,0
Лековито и ароматично биље	6	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	6	100,0
Ост. инд. биље	2	0,0	0	0,0	2	100,0	0	0,0	0	0,0
Парадајз	45	0,1	2	4,4	28	62,2	7	15,6	8	17,8
Купус и кељ	42	0,1	5	11,9	12	28,6	18	42,9	7	16,7
Паприка	188	0,4	4	2,1	159	84,6	11	5,9	14	7,4
Црни лук	32	0,1	2	6,3	12	37,5	4	12,5	14	43,8
Бели лук	15	0,0	1	6,7	6	40,0	2	13,3	6	40,0
Карфиол	1	0,0	0	0,0	1	100,0	0	0,0	0	0,0
Шаргарепа	2	0,0	0	0,0	0	0,0	1	50,0	1	50,0
Грашак	7	0,0	3	42,9	1	14,3	1	14,3	2	28,6
Ост. свеже поврће	36	0,1	7	19,4	18	50,0	5	13,9	6	16,7
Бостан	448	0,9	1	0,2	446	99,6	0	0,0	1	0,2
Јагоде	49	0,1	14	28,6	10	20,4	23	46,9	2	4,1
Заштићени простор	70	0,1	0	0,0	67	95,7	1	1,4	2	2,9
Меш. Трава	767	1,5	231	30,1	69	9,0	309	40,3	158	20,6
Кукуруз за силажу	595	1,2	457	76,8	7	1,2	30	5,0	101	17,0
Детелина	2237	4,3	482	21,5	347	15,5	690	30,8	718	32,1
Луцерка	1148	2,2	416	36,2	37	3,2	220	19,2	475	41,4
Ост. крмне лег.	220	0,4	191	86,8	8	3,6	4	1,8	17	7,7
Ост. биље које се жање зелено	307	0,6	292	95,1	8	2,6	0	0,0	7	2,3
Ост. коренасто и зељасто	4	0,0	2	50,0	0	0,0	0	0,0	2	50,0
Јабуке	754	1,5	311	41,2	12	1,6	220	29,2	211	28,0
Крушке	218	0,4	78	35,8	6	2,8	83	38,1	51	23,4
Брескве	18	0,0	2	11,1	7	38,9	1	5,6	8	44,4
Кајсије	24	0,0	5	20,8	2	8,3	5	20,8	12	50,0
Вишње	2765	5,4	295	10,7	316	11,4	69	2,5	2085	75,4
Шљиве	5550	10,8	1886	34,0	284	5,1	1331	24,0	2049	36,9

Усев/засад	Топлички округ		Блаце		Житорађа		Куршумлија		Прокупље	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Ораси	132	0,3	36	27,3	6	4,5	49	37,1	41	31,1
Лешници	37	0,1	7	18,9	5	13,5	14	37,8	11	29,7
Малине	60	0,1	7	11,7	0	0,0	44	73,3	9	15,0
Купине	29	0,1	8	27,6	1	3,4	16	55,2	4	13,8
Ост. бобичасто	6	0,0	1	16,7	0	0,0	4	66,7	1	16,7
Виногради	404	0,8	6	1,5	222	55,0	3	0,7	173	42,8

3.3.2 Подаци из климатских и хидролошких пројекција

Анализа утицаја климатских промена на водне ресурсе и обезбеђеност усева и засада водом спроведена у оквиру ове дисертације заснива се на коришћењу резултата климатских и хидролошких пројекција. За израду пројекција примењени су климатски и хидролошки модели. Симулације су рађене за референтни период (1971-2000) и будући период (2021-2100).

Климатолошки подаци

За потребе истраживања коришћени су симулирани дневни подаци о падавинама (P) и температури ваздуха (максимална (Tmax), минимална (Tmin) и средња температура (Tmean)) за четири локације, на којима се налазе одабране метеоролошке станице (Табела 1), за периоде 1971-2000 и 2021-2100. Пројекције климе добијене су применом 7 комбинација GCM-RCM и два RCP сценарија, RCP4.5 и RCP8.5. Како би се добили репрезентативни подаци за цео слив, вредности климатолошких променљивих су пондерисане методом Тисенових полигона.

Вредности PET срачунате су на основу симулираних дневних вредности Tmax и Tmin према једначини (1). Вредности су рачунате за локације четири метеоролошке станице, за сваки модел и за два RCP сценарија, а затим пондерисане методом Тисенових полигона. Резултат симулација климатских модела је скуп од по 14 низова података за сваки параметар за периоде 1971-2000 и 2021-2100.

Дневни подаци о P и Tmean из сваког климатског модела и два RCP сценарија и израчунате дневне вредности PET коришћени су као улазни подаци у хидролошки модел за симулацију протицаја.

На основу вредности P из климатских симулација, одређене су ефективне падавине, које су затим коришћене за прорачун дефицита/суфуцита воде за биљне културе. За прорачун агроклиматских индекса, на основу којих су праћени агроклиматски услови у сливу, коришћени су дневни подаци о Tmax, Tmin и Tmean из климатских пројекција.

Срачунате вредности PET за метеоролошке станице Прокупље и Куршумлија коришћене су за прорачун евапотранспирације културе, у циљу одређивања дефицита/суфуцита воде за биљне културе.

Хидролошки подаци

Стање водних ресурса у сливу реке Топлице у условима климатских промена процењено је коришћењем симулација протицаја (Q) на хидролошкој станици Дољевац и нивоа подземне воде (NPZV) у изабраном репрезентативном пијезометру.

Симулације дневних вредности протицаја у референтном и будућем периоду засноване су на подацима из симулацијама климатолошких величина са четири метеоролошке станице. Како је у HBV-light модел могуће унети податке са само једне метеоролошке станице, за улаз

у модел коришћене су пондерисане вредности Р, Т и РЕТ. Као резултат хидролошких симулација, добијено је 14 низова података за утицај.

Симулиране дневне вредности Q примењене су за оцену утицаја климатских промена на површинске воде до краја 21. века у сливу Топлице.

Добијене дневне симулације Q срачунате су у месечне вредности а затим су даље коришћене као улазни подаци за сумулације нивоа подземних вода (NPZV). Симулације месечних вредности NPZV рађене су за референтни (1971-2000) и будући период (2021-2100), а резултат симулација јесте 14 низова о NPZV у условима климатских промена.

Подаци о Q из хидролошких пројекција примењени су за оцену утицаја климатских промена на површинске воде, а подаци о NPZV за оцену утицаја климатских промена на подземне воде у сливу Топлице до краја 21. века.

Пољопривреда

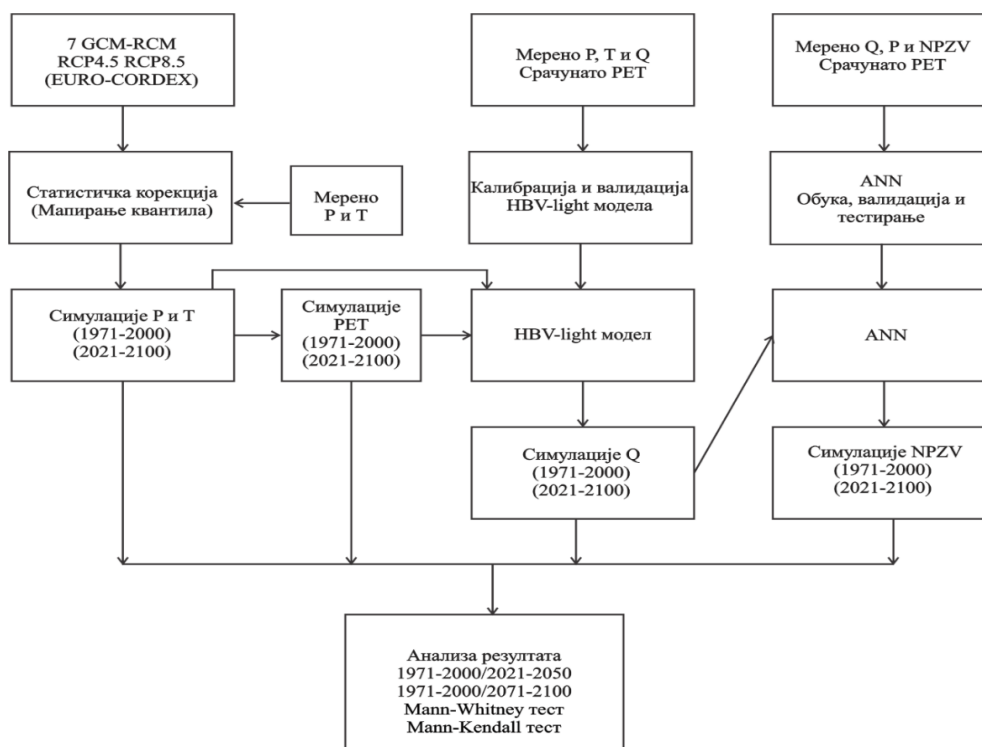
Анализа потреба и обезбеђености усева и засада водом на подручју слива Топлице заснована је на симулацијама Т, Р и срачунатим симулираним вредностима РЕТ за референти (1971-2000) и период блиске (2021-2050) и далеке будућности (2071-2100), за станице Прокупље и Куршумлија. Подаци са станице Прокупље коришћени су за прорачун на подручју општина Прокупље и Житорађа, док су подаци са станице Куршумлија коришћени за прорачун на подручју општина Куршумлија и Блаце. Прорачун је рађен на месечном и вегетационом нивоу.

Процена потреба усева и засада за водом заснива се на прорачунатим вредностима евапотранспирације усева и засада (ЕТс). За прорачун ЕТс коришћене су срачунате симулиране вредности РЕТ, за референтни (1971-2000) и период блиске (2021-2050) и далеке будућности (2071-2100), за станице Прокупље и Куршумлија. За најзаступљеније биљне врсте на подручју слива рачунат је дефицит, односно суфицит воде, који представља разлику између потреба усева и засада за водом и ефективних падавина. Ефективне падавине срачунате су на основу симулација Р за станице Прокупље и Куршумлија, за периоде 1971– 2000, 2021– 2050 и 2071– 2100. године.

Прорачун агроклиматских индекса заснован је на симулацијама Т, за референтни (1971-2000) и будуће периоде (2021-2050 и 2071-2100). Коришћене су симулације Т за станицу Прокупље, како би се оценио утицај на подручју општина Прокупље и Житорађа, и за станицу Куршумлија, како би се оценио утицај на подручју општина Куршумлија и Блаце.

3.4 Методологија

Шематски приказ методологије примењене за процену утицаја климатских промена на водне ресурсе подручја слива Топлице представљен је на слици 12. Ансамбл од 7 комбинација глобалних и регионалних климатских модела (GCM-RCM) коришћен је за симулацију падавина (Р) и температуре (Т) у референтном и будућем периоду. Пројекције Т коришћене су за израчунавање вредности потенцијалне евапотранспирације (РЕТ) у референтном и будућем периоду. Климатске пројекције засноване су на два RCP сценарија, RCP4.5 и RCP8.5. Добијене величине Р и Т и срачунате вредности РЕТ даље су коришћене за израду хидролошких пројекција. Калибрисани хидролошки модел HBV-light коришћен је за симулацију Q, док је за симулацију NPZV примењен обучен и тестиран модел вештачке неуралне мреже (енг. *Artificial Neural Networks*, ANN). Промене су анализиране применом *Mann-Whitney* (MW) и *Mann-Kendall* (МК) тестова.



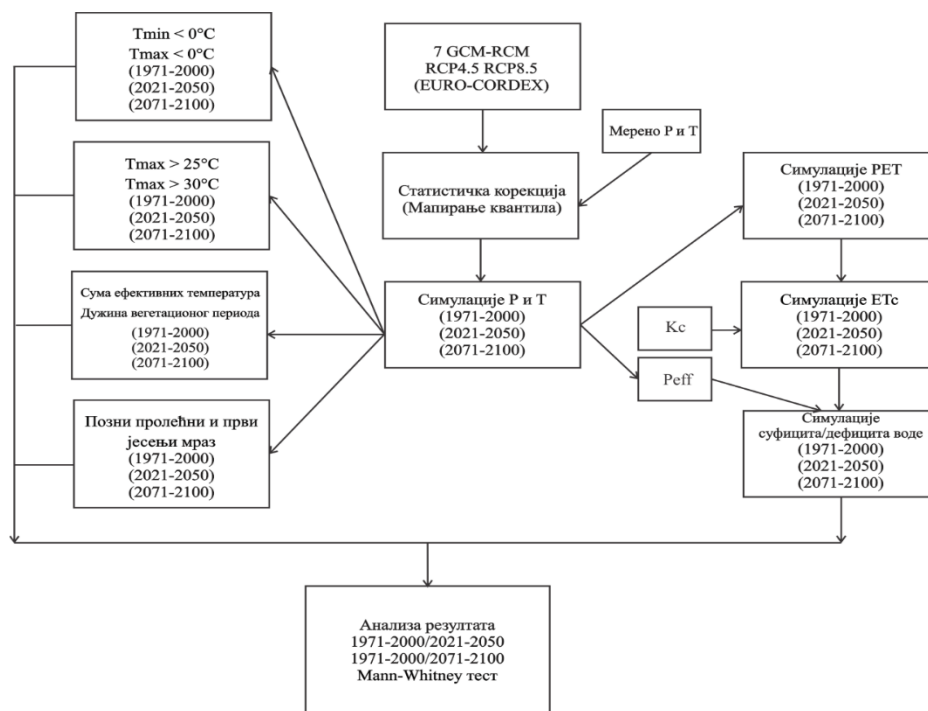
Слика 12. Шематски приказ методологије процене утицаја климатских промена на водне ресурсе подручја слива Топлице.

Процена утицаја климатских промена на обезбеђеност усева и засада водом на подручју слива Топлице заснована је на вредностима P и T, добијених применом 7 комбинација GCM-RCM и два RCP сценарија (Слика 13). На основу симулиране T срачанате су вредности PET у референтном и будућем периоду. Као производ коефицијента културе (K_c) и PET добијене су вредности потребе усева и засада за водом, изражене кроз евапотранспирацију усева и засада (ETc). Обезбеђеност усева и засада водом одређена је на основу дефицита, односно суфицита воде за најзаступљеније културе на подручју слива. Дефицит, односно суфицит воде рачунат је као разлика ETc и ефективних падавина (P_{eff}).

Обезбеђеност усева и засада водом услед климатских промена праћена је поређењем срачанатих вредности ETc и дефицита, односно суфицита воде у периоду блиске (2021-2050) и далеке будућности (2071-2100) са срачанатим вредностима у референтном периоду (1971-2000).

Процена агроклиматских услова на анализираном подручју у референтном и будућем периоду извршена је праћењем вредности агроклиматских индекса:

- Просечан датум појаве позног пролећног мраза;
- Просечан датум појаве раног јесењег мраза;
- Просечан број мразних дана ($T_{min} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$);
- Просечан број ледених дана ($T_{max} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$);
- Просечан број летњих дана ($T_{max} > 25 \text{ } ^\circ\text{C}$);
- Просечан број тропских дана ($T_{max} > 30 \text{ } ^\circ\text{C}$);
- Сума ефективних температура (GDD);
- Дужина вегетационе сезоне.



Слика 13. Шематски приказ методологије процене утицаја климатских промена на обезбеђеност усева и засада водом на подручја слива Топлице.

3.5 Модели коришћени у истраживањима

3.5.1 Климатски модели

Проучавање утицаја климатских промена на регионалном или локалном нивоу захтева климатске пројекције високе просторне резолуције. Глобални климатски модели (GCM) основни су алат за добијање климатских пројекција у условима климатских промена у зависности од задатих емисионих сценарија. Климатске пројекције добијене GCM пружају задовољавајућу информацију о стању и промени климе на глобалном нивоу (Gebrechorkos et al., 2019). Међутим, за израду студија на регионалном и локалном нивоу резолуција тренутно доступних GCM је груба и не пружа довољно детаљну информацију о просторним карактеристима (Gebrechorkos et al., 2019). Да би се превазишла ограничења GCM у смислу просторне резолуције примењују се технике регионализације (енг. *downscaling*). Поступком регионализације преводи се информација из GCM о промени климатских варијабли са глобалног на регионални, односно локални ниво. Климатске варијабле на глобалном нивоу у овом случају називају се предиктори (енг. *predictors*), а на регионалном предиктанти (енг. *predictands*) (Gebrechorkos et al., 2019). Резултат су климатске пројекције финије просторне резолуције које се могу применити у студијама утицаја климатских промена на испитivanoј локацији (нпр. слив) (Navarro-Racines et al., 2020). Метода динамичке регионализације (енг. *dynamical downscaling*) користи регионалне климатске моделе (RCM) и излазну информацију из GCM као гранични услов за добијање финије резолуције климатских пројекција (Navarro-Racines et al., 2020). Са друге стране, метода статистичке регионализације (енг. *statistical downscaling*) спроводи се проналажењем статистичке везе између климатских варијабли на глобалном (предиктори) и локалном нивоу (предиктанти).

Ансамбл регионалних климатских модела хоризонталних резолуција од 50 km (EUR-44) и 12,5 km (EUR-11) направљен је за Европу у оквиру пројекта *World Climate Research Program Coordinated Regional Downscaling Experiment* (EURO-CORDEX) (<http://www.euro-cordex.net/>). Пројекат EURO-CORDEX је окупио на једном месту симулације RCM, које су

настале регионализацијом пројекција GCM из пројекта *Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5* (CMIP5) (Jacob et al., 2014). Климатске пројекције засноване су на RCP сценаријима, коришћеним од стране IPCC-а у AR5 (IPCC, 2013). Коришћени RCP сценарији претпостављају различит интензитет радијационог форсирања до краја 21. века.

Симулације падавина и температуре за изабране четири локације на којима су метеоролошке станице (Слика 9) добијене су коришћењем резултата 7 комбинација глобалних и регионалних климатских модела из EURO-CORDEX пројекта, хоризонталне резолуције 12,5 km (Табела 8). Резултати се односе на дневне вредности P, Tmax, Tmin и Tmean у периоду 1971-2000 и 2021-2100.

Табела 8. Листа коришћених комбинација глобалних (GCM) и регионалних (RCM) климатских модела.

	GCM	RCM
1	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CCLM4-8-17
2	ICHEC-EC-EARTH	CCLM4-8-17
3	MOHC-HadGEM2-ES.rcp8.5	CCLM4-8-17
4	MPI-M-MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17
5	MOHC-HadGEM2-ES	RACMO22E
6	MPI-M-MPI-ESM-LR	REMO2009
7	MPI-M-MPI-ESM-LR	REMO2009

У овом истраживању примењен је вишемоделски ансамбл приступ (енг. *multi-model ensemble*), односно коришћен је скуп резултата више климатских модела за потребе једног експеримента (Parker, 2013; Ђурђевић и Тошић, 2017). Вишемоделски приступ примењен је како би се уравнотежили различити концепти нумеричких модела, чиме се смањује удео укупне грешке у резултатима и добијају се поузданије пројекције у односу на приступ коришћења једног модела (Seiller et al., 2012; Zhang et al., 2021). Структура и начин решавања физичких једначина у климатским моделима један је од узрока неизвесности у климатским пројекцијама. Применом ансамбла од 7 комбинација GCM-RCM могуће је проценити неизвесности у климатским пројекцијама настале услед структуре климатских модела (Parker, 2013). Приступ коришћења вишемоделског ансамбла климатских симулација коришћен је у многим студијама (Refsgaard et al., 2016; Reshmidevi et al., 2018; Shen et al., 2018).

Дневне вредности климатских величине (P, Tmax, Tmin и Tmean) добијене помоћу 7 комбинација GCM-RCM, статистички су кориговане методом мапирања квантила, што је стандардан метод за уклањање системске грешке (енг. *bias*), коју у мањој или већој мери имају сви нумерички модели. Први корак статистичке корекције подразумева израчунавање одговарајуће кумулативне функције расподеле (енг. *Cumulative distribution functions, CDF*) за временске серије дневних осмотрених и моделираних климатских величина за сваки месец у години. Кумулативне функције расподеле осмотрених дневних климатских величина са четири изабране станице поређене су са кумулативним функцијама расподеле резултата модела у тачкама најближим овим станицама за референтни период 1971-2000. Поређење је рађено под претпоставком да дневни подаци о температури имају нормалну, односно Гаусову расподелу (енг. *Gaussian distribution*) (Dettinger et al., 2004), а подаци о падавинама (без сувих дана) двопараметарску гама расподелу (Piani et al., 2010). Корекција броја сувих дана извршена је посебно, изједначавањем броја мерених и пројектованих сувих дана (Wood et al., 2004). Уколико модел пројектује већи број сувих дана у односу на мерени број, случајно одабрани дани су преведени у дане са минималном количином падавина. Ако је модел пројектовао мањи број сувих дана од мереног броја, случајно изабрани дани са малом количином падавина вештачки су преведени у суве. На основу разлике у кумулативним функцијама расподеле установљене су корекционе функције за сваки климатски параметар,

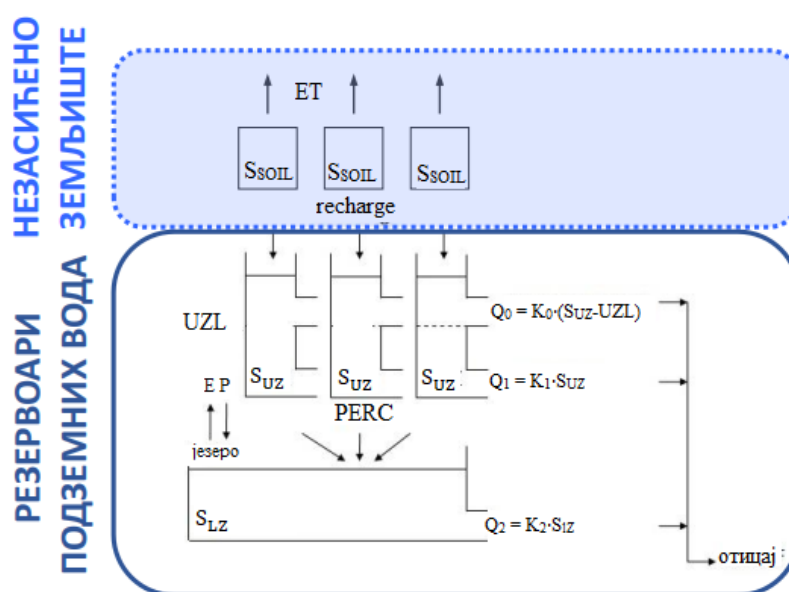
сваки модел, сваки месец и сваку локацију. Корекционе функције примењене су за корекцију резултата модела за референтни и будући период.

3.5.2 HBV-light модел

Опис хидролошког модела

Симулација отицаја са слива, тј. протицаја (Q) код мерног места Дољевац, добијена је коришћењем калибрисаног HBV-light модела (Seibert и Vis, 2012). Хидролошки HBV-light модел заснован је на концептуалном HBV моделу (Bergström, 1976) и коришћен је у многим студијама утицаја климатских промена (Seiller et al., 2012; Langsholt et al., 2013; Etter et al., 2017; Bhattarai et al., 2018).

HBV-light модел је семи-дистрибутивни хидролошки модел. Симулирање хидролошких величина моделом врши се континуално, са дужином рачунског корака од најчешће једног дана, иако модел дозвољава и друге временске кораке (Seibert и Vis, 2012). Структуру модела чине четири рачунска модула: модул за снег, модул за незасићено земљиште, модул за подземне воде и модул за трансформацију отицаја (Тодоровић и Плавшић, 2015). У моделу је могуће одабрати неку од алтернативних структура, при чему се може одабрати број резервоара подземних вода, као и начин решавања једначина у модулима (обједињено за цео слив или посебно за сваку елевациону/вегетациону зону) (Seibert и Vis, 2012). Seibert и Vis (2012) су дали детаљни преглед структуре и једначина модела. У овом раду коришћен је модел са два резервоара подземних вода (Слика 14).



$S_{SOIL}(t)$ – стање влаге у резервоару незасићеног земљишта у тренутку t (mm); ET – евапорација из земљишта ($mm \cdot \Delta t^{-1}$); recharge – перколација из резервоара незасићеног земљишта у резервоар подземних вода ($mm \cdot \Delta t^{-1}$); S_{LZ} – количина воде у доњем резервоару подземних вода (mm); S_{UZ} – количина воде у горњем резервоару подземних вода (mm); UZL – праг (mm); $PERC$ – максимална перколација из горњег у доњи резервоар подземних вода ($mm \cdot \Delta t^{-1}$); Q_i – истицање из резервоара ($mm \cdot \Delta t^{-1}$); K_i – Коefицијент линеарног резервоара ($mm \cdot \Delta t^{-1}$); E – евапорација са водених површина (језера) ($mm \cdot \Delta t^{-1}$); P – падавине на водене површине ($mm \cdot \Delta t^{-1}$).

Слика 14. Структура HBV-light модела (Модификовано према извору: Тодоровић и Плавшић, 2015).

У зависности од температуре ваздуха, модел класификује падавине на кишу и снег. При температурама ваздуха мањим од задате граничне вредности, односно параметра T_T ($^{\circ}C$) (Табела 10), падавине се сматрају снегом и чине улаз у резервоар за снег. У модулу за снег,

акумулација и топљење снега рачуна се методом степен-дан (параметар CFMAX ($\text{mm} \cdot \text{дан}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), Једначина (2)). Процес топљења и поновног замрзавања снега условљен је температуром. Температура топљења снега једнака је граничној температури (ТТ), при чему се део отопљеног снега задржава у снежном покривачу. При температури мањој од ТТ количина воде која се поново замрзава рачуна се преко параметра CFR (–) (Табела 10), према једначини (3). Грешке у мереним снежним падавинама и немогућност модела да симулира испаравање из снежног покривача коригују се преко корекционог фактора за снежне падавине, параметар SCF (–) (Табела 10).

$$M = CFMAX \cdot (T(t) - TT) \quad (2)$$

Где је: М – количина отопљеног снега ($\text{mm} \cdot \text{Дт}^{-1}$); CFMAX – степен-дан фактор фактор ($\text{mm} \cdot \text{дан}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); Т(t) – одступање температуре ваздуха у одређеном временском кораку од вишегодишње средње температуре ваздуха (Tmean); ТТ – температурни праг ($^\circ\text{C}$); t – временски корак.

$$R = CFR \cdot CFMAX \cdot (TT - T(t)) \quad (3)$$

Где је: R – количина поново замрзнуте воде при температурама мањим од ТТ ($\text{mm} \cdot \text{Дт}^{-1}$); CFR – коефицијент поновног замрзавања.

Модел симулира укупну влагу у земљишту тако што обједињује симулације влаге у незасићеној зони земљишта и у резервоарима подземних вода. У модулу за незасићено земљиште симулира се влага у незасићеној зони земљишта. Улаз у резервоар незасићене зоне земљишта чине падавине и отопљени снег, а излаз евапотранспирација и перколација у горњи резервоар подземних вода (енг. *recharge*). Количина влаге у земљишту ограничена је максималном вредношћу параметра FC (mm) (Табела 10). Симулација влаге у незасићеној зони земљишта детерминисана је и параметрима LP (–) (Табела 10), чија вредност представља границу изнад које актуелна евапорација достиже потенцијалну и параметром ВЕТА (–) (Табела 10) који одређује релативни допринос кише и отопљеног снега отицају (Једначина (4) и (5)).

$$\frac{F(t)}{I(t)} = \left(\frac{S_{SOIL}(t)}{FC} \right)^{BETA} \quad (4)$$

Где је: I(t) – количина воде пореклом од падавина и отопљеног снега у одређеном временском кораку ($\text{mm} \cdot \text{Дт}^{-1}$); F(t) – перколација из резервоара незасићеног земљишта у резервоар подземних вода у одређеном временском кораку ($\text{mm} \cdot \text{Дт}^{-1}$); S_{SOIL}(t) – стање влаге у резервоару незасићеног земљишта у одређеном временском кораку (mm); FC – параметар за одређивање максималне количине влаге у резервоару за земљиште (mm); ВЕТА – коефицијент облика.

$$E_{act} = E_{pot} \cdot \min \left(\frac{S_{SOIL}(t)}{FC \cdot LP}, 1 \right) \quad (5)$$

Где је: E_{act} – актуелна евапорација ($\text{mm} \cdot \text{Дт}^{-1}$); E_{pot} – потенцијална евапорација ($\text{mm} \cdot \text{Дт}^{-1}$); LP – праг за редуковање евапорације.

Из резервоара подземних вода постоје два истицања из горњег резервоара (Q_0 и Q_1 , $\text{mm} \cdot \text{дан}^{-1}$) и истицање из доњег резервоара (Q_2 , $\text{mm} \cdot \text{дан}^{-1}$). Улаз у горњи резервоар представља перколација из незасићене зоне земљишта. Истицање из горњег резервоара Q_0 је условљено граничном вредности параметра UZL (mm) (Табела 10) и до њега долази само када су вредности воденог талога у резервоару веће од граничне вредности UZL . Сваки од резервоара карактеришу одговарајући коефицијенти са односом $K_0 > K_1 > K_2$ (дан^{-1}) (Табела 10). Збир отицаја из резервоара чини укупни отицај са слива (Једначина (6)). У модулу за трансформацију отицаја такав отицај се даље трансформише на основу троугаоне функције време-површина, дефинисане параметром $MAXBAS$ (дан) који утиче на висину пикова поплавног таласа (Једначина (7)). Резултат примене ове функције је боље слагање симулираног са осмотреним отицајем са слива (Тодоровић и Плавшић, 2015).

$$Q_{GW}(t) = K_2 \cdot S_{LZ} + K_1 \cdot S_{UZ} + K_0 \cdot \max(S_{UZ} - UZL, 0) \quad (6)$$

Где је: $Q_{GW}(t)$ – отицај из резервоара подземних вода ($\text{mm} \cdot \Delta t^{-1}$); K_0 – регресиони коефицијент за горњи резервоар подземних вода (дан^{-1}); K_1 – регресиони коефицијент за горњи резервоар подземних вода (дан^{-1}); K_2 – регресиони коефицијент за доњи резервоар подземних вода (дан^{-1}); S_{LZ} – количина воде у доњем резервоару подземних вода (mm); S_{UZ} – количина воде у горњем резервоару подземних вода (mm); UZL – праг (mm).

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i=1}^{MAXBAS} c(i) \cdot Q_{GW}(t - i + 1) \quad (7)$$

Где је: $Q_{sim}(t)$ – симулирани отицај са слива у одређеном временском кораку ($\text{mm} \cdot \text{дан}^{-1}$); $MAXBAS$ – коефицијент за трансформацију отицаја (дан); $c(i)$ – рачуна се по једначини (8):

$$c(i) = \int_{i-1}^i \frac{2}{MAXBAS} - \left| u - \frac{MAXBAS}{2} \right| \frac{4}{MAXBAS^2} du \quad (8)$$

При симулацији стања резервоара снега и влаге у незасићеној зони земљишта модел узима у обзир просторну варијабилност. Модел симулира стање у овим резервоарима независно за сваку висинску зону. Падавине и температура се коригују према надморској висини, те свака висинска зона има своје улазне податке, док су параметри модела исти за све зоне.

Улазни подаци

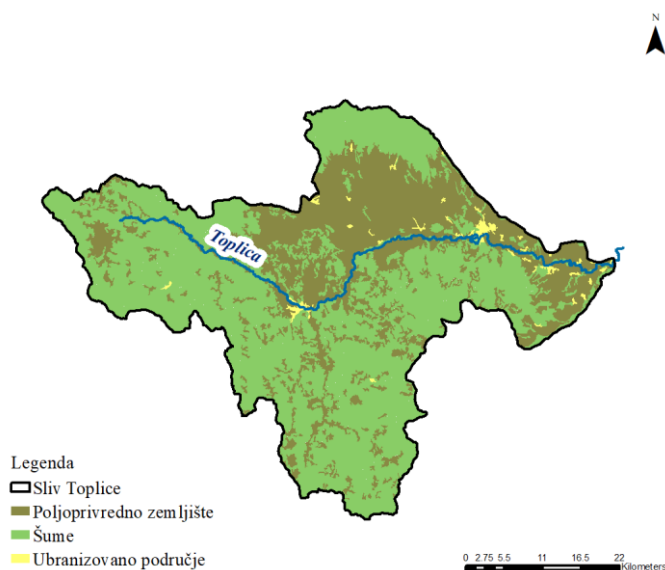
НВV-light модел захтева улазне податке о дневним падавинама, дневним средњим температурама ваздуха, потенцијалној евапотранспирацији и протоцима израженим у $\text{mm} \cdot \text{дан}^{-1}$. У модел је могуће унети дневне вредности PET , као и вишегодишње просечне месечне и вишегодишње просечне дневне вредности. Климатолошки подаци (P , T и PET) са четири метеоролошке станице просторно су осредњени методом Тисенових полигона, јер модел дозвољава унос само једног сета података. Улазни подаци о падавинама и температури просторно се дистрибуирају у односу на висинске зоне преко параметара $PCALT$ и $TCALT$. Са порастом надморске висине модел коригује суме дневних падавина и средњу дневну температуру, тако што их линеарно повећава ($PCALT$, $\% \cdot 100 \cdot \text{m}^{-1}$;) и линеарно смањује ($TCALT$, $^{\circ}\text{C} \cdot 100 \cdot \text{m}^{-1}$), респективно. Потенцијална евапотранспирација рачуната је модификованом *Hargreaves* методом (Једначина (1)), на основу вредности T .

Улазни подаци о просторној варијабилности слива (број елевационих зона у зависности од надморске висине, број зона у којима је заступљена одређена врста вегетационог покривача и њихова процентуална заступљеност у свакој елевационој зони) добијени су обрадом сателитских снимака у софтверском програму ArcGIS (Табела 9).

Табела 9: Површина елевационих зона у сливу Топлице и површина вегетационих зона у оквиру одређене елевационе зоне.

Елевационе зоне (mm)	Елевационе зоне (km ²)	Вегетационе зоне (km ²)	
		Пољопривредно земљиште	Шуме
<400	430,21	350,61	79,77
400-500	267,91	151,15	116,31
500-600	303,43	95,71	207,84
600-700	234,89	32,71	202,28
700-800	233,95	21,95	212,09
800-900	198,24	26,86	171,23
900-1000	165,14	20,73	144,25
1000-1100	100,35	9,66	90,73
1100-1200	60,05	4,92	55,15
>1200	57,86	1,82	56,07
Укупна површина слива: 2052 km ²			

За добијање података о елевационим зонама коришћени су сателитски снимци са сајта Геолошког топографског института Сједињених Америчких Држава (енг. *United States Geological Survey, USGS*). Вегетационе зоне одређене су на основу базе сателитских снимака са сајта Copernicus Land Monitoring Service (CORINE). Слив је моделиран на бази 10 елевационих, са по две вегетационе зоне (пољопривредно земљиште и шуме). Укупан проценат урбанизованог земљишта у сливу износи око 1% (Слика 15).



Слика 15: Категорије коришћеног земљишта у сливу Топлице.

Све хидролошке симулације рађене су за хидролошку годину (1. октобар – 30. септембар), а свакој симулацији претходи период „загревања“ (енг. *warm-up* период). Симулације протицаја рађене су до профила Дољевац.

Калибрација модела

НВV-light модел је калибрисан у односу на дневна мерења протицаја на хидролошкој станици Дољевац, користећи пондерисане податке о средњој дневној температури, падавинама и срачунатој РЕТ са четири метеоролошке станице (Слика 9).

Калибрацијом модела генерише се оптимални сет параметара који омогућавају најбоље могуће слагање симулираних и осмотрених вредности протицаја у одговарајућем сливу. Иницијални интервали вредности параметра усвојени у овом раду преузети су од Todorovic и Plavsic (2016), из истраживања спроведеног за подручје наше земље (Табела 10).

Табела 10: Параметри модела и иницијални интервали вредности (Todorovic и Plavsic, 2016).

Параметар	Објашњење	Мин. вредност	Макс. вредност	Јединице
Модул за снег				
TT	Температурни праг	-2,5	2,5	°C
CFMAX	Степен-дан фактор	0,1	10	mm·дан ⁻¹ ·°C ⁻¹
SCF	Корекциони фактор за снег	0,5	1,5	-
CWH	Капацитет задржавања воде у снегу	0,01	0,2	-
CFR	Коефицијент поновног замрзавања	0	0,1	-
Модул за земљиште				
FC	Максимална количина влаге у резервоару за земљиште	5	650	mm
LP	Праг за редуковање евапорације	0	1	-
BETA	Коефицијент облика	1	15	-
PERC	Максимално отицање из горњих у доњи резервоаре	0	10	mm·дан ⁻¹
Модул за подземне воде				
UZL	Праг	0	200	mm
K ₀	Регресиони коефицијент за горњи резервоар подземних вода	0,25	0,99	дан ⁻¹
K ₁	Регресиони коефицијент за горњи резервоар подземних вода	0,2	0,99	дан ⁻¹
K ₂	Регресиони коефицијент за доњи резервоар подземних вода	5·10 ⁻⁵	0,1	дан ⁻¹
MAXBAS	Трансформација отицаја	1	10	дан

Калибрација модела рађена је применом GAD алгоритма (енг. *Genetic Algorithm and Powell's method*), који садржи генетички алгоритам за регионалну оптимизацију и алгоритам за локалну оптимизацију региона (енг. *Powell's method*) (Seibert, 2000). Модел је калибрисан према композитној критеријумској функцији (OF), која укључује *Nash-Sutcliffe* коефицијент ефикасности (NSE), (Nash и Sutcliffe, 1970) (Једначина (9)), NSE срачунат на основу логаритмованих протока (NSE_{logQ}) (Једначина (10)) и волуметријске грешке (VE) (Criss и Winston, 2008) (Једначина (11)), срачунатих према једначинама:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_i (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs,i}})^2} \quad (9)$$

$$NSE_{logQ} = 1 - \frac{\sum_i (\ln Q_{obs,i} - \ln Q_{sim,i})^2}{\sum_i (\ln Q_{obs,i} - \ln \overline{Q_{obs,i}})^2} \quad (10)$$

$$VE = 1 - \frac{\sum_i |Q_{obs,i} - Q_{sim,i}|}{\sum_i Q_{obs,i}} \quad (11)$$

Где је: Q_{obs} – осмотрени протицај ($\text{mm} \cdot \text{дан}^{-1}$); Q_{sim} – симулирани протицај ($\text{mm} \cdot \text{дан}^{-1}$); $\overline{Q_{obs}}$ – просечни Q_{obs} ($\text{mm} \cdot \text{дан}^{-1}$) и i – временски корак (дан).

Композитна критеријумска функција (OF) (Kim и De Weck, 2006) дата је изразом:

$$OF = w_{NSE} \cdot NSE + w_{NSE_{logQ}} \cdot NSE_{logQ} + w_{VE} \cdot VE \quad (12)$$

Где је: NSE је Nash-Sutcliffe коефицијент ефикасности, NSE_{logQ} означава NSE срачунат на основу логаритмованих протока, VE је волуметријска грешка и w_{NSE} , $w_{NSE_{logQ}}$ и w_{VE} су тежине додељене NSE, NSE_{logQ} и VE, респективно.

NSE указује на слагање осмотрених и симулираних протока великих вода, слагање у домену малих вода одражава вредност NSE_{logQ} (Oudin et al., 2006), док VE одражава слагање у запремини између осмотреног и симулираног протицаја (Criss и Winston, 2008). Критеријумима ефикасности (Једначина (12)), додељене су исте тежине за велике и мале воде тако да модел, услед неизвесности климатских промена, може симулирати подједнако протицаје великих и малих вода. NSE коефицијенту дата је тежина 0,4, NSE_{logQ} тежина 0,4, а VE 0,2.

Период калибрације је изабран анализом климатских услова у периоду 1961-2010. година. Методом покретног просека (енг. *moving average*) одређени су низови узастопних просечно влажних година, на основу којих је урађена калибрација.

Валидација модела рађена је применом *Differential split-sample* теста (DSS-тест) (Klemeš, 1986). Форма теста састоји се у томе да се валидација модела изврши у периоду кога карактеришу климатски услови значајно различити од услова у калибрационом периоду. Периоди валидације одабрани су методом покретног просека из временске серије података 1961-2010, тако да репрезентују влажне, суве, топле и хладне климатске услове. Периоди валидације се не преклапају са периодима калибрације.

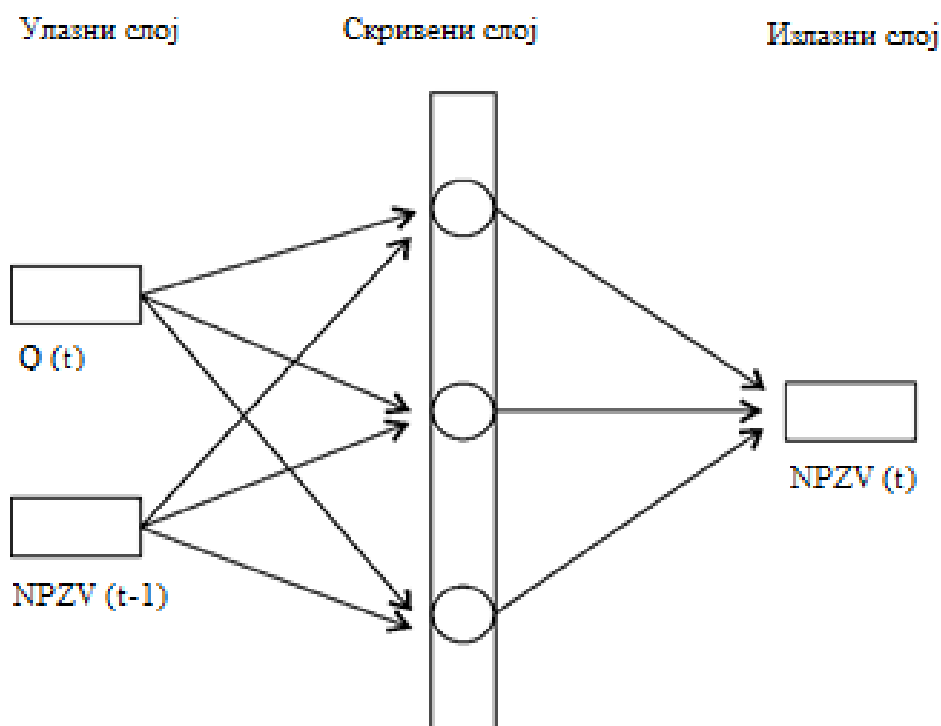
3.5.3 Вештачке неуралне мреже (*Artificial Neural Networks, ANN*)

Моделирање нивоа подземних вода један месец унапред урађено је применом *soft computing* технике вештачке неуралне мреже (енг. *Artificial Neural Networks, ANN*). За потребе истраживања формирана је вишеслојна неповратна (енг. *feedforward*) мрежа са једним скривеним слојем која показује добре резултате у прогнозирању нивоа подземних вода (Coulibaly et al., 2000; Bowden et al., 2005; Rakhshandehroo et al., 2012; Kumar et al., 2016). Код неповратних мрежа, сигнал се простире унапред, односно излазна информација из виших слојева се не враћа у ниже слојеве.

Архитектуру ANN чини више чворова организованих у слојеве. Структура мреже одређена је степеном нелинеарности процеса за који се мрежа примењује. За одређивање оптималне структуре најчешће се примењује метод покушаја и грешке (енг. *trial and error*), при чему се креће од најједноставније структуре која се усложњава док се не добију

задовољавајући резултати перформансе мреже (Кнежевић, 2020). У овом истраживању коришћена је ANN мрежа коју чине улазни, излазни и један скривени слој (енг. *hidden layer*) (Слика 16). Функција улазног слоја јесте да прими информацију и пренесе је на следећи, скривени слој. Излаз мреже се генерише из излазног слоја. Структура мреже са једним скривеним слојем најчешће се среће у литератури (Coulibaly et al., 2000; Daliakopoulos et al., 2005; Behzad et al., 2010; Maheswaran и Khosa, 2013). Чворови из једног слоја повезани су са чворовима из следећег слоја, али не и у оквиру истог слоја.

Методом покушаја и грешке дефинисан је број чворова у скривеном слоју. Као критеријум квалитета структуре мреже коришћена је средња квадратна грешка (енг. *mean squared error*, MSE). Мрежа је тестирана за број чворова од 3 до 6, при чему је за сваку варијанту рачуната MSE. Са повећавањем броја чворова у скривеном слоју вредности MSE су се незнатно поправљале, односно смањивале, док су се структуре мреже и број параметара које треба подесити значајно повећавали. Као компромисно решење између моделирања и комплексности обуке мреже одабрано је да скривени слој чине три чвора. У доступној литератури такође се сугерише структура мреже са три чвора у скривеном слоју (Coulibaly et al., 2001; Daliakopoulos et al., 2005; Tsanis et al., 2008; Djurovic et al., 2015).



Слика 16: Структура ANN мреже.

Коришћењем ANN моделирана је зависност NPZV на равничарском делу слива од протицаја воде у реци Топлица. За избор пијезометра коришћен је критеријум о јачини међусобне везе мерених података у постојећим пијезометрима, као и доступност мерених података. Примењена је корелациона анализа на нивоу значајности $p=0,01$.

Приликом одређивања улазних варијабли кренуло се од априорних знања о физичким процесима који се моделирају. Аналитичке технике као што су крос корелациона и аутокорелациона анализа, којима се може утврдити линеарна веза између променљивих које се разматрају, коришћене су у радовима (Bowden et al., 2005; Kumar et al., 2016). Корелациона

анализа примењена је и у овом истраживању. У разматрање међусобних веза узете су физичке величине за које се искуствено претпоставило да могу имати утицаја на ниво подземне воде и доступне су њихове пројекције у будућности: NPZV у претходном периоду, Q реке Топлице, P, PET и T ваздуха. Све величине су на месечном нивоу, за период јул 1988 – децембар 2016. године, што чини серију од 342 података.

Излазни слој има само једну варијаблу – месечна вредност нивоа подземне воде на посматраном пијезометру.

Методом покушаја и грешке показало се да је најбоља активациона функција за скривени слој тангенс хиперболична сигмоидална функција, *tansig*, а за излазни линеарна активациона функција, *purelin*.

За обуку ANN коришћен је *Levenberg-Marquardt* (LM) метод пропагације грешке уназад (Јћа и Sahoo, 2015; Wunsch et al., 2018). Завршетак обуке условљавао је један од следећа три услова: максималан број итерација (усвојено 1000), праг грешке предвиђања (усвојен 0,01) и промена MSE критеријума за валидациони тест. Обука мреже вршена је у итерацијама, односно епохама, при чему је у свакој епохи рачуната MSE. Уколико је у 6 узастопних епоха MSE критеријум растао заустављала се даља обука. Овај критеријум је усвојен како би се спречила претренираност ANN (енг. *data over fitting*). Овако припремљен ANN модел је примењен за симулацију нивоа подземних вода, у референтном (1971-2000) и будућем периоду (2021-2100), коришћењем вредности Q добијених из хидролошких пројекција (HBV-light моделом) на основу вредности P, Tmean и PET из климатских симулација.

3.6 Процена утицаја климатских промена на обезбеђеност усева и засада водом

Подаци о заступљености биљних усева и засада на подручју слива Топлице преузети су из статистичког годишњака Попис пољопривреде (2012). Публикација Попис пољопривреде (2012) садржи податке из последње урађеног пописа пољопривреде у Републици Србији. За сваку општину одабрано је по 10 процентуално најзаступљенијих култура (Табела 11).

Табела 11: Најзаступљеније културе на подручју слива Топлице, по општинама. Коришћени подаци из Пописа пољопривреде (2012).

Култура	Заступљеност		Култура	Заступљеност	
	ha	%*		ha	%*
Прокупље			Житорађа		
Пшеница	2574	30,1	Пшеница	2904	33,9
Јечам	362	33,7	Кукуруз	2539	32,9
Кукуруз	2437	31,6	Детелина	347	15,5
Кромпир	75	20,4	Вишње	316	11,4
Детелина	718	32,1	Шљиве	284	5,1
Луцерка	475	41,4	Виногради	222	55,0
Јабуре	211	28,0	Пасуљ	73	30,4
Вишње	2085	75,4	Паприка	159	84,6
Шљиве	2049	36,9	Парадајз	28	62,6
Винова лоза	173	42,8	Бостан	446	99,6
Куршумлија			Блаце		
Пшеница	1353	15,8	Пшеница	1724	20,2
Јечам	200	18,6	Јечам	278	25,9
Кукуруз	1073	13,9	Кукуруз	1657	21,5

Култура	Заступљеност		Култура	Заступљеност	
	ha	%*		ha	%*
Кромпир	163	44,3	Кромпир	16	4,3
Детелина	690	30,8	Детелина	482	21,5
Луцерка	220	19,2	Луцерка	416	36,2
Јабуре	220	29,2	Јабуре	311	41,2
Шљиве	1331	24,0	Шљиве	1886	34,0
Малине	44	73,3	Вишње	295	10,7
Пасуљ	81	33,8	Пасуљ	17	7,1

*Процентуална заступљеност културе у општини у односу на заступљеност културе у округу.

Услед сличних климатских услова и карактеристика рељефа у општинама Прокупље и Житорађа, односно у општинама Куршумлија и Блаце, прорачун потреба и обезбеђености усева и засада за водом рачунат је за груписану сетвену структуру на основу климатских података (Р и срачуната РЕТ на основу симулираних Т) за општине Прокупље и Житорађа са станице Прокупље и за општине Куршумлија и Блаце са станице Куршумлија.

Прорачун потреба и обезбеђености усева и засада за водом рачунат је под претпоставком: (а) да се сетвена структура и датум сетве у будућности неће мењати и (б) да се остале климатске варијабле неће мењати.

3.6.1 Потребне усева и засада за водом

Потребне усева и засада за водом изражене су преко евапотранспирације културе (ЕТс). Евапотранспирација културе (ЕТс) у стандардним условима дефинише се као евапотраспирација културе оптималне густине сетве, обезбеђене водом и хранивима, без присуства корова, штеточина и болести, која у датим климатским условима постиже пун генетички потенцијал (Allen et al., 1998). Према Pereira и Alves (2013), сума ЕТс за цео вегетациони период означава потребе дате културе за водом. Рачуна се као производ потенцијалне евапотранспирације (РЕТ) која одражава климатске карактеристике подручја и коефицијента културе (кс), који одражава карактеристике усева (Једначина (13)):

$$ET_c = PET \cdot k_c \quad (13)$$

Где је: кс коефицијент културе, а РЕТ потенцијална евапотранспирација (mm). Вредности РЕТ срачунате су модификованом *Hargreaves* методом на основу симулираних вредности температуре ваздуха за станице Прокупље и Куршумлија, према једначини (1).

За прорачун ЕТс потребно је одредити вредности коефицијента културе за сваки усев и засад. За одређивање коефицијента културе примењена је методологија описана у публикацији FAO *Irrigation and drainage paper 56* (Allen et al., 1998).

Први корак у одређивању коефицијента културе јесте утврђивање трајања периода вегетације и фенофаза развића сваког усева/засада. Посматране су четири фазе развића биљака:

1. Иницијална фаза (фаза ницања, клијања и формирања 3-4 листа);
2. Фаза интезивног пораста;
3. Фаза цветања и плодношења;
4. Фаза сазревања.

Индикације трајања појединих фенофаза и периода вегетације и типичне вредности k_c за стандардне климатске услове најзаступљенијих усева и засада у сетвеној структури подручја слива Топлице усвојени су из FAO *Irrigation and drainage paper* 56 (Allen et al., 1998). Под стандардним климатским условима подразумева се да минимална релативна влажност ваздуха (RH_{\min}) износи 45% и просечна брзина ветра мерено на 2 m висине (u_2) износи $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Вредности k_c у стандардним климатским условима за најзаступљеније културе у сетвеној структури подручја слива Топлице дате су у табели 12 (Allen et al., 1998).

Табела 12: Вредности k_c у стандардним климатским условима.

Култура	$k_{c(I)}$	$k_{c(III)}$	$k_{c(IV)}$	Висина
				усева (m)
Пшеница	0,3	1,15	0,25	1,0
Јечам	0,3	1,15	0,25	1,0
Кукуруз	0,3	1,20	0,35	2,0
Кромпир	0,5	1,15	0,75	0,6
Детелина	0,4	0,90	0,85	0,6
Луцерка	0,4	0,95	0,90	0,7
Јабукe	0,5	1,20	0,95	4,0
Вишње	0,5	1,20	0,95	4,0
Шљиве	0,5	1,15	0,90	3,0
Винова лоза	0,3	0,85	0,45	2,0
Пасуљ	0,4	1,15	0,35	0,4
Паприка	0,7	1,05	0,90	0,7
Парадајз	0,7	1,15	0,7-0,9	0,6
Бостан	0,4	1,00	0,75	0,4
Малине	0,3	1,05	0,50	1,5

Уколико климатски услови анализираног подручја одступају од стандардних неопходно је извршити усклађивање коефицијента културе за трећу и четврту фазу. Да би се стекао увид у климатске карактеристике анализираног подручја, са аспекта евентуалне потребе усклађивања k_c , посматрани су мерени месечни подаци о RH_{\min} и u_2 у периоду 1971-2013 обезбеђени са метеоролошких станица РХМЗ-а Прокупље и Куршумлија. Просечне вредности RH_{\min} и u_2 за период 1971-2013 дате су у табели 13.

Табела 13: Просечне вредности минималне релативна влажност ваздуха (RH_{\min}) и брзине ветра мерено на 2 m висине (u_2) за станице Прокупље и Куршумлија, 1971-2013.

	Прокупље	Куршумлија
RH_{\min} (%)	36	34
u_2 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1,76	1,03

Како дати климатски параметри одступају од стандардних вредности, коефицијенти културе за трећу и четврту фазу усклађени су за дате климатске услове, према једначинама (14) и (15) (Allen et al., 1998; Стричевић, 2007):

$$kc_{uskIII} = kc_{III} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \cdot \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (14)$$

$$kc_{uskIV} = kc_{IV} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \cdot \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (15)$$

Где је: kc_{uskIII} – усклађена вредност коефицијента културе за трећу фазу; kc_{III} – вредност коефицијента културе за трећу фазу (Табела 12); kc_{uskIV} – усклађена вредност коефицијента културе за четврту фазу; kc_{IV} – вредност коефицијента културе за четврту фазу (Табела 12); RH_{min} – минимална релативна влажност ваздуха ($20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$); u_2 – брзина ветра мерена на 2 m висине ($m \cdot s^{-1}$); h – висина усева у трећој, односно четвртој фази (m).

Једначина (15) примењена је за усклађивање $kc_{(IV)}$ за четврту фазу само када је вредност $kc_{(IV)}$ из Табела 12 већа од 0,45, што је случај код усева код којих се врши жетва пре сазревања биљака.

Након одређивања вредности kc , конструисана је крива коефицијента културе на основу које су очитане вредности kc за сваки период у току вегетације одређеног усева. На овај начин утврђена су два низа вредности kc , за Прокупље и Куршумлију.

Припремљени подаци о kc коришћени су за прорачун ЕТс (Једначина (13)) у референтном периоду (1971-2000) и периоду блиске (2021-2050) и далеке будућности (2071-2100), за четири општине на подручју слива Топлице. Прорачун ЕТс за подручје општина Прокупље и Житорађа подразумева примену срачунатих вредности РЕТ за метеоролошку станицу Прокупље и утврђених вредности kc (вредности из табеле 12 и коригованих вредности на основу података за метеоролошку станицу Прокупље). За подручје општина Куршумлија и Блаце, примењене су срачунате вредности РЕТ за метеоролошку станицу Куршумлија и утврђене вредности kc (вредности из табеле 12 и кориговане вредности на основу података за метеоролошку станицу Куршумлија).

3.6.2 Обезбеђеност усева и засада водом

Обезбеђеност усева и засада водом одређена је обрачуном дефицита, односно суфицита воде за сваку биљну врсту. Дефицит, односно суфицит воде рачунат је као разлика између потребе културе за водом и ефективних падавина (Једначина (16)):

$$\text{дефицит/суфицит} = ET_c - P_{eff} \quad (16)$$

Где је: ET_c - евапотранспирација културе (mm); P_{eff} – ефективне падавине (mm).

Ефективне падавине (P_{eff}) представљају количину од укупних падавина која доспе и задржи се у активној зони ризосфере. За одређивање ефективних падавина примењена је метода фиксног процента. Усвојена је ефективност падавина од 80% (Saadi et al., 2015), што се сматра оправданим у климатским условима подручја наше земље, без примене наводњавања (Стричевић, 2007).

Дефицит, односно суфицит воде за најзаступљеније усева и засаде (Табела 11) за подручје општина Прокупље и Житорађа рачунат је на основу срачунатих вредности ЕТс и P_{eff} на основу података са метеоролошке станице Прокупље, односно за подручје општина Куршумлија и Блаце на основу срачунатих вредности ЕТс и P_{eff} на основу података са метеоролошке станице Куршумлија, за периоде 1971-2000, 2021-2050. и 2071-2100. године.

Обезбеђеност водом пшенице, јечма, кукуруза, кромпира, луцерке, детелине, јабуке, вишње, шљиве и пасуља праћена је на подручју оба локалитета. Заступљеност малине на подручју Куршумлије и Блаца у односу на укупну заступљеност културе у округу износи 85% (Попис пољопривреде, 2012), због чега је прорачун обезбеђености водом малине рађен само за овај локалитет. Прорачун обезбеђености водом винове лозе рађен је за подручје Прокупља и Житорађе. Винова лоза је заступљена на подручју Прокупља и Житорађе на око 98% укупне површине под виноградима у Топличком округу (Попис пољопривреде, 2012). Овај регион познат је као стари виноградарски центар, из кога потиче аутохтона сорта винове лозе Прокупац. Прорачун обезбеђености водом паприке, парадајз и бостана рађен је за подручје Прокупља и Житорађе с обзиром на то да је процентуална заступљеност датих култура на овом подручју у односу на укупну заступљеност у округу 92%, 80% и 99,8%, респективно.

3.7 Агроклиматски услови

Утицај климатских промена на агроклиматске услове подручја слива Топлице анализиран је праћењем вредности агроклиматских индекса. Агроклиматски индекси рефлектују утицај температурног и водног режима на биљну производњу (Mathieu и Aires, 2018). Процена утицаја климатских промена урађена је поређењем вредности агроклиматских индекса у блиској (2021-2050) и далекој будућности (2071-2100) са вредностима током референтног периода (1971-2000).

Испитивани су следећи агроклиматски индекси:

- Датум појаве позног пролећног мраза, одређен као просечан датум последње појаве минималне температуре ваздуха испод 0 °C ($T_{min} < 0\text{ °C}$) пре 1. јула;
- Датум појаве раног јесењег мраза, одређен као просечан датум прве појаве минималне температуре ваздуха испод 0 °C ($T_{min} < 0\text{ °C}$) после 1. јула;
- Просечан број мразних дана, одређен као просечан број дана са минималном температуром ваздуха испод 0 °C ($T_{min} < 0\text{ °C}$);
- Просечан број ледених дана, одређен као просечан број дана са максималном температуром ваздуха испод 0 °C ($T_{max} < 0\text{ °C}$);
- Просечан број летњих дана, одређен као просечан број дана са максималном температуром ваздуха изнад 25 °C ($T_{max} > 25\text{ °C}$);
- Просечан број тропских дана, одређен као просечан број дана са максималном температуром ваздуха изнад 30 °C ($T_{max} > 30\text{ °C}$);
- Дужина вегетационе сезоне рачуната је као број дана између првог низа од најмање 6 узастопних дана са средњом температуром ваздуха изнад 5 °C ($T_{mean} > 5\text{ °C}$) и првом појавом након 1. јула од најмање 6 узастопних дана са средњом температуром ваздуха испод 5 °C ($T_{mean} < 5\text{ °C}$) (Ruml et al., 2015);
- Сума ефективних температура (енг. *Growing degree-days*, GDD) рачуната је према једначини (17) (McMaster и Wilhelm, 1997):

$$GDD = \left[\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right] - T_b \quad (17)$$

Где је: T_{max} – максимална температура ваздуха (°C); T_{min} – минимална температура ваздуха (°C); T_b – биолошки минимум (°C).

Биолошки минимум (T_b) представља доњи температурни праг изнад кога биљке улазе у одређену фазу развића и разликује се код сваке културе (Јанчић, 2015). За прорачун GDD узет је у и обзир горњи температурни праг за сваку културу, T_{UT} . Горњи температурни праг (T_{UT}) представља горњу границу температуре изнад које се зауставља развиће културе (de Roos et al., 2021). Израчунавање суме ефективних температура спроведено је према методу предложеном од стране McMaster и Wilhelm (1997):

Ако је средња температура ваздуха $\left[\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right] < T_b$; узима се да је $\left[\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right] = T_b$;

Ако је средња температура ваздуха $\left[\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right] > T_{UT}$; узима се да је $\left[\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right] = T_{UT}$;

Преглед температурних прагова коришћених у овом истраживању дат је у табели 14.

Табела 14: Биолошки минимум (T_b) и горњи температурни праг (T_{UT}) за најзаступљеније културе на подручју слива Топлице.

Култура	T_b (°C)	T_{UT} (°C)	Извор
Пшеница и јечам	0	25	McMaster и Wilhelm (1997)
Кукуруз	10	30	McMaster и Wilhelm (1997)
Кромпир	2	26	Raes et al., (2012)
Луцерка и детелина	5	30	Smeal et al., (2014)
Парадајз и паприка	7	28	Raes et al., (2012)
Пасуљ	5	30	Raes et al., (2012)
Воће	5	30	Carisse et al., (2008)
Винова лоза	10	30	Ruml et al., (2012)

3.8 Методологија обраде података

Утицај климатских промена на климатолошке и хидролошке величине у будућности анализиран је у периоду од 2021. до 2100. године, на годишњем и месечном нивоу и током периода април-септембар (1. април - 30. септембар) и октобар-март (1. октобар – 31. март). Вегетациона сезона већине анализираних култура одвија се у периоду април-септембар. Промене свих посматраних климатолошких и хидролошких величина у будућности изражене су у односу на референтни период 1971-2000. Пројекције климатских и хидролошких модела у себи садрже одређени степен грешке или одступања (енг. *bias*). Да би се делимично елиминисао утицај те грешке, симулиране вредности у будућности поређене су са симулираним вредностима у референтном периоду (1971-2000), а не са осмотреним вредностима (Minville et al., 2008; Shen et al., 2018). Пројекције климатских величина (P, Tmean и срачунато PET) добијене су применом 7 комбинација GCM-RCM за по 2 RCP сценарија. Хидролошке пројекције добијене су HBV-light (Q) и ANN (NPZV) моделом. За сваки параметар укупно је добијено два пута по 7 низова података за будући (2021-2100) и два пута по 7 низова за референтни период (1971-2000). Анализе се односе на хидролошку годину (1. октобар – 30. септембар). За анализу расположивости подземне воде коришћена је њена дубина (DPZV), која је исказана као одстојање нивоа подземне воде од површине терена. Израчуната је као:

$$DPZV (m) = \text{Апсолутна кота терена (mm)} - NPZV (mm) \quad (18)$$

При анализи промене, примењен је мултимодел приступ, да би се смањила несигурност резултата климатских модела. Мулти-модел ансамбл у овом истраживању чини 7 климатских модела за сваки RCP сценарио. У циљу умањења утицаја екстремних вредности, за које се очекује већа учесталост у будућности, и грешака климатолошких модела, у анализама су коришћене медијане. Апсолутне промене код медијане T_{mean} су изражене у °C, а код медијана PET, P, Q и дубине подземне воде (DPZV) су приказане као релативне промене у % (Једначина (19)):

$$\Delta = \frac{\text{медијана}X_{\text{сим.буд.}} - \text{медијана}X_{\text{сим.реф.}}}{\text{медијана}X_{\text{сим.реф.}}} * 100[\%] \quad (19)$$

Где је: Δ очекивана разлика у медијани, $X_{\text{сим.}}$ је симулирана вредност PET, P, Q или DPZV у референтном (*реф.*) и будућем (*буд.*) периоду.

Временска варијација промене праћена је на низу од 51 податка, формираном од временских исечака (енг. *time-slice*) са померањем од једне године од 2021. до 2100. Први податак односи се на промену у периоду од 2021-2050 (2035s), други на 2022-2051 (2036s), где се даљим померањем у дужини корака од једне године добија низ са последњом променом у периоду 2071-2100 (2085s). На овим временским низовима је испитано постојање тренда и његова статистичка значајност. Расподела временских серија анализираних хидролошких и климатских варијабли испитана је применом *Kolmogorov-Smirnov* и *Shapiro-Wilk* теста ($p = 0,05$) (Razali и Wah, 2011). Резултати ових тестова показали су да временске серије тестираних података немају нормалну расподелу, те не испуњавају услов за примену параметарских тестова. Изабране су непараметарске методе, *Mann-Kendall* тренд тест (МК) и *Sen's slope* метода за оцену нагиба, за утврђивање тренда и његову статистичку значајност (Mann, 1945; Mondal et al., 2012).

Примена МК теста није условљена претпоставком о нормалности тестираних података и због тога је тест често примењиван за испитивање статистичке значајности тренда на временским серијама хидролошких и климатолошких података (Tabari et al., 2011; Mondal et al., 2012; Shen et al., 2018). МК тест захтева да тестиране временске серије буду серијски независне. Присуство позитивне или негативне аутокорељације у серијама података утиче на могућност теста да детектује тренд. При тестирању података са позитивном аутокорељацијом, тест прецењује статистичку значајност тренда. Обрнуто, у случају тестирања података са негативном аутокорељацијом, тест неће открити присуство тренда (Novotny и Stefan, 2007). Да би се избегао утицај аутокорељације серије података на статистичку значајност тренда, пре примене МК теста примењена је *pre-whitening* техника на оригиналним тестираним подацима (Mondal et al., 2012). Присуство аутокорељације установљено је применом R платформе и јавно доступног пакета *Acf* ([acf function - RDocumentation](#)). Употребом пакета *modifiedmk v1.1.0* ([modifiedmk package - RDocumentation](#)) примењује се *pre-whitening* техника на серијама података са установљеном аутокорељацијом, затим се врши тестирање тренда МК тестом на нивоу значајности $p=0,05$ и рачуна вредност *Sen's* параметра, преко кога је процењен нагиб тренда.

Тест статистика рачуна се према једначини (20) (Mondal et al., 2012):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (20)$$

Где је: X вредност тестиране промене на рачунском кораку i и j ; n је број података у временској серији; и $\text{sgn}(X_j - X_i)$ једнак је +1 у случају када је X_i веће од (X_j) и -1 ако је супротно.

Варијанса статистике теста рачуна се:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t'(i)(i-1)(2i+5)}{18} \quad (21)$$

Где је: t' број група истих вредности у временској серији; i је рачунски корак; n је број података у временској серији.

Стандардизована променљива Z_c рачуна се:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} \\ 0, S=0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, S < 0 \end{cases} \quad (22)$$

При чему Z_c прати стандардну нормалну расподелу. Позитивна вредности Z_c указује на растући тренд, односно негативна вредност на опадајући тренд. Уколико је вредност статистике Z_c већа од $Z_{(\alpha/2)}$, при чему је α статистички ниво значајности, одбацује се нулта хипотеза да не постоји тренд у серији података, односно усваја се алтернативна хипотеза да постоји статистички значајан тренд у тестираној серији података (Mondal et al., 2012).

Поред описаног тестирања постојања тренда за све симулиране климатолошке и хидролошке величине квантификована је процентуална промена у блиској (2021-2050) и далекој будућности (2071-2100) у односу на референтни период (1971-2000) и њена статистичка значајност.

Временске серије посматраних величина за три периода (референтни период, блиска и далека будућност) добијене су са 7 комбинација GCM-RCM, за сваки RCP сценарио. Испитивана је значајност промене медијане P , T_{mean} , PET , Q и $DPZV$ у блиској (2021-2050) и далекој (2071-2100) будућности у односу на референтни период (1971-2000).

Статистичка значајност промена медијане P , T_{mean} , PET , Q и $DPZV$ на годишњем и месечном нивоу и током периода април-септембар и октобар-март процењена је *Mann-Whitney* тестом (MW) (Mann and Whitney, 1947), на нивоу значајности $p=0,05$. MW тест је непараметарски тест заснован на ранговима и процењује значајност разлике у медијани или средњој вредности две серије података, често употребљаван при анализи хидролошких и метеоролошких серија (Reshmidevi et al., 2018). Тест се заснива на нултој хипотези да су медијане/средње вредности две упоређиване серије исте, насупрот алтернативне хипотезе да се значајно разликују.

Овим тестом се процењује значајност разлике сума рангова измешаних података за два независна узорка. У циљу контроле рангова прво се саберу рангови за сваки узорак ($\sum R_1$ и $\sum R_2$), а затим се саберу те две суме рангова. Збир свих рангова једнак је збиру узастопних n природних бројева $n \cdot (n+1)/2$. Ако оба узорка имају више од 20 јединица користи се Z статистика:

$$Z_c = \frac{R_1 - [n_1(n_1 + n_2 + 1)/2]}{\sqrt{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)/12}} \quad (23)$$

При чему је: R_1 вредност суме рангова серије 1; n_1 и n_2 – величине узорака тестираних серија.

Рангови су додељени комбиновањем свих вредности у серијама података 1 и 2 и распоређени у растућем низу. Нулта хипотеза се одбацује, односно усваја се да постоји разлика

између медијана/средњих вредности две серије уколико је статистика Z_c једнака или већа од $1 - \alpha/2$, где је α задати ниво статистичке значајности (Reshmidevi et al., 2018).

Статистичка значајност разлике вредности ЕТс и дефицита, односно суфицита воде за сваки усев и засад у блиској (2021-2050) и далекој (2071-2100) будућности у односу на референтни период (1971-2000) анализирана је такође применом MW теста, на нивоу значајности $p=0,05$. Анализа података урађена је на вегетационом и месечном нивоу. Апсолутна промена ЕТс и дефицита, односно суфицита воде рачуната је према једначини (24), а релативна промена према једначини (25).

$$\Delta = X_{\text{сим.буд.}} - X_{\text{сим.реф.}} \quad (24)$$

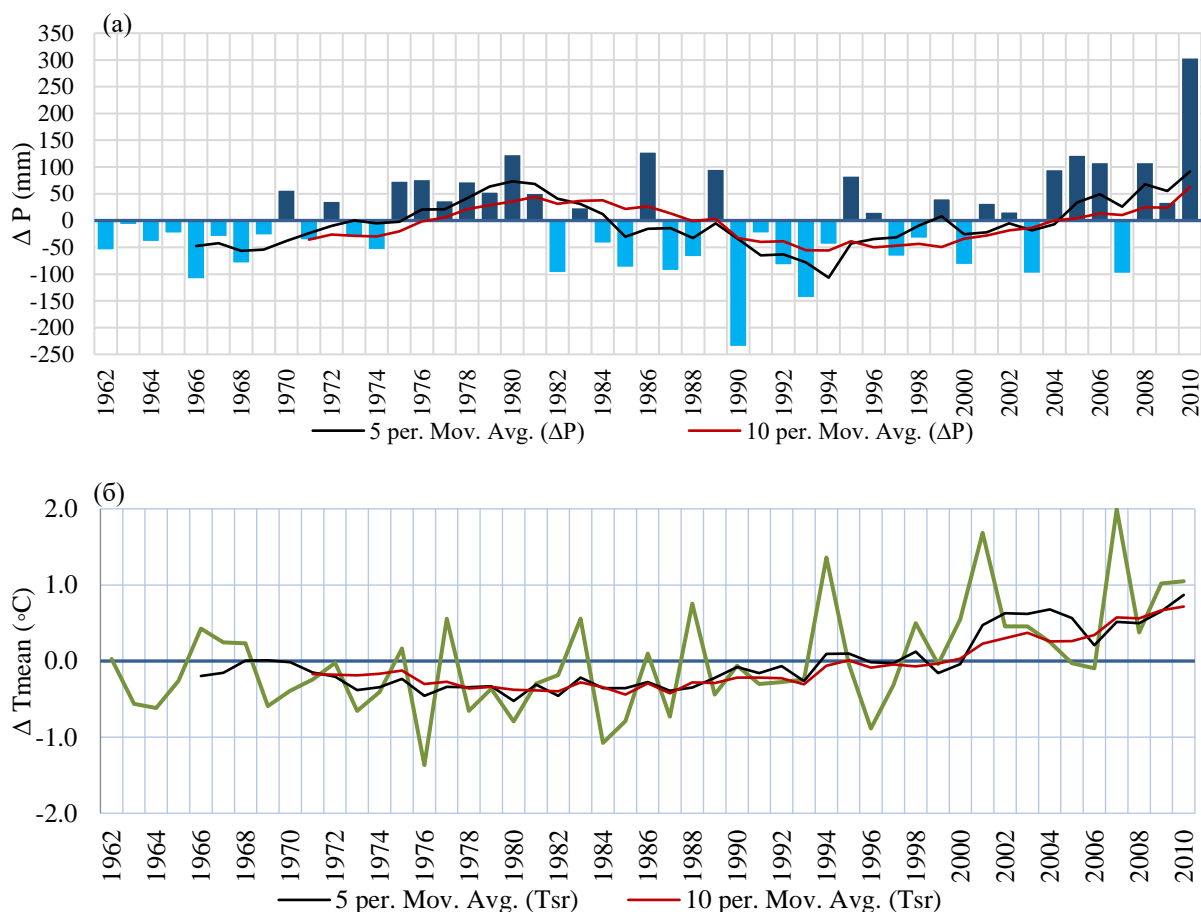
$$\Delta = \frac{X_{\text{сим.буд.}} - X_{\text{сим.реф.}}}{X_{\text{сим.реф.}}} \cdot 100 [\%] \quad (25)$$

Где је: Δ симулирана промена; $X_{\text{сим.}}$ је симулирана вредност ЕТс или дефицита, односно суфицита воде у референтном (*реф.*) и будућем (*буд.*) периоду.

4. Резултати и дискусија

4.1 Калибрација и валидација

Пре примене HBV–light modela за симулирање протицаја до краја века, урађена је калибрација modela. Како се у будућности очекују појаве и кишних и сушних година, model је калибрисан за период кога карактерише просечна влажност, да би се подједнако могла симулирати оба екстремна климатска услова. За одређивање просечно влажних година у периоду 1961–2010 коришћена је метода покретног просека (енг. *moving average*). Применом покретног просека одређено је 13 просечно влажних периода различите дужине од 5 до 12 година. За сваки од тих 13 периода урађена је GAP оптимизација, пру чему се свака оптимизација састојала од 10000 итерација за генетички алгоритам за регионалну оптимизацију и 1000 итерација за локалну оптимизацију региона (Powel). Као резултат, аутоматски се издваја 13 пута по 10 најбољих сетова параметара према композитној критеријумској функцији (OF). Следећи корак био је издвајање сетова параметара са најбољим постигнутим вредностима OF, који сачињавају мере ефикасности NSE, NSE_{logQ} и VE. Издвојено је од три до пет сетова параметара за сваки калибрациони период, који су даље тестирани у процесу валидације modela. Како су калибрациони периоди изабрани тако да представљају просечне климатске услове, за периоде валидације изабрани су екстремни временски услови да би се испитала могућност modela да симулира хидролошке величине у различитим метеоролошким условима.



Слика 17. Одступање од нормале пондерисане годишње суме падавина (P) (a) и средње годишње температуре (T_{mean}) (б) на подручју слива реке Топлице и 5-годишњи и 10-годишњи покретни просек, период 1961–2010. година.

У периоду од 1961. до 2010. године, методом покретног просека одређеном на низу података о одступању просечне годишње суме падавина и средње годишње температуре од нормале, изабрани су топли, хладни, суви и влажни валидациони периоди (Слика 17). На овај начин, изабрани периоди валидације омогућавају тестирање ефикасности модела при симулацији протицаја у различитим екстремним временским условима, чија се учесталост очекује у условима климатских промена. Периоди калибрације и валидације нису се преклапали. Изабрани периоди за калибрацију су: 1977-1991, 1978-1990, 1979-1984, 1979-1989, 1980-1985, 1981-1985, 1984-1989, 1994-2008, 1994-1999, 1995-1999, 1996-2006, 1998-2006, 1993-2005. За валидацију модела изабрани су периоди: 1975-1985, 1999-2004, 2000-2010, 2005-2010, 1971-1981, 1975-1980, 2009-2010, 1962-1969, 1984-1994, 1989-1994, 1989-1990.

Оптималан сет параметара одабран је на основу више критеријума. За задати сет параметара усвојено је да вредности ефикасности модела буду изнад 0,65 у што већем броју различитих валидационих периода. Даље, праћена су и одступања унутаргодишње расподеле мерених и симулираних вредности протицаја током референтног периода (1971–2000). Анализом података изабран је један од 10 сетова параметара калибрационог периода 1994-1999. Постигнуте вредности критеријума ефикасности за овај период калибрације износиле су: OF – 0,83, NSE – 0,76, $NSE_{\log Q}$ – 0,82 и VE – 1. Вредности појединих параметара HBV-light модела, постигнутих у процесу калибрације, дате су у табели 15.

Табела 15. Вредност појединих параметара HBV-light модела постигнутих у процесу калибрације за калибрациони период 1994-1999.

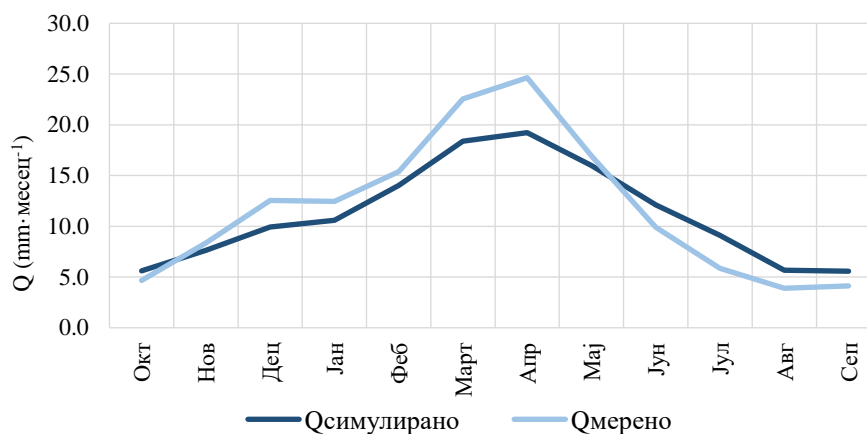
Параметар	Вредност
PERC_1	0,573167
UZL_1	131,6755
K ₀ _1	0,418757
K ₁ _1	0,216134
K ₂ _1	0,04238
MAXBAS_1	2,369106
PCALT_1	5,726824
TCALT_1	0,618621
Pelev_1	490,104
Telev_1	490,104
TT_1_1	-2,4992
CFMAX_1_1	7,639342
SCF_1_1	0,844639
CFR_1_1	1,477366
CWH_1_1	0,199864
TT_1_2	-0,66362
CFMAX_1_2	4,696012
SCF_1_2	0,843092
CFR_1_2	0,400002
CWH_1_2	0,116758

За изабране периоде валидације испуњени су задати критеријуми ефикасности модела у топлим, сувим и влажним периодима валидације. Примећује се да модел даје нешто лошије резултате симулације у хладном периоду валидације (Табела 16).

Табела 16. Ефикасност модела постигнута валидацијом за период калибрације 1994-1999.

Периоди валидације		Ефикасност модела
Хладно	1975-1985	0,63
	1999-2004	0,66
Топло	2000-2010	0,70
	2005-2010	0,70
Влажно	1971-1981	0,60
	1975-1980	0,61
	2009-2010	0,67
Суво	1962-1969	0,52
	1984-1994	0,65
	1989-1994	0,64
	1989-1990	0,62

Укупно одступање симулираних вредности протицаја, добијених на бази улазног сета параметара за период 1994-1999, од мерених дугогодишњих протицаја, по месецима, у референтном периоду 1971–2000 (Слика 18) износи 5,28%.



Слика 18. Унутаргодишња расподела мереног и симулираног протицаја (Q), период 1971–2000.

Коришћењем ANN моделирана је зависност NPZV на равничарском делу слива од протицаја воде у реци Топлица. За моделирање NPZV као репрезентативан изабран је пијезометар 3-540 који има редовна читања (осим за један месец) и показује статистички значајну корелацију између флукуација NPZV на тој локацији и флукуација у осталих 7 постојећих пијезометара, на нивоу значајности $p=0,01$ (Табела 17).

Табела 17: Резултати корелационе анализе флукуација NPZV у пијезометру 3-540 са преосталих 7 постојећих пијезометара.

	Дољевац ЗНП533	Дољевац Орљане ЗНП535	Дољевац кланица ЗНП534	Глашнице ЗНП541	Шарлинац ЗНП538	Шарлинац вис.мост ЗНП537	Житорађа ЗНП539
Житорађа 3-540	0,71	0,73	0,72	0,80	0,82	0,87	0,88

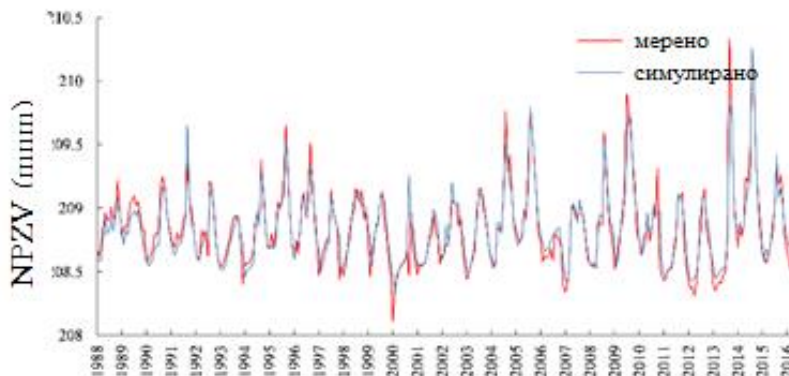
У циљу припреме ANN модела, који се користи за пројектовање NPZV, корелационом анализом испитане су јачина везе између NPZV у пијезометру 3-540 и различитих климатских и хидролошких величина. Корелационом анализом испитивана је веза између месечних нивоа подземне воде NPZV (пијезометар 3-540) и климатских (максимална - T_{max} , минимална - T_{min} и средња месечна температура - T_{mean} ; месечна сума падавина - P ; потенцијална евапотранспирација - PET) и хидролошких података (просечни месечни водостај - H и протицај - Q на хидролошкој станици површинских вода Дољевац).

Резултати у табели 18 показују да је између NPZV и испитиваних хидролошких величина (водостај и протицај) постоји значајна позитивна корелација ($R=0,87$; $p=0,01$). Климатски елементи на месечном нивоу не показују статистички значајну корелацију са NPZV.

Табела 18. Коефицијент корелације (R) између месечних нивоа подземне воде (NPZV; пијезометар 3-540) и климатских (максимална (T_{max}), минимална (T_{min}) и средња месечна температура (T_{mean}), месечна сума падавина (P), потенцијална евапотранспирације (PET)) и хидролошких података (просечни месечни водостај (H) и протицај (Q)).

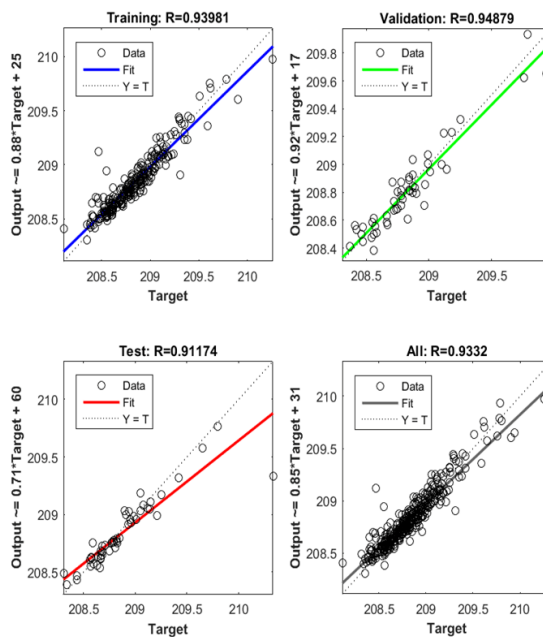
	T_{max}	T_{min}	T_{mean}	P	PET	H	Q
R	0,29	0,32	0,33	0,25	0,18	0,87	0,87

За моделирање NPZV коришћена је једноставна неурална мрежа у којој су као улазни подаци коришћене вредности протицаја реке Топлице $Q(t)$, у месецу t и ниво подземне воде у изабраном пијезометру 3-540 $NPZV(t-1)$, за претходни месец $t-1$. Излаз из неуралне мреже је ниво подземне воде $NPZV(t)$, у посматраном месецу t . На слици 19 су приказане мерене и симулиране вредности нивоа подземне воде у периоду 1988-2016.



Слика 19. Поређење мерених вредности NPZV и симулираних резултата за 1 месец унапред, добијених ANN моделом обученим *Levenberg–Marquardt* методом.

Сет података за симулацију је подељен у три групе: 70% података временске серије која је на располагању је употребљено за обуку (енг. *training*), 15% података је коришћено за валидацију и 15% за тестирање. Коефицијент корелације ($p=0,01$) мерених и добијених података за сваки појединачни скуп (обучавање, валидацију и тестирање) креће се у интервалу од 0,91 до 0,95, а за целокупни скуп података је 0,93 (Слика 20).



Слика 20. Статистички показатељи ANN модела

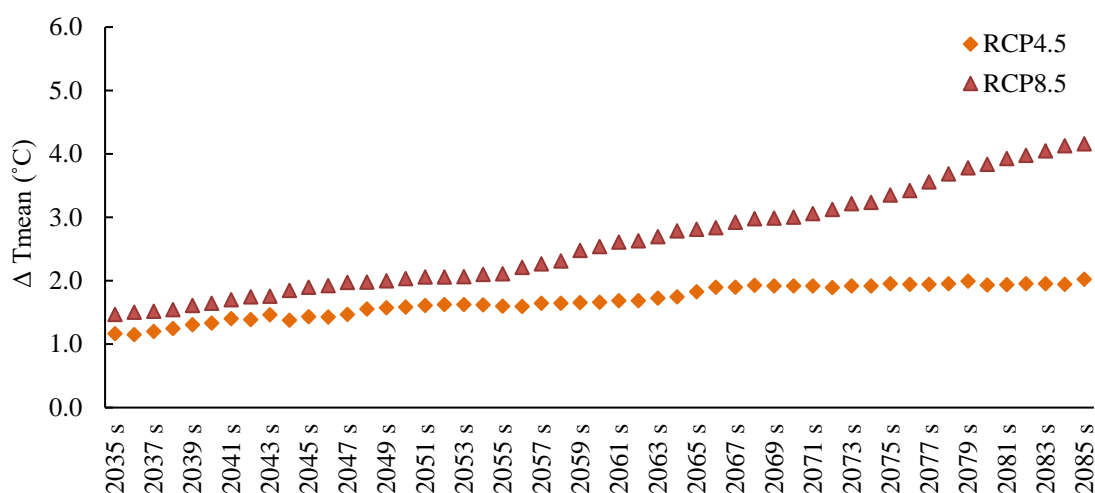
Симулације нивоа подземних вода у будућности, $NPZV(t)$, урађена је применом података о симулираном нивоу протицаја $Q(t)$ (излаз из модела HBV-light) и података о нивоу подземне воде један месец раније $NPZV(t-1)$ које је ANN модел генерисао. Поново је неурална мрежа пројектована и обучавана тако што су на улаз неуралне мреже довођени парови $NPZV(t-1)$ и $Q(t)$, док је жељени излаз неуралне мреже био $NPZV(t)$ при чему је са $Q(t)$ означен протицај реке Топлице у тренутку времена t , а са $NPZV(t-1)$ и $NPZV(t)$ су означене вредности модела у тренуцима $t-1$ и t .

4.2 Анализа утицаја климатских промена на водне ресурсе у сливу реке Топлице

4.2.1 Утицај климатских промена на климатолошке величине

Промене температуре ваздуха

На временском низу података о апсолутној промени медијане T_{mean} на годишњем нивоу испитивано је постојање тренда и његова статистичка значајност применом Mann-Kendall теста и Sen's методе за оцену нагиба, на нивоу значајности $p=0,05$. Резултати теста показују статистички значајан тренд повећања апсолутне промене медијане T_{mean} до краја века, по оба сценарија. Предвиђено је повећање годишње T_{mean} од $0,02 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{година}^{-1}$ и $0,05 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{година}^{-1}$ за RCP4.5 и RCP8.5 сценарио, респективно (Слика 21).



Слика 21. Апсолутна промена медијане T_{mean} у односу на референтни период према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију током 51 будућег периода.

Према RCP4.5 и RCP8.5 сценаријима, у периоду блиске и далеке будућности очекује се статистички значајно повећање медијане T_{mean} (MW; $p=0,05$). Према RCP4.5 сценарију, до краја века предвиђа се повећање до $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, док је према RCP8.5 повећање у односу на референтни период двоструко веће $4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Табела 19).

Табела 19. Промена медијане средње температуре (ΔT_{mean}) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период.

		RCP4.5		RCP8.5	
		2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	ΔT_{mean} ($^{\circ}\text{C}$)	1,2	2,0	1,5	4,2
Април–септембар	ΔT_{mean} ($^{\circ}\text{C}$)	1,3	2,0	1,4	4,1
Октобар–март	ΔT_{mean} ($^{\circ}\text{C}$)	1,2	1,9	1,3	4,2

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

Током периода април-септембар и октобар-март МК тестом ($p=0,05$) утврђен је статистички значајан тренд загревања до краја века, од $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{година}^{-1}$ (RCP4.5) и $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{година}^{-1}$ (RCP8.5), респективно.

У периодима април-септембар и октобар-март предвиђено је статистички значајно повећање медијане T_{mean} у периоду блиске и далеке будућности и по оба RCP сценарија у односу на референтни период (Табела 19) (MW; $p=0,05$). Очекивано загревање веће је у периоду далеке будућности и према RCP8.5 сценарију.

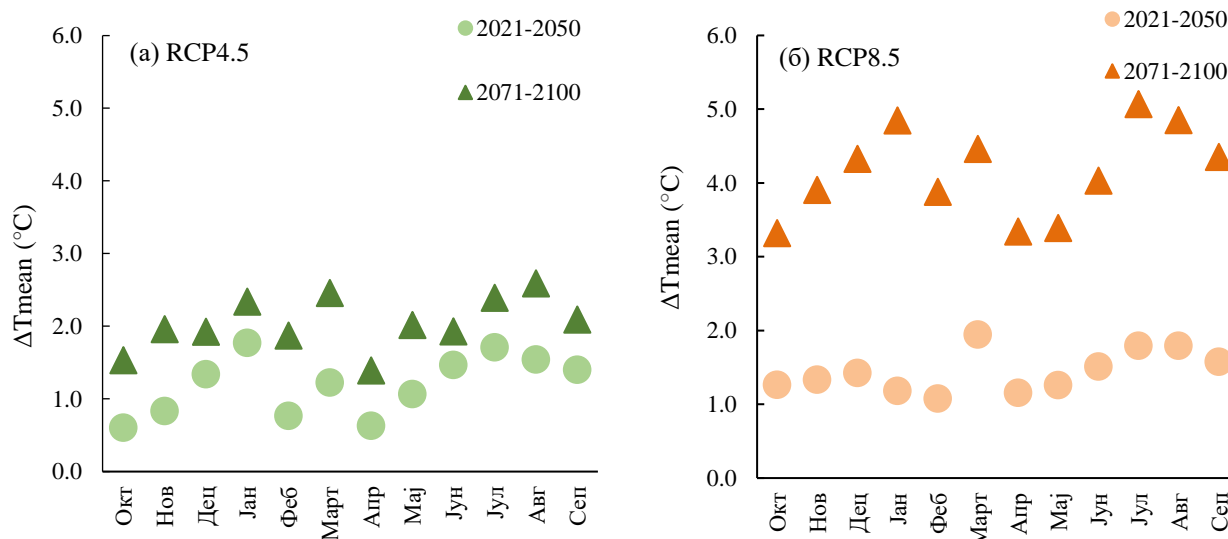
Анализом тренда промене медијане T_{mean} на месечном нивоу утврђено је постојање статистички значајног тренда загревања у појединим месецима према сценарију RCP4.5 сценарија, док се према сценарију RCP8.5 статистички значајан тренд повећања медијане T_{mean} очекује у свим месецима (МК; $p=0,05$) (Табела 20). До краја века, повећање биће у опсегу од $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{година}^{-1}$ до $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{година}^{-1}$ (RCP8.5).

Табела 20. Тренд промене медијане средње температуре (T_{mean}) током 51 будућег периода у односу на референтни период.

	RCP4.5		RCP8.5	
	Нагиб (Sen's Slope)	p (0,05)	Нагиб (Sen's Slope)	p (0,05)
Окт	0,01	0,29	0,04	0,00
Нов	0,03	0,14	0,05	0,00
Дец	0,01	0,49	0,06	0,00
Јан	0,01	0,19	0,07	0,00
Феб	0,02	0,03	0,05	0,00
Март	0,02	0,01	0,04	0,00
Апр	0,01	0,21	0,04	0,00
Мај	0,02	0,02	0,04	0,00
Јун	0,01	0,10	0,04	0,00
Јул	0,01	0,19	0,06	0,00
Авг	0,02	0,39	0,05	0,00
Сеп	0,02	0,03	0,05	0,00

* Статистички значајан тренд према Mann-Kendall тесту ($p=0,05$) означен је првеном бојом

Према MW тесту ($p=0,05$), у односу на референтни период, у периоду блиске и далеке будућности очекује се статистички значајно повећање медијане T_{mean} у свим месецима, по оба RCP сценарија. У односу на референтни период, очекивано је повећање у интервалу од 0,6 °C до 2,6 °C, према RCP4.5, односно од 1,1 °C до 5,1 °C, према RCP8.5. За најтоплије месеце у години (јул и август) очекује се и највећи пораст медијане T_{mean} , од око 2,5 °C (RCP4.5) и 5 °C (RCP8.5). Температуре у зимским месецима биће у порасту од 3,3 °C до 4,8 °C до краја века према RCP8.5 сценарију (Слика 22).



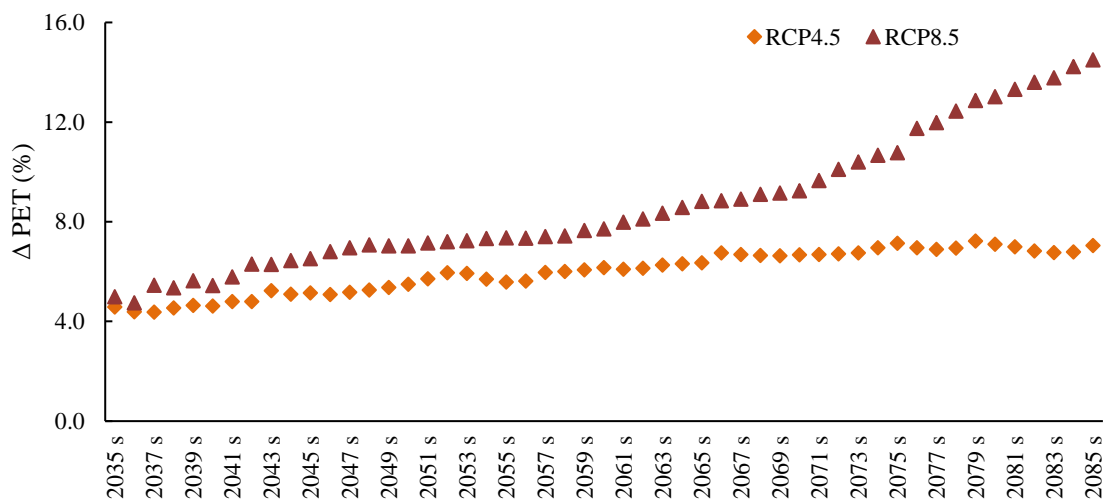
Слика 22. Унутаргодишња расподела апсолутног одступања медијане средње температуре (T_{mean}) у блиској и далекој будућности по RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б), у односу на референтни период. Испуњене ознаке означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Пројекције IPCC-а указују да се значајан тренд глобалног загревања очекује до краја 2100. године (Le Treut et al., 2007; Kovats et al., 2014). У складу са овим тврдњама су и резултати

овог истраживања, према којима се до краја века очекује статистички значајан тренд загревања на подручју слива Топлице. Претходно рађена истраживања у Србији указала су на тренд повећања температуре у прошлости (Ruml et al., 2017), што се очекује и у будућим периодима, закључак је овог истраживања. Резултати анализе промене температуре у будућности у складу су са резултатима истраживања промена климатских варијабли у будућности у Србији (Vuković et al., 2018). Студије рађене за подручја широм света такође указују на повећање температуре током 21. века (Kovats et al., 2014; Papadimitriou et al., 2016; Lobanova et al., 2018; Reshmidevi et al., 2018; Shen et al., 2018).

Промене потенцијалне евапотранспирације

Присуство тренда и оцена нагиба о релативној промени медијане годишње РЕТ анализирано је на низу од 51 податка (МК тест и *Sen's* метода; $p=0,05$). На годишњем нивоу није детектован статистички значајан тренд промене медијане РЕТ према RCP4.5 сценарију (МК; $p=0,05$). Статистички значајан тренд релативне промене медијане годишње РЕТ предвиђа се по сценарију RCP8.5, са повећањем од $0,16\% \cdot \text{година}^{-1}$ (МК; $p=0,05$) (Слика 23).



Слика 23. Релативна промена медијане РЕТ у односу на референтни период према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију током 51 будућег периода.

Анализа промене медијане годишње РЕТ у блиској и далекој будућности у односу на референтни период показала је да се у будућности може очекивати пораст РЕТ, према оба сценарија. Mann–Whitney тестом утврђено је да је добијена промена статистички значајна ($p=0,05$). До краја века, према RCP4.5 сценарију, предвиђено је повећање медијане РЕТ од 7,1%, док је према RCP8.5 очекивано повећање дупло веће (14,5%) (Табела 21).

За период април-септембар, промена медијане РЕТ не показује статистички значајан тренд током 21. века, према RCP4.5 сценарију. Према пројекцијама RCP8.5 сценарија, током испитиваног периода очекује се статистички значајан тренд повећања медијане РЕТ од $0,15\% \cdot \text{година}^{-1}$ (МК; $p=0,05$). Промена медијане РЕТ, у односу на референтни период, у блиској и далекој будућности добијена на основу пројекција оба сценарија статистички је значајна (MW; $p=0,05$). У односу на РЕТ током референтног периода за април-септембар, у периоду блиске будућности очекује се повећање од око 4%, према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију. У периоду далеке будућности, повећање према RCP4.5 сценарију износи 6,1%, док је према RCP8.5 сценарију дупло веће, 12,7% (Табела 21).

Промену медијане РЕТ за период октобар-март током 21. века карактерише статистички значајан узлазни тренд, са повећањем од $0,07\% \cdot \text{година}^{-1}$ (RCP4.5), односно

0,23%·година⁻¹ (RCP8.5) (МК; p=0,05). Највеће релативно одступање је у периоду далеке будућности и по RCP8.5 сценарију (18,4%) (Табела 21).

Табела 21. Промена медијане потенцијале евапотранспирације (Δ РЕТ) на нивоу године и за периоде април–септембар и октобар–март, у односу на референтни период.

		RCP4.5		RCP8.5	
		2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	Δ РЕТ (%)	4,6	7,1	5,0	14,5
Април–септембар	Δ РЕТ (%)	4,0	6,1	4,4	12,7
Октобар–март	Δ РЕТ (%)	4,4	8,2	5,8	18,4

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney p=0,05).

Анализом месечних података о промени медијане РЕТ статистички значајан тренд утврђен је у месецима фебруар–мај, са процентом пораста од 0,06%·година⁻¹ до 0,14%·година⁻¹, према RCP4.5 (МК; p=0,05). Према RCP8.5 сценарију, статистички значајан тренд повећања медијане РЕТ предвиђен је у свим месецима, у опсегу од 0,11%·година⁻¹ до 0,49%·година⁻¹ (МК; p=0,05) (Табела 22).

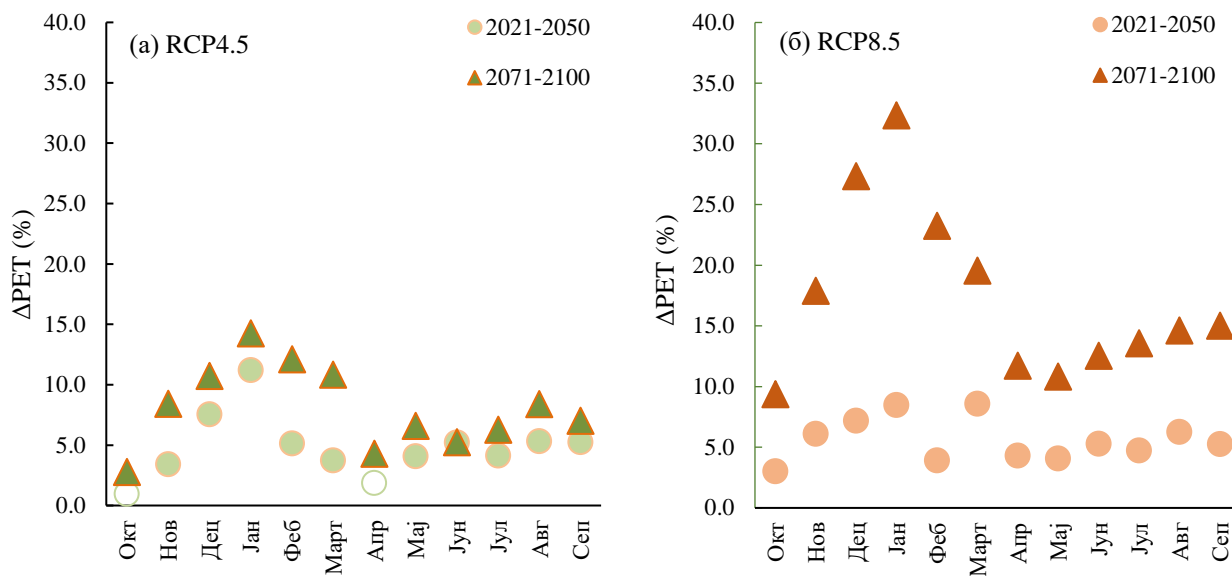
Табела 22. Тренд промене медијане потенцијалне евапотранспирације (РЕТ) током 51 будућег периода у односу на референтни период.

	RCP4,5		RCP8,5	
	Нагиб (Sen's Slope)	p (0,05)	Нагиб (Sen's Slope)	p (0,05)
Окт	0,04	0,74	0,11	0,00
Нов	0,11	0,08	0,22	0,00
Дец	0,06	0,66	0,41	0,00
Јан	0,06	0,34	0,49	0,00
Феб	0,14	0,01	0,35	0,00
Март	0,14	0,02	0,16	0,00
Апр	0,06	0,04	0,13	0,00
Мај	0,06	0,02	0,12	0,00
Јун	0,00	0,43	0,13	0,00
Јул	0,01	0,18	0,16	0,00
Авг	0,05	0,31	0,16	0,00
Сеп	0,04	0,10	0,17	0,00

* Статистички значајан тренд према Mann-Kendall тесту (p=0,05) означен је црвеном бојом.

У односу на референтни период, током периода блиске и далеке будућности на месечном нивоу очекује се пораст медијане РЕТ. Добијена промена је статистички значајна према MW тесту (p=0,05), изузев у октобру и априлу блиске будућности према RCP4.5 (Слика 24). Највеће процентуално повећање од 32,4% предвиђено је под сценаријем RCP8.5 у јануару далеке будућности. Према истом сценарију, процентуално повећање у августу је мање (14,6%), али је апсолутна промена 3,5 пута већа него у јануару. Посматрајући процентуалну промену по месецима, долази се до закључка да се највећи пораст РЕТ очекује у зимским месецима.

Међутим, просечна предикована сума и апсолутна промена веће су у летњим месецима (јун, јул и август), те се у том периоду, уз пораст температуре, очекују и највеће вредности РЕТ.



Слика 24. Унутаргодишња расподела релативног одступања медијане РЕТ у блиској и далекој будућности по RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б), у односу на референтни период. Испуњене ознаке означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Потенцијална евапотранспирација (РЕТ) има директан утицај на одрживост површинских и подземних водних ресурса (Green et al., 2011; Pan et al., 2015). Прорачун РЕТ урађен је модификованом *Hargreaves* методом. С обзиром на то да су срачунате вредности РЕТ засноване на пројекцијама температуре, очекивано је да промене РЕТ имају исти тренд повећања до краја века као и T_{mean} (Green et al., 2011). Према добијеним резултатима, највећи пораст температуре и највећи водни дефицит очекује се у летњим месецима. Добијени резултати повећања РЕТ у будућности на подручју Топлице у складу су са резултатима истраживања спроведеним у другим деловима света (Green et al., 2011; Kovats et al., 2014; Pan et al., 2015; Reshmidevi et al., 2018).

Промене падавина

Анализом низа од 51 податка о промени медијане годишње Р није утврђен статистички значајан тренд промене током 21. века (МК; $p=0,05$).

У поређењу са симулацијама за референтни период, у будућим периодима се очекује повећање медијане Р на годишњем нивоу. Релативна промена медијане Р у блиској и далекој будућности и резултати статистичке анализе према MW тесту ($p=0,05$) представљени су у табели 23. Анализом је утврђено да се статистички значајна промена очекује само у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију (повећање од 7,2%).

За период април-септембар, током 21. века предвиђен је статистички значајан тренд смањења медијане Р од $0,03\% \cdot \text{година}^{-1}$, према RCP4.5 (МК; $p=0,05$). У периоду блиске и далеке будућности очекује се смањење медијане Р у односу на референтни период, али промена није статистички значајна према MW тесту ($p=0,05$). Највеће процентуално смањење предиковано је у периоду блиске будућности по RCP4.5 сценарију (6,8%). До краја века, промена је око 3%, према оба сценарија (Табела 23).

Статистички значајан тренд није утврђен ни на низу података о промени медијане P током периода октобар-март (МК; $p=0,05$). У односу на референтни период, у блиској и далекој будућности се очекује статистички значајно повећање медијане P (MW; $p=0,05$). Према пројекцијама, до краја века очекује се повећање за период октобар-март 17,2% (RCP4.5) и 18,8% (RCP8.5) (Табела 23).

Табела 23. Промена медијане падавина (ΔP) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март у односу на референтни период.

		RCP4.5		RCP8.5	
		2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	ΔP (%)	1,4	2,6	3,6	7,2
Април–септембар	ΔP (%)	-6,8	-3,7	-1,9	-3,4
Октобар–март	ΔP (%)	15,6	17,2	12,2	18,8

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

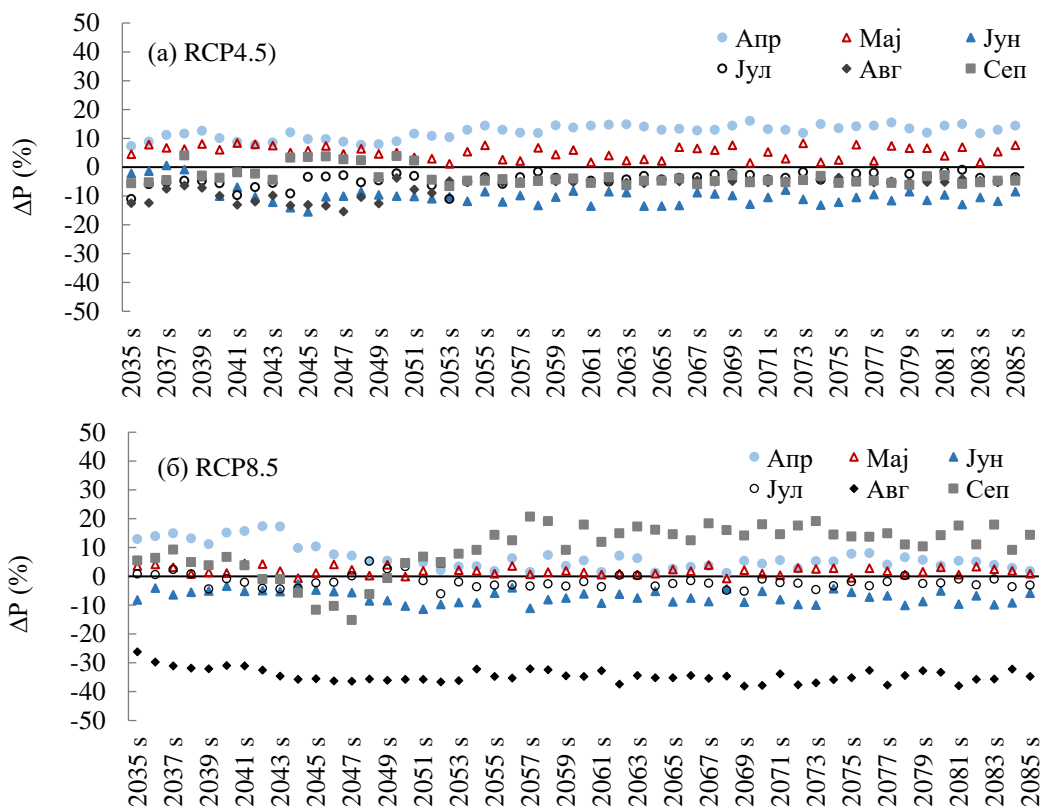
Статистичка анализа постајања тренда и процене нагиба података о промени медијане месечних P до краја века показала је да се статистички значајан тренд очекује само у јуну по RCP8.5 сценарију, уз смањење од $0,04\% \cdot \text{година}^{-1}$ (МК; $p=0,05$) (Табела 24).

Табела 24. Тренд промене медијане падавина (P) током 51 будућег периода у односу на референтни период.

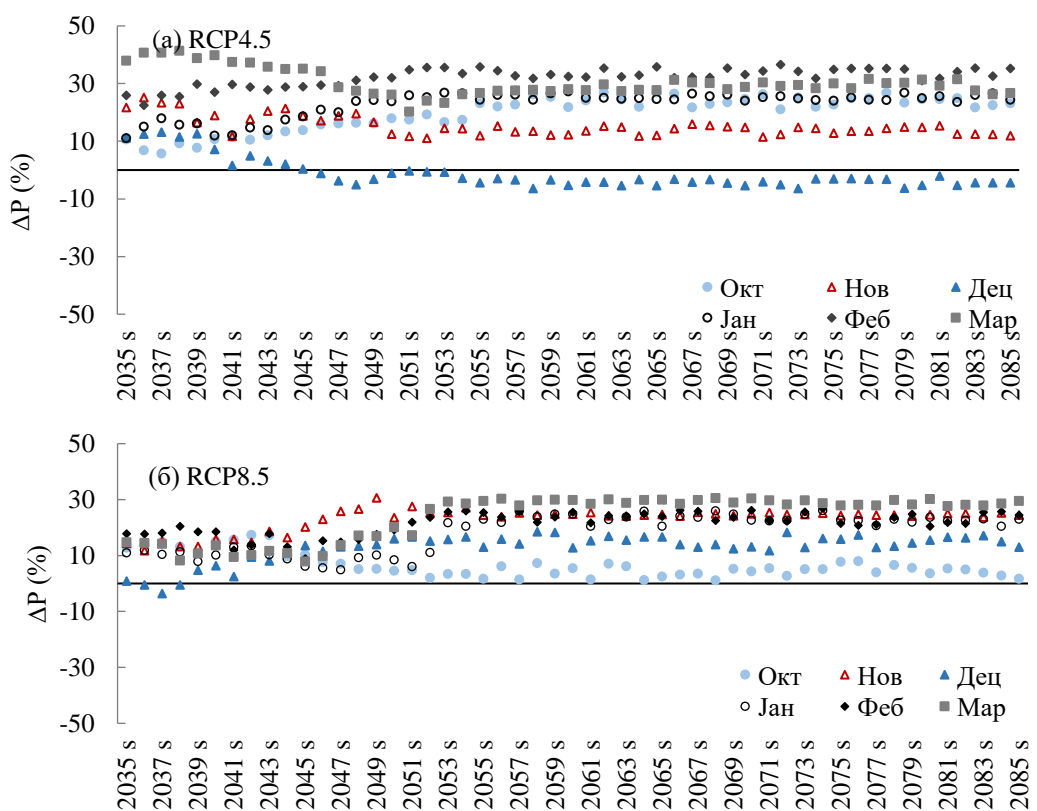
	RCP4.5		RCP8.5	
	Нагиб (Sen's Slope)	p (0,05)	Нагиб (Sen's Slope)	p (0,05)
Окт	0,34	0,28	-0,16	0,09
Нов	-0,13	0,12	0,06	1,00
Дец	-0,18	0,58	0,15	0,76
Јан	0,16	0,94	0,29	0,19
Феб	0,15	0,11	0,16	0,20
Март	-0,11	0,40	0,34	0,66
Апр	0,11	0,07	0,08	0,37
Мај	-0,03	0,13	-0,01	0,25
Јун	-0,05	0,55	-0,04	0,03
Јул	0,06	0,07	-0,02	0,47
Авг	0,09	0,06	-0,06	0,50
Сеп	-0,04	0,12	0,29	0,19

* Статистички значајан тренд према Mann-Kendall тесту ($p=0,05$) означен је црвеном бојом.

На слици 25 представљена је процентуална промена медијане P по месецима током 51 будућег периода у односу на референтни период. Резултати анализе месечних података подељени су на резултате који се односе на периоде април-септембар и октобар-март.



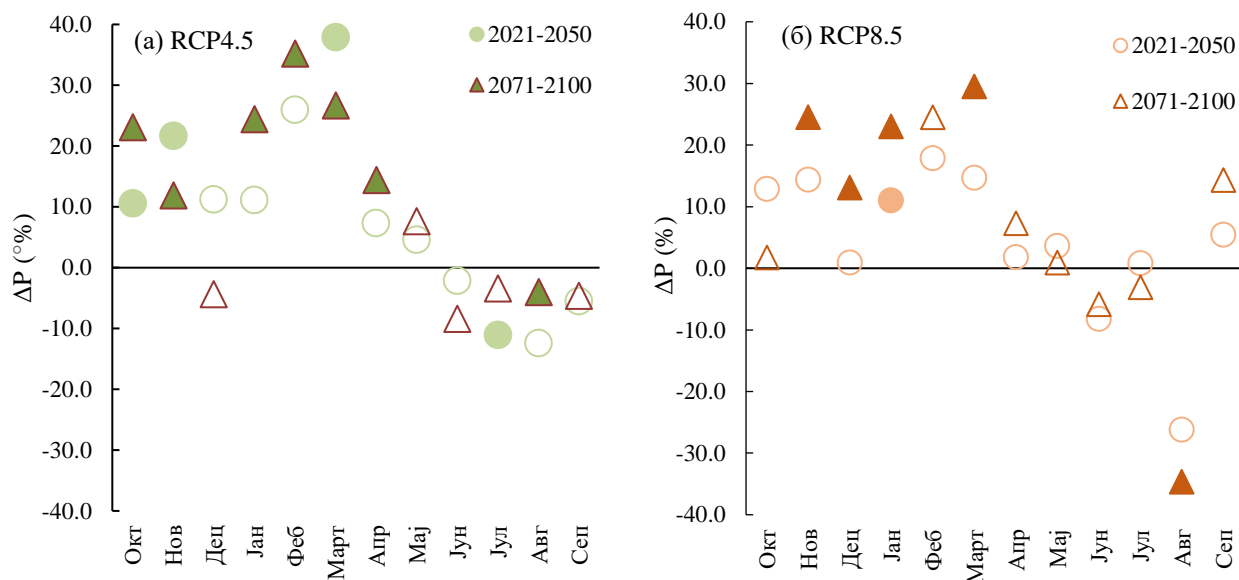
Слика 25. Релативна промена медијане падавина (P) у периоду април-септембар током 51 будућег периода у односу на референтни, према RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б) сценарију.



Слика 26. Релативна промена медијане падавина P у периоду октобар-март током 51 будућег периода у односу на референтни према RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б) сценарију.

Према RCP4.5 сценарију, у периоду април-септембар очекује се смањење медијане Р, изузев у априлу и мају (Слика 25 (а)). У истом периоду, према RCP8.5 сценарију, смањење медијане Р у највећем броју будућих периода односи се на месеце у најтоплијем делу године (јун, јул, август), при чему су највећа смањења предвиђена у августу (Слика 25(б)).

За месеце у периоду октобар-март, према оба RCP сценарија, предвиђено је повећање медијане Р током свих будућих периода, осим у одређеним периодима у децембру (Слика 26).



Слика 27. Унутаргодишња расподела релативног одступања медијане Р у блиској и далекој будућности по RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б), у односу на референтни период. Испуњене ознаке означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Промена медијане Р у блиској и далекој будућности, у односу на референтни период, статистички је значајна за неколико месеци (MW; $p=0,05$) (Слика 27). Највеће смањење од скоро 35% очекује се у августу далеке будућности према RCP8.5. Повећања су карактеристична за месеце октобар-март. Највећа повећања у том периоду предвиђају се у марту блиске будућности (38%) и фебруару далеке будућности (35%), према RCP4.5. Према RCP8.5 сценарију, највеће статистички значајно повећање медијане Р очекује се у марту далеке будућности (30%).

Падавине (Р) представљају значајну компоненту хидролошког циклуса због њиховог утицаја на протицај и подземне воде (Singh и Kumar, 2010; Green et al., 2011). Уопштено, у прошлости је утврђен тренд повећања падавина у Србији (Ruml et al., 2016), али је тренд смањења примећен у летњим месецима у централној и јужној Србији, подручју на коме је локализован слив Топлице (Vuković et al., 2018). Добијени образац промене Р у будућности за подручје Топлице потврђују и истраживања спроведена од стране Vuković et al. (2018) за територију Србије, заснована на RCP4.5 и RCP8.5 сценарију. Предиковано смањење падавина у летњим, а повећање током зимских месеци објављено је и у студијама рађеним за део Европе коме припада Србија (Kovats et al., 2014; Navril et al., 2018; Lobanova et al., 2018).

4.2.2 Утицај климатских промена на хидролошке величине

Промене протицаја

Спроведеном анализом о релативној промени медијане годишњег Q на низу од 51 будућег периода није утврђен статистички значајан тренд промене током 21. века, у односу на референтни период (МК; $p=0,05$). Промена медијане Q у блиској и далекој будућности у односу на референтни период није статистички значајна, према резултатима MW теста ($p=0,05$). На годишњем нивоу, у поређењу са референтном вредношћу у периоду блиске будућности очекује се повећање медијане Q од око 13%, према оба сценарија. У периоду далеке будућности такође се очекује повећање, али је процентуална промена мања него у периоду блиске будућности. До краја века, према RCP8.5 повећање износи 2% (Табела 25).

Табела 25. Промена медијане протицаја (ΔQ) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период.

		RCP4.5		RCP8.5	
		2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	ΔQ (%)	13,1	12,5	13,4	2,0
Април–септембар	ΔQ (%)	-6,4	-3,3	-5,4	-24,0
Октобар–март	ΔQ (%)	34,7	33,0	30,4	29,8

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

За период април-септембар, током 21. века предвиђен је статистички значајан тренд смањења медијане Q у односу на референтни период, од $0,07\% \cdot \text{година}^{-1}$ (RCP4.5) и $0,34\% \cdot \text{година}^{-1}$ (RCP8.5) (МК; $p=0,05$). Током посматраног периода, очекује се смањење медијане Q у периоду блиске и далеке будућности, према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију, у односу на референтни период. Статистичка анализа MW тестом ($p=0,05$) показала је да је промена значајна само у периоду далеке будућности по пројекцијама RCP8.5 сценарија (-24%) (Табела 25).

Током периода октобар-март није уочен статистички значајан тренд промене медијане Q током 51 будућег периода, у односу на референтни период (МК; $p=0,05$). У блиској и далекој будућности очекује се повећање медијане Q од око 30%, у односу на референтни период. Према резултатима MW теста ($p=0,05$), промена је статистички значајна у периоду блиске будућности по RCP4.5 сценарију (Табела 25).

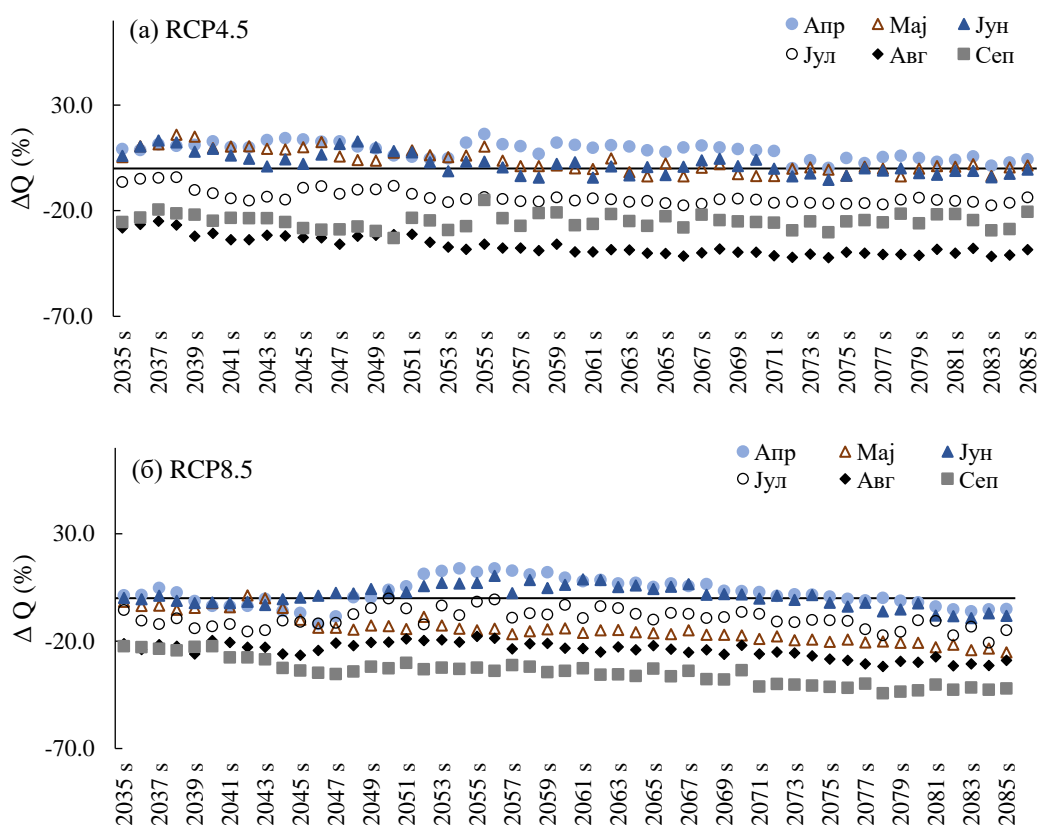
Анализом месечних података о промени медијане Q током 51 будућег периода у односу на референтни, статистички значајан тренд утврђен је само за месец мај по RCP8.5 сценарију (МК; $p=0,05$). У наведеном периоду, промена медијане Q у мају има тренд смањења од $0,38\% \cdot \text{година}^{-1}$, у односу на референтни период (Табела 26).

Табела 26. Тренд промене медијане протицаја (Q) током 51 будућег периода у односу на референтни период.

	RCP4.5		RCP8.5	
	Нагиб (Sen's Slope)	p (0,05)	Нагиб (Sen's Slope)	p (0,05)
Окт	0,02	0,59	-0,44	0,28
Нов	0,39	0,17	-0,28	0,12
Дец	0,33	0,16	0,39	0,10
Јан	0,23	0,13	0,56	0,75
Феб	-0,14	0,06	0,04	0,43
Март	-0,38	0,07	-0,35	0,16
Апр	-0,18	0,07	-0,15	0,11
Мај	-0,29	0,07	-0,38	0,05
Јун	-0,24	0,11	-0,12	0,18
Јул	-0,13	0,50	-0,09	0,76
Авг	-0,25	0,29	-0,19	0,08
Сеп	-0,01	0,67	-0,38	0,08

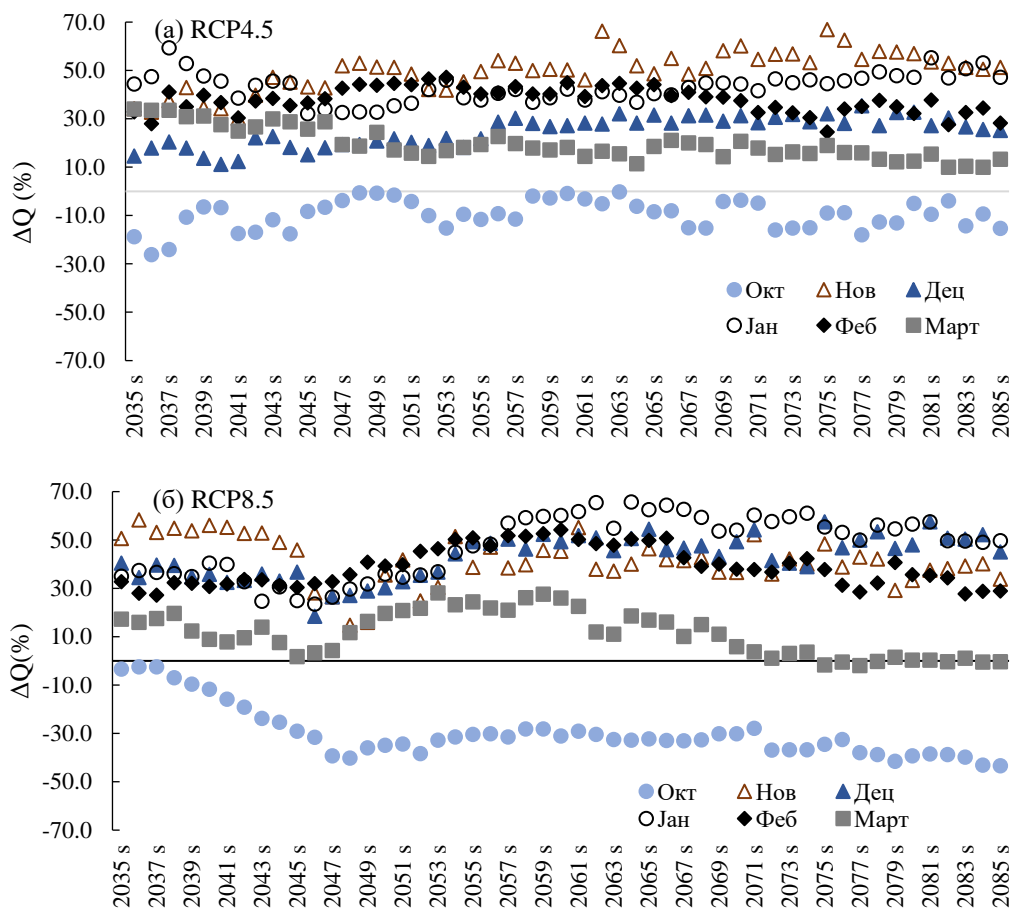
* Статистички значајан тренд према Mann-Kendall тесту (p=0,05) означен је црвеном бојом.

За месеце у периоду април-септембар смањење медијане Q током 51 будућег периода у односу на референтни предвиђено је за три, односно четири месеца, према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију, респективно (Слика 28). Највеће смањење очекују се у августу и септембру.



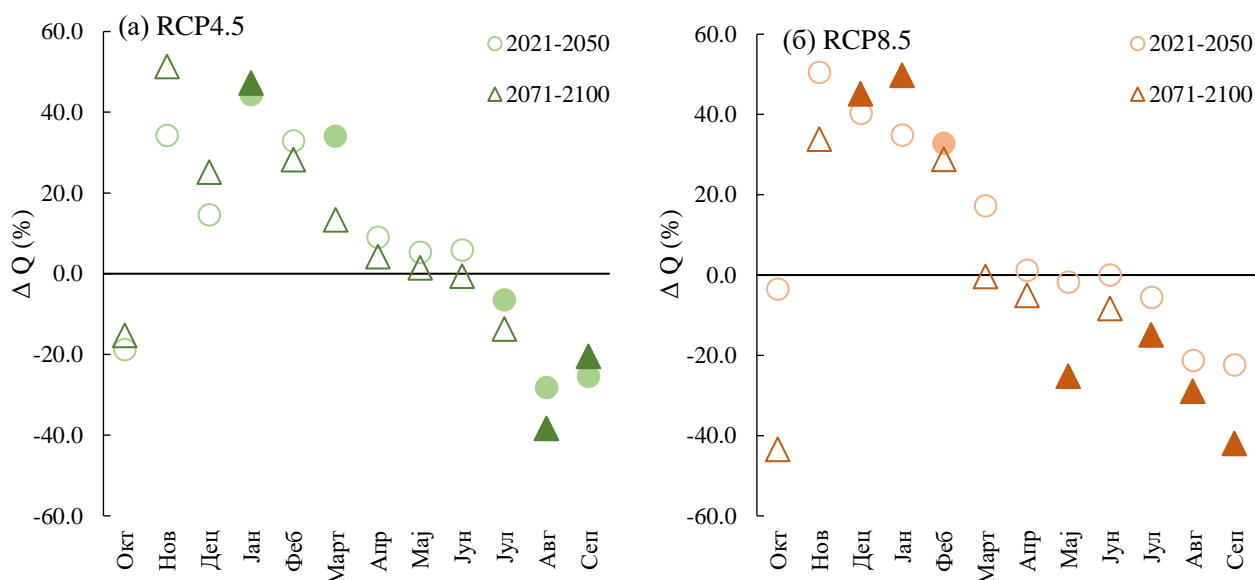
Слика 28. Релативна промена медијане протицаја (Q) у периоду април-септембар током 51 будућег периода у односу на референтни према RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б) сценарију.

Промену медијане Q у периоду октобар-март карактерише њено повећање током 51 будућег периода, за све месеце, изузев за октобар, према оба сценарија (Слика 29).



Слика 29. Релативна промена медијане протицаја (Q) у периоду октобар-март године током 51 будућег периода у односу на референтни, према RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б) сценарију.

Релативна промена месечне медијане Q у блиској и далекој будућности у односу на референтни период и резултати статистичке анализе урађене MW тестом ($p=0,05$) представљени су на слици 30. Према RCP4.5 сценарију, број месеци у којима је промена статистички значајна већи је у периоду блиске будућности (5 месеци) него у далекој будућности (3 месеца). Са друге стране, према RCP8.5 сценарију, број месеци са статистички значајном променом већи је у далекој будућности. У летњим и раним јесењим месецима предвиђено је смањење медијане Q у периодима блиске и далеке будућности, према оба сценарија. Повећање медијане Q карактеристично је за зимске месеце у оба посматрана периода. Највећа процентуална промена у оба будућа периода очекује се у августу и септембру (период април-септембар) и у јануару (период октобар-март), која је статистички значајна (MW; $p=0,05$), изузев у блиској будућности по RCP8.5 (Слика 30).



Слика 30. Унутаргодишња расподела релативног одступања медијане протицаја (Q) у блиској и далекој будућности по RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б), у односу на референтни период. Испуњене ознаке означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Kovačević-Majkić и Urošev (2014) објавили су да није утврђен статистички значајан тренд промене годишњег и месечног протицаја (Q) мереног на станици Дољевац, у периоду од 1961. до 2010. године. Спроведеном анализом у оквиру истраживања ове докторске дисертације такође није утврђен статистички значајан тренд промене годишњег Q у будућности у односу на референтни период. Промену медијане Q на месечном нивоу карактерише смањење медијане протицаја током летњих и раних јесењих месеци, као и смањење пикова Q у пролећним месецима и њихово померање ка зимским месецима, поготово у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију. Унутаргодишње промене Q уочене су и у истраживању спроведеном од стране Schneider et al. (2013). Очекиван је пораст медијане Q током свих месеци у периоду октобар-март, осим у октобру. Различитост промене Q у октобру у односу на остале месеце указује на продужење топле сезоне, што је закључено и у истраживањима рађеним за централну и источну Европу (Paradimitriou et al., 2016). Повећање Q током зимских и касних јесењих месеци предвиђено је за подручје слива Дунава (Lobanova et al., 2018), коме припада и слив Топлице. Претходно рађена истраживања утицаја климатских промена на Q за слив Топлице указују на смањење годишњег Q (Langsholt et al., 2013; Тодоровић и Плавшић, 2015), при чему су пројекције Q засноване на IPCC/SRES сценаријима, A2 и A1B (Nakicenovic et al., 2000), према којима се очекује смањење годишњих P.

Промене дубине подземне воде

Анализом тренда урађеног МК тестом ($p=0,05$) није утврђен статистички значајан тренд промене медијане DPZV на годишњем нивоу током 51 будућег периода у односу на референтни период. Резултати MW теста ($p=0,05$) такође су показали да очекивана промена медијане DPZV није статистички значајна у периоду блиске и далеке будућности, у односу на референтни период. Релативна промена медијане DPZV у два будућа периода представљена је у табели 27. У блиској и далекој будућности пројекције RCP4.5 сценарија указују на смањење DPZV, односно повећање NPZV у поређењу са референтним периодом. Смањење је предвиђено и по сценарију RCP8.5 у периоду блиске будућности, док је у периоду далеке будућности предвиђено благо повећање (0,7%).

Табела 27. Промена медијане дубине подземне воде (Δ DPZV) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период.

		RCP4.5		RCP8.5	
		2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	Δ DPZV (%)	-0,6	-0,8	-0,8	0,7
Април–септембар	Δ DPZV (%)	0,8	0,6	0,9	2,8
Октобар–март	Δ DPZV (%)	-2,6	-2,3	-2,0	-1,1

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

Промену медијане DPZV за период април-септембар током 51 будућег периода карактерише статистички значајан тренд повећања, односно смањења NPZV у односу на референтни период (МК; $p=0,05$). Током 21. века, предвиђено је смањење медијане DPZV од $0,01\% \cdot \text{година}^{-1}$ (RCP4.5), односно $0,04\% \cdot \text{година}^{-1}$ (RCP8.5). У односу на симулирану вредност DPZV у референтном периоду, у периоду блиске и далеке будућности очекује се повећање DPZV, при чему је промена статистички значајна само у далекој будућности по RCP8.5 (2,8%) (Табела 27).

За период октобар-март није утврђен статистички значајан тренд промене медијане DPZV током 51 будућег периода (МК; $p=0,05$), као и статистички значајна промена медијане у блиској и далекој будућности, у односу на референтни период (MW; $p=0,05$). Промену за период октобар-март карактерише смањење у блиској и далекој будућности према симулацијама оба сценарија, при чему се најмања промена очекује у далекој будућности по RCP8.5 сценарију (Табела 27).

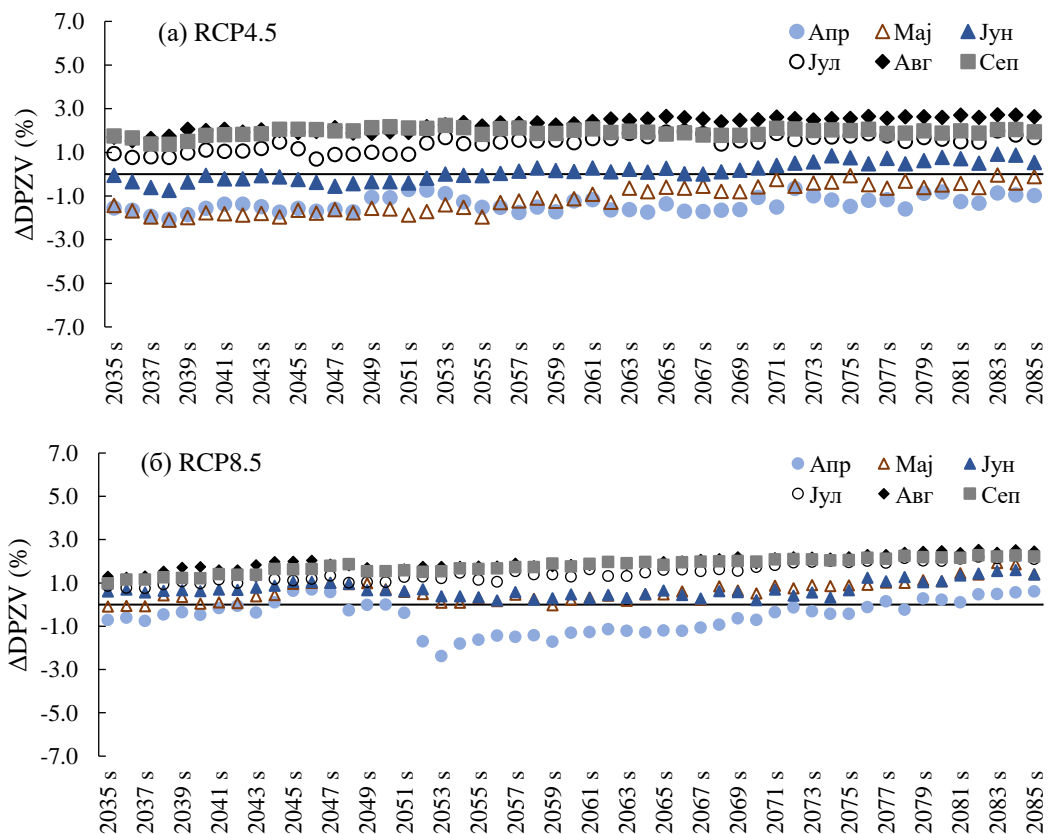
За месеце у периоду април-септембар, статистички значајан позитиван тренд промене медијане DPZV утврђен је у мају ($0,04\% \cdot \text{година}^{-1}$) по RCP4.5 и јулу ($0,03\% \cdot \text{година}^{-1}$) и августу ($0,02\% \cdot \text{година}^{-1}$), по RCP8.5 (МК; $p=0,05$) (Табела 28). Током периода октобар-март, статистички значајан позитиван тренд промене медијане DPZV очекује се у јануару ($0,01\% \cdot \text{година}^{-1}$), према RCP4.5 и новембру ($0,03\% \cdot \text{година}^{-1}$), према RCP8.5 (МК; $p=0,05$) (Табела 28).

Табела 28. Тренд промене медијане дубине подземне воде (DPZV) током 51 будућег периода у односу на референтни период.

	RCP4.5		RCP8.5	
	Нагиб (Sen's Slope)	p (0,05)	Нагиб (Sen's Slope)	p (0,05)
Окт	-0,01	0,57	0,03	0,35
Нов	-0,01	0,49	0,03	0,03
Дец	-0,01	0,06	-0,01	0,59
Јан	0,01	0,02	-0,03	0,34
Феб	0,01	0,12	0,00	0,78
Март	0,05	0,10	0,04	0,09
Апр	0,01	0,10	0,02	0,42
Мај	0,04	0,02	0,02	0,08
Јун	0,03	0,06	0,01	0,20
Јул	0,02	0,17	0,03	0,03
Авг	0,02	0,15	0,02	0,05
Сеп	0,00	0,75	0,02	0,06

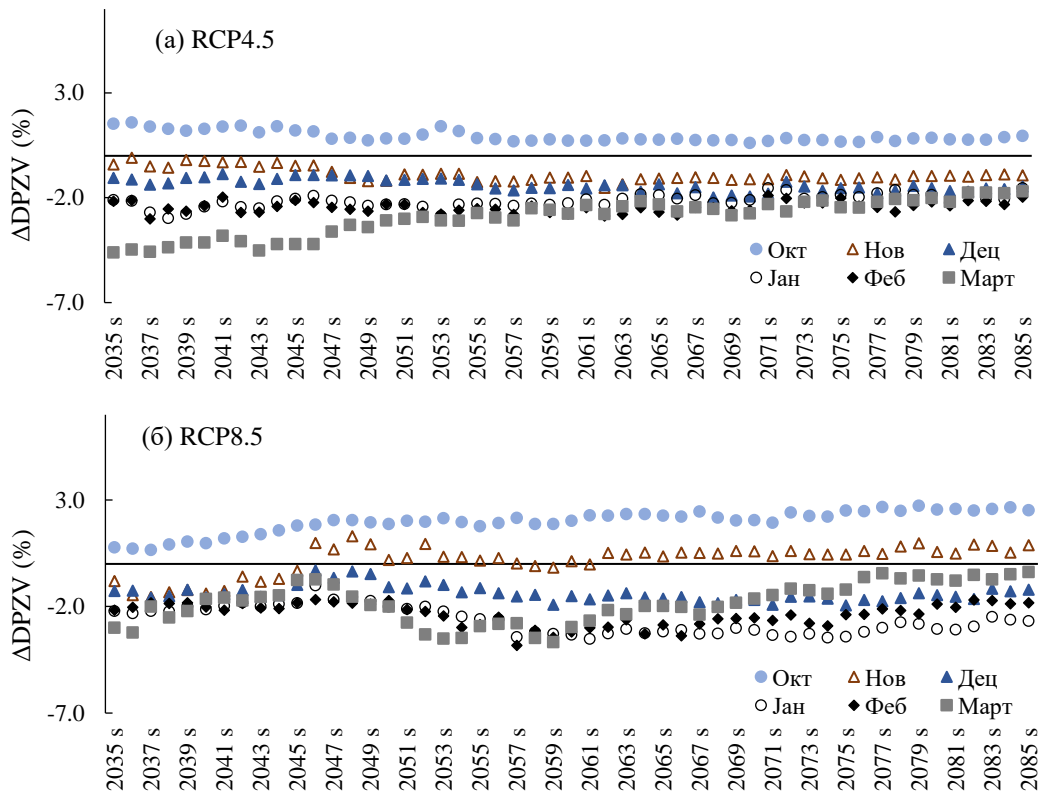
* Статистички значајан тренд према Mann-Kendall тесту ($p=0,05$) означен је црвеном бојом.

Промена медијане DPZV током 51 будућег периода у односу на референтни период по месецима представљена је на сликама 31 и 32. Анализа података о промени медијане DPZV током 51 будућег периода показала је да период април-септембар карактерише повећање DPZV, односно смањење NPZV у односу на референтни период. Изузетак је уочен у априлу и мају, као и у јуну током прве половине 21. века, према (RCP4.5) (Слика 31 (а)). Према пројекцијама RCP8.5 сценарија, повећање DPZV очекује се у свим месецима, осим у априлу када је уочено да промена иде и у смеру повећања и смањења (Слика 31 (б)).



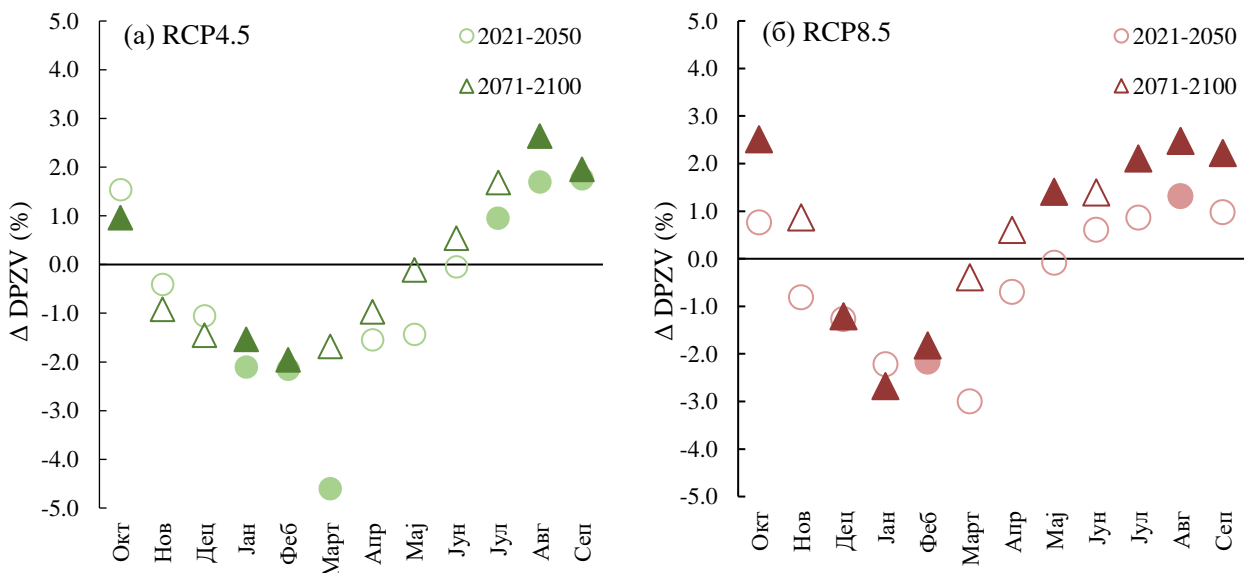
Слика 31. Релативна промена медијане дубине подземне воде (DPZV) у периоду април-септембар током 51 будућег периода у односу на референтни, према RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б) сценарију.

Пројекције RCP4.5 сценарија указују да се у месецима октобар-март очекује смањење DPZV током 51 периода, изузев у октобру (Слика 32(а)). Према RCP8.5 сценарију, повећање DPZV предиковано је у октобру, као и у већем броју периода у новембру (Слика 32(б)).



Слика 32. Релативна промена медијане дубине подземне воде (DPZV) у периоду октобар-март током 51 будућег периода у односу на референтни према RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б) сценарију.

Промена медијане DPZV на месечном нивоу у блиској и далекој будућности у односу на референтни период креће се у интервалу од -4,6% до 2,6%, а MW тест ($p=0,05$) показао је да је промена значајна у 44% месеци (Слика 33).



Слика 33. Унутаргодишња расподела релативног одступања медијане дубине подземне воде (DPZV) у блиској и далекој будућности по RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б), у односу на референтни период. Испуњене ознаке означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Повећање DPZV у будућности током периода април-септембар које се наставља и у октобру и већини периода у новембру (RCP8.5), уз смањење Q у летњим и раним јесењим месецима указује на продужење сушног периода услед загревања и повећања PET (Kovats et al., 2014). Смањење DPZV у будућности током периода октобар-март, а повећање током април-септембар у складу је са резултатима представљеним у Техничком извештају IPCC-а (Bates et al., 2008). Наведене промене појачавају сезоналност промена у хидролошком режиму, што се наводи као могућа карактеристика утицаја климатских промена на хидролошки режим (Taylor et al., 2013).

4.2.3 Процена утицаја климатских промена на доступност водних ресурса

Симулирани утицај климатских промена на доступност воде и његове могуће последице на проучаваном подручју, на крају века, према строжијем сценарију, обједињене су у наставку. Изабран је крај века јер су у њему разлике између сценарија најизраженије, па су јасно испољени могући утицаји климатских промена.

На годишњем нивоу, МК тестом ($p=0,05$) није утврђен статистички значајан тренд промене P, Q и DPZV током 51 будућег периода ни по једном сценарију. Статистички значајан тренд повећања промене очекује се за Tmean, према оба сценарија, као и за PET, али само према RCP8.5 сценарију. У поређењу са референтним периодом, до краја века очекује статистички значајно (MW; $p=0,05$) повећање годишње P (7,2%) и годишње PET (14,5%), према пројекцијама RCP8.5 сценарија. Повећања P и PET на годишњем нивоу резултоваће повећањем годишњег Q од само 2% и повећањем DPZV од 0,7%, при чему наведене промене нису статистички значајне према MW тесту ($p=0,05$). Стога се на годишњем нивоу не очекују знатне промене у доступности водних ресурса на проучаваном подручју, што је у складу са IPCC извештајем (Kovats et al., 2014).

Поред утицаја климатских промена на доступност воде на годишњем нивоу праћене су промене и на месечном нивоу. За испитивани период 2021-2100, МК тест ($p=0,05$) показао је статистички значајан тренд повећања промене медијане PET за све месеце, по RCP8.5 сценарију. У истим условима, статистички значајан тренд промене P, Q и DPZV детектован је само за неколико месеци (један за P и Q и три за DPZV). Статистичка значајност промене P, Q и DPZV на месечном нивоу у блиској (2035 s) и далекој будућности (2085 s) испитивана је MW тестом ($p=0,05$). У периоду блиске будућности (RCP4.5), њихова промена је значајна у марту и јулу. До краја века, према пројекцијама оба сценарија, промена је статистички значајна у јануару и августу, као и у децембру, по RCP8.5 сценарију. Према пројекцијама, количина доступне воде у будућности ће се повећати у месецима октобар-март, а смањивати у летњим месецима. Овакав тип промене указује на израженију неуниформност месечне расподеле P, Q и DPZV у будућности.

Већи део слива реке Топлице карактерише кишни режим, који се одликује, у данашњим климатским условима, највећим протицајима од фебруара до маја, уз најмање протицаје у летњим месецима (август и септембар). Део слива на већим надморским висинама има снежни режим и обилује водом у пролеће, услед пролећних киша и ослобађања зимских падавина, које су се складиштиле као снег током хладнијих месеци. Измене у режиму падавина услед климатских промена имаће велики утицај на део слива са кишним режимом, док ће будуће температуре имати утицај на зоне са вишом надморском висином и већим снежним покривачем, с обзиром да сливоде са снежним режимом одликује изражена осетљивост на промене температуре (Praskievicz и Chang, 2009).

На крају века, према RCP8.5, због предвиђеног повећања P и T у зимским месецима, очекује се знатно повећање Q (29–50%) у периоду од новембра до фебруара. Очекивано повећање може бити изазвано повећањем P, као и излучивањем већег дела падавина у облику кише, а не снега (Langsholt et al., 2013; Kovats et al., 2014), што је у складу са резултатима

других аутора за централну Европу (Green et al., 2011; Schneider et al., 2013). Као последица оваквих промена Q, очекује се смањење дубине подземних вода у првом водоносном слоју (повећање нивоа подземних вода), али са месец дана закашњења, од децембра до марта (RCP8.5, 2085s).

Током референтног периода, највеће вредности протицаја на реци Топлици јављале су се у марту и априлу, што је у складу са класификацијом од стране Haines et al. (1988), по којој реке у умерено континенталној зони имају пик почетком или средином пролећа. Ефекат загревања на промене у протицају процењен је поређењем симулираних вредности у марту за период блиске и далеке будућности по RCP8.5. У блиској будућности, због повећања P (14,7%), Tmean (2°C) и PET (9%), предвиђен је пораст Q од 17,3% и смањење DPZV (повећање NPZV) од 3%. У периоду далеке будућности, двоструко повећање P (29,5%) условиће смањење Q и DPZV од само 0,4%, због двоструког повећања Tmean (4,5°C) и PET (20%). Ово указује да ће се до краја века, као резултат загревања, максималне вредности Q јавити пре марта. Померање пролећног пика један месец раније на крају века (RCP8.5) је добијено за слив Дунава (Lobanova et al., 2018), чији је подслив Топлица. Ово померање унапред уочено је и код DPZV услед промене у хидролошком циклусу у планинском делу слива, што је у складу са констатацијом Taylor et al. (2013). С обзиром да река Топлица спада у бујичне водотоке (Ристић и сар., 2009), позитивна страна предвиђеног смањења Q током пролећа, огледа се у смањеном ризику од поплава у том периоду, када су генерално забележене највеће вредности Q током историјског периода. Истовремено, зимско повећање протицаја повећава ризик од поплаве у том периоду.

Предикције за период април-септембар указују на смањење P и повећање Tmean и PET. У таквим условима, до краја века потребе за наводњавањем биће у порасту. Промена месечних вредности Q на реци Топлица показује да су најмањи протицаји карактеристични за период од августа до октобра. Према пројекцијама за далеку будућност, смањење P у летњим месецима (у августу је предвиђено статистички значајно смањење од 34,5%) и статистички значајно повећање PET, резултоваће знатним процентуалним смањењем Q (август 29%, септембар 42% и октобар 43,4%). Симулирано смањење у септембру и октобру такође је статистички значајно, према MW тесту ($p=0,05$). Статистички значајно повећање DPZV очекује се од јула до октобра, у распону од 2,1% до 2,5%. Током осам месеци у години предвиђено је смањење Q и пораст DPZV, што ће продужити период смањене количине воде.

На алувијалном подручју реке Топлице, становништво се традиционално бави пољопривредом. Смањена доступност воде у периоду април-септембар може имати негативан утицај на пољопривреду, с обзиром да се тај период поклапа са вегетационом сезоном великог броја култура које се гаје на испитиваном подручју. Пошто је реч о значајном смањењу Q и повећању DPZV у периоду када је подручје иначе угрожено недостатком воде, смањење у доступности вода у периоду април-септембар може се негативно одразити осим на пољопривреду и на водоснабдевање, рибарство и туризам овог подручја. Смањење количине и повећање температуре речне воде утицаће на квалитет воде, што би могло угрозити речни екосистем и смањити количине воде високог квалитета. Ово је глобалан проблем који се јавља у подручјима где се очекује смањење количине воде (Schneider et al., 2013; van Vliet et al., 2013).

Да би се ублажили проблеми изазвани климатским променама потребно је применити мере адаптације у погледу одрживог управљања водним ресурсима (Kovats et al., 2014). Као што је у многим радовима наглашено (Zhang и Huang, 2013; Refsgaard et al., 2016; Reshmidevi et al., 2018), сва ова предвиђања су веома зависна од избора климатских модела. Највеће неизвесности уносе климатски модели (Karlsson et al., 2016; Pechlivanidis et al., 2017; Shen et al., 2018), а додатно има утицаја и хидролошки модел и модел за подземне воде (Singh и Kumar, 2010; Gädeke et al., 2014; Emam et al., 2018).

Резултати представљени у овом истраживању, као и бројним другим, потврђују да ће климатске промене изменити хидролошки циклус, а тиме и хидролошки режим одређеног подручја, чиме се мења и доступност воде (Green et al., 2011; Schneider et al., 2013; Donnelly et al., 2017).

4.3 Анализа утицаја климатских промена на обезбеђеност усева и засада водом

4.3.1 Утицај климатских промена на климатолошке величине за подручје општина у Топличком округу

У циљу процене обезбеђености усева и засада водом у условима климатских промена на подручју округа Топлице (општине Прокупље, Житорађа, Куршумлија и Блаце) дат је преглед симулираних величина и промена средње температуре ваздуха (T_{mean}), потенцијалне евапотранспирације (PET), падавина (P) и ефективних падавине (P_{eff}), за метеоролошке станице Прокупље и Куршумлија. Прорачун података рађен је за референтни период (1971-2000), периоде блиске (2021-2050) и далеке будућности (2071-2100), за сценарије RCP4.5 и RCP8.5. Квантификовање утицаја климатских промена на посматране варијабле извршено је рачунањем апсолутне промене (одсупање симулиране вредности варијабле у будућим периодима у односу на референтни период) и релативне промене (према једначини (19)), а статистичка значајност добијених промена процењена је Mann-Whitney тестом ($p=0,05$). Испитивање је рађено за временске интервале: година, месец и периоде април-септембар и октобар-март.

Симулације средње температуре ваздуха (T_{mean}) за метеоролошке станице Прокупље и Куршумлија

Статистичка анализа је показала да се до краја века на подручју округа Топлице (четири општине) може очекивати статистички значајно загревање у свим испитиваним временским интервалима (година, месец и периоди април-септембар и октобар-март) (MW; $p=0,05$). Величина промене установљена анализом података са ове две станице веома је слична за подручја посматраних општина, са нешто мањим вредностима за подручје општина Куршумлија и Блаце. Пројекције оба сценарија указују на повећање температуре у блиској и далекој будућности у односу на референтни период. Током периода блиске будућности могу се очекивати сличне вредности промене годишње медијане T_{mean} за оба сценарија, док је у периоду далеке будућности повећање скоро двоструко веће према сценарију RCP8.5.

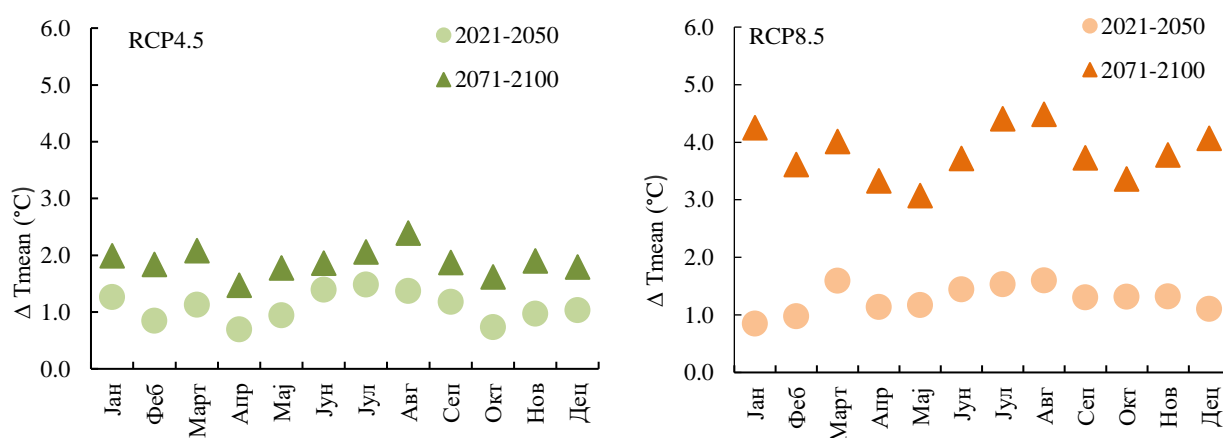
Табела 29. Вредности и промена медијане средње температуре (T_{mean}) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период, метеоролошка станица Прокупље.

		RCP4.5			RCP8.5	
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	T_{mean} (°C)	10,8	11,9	12,7	12,1	14,6
	ΔT_{mean} (°C)		1,1	1,9	1,3	3,8
Април – септембар	T_{mean} (°C)	17,1	18,3	19,0	18,5	20,9
	ΔT_{mean} (°C)		1,2	1,9	1,4	3,8
Октобар – март	T_{mean} (°C)	4,3	5,3	6,2	5,5	8,2
	ΔT_{mean} (°C)		1,0	1,9	1,2	3,8

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann-Whitney $p=0,05$).

За метеоролошку станицу Прокупље до краја 2100. године према RCP8.5 сценарију предвиђено је повећање медијане годишње T_{mean} од 3,8 °C у односу на референтни период. Повећање температуре у току периода април – септембар истоветно је као и повећање на годишњем нивоу, уз максимално повећање до краја века као и код годишње T_{mean} по RCP8.5 сценарију. Период октобар – март такође карактерише повећање температуре које у периоду далеке будућности износи 1,9 °C према RCP4.5, односно 3,8 °C према RCP8.5 сценарију (Табела 29).

На слици 34 представљена је промена медијане T_{mean} по месецима, за периоде блиске и далеке будућности у односу на референтни период за станицу Прокупље. Опсег повећања температуре по месецима у далекој будућности износи 1,5–2,4 °C према RCP4.5, односно 3,1–4,5 °C према RCP8.5 (Слика 34). На крају века очекује се знатно веће загревање у летњим и зимским месецима, при чему се јул и август истичу као месеци са највећим повећањем медијане T_{mean} од преко 2 °C (RCP4.5), односно 4 °C (RCP8.5). Најмање повећање предвиђено је за месеце април, мај и октобар.



Слика 34. Промена медијане средње температуре (T_{mean}) у односу на референтни период, метеоролошка станица Прокупље. Испуњене ознаке означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Табела 30. Вредности и промена медијане средње температуре (T_{mean}) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период, метеоролошка станица Куршумлија.

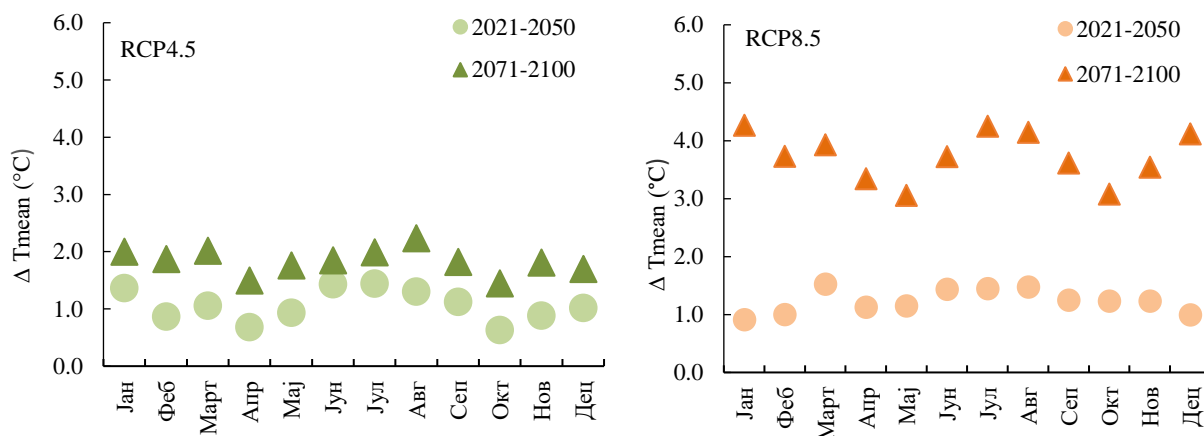
		RCP4.5		RCP8.5	
		1971-2000	2021-2050	2021-2050	2071-2100
Година	T_{mean} (°C)	10,0	11,0	11,2	13,7
	ΔT_{mean} (°C)		1,1	1,2	3,7
Април-септембар	T_{mean} (°C)	16,0	17,2	17,3	19,7
	ΔT_{mean} (°C)		1,2	1,3	3,7
Октобар – март	T_{mean} (°C)	3,9	4,8	5,0	7,6
	ΔT_{mean} (°C)		1,0	1,2	3,8

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann-Whitney $p=0,05$).

За метеоролошку станицу Куршумлија до краја века према RCP8.5 сценарију предвиђено је повећање медијане годишње T_{mean} од 3,7 °C у односу на референтни период. У току периода април – септембар максимално повећање T_{mean} очекује се у периоду далеке будућности по сценарију RCP8.5 (3,7 °C). За период октобар – март за период далеке

будућности очекивано је повећање T_{mean} од 1,8 °C према RCP4.5, односно 3,8 °C према RCP8.5 сценарију (Табела 30).

На основу података из тачке модела најближе станици Куршумлија, повећање температуре по месецима у односу на референтни период у далекој будућности креће се у интервалу од 1,4–2,2 °C (RCP4.5), односно 3,1–4,3 °C (RCP8.5) (Слика 35). У летњим и зимским месецима очекиване су највеће вредности повећања T_{mean} . До краја века повећање T_{mean} у јулу и августу износи око 2 °C (RCP4.5), односно 4 °C (RCP8.5), а највеће повећање медијане T_{mean} у односу на референтни период предвиђено је у јануару, 4,3 °C, према RCP8.5 сценарију. Април, мај и октобар карактерише најмање апсолутно повећање T_{mean} у односу на референтни период.



Слика 35. Промена медијане средње температуре (T_{mean}) у односу на референтни период, метеоролошка станица Куршумлија. Испуњене ознаке представљају статистички значајну промену за дати месец према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Симулације потенцијалне евапотранспирације (PET) за метеоролошке станице Прокупље и Куршумлија

Пројекције PET анализирани су у циљу одређивања величине промене медијане PET у условима климатских промена. Симулиране вредности PET у директној су зависности од симулираних вредности T , с обзиром на то да је за прорачун коришћена метода која се заснива на температури (једначина (1)). Очекивано је да повећање температуре услови повећање PET.

Резултати анализе указују на статистички значајно повећање медијане PET у будућности у односу на референтни период за податке са станица Прокупље на нивоу године и периода април-септембар и октобар-март (MW; $p=0,05$) (Табела 31). Током референтног периода (1971-2000) симулиране количина просечне годишње PET износи 873 mm. У току периода блиске будућности очекује се повећање медијане PET од 35 mm (RCP4.5), односно 40 mm (RCP8.5) у односу на референтни период. У далекој будућности предвиђено је знатно веће повећање према RCP8.5 сценарију (116 mm), док је према RCP4.5 повећање 57 mm у односу на референтни период.

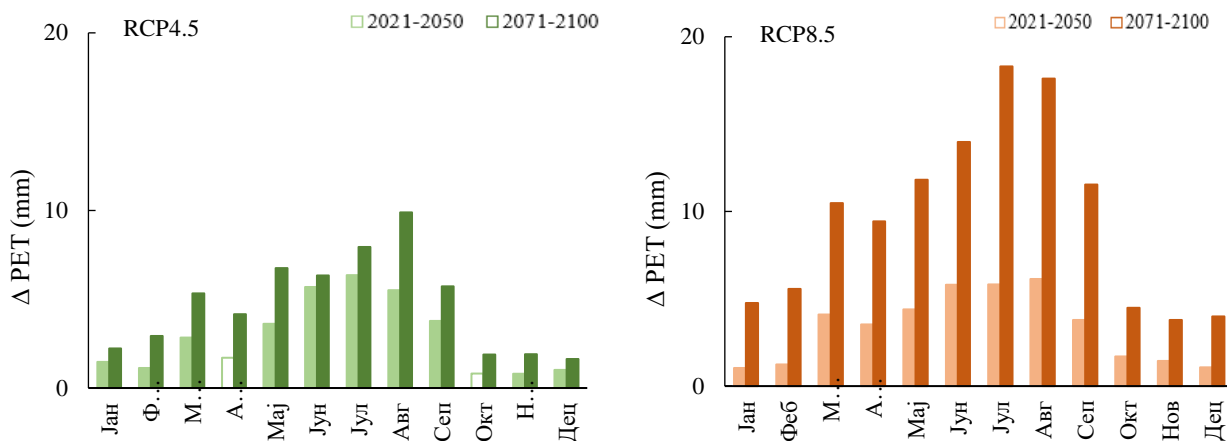
Симулирана сума PET за станицу Прокупље за референтни период током периода април-септембар износи просечно 684 mm (Табела 31). До краја века током периода април-септембар очекује се повећање медијане PET од 41 mm према RCP4.5, односно 83 mm према RCP8.5 сценарију. За октобар-март референтног периода симулирана је сума PET од просечно 189 mm. У поређењу са референтним периодом, највеће повећање медијане PET у периоду октобар-март очекује се у периоду далеке будућност по RCP8.5 сценарију и износи 33 mm (Табела 31).

Табела 31. Вредности и промена медијане потенцијалне евапотранспирације (РЕТ) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период, метеоролошка станица Прокупље.

		RCP4.5		RCP8.5		
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	PET (mm)	873	908	930	913	989
	Δ PET (mm)		35	57	40	116
	Δ PET (%)		4,0	6,5	4,6	13,3
Април – септембар	PET (mm)	684	711	725	714	767
	Δ PET (mm)		27	41	30	83
	Δ PET (%)		3,9	6,0	4,4	12,1
Октобар – март	PET (mm)	189	197	205	200	222
	Δ PET (mm)		8	16	11	33
	Δ PET (%)		4,2	8,5	5,8	17,5

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

Анализом месечних података из тачке модела најближе метеоролошкој станици Прокупље, у односу на референтни период утврђено је статистички значајно повећање медијане РЕТ (MW; $p=0,05$) у свим месецима по оба сценарија, изузев априла и октобра према RCP4.5 у периоду блиске будућности. Максималне вредности повећања медијане РЕТ очекују се у далекој будућности по RCP8.5 сценарију. Карактеристично је да су највеће промене медијане РЕТ у односу на референтни период добијене у току летњих месеци. Максимално повећање очекује се у јулу и августу. Интервал повећања месечне медијане РЕТ до краја века креће се од 1,6 до 9,9 mm према RCP4.5, а према RCP8.5 од 3,8 до 18,3 mm (Слика 36).



Слика 36. Промена медијане потенцијалне евапотранспирације (РЕТ) у односу на референтни период, метеоролошка станица Прокупље. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Према пројекцијама климатских модела и два RCP сценарија, за метеоролошку станицу Куршумлија у будућности се очекује статистички значајно повећање медијане РЕТ у односу на референтни период у току године, периода април-септембар и октобар-март (MW; $p=0,05$) (Табела 32). Током референтног периода симулирана количина просечне годишње РЕТ износи 852 mm. У периоду далеке будућности очекује се повећање медијане годишње РЕТ од 57 mm (RCP4.5) и 120 mm (RCP8.5) у односу на референтни период.

За период април-септембар током референтног периода предвиђена је сума РЕТ од просечно 665 mm. У односу на референтни период, у будућности се очекује статистички значајно повећање медијане РЕТ за период април-септембар (MW; $p=0,05$). До краја века

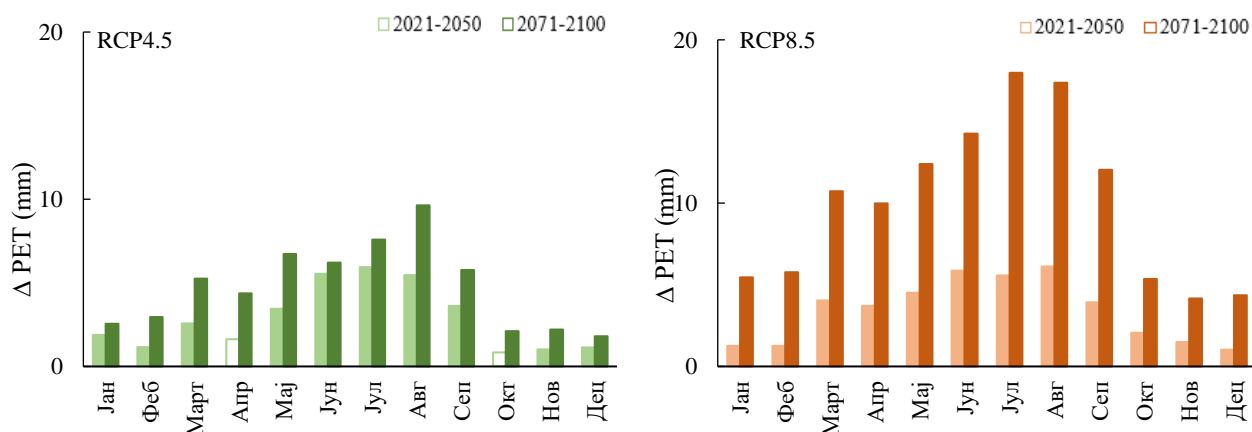
очекује се повећање медијане PET од 40 mm (RCP4.5) и 84 mm (RCP8.5) (Табела 32). Просечна сума PET током периода октобар-март у референтном периоду износи просечно 187 mm. У односу на ту вредност, у будућим периодима по оба сценарија предвиђено је статистички значајно повећање PET, при чему се највеће повећање очекује у периоду далеке будућности по RCP8.5 (36 mm).

Табела 32. Вредности и промена медијане потенцијалне евапотранспирације PET на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период, метеоролошка станица Куршумлија.

		RCP4.5			RCP8.5	
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	PET (mm)	852	886	909	893	972
	Δ PET (mm)		34	57	41	120
	Δ PET (%)		4,0	6,7	4,8	14,1
Април – септембар	PET (mm)	665	691	705	695	749
	Δ PET (mm)		26	40	30	84
	Δ PET (%)		3,9	6,0	4,5	12,6
Октобар – март	PET (mm)	187	195	204	198	223
	Δ PET (mm)		8	17	11	36
	Δ PET (%)		4,3	9,1	5,9	19,3

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann-Whitney $p=0,05$).

Месечне вредности симулиране PET за метеоролошку станицу Куршумлија у референтном и будућим периодима највеће су у летњим месецима (јун-август). У односу на референтни период, предвиђена су статистички значајна повећања медијана месечних PET у будућности по оба сценарија (MW; $p=0,05$), осим у априлу и октобру у периоду блиске будућности према RCP4.5. За станицу Куршумлија до краја века очекује се повећање у распону 1,8-9,6 mm (RCP4.5) и 4,2-18 mm (RCP8.5) (Слика 37). Највеће вредности повећања очекивана су у јулу и августу.



Слика 37. Промена медијане потенцијалне евапотранспирације (PET) у односу на референтни период, метеоролошка станица Куршумлија. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Симулације падавина (P) за метеоролошке станице Прокупље и Куршумлија

Количине симулираних падавина за метеоролошке станице Прокупље и Куршумлија у току године, периода април-септембар и октобар-март за референтни и будуће периоде представљене су у табелама 33 и 34, респективно. За податке са обе станице карактеристично је да пројекције оба сценарија у периодима блиске и далеке будућности указују на благо повећање суме просечних годишњих P у односу на референтни период. Промена медијане P на годишњем нивоу није статистички значајна у периодима блиске и далеке будућности према RCP4.5 и периоду блиске будућности према RCP8.5 (MW; $p=0,05$) у односу на референтни период. Према резултатима Mann-Whitney теста ($p=0,05$), статистички значајна промена детектована је само у периоду далеке будућности према RCP8.5 сценарију. Просечна сума P у периоду април-септембар у будућности ће се смањивати у односу на референтни период, али промена није статистички значајна (MW; $p=0,05$). Промена просечне суме P у периоду октобар-март у свим испитиваним периодима је позитивна у односу на референтни период и статистички значајна (MW; $p=0,05$).

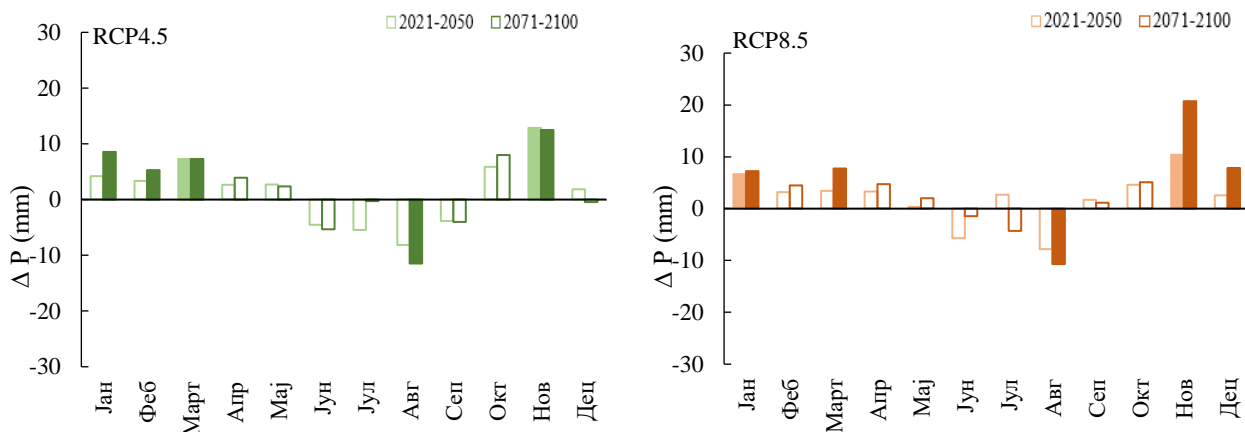
Током референтног периода за метеоролошку станицу Прокупље симулирана количина просечних годишњих P износи 543 mm. До краја века очекује се повећање просечних годишњих P од 26 mm (RCP4.5) и 44 mm (RCP8.5) у односу на референтни период (Табела 33). Карактеристично је да очекивано повећање падавина није равномерно распоређено током године. Пројекције оба сценарија и за блиску и далеку будућност, показују смањење падавина током периода април-септембар, а повећање током периода октобар-март (Табела 33). У периоду април-септембар највеће смањење P у односу на референтну вредност очекује се у блиској будућности према пројекцијама RCP4.5 и износи просечно 16 mm. У периоду октобар-март у свим испитиваним периодима, према пројекцијама оба сценарија, очекује се статистички значајно повећање медијане P (MW; $p=0,05$). Израженије промене очекују се у периоду далеке будућности, а максимално повећање очекује се према RCP8.5 сценарију (53 mm) (Табела 33).

Табела 33. Вредности и промена медијане падавина (P) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период, метеоролошка станица Прокупље.

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	P (mm)	543	562	569	568	587
	ΔP (mm)		19	26	25	44
	ΔP (%)		3,5	4,8	4,6	8,1
Април – септембар	P (mm)	302	286	288	297	294
	ΔP (mm)		-16	-14	-5	-8
	ΔP (%)		-5,3	-4,6	-1,7	-2,6
Октобар – март	P (mm)	240	276	282	271	293
	ΔP (mm)		36	42	31	53
	ΔP (%)		15,0	17,5	12,9	22,1

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

На слици 38 представљене су промене медијана месечних P у будућности у односу на референтни период. За летње месеце је смањење медијане P, што условљава смањење на нивоу периода април-септембар. Насупрот томе, у зимским месецима које обухвата период октобар-март, очекује се повећање медијане месечних P у будућности у поређењу са референтном вредношћу. Изузетак се јавља у месецу децембру у далекој будућности према RCP4.5, за који се очекује незнатно смањење медијане P од 0,43 mm.



Слика 38. Промена медијане падавина (P) у односу на референтни период, метеоролошка станица Прокупље. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

У табели 34 дат је преглед симулираних вредности P у току године и за периоде април-септембар и октобар-март за метеоролошку станицу Куршумлија, као и срачунате вредности промене P у будућим периодима у односу на референтни. У односу на симулирану референтну вредност просечне годишње P (639 mm), предвиђено повећање медијане P до краја века износи 30 mm (RCP4.5), односно 38 mm (RCP8.5). За период април-септембар највеће смањење медијане P у односу на референтни период очекивано је по RCP4.5 сценарију у блиској будућности (21 mm). Период октобар-март одликује повећање медијане P у посматраним будућим периодима у односу на референтни, са највећом променом у далекој будућности по RCP8.5 сценарију (47 mm).

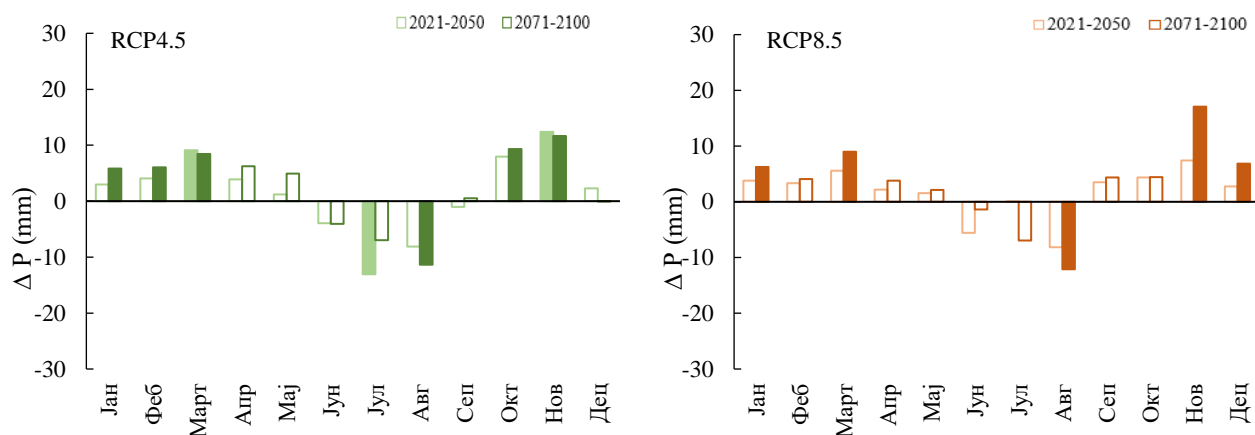
Табела 34. Вредности и промена медијане падавина (P) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период, метеоролошка станица Куршумлија.

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	P (mm)	639	657	669	660	677
	ΔP (mm)		18	30	21	38
	ΔP (%)		2,8	4,7	3,3	5,9
Април – септембар	P (mm)	357	336	347	351	347
	ΔP (mm)		-21	-10	-6	-10
	ΔP (%)		-5,9	-2,8	-1,7	-2,8
Октобар – март	P (mm)	282	320	323	309	329
	ΔP (mm)		38	41	27	47
	ΔP (%)		13,5	14,5	9,6	16,7

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann-Whitney $p=0,05$).

Промена медијане месечних P за метеоролошку станицу Куршумлија идентична је симулираним променама за метеоролошку станицу Прокупље. Летње месеце одликује смањење медијане P, а зимске повећање. Највећи пораст P у односу на референтни период очекује се у новембру током будућих периода. Према пројекцијама климатских модела, у будућности се очекује највеће смањење медијане P у односу на референтни период у августу,

осим у периоду блиске будућности по RCP4.5 сценарију када је предвиђено највеће смањење у јулу. За разлику од осталих летњих месеци у јулу блиске будућности по RCP8.5 сценарију предвиђено је незнатно повећање P (0,03 mm). Mann-Whitney тестом ($p=0,05$) утврђено је постојање статистички значајне промене за неке месеце (Слика 39).



Слика 39. Промена медијане падавина (P) у односу на референтни период, метеоролошка станица Куршумлија. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Симулације ефективних падавина (P_{eff}) за метеоролошке станице Прокупље и Куршумлија

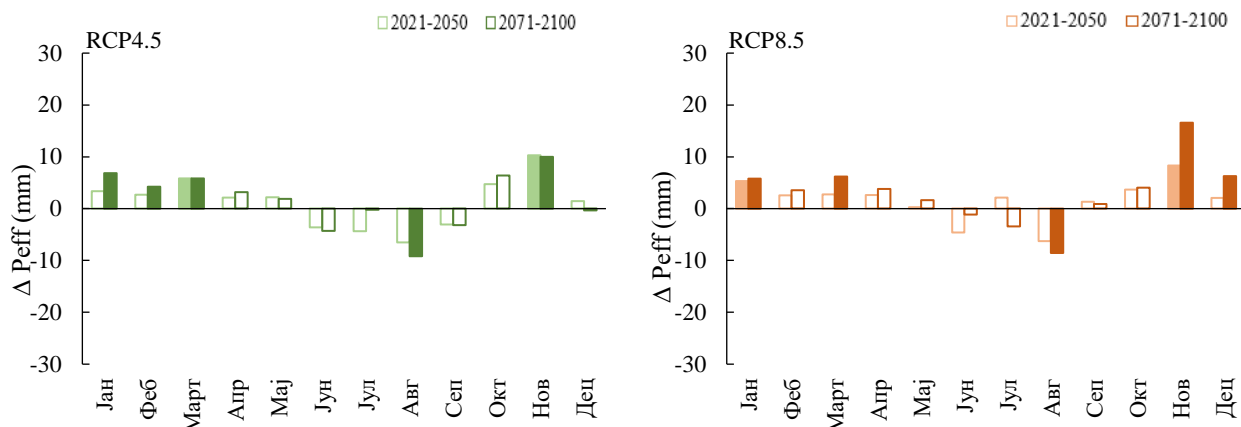
У току референтног периода симулирана је просечна сума P_{eff} од 434 mm (Прокупље) и 511 mm (Куршумлија). Описане карактеристике промена медијане P у будућности у односу на референтни период односе се и на промене медијане P_{eff} .

У табели 35 дат је преглед симулираних вредности P_{eff} у току године и за периоде април-септембар и октобар-март за метеоролошку станицу Прокупље, као и срачунате вредности промене P_{eff} у будућим периодима у односу на референтни, а на слици 40 представљене су предиковане промене медијане месечне суме ефективних падавина (P_{eff}) у односу на референтни период.

Табела 35. Вредности и промена медијане ефективних падавина (P_{eff}) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период, метеоролошка станица Прокупље.

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	P_{eff} (mm)	434	450	455	454	470
	ΔP_{eff} (mm)		16	21	20	36
	ΔP_{eff} (%)		3,7	4,8	4,6	8,3
Април – септембар	P_{eff} (mm)	242	229	230	237	235
	ΔP_{eff} (mm)		-13	-12	-5	-7
	ΔP_{eff} (%)		-5,4	-5,0	-2,1	-2,9
Октобар – март	P_{eff} (mm)	192	221	225	217	235
	ΔP_{eff} (mm)		29	33	25	43
	ΔP_{eff} (%)		15,1	17,2	13,0	22,4

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann-Whitney $p=0,05$).



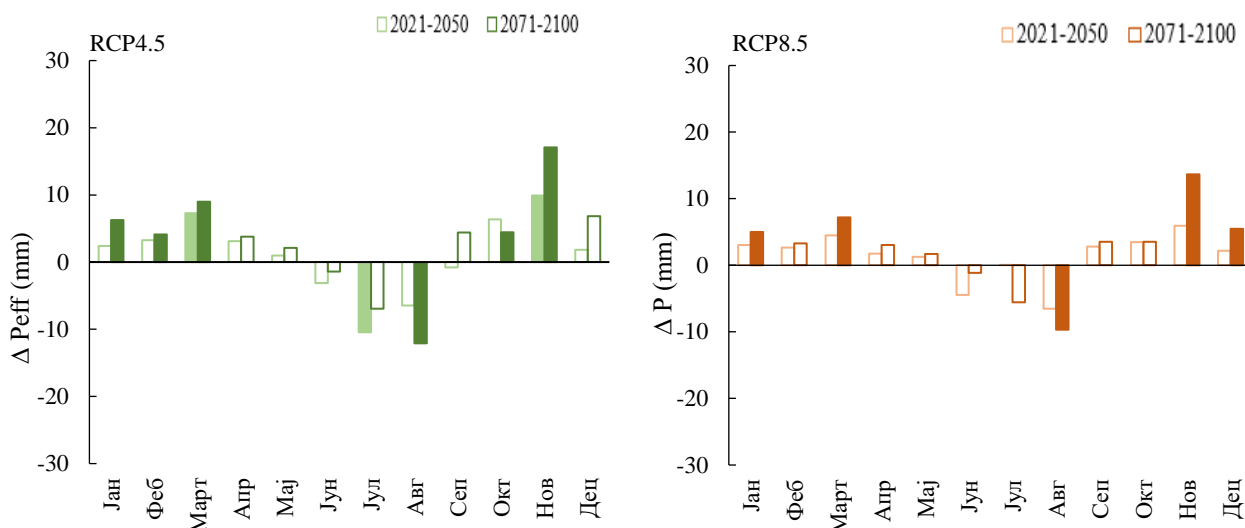
Слика 40. Промена медијане ефективних падавина (P_{eff}) у односу на референтни период, метеоролошка станица Прокупље. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Симулиране P_{eff} у току године, периода април-септембар и октобар-март за метеоролошку станицу Куршумлија, као и срачунате вредности промене P_{eff} у будућим периодима у односу на референтни дате су у табели 36. На слици 41 представљене су симулиране промене медијане месечне суме ефективних падавина (P_{eff}) у односу на референтни период.

Табела 36. Вредности и промена медијане ефективних падавина (P_{eff}) на нивоу године и за периоде април-септембар и октобар-март, у односу на референтни период, метеоролошка станица Куршумлија.

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Година	P_{eff} (mm)	511	526	535	528	541
	ΔP_{eff} (mm)		15	24	17	30
	ΔP_{eff} (%)		2,9	4,7	3,3	5,9
Април – септембар	P_{eff} (mm)	286	269	277	281	278
	ΔP_{eff} (mm)		-17	-9	-5	-8
	ΔP (%)		-5,9	-3,1	-1,7	-2,8
Октобар – март	P_{eff} (mm)	225	256	258	247	263
	ΔP_{eff} (mm)		31	33	22	38
	ΔP_{eff} (%)		13,8	14,7	9,8	16,9

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann-Whitney $p=0,05$).



Слика 41. Промена медијане ефективних падавина (P_{eff}) у односу на референтни период, метеоролошка станица Куршумлија. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Коефицијент културе

Усклађивање коефицијената културе за трећу и четврту фазу развића биљака урађено је према једначинама (14) и (15). Прорачун је базиран на просечним вредностима RH_{min} и u_2 за станице Прокупље и Куршумлија у периоду 1971-2013 (Табела 13). Прорачунате вредности k_c , за станице Прокупље и Куршумлија, дате су у табелама 37 и 38, респективно.

Табела 37. Усклађене вредности коефицијента културе базиране на подацима са станице Прокупље.

Култура	$k_c(I)$	$k_{c_{\text{usk}}(III)}$	$k_{c_{\text{usk}}(IV)}$
Пшеница	0,3	1,17	0,26
Јечам	0,3	1,17	0,26
Кукуруз	0,3	1,22	0,36
Кромпир	0,5	1,17	0,77
Детелина	0,4	0,92	0,87
Луцерка	0,4	0,97	0,92
Јабука	0,5	1,23	0,98
Вишње	0,5	1,23	0,98
Шљиве	0,5	1,18	0,93
Винова лоза	0,3	0,87	0,47
Пасуљ	0,4	1,17	0,37
Паприка	0,7	1,07	0,92
Парадајз	0,7	1,17	0,72
Бостан	0,4	1,01	0,76

Табела 38. Усклађене вредности коефицијента културе базиране на подацима са станице Куршумлија.

Култура	к _c (I)	к _{usk} (III)	к _{usk} (IV)
Пшеница	0,3	1,16	0,26
Јечам	0,3	1,16	0,26
Кукуруз	0,3	1,21	0,36
Кромпир	0,5	1,16	0,76
Детелина	0,4	0,91	0,86
Луцерка	0,4	0,96	0,91
Јабука	0,5	1,22	0,96
Вишње	0,5	1,22	0,96
Шљиве	0,5	1,17	0,91
Пасуљ	0,4	1,16	0,36
Малине	0,3	1,07	0,52

4.3.2 Утицај климатских промена на потребе усева и засада за водом

На подручју четири општине, током референтног периода, највеће потребе за водом на нивоу вегетационе сезоне предиковане су за воћарске засаде јабуке, вишње и шљиве, као и за вишегодишње крмне легуминозе, луцерку и детелину, док најмање потребе за водом имају озима стрна жита, пшеница и јечам. Симулације ЕТс током референтног периода у распону су од 409 и 394 mm·вегетациона сезона⁻¹ за пшеницу и јечам, до 768 и 736 mm·вегетациона сезона⁻¹ за јабуку и вишњу, за локалитете Прокупље и Житорађа (Табела 39) и Куршумлија и Блаце (Табела 40), респективно.

Табела 39. Вредности и промена евапотранспирације култура (ЕТс) у односу на референтни период, локалитет Прокупље и Житорађа.

		1971-2000	2021-2050 RCP4.5	2071- 2100 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2071-2100 RCP8.5
Пшеница и јечам	ЕТс (mm)	409	423	433	427	459
	ЕТс Δ (mm)		14	24	18	50
Кукуруз	ЕТс (mm)	542	564	575	565	609
	Δ (mm)		22	33	23	67
Кромпир	ЕТс (mm)	560	582	593	584	627
	ЕТс Δ (mm)		22	33	24	67
Детелина	ЕТс (mm)	723	751	768	755	814
	ЕТс Δ (mm)		28	45	32	91
Луцерка	ЕТс (mm)	763	793	810	797	858
	ЕТс Δ (mm)		30	47	34	95
Јабука и вишња	ЕТс (mm)	768	798	813	801	860
	ЕТс Δ (mm)		30	45	33	92
Шљива	ЕТс (mm)	748	777	792	780	838
	ЕТс Δ (mm)		29	44	32	90
Винова лоза	ЕТс (mm)	487	505	515	508	544
	ЕТс Δ (mm)		18	28	21	57
Пасуљ	ЕТс (mm)	467	486	494	487	521
	ЕТс Δ (mm)		19	27	20	54
Паприка	ЕТс (mm)	579	603	614	604	650
	ЕТс Δ (mm)		24	35	25	71
Парадајз	ЕТс (mm)	615	641	652	642	690
	ЕТс Δ (mm)		26	37	27	75
Бостан	ЕТс (mm)	453	471	479	472	507
	ЕТс Δ (mm)		18	26	19	54

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney p=0,05).

Резултати спроведене анализе указују да се у условима климатских промена на посматраним локалитетима у односу на референтни период у будућности очекује статистички значајно повећање потреба за водом на нивоу вегетационе сезоне свих посматраних усева и засада, по оба RCP сценарија (MW; $p=0,05$) (Табела 39 и 40). Уочава се да је добијена промена већа у периоду далеке будућности и по RCP8.5 сценарију у поређењу са променом у блиској будућности и по RCP4.5 сценарију.

На локалитету Прокупље и Житорађа у периоду блиске будућности према RCP4.5 сценарију највеће просечно повећање потреба за водом у односу на референтни период показују јабука и вишња (30 mm), луцерка (30 mm) и шљива (29 mm), а према RCP8.5 сценарију луцерка (34 mm), јабука и вишња (33 mm), детелина (32 mm) и шљива (32 mm). До краја века, највећи пораст потреба за водом установљен је за културе луцерка, јабука и вишња и детелина од 47 mm, 45 mm и 45 mm (RCP4.5), односно 95 mm, 92 mm и 91 mm (RCP8.5), респективно (Табела 39).

На локалитету Куршумлија и Блаце, према пројекцијама RCP4.5 сценарија, културе код којих се очекује највећи просечни пораст потребе за водом у блиској будућности у односу на референтни период су луцерка, јабука и вишња и шљива (пораст од 28 mm). У истом периоду према RCP8.5 сценарију највећи просечни пораст потребе за водом добијен је за културе луцерка (33 mm), детелина, јабука и вишња и шљива (32 mm). За период далеке будућности највећи просечни пораст потреба за водом очекује се за луцерку (46 и 97 mm), јабуку и вишњу (44 и 93 mm) и детелину (44 и 92 mm) (RCP4.5 и RCP8.5, респективно) (Табела 40).

Табела 40. Вредности и промена евапотранспирације култура (ЕТс) у односу на референтни период, локалитет Куршумлија и Блаце.

		1971-2000	2021-2050 RCP4.5	2071-2100 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2071-2100 RCP8.5
Пшеница и јечам	ЕТс (mm)	394	407	418	412	446
	ЕТс Δ (mm)		13	24	18	52
Кукуруз	ЕТс (mm)	520	541	551	543	586
	ЕТс Δ (mm)		21	31	23	66
Кромпир	ЕТс (mm)	537	558	569	561	604
	ЕТс Δ (mm)		21	32	24	67
Детелина	ЕТс (mm)	694	721	738	726	786
	ЕТс Δ (mm)		27	44	32	92
Луцерка	ЕТс (mm)	733	761	779	766	830
	ЕТс Δ (mm)		28	46	33	97
Јабука и вишња	ЕТс (mm)	736	764	780	768	829
	ЕТс Δ (mm)		28	44	32	93
Шљива	ЕТс (mm)	716	744	759	748	807
	ЕТс Δ (mm)		28	43	32	91
Пасуљ	ЕТс (mm)	450	467	475	469	504
	ЕТс Δ (mm)		17	25	19	54
Малина	ЕТс (mm)	535	557	567	559	602
	ЕТс Δ (mm)		22	32	24	67

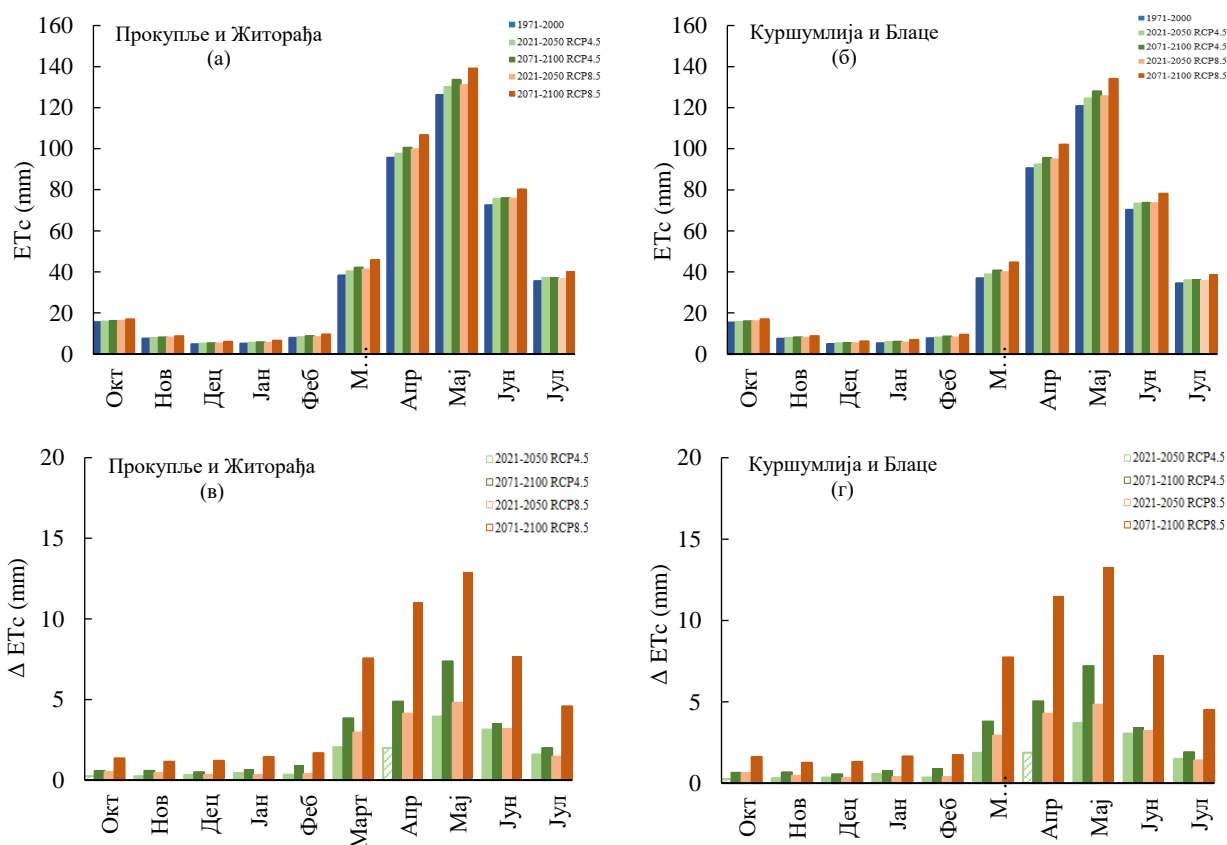
* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

Спроведене анализе указују да се у условима климатских промена на подручју округа Топлица у односу на референтни период у будућности очекује статистички значајно повећање потреба за водом на нивоу вегетационе сезоне свих посматраних култура, по оба RCP сценарија (MW; $p=0,05$). До краја 21. века, према сценарију RCP8.5, потребе за водом посматраних култура, у односу на референтни период, биће у порасту од 50 mm и 52 mm (пшеница и јечам) до 95 mm и 97 mm (луцерка) за подручје Прокупља и Житорађе и Куршумлије и Блаца, респективно. Утврђени образац промена ЕТс примећен је и код промена

РЕТ за обе проучаване локације, што је очекивано с обзиром на то да РЕТ одражава климатске карактеристике подручја при прорачуну ЕТс. Стога се очекивано повећање ЕТс може објаснити симулираним повећањем РЕТ, а које је у директној зависности од симулираних вредности Т. У прилог овој тврдњи су и резултати истраживања од стране Cai et al. (2015) и Chowdhury et al. (2016) у којима је закључено да ће промене у температурном режиму настале услед климатских промена значајно изменити потребе култура за водом.

У складу са представљеним резултатима овог истраживања су и раније објављена истраживања која истичу да се као последица климатских промена очекује повећање потреба култура за водом (Mizyed, 2009; Iglesias и Garrote, 2015; Ye et al., 2015; Mo et al., 2017; Rio et al., 2018; Jacobs et al., 2019; Li et al., 2020). Предвиђено повећање потреба култура за водом на подручју округа Топлице у складу је и са резултатима студија рађених за подручје Србије које указују на могући негативан утицај климатских промена у смислу повећања потреба за водом воћарских засада, трава, кукуруза, соје, шећерне репе (Стричевић и сар., 2017; Стричевић и сар., 2019б; Tovjanin et al., 2019; Gregorić et al., 2020).

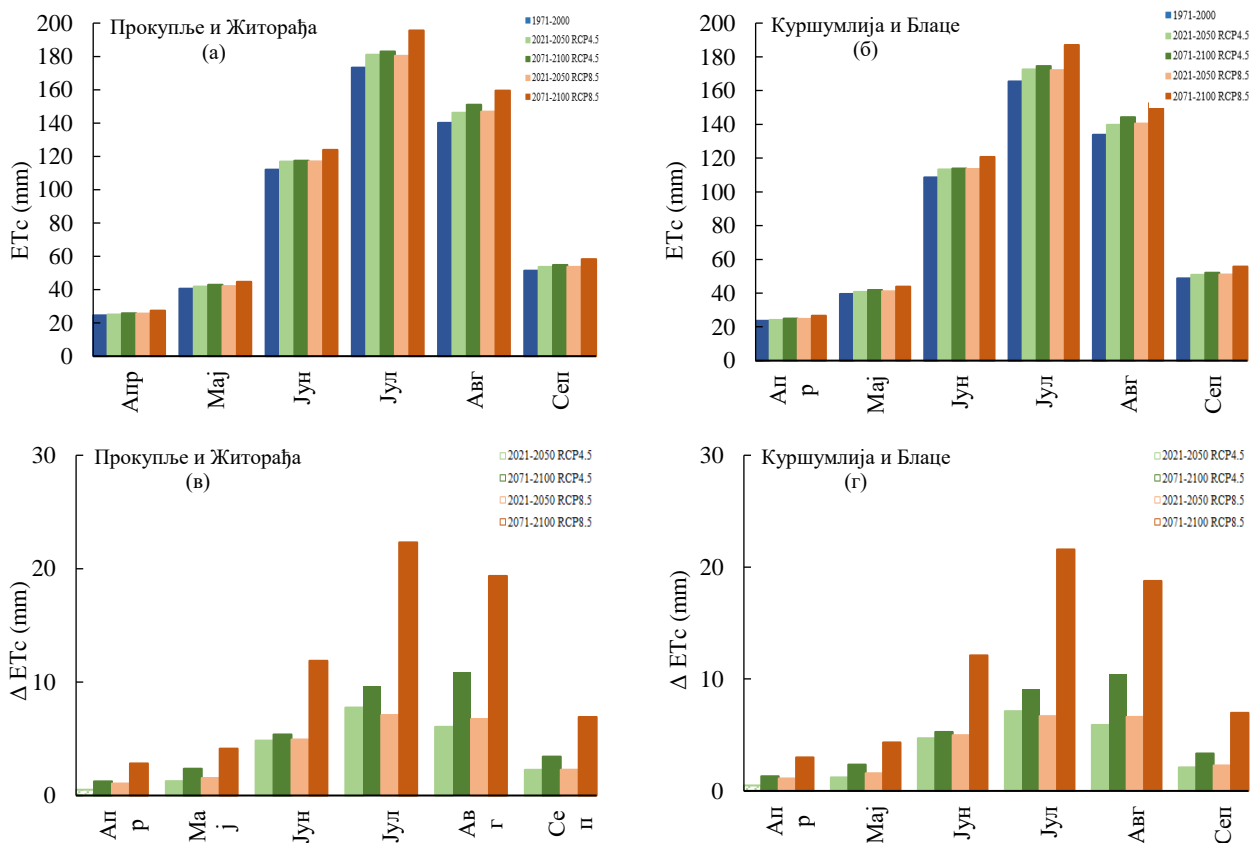
Посматране културе показују највеће потребе за водом током летњих месеци (јун-август) у референтном и будућим периодима, изузев пшенице и јечма за које су највеће потребе предвиђајено у априлу и мају. Посматрано по месецима, за све културе очекиван је пораст ЕТс у оба периода и по оба сценарија у односу на референтни период, а MW тестом ($p=0,05$) утврђено је да је промена статистички значајна у свим месецима, осим у априлу и октобру у периоду блиске будућности по RCP4.5 сценарију (Слика 42 - ЕТс 53).



Слика 42. Потребе за водом (ЕТс) за пшеницу и јечам у референтном и будућим периодима и промена (Δ ЕТс) у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и (в) и Куршумлија и Блаце (б) и (г). Испуњени полигони ((в) и (г)) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Вегетациона сезона озиме пшенице и јечма одвија се у периоду октобар-јул. Највеће вредности ЕТс у референтном и будућим периодима за ове усеве јављају се у мају (Слика 42). До краја века, према сценарију RCP8.5, за месец мај добијене су вредности ЕТс пшенице и јечма од $139 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ (Прокупље и Житорађа; Слика 42 (а)) и $134 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ (Куршумлија и Блаце; Слика 42(б)). Изражено просечно месечно повећање ЕТ пшенице и јечма у будућим периодима у односу на референтни очекује се у пролећним месецима, а највеће вредности повећања предвиђене су у мају и до краја века по RCP8.5 сценарију износе $13 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ за оба локалитета (Слика 42 (в) и (г)).

Током вегетационе сезоне кукуруза (април-септембар) у референтном периоду симулиране ЕТс су у интервалу од 25 до $173 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ (Прокупље и Житорађа; Слика 43 (а)) и од 24 до $165 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ (Куршумлија и Блаце; Слика 43 (б)). Највеће вредности ЕТс током референтног и будућих периода предвиђене су у јулу. У односу на референтне вредности, за све месеце очекиван је статистички значајан пораст ЕТс у будућности по оба сценарија, осим у априлу блиске будућности по RCP4.5. Апсолутна промена ЕТс кукуруза највећа је у јулу далеке будућности по RCP8.5 сценарију и износи $22 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ за подручје Прокупље и Житорађа (Слика 43 (в)) и исто толико за подручје Куршумлија и Блаце (Слика 43 (г)), респективно.

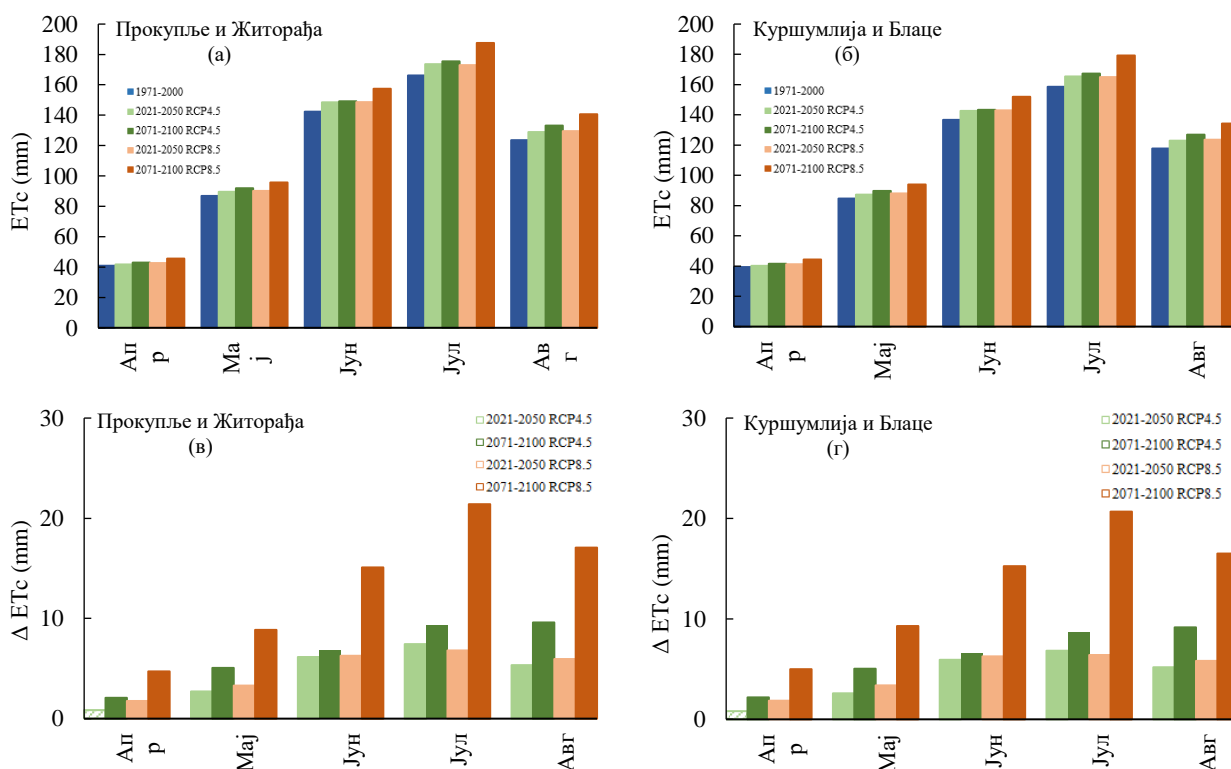


Слика 43. Потребe за водом (ЕТс) за кукуруз у референтном и будућим периодима и промена (ΔETc) у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и (в) и Куршумлија и Блаце (б) и (г). Испуњени полигони ((в) и (г)) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

У условима климатских промена, на подручју округа Топлице до краја века према сценарију RCP8.5 предвиђен је пораст потреба кукуруза за водом за 67 mm (Прокупље и Житорађа), односно 66 mm (Куршумлија и Блаце) у односу на референтни период. Резултати

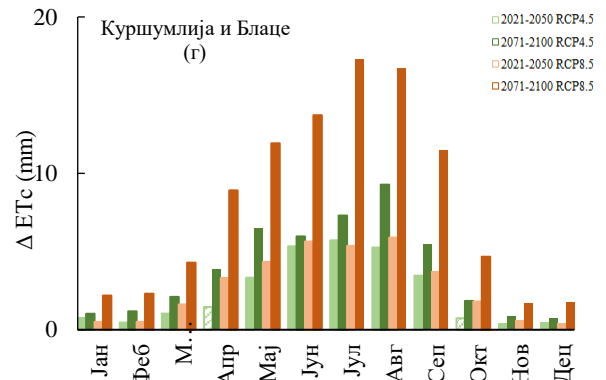
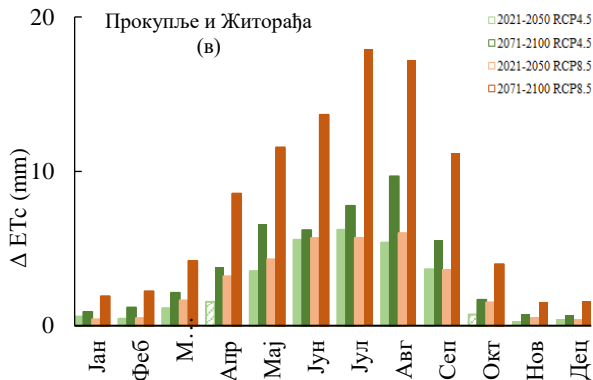
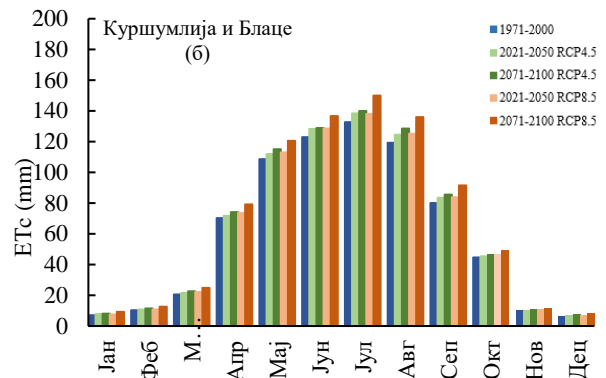
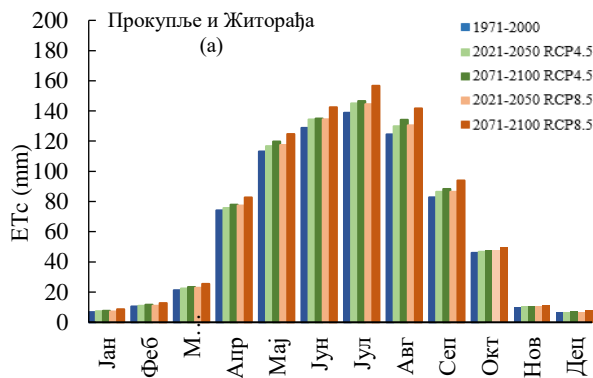
истраживања рађених за подручје Ирана (Ahmadi et al., 2021) и Медитерана (Masia et al., 2021) такође указују на повећање потреба кукуруза за водом у будућности услед климатских промена. Промене у температури, повезане са потенцијалним ефектима климатских промена, имају велики утицај на повећање потребе кукуруза за водом (Casolani et al., 2020). Истраживање спроведено од стране Матовић и сар. (2021б) указује да је у последњих пола века примећен тренд пораста потенцијалне евапотранспирације кукуруза у Србији. Према њиховим резултатима, засаду кукуруза било је потребно обезбедити наводњавањем 56% (114 mm) више воде у периоду 2009-2016, у односу на период 1966-1985.

Током вегетационе сезоне кромпира (април-август) у референтном и будућим периодима највеће просечне месечне вредности ЕТс предвиђене су у периоду јун-август. За период далеке будућности, по RCP8.5 сценарију, највеће потребе за водом кромпира очекују се у јулу, од 188 mm·месе⁻¹ (Прокупље и Житорађа) (Слика 44 (а)) и 179 mm·месе⁻¹ (Куршумлија и Блаце) (Слика 44 (б)). У односу на симулиране месечне вредности ЕТс у референтном периоду, у будућности се очекује статистички значајан пораст ЕТс према пројекцијама оба сценарија, на оба локалитета, осим у априлу блиске будућности по RCP4.5. Максималан пораст предвиђен је у јулу далеке будућности по RCP8.5 сценарију и износи просечно 21 mm·месе⁻¹ за локалитете Прокупље и Житорађа (Слика 44 (в)) и Куршумлија и Блаце (Слика 44 (г)).

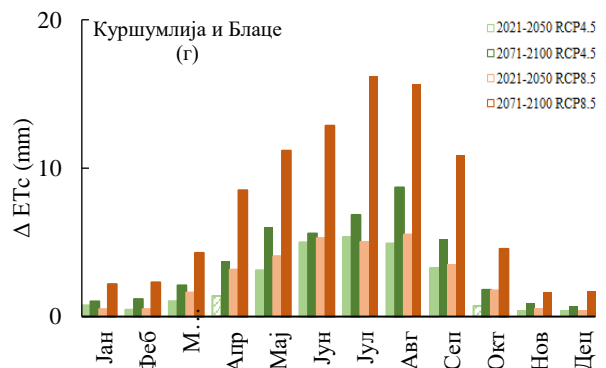
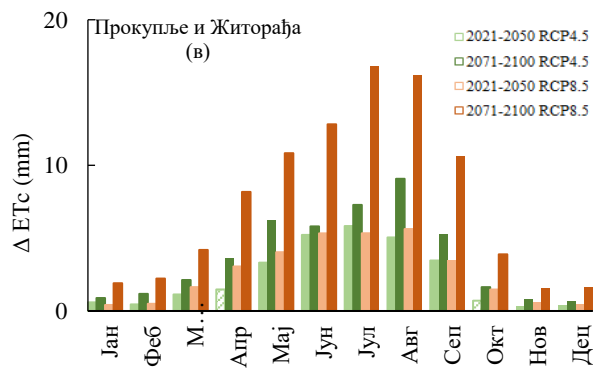
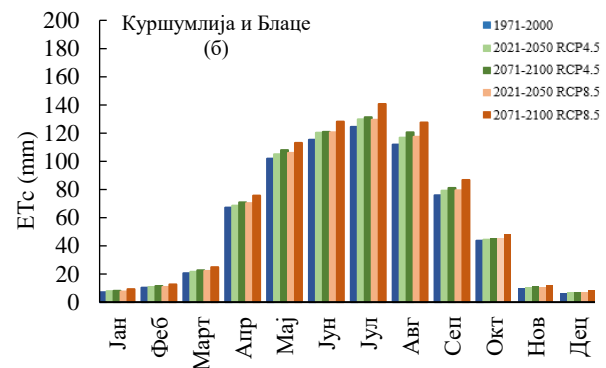
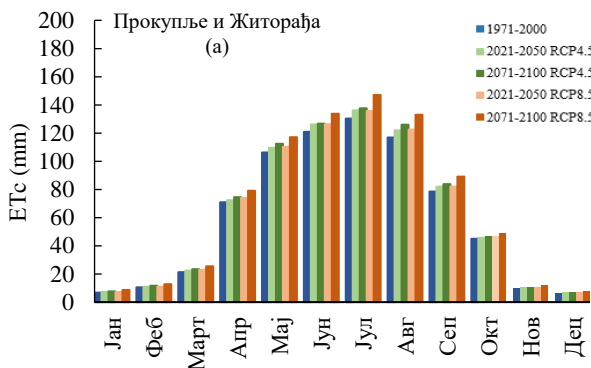


Слика 44. Потребности за водом (ЕТс) за кромпир у референтном и будућим периодима и промена (Δ ЕТс) у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и (в) и Куршумлија и Блаце (б) и (г). Испуњени полигони ((в) и (г)) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Вишегодишње легуминозе, луцерка и детелина, гајене на подручју Прокупље и Житорађа (Слика 45 (а) и Слика 46 (а)) и Куршумлија и Блаце (Слика 45 (б) и Слика 46 (б)) показују највеће потребе за водом у периоду мај-август, са максималним вредностима у јулу, током референтног и будућих периода.



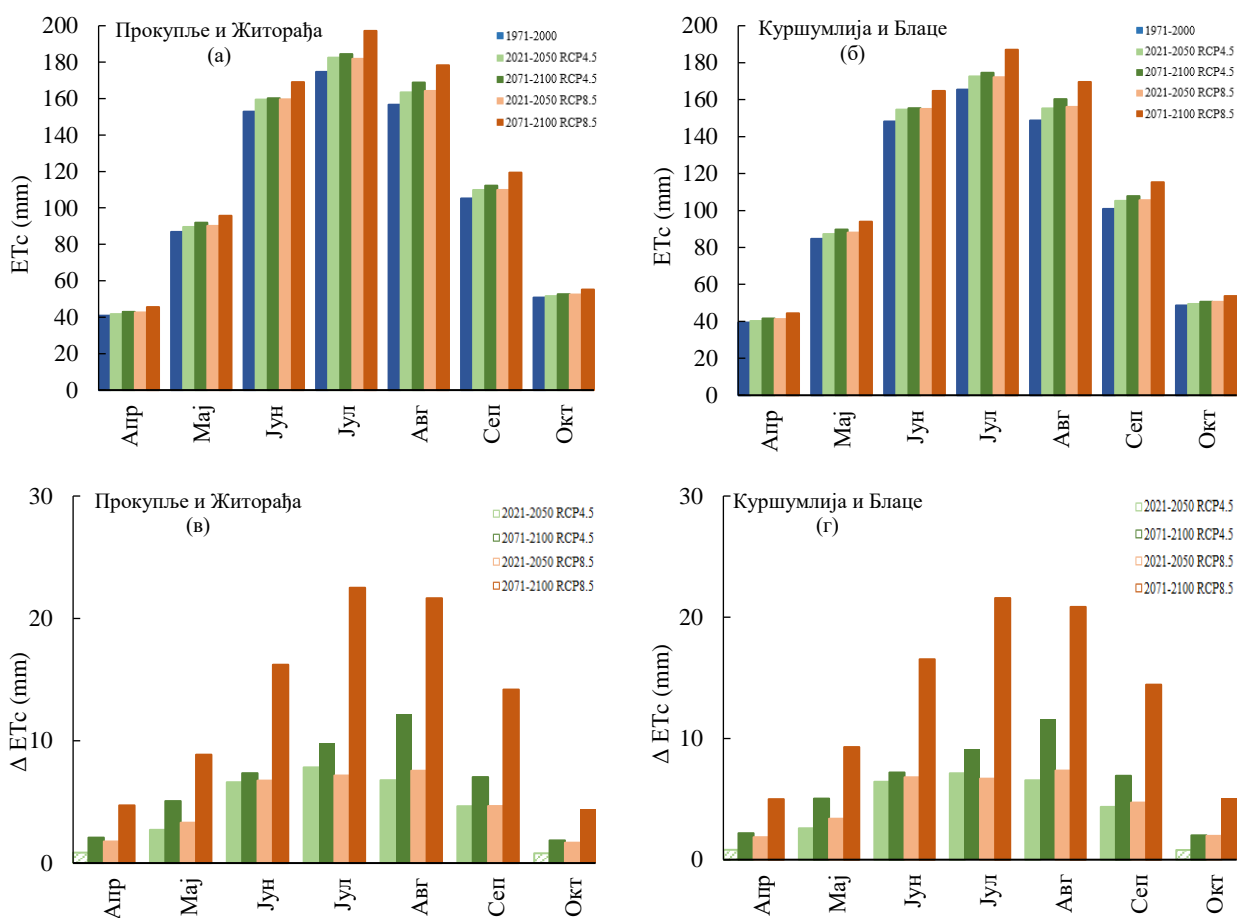
Слика 45. Потребe за водом (ETc) за луцерку у референтном и будућим периодима и промена (Δ ETc) у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и (в) и Куршумлија и Блаце (б) и (г). Испуњени полигони ((в) и (г)) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).



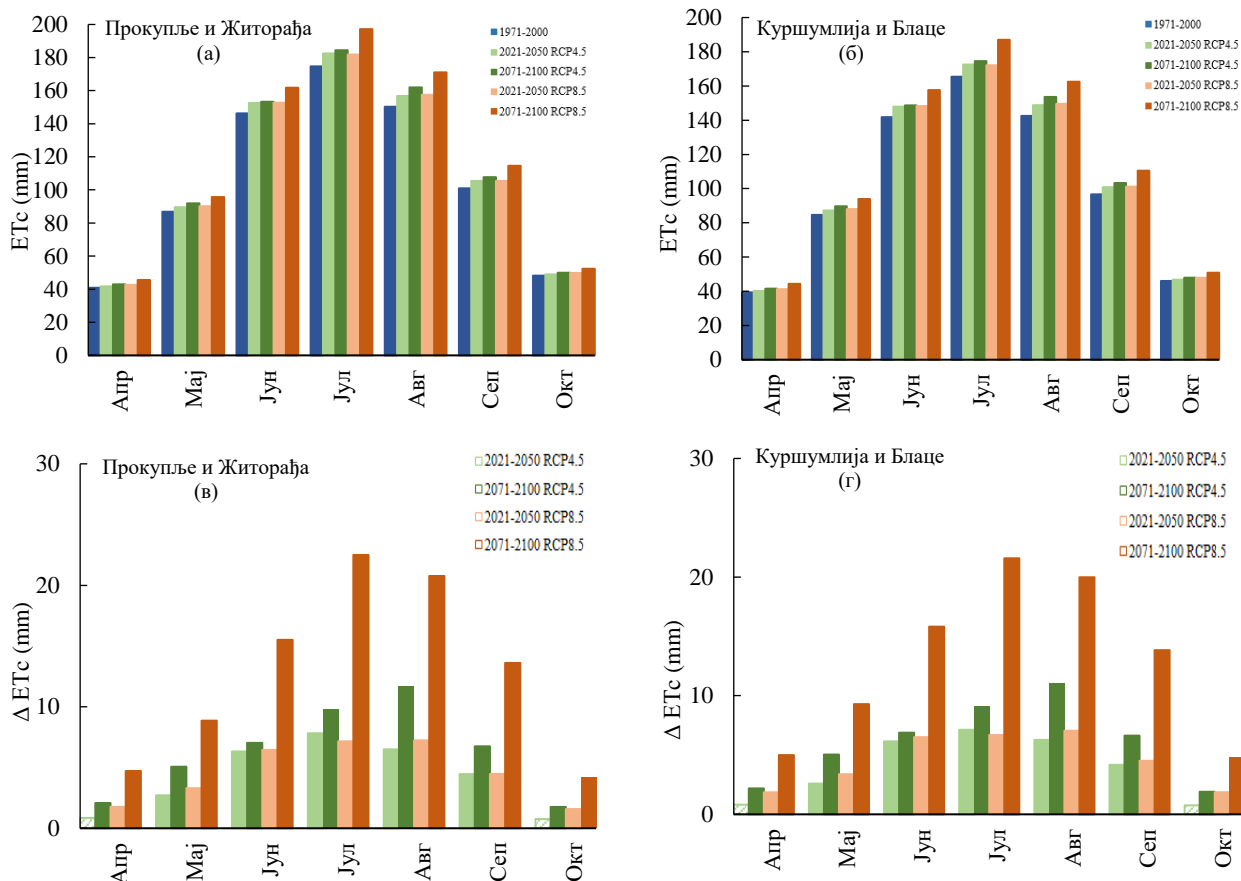
Слика 46. Потребe за водом (ETc) за детелину у референтном и будућим периодима и промена (Δ ETc) у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и (в) и Куршумлија и Блаце (б) и (г). Испуњени полигони ((в) и (г)) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

У будућности се очекује пораст месечних ЕТс за луцерку и детелину, при чему су највећа повећања очекивана у периоду јун-август (Слика 45 (в) и (г) и Слика 46 (в) и (г), респективно). Предвиђено повећање је статистички значајно (MW; $p=0,05$) у свим месецима и периодима, осим у априлу и октобру блиске будућности по RCP4.5.

За воћарске засаде јабуку, вишњу и шљиву добијене ЕТс највеће су током летњих месеци, јун-август, са максималним вредностима у јулу, током референтног и будућих периода (Слика 47 (а) и (б) и Слика 48 (а) и (б), респективно). Уочава се да су вредности ЕТс веће у периоду далеке будућности и по RCP8.5 сценарију, него у блиској будућности и по RCP4.5 сценарију, као и да су потребе за водом веће на подручју Прокупља и Житорађе него на подручју Куршумлије и Блага. Највеће повећање потреба за водом у будућности у односу на референтни период очекује се у јулу и августу. До краја века, према RCP4.5 сценарију, највећи пораст ЕТс очекује се у августу, док је према RCP8.5 сценарију, највећи пораст у јулу (Слика 47 (в) и (г) и Слика 48 (в) и (г)).

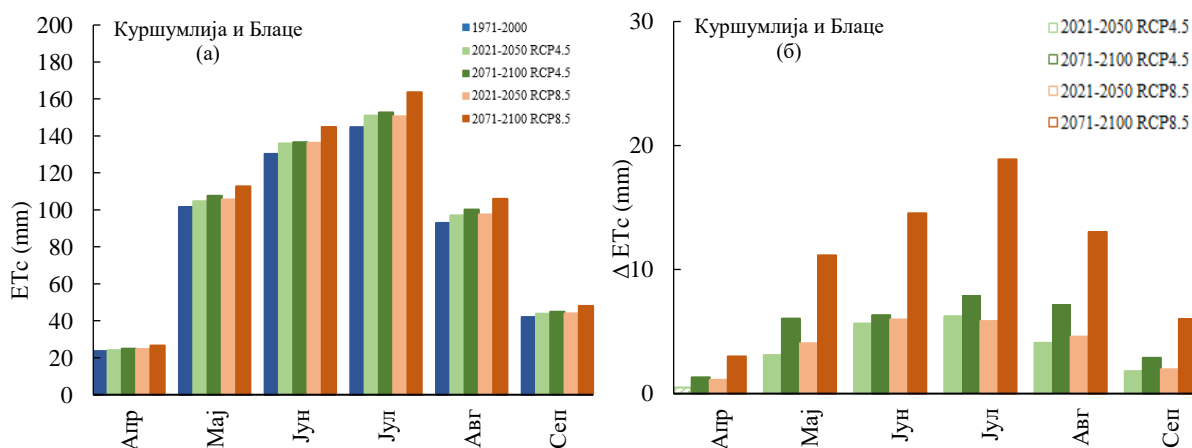


Слика 47. Потребе за водом (ЕТс) за јабуку и вишњу у референтном и будућим периодима и промена (Δ ЕТс) у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и (в) и Куршумлија и Блага (б) и (г). Испуњени полигони ((в) и (г)) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).



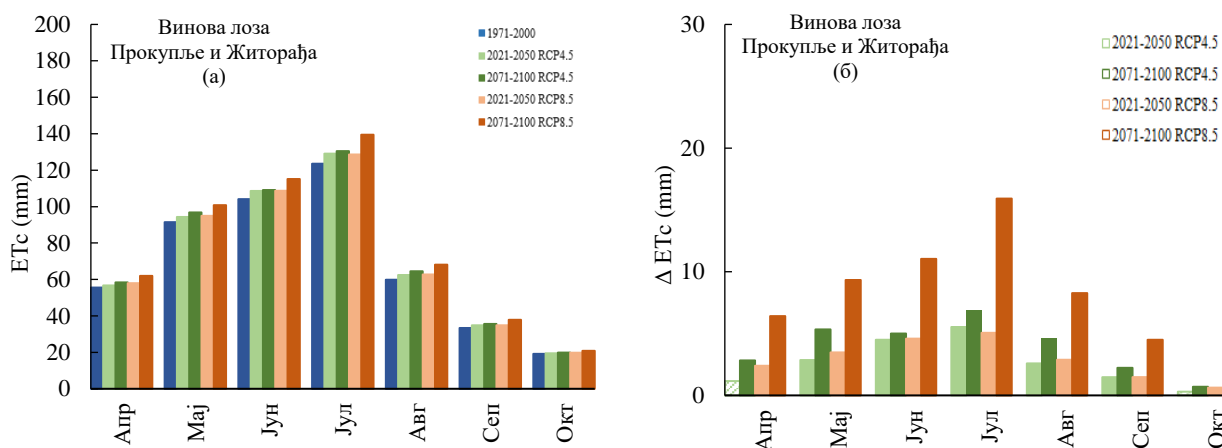
Слика 48. Потребне за водом (ETc) за шљиву у референтном и будућим периодима и промена (Δ ETc) у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и (в) и Куршумлија и Блаце (б) и (г). Испуњени полигони ((в) и (г)) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Засад малине највеће потребе за водом показује у месецима мај-јул, у референтном и будућим периодима (Слика 49 (а)). На месечном нивоу, у будућности се очекује пораст ETc, при чему је највеће повећање очекује се у јулу далеке будућности по RCP8.5 сценарију и износи $19 \text{ mm} \cdot \text{месећ}^{-1}$ (Слика 49 (б)).



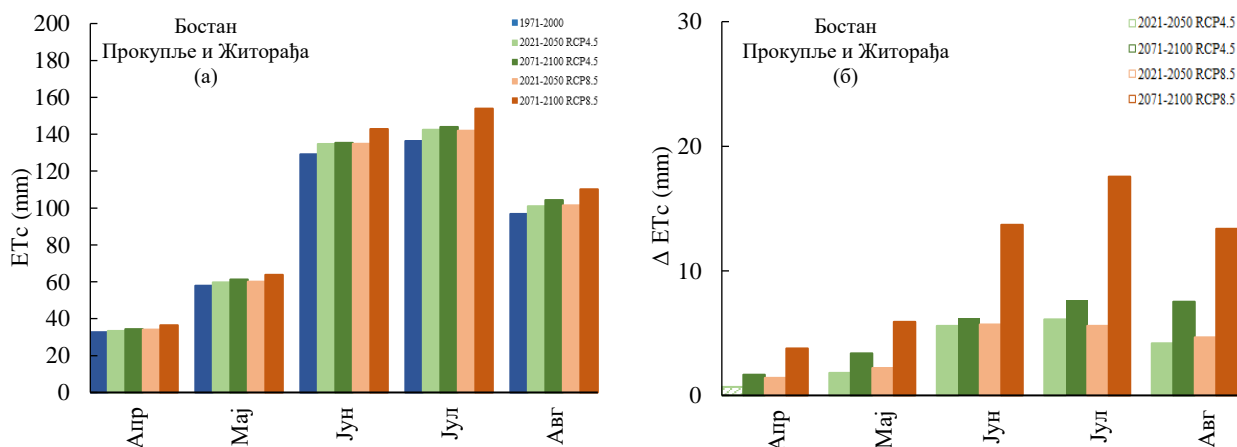
Слика 49. Потребне за водом (ETc) за малину у референтном и будућим периодима (а) и промена (Δ ETc) у односу на референтни период по месецима (б) за подручје Куршумлија и Блаце. Испуњени полигони (б) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Током вегетационе сезоне (април-октобар) највеће потребе за водом за винову лозу предвиђене су у месецима мај-јул, у референтном и будућим периодима (Слика 50 (а)). На месечном нивоу, у будућности се очекује пораст ЕТс, при чему је највеће повећање очекивано у јулу далеке будућности по RCP8.5 од просечно 16 mm·месе⁻¹ Слика 50 (б)).



Слика 50. Потребе за водом (ЕТс) за винову лозу у референтном и будућим периодима (а) и промена (Δ ЕТс) у односу на референтни период по месецима (б) за подручје Прокупље и Житорађа. Испуњени полигони (б) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

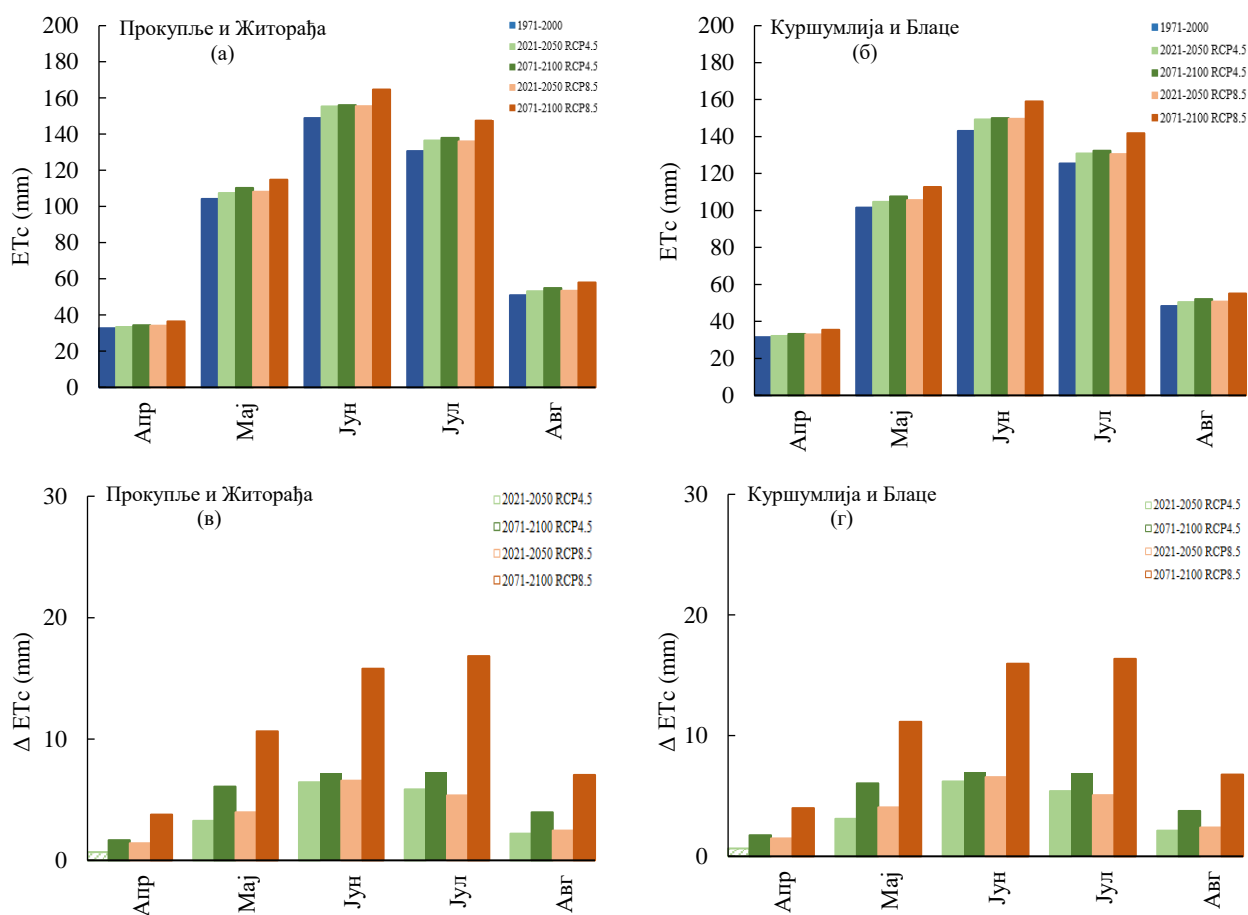
Потребе за водом бостана током референтног и будућих периода на подручју Прокупља и Житорађе представљене су на слици 51 (а). Највеће месечне вредности ЕТс очекују се у јуну и јулу, са максималним вредностима у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију. У односу на симулиране месечне вредности у референтном периоду, у будућности се очекује повећање ЕТс, а највећа промена од 18 mm·месе⁻¹ предвиђена је у јулу далеке будућности по RCP8.5 сценарију (Слика 51 (б)), када се очекују и највеће потребе за водом.



Слика 51. Потребе за водом (ЕТс) за бостан у референтном и будућим периодима (а) и промена (Δ ЕТс) у односу на референтни период по месецима (б) за подручје Прокупље и Житорађа. Испуњени полигони (б) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

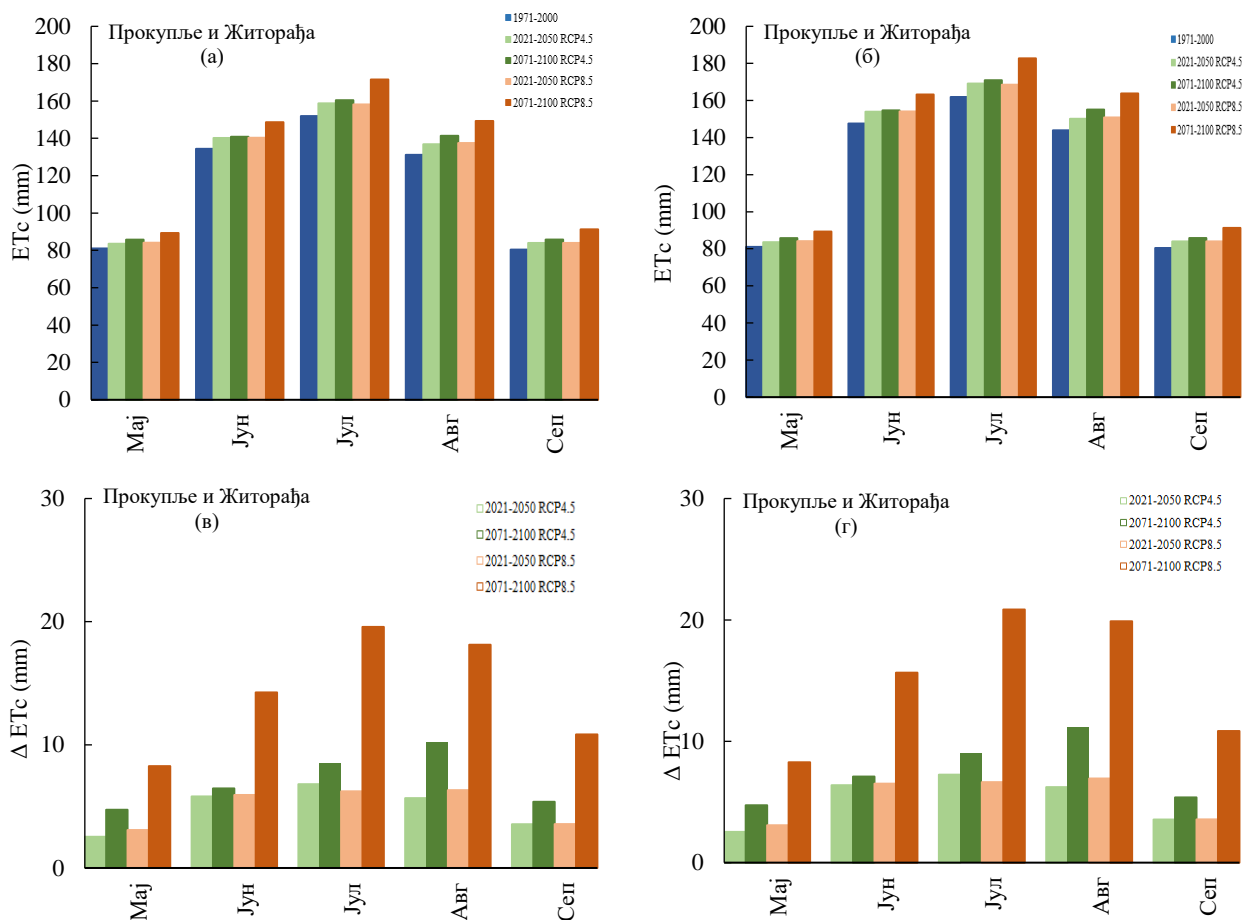
На нивоу вегетационе сезоне пасуља (април-август) у референтном периоду симулиране су просечне вредности ЕТ су у интервалу од 33 до 149 mm·вегетациона сезона⁻¹

за подручје Прокупље и Житорађа (Слика 52 (а)) и од 31 до 143 mm·вегетациона сезона⁻¹ за подручје Куршумлија и Блаце (Слика 52 (б)). У референтном и будућим периодима највеће потребе за водом симулиране су јуну. У односу на референтне вредности, у будућности је предвиђен статистички значајан пораст ЕТс (MW; $p=0,05$) у свим месецима и периодима, изузев у априлу блиске будућности по RCP4.5. На локалитету Прокупље и Житорађа, највећи пораст ЕТс од 17 mm·месеца⁻¹ предвиђен је у јулу далеке будућности (RCP8.5) (Слика 52 (в)), а на локалитету Куршумлија и Блаце од 16 mm·месеца⁻¹ у јуну и јулу далеке будућности (RCP8.5) (Слика 52 (г)).



Слика 52. Потребe за водом (ЕТс) за пасуљ у референтном и будућим периодима и промена (Δ ЕТс) у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и (в) и Куршумлија и Блаце (б) и (г). Испуњени полигони ((в) и (г)) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

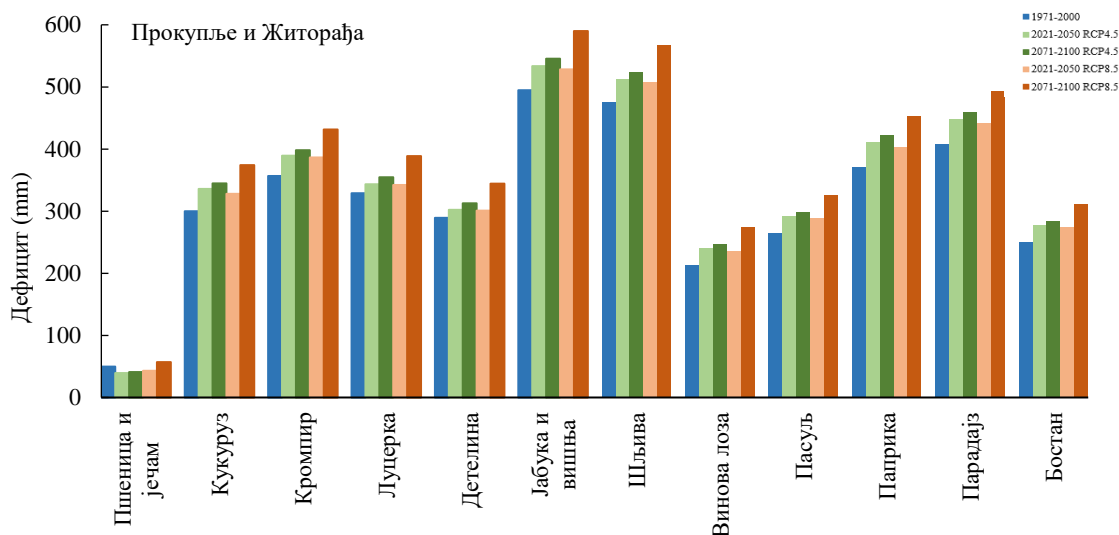
Потребe за водом за засаде паприке и парадајза током референтног и будућих периода на подручју Прокупља и Житорађе представљене су на слици 53 (а) и (б), респективно. Највеће месечне вредности ЕТс очекују се у јулу, са максималним вредностима у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију. У односу на месечне вредности у референтном периоду, у будућности се очекује повећање ЕТс, а највећа промена од око 20 mm·месеца⁻¹ предвиђена је у јулу далеке будућности по RCP8.5 сценарију (Слика 53 (в) и (г)).



Слика 53. Потребе за водом (ETc) у референтном и будућим периодима и промена (Δ ETc) у односу на референтни период по месецима за паприку (а) и (в) и парадајз (б) и (г) за подручје Прокупље и Житорађа. Испуњени полигони ((в) и (г)) означавају статистички значајну промену према Манн-Whitney тесту ($p=0,05$).

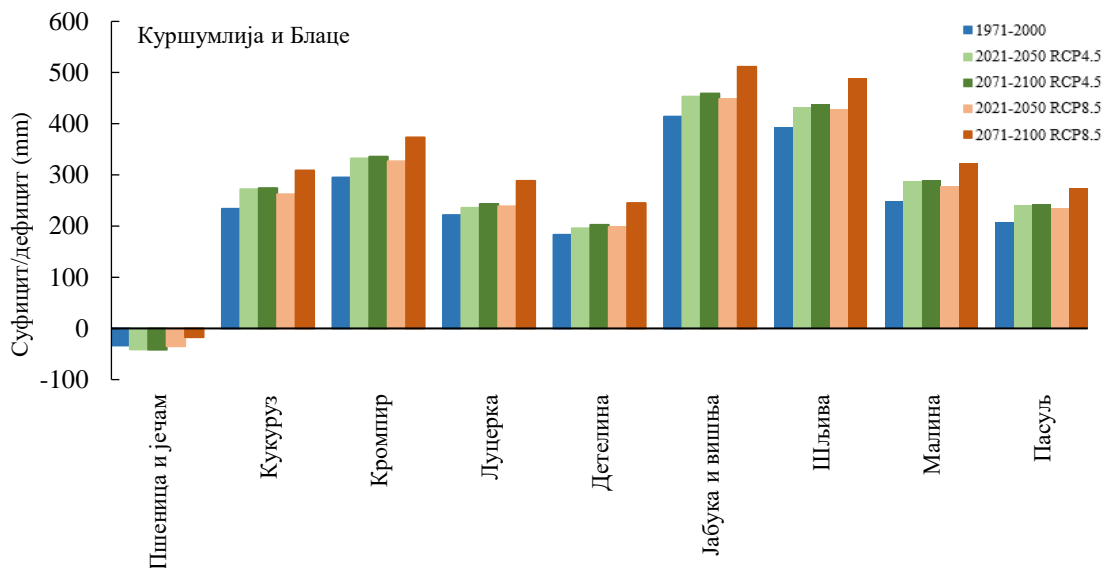
4.3.3 Утицај климатских промена на обезбеђеност усева и засада водом

Све културе гајене на подручју Прокупља и Житорађе су током вегетационе сезоне изложене дефициту воде. Према пројекцијама, недостатак воде у будућности се повећава у односу на референтни период. Највеће вредности дефицита за сваку културу предвиђене су у периоду далеке будућности под сценаријем RCP8.5. На овом подручју током референтног и будућих периода највећем дефициту воде изложени су воћарски засади, јабука, вишња и шљива, затим засади поврћа паприка и парадајз и кромпир. Очекивани дефицит до краја века према RCP8.5 сценарију износиће од 57 mm (пшеница и јечам) до 590 mm (јабука и вишња) (Слика 54).



Слика 54. Просечне вредности дефицита воде за све заступљене културе по вегетационој сезони за локалитет Прокупље и Житорађа.

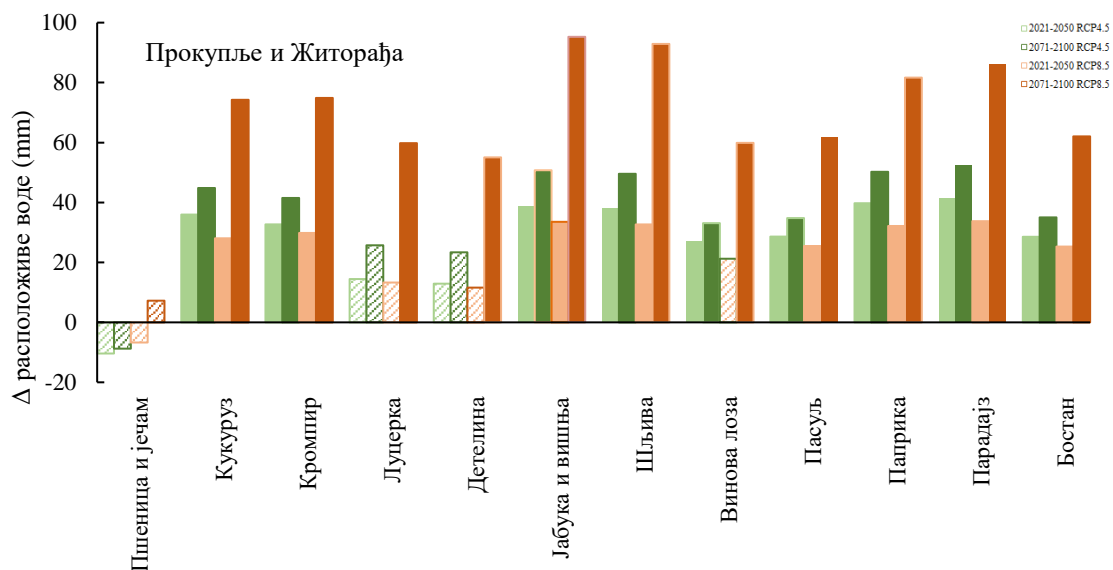
За разлику од Прокупља и Житорађе, на подручју Куршумлије и Блаца за пшеницу и јечам очекивани су вишкови воде. Симулирани суфицит воде за пшеницу и јечам у референтном периоду износи 33 mm (Слика 55). Остале културе изложене су недостатку воде током референтног и будућих периода. Највеће вредности дефицита на овом подручју добијене су за воћарске засаде, јабуку и вишњу, шљиву и кромпир, које у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију износе 511, 489, 373 mm, респективно (Слика 55).



Слика 55. Просечне вредности дефицита/суфицита воде за све заступљене културе по вегетационој сезони за локалитет Куршумлија и Блаце. Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде.

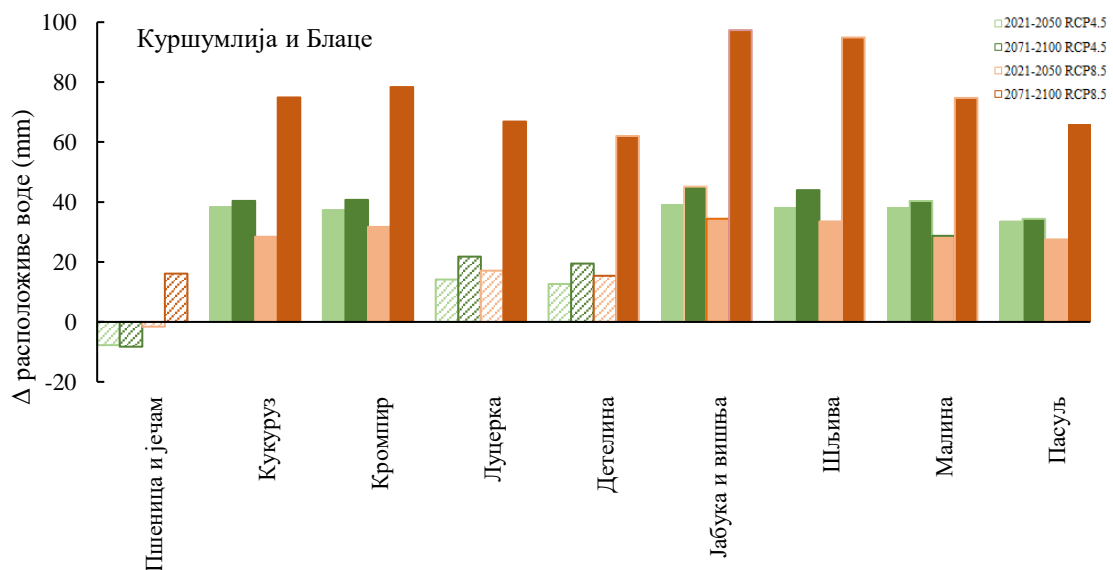
На сликама 56 и 57 представљена је симулирана промена расположиве воде у будућности у односу на референтни период за све заступљене културе по вегетационој сезони за локалитете Прокупље и Житорађа, као и за Куршумлија и Блаце, респективно.

На локалитету Прокупље и Житорађа до краја века највеће смањење количине воде у односу на референтни период предвиђено је за културе јабука и вишња, шљива, паприка и парадајз (RCP8.5). За културе пшеница и јечам смањење количине воде очекивано је само за период далеке будућности по RCP8.5 сценарију (Слика 56).



Слика 56. Промена расположиве воде (Δ) за све заступљене културе по вегетационој сезони за локалитет Прокупље и Житорађа. Позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

На подручју Куршумлије и Блаца, за пшеницу и јечам, у односу на референтну вредност, у будућности се очекује повећање суфицита, изузев у периоду далеке будућности по RCP8.5, када се очекује смањење. За остале културе дефицит ће бити у порасту у будућности, а највеће смањење количине воде предвиђено је за јабуку, вишњу и шљиву (Слика 57).



Слика 57. Промена расположиве воде (Δ) за све заступљене културе по вегетационој сезони за локалитет Куршумлија и Блаце. Позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Резултати добијени у овом истраживању показују да се током вегетационе сезоне најзаступљенијих култура потребе за водом не могу задовољити симулираним количинама P_{eff} , услед чега се јавља дефицит воде у референтном и будућим периодима за посматране културе гајене на подручју округа Топлице. Највећем недостатку воде биће изложени воћарски засади јабуке, вишње и шљиве, као и засади паприке, парадајза и кромпира. До краја века, према пројекцијама RCP8.5 сценарија, дефицит ће бити у порасту од 7 mm (пшеница и јечам) до 95 mm (јабука и вишња) на подручју Прокупља и Житорађе, а на подручју Куршумлије и Блаца од 16 mm (пшеница и јечам) до 97 mm (јабука и вишња). Вишак воде на нивоу вегетационе сезоне се јавља само за пшеницу и јечам на подручју Куршумлије и Блаца.

Праћењем промене дефицита анализираних култура у будућности у односу на референтни период уочава се да вредности дефицита имају тенденцију пораста у будућности, при чему се веће вредности промене очекују за период далеке будућности, него у периоду блиске будућности. За сваку посматрану културу, вредности дефицита и његова промена у будућности највеће су у периоду далеке будућности према RCP8.5 сценарију. Слични закључци изнети су у истраживању од стране Gorguner и Kavvas (2020), где су резултати анализе показали да се највећи недостатак воде који је културама потребно надокнадити наводњавањем очекује крајем 21. века, као и да су предвиђене вредности недостатка воде веће према пројекцијама RCP8.5 сценарија у поређењу са RCP4.5.

Када се упореде анализирана подручја, за локалитет Прокупље и Житорађа предвиђене су веће вредности недостатка воде код култура током референтног и будућих периода него за локалитет Куршумлија и Блаце. За подручје Прокупља и Житорађа очекиване су веће вредности температуре ваздуха и потенцијалне евапотранспирације, а мање просечне суме падавина за годину и период април-септембар, што објашњава разлику у вредности дефицита. Анализом података о апсолутној промени дефицита у будућим периодима уочава се да је величина промене дефицита у односу на референту вредност слична на оба локалитета. Међутим, вредности дефицита показују да ће већем недостатку воде бити изложене културе у Прокупљу и Житорађи, услед чега ће бити потребно обезбедити веће количине воде за наводњавање на овом локалитету.

Вегетациона сезона већине посматраних култура (кукуруз, кромпир, поврће и воћарски засади) одвија се у топлијем делу године, период април-октобар. Посматрано на месечном нивоу, највеће вредности дефицита воде за ове културе очекиване су у летњим месецима, у јулу и августу. У том периоду већина пролећних усева пролази кроз фазе развића у којима су биљке јако осетљиве на недостатак воде. Потреба биљака за водом разликује се током различитих фенолошких фаза, услед чега појава дефицита воде у појединим фазама развића може имати изразити негативан утицај на остваривање приноса.

Добијене вредности дефицита, односно суфицита и промене расположиве воде за сваку културу дате су у даљем тексту.

Пшеница и јечам

На подручју општина Прокупље и Житорађа, симулације климатских модела за референтни период указују да су, посматрано на нивоу вегетационе сезоне (октобар-јул), пшеница и јечам изложени благом дефициту воде који се предвиђа и у будућим периодима. Дефицит током референтног периода износи $50 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (Слика 54). У односу на референтни период, једино се у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију очекује пораст дефицита од $7 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (Слика 5б), односно релативна промена од 15% (Табела 41).

За подручје општина Куршумлија и Блаце спредвиђена је појава суфицита воде на нивоу вегетационе сезоне пшенице и јечма у референтном ($33 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$)

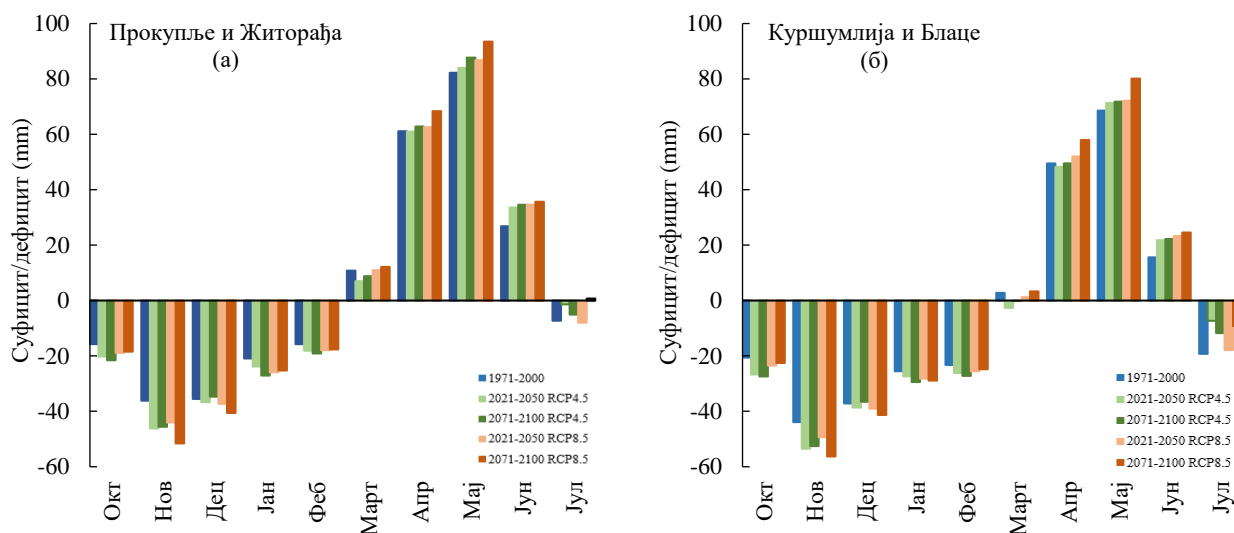
(Слика 55) и будућим периодима према оба сценарија. Вишак воде има тенденцију пораста до краја века према RCP4.5 сценарију, а по RCP8.5 очекује се смањење суфицита од просечно 16 mm (Слика 57), што је према једначини (25) промена од 49% (Табела 41) у односу на референтни период. Mann-Whitney тестом ($p=0,05$) није утврђена статистички значајна разлика промене суфицита на нивоу вегетационе сезоне пшенице и јечма (Табела 41).

Табела 41. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) пшенице и јечма у односу на референтни период.

	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
	RCP4.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP8.5
Δ (%)				
Прокупље и Житорађа				
Окт	28,3	37,0	20,1	17,2
Нов	27,8	26,1	21,8	42,7
Дец	3,3	-2,3	4,9	14,3
Јан	14,0	29,5	24,0	20,8
Феб	14,9	21,2	13,8	12,0
Март	-35,1	-18,5	1,8	12,6
Апр	-0,2	2,8	2,4	11,9
Мај	2,2	6,6	5,5	13,7
Јун	25,2	28,9	29,0	32,9
Јул	-81,3	-30,3	9,6	-110,0
Вег. сез.	-20,9	-17,6	-13,5	14,5
Куршумлија и Блаце				
Окт	29,6	33,1	14,0	9,4
Нов	21,9	19,7	12,4	28,3
Дец	4,0	-1,6	5,1	11,2
Јан	7,2	15,3	10,4	13,2
Феб	12,5	17,0	9,9	6,7
Март	-195,0	-106,7	-56,3	19,3
Апр	-2,6	0,1	5,1	17,1
Мај	4,0	4,7	5,2	16,9
Јун	39,6	42,5	49,3	57,4
Јул	-62,0	-39,0	-7,1	-52,2
Вег. сез.	23,4	24,9	4,8	-48,6

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann-Whitney $p=0,05$).

Унутарсезонска анализа указује да се током вегетационе сезоне (октобар-јул) пшенице и јечма на посматраним подручјима очекује појава дефицита воде у пролећним и летњим месецима, а да су вишкови воде карактеристични за јесење и зимске месеце (Слика 58 (а) и (б)). Изузетак из овог обрасца јавља се у јулу, за који је предвиђен суфицит воде у свим будућим периодима, осим у далекој будућности према RCP8.5 за подручје Прокупља и Житорађе. Максималне вредности месечног дефицита очекују се у мају (Слика 58 (а) и (б)).



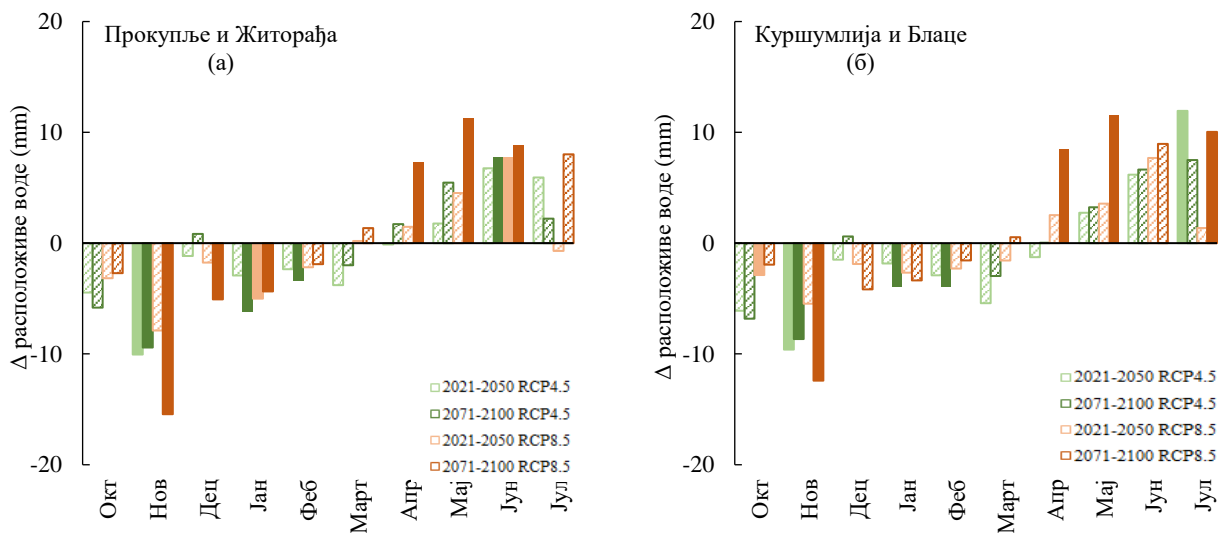
Слика 58. Дефицит/суфицит воде за пшеницу и јечам у референтном и будућим периодима, за подручја Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде.

Са слике 58 уочава се да је дефицит у периоду април-јун већи за подручје Прокупља и Житорађе (Слика 58 (а)), што се може објаснити тиме што је за ово подручје у референтном и будућим периодима добијена већа просечна сума P_{ET} и мања сума P_{eff} у периоду април-септембар, у поређењу са подручјем Куршумлије и Блаца. Са друге стране суфицит у јесењим и зимским месецима већи је за подручје Куршумлије и Блаца (Слика 58 (б)), с обзиром да је за ово подручје очекивана већа просечна сума P_{eff} за период октобар-март, док је сума P_{ET} сличних вредности за оба локалитета.

Статистичка значајност релативне промене расположиве воде пшенице и јечма у односу на референтни период, у току вегетационе сезоне и по месецима, испитивана је Mann-Whitney тестом ($p=0,05$). Резултати анализе представљени су у табели 41. На слици 59 представљена је апсолутна промена расположиве воде пшенице и јечма у односу на референтни период по месецима за два подручја.

На подручју Прокупља и Житорађе, до краја века, према RCP8.5, процењује се да ће дефицит воде у мају статистички значајно повећати за $11 \text{ mm} \cdot \text{mесеc}^{-1}$, што је за 14% више него у току референтног периода (Слика 59 (а), Табела 41).

На подручју Куршумлија и Блаце, у односу на референтни период, до краја века према RCP8.5 сценарију предвиђено је повећање дефицита у априлу и мају од просечно 8 и $12 \text{ mm} \cdot \text{mесеc}^{-1}$, респективно (Слика 59 (б)). Највећи пораст суфицита у односу на референтни период очекује се у новембру, када је предвиђено статистички значајно повећање суфицита од $12 \text{ mm} \cdot \text{mесеc}^{-1}$ (28%) до краја века (RCP8.5) (MW; $p=0,05$).



Слика 59. Промена расположиве воде (Δ) пшенице и јечма у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Анализом података о дефициту воде пшенице и јечма утврђено је да промена дефицита за ове културе не прати образац промене примећен код осталих култура. За подручје Прокупља и Житорађе на нивоу вегетационе сезоне пшенице и јечма (октобар-јул), током референтног периода симулиран је дефицит воде од просечно 50 mm по вегетационој сезони. Симулирани дефицит у будућности ићи ће у смеру смањења, изузев у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију, када се очекује повећање од 7 mm. Највеће повећање расположиве воде од 10 mm, добијено је за период блиске будућности према RCP4.5 сценарију. На нивоу вегетационе сезоне пшенице и јечма на подручју Куршумлије и Блаца током референтног периода симулирана је појава вишкова воде од 33 mm у референтном периоду, која се до краја века по RCP8.5 сценарију смањује услед климатских промена за просечно 16 mm. Претходно рађена истраживања показују да се у неким регионима (централна Европа, источна Енглеска, Азербејџан, Иран, Ирак) у условима климатских промена у будућности очекује појава дефицита и пораст количине воде коју је пшеници и јечму потребно надокнадити наводњавањем (Thaler et al., 2012; El Chami и Daccache, 2015; Ashofteh et al., 2015; Mirgol et al., 2020; Salman et al., 2020). На основу представљених резултата овог истраживања може се закључити да у блиској будућности климатске промене неће имати негативан ефекат на производњу пшенице и јечма, са аспекта обезбеђености водом. Међутим у далекој будућности, при сценарију RCP8.5, очекује се мало повећање дефицита воде у априлу и мају, што би могло да се одрази на смањење финалног приноса. До сличног закључка су дошли и Matović et al. (2021a) симулирајући параметре водног режима земунског чернозема под усевом пшенице, на основу пројекције климатског модела по сценарију RCP8.5. Они су закључили да се у блиској будућности (2021/2022-2050/2051) очекују повољнији услови водног режима за производњу пшенице (смањење потребе за наводњавањем и мања редуција приноса него у референтном периоду (1970/1971-1999/2000), док се у последње три деценије 21. века очекују лошији услови водног режима, већа потреба за наводњавањем и већа редуција приноса него у референтном периоду. Стричевић и сар. (2021) проценили су утицај померања рокова сетве и наводњавања на приносе кукуруза, сунцокрета и пшенице, као мера адаптације на климатске промене. Закључак студије изведен на основу пројекција ансамбла климатских и *AquaCrop* модела је да се на подручју Србије могу постићи високи приноси пшенице и у условима без наводњавања.

Кукуруз

Вегетациона сезона кукуруза одвија се у периоду април-септембар, за који је предвиђено смањење просечне суме P_{eff} , што уз предвиђено повећање ЕТ кукуруза доводи до дефицита воде. Образац промене симулираних вредности дефицита/суфицита воде кукуруза у условима климатских промена сличан је на подручју оба посматрана локалитета. Током вегетационе сезоне, резултати симулација показују да је кукуруз изложен дефициту воде у референтном и у будућим периодима.

Симулирана вредност дефицита на подручју Прокупља и Житорађе у референтном периоду износи $300 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (Слика 54). У периоду блиске и далеке будућности, према оба сценарија, очекује се статистички значајно повећање дефицита (MW; $p=0,05$) на нивоу вегетационе сезоне кукуруза у односу на референтни период. Према RCP8.5 сценарију, до краја века указују на просечни пораст дефицита од 74 mm (Слика 56), у односу на референтни период, односно 25% (Табела 42). Промена дефицита најмања је у периоду блиске будућности по RCP8.5, када је предвиђено и најмање смањење P_{eff} .

За подручје Куршумлије и Блаца просечни дефицит за период април-септембар у референтном периоду износи $234 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (Слика 55). У будућим периодима, по оба сценарија, предвиђено је статистички значајно повећање дефицита (MW; $p=0,05$). До краја века, дефицит воде за кукуруз на овом подручју повећаће се за $40 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ по RCP4.5 и $75 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ по RCP8.5, у односу на вредности симулиране у референтном периоду (Слика 57).

Релативна промена расположиве воде кукуруза у будућим периодима и резултати статистичке анализе Mann-Whitney тестом ($p=0,05$) дати су у табели 42.

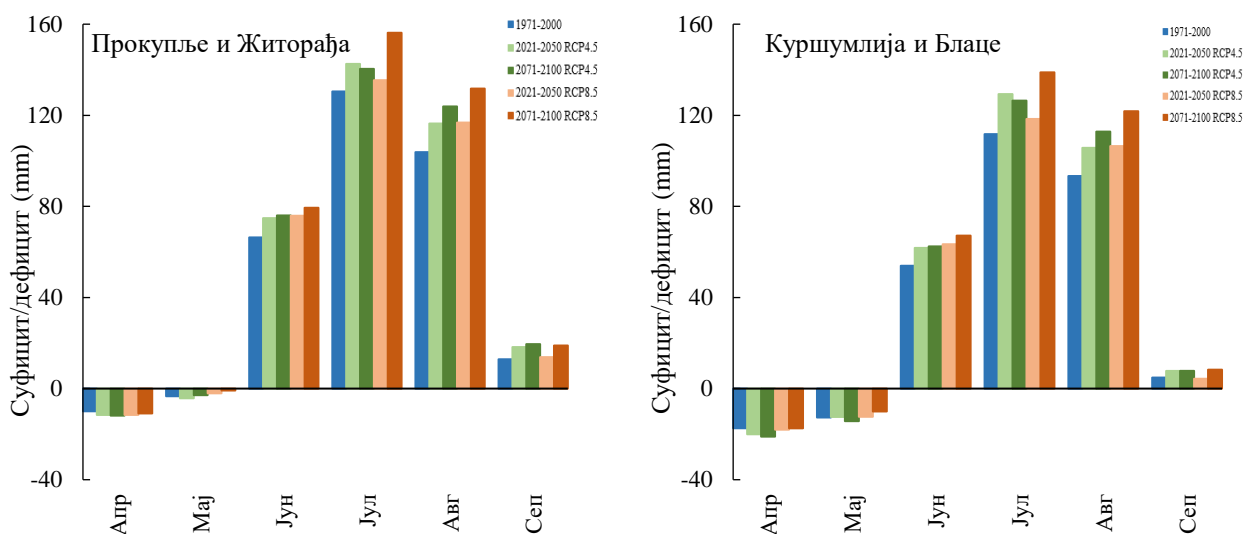
Табела 42. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) кукуруза у односу на референтни период.

		Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Вег. сез.
		Δ (%)						
Прокупље и Житорађа	2021-2050 RCP4.5	16,1	27,0	12,8	9,3	12,1	41,6	12,0
	2071-2100 RCP4.5	19,1	-14,0	14,5	7,6	19,3	51,7	14,9
	2021-2050 RCP8.5	16,0	-37,9	14,3	3,8	12,5	7,3	9,4
	2071-2100 RCP8.5	9,5	-74,8	19,6	19,7	26,9	46,9	25
Куршумлија и Блаце	2021-2050 RCP4.5	15,2	-2,0	14,5	15,7	13,3	60,3	16,4
	2071-2100 RCP4.5	21,1	12,6	15,8	13,2	20,9	60,8	17,3
	2021-2050 RCP8.5	3,6	-2,5	17,5	6,0	14,1	-10,8	12,2
	2071-2100 RCP8.5	0,2	-20,9	24,5	24,3	30,5	71,6	32,0

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann-Whitney $p=0,05$).

Месечна расподела дефицита/суфицита воде одражава месечну расподелу P_{eff} . Појава вишкова вода очекује се у месецима април и мај, када је предвиђен и пораст P_{eff} . У периоду јун-септембар, када се углавном очекује смањење P_{eff} , симулиран је недостатак воде у референтном и будућим периодима, за оба посматрана локалитета (Слика 60). Највеће вредности дефицита очекују се у јулу далеке будућности према RCP8.5 сценарију, 156 mm за

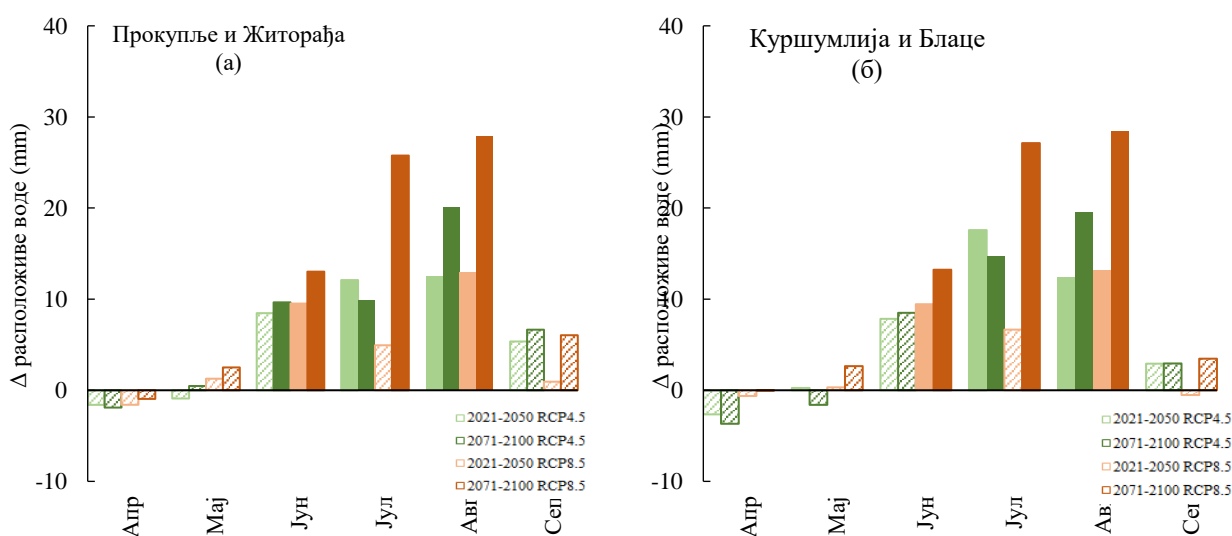
подручје Прокупље и Житорађа (Слика 60 (а)) и 139 mm за подручје Куршумлија и Блаце (Слика 60 (б)).



Слика 60. Дефицит/суфицит воде за кукуруз у референтном и будућим периодима, за подручја Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде.

За подручје Прокупље и Житорађа, највећи апсолутни месечни пораст дефицита у будућим периодима у односу на референтни очекује се у августу. До краја века дефицит воде у августу повећаће се за $20 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ (RCP4.5), односно $28 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ (RCP8.5) (Слика 61 (а)).

На локалитету Куршумлија и Блаце, у периоду блиске будућности по RCP4.5 сценарију највећи пораст дефицита у односу на референтни период предвиђен је у јулу ($18 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$). У осталим периодима према оба сценарија повећање дефицита је веће у августу, са максималном вредношћу од $28 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ у периоду далеке будућности по RCP8.5 (Слика 61 (б)).



Слика 61. Промена расположиве воде (Δ) кукуруза у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Резултати овог истраживања показали су да се у будућности може очекивати пораст дефицита воде кукуруза, који до краја века према сценарију RCP8.5 износи око 75 mm, у односу на референтни период. Слични резултати објављени су у студијама рађеним за подручје јужне и централне Европе (ЕЕА, 2016), као и за Србију (Товјанин et al., 2019; Стричевић и сар., 2021). Највеће вредности дефицита током вегетационе сезоне кукуруза (април-септембар) на испитиваном подручју очекују се у јулу и августу. Са аспекта обезбеђености водом, недостатак воде у летњим месецима (јун-август) критичан је у производњи кукуруза (Товјанин et al., 2019). Недостатак воде у јулу може се негативно одразити на даљи развој и принос кукуруза, јер се у том периоду одвија фаза цветања и оплодње у току које је кукуруз осетљив на дефицит воде (Матовић и сар., 2021б).

Кромпир

На нивоу вегетационе сезоне кромпира (април-август) симулиран је дефицит воде за посматрана подручја у току референтног периода (Слика 54 и 55). Према пројекцијама оба сценарија, у будућим периодима очекује се појава дефицита. У односу на референтни период дефицит у будућим периодима по оба сценарија се статистички значајно повећава (MW; $p=0,05$) (Табела 43).

Табела 43. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) кромпира у односу на референтни период.

		Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Вег. сез.
		Δ (%)					
Прокупље и Житорађа	2021-2050 RCP4.5	-19,8	1,3	10,1	9,5	13,6	9,2
	2071-2100 RCP4.5	-16,8	7,4	11,4	7,7	21,5	11,6
	2021-2050 RCP8.5	-13,9	7,1	11,2	3,8	14,0	8,4
	2071-2100 RCP8.5	14,7	16,8	16,7	20,1	29,4	21,0
Куршумлија и Блаце	2021-2050 RCP4.5	139,4	5,0	11,0	16,5	15,1	12,7
	2071-2100 RCP4.5	168,4	3,4	12,0	13,7	23,6	13,8
	2021-2050 RCP8.5	-7,1	6,5	13,1	6,1	16,0	10,8
	2071-2100 RCP8.5	-117,9	23,4	20,0	25,0	33,9	26,6

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

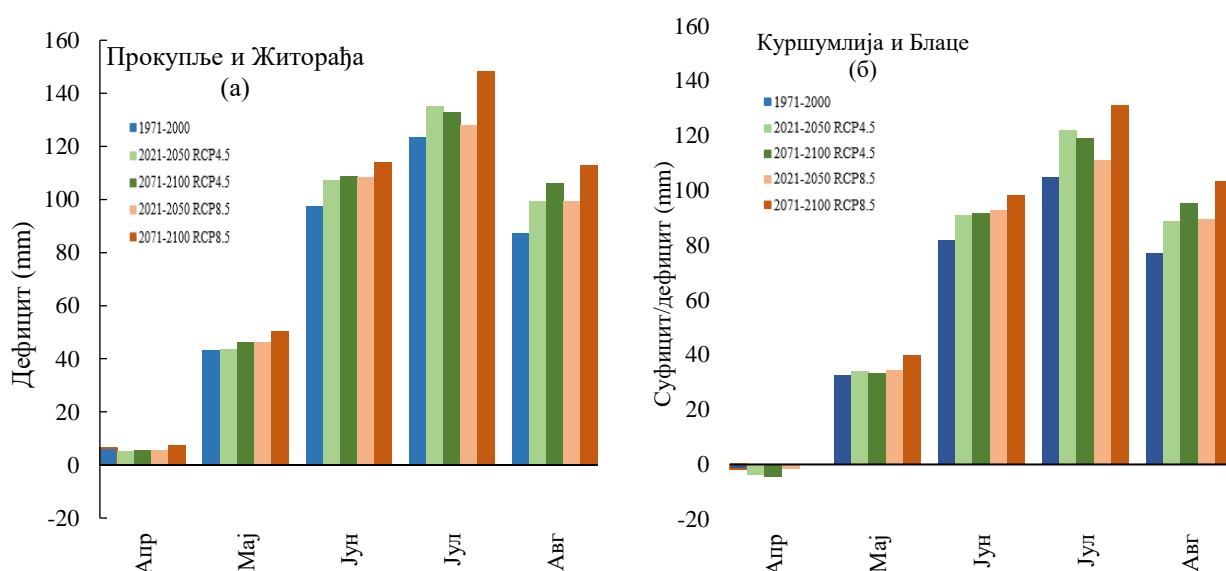
За подручје општина Прокупље и Житорађа, симулирана вредност дефицита у референтном периоду износи просечно 357 mm по вегетационој сезони (Слика 54). До краја века, предвиђено је статистички значајно повећање дефицита у односу на референтни период од 42 mm·вегетациона сезона⁻¹ и 75 mm·вегетациона сезона⁻¹ према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију, респективно (Слика 56).

На локалитету Куршумлија и Блаце просечна вредност дефицита за вегетациону сезону симулирана у референтном периоду износи 295 mm по вегетационој сезони (Слика 55). У

односу на вредност дефицита у референтном периоду у будућности се очекује статистички значајан пораст дефицита према оба сценарија (Табела 43). Очекује се да се до краја века недостатак воде у току вегетационе сезоне кромпира повећа за 41 mm·вегетациона сезона⁻¹ (RCP4.5), односно за 78 mm·вегетациона сезона⁻¹ (RCP8.5) у односу на референтни период (Слика 57).

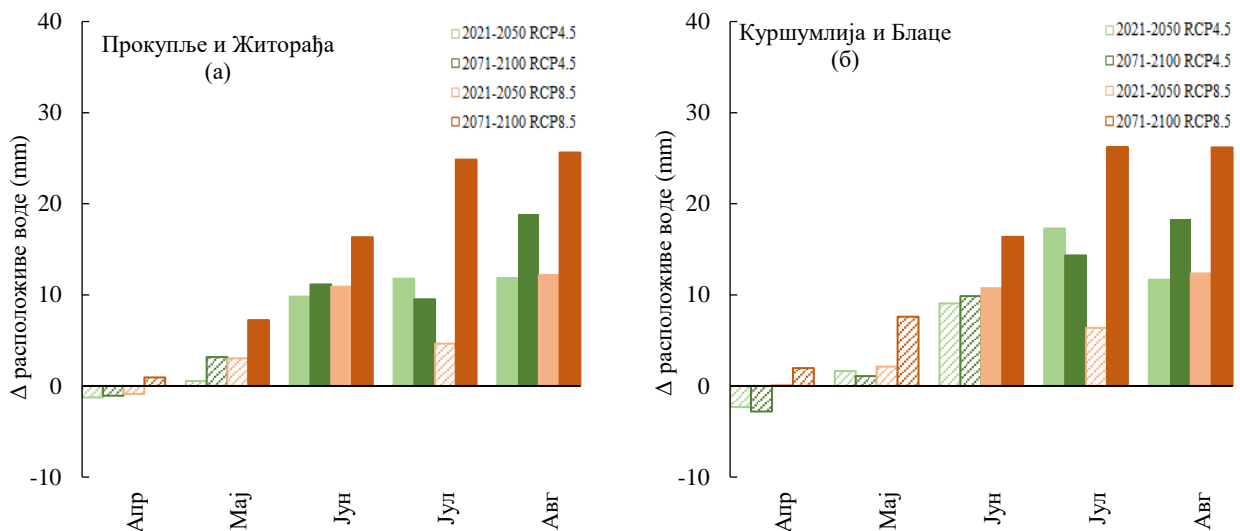
Посматрано по месецима вегетационе сезона кромпира (април-август), у референтном периоду симулиран је дефицит воде, за подручје Прокупље и Житорађа (Слика 62 (а)). У односу на референтни период, предвиђени дефицит у априлу повећава се само у периоду далеке будућности према RCP8.5, док је за остале месеце добијено повећање дефицита у свим периодима по оба сценарија. Највећи недостатак воде у будућности очекује се у јулу и према строжијем сценарију до краја века износи 148 mm·месеца⁻¹ (Слика 62 (а)).

За подручје Куршумлије и Блаца, на месечном нивоу у периоду мај-август симулиран је дефицит воде кромпира у референтном и периодима будућности (Слика 62 (б)). Највеће вредности дефицита за месеце мај-август очекују се у периоду далеке будућности према RCP8.5 сценарију, док је максимална вредност дефицита од 131 mm·месеца⁻¹ предвиђена у јулу (Слика 62 (б)). Током референтног и будућних периода у априлу симулиције указују појава незнатних вишкова воде, изузев у периоду далеке будућности према RCP8.5 сценарију када се очекује појава веома малог дефицита (0,3 mm·месеца⁻¹).



Слика 62. Дефицит/суфицит воде за кромпир у референтном и будућим периодима, за подручја Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде.

Статистичка значајност релативне промене (MW; p=0,05) расположиве воде у односу на референтни период по месецима вегетационе сезоне кромпира за посматрана подручја дата је у табели 43. На слици 63 представљена је апсолутна промена расположиве воде по месецима у односу на референтни период, за два посматрана локалитета.



Слика 63. Промена расположиве воде (Δ) кромпира у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Према предвиђањима под оба сценарија, највеће повећање дефицита воде кромпира за локалитет Прокупље и Житорађа очекује се у августу, које до краја века износи просечно $19 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ (RCP4.5) и $26 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ (RCP8.5) (Слика 63 (а)).

За локалитет Куршумлија и Блаце, од маја до августа предвиђен је пораст дефицита у односу на референтни период (Слика 63 (б)). Највећи пораст недостатка воде предвиђен је у јулу и августу далеке будућности по RCP8.5 сценарију ($26 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$).

Подаци добијени у спроведеном истраживању указују да се у условима климатских промена у периоду далеке будућности очекује недостатак воде кромпира од 431 mm (Прокупље и Житорађа) и 373 mm (Куршумлија и Блаце) по вегетационој сезони (RCP8.5). У односу на референтни период, у будућим периодима очекује се пораст дефицита. Због плитког кореновог система кромпир је осетљив на сушу. Недостатак воде који се јавља као последица климатских промена може допринети паду приноса кромпира до 4% (Dahal et al., 2019). У студији процене утицаја климатских промена на производњу кромпира у Уједињеном Краљевству добијено је да се у периоду 2050-2080, према RCP8.5 сценарију очекује пораст потребе воде за наводњавање кромпира у опсегу 20-30% (Adesina и Thomas, 2020). Током вегетационе сезоне кромпира (април-август), највећи недостатак воде у будућности је предикован у јулу. Дефицит воде који се очекује у јулу може имати изражени негативни ефекат на принос кромпира, с обзиром на то да тада кромпир пролази кроз фазу интензивног наливања кртола, када је и најосетљивији на недостатак воде (Поштић, 2013). Grusson et al. (2021) закључили су да се јулу и августу очекује повећања дефицита воде и норме наводњавања кромпира у периоду 2021-2050 у Шведској.

Луцерка и детелина

Процена обезбеђености луцерке и детелине водом за референтни период показује да су у периоду април–октобар ови усеви изложени дефициту воде. У будућим периодима, према оба RCP сценарија, превиђено је повећање дефицита.

За подручје општина Прокупље и Житорађа симулирана количина дефицита воде за референтни период луцерке износи $329 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$, а детелине $289 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (Слика 54). У односу на те вредности, у будућим периодима очекује се повећање дефицита (RCP4.5, RCP8.5). До краја века, према RCP8.5 сценарију, предвиђено

је статистички значајно повећање дефицита воде луцерке од 60 mm·вегетациона сезона⁻¹ и детелине 55 mm·вегетациона сезона⁻¹ (MW; p=0,05) (Слика 56). За исти период, релативна промена по RCP8.5 сценарију износи 18% (луцерка) и 19% (детелина) (Табела 44 и 45).

Резултати прорачуна симулираног дефицита/суфицита воде луцерке и детелине за подручје Куршумлије и Блаца такође указују да су ове културе на нивоу вегетационе сезоне референтног периода изложене дефициту воде (Слика 55). Симулирани дефицит за ово подручје мањи је од симулираног дефицита за подручје Прокупља и Житорађе, што је у складу са већом количином просечних годишњих P_{eff} на овом подручју, за референтни и будуће периоде. Предвиђени дефицити у референтном периоду износе 221 mm за вегетациону сезону луцерке и 183 mm за вегетациону сезону детелине. У периоду далеке будућности према RCP8.5 сценарију дефицит ће се статистички значајно повећати за 67 mm·вегетациона сезона⁻¹ (луцерка) и 62 mm·вегетациона сезона⁻¹ (детелина) (Слика 57), односно 30% и 34%, респективно (Табела 44 и 45).

Табела 44. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) луцерке у односу на референтни период.

	2021-2050 RCP4.5	2071-2100 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2071-2100 RCP8.5
Δ (%)				
Прокупље и Житорађа				
Јан	14,4	31,0	25,5	20,2
Феб	17,0	23,2	15,6	10,2
Март	75,6	59,5	17,9	32,1
Апр	-1,4	1,6	1,4	12,0
Мај	2,0	6,8	5,8	14,3
Јун	11,1	12,6	12,3	17,8
Јул	11,0	8,3	3,7	22,2
Авг	13,5	21,4	13,9	29,2
Сеп	15,3	19,8	5,3	23,3
Окт	-27,1	-32,0	-14,7	-0,5
Нов	29,7	27,4	23,0	44,8
Дец	3,1	-2,9	4,9	13,8
Вег. сез.	4,4	7,8	4,0	18,2
Куршумлија и Блаце				
Јан	6,9	15,3	10,7	11,9
Феб	13,5	17,7	10,5	4,7
Март	45,8	34,1	21,0	21,3
Апр	-5,8	-3,7	5,4	20,1
Мај	4,2	4,5	5,5	18,1
Јун	12,4	13,5	14,8	21,7
Јул	20,5	16,3	6,8	28,9
Авг	14,9	23,3	15,8	33,5
Сеп	11,8	14,1	2,6	22,0
Окт	-64,7	-64,6	-19,5	13,0
Нов	23,0	20,4	12,8	29,0
Дец	3,9	-2,2	5,0	10,5
Вег. сез.	6,4	9,8	7,7	30,2

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney p=0,05).

Табела 45. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) детелине у односу на референтни период.

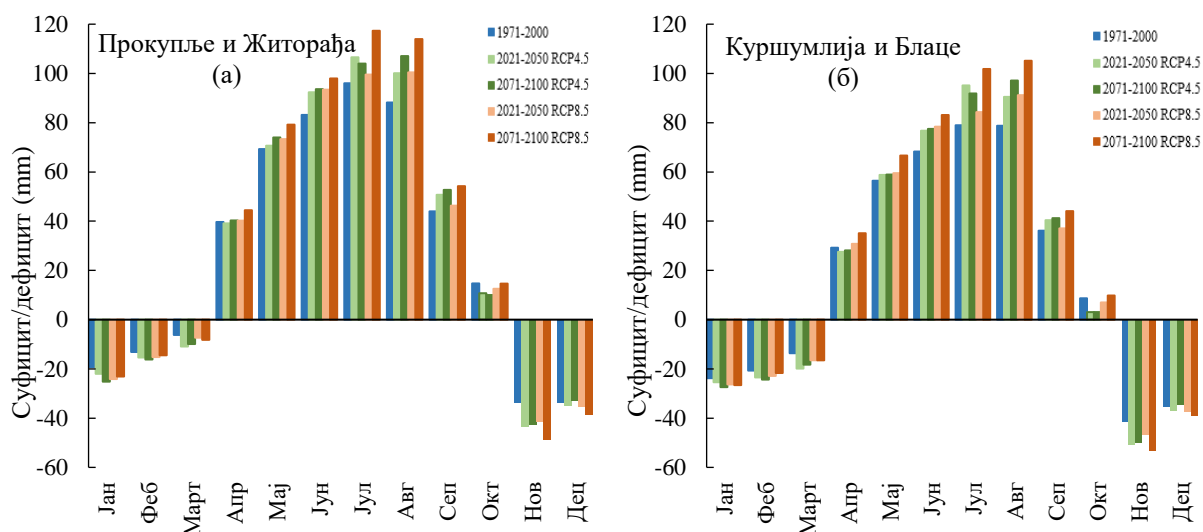
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
	RCP4.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP8.5
Δ (%)				
Прокупље и Житорађа				
Јан	14,4	31,0	25,5	20,2
Феб	17,0	23,2	15,6	10,2
Март	75,6	59,5	17,9	32,1
Апр	-1,7	1,3	1,1	12,1
Мај	1,8	6,9	6,0	14,8
Јун	11,8	13,4	13,2	18,6
Јул	11,6	8,6	3,6	23,1
Авг	14,4	22,7	14,7	30,7
Сеп	16,5	21,3	5,4	24,3
Окт	-29,2	-34,7	-16,1	-1,2
Нов	29,7	27,4	23,0	44,8
Дец	3,1	-2,9	4,9	13,8
Вег. сез.	4,5	8,1	4,0	19,0
Куршумлија и Блаце				
Јан	6,9	15,3	10,7	11,9
Феб	13,5	17,7	10,5	4,7
Март	45,8	34,1	21,0	21,3
Апр	-6,7	-4,8	5,5	21,0
Мај	4,4	4,3	5,7	19,1
Јун	13,4	14,6	16,1	23,1
Јул	22,4	17,6	7,1	30,8
Авг	16,0	24,9	16,9	35,6
Сеп	12,8	15,0	2,3	23,0
Окт	-73,6	-73,8	-22,6	13,3
Нов	23,0	20,4	12,8	29,0
Дец	3,9	-2,2	5,0	10,5
Вег. сез.	6,9	10,6	8,4	33,9

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

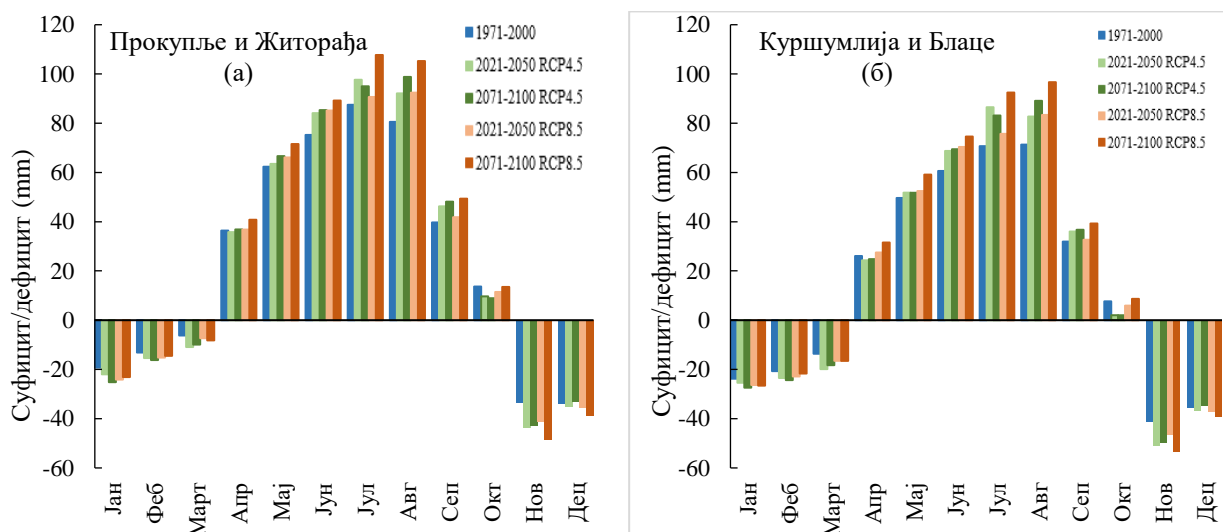
Унутарсезонска расподела расположиве воде за детелину и луцерку на оба локалитета огледа се у појави вишкова воде у периоду новембар-март и недостатка воде у периоду април-октобар, током референтног и будућих периода. Највећи суфицит воде предвиђа се у новембру и децембру, а дефицит у јулу и августу (Слика 64 и 65). Суфицит воде код обе културе у будућим периодима се повећава у односу на референтни период, осим у децембру далеке будућности по RCP4.5 (Слика 64 и 65).

За подручје Прокупља и Житорађе, највећи дефицит воде предвиђен до краја века према RCP8.5 сценарију очекује се у јулу и износи $117 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ за луцерку (Слика 64 (а)) и $108 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ за детелину (Слика 65 (а)). За подручје Куршумлије и Блаце, највећи

недостатак у периоду далеке будућности према RCP8.5 сценарију очекује се у августу, од $105 \text{ mm} \cdot \text{месеца}^{-1}$ за луцерку (Слика 64 (б)) и $97 \text{ mm} \cdot \text{месеца}^{-1}$ за детелину (Слика 65 (б)).

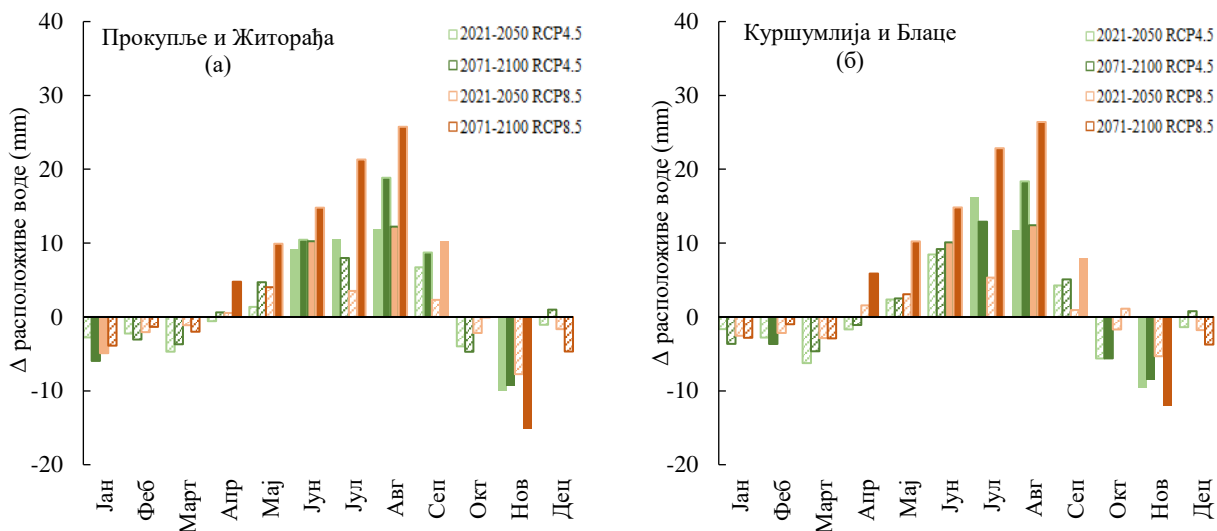


Слика 64. Дефицит/суфицит воде за луцерку у референтном и будућим периодима, за подручја Прокупље и Житораја (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде.

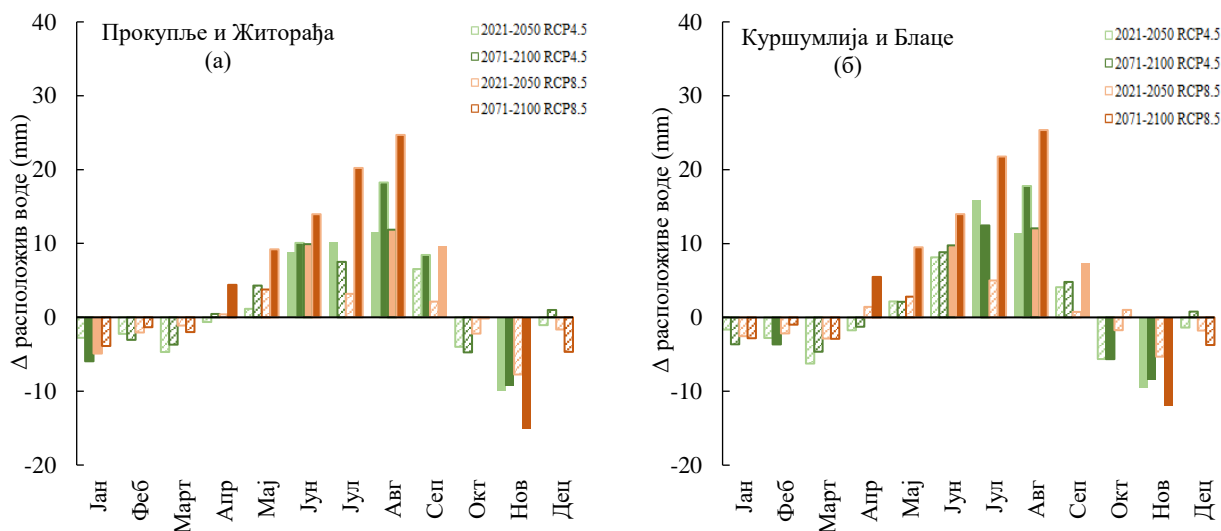


Слика 65. Дефицит/суфицит воде за детелину у референтном и будућим периодима, за подручја Прокупље и Житораја (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде.

На сликама 66 и 67 представљена је апсолутна промена расположиве воде по месецима у будућности у односу на референтни период за луцерку и детелину, респективно. Уочава се да је за обе културе на посматраним локалитетима у периоду мај-септембар предвиђен пораст дефицита воде у свим будућим периодима по оба RCP сценарија, док промена дефицита у априлу и октобру није униформна. Највећи пораст дефицита очекује се у августу далеке будућности према RCP8.5 сценарију, за обе културе. Промена суфицита воде у будућности иде у смеру повећања у односу на референтни период, изузев у децембру далеке будућности по RCP4.5 сценарију.



Слика бб. Промена расположиве воде (Δ) луцерке у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).



Слика б7. Промена расположиве воде (Δ) детелине у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Резултати спроведеног истраживања указују да се у условима климатских промена у Топличком округу очекује пораст дефицита воде за културе луцерку и детелину, при чему се највеће вредности дефицита и пораста предиковани за период далеке будућности по RCP8.5 сценарију. Добијени резултати су у сагласности са претходно рађеним истраживањима, која указују на појаву дефицита и повећање потребе за наводњавањем услед климатских промена за луцерку (Savé et al., 2012; Ashofteh et al., 2015; Medina-Garcia et al., 2020) и детелину (Ouda et al., 2015).

Јабука, вишња и шљива

Према FAO 56 публикацији (Allen et al., 1998) јабука и вишња спадају у групу култура са истом вредношћу ks . Због сличних вредности ks за засад шљиве, добијени су веома слични резултати прорачуна за ове културе по посматраним локалитетима. Стога је у наставку дат преглед симулираних потреба и промена вредности дефицита/суфицита за ова три засада.

Прорачун обезбеђености засада јабуке, вишње и шљиве водом, базиран на симулацијама климатских величина за метеоролошку станице Прокупље, указује да су засади током вегетационе сезоне (април-октобар) референтног периода изложени дефициту воде, са вредностима $495 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (јабука и вишња), односно $475 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (шљива) (Слика 54). Предвиђено је да се недостатак воде симулиран током референтног периода у будућим периодима статистички значајно повећа (MW ; $p=0,05$). Највећа промена у односу на референтни период очекују се до краја века према RCP8.5, када очекује статистички значајно повећање дефицита за јабуку и вишњу од $95 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ и за шљиву $93 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (Слика 56), што је релативна промена од 19% и 20%, респективно (Табела 46 и 47).

Нешто мање вредности дефицита током вегетационе сезоне (период април-октобар) референтног периода јабуке, вишње и шљиве симулиране су за подручје Куршумлије и Блага (Слика 55), $414 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (јабука и вишња) и $394 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (шљива). Такође се током будућих периода очекује се повећање дефицита у односу на референтни период, а највећи пораст од $97 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (24%) за јабуку и вишњу и $95 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (24%) за шљиву предвиђен је у далекој будућности према RCP8.5 сценарију (Слика 57). Релативна промена расположиве воде за вегетациону сезону јабуке, вишње и шљиве и по месецима дата је у табелама 46 и 47.

Табела 46. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) јабуке и вишње у односу на референтни период.

		Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Окт	Вег. сез.
		Δ (%)							
Прокупље и Житорађа	2021-2050 RCP4.5	-19,8	1,3	9,5	9,2	11,0	11,6	-20,0	7,8
	2071-2100 RCP4.5	-16,8	7,4	10,8	7,6	17,7	15,4	-23,2	10,3
	2021-2050 RCP8.5	-13,9	7,1	10,6	3,8	11,5	5,0	-10,3	6,8
	2071-2100 RCP8.5	14,7	16,8	16,2	19,7	25,1	20,0	1,8	19,3
Куршумлија и Блага	2021-2050 RCP4.5	139,4	5,0	10,2	15,7	12,0	9,1	-43,9	9,4
	2071-2100 RCP4.5	168,4	3,4	11,1	13,2	19,1	11,4	-43,0	10,9
	2021-2050 RCP8.5	-7,1	6,5	12,0	6,0	12,8	3,4	-12,1	8,3
	2071-2100 RCP8.5	-117,9	23,4	18,9	24,3	28,2	19,2	12,2	23,5

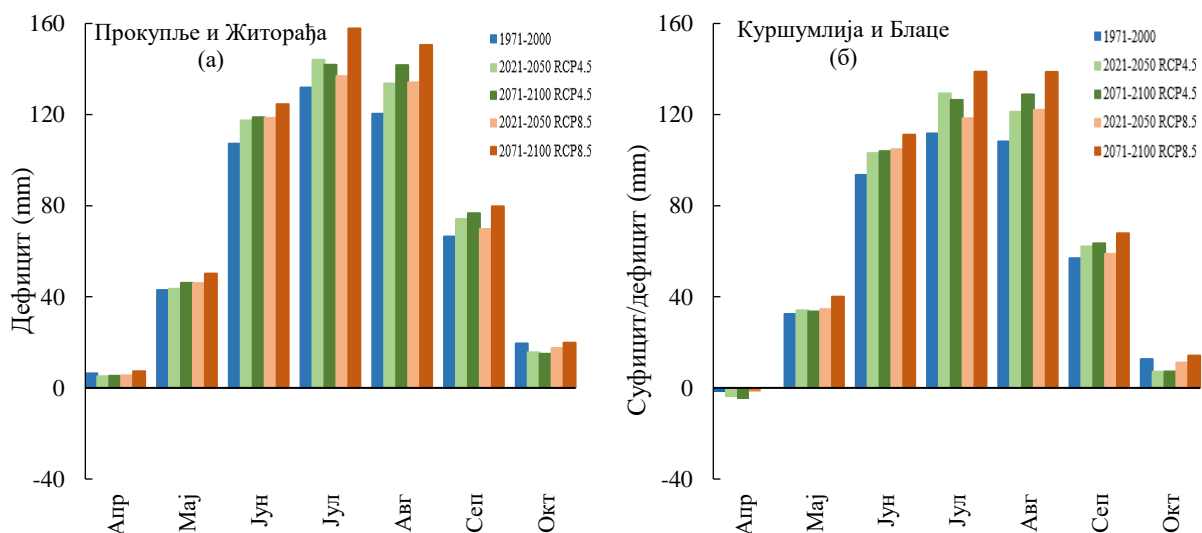
* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом ($Mann-Whitney p=0,05$).

Табела 47. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) шљиве у односу на референтни период.

		Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Окт	Вег. сез.
		Δ (%)							
Прокупље и Житорађа	2021-2050 RCP4.5	-19,8	1,3	9,9	9,5	11,4	12,1	-23,3	8,0
	2071-2100 RCP4.5	-16,8	7,4	11,2	7,7	18,3	16,0	-27,4	10,4
	2021-2050 RCP8.5	-13,9	7,1	11,0	3,8	11,8	5,0	-12,4	6,9
	2071-2100 RCP8.5	14,7	16,8	16,6	20,1	25,7	20,4	0,7	19,6
Куршумлија и Блаце	2021-2050 RCP4.5	139,4	5,0	10,7	15,7	12,5	9,5	-55,4	9,7
	2071-2100 RCP4.5	168,4	3,4	11,6	13,2	19,8	11,8	-55,0	11,1
	2021-2050 RCP8.5	-7,1	6,5	12,6	6,0	13,3	3,3	-16,2	8,5
	2071-2100 RCP8.5	-117,9	23,4	19,4	24,3	29,1	19,6	12,6	24,1

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

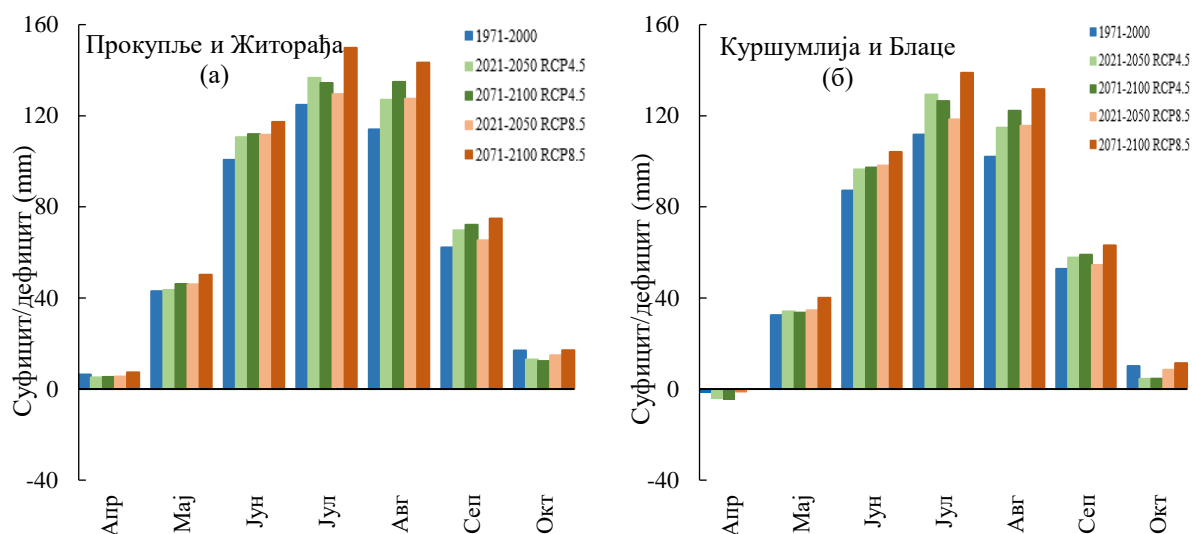
На подручју Прокупље и Житорађа у месецима вегетационе сезоне три засада (април-октобар) током референтног и будућих периода симулирана је појава дефицита воде. Летњи месеци (јун-август) одликују се највећим недостатком воде. До краја века, према RCP8.5 у овим месецима очекује се дефицит воде од 125 до 158 mm·месе⁻¹ за засаде јабуке и вишње (Слика 68 (а)), односно од 117 до 150 mm·месе⁻¹ за засаде шљиве (Слика 69 (а)).



Слика 68. Дефицит/суфицит воде за јабуку и вишњу у референтном и будућим периодима, за подручја Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде.

У току вегетационе сезоне (април-октобар) јабуке, вишње и шљиве на подручју Куршумлије и Блаца незнатне количине вишка воде јављају се у априлу у референтном и будућим периодима, изузев у далекој будућности по RCP8.5, када је предвиђен дефицит од само 0,3 mm·месе⁻¹. У периоду мај-октобар очекује се појава недостатка воде за три засада,

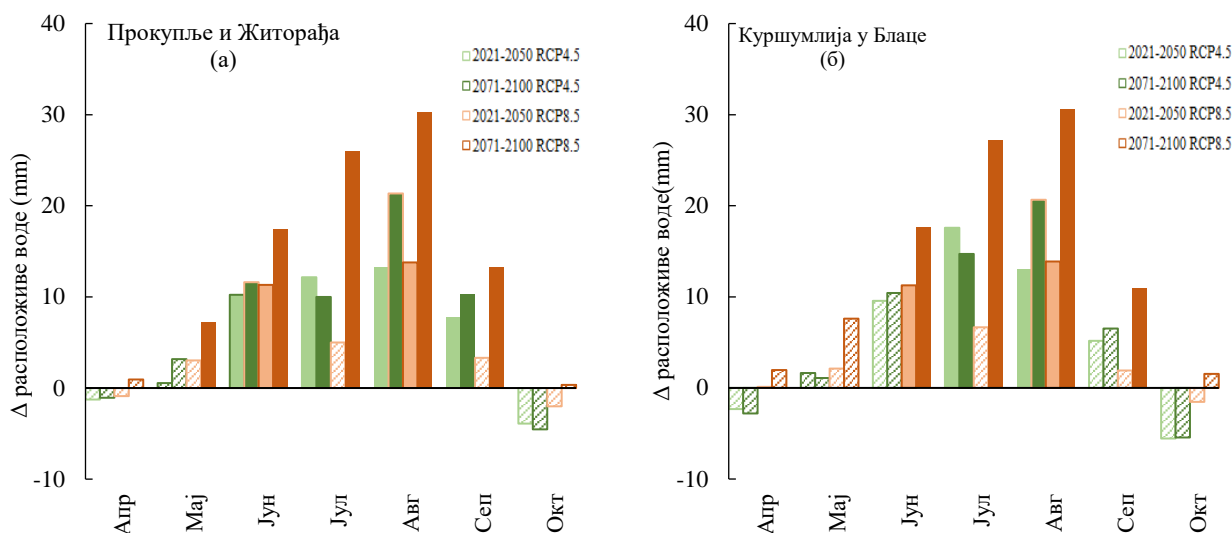
при чему је дефицит мањи у односу на подручје Прокупље и Житорађа. У периоду јун-август, према RCP8.5 сценарију, до краја века очекује се дефицит воде од 111 до 139 mm·месе⁻¹ за засаде јабуке и вишње (Слика 68 (б)) и од 104 до 139 mm·месе⁻¹ за засаде шљиве (Слика 69 (б)).



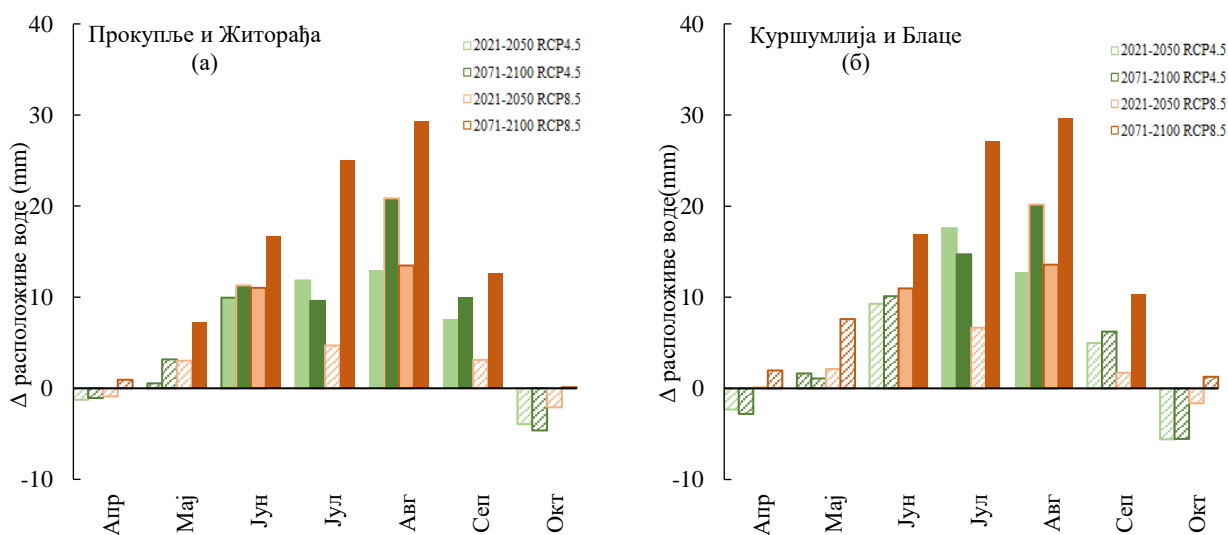
Слика 69. Дефицит/суфицит воде за шљиву у референтном и будућим периодима, за подручја Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде.

Анализа промене расположиве воде по месецима за три засада на оба локалитета показује да се у периоду мај-септембар очекује повећање дефицита у будућим периодима у односу на референтни. Највећа повећања предвиђена су у месецима јун-август, у периоду далеке будућности према RCP8.5 сценарију. До краја века, за подручје Прокупље и Житорађа максимално повећање дефицита воде очекује се у августу по RCP8.5 од 30 mm·месе⁻¹ за јабуку и вишњу (Слика 70 (а)) и 29 mm·месе⁻¹ за шљиву (Слика 71 (а)). Резултати MW теста ($p=0,05$) показују да се статистички значајно повећање очекује у периоду јун-септембар у свим периодима и по оба сценарија, изузев у јулу и септембру блиске будућности према RCP8.5 сценарију. Предвиђени дефицит у априлу и октобру у будућности ће се смањивати, изузев у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију.

За подручје Куршумлија и Блаце у периоду далеке будућности, по RCP8.5 сценарију, предвиђено је повећање дефицита у августу износи 31 mm·месе⁻¹ за јабуку и вишњу (Слика 70 (б)) и 30 mm·месе⁻¹ за шљиву (Слика 71 (б)). Симулирани дефицит воде у октобру повећаће се само у периоду далеке будућности по RCP8.5 (Слика 70 (б) и 71 (б)). Превиђени суфицит воде у априлу, према RCP4.5 сценарију, повећава се у периоду блиске и далеке будућности.



Слика 70. Промена расположиве воде (Δ) јабуке и вишње у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).



Слика 71. Промена расположиве воде (Δ) шљиве у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Процена обезбеђености водом засада јабуке, вишње и шљиве на подручју Топличког округа у условима климатских промена показала је да ће се потребе за водом ових засада статистички значајно повећати у будућности у односу на референтни период. На подручју оба локалитета до краја века, према RCP8.5 сценарију, током вегетационе сезоне засада (април-октобар) предвиђено је повећање ET_c за око 90 mm, док је у периоду април-септембар предвиђено смањење P_{eff} око 8 mm у поређењу са референтним периодом. Овакви услови у будућности условиће пораст дефицита воде јабуке, вишње и шљиве, са знатно већом променом у далекој будућности у односу на блиску, као и по сценарију RCP8.5 (од 93 до 97 mm, односно од 19 до 24%). Резултати су у складу са извештајем утицаја осматраних климатских промена на пољопривреду у Србији и пројекције утицаја будуће климе на основу различитих сценарија

будућих емисија, где се наводи да ће воћарским засадима до краја века бити потребно обезбедити и до 26% више воде, због поштравања сушних услова (Стричевић и сар., 2019б). Посматрано по месецима вегетационе сезоне засада јабуке, вишње и шљиве (април-октобар), највеће вредности дефицита очекују се у периоду јун-август. Максималне вредности недостатка воде од око 155 mm за подручје Прокупља и Житорађе и око 140 mm за подручје Куршумлије и Блага предвиђене су у јулу далеке будућности при RCP8.5 сценарију. Са друге стране, у истом периоду, највећи пораст дефицита у односу на референтни период, очекује се у августу (око 30 mm, односно 25-29%). Пројекције рађене за подручје Србије указују да се појава сушних периода у воћарским засадима очекује од средине маја и почетка јуна (Стричевић и сар., 2019б).

Малина

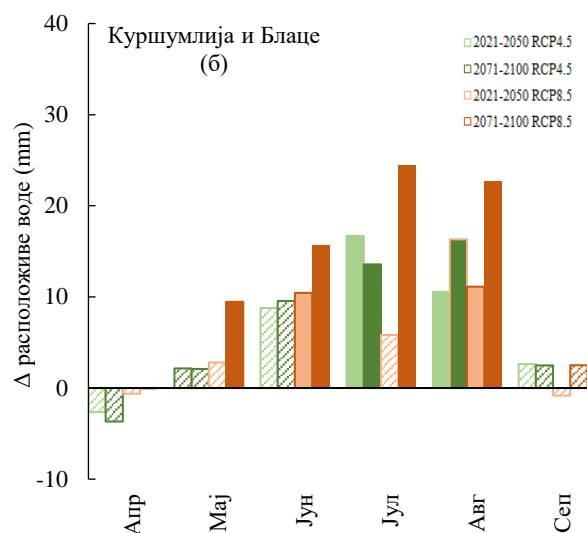
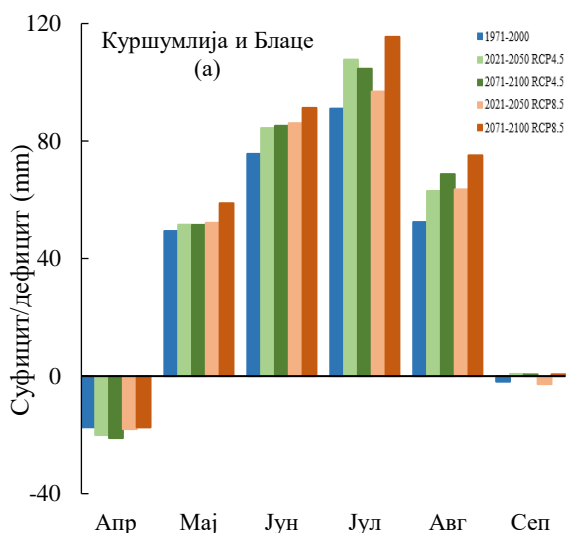
Обезбеђеност водом засада малине праћена је у референтном и будућим периодима на подручју Куршумлије и Блага. Резултати симулација показују да се на нивоу вегетационе сезоне малине (април-септембар) у референтном периоду јавља дефицит воде од 249 mm·вегетациона сезона⁻¹ (Слика 55). У будућности се очекује статистички значајно повећање дефицита, које до краја века износи 75 mm·вегетациона сезона⁻¹ (Слика 57), односно 30% (RCP8.5) (Табела 48).

Табела 48. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) малине у односу на референтни период.

		Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Вег. сез.
		Δ (%)						
Куршумлија и Блага	2021-2050 RCP4.5	15,2	4,4	11,6	18,3	20,2	-139,5	15,3
	2071-2100 RCP4.5	21,1	4,2	12,6	14,9	31,1	-131,6	16,2
	2021-2050 RCP8.5	3,6	5,7	13,8	6,4	21,2	44,3	11,5
	2071-2100 RCP8.5	0,2	19,2	20,7	26,8	43,3	-132,8	30,0

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney p=0,05).

У априлу, у свим посматраним периодима, симулиран је суфицит воде, при чему се у будућим периодима очекује повећање истог изузев у периоду далеке будућности по RCP8.5, у коме ће вредност дефицита остати слична као у референтном периоду. У септембру референтног периода симулиран је суфицит воде, док у будућности појава није униформна. У осталим месецима очекује се појава дефицита воде (Слика 72 (а)). У периоду мај-август предвиђен је пораст дефицита у будућност у односу на референтни период. По RCP8.5 сценарију, до краја века највећи апсолутни пораст предикован је у јулу (24 mm·месе⁻¹) (Слика 72 (б)), док је релативни пораст највећи у августу (43%) (Табела 48).



Слика 72. Дефицит/суфицит воде за малину у референтном и будућим периодима (а) и промена расположиве воде (Δ) у односу на референтни период по месецима (б) за подручје Куршумлија и Блаце. Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде (а), односно позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде (б). Испуњени полигони (б) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Винова лоза

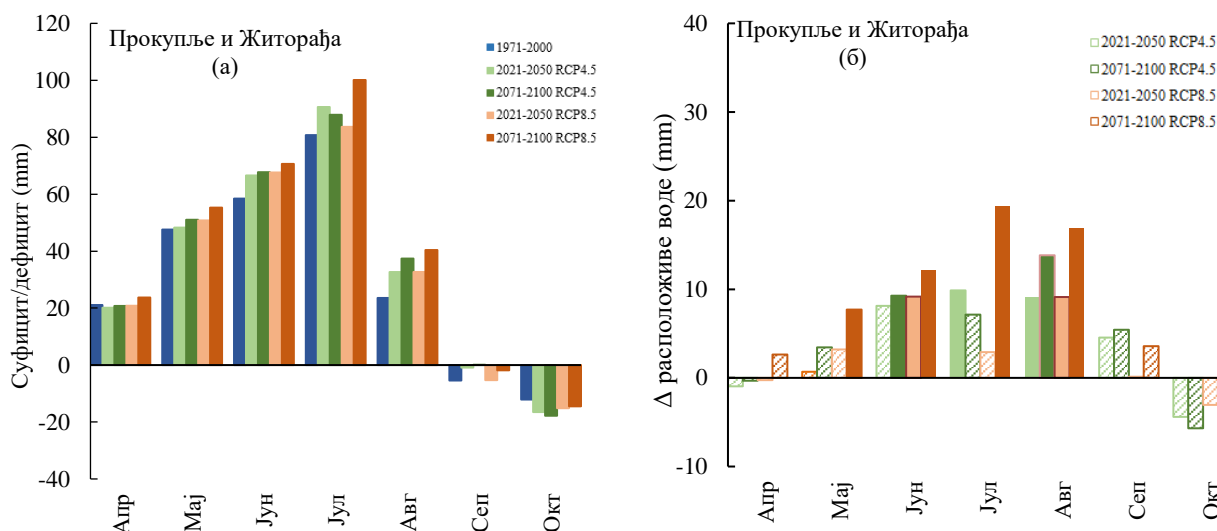
За засаде винове лозе на подручју Прокупља и Житорађе током референтног периода симулирани је дефицит воде на нивоу вегетационе сезоне винове лозе (април-октобар) од 214 mm·вегетациона сезона⁻¹ (Слика 54). У будућности се очекује повећање дефицита, које је статистички значајно у свим периодима, осим у периоду блиске будућности по RCP8.5 (MW; $p=0,05$). До краја века, према RCP8.5 сценарију, предвиђа се повећање дефицита просечно за 60 mm (Слика 56), односно 28% (Табела 49).

Табела 49. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) винове лозе у односу на референтни период.

		Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Окт	Вег. сез.
		Δ (%)							
Прокупље и Житорађа	2021-2050 RCP4.5	-4,5	1,4	13,9	12,2	38,6	-83,8	36,4	12,6
	2071-2100 RCP4.5	-1,5	7,2	15,9	8,8	58,7	-100,0	47,0	15,5
	2021-2050 RCP8.5	-1,2	6,7	15,7	3,6	38,7	-2,4	25,2	9,9
	2071-2100 RCP8.5	12,5	16,2	20,8	24,0	71,4	-65,9	19,8	28,0

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann-Whitney $p=0,05$).

Током вегетационе сезоне винове лозе (април-октобар) предвиђа се појава дефицита воде у периоду април – август, а суфицита у септембру и октобру. До краја века, према RCP8.5 сценарију, предвиђа се дефицит од 24 mm месечно (април) до 100 mm месечно (јул) (Слика 73 (а)). Вредности релативне промене расположиве воде по месецима дате су у табели 9. Највеће апсолутно повећање месечног дефицита од просечно 19 mm очекује се у јулу далеке будућности по RCP8.5 (Слика 73 (б)).



Слика 73. Дефицит/суфицит воде за винову лозу у референтном и будућим периодима (а) и промена расположиве воде (Δ) у односу на референтни период по месецима (б) за подручје Прокупље и Житорађа. Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде (а), односно позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде (б). Испуњени полигони (б) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Резултати овог истраживања показују да ће засади винове лозе на посматраном подручју у будућности бити изложени недостатку воде. До краја века, према RCP8.5 сценарију, дефицит воде износиће 274 mm што је пораст од 60 mm у односу на референтну вредност. Добијени резултати у складу су са литературним подацима који показују да се као последица климатских промена очекује дефицит воде за засаде винове лозе у регионима Европе значајним по заступљености засада винове лозе и да ће имати негативан утицај на остваривање приноса (Droulia и Charalamporoulos 2021; Masia et al., 2021).

Бостан

Прорачун обезбеђености водом на нивоу вегетационе сезоне бостана (април-август) рађен је за подручје Прокупља и Житорађе. Током референтног и будућих периода симулиран је дефицит воде на нивоу вегетационе сезоне (Слика 54).

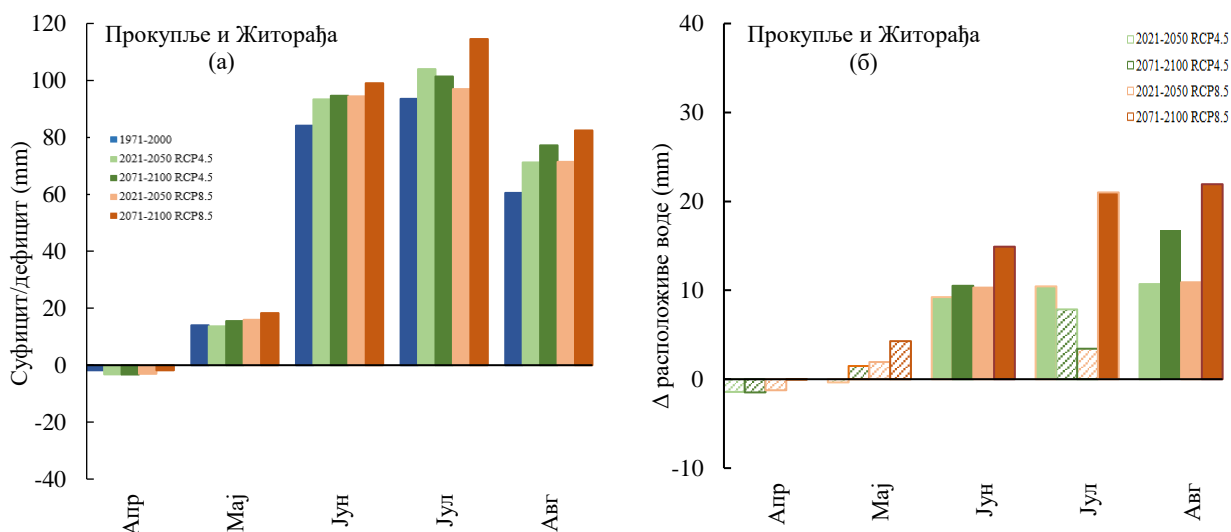
Табела 50. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) бостана у односу на референтни период.

		Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Вег. сез.
		Δ (%)					
Прокупље и Житорађа	2021-2050 RCP4.5	79,9	-2,6	11,0	11,2	17,7	11,4
	2071-2100 RCP4.5	82,9	10,6	12,5	8,4	27,6	14,0
	2021-2050 RCP8.5	69,2	13,8	12,2	3,7	18,0	10,1
	2071-2100 RCP8.5	0,4	30,5	17,7	22,5	36,2	24,8

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann-Whitney $p=0,05$).

Вредност дефицита у референтном периоду од $250 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ у будућим периодима ће се статистички значајно повећати (MW; $p=0,05$). До краја века, према RCP8.5 сценарију, предвиђа се пораст дефицита од $62 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (Слика 56) (25%) (Табела 50) у односу на референтни период.

Посматрано по месецима вегетационе сезоне бостана (април-август), незнатни вишак воде симулиран је у априлу, док је за остале месеце предвиђен дефицит воде (Слика 74 (а)). Предиковани дефицит воде на месечном нивоу биће у порасту у будућности. Највећи пораст дефицита у односу на референтни период очекују се у августу, у свим периодима и по оба сценарија, који до краја века износи $17 \text{ mm} \cdot \text{месеца}^{-1}$ (RCP4.5), односно $22 \text{ mm} \cdot \text{месеца}^{-1}$ (RCP8.5) (Слика 74 (б)).



Слика 74. Дефицит/суфицит воде за бостан у референтном и будућим периодима (а) и промена расположиве воде (Δ) у односу на референтни период по месецима (б) за подручје Прокупље и Житорађа. Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде (а), односно позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде (б). Испуњени полигони (б) означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Пасуљ

У односу на симуларане вредности P_{eff} и ET_c за подручје Прокупља и Житорађе, на нивоу вегетационе сезоне пасуља (април-август) симулирана је појава дефицита у референтном периоду од $264 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (Слика 54).

У будућим периодима такође се очекује појава дефицита. У односу на референтни период, у будућности се предвиђа статистички значајно повећање дефицита које до краја века износи $35 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (RCP4.5) и $62 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (RCP8.5) (Слика 56).

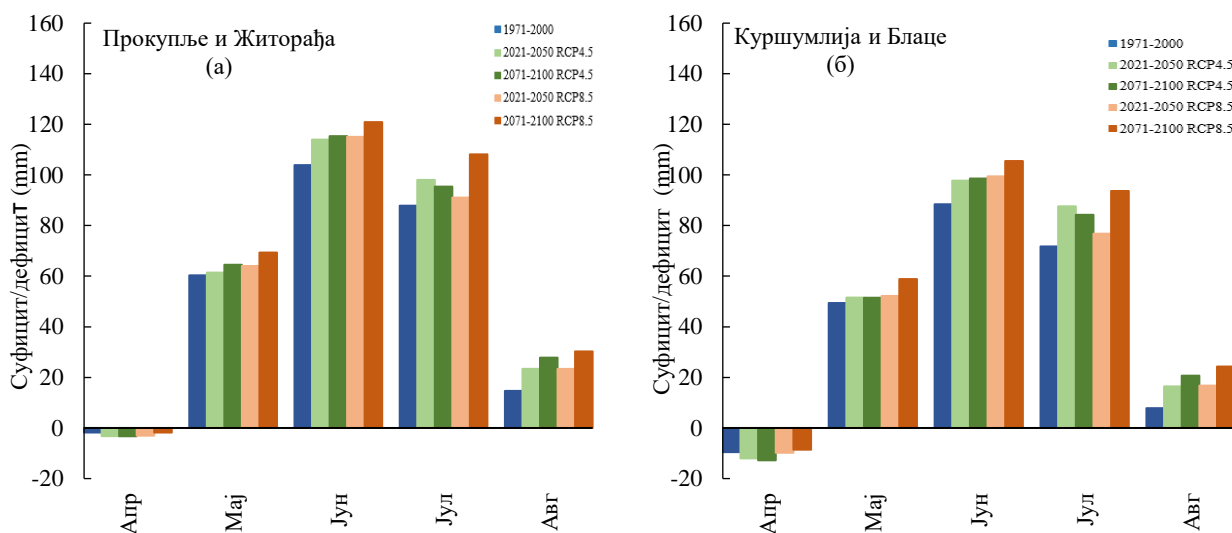
На подручју Куршумлије и Блаца дефицит током вегетационе сезоне (април-август) референтног периода износи $208 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$. Предикције оба сценарија показују да ће и у будућности пасуљ бити изложен дефициту воде (Слика 55). У односу на референтни период, дефицит ће се статистички значајно повећати у будућим периодима, а највеће повећање од $66 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (Слика 57) очекује се у далекој будућности према RCP8.5, што у процентима износи 32% (MW; $p=0,05$) (Табела 10).

Табела 51. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) пасуља у односу на референтни период.

		Апр	Мај	Јун	Јул	Авг	Вег. сез.
		Δ (%)					
Прокупље и Житорађа	2021-2050 RCP4.5	79,9	1,8	9,7	11,6	59,5	10,8
	2071-2100 RCP4.5	82,9	6,9	11,0	8,6	89,7	13,2
	2021-2050 RCP8.5	69,2	6,1	10,8	3,6	59,3	9,6
	2071-2100 RCP8.5	0,4	14,9	16,4	23,1	106,4	23,4
Куршумлија и Блаце	2021-2050 RCP4.5	26,0	4,4	10,6	22,1	110,0	16,1
	2071-2100 RCP4.5	34,0	4,2	11,5	17,4	164,2	16,5
	2021-2050 RCP8.5	2,7	5,7	12,5	7,0	114,0	13,2
	2071-2100 RCP8.5	-10,1	19,2	19,3	30,5	210,3	31,7

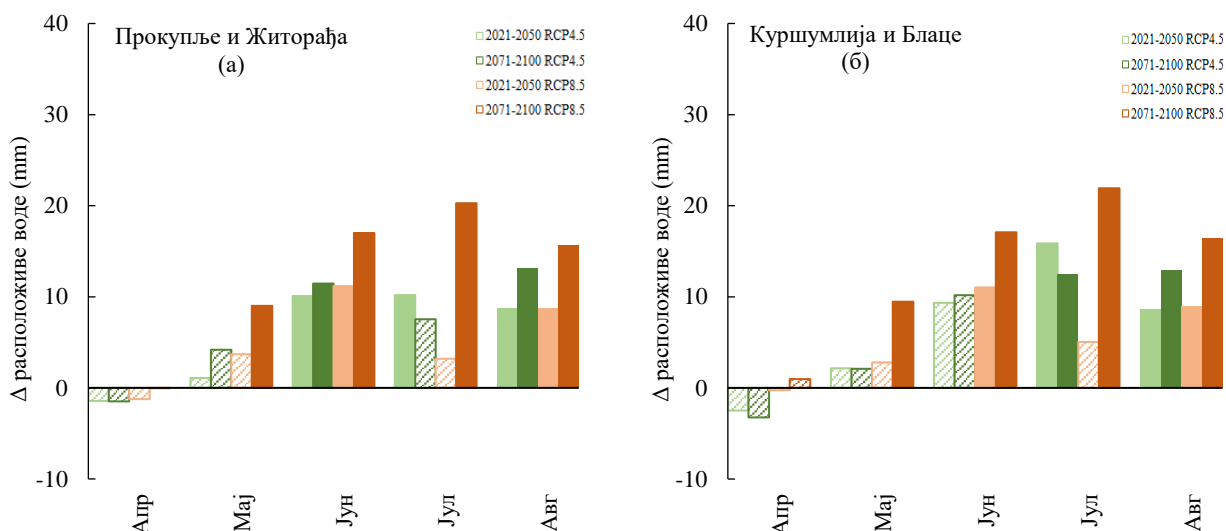
* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

Прорачун месечне обезбеђености водом током референтног периода на оба подручја указује да се у априлу јавља вишак воде, док се у осталим месецима (мај-август) очекује појава дефицита са тенденцијом пораста у будућим периодима. Када се упореде два подручја, уочава се да су веће вредности дефицита предвиђене за Прокупље и Житорађу, док се са друге стране већи суфицит воде очекује за Куршумлију и Блаце. Највећи недостатак воде очекује се у јуну, који до краја века према RCP8.5 сценарију износи $121 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ за Прокупље и Житорађу (Слика 75 (а)), односно $105 \text{ mm} \cdot \text{месец}^{-1}$ за Куршумлију и Блаце (Слика 75 (б)).



Слика 75. Дефицит/суфицит воде за пасуљ у референтном и будућим периодима, за подручја Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају дефицит, а негативне суфицит воде.

Предикована промена расположиве воде за пасуљ у будућности у односу на референтни период представљена је на слици 19. На подручју Прокупље и Житорађа, до краја века према RCP4.5 сценарију највећи пораст очекује се у августу ($13 \text{ mm} \cdot \text{месеца}^{-1}$), а према RCP8.5 у јулу ($20 \text{ mm} \cdot \text{месеца}^{-1}$) (Слика 76 (а)). На подручју Куршумлије и Блаца, суфицит воде који је симулиран у априлу у референтном периоду у будућности ће се повећавати, осим у периоду далеке будућности по RCP8.5 када се очекује незнатно смањење од $1 \text{ mm} \cdot \text{месеца}^{-1}$ (Слика 76 (б)). У осталим месецима вегетационе сезоне пасуља предвиђен је дефицит воде за који се у будућности очекује пораст у односу на референтни период. Највеће месечно повећање дефицита очекује се у јулу у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију, просечно 22 mm (Слика 76 (б)).



Слика 76. Промена расположиве воде (Δ) пасуља у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа (а) и Куршумлија и Блаце (б). Позитивне вредности представљају смањење, а негативне повећање количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Паприка и парадајз

Обезбеђеност водом паприке и парадајза на нивоу вегетационе сезоне (мај-септембар) процењена је прорачуном дефицита/суфицита воде за подручје општина Прокупље и Житорађа, у току референтног и будућних периода.

Симулације за референтни период показују да су паприка и парадајз изложени дефициту воде на вегетационом и месечном нивоу. На нивоу вегетационе сезоне (мај-септембар), у референтном периоду симулиран је дефицит од $372 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (паприка) и $407 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (парадајз). У будућим периодима, према оба сценарија, предвиђена је појава израженог дефицита (Слика 54). Дефицит воде за засаде паприке и парадајза у будућности ће се статистички значајно повећавати у свим периодима, у односу на референтни (MW; $p=0,05$; Табела 52 и 53). Повећање дефицита веће је у далекој будућности него у блиској. До краја века дефицит воде за засад паприке биће у статистички значајном порасту од $82 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$, а за засад парадајза $86 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$ (RCP8.5) (Слика 56).

Табела 52. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) паприке у односу на референтни период.

		Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Вер. сез.
		Δ (%)					
Прокупље и Жигорађа	2021-2050 RCP4.5	1,0	10,6	10,2	12,8	15,9	10,7
	2071-2100 RCP4.5	7,6	12,1	8,0	20,4	20,6	13,5
	2021-2050 RCP8.5	7,6	11,8	3,7	13,2	5,3	8,7
	2071-2100 RCP8.5	17,9	17,3	21,1	28,1	23,8	22,0

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

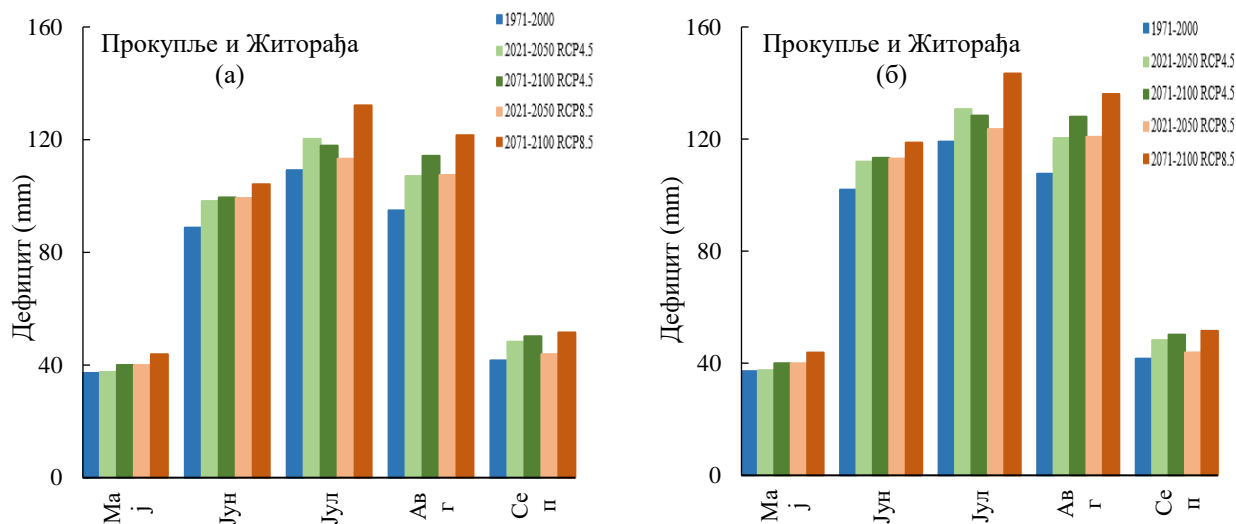
Табела 53. Релативна промена пројекција расположиве воде (Δ) парадајза у односу на референтни период.

		Мај	Јун	Јул	Авг	Сеп	Вер. сез.
		Δ (%)					
Прокупље и Жигорађа	2021-2050 RCP4.5	1,0	9,8	9,7	11,8	15,9	10,1
	2071-2100 RCP4.5	7,6	11,1	7,8	18,9	20,6	12,9
	2021-2050 RCP8.5	7,6	10,9	3,8	12,2	5,3	8,3
	2071-2100 RCP8.5	17,9	16,5	20,4	26,4	23,8	21,1

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

Сви месеци током вегетационе сезоне паприке и парадајза (мај–септембар) одликују се појавом дефицита у референтном и будућим периодима (Слика 77 (а) и (б)). Највеће вредности дефицита воде за засад паприке очекују се у јулу током референтног и будућих периода. До краја века, по RCP8.5 сценарију предвиђен је дефицит воде у јулу од $132 \text{ mm} \cdot \text{mесец}^{-1}$ (Слика 77 (а)).

За засад парадајза у периоду јун–август током референтног периода дефицит воде је распону од 102 до $119 \text{ mm} \cdot \text{mесец}^{-1}$, док је до краја века по RCP8.5 сценарију предвиђен дефицит у овим месецима од 119 до $143 \text{ mm} \cdot \text{mесец}^{-1}$ (Слика 77 (б)).

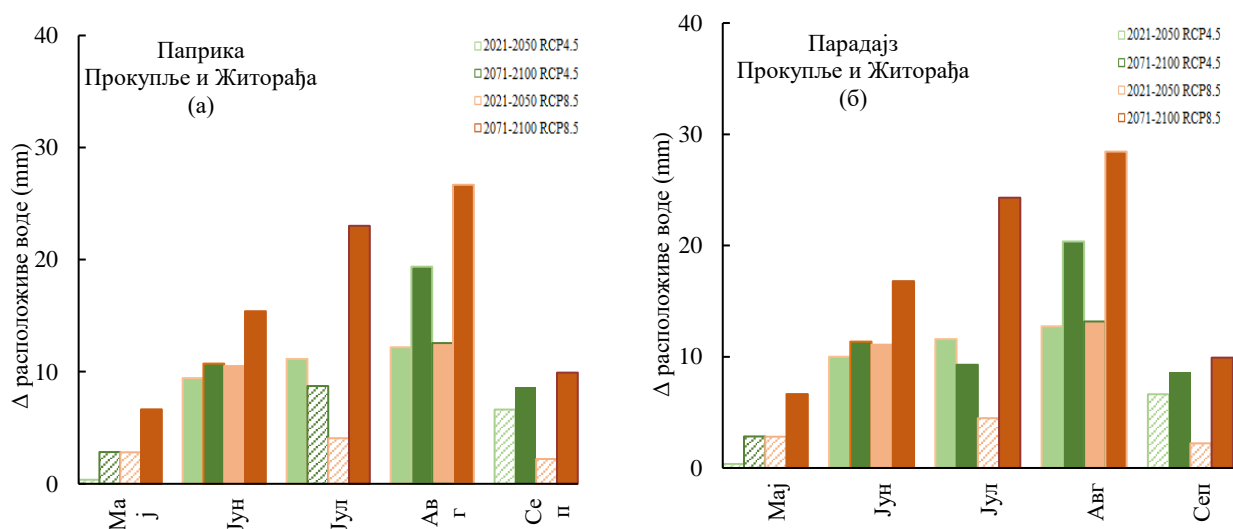


Слика 77. Дефицит воде за паприку (а) и парадајз (б) у референтном и будућим периодима, за подручје Прокупље и Житорађа.

Релативна промена расположиве воде по месецима и укупно за вегетациону сезону, као и резултати MW теста ($p=0,05$) дати су у табелама 52 и 53 за паприку и парадајз, респективно. За оба засада, највећи пораст месечног дефицита, који је уједно и статистички значајан, предвиђен је у периоду далеке будућности по RCP8.5.

Поређењем месечних вредности дефицита за засад паприке у будућности са вредностима у референтном периоду, уочава се да је највећа апсолутна промена у августу. Предвиђени пораст дефицита у августу далеке будућности износи $19 \text{ mm} \cdot \text{месеца}^{-1}$ (RCP4.5), односно $27 \text{ mm} \cdot \text{месеца}^{-1}$ (RCP8.5) (Слика 78 (а)).

За месеце вегетационе сезоне парадајза (мај-септембар) у будућим периодима очекује се пораст дефицита у односу на референтни период, при чему је највећа промена од $28 \text{ mm} \cdot \text{месеца}^{-1}$ предикована у августу далеке будућности према RCP8.5 сценарију (Слика 78 (б)).



Слика 78. Промена расположиве воде (Δ) паприке (а) и парадајза (б) у односу на референтни период по месецима за подручје Прокупље и Житорађа. Позитивне вредности представљају смањење количине воде. Испуњени полигони означавају статистички значајну промену према Mann-Whitney тесту ($p=0,05$).

Анализа података о обезбеђености водом засада паприке и парадајза у условима климатских промена показује да ће дефицит у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију износи 453 mm (паприка) и 494 mm (парадајз), што је у односу на референтни период повећање од 82 mm (22%) и 86 mm (21%), респективно. Током вегетационе сезоне засада (мај-септембар), највећи недостатак воде очекује се у јулу и августу. До сличних закључака дошли су Стричевић и сар. (2019б), који до краја века за подручје Србије наводе већи пораст дефицита воде за засад паприке у односу на резултате добијене у овом истраживању (пораст 27 до 36%). За засаде паприке и парадајза, дефицит воде у јулу и августу може имати највећи утицај на редукацију приноса и квалитета плода, јер биљке у том периоду пролазе кроз фазу цветања и раста плодова током које су најосетљивије на водни дефицит (Марјановић, 2015; Ћосић, 2015).

4. 4 Агроклиматски индекси

4.4.1 Дужина вегетационе сезоне

На подручју Прокупља и Житорађе у току референтног периода просечна дужина вегетационе сезоне износила је 248 дана (Табела 54). Почетак вегетационе сезоне означава појаву првог низа од најмање 6 узастопних дана са T_{mean} изнад $5^{\circ}C$ и у референтном периоду био је између 23. фебруара и 7. априла, а просечни почетак вегетационе сезоне је 17. март. Прва појава након 1. јула од најмање 6 узастопних дана са T_{mean} испод $5^{\circ}C$ означава крај вегетационе сезоне и током референтног периода дешавала се између 2. новембра и 7. децембра, са просечном појавом 20. новембра.

У будућим периодима предвиђене су статистички значајне промене почетка и краја вегетационе сезоне. Почетак вегетационе сезоне до краја века биће померен за 19 (RCP4.5) и 43 (RCP8.5) дана раније у односу на референтни период, од друге до треће декаде марта (RCP4.5), односно прве (RCP8.5) декаде фебруара. Предвиђено је да крај вегетационе сезоне до краја века буде одложен у односу на референтни период за 14 (RCP4.5) и 28 (RCP8.5) дана (од друге декаде новембра до прве, односно друге декаде децембра). Као последица померања датума почетка и краја вегетационе сезоне, у условима климатских промена просечна дужина вегетационе сезоне на подручју Прокупља и Житорађе статистички ће се значајно повећати у односу на референтни период (MW; $p=0,05$). До краја века и вегетационе сезона биће дужа за просечно 33 (RCP4.5) и 71 (RCP8.5) дан (Табела 54).

Табела 54. Просечан датум почетка и краја вегетационе сезоне, дужина вегетационе сезоне у референтном и будућим периодима и промена наведених агроклиматских индекса (Δ) у односу на референтни период (Прокупље и Житорађа).

		RCP4.5			RCP8.5	
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Почетак вегетационе сезоне	датум	17. март	7. март	26. фебруар	8. март	2. фебруар
	JD	76	66	57	67	33
	Δ (дан)		-10	-19	-9	-43
Крај вегетационе сезоне	датум	20. новембар	26. новембар	4. децембар	28. новембар	18. децембар
	JD	324	330	338	332	352
	Δ (дан)		6	14	8	28
Дужина вегетационе сезоне	дан	248	264	281	265	319
	Δ (дан)		16	33	17	71

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$). JD – редни број календарског дана појаве.

Током референтног периода на подручју Куршумлије и Блаца просечна дужина вегетационе сезоне износила је 239 дана (Табела 55). Просечни почетак вегетационе сезоне био је 23. март, док је крај вегетационе сезоне био 17. новембар.

У будућности очекује статистички значајно повећање дужине вегетационе сезоне, као и померање просечног датума почетка и краја вегетационе сезоне у односу на референтни период (RCP4.5 и RCP8.5). У блиској будућности вегетациона сезона биће дужа за просечно 16 и 18 дана, а у далекој будућности за просечно 33 и 81 дана према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију, респективно. Почетак вегетационе сезоне до краја века наступиће раније за 20 (RCP4.5) и 51 (RCP8.5) дан, док је крај вегетационе сезоне превиђен за просечно 13 дана (RCP4.5), односно 30 дана (RCP8.5) у поређењу са датумима симулираним у референтном периоду (Табела 55).

Табела 55. Просечан датум почетка и краја вегетационе сезоне, дужина вегетационе сезоне у референтном и будућим периодима и промена наведених агроклиматских индекса (Δ) у односу на референтни период (Куршумлија и Блаце).

		RCP4.5			RCP8.5	
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Почетак вегетационе сезоне	датум	23. март	12. март	3. март	13. март	31. јануар
	JD	82	71	62	72	31
	Δ (дан)		-11	-20	-10	-51
Крај вегетационе сезоне	датум	17. новембар	22. новембар	30. новембар	25. новембар	17. децембар
	JD	321	326	334	329	351
	Δ (дан)		5	13	8	30
Дужина вегетационе сезоне	дан	239	255	272	257	320
	Δ (дан)		16	33	18	81

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$). JD – редни број календарског дана појаве.

4.4.2 Појава позног пролећног и раног јесењег мраза

На посматраним локалитетима, у будућности се очекује ранија појава позног пролећног и одлагање раног јесењег мраза, у односу на датум појаве у референтном периоду. Предвиђена промена у датумима појаве позног пролећног и раног јесењег мраза условиће продужење трајања периода без мраза.

На подручју Прокупља и Житорађе, током периода блиске будућности појава позног пролећног мраза очекује се раније за просечно 7 дана према RCP4.5 сценарију, односно 13 дана према RCP8.5 у односу на појаву током референтног периода. До краја века, појава позног пролећног мраза дешаваће се раније за просечно 13 дана према RCP4.5 и 34 дана према RCP8.5 (Табела 56).

Појава раног јесењег мраза у периоду блиске будућности очекује се касније за просечно 4 (RCP4.5) и 8 дана (RCP8.5) у односу на референтни период. У периоду далеке будућности очекује се знатно већа промена него у блиској будућности, која према сценарију интензивних емисија GHG износи 32 дана (Табела 56).

Услед предвиђених промена у појавама позног пролећног и раног јесењег мраза, у будућности се очекује да ће се дужина периода без мраза статистички значајно продужити, у односу на његово трајање у референтном периоду (237 дана) (MW; $p=0,05$). Промена дужине трајања периода без мраза знатно је већа у периоду далеке будућности и по RCP8.5 сценарију

у поређењу са периодом блиске будућности и по RCP4.5 сценарију. До краја века, просечно повећање трајања периода без мраза износи 66 дана (RCP8.5).

Табела 56. Просечан датум појаве позног пролећног и раног јесењег мраза, дужина периода без мраза у референтном и будућим периодима и промена наведених агроклиматских индекса у односу на референтни период (Прокупље и Житорађа).

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Појава позног пролећног мраза	датум	20. март	13. март	7. март	7. март	14. фебруар
	JD	79	72	66	66	45
	Δ (дан)		-7	-13	-13	-34
Појава раног јесењег мраза	датум	12. новембар	16. новембар	26. новембар	20. новембар	14. децембар
	JD	316	320	330	324	348
	Δ (дан)		4	14	8	32
Дужина периода без мраза	дан	237	248	264	258	303
	Δ (дан)		11	27	21	66

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$). JD – редни број календарског дана појаве.

На подручју Куршумлије и Блаца, у односу на референтни период, до краја века предвиђена је ранија појава позног пролећног мраза за 15 и 31 дана, према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију, респективно. Према RCP4.5 и RCP8.5 сценаријима, појава раног јесењег мраза до краја века превиђена је за просечно 14 и 36 дана, респективно (Табела 57). У референтном периоду дужина периода без мраза износила је 225 дана. У условима климатских промена, до краја века очекује се статистички значајно продужење трајања периода без мраза од 29 (RCP4.5) и 67 дан (RCP8.5) (Табела 57).

Табела 57. Просечан датум појаве позног пролећног и раног јесењег мраза, дужина периода без мраза у референтном и будућим периодима и промена наведених агроклиматских индекса у односу на референтни период (Куршумлија и Блаце).

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Појава позног пролећног мраза	датум	26. март	21. март	11. март	16. март	23. фебруар
	JD	85	80	70	75	54
	Δ (дан)		-5	-15	-10	-31
Појава раног јесењег мраза	датум	6. новембар	13. новембар	20. новембар	17. новембар	12. децембар
	JD	310	317	324	321	346
	Δ (дан)		7	14	11	36
Дужина периода без мраза	дан	225	237	254	246	292
	Δ (дан)		12	29	21	67

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$). JD – редни број календарског дана појаве.

4.4.3 Просечан број мразних ($T_{min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и ледених ($T_{max} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) дана

У условима климатских промена на посматраним локалитетима очекује се смањење просечног броја мразних и ледених дана у будућности у односу на референтни период.

За локалитет Прокупље и Житорађа, током тридесетогодишњег референтног периода симулирано је просечно 104 дана са појавом T_{min} испод $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. До краја века, просечан број мразних дана ће се статистички значајно смањити за 39 дана према RCP4.5 сценарију, односно 79 дана према RCP8.5 у односу на референтни период (Табела 58).

Током референтног периода симулирана је појава од просечно 1,3 дана са T_{max} испод $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. У периоду далеке будућности према RCP8.5 сценарију не очекује се појава ледених дана (Табела 58). Услед очекиваног загревања, у односу на референтни период, до краја века предвиђено је статистички значајно смањење броја ледених дана од 1,2 (RCP4.5) и 1,3 (RCP8.5).

Табела 58. Просечан број мразних и ледених дана у референтном и будућим периодима и промена наведених агроклиматских индекса у односу на референтни период (Прокупље и Житорађа).

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Просечан број мразних дана ($T_{min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	дан	104	84	65	80	25
	Δ (дан)		-20	-39	-24	-79
Просечан број ледених дана ($T_{max} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	дан	1,3	0,2	0,1	0,6	0,0
	Δ (дан)		-1,1	-1,2	-0,7	-1,3

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

Табела 59. Просечан број мразних и ледених дана у референтном и будућим периодима и промена наведених агроклиматских индекса у односу на референтни период (Куршумлија и Блаце).

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Просечан број мразних дана ($T_{min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	дан	114	94	76	90	34
	Δ (дан)		-20	-38	-24	-80
Просечан број ледених дана ($T_{max} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	дан	1,4	0,1	0,1	0,7	0,0
	Δ (дан)		-1,3	-1,3	-0,7	-1,4

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

На локалитету Куршумлије и Блаца симулирани просечни број мразних дана у референтном периоду је 114. У односу на референтну вредност, просечни број мразних дана у будућности ће се статистички значајно смањити, а максимално умањење од 80 дана очекује се у периоду далеке будућности према сценарију RCP8.5 (Табела 59). У односу на симулирану референтну вредност (просечно 1,4 дана), просечан број ледених дана на подручју

Куршумлије и Блага у будућности ће се смањивати, тако да се до краја века према сценарију RCP8.5 не очекује појава ледених дана (Табела 59).

Током референтног периода, дани са T_{min} испод $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ предвиђају се у месецима јануар-април и октобар-децембар, са највећим бројем у јануару и децембру. Појава ледених дана током референтног периода уочена је у јануару, фебруару и децембру. У условима климатских промена, на месечном нивоу у будућности очекује се смањење просечног броја мразних и ледених дана у односу на референтни период.

За подручје Прокупље и Житорађа, у будућим периодима по оба сценарија предвиђено је статистички значајно смањење просечног броја мразних дана у месецима јануар-март и новембар-децембар, у односу на референтни период (MW; $p=0,05$). Током априла, у будућности се не очекује појава мразних дана, док се у октобру у односу на референтну вредност (просечно 0,2 дана), према RCP4.5 очекује смањење, а према RCP8.5 одсуство дана са појавом мрза. Број ледених дана у референтном периоду у јануару и децембру смањиваће се у периоду блиске и далеке будућности по RCP4.5 и периоду блиске будућности по RCP8.5 у односу на референтни период, док у периоду далеке будућности по RCP8.5 није предвиђена појава ледених дана у датим месецима. У будућности, према оба сценарија, у фебруару се не очекује појава ледених дана.

За подручје Куршумлија и Блага, у односу на референтни период, у периоду блиске и далеке будућности према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију очекује се смањење просечног броја мразних дана за јануар-март и новембар-децембар. Према MW тесту ($p=0,05$) промена није статистички значајна само у јануару у блиској будућности по RCP8.5 сценарију. У односу на појаву мразних дана од просечно једног дана у априлу и октобру током референтног периода, у будућности се очекује смањење, односно одсуство дана са T_{min} испод $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ у периоду далеке будућности према сценарију RCP8.5. Просечан број ледених дана у јануару, фебруару и децембру, у будућности ће се такође смањивати, док се до краја века не очекује појава ледених дана према пројекцијама RCP8.5 сценарија.

4.4.4 Просечан број летњих ($T_{max} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) и тропских ($T_{max} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) дана

Анализом симулираних података о T_{max} за подручје Прокупља и Куршумлије у будућности се очекује повећање просечног броја дана са T_{max} изнад $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и T_{max} изнад $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ у односу на референтни период. Очекивано повећање просечног броја летњих и тропских дана знатно је веће у периоду далеке будућности и по RCP8.5 сценарију, а добијена промена статистички је значајна према MW тесту ($p=0,05$) (Табела 60). До краја века, према сценарију са интензивнијим емисијама GHG, просечан број летњих дана на подручју Прокупља и Куршумлије повећаће се за 45 дана, а број тропских за 70 дана (Табела 60).

Табела 60. Просечан број летњих и тропских дана у референтном и будућим периодима и промена наведених агроклиматских индекса у односу на референтни период (Прокупље и Житорађа).

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Просечан број летњих дана ($T_{max} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	дан	97	115	124	116	142
	Δ (дан)		18	27	19	45
Просечан број тропских дана ($T_{max} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$)	дан	15	38	49	39	85
	Δ (дан)		23	34	24	70

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

За подручје Куршумлије и Блаца током референтног периода симулиран је мањи просечни број летњих и тропских дана у односу на подручје Прокупља и Житорађе, за које се такође услед климатских промена предвиђа статистички значајно повећање у будућности према MW тесту ($p=0,05$). У периоду далеке будућности, просечан број летњих дана биће у порасту за 34 (RCP4.5) и 55 (RCP8.5). У истом периоду, предвиђено је повећање просечног броја тропских дана за 27 (RCP4.5) и 64 (RCP8.5) (Табела 61).

Табела 61. Просечан број летњих и тропских дана у референтном и будућим периодима и промена наведених агроклиматских индекса у односу на референтни период (Куршумлија и Блаце).

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Просечан број летњих дана ($T_{max} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	дан	79	101	113	102	134
	Δ (дан)		22	34	23	55
Просечан број тропских дана ($T_{max} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$)	дан	5	20	32	20	69
	Δ (дан)		15	27	15	64

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

Подручја испитиваних локалитета карактерише истоветни образац појаве и промене просечног месечног броја летњих и тропских дана. Током референтног периода, појава летњих дана забележена је у месецима април-октобар. У периодима будућности, просечни број летњих дана биће у порасту у односу на референтни период, а највеће повећање предвиђено је у септембру далеке будућности по RCP8.5. Појава тропских дана у референтном периоду предвиђена је у месецима мај-септембар. Услед предвиђеног загревања до краја века према RCP8.5 сценарију појава тропских дана може се очекивати и у априлу и октобру. Просечан број тропских дана у будућности ће такође бити у порасту, при чему се највеће повећање у периоду далеке будућности по сценарију RCP8.5 очекује у јулу.

4.4.5 Сума ефективних температура (GDD)

Сума ефективних температура (GDD) рачуната је за најзаступљеније културе на подручју округа Топлица, према температурним праговима наведеним у табели 14. Симулиране суме ефективних температура у референтном и будућим периодима према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију, као и промене у будућим периодима у односу на референтни представљене су у табелама 62 и 63, за подручје Прокупља и Житорађе и Куршумлије и Блаца, респективно. За анализиране културе, на подручју оба локалитета очекује се да GDD расте у будућности, а применом MW теста ($p=0,05$) утврђено је да је та промена статистички значајна у односу на референтни период.

Табела 62. Просечна сума ефективних температура (GDD) у референтном и будућим периодима и промена (Δ) у односу на референтни период (Прокупље и Житорађа).

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Пшеница и јечам	$^{\circ}\text{C}$	3210	3293	3534	3357	4122
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		83	324	147	912
	Δ (%)		2,6	10,1	4,6	28,4
Кукуруз	$^{\circ}\text{C}$	1401	1634	1776	1669	2154
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		233	375	268	753
	Δ (%)		16,6	26,8	19,1	53,7
Кромпир	$^{\circ}\text{C}$	2402	2598	2717	2630	2985
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		196	315	228	583
	Δ (%)		8,2	13,1	9,5	24,3
Луцерка и детелина	$^{\circ}\text{C}$	2626	2952	3198	3029	3841
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		326	572	403	1215
	Δ (%)		12,4	21,8	15,3	46,3
Јабука, вишња и шљива	$^{\circ}\text{C}$	2515	2778	2954	2834	3392
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		263	439	319	877
	Δ (%)		10,5	17,5	12,7	34,9
Винова лоза	$^{\circ}\text{C}$	1469	1721	1889	1772	2322
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		252	420	303	853
	Δ (%)		17,2	28,6	20,6	58,1
Пасуљ	$^{\circ}\text{C}$	1943	2140	2262	2172	2575
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		197	319	229	632
	Δ (%)		10,1	16,4	11,8	32,5
Паприка, парадајз, бостан	$^{\circ}\text{C}$	1813	2030	2152	2053	2466
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		217	339	240	653
	Δ (%)		12,0	18,7	13,2	36,0

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

Табела 63. Просечна сума ефективних температура (GDD) у референтном и будућим периодима и промена у односу на референтни период (Куршумлија и Блаце).

		1971-2000	RCP4.5		RCP8.5	
			2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Пшеница и јечам	$^{\circ}\text{C}$	2771	3088	3323	3146	3934
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		317	552	375	1163
	Δ (%)		11,4	19,9	13,5	42,0
Кукуруз	$^{\circ}\text{C}$	1221	1443	1578	1473	1939
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		222	357	252	718
	Δ (%)		18,2	29,2	20,6	58,8
Кромпир	$^{\circ}\text{C}$	2236	2428	2545	2456	2837
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		192	309	220	601
	Δ (%)		8,6	13,8	9,8	26,9
Луцерка и детелина	$^{\circ}\text{C}$	2390	2698	2930	2768	3548
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		308	540	378	1158
	Δ (%)		12,9	22,6	15,8	48,5
Јабука, вишња и шљива	$^{\circ}\text{C}$	2306	2558	2728	2611	3151
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		252	422	305	845
	Δ (%)		10,9	18,3	13,2	36,6
Малина	$^{\circ}\text{C}$	2113	2344	2487	2377	2853
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		231	374	264	740
	Δ (%)		10,9	17,7	12,5	35,0
Пасуљ	$^{\circ}\text{C}$	1777	1969	2087	1997	2390
	Δ ($^{\circ}\text{C}$)		192	310	220	613
	Δ (%)		10,8	17,4	12,4	34,5

* Статистички значајна промена означена је црвеном бојом (Mann–Whitney $p=0,05$).

4.4.6 *Процена утицаја климатских промена на агроклиматске индексе*

Процена агроклиматских индекса у будућности урађена је да би се стекао увид у утицај климатских промена на биљну производњу у округу Топлица. Током испитиваних будућих периода резултати указују на следеће промене агроклиматских индекса у односу на референтни период:

- Статистички значајно повећање дужине вегетационе сезоне;
- Ранију појаву позног пролећног и одлагање појаве раног јесењег мраза, а тиме и продужење периода без мраза;
- Смањење просечног броја ледених и мразних дана у току године;
- Повећање просечног броја летњих и тропских дана у току године;
- Повећање суме ефективних температура (GDD) за најзаступљеније културе у округу.

На основу урађене анализе агроклиматских индекса закључује се да ће се услед климатских промена агроклиматски услови на подручју Топлице знатно разликовати у поређењу са условима у референтном периоду.

Слични резултати добијени су у студијама рађеним за подручје Европе (Trnka et al., 2011, 2021), источне Данске (Rasmussen et al., 2018), Уједињеног Краљевства (Arnell и Freeman, 2021), Србије (Ruml et al., 2012; Јанчић, 2015), као и Ирана (Kamyar et al., 2020). Осим промене у повећању дужине вегетационе сезоне и GDD и смањење броја мразних дана, до краја века се може очекивати повећан ризик од суше и топлотних таласа, што је констатовано у истраживању рађеном за подручје Уједињеног Краљевства (Arnell и Freeman, 2021). Повећање потенцијалне дужине вегетационе сезоне створиће могућност гајења више култура у плодореду.

Услед повећања GDD, очекује се да вегетациони период култура буде краћи у односу на референтни период, што уз повећање потенцијалне дужине вегетационе сезоне ствара могућност за увођење више култура у плодоред. Праћење датума појаве позног пролећног мраза значајно је ради процене ризика од мраза на почетак вегетационе сезоне пролећних усева и могућности обављања безбедне сетве у будућности раније или касније у односу на референтни период. Појава раног јесењег мраза може угрозити приносе култура чија је вегетациона сезона у току. У складу са добијеним резултатима у овом истраживању, у студијама спроведеним од стране Ruml et al. (2012) и Јанчић (2015) закључено је да се у будућности очекује ранија појава позног пролећног и каснија појава раног јесењег мраза у Србији. Према истраживању Ruml et al. (2012), у Србији се до краја 21. века појава позног пролећног мраза не очекује после 1. марта, док је појава раног јесењег мраза предвиђена за просечно 16 дана касније у односу на референтни период, односно очекује се после 1. новембра, што је у складу са резултатима овог истраживања према сценарију RCP8.5. Очекиване промене у датумима појаве мраза и продужење периода без мраза могу имати позитиван утицај на принос и квалитет грожђа (Ruml et al., 2012).

Смањење просечног броја дана са ниским температурама ($T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{max} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) указује да би се у будућности могли очекивати погоднији агроклиматски услови за производњу озимих усева (Јанчић, 2015) и смањење ризика од измрзавања вишегодишњих засада (Ruml et al., 2012). Са друге стране, повећање просечног броја летњих и тропских дана у летњем периоду повећава ризик од топлотног стреса код усева, што је закључено и од стране Јанчић (2015).

5. Адаптационе мере

Спроведена анализа симулација климатолошких варијабли, обезбеђености водом култура и агроклиматских индекса показује да се на подручју слива Топлице у будућности могу очекивати измене у агроклиматским условима услед климатских промена. Према извештају FAO о осетљивости на климатске промене, општина Житорађа спада у једну од 15 најосетљивијих општина на климатске промене у Србији (FAO, 2021).

За период април-септембар, у коме се одвија вегетациона сезона већине посматраних култура, предвиђено је повећање T_{mean} и PET , а смањење P у периоду блиске и далеке будућности, по оба сценарија. Највеће вредности наведених промена очекују се у јулу и августу. У истом периоду на испитиваном подручју очекује се смањење доступне воде у будућности, услед предвиђеног смањења Q и пораста $DPZV$.

Предвиђене промене у метеоролошким варијаблама условиће промене у обезбеђености култура водом – повећање потреба култура за водом и појаву дефицита воде. У будућности се очекује изражени недостатак воде у јулу и августу, када већина култура пролази кроз фазе развоја током којих су осетљиве на недостатак воде. Са друге стране, анализа агроклиматских индекса указује да се у будућности може очекивати позитиван утицај климатских промена на биљну производњу у смислу продужења дужине вегетационе сезоне и периода без мрза и смањење просечног броја мразних и ледених дана. Негативан утицај испољиће се кроз повећање просечног броја дана са високим температурама, посебно у јулу и августу, што повећава ризик од температурног стреса код биљака. Високе температуре повећаће евапотранспирацију, самим тим и потребу култура за водом, и то управо у месецима када је смањење падавина највеће и када се може очекивати суша.

Да би се постигли стабилни и високи приноси култура на подручју слива Топлице у условима повећаног ризика од недостатка воде, суше и екстремних климатских појава, у будућности је неопходно применити одговарајуће мере прилагођавања на измењене климатске услове у биљној производњи.

У условима климатских промена, током 21. века очекује се повећање недостатка воде за посматране културе, осим за пшеницу и јечам. Да би се остварили високи и стабилни приноси култура у условима повећаног водног дефицита, неопходно је применити наводњавање као меру адаптације. Највеће потребе за наводњавањем предвиђене су у летњим месецима, јулу и августу, када се очекује и смањење Q и повећање $DPZV$.

С обзиром да Топлички округ спада у подручја која не обилују водним ресурсима (Стричевић и сар., 2019б), а да се услед климатских промена очекује смањење доступности водних ресурса у топлом делу године, акумулирање воде, поновно коришћење пречишћених отпадних вода и рационално коришћење подземних вода могу бити решења за обезбеђивање потребне воде за наводњавање. Дашић и сар. (2020) наводе потребу за изградњом акумулација као једну од кључних мера адаптације у управљању водним ресурсима у условима климатских промена, чиме би се обезбедила неопходна вода за пољопривреду током сушног дела године, када су и највеће потребе за водом.

Према предвиђањима, у сливу реке Топлице режим површинских и подземних вода у будућности ће карактерисати изражена неравномерна унутаргодишња расподела и смањена количина доступне воде у периоду април-септембар. Измене у доступности водних ресурса указују на потребу примена мера за ефикасније коришћење воде у пољопривредној производњи и за наводњавање. Унапређивање постојећих система за наводњавање, примена метода редукваног наводњавања, гајење усева и сорти са већом толеранцијом на сушу неке

су од мера адаптације које се могу применити у циљу рационалног коришћења воде у биљној производњи.

Предикције агроклиматских индекса за подручје слива Топлице указују да ће у будућности доћи до измена у датумима појаве позног пролећног и раног јесењег мраза. Ранија појава позног пролећног мраза омогућава померање рокова сетве као мере адаптације. Ранијом сетвом пролећних усева умањио би се негативан утицај суше и топлотног стреса који се очекује у летњим месецима, избегло би се повећање дефицита воде а тиме и повећање потребе за наводњавањем у односу на садашње услове (Стричевић и сар., 2021).

Наводњавање и померање рокова сетве показали су се ефикасном методом за ублажавање последица климатских промена у ратарској производњи у Србији у студијама спроведеним од стране Јанчић (2015) и Стричевић и сар. (2021).

Остале мере адаптације које пољопривредни произвођачи могу применити директно на газдинствима су:

- Увођење и узгој сорти и хибрида отпорних на сушу и температурни стрес;
- Узгој сорти и хибрида ранијег зрења;
- Повећање површина под озимим усевима, како би се што боље искористиле резерве влаге у земљишту;
- Правовремено обављање обраде земљишта и сетве (мања густина и већа дубина сетве у условима суше);
- Увођење вишепољних плодореда, услед повећања потенцијалне дужине вегетационе сезоне, а скраћивања вегетационог периода култура;
- Употреба противградних мрежа у воћњацима, како би се смањила температура и потрошња воде у воћњаку;
- *Коришћење* алтернативних агротехничких метода: увођење минималног обрађивања земљишта (енг. *minimum tillage*), малчирање, гајење покровних и здружених усева.

Поред мера које пољопривредни произвођачи могу директно применити у производњи, у циљу ублажавања утицаја климатских промена на биљну производњу, потребно је ангажовање надлежних институција, саветодавних и стручних тела. Подршку пољопривредним произвођачима институције могу пружити доношењем стратешког и правног оквира за спровођење мера адаптације у пољопривреди, субвенционисањем имплементације мера адаптације, едукацијом пољопривредника као и истраживањима у области утицаја климатских промена на биљну производњу.

Наведене мере прилагођавања пољопривредне производње у измењеним климатским условима у Србији предложене су и од стране Лалић и сар. (2015), Стричевић и сар. (2019б) и Долијановић и сар. (2020).

6. Закључак

Ова докторска дисертација се бави развојем методологије за анализу утицаја климатских промена на расположивост водних ресурса на сливовима у брдско-планинским подручјима. Посебан акценат је стављен на предикцију агроклиматских услова у будућности и процену обезбеђености водом изабраних биљних врста.

Примењени методолошки приступ спроведен је кроз следеће кораке:

- Симулације климатолошких величина применом 7 комбинација GCM-RCM, засноване на два емисиона сценарија (RCP4.5 и RCP8.5);
- За симулацију Q примењен је хидролошки HBV-light модел, који је калибрисан применом GAP алгоритма;
- Моделирање NPZV урађено је применом вештачких неуралних мрежа. За потребе истраживања формирана је вишеслојна неповратна (енг. *feedforward*) мрежа са једним скривеним слојем. За обуку ANN коришћен је *Levenberg-Marquardt* (LM) метод пропагације грешке уназад;
- Прорачун вредности евапотранспирације културе (ETc), дефицита/суфицита воде за сваки усев и засад и агроклиматских индекса урађен је на основу климатских симулација;
- Квантификовање утицаја климатских промена на климатолошке, хидролошке и величине које описују агроклиматске услове и обезбеђеност водом култура урађено је праћењем промене на годишњем и месечном нивоу и током периода април-септембар и октобар-март. Тренд промене праћен је у периоду 2021-2100, на низу од 51 податка, у односу на референтни период. Промена наведених параметара у блиској (2021-2050) и далекој будућности (2071-2100) процењена је у односу на референтни период (1971-2000);
- Постојање тренда и његова статистичка значајност анализирани су применом *Mann-Kendall* тренд теста (МК) и *Sen's slope* методе за оцену нагиба ($p=0,05$). Статистичка значајност промене у периоду блиске и далеке будућности у односу на референтни период процењена је *Mann-Whitney* (MW) тестом ($p=0,05$).

Примењивост методологије је тестирана на сливу реке Топлице, који је изабран као пилот подручје у Србији.

Симулације климатолошких величина добијене су са 7 комбинација GCM-RCM и односе се на дневне вредности P, T_{max}, T_{min} и T_{mean} у периоду 1971-2000 и 2021-2100 према два сценарија. Симулиране климатолошке величине из тачака мреже најближих локацијама четири метеоролошке станице просторно су осредњене методом Тисенових полигона, да би се припремиле као улазни подаци у HBV-light модел, који дозвољава унос само једног сета климатолошких вредности.

У процесу калибрације хидролошког HBV-light модела, на основу задатих критеријума ефикасности, одабран је сет параметара калибрационог периода 1994-1999, за који су постигнуте следеће вредности критеријума ефикасности: OF – 0,83, NSE – 0,76, NSE_{logQ} – 0,82 и VE – 1. У процесу валидације задати критеријуми ефикасности модела постигнути су у топлим, сувим и влажним периодима валидације, док су у хладном периоду постигнути нешто лошији резултати симулације. Применом калибрисаног HBV-light модела добијено је укупно одступање симулираних од мерених вредности протицаја, у референтном периоду 1971–2000, од 5,28%.

Корелационом анализом установљено је да постоји статистички значајна позитивна веза ($R=0,87$; $p=0,01$) између NPZV у пијезометру 3-540 и протицаја, док између NPZV и климатолошких величина није утврђена статистички значајна корелација. Сходно томе архитектура неуралне мреже је изабрана на тај начин да улазни параметри буду одбирци мерења протицаја реке Топлице а излазни сигнал модела ниво подземних вода. У циљу формирања ваљаног модела извршено је обучавање неуралне мреже *Levenberg–Marquardt* методом, а затим валидација и тестирање. Након великог броја поновљених поступака обучавања, са различитим почетним вредностима параметара мреже, изабрана је и усвојена неурална мрежа која је показала најбоље перформансе моделирања. Коефицијент корелације за податке из обучавајућег скупа је био највећи што је и очекивано, и износио је 0,95. Коефицијент корелације за податке из тестирајућег скупа 0,91, док је за целокупни скуп података овај параметар 0,93. Знајући да је максимална вредност овог коефицијента 1 и да он означава апсолутно статистичко поклапање, добијени параметар од 0,93 за целокупни скуп података сведочи о томе да је добијени модел врло ваљан и високе употребне вредности.

На подручју слива Топлице, током 21. века, на нивоу године, месеца и периода април-септембар и октобар-март очекује се статистички значајан тренд загревања према пројекцијама RCP8.5 сценарија (МК; $p=0,05$). Према пројекцијама RCP4.5 сценарија, тренд загревања је статистички значајан на годишњем нивоу, за периоде април-септембар и октобар-март и за месеце фебруар, март, мај и септембар (МК; $p=0,05$). У односу на референтни период, до краја века очекује се статистички значајно повећање медијане годишње T_{mean} до 2 °C (RCP4.5), односно 4,2 °C (RCP8.5) (MW; $p=0,05$). Према MW тесту ($p=0,05$), промена медијане T_{mean} у периоду блиске и далеке будућности у периодима април-септембар и октобар-март, као и по месецима статистички је значајна, при чему се већа промена очекује у периоду далеке будућности и према RCP8.5 сценарију. Највећи пораст предвиђен је у летњим (јул и август) и зимским месецима (јануар и март).

Према пројекцијама сценарија са интензивнијом емисијом GHG до 2100. године предвиђа се статистички значајан тренд повећања медијане PET на нивоу године, периода април-септембар и октобар-март, као и у свим месецима (МК; $p=0,05$). У периоду блиске и далеке будућности, очекује се статистички значајан пораст медијане годишње PET, који би на крају века износио 7,1%, (RCP4.5) и 14,5%. (RCP8.5) (MW; $p=0,05$). Током периода април-септембар, до краја века предвиђено је повећање медијане PET од 6,1% и 12,7%, према RCP4.5 и RCP8.5 сценарију, респективно. Период октобар-март карактерише пораст медијане PET у будућности, при чему се највећа промена очекује крајем века по RCP8.5 сценарију (18,4%). У блиској и далекој будућности очекује се пораст на месечном нивоу, према оба сценарија, при чему добијена промена није статистички значајна само у октобру и априлу блиске будућности према RCP4.5 (MW; $p=0,05$).

Промена медијане годишњих P не показује статистички значајан тренд промене током периода 2021-2100, док је статистички значајан тренд смањења предвиђен само за период април-септембар према RCP4.5, и за јун (RCP8.5) (МК; $p=0,05$). Очекивани пораст медијане годишње P, статистички је значајан само у периоду далеке будућности по RCP8.5 (пораст од 7,2%) (MW; $p=0,05$). Пораст медијане P карактеристичан је такође и за период октобар-март, као и за месеце које обухвата тај период. До краја века, према строжијем сценарију, највеће статистички значајно повећање очекује се у марту (30%). На месечном нивоу, највеће смањење очекује се у августу далеке будућности према RCP8.5 (35%) (MW; $p=0,05$).

Анализом података о релативној промени медијане Q у периоду 2021-2100, на нивоу године, месеца и периода април-септембар и октобар-март, статистички значајан тренд утврђен је само за период април-септембар, по оба сценарија и месец мај, по RCP8.5 (смањење, МК; $p=0,05$). На годишњем нивоу, очекиван је пораст медијане Q, од око 13%, у периоду блиске будућности према оба сценарија, а до краја века, према RCP8.5, повећање износи 2% (MW; $p=0,05$) Током зимских месеци предвиђа се пораст Q, а његово смањење у летњим и

раним јесењим месецима. Највеће статистички значајно повећање медијане Q предвиђено је за месеце јануар и децембар а смањење у августу и септембру, по RCP8.5 на крају века (MW; $p=0,05$).

Статистички значајан тренд промене медијане DPZV утврђен је за период април-септембар (RCP4.5 и RCP8.5) и месеце јануар и мај (RCP4.5), као и за јул, август и новембар (RCP8.5) (МК; $p=0,05$). На годишњем нивоу, предвиђено је смањење медијане DPZV, односно повећање NPZV за период блиске и далеке будућности по RCP4.5 и блиске будућности по RCP8.5, док је повећање медијане DPZV од 0,7% предвиђено за период далеке будућности (RCP8.5). Очекује се смањење и за период октобар-март, а повећање за период април-септембар. Промена на месечном нивоу у блиској и далекој будућности креће се у интервалу од -4,6% до 2,6%, а промена је статистички значајна у 44% месеци, према MW тесту ($p=0,05$).

Прегледом добијених резултата може се закључити да се на подручју слива реке Топлице, према сценарију RCP8.5, до краја века не очекују значајне варијације у количини воде на годишњем нивоу као последица климатских промена.

Значајне промене предвиђају се на месечном нивоу, у односу на садашњу унутаргодишњу расподелу. У будућности се очекује смањење количине доступне воде у летњим месецима, а повећање у зимским, што указује на израженију неуниформност месечне расподеле P, Q и DPZV у будућности. Као резултат предикованог загревања, очекује се смањење максималних вредности Q, као и њихова ранија појава у односу на садашње услове. Током историјског периода највеће вредности Q забележене су у пролећним месецима, те се предвиђено смањење Q у будућности може протумачити позитивно у смислу смањења ризика од поплава у том периоду. Предвиђено повећање P и T у зимским месецима условиће повећање Q (29–50%) у периоду од новембра до фебруара. Последица ових промена је и смањење DPZV (повећање NPZV), од децембра до марта (RCP8.5), односно са месец дана закашњења.

Смањење Q и NPZV предвиђено је током осам месеци, што указује на продужење периода са смањеном количином воде. Предвиђено смањење P, Q и NPZV у летњим месецима, када је и током историјског периода примећен недостатак воде, може негативно утицати на пољопривреду, водоснабдевање, хидроенергетику, рибарство, речни екосистем и туризам.

Утицај климатских промена на обезбеђеност усева и засада водом процењен је праћењем разлике вредности евапотранспирације културе (ETc) односно дефицита/суфицита воде за сваки усев и засад, у блиској (2021-2050) и далекој (2071-2100) будућности у односу на референтни период (1971-2000). На исти начин праћена је и промена агроклиматских индекса.

У будућности се очекује статистички значајан пораст потреба за водом посматраних култура на нивоу вегетационе сезоне (MW; $p=0,05$). Добијена промена већа је у периоду далеке будућности по RCP8.5 сценарију у поређењу са променом у блиској будућности и променом по RCP4.5 сценарију. До краја века, према RCP8.5 сценарију, највећи пораст потреба за водом предвиђен је за луцерку (95 mm и 97 mm), јабуку и вишњу (92 mm и 93 mm) и детелину (91 и 92 mm), за локалитете Прокупље и Житорађа, односно Куршумлија и Блаце, респективно. Највеће потребе за водом предвиђене су током летњих месеци (јун-август) изузев за пшеницу и јечам за које су највеће потребе предвиђене у априлу и мају. Добијено повећање ETc, статистички је значајно у свим месецима, осим у априлу и октобру у периоду блиске будућности по RCP4.5 сценарију (MW; $p=0,05$).

Вегетациона сезона већине посматраних култура (кукуруз, кромпир, поврће и воћарски засади) одвија се у периоду април-октобар, за који је карактеристично смањење P, а пораст T, PET и ETc што условљава недостатак воде. Највећем недостатку воде у будућности биће изложени воћарски засади јабуке, вишње и шљиве, засади паприке, парадајза и кромпира, док се вишак воде предвиђа само за пшеницу и јечам на подручју Куршумлије и Блаца.

Предиктовани суфицит за пшеницу и јечам на овом локалитету биће у порасту у будућности у односу на референту вредност ($33 \text{ mm} \cdot \text{вегетациона сезона}^{-1}$), док се у далекој будућности очекује смањење суфицита (RCP8.5). Израженији пораст дефицита воде предвиђен је за период далеке будућности по RCP8.5 сценарију, у поређењу са периодом блиске будућности и пројекцијама RCP4.5 сценарија. Према RCP8.5 сценарију, до краја века дефицит воде за посматране културе биће у опсегу од 57 mm (пшеница и јечам) до 590 mm (јабука и вишња), за локалитет Прокупља и Житорађе односно од 245 mm (детелина) до 511 mm (јабука и вишња), за Куршумлију и Блаце.

Резултати овог истраживања указују да климатске промене неће имати негативан ефекат на производњу пшенице и јечма, са аспекта обезбеђености водом у периоду блиске будућности. До краја века, према пројекцијама RCP8.5 сценарија очекује се мали пораст дефицита воде у априлу и мају, што би могло утицати на крајњи принос пшенице и јечма. За остале културе, највећи недостаци воде очекују се у летњим месецима, јулу и августу, када се одвијају фазе развића у којима су биљке осетљиве на недостатак воде. У том периоду може се очекивати изражен негативан утицај климатских промена на приносе свих пролећних усева.

Да би се стекао детаљнији увид у утицај климатских промена у будућности на биљну производњу у округу Топлица, урађена је анализа агроклиматских индекса на основу пројекција Т. До краја века, превиђено је повећање суме ефективних температура (GDD), те се може очекивати да вегетациони период култура буде краћи у односу на референтни период. Уз повећање GDD, очекује се и повећање потенцијалне дужине вегетационе сезоне чиме би се могли стећи услови за увођење више култура у плодоред. Пројекције указују да се у будућности може очекивати ранија појава позног пролећног мраза и каснија појава раног јесењег мраза, тиме и продужење периода без мраза у току године. У односу на референтни период, појава позног пролећног мраза у периоду далеке будућности очекује се за 34 и 31 дан раније, а појава раног јесењег мраза за 32 и 36 дана касније, за локалитете Прокупље и Житорађа, односно Куршумлија и Блаце, респективно (RCP8.5). Предикције указују да ће се до краја века дужина вегетационе сезоне статистички значајно повећати ($MW; p=0,05$) за 71 дан (Прокупље и Житорађа), односно 81 дан (Куршумлија и Блаце) (RCP8.5). Смањењем просечног броја ледених и мразних дана у току године створиће се повољнији услови за производњу озимих усева и смањење ризика од измрзавања вишегодишњих засада. До краја века, према RCP8.5, број мразних дана ($T_{\min} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$) биће мањи за око 80 дана и не очекује се појава ледених дана ($T_{\max} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$) на посматраним локалитетима. Повећање просечног броја дана са екстремно високим температурама повећава ризик од топлотног стреса код усева. У периоду далеке будућности, просечан број тропских дана ($T_{\max} > 30 \text{ } ^\circ\text{C}$) повећаће се за 70 дана (Прокупље и Житорађа) и 64 дана (Куршумлија и Блаце) (RCP8.5). Јасан утицај загревања до краја века огледа се у појави тропских дана већ у априлу, за разлику од референтног периода када су се тропски дани јављали од маја до октобра.

Узимајући у обзир резултате анализа климатолошких варијабли, обезбеђености водом култура и агроклиматских индекса, може се закључити да ће климатске промене изменити агроклиматске услове на подручју слива Топлице у будућности. Пројекције показују да се до краја века на испитиваном подручју могу очекивати повећани ризици од недостатка воде, суше и екстремних климатских појава. Стога је у будућности у пољопривредној производњи потребно применити одговарајуће мере ублажавања (адаптације) на измењене климатске услове како би се постигли стабилни и високи приноси култура.

Примена наводњавања предложена је као мера адаптације у условима повећаног ризика од суше, поготово у летњем периоду (јул и август). Како је управо у тим месецима предвиђено и смањење доступних водних ресурса, јавља се потреба за рационалним управљањем водним ресурсима. Потребна вода за наводњавање може се обезбедити изградњом акумулација, поновним коришћењем пречишћених отпадних вода и рационалним коришћењем подземних вода. У циљу рационалног коришћења воде у пољопривреди, неке од предложених мера

адаптације су унапређивање постојећих система за наводњавање, примена метода редукованог наводњавања, гајење усева и сорти са већом толеранцијом на сушу.

Ранија појава позног пролећног мраза у будућности пружа могућност раније сетве пролећних усева, чиме би се умањило негативан утицај суше и топлотног стреса биљака у летњим месецима и смањила потреба за наводњавањем, у односу на услове са непромењеним датумом сетве. Повећање површина под озимим усевима омогућило би боље искоришћавање резерви влаге у земљишту. Примена противградних мрежа у воћњацима као мера адаптације предложена је како би се смањила температура и потрошња воде у воћњаку, а самим тим и потреба за наводњавањем. Такође, могу се применити алтернативне агротехничке мере као што су увођење редуковане обраде земљишта (енг. *minimum tillage*), малчирање, гајење покровних и здружених усева, које поспешују конзервацију влаге у земљишту.

Осим наведених мера које пољопривредни произвођачи могу применити у производњи, за прилагођавање на измењене климатске услове потребно је ангажовање од стране надлежних институција у виду доношења стратешког и правног оквира за спровођење мера адаптације у пољопривреди, субвенционисање имплементације мера адаптације, едукација пољопривредника, као и спровођење истраживања у области утицаја климатских промена на биљну производњу.

Наведени закључци могу се применити у развоју стратешких планова адаптације пољопривреде, али и других сектора који се ослањају на водне ресурсе, на испитиваном и другим подручјима са сличним климатским условима и упоредивим физичко-географским карактеристикама. Посебан допринос дисертације односи се на чињеницу да је ово иницијална студија пројекције нивоа подземних вода на испитиваном подручју, применом предложене методологије која ефикасно комбинује *soft computing* технику (вештачке неуралне мреже – *Artificial Neural Network, ANN*) и концептуални хидролошки модел са климатским моделима. Шири значај методологије је да је применљива и на друге мање сликове.

У овом истраживању нису разматране неизвесности у целом ланцу моделирања, што је следећи корак у даљим истраживањима. У циљу умањења неизвесности у климатским и хидролошким пројекцијама потребно је применити већи број климатских и хидролошких модела, као и анализирати опсег вероватноћа резултата ансамбла.

Предложена методологија за процену утицаја климатских промена на расположивост водних ресурса за развој биљних култура требало би применити на више сликова, чиме би се употпунила досадашња сазнања о утицају климатских промена у Србији, омогућило одрживо планирање мера прилагођавања у свим секторима привреде који се ослањају на коришћење вода и тестирала методологија на сликовима другачијих физичко-географских карактеристика. Од посебног значаја за биљну производњу било би симулирање утицаја предложених мера адаптације на параметре биљне производње, посебно на обезбеђеност биљака водом и на њихов коначан принос.

7. Литература

- Adesina, O., Thomas, B. (2020): Potential impacts of climate change on UK potato production. *International Journal of Environment and Climate Change*10(4):39-52.
- Ahmad, I., Ahmad, B., Boote, K., Hoogenboom, G. (2020): Adaptation strategies for maize production under climate change for semi-arid environments. *European Journal of Agronomy* 115:126040.
- Alamou, E. A., Obada, E., Afouda, A. (2017): Assessment of future water resources availability under climate change scenarios in the mékrou basin, Benin. *Hydrology*4(4):51.
- Alehu, B. A., Desta, H. B., Daba, B. I. (2022): Assessment of climate change impact on hydro-climatic variables and its trends over Gidabo Watershed. *Modeling Earth Systems and Environment* 8(3):3769-3791.
- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G. (2015): Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(5):2247–2260. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2247-2015>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998): Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9):D05109.
- Al-Safi, H.I.J., Sarukkalige, P.R. (2017): Assessment of future climate change impacts on hydrological behavior of Richmond River Catchment. *Water Science and Engineering*10(3):197-208.
- Anderson, R., Bayer, P.E., Edwards, D. (2020): Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current opinion in plant biology* 56:197-202.
- Andrade, C.W., Montenegro, S.M., Montenegro, A.A., Lima, J.R.D.S., Srinivasan, R., Jones, C.A. (2021): Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. *International Journal of Climatology* 41: E1045-E1061.
- Apsite, E., Zīverts, A., Bakute, A. (2008): Application of conceptual rainfall-runoff model METQ for simulation of daily runoff and water level: the case of the Lake Burtnieks watershed. In *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences* 62(1-2):47-54.
- Arnell, N., Liu, C. (2001): Hydrology and water resources. In: *Climate Change 2001, Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Arnell, N. W., van Vuuren, D. P., Isaac, M. (2011): The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources. *Global Environmental Change*21(2):592-603.
- Arnell, N.W., Gosling, S.N. (2013): The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology* 486:351–364. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.010>
- Arnell, N.W., Freeman, A. (2021): The effect of climate change on agro-climatic indicators in the UK. *Climatic Change* 165(1):1-26.
- ASCE, 2000. Artificial neural networks in hydrology I. Preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering* 5(2):115–123.
- Ashofteh, P.S., Haddad, O.B., Marino, M.A. (2015): Risk analysis of water demand for agricultural crops under climate change. *Journal of Hydrologic Engineering*20(4):04014060.

- Ayalew, D. W., Asefa, T., Moges, M. A., Leyew, S. M. (2022): Evaluating the potential impact of climate change on the hydrology of Ribb catchment, Lake Tana Basin, Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change* 13(1):190-205.
- Babaeian, F., Delavar, M., Morid, S., Srinivasan, R. (2021): Robust climate change adaptation pathways in agricultural water management. *Agricultural Water Management* 252:106904.
- Bae, D. H., Jung, I. W., Lettenmaier, D. P. (2011): Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. *Journal of Hydrology* 401:90–105.
- Banerjee, P., Prasad, R.K., Singh, V.S. (2009): Forecasting of groundwater level in hard rock region using artificial neural network. *Environmental Geology* 58:1239–1246. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1619-z>
- Barzegar, R., Fijani, E., Asghari Moghaddam, A., Tziritis, E. (2017): Forecasting of groundwater level fluctuations using ensemble hybrid multi-wavelet neural network-based models. *Science of the Total Environment* 599–600:20–31. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.189>
- Bastola, S., Murphy, C., Sweeney, J. (2011): The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish river catchments. *Advances in Water Resources* 34(5):562–576.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J.P., Eds. (2008): *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Behzad, M., Asghari, K., Coppola, Jr, E.A. (2010): Comparative Study of SVMs and ANNs in Aquifer Water Level Prediction. *Journal of Computing in Civil Engineering* 24(5):408–413.
- Bekele, A.A., Pingale, S.M., Hatiye, S.D., Tilahun, A.K. (2019): Impact of climate change on surface water availability and crop water demand for the sub-watershed of Abbay Basin, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management* 5(4):1859-1875.
- Bergström, S. (1976): Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. *Smhi RHO* 7:134. <https://doi.org/10.1093/bjsw/bcn100>
- Bergström, S., Graham, L.P. (1998): On the scale problem in hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 211:253-265.
- Bergström, S., Harlin, J., Lindström, G. (1992): Spillway design floods in Sweden: I. New guidelines. *Hydrological Sciences Journal* 37:505-519.
- Bergström, S., Lindström, G. (2015): Interpretation of runoff processes in hydrological modelling - experience from the HBV approach. *Hydrological Processes* 29:3535–3545. <https://doi.org/10.1002/hyp.10510>
- Beven, K. J. (2006): Rainfall-runoff modeling: Introduction. *Encyclopedia of hydrological sciences*.
- Bhattarai, S., Zhou, Y., Shakya, N.M., Zhao, C. (2018): Hydrological modelling and climate change impact assessment using HBV Light model: A case study of Narayani River Basin, Nepal. *National Environment and Pollution Technology* 17(3):691-702.
- BOM, (2003): The green house effect and climate change, <http://www.bom.gov.au/info/GreenhouseEffectAndClimateChange.pd>
- Bowden, G.J., Dandy, G.C., Maier, H.R. (2005): Input determination for neural network models in water resources applications. Part 1 - Background and methodology. *Journal of Hydrology* 301:75–92. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.021>

- Brandt, M., Bergström, S., Gardelin, M. (1988): Modelling the effects of clearcutting on runoff - examples from Central Sweden. *Ambio* 17(5):307-313.
- Bursać, N. M. M., Radovanović, M. M., Radivojević, A. R., Ivanović, R. D., Stričević, L. S., Gocić, M. J., Bursać, B. L. (2022): Observed climate changes in the Toplica river valley-Trend analysis of temperature, precipitation and river discharge. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 126(3):403-423.
- Cai, X., Zhang, X., Noël, P.H., Shafiee-Jood, M. (2015): Impacts of climate change on agricultural water management: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews Water* 2:439–455. <https://doi.org/10.1002/wat2.1089>
- Carisse, O., Jobin, T., Bourgeois, G. (2008): Predicting apple leaf emergence from degree-day accumulation during the primary scab period. *Canadian Journal of Plant Science* 88(1):229-238.
- Casolani, N., Cartone, A., Postiglione, P., Liberatore, L. (2020): Climate variability in agriculture and crop water requirement: Spatial analysis of Italian provinces. *Journal of Cleaner Production* 262: 121331.
- Caudill, M. (1987): Neural networks primer I. *AI Expert*.
- Caudill, M. (1988): Neural networks primer II, III, IV and V. *AI Expert*.
- Caudill, M. (1989): Neural networks primer VI, VII and VIII. *AI Expert*.
- Chang, J., Wang, G., Mao, T. (2015): Simulation and prediction of suprapermafrost groundwater level variation in response to climate change using a neural network model. *Journal of Hydrology* 529:1211–1220. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.038>.
- Chen, H., Wang, S., Gao, Z., Hu, Y. (2010): Artificial neural network approach for quantifying climate change and human activities impacts on shallow groundwater level: A case study of Wuqiao in North China Plain. In 18th International Conference on Geoinformatics, pp. 1-6. IEEE.
- Chen, J., Brissette, F.P., Leconte, R. (2011a): Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology* 401(3–4): 190–202.
- Chen, J., Brissette, F.P., Poulin, A., Leconte, R. (2011b): Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resour. Res.* 47:W12509. <https://doi.org/10.1029/2011wr010602>.
- Chen, Z., Grasby, S.E., Osadetz, K.G. (2004): Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology* 290(1–2):43–62.
- Chiew, F. H. S., Zheng, H., Vaze, J. (2015): Implication of calibration period on modelling climate change impact on future runoff. In *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* Vol. 371, pp. 3–6.
- Chowdhury, S., Al-Zahrani, M., Abbas, A. (2016): Implications of climate change on crop water requirements in arid region: An example of Al-Jouf, Saudi Arabia. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* 28:21-31. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.11.001>
- Cloke, H. L., Wetterhall, F., He, Y., Freer, J. E., Pappenberger, F. (2013): Modelling climate impact on floods with ensemble climate projections. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 139(671):282-297.

- Coulibaly, P., Anctil, F., Bobée, B. (2000): Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. *Journal of Hydrology* 230:244–257. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00214-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00214-6).
- Coulibaly, P., Anctil, F., Aravena, R., Bobée, B. (2001): Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations. *Water Resources Research* 37:885–896. <https://doi.org/10.1029/2000WR900368>.
- Criss, R.E., Winston, W.E. (2008): Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. *Hydrological Processes* 22:2723–2725. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Ћосић, М.Д. (2015): Утицај каолина на повећање ефикасности коришћења воде у различитим режимима наводњавања паприке (*Capsicum annuum* L.). Докторска дисертација. Пољопривредни факултет, Универзитет у Београду, Србија.
- Dahal, K., Li, X. Q., Tai, H., Creelman, A., Bizimungu, B. (2019): Improving potato stress tolerance and tuber yield under a climate change scenario—a current overview. *Frontiers in plant science* 10:563.
- Daliakopoulos, I.N., Coulibaly, P., Tsanis, I.K. (2005): Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology* 309:229–240. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.001>.
- Dankers, R., Feyen, L. (2008): Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113.
- Das, J., Poonia, V., Jha, S., Goyal, M.K. (2020): Understanding the climate change impact on crop yield over Eastern Himalayan Region: ascertaining GCM and scenario uncertainty. *Theoretical and Applied Climatology* 142(1):467-482.
- Дашић, Т., Ђорђевић, Б., Плавшић, Ј. (2020): Управљање водама у условима климатских промена. У: Зборник радова Вода 2020, Требиње, стр. 1-8.
- de Roos, S., De Lannoy, G. J., Raes, D. (2021): Performance analysis of regional AquaCrop (v6. 1) biomass and surface soil moisture simulations using satellite and in situ observations. *Geoscientific Model Development Discussions* 14(12):7309-7328.
- Deletic, A., Dotto, C.B.S., McCarthy, D.T., Kleidorfer, M., Freni, G., Mannina, G., Uhl, M., Henrichs, M., Fletcher, T.D., Rauch, W., Bertrand-Krajewski, J.L. (2012): Assessing uncertainties in urban drainage models. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 42:3-10.
- Dettinger, M.D., Cayan, D.R., Meyer, M.K., Jeton, A.E. (2004): Simulated hydrologic responses to climate variations and change in the Merced, Carson, and American River Basins, Sierra Nevada, California, 1900–2099. *Climatic Change* 62:283–317.
- Devi, G.K., Ganasri, B.P., Dwarakish, G.S. (2015): A review on hydrological models. *Aquatic Procedia* 4:1001-1007.
- Dezsi, Ş., Mîndrescu, M., Petrea, D., Rai, P. K., Hamann, A., Nistor, M. M. (2018): High-resolution projections of evapotranspiration and water availability for Europe under climate change. *International Journal of Climatology* 38(10):3832-3841.
- DHI, (2000): MIKE 11 User Guide and Reference Model, Tech. Rep., Danish Hydraulic Institute (DHI)
- Dibike, Y.B., Coulibaly, P. (2006): Temporal neural networks for downscaling climate variability and extremes. *Neural Networks* 19:135–144. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.01.003>

- Didovets, I., Krysanova, V., Bürger, G., Snizhko, S., Balabukh, V., Bronstert, A. (2019): Climate change impact on regional floods in the Carpathian region. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 22:100590.
- Dimkić, D., Despotovic, J. (2012): Analysis of the Changes of the Streamflows in Serbia Due to Climate Changes. In: Berger, A., Mesinger, F., Šijački, Dj. (Eds.), *Climate Change. Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects*. Springer-Verlag Wien 2012, pp. 167-177.
- Djurdjevic, V., Trbić, G., Krzic, A., Bozanic, D. (2019): Projected Changes in Multi-day Extreme Precipitation Over the Western Balkan Region. In: Filho, W. L., Trbić, G., Filipovic, D. (Eds.), *Climate Change Adaptation in Eastern Europe. Managing Risks and Building Resilience to Climate Change*. Springer Nature Switzerland AG 2019, pp. 15-28.
- Ђурђевић, В., Тошић, И. (2017): Климатске промене. Физички факултет, Универзитет у Београду, Инститит за метеорологију, 206 стр.
- Ђурђевић, В., Вуковић, А., Вујадиновић, М. М. (2018): Осмотрене промене климе у Србији и пројекције будуће климе на основу различитих сценарија будућих емисија. Програм Уједињених нација за развој.
- Djurovic, N., Domazet, M., Stricevic, R., Pocuca, V., Spalevic, V., Pivic, R., Gregoric, E., Domazet, U. (2015): Comparison of groundwater level models based on artificial neural networks and ANFIS. *The Scientific World Journal* 2015:13 pp. <https://doi.org/10.1155/2015/742138>.
- Dobler, C., Hagemann, S., Wilby, R. L., Stötter, J. (2012): Quantifying different sources of uncertainty in hydrological projections in an Alpine watershed. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(11):4343-4360.
- Döll, P. (2002): Impact of climate change and variability on irrigation requirements: A global perspective. *Climatic Change* 54:269–293. <https://doi.org/10.1023/A:1016124032231>.
- Долијановић, Ж., Ковачевић, Д., Ољача, С., Симић, М. (2020): Адаптација агротехничких мера у ратарству на климатске промене. У: Значај развојних истраживања и иновација у функцији унапређења пољопривреде и шумарства Србије. Академија инжењерских наука Србије, 4. 11. 2020. године, стр. 60-71.
- Donatelli, M., Srivastava, A.K., Duveiller, G., Niemeyer, S., Fumagalli, D. (2015): Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe. *Environmental Research Letters* 10(7):075005.
- Donnelly, C., Greuell, W., Andersson, J., Gerten, D., Pisacane, G., Roudier, P., Ludwig, F. (2017): Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level. *Climatic Change* 143:13–26. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1971-7>
- Doorenbos, J., Pruitt W.O. (1977): *Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 144 p.
- Doria, R., Madramootoo, C.A., Mehdi, B.B. (2006): Estimation of future crop water requirements for 2020 and 2050, using CROPWAT. In: *Proceedings of 2006 IEEE EIC Climate Change Conference*, Ottawa, ON, 2006, pp. 1-6. doi: 10.1109/EICCCC.2006.277194.
- Doulabian, S., Golian, S., Toosi, A.S., Murphy, C. (2021): Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios. *Journal of Water and Climate Change* 12(1):166-184.
- Droulia, F., Charalampopoulos, I. (2021): Future Climate Change Impacts on European Viticulture: A Review on Recent Scientific Advances. *Atmosphere* 12(4):495.

- Други национални извештај Републике Србије према Оквирној конвенцији УН о промени климе (2017). https://unfccc.int/sites/default/files/resource/SNC%20Eng_Serbia.pdf. Приступљено: 20. децембра 2021. године.
- Ducharne, A., F. Habets, C. Pagé, E. Sauquet, P. Viennot, M. Déqué, S. Gascoin, A. Nachour, E. Martin, L. Oudin, L. Terray, Thiéry, D. (2010): Climate change impacts on water resources and hydrological extremes in northern France. In: Carrera, J. (Eds.), Proceedings of XVIII International Conference on Computational Methods in Water Resources, CIMNE, 21-24, June 2010, Barcelona, Spain.
- Eckhardt, K., Ulbrich, U. (2003): Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology* 284(1-4):244-252.
- EEA. 2016: Crop Water Demand. Copenhagen.
- Emam, R. A., Kappas, M., Fassnacht, S., Linh, N. H. K. (2018): Uncertainty analysis of hydrological modeling in a tropical area using different algorithms. *Frontiers of Earth Science* 12(4):661-671.
- El Chami, D., Daccache, A. (2015): Assessing sustainability of winter wheat production under climate change scenarios in a humid climate—An integrated modelling framework. *Agricultural Systems* 140:19-25.
- Eregno, F. E., Xu, C. Y., Kitterød, N. O. (2013): Modeling hydrological impacts of climate change in different climatic zones. *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 5(3):344-365. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2012-0024>
- Ertürk, A., Ekdal, A., Gürel, M., Karakaya, N., Guzel, C., Gönenç, E. (2014): Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in a small Mediterranean watershed. *Science of the Total Environment* 499:437-447.
- Etter, S., Addor, N., Huss, M., Finger, D. (2017): Climate change impacts on future snow, ice and rain runoff in a Swiss mountain catchment using multi-dataset calibration. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 13:222-239.
- Ерић, Р., Тодоровић, А., Плавшић, Ј., Ђукић, В. (2019): Симулације процеса падавине-отицај на сливу Луковске реке коришћењем hess-hms модела. *Bulletin of the Faculty of Forestry/Glasnik Sumarskog fakulteta*, (119).
- FAO (2003): Agriculture, food and water. A contribution to the World Water Development report.
- FAO (2021): Climate change vulnerability in Serbia – An assessment of exposure, susceptibility and capacity at municipal level. Budapest. <https://doi.org/10.4060/cb4916en>
- Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason, Rummukainen, M. (2013): Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Flörke, M., Wimmer, F., Bianchi, A. (2014): Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:85-108. <https://doi.org/10.5194/hess-18-85-2014>

- Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C. (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological. *International Journal of Climatology* 27:1547–1578. <https://doi.org/10.1002/joc.1556>
- Fowler, K. J., Peel, M. C., Western, A. W., Zhang, L., Peterson, T. J. (2016): Simulating runoff under changing climatic conditions: Revisiting an apparent deficiency of conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 52(3):1820-1846.
- Funes, I., Savé, R., de Herralde, F., Biel, C., Pla, E., Pascual, D., Zabalza, J., Cantos, G., Borràs, G., Vayreda, J., Aranda, X. (2021): Modeling impacts of climate change on the water needs and growing cycle of crops in three Mediterranean basins. *Agricultural Water Management* 249:106797.
- Гавриловић, Љ., Дукић, Д. (2014): Реке Србије. Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, Србија.
- Gädeke, A., Hölzel, H., Koch, H., Pohle, I., Grünwald, U. (2014): Analysis of uncertainties in the hydrological response of a model-based climate change impact assessment in a subcatchment of the Spree River, Germany. *Hydrological Processes* 28:3978–3998. <https://doi.org/10.1002/hyp.9933>
- Gebrechorkos, S. H., Hülsmann, S., Bernhofer, C. (2019): Regional climate projections for impact assessment studies in East Africa. *Environmental Research Letters* 14(4):044031.
- Gemitzi, A., Ajami, H., Richnow, H. (2017): Developing empirical monthly groundwater recharge equations based on modeling and remote sensing data – Modeling future groundwater recharge to predict potential climate change impacts. *Journal of Hydrology* 546:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.005>.
- ГеоСрбија. <https://a3.geosrbija.rs/>. Приступљено: 30. децембра 2020. године.
- Ghazi, B., Jeihouni, E., Calamari, Z. (2021): Predicting groundwater level fluctuations under climate change scenarios for Tasuj plain, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 14(2):1-12.
- Гњато, С. (2018). Анализа отицаја у сливу ријеке Топлице. *Скуп* 9(2):25-37.
- Gocic, M., Trajkovic, S. (2014): Spatio-temporal patterns of precipitation in Serbia. *Theoretical and Applied Climatology* 117(3):419-431.
- Goderniaux, P., S. Brouyère, S. Blenkinsop, A. Burton, H.J. Fowler, P. Orban, Dassargues, A. (2011): Modeling climate change impacts on groundwater resources using transient stochastic climatic scenarios. *Water Resources Research* 47(12). doi:10.1029/2010WR010082.
- Gorguner, M., Kavvas, M. L. (2020): Modeling impacts of future climate change on reservoir storages and irrigation water demands in a Mediterranean basin. *Science of the Total Environment* 748: 141246.
- Green, T.R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Hiscock, K.M., Treidel, H., Aureli, A. (2011): Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology* 405:532–560. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002>.
- Gregorić, E., Počuča, V., Vujadinović Mandić, M., Matović, G (2020): Prediction of water conditions for maize cultivation on the chernozem soil until the year of 2100. In: *Book of Proceedings of the XI International Scientific Agricultural Symposium “Agrosym 2020”*, 8 - 11. 10. 2020, Jahorina, Bosnia and Herzegovina. pp. 611-617.
- Група аутора (1973): Основна геолошка карта СФРЈ 1:100000. Тумач за лист Ниш. Савезни геолошки завод Београд, Србија.

- Група аутора (1980): Основна геолошка карта СФРЈ 1:100000. Тумач за лист Куршумлија. Савезни геолошки завод Београд, Србија.
- Gorguner, M., Kavvas, M. L. (2020): Modeling impacts of future climate change on reservoir storages and irrigation water demands in a Mediterranean basin. *Science of the Total Environment* 748:141246.
- Grusson, Y., Wesström, I., Joel, A. (2021): Impact of climate change on Swedish agriculture: Growing season rain deficit and irrigation need. *Agricultural Water Management* 251:106858.
- Guardiola-Albert, C., Jackson, C.R. (2011): Potential Impacts of climate change on groundwater supplies to the Doñana wetland, Spain. *Wetlands* 31(5):907-920.
- Gurara, M. A., Jilo, N. B., Tolche, A. D. (2021): Impact of climate change on potential evapotranspiration and crop water requirement in Upper Wabe Bridge watershed, Wabe Shebele River Basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences* 180:104223.
- Haines, A. T., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. (1988): A global classification of river regimes. *Applied Geography* 8(4):255-272.
- Harding, R.J., Weedon, G.P., van Lanen, H.A.J., Clark, D.B. (2014): The future for global water assessment. *Journal of Hydrology* 518:186–193. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.014>.
- Harvey, D., Gregory, J., Hoffert, M., Jain, A., Lal, M., Leemans, R., Raper, S., Wigley, T., de Wolde, J. (1997): An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report. IPCC Technical Paper II, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. 47 pp.
- Hasda, R., Rahaman, M. F., Jahan, C. S., Molla, K. I., Mazumder, Q. H. (2020): Climatic data analysis for groundwater level simulation in drought prone Barind Tract, Bangladesh: Modelling approach using artificial neural network. *Groundwater for Sustainable Development* 10:100361. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100361>
- Hatfield, J.L., Antle, J., Garrett, K.A., Izaurralde, R.C., Mader, T., Marshall, E., Nearing, M., Robertson, P., Ziska, L. (2020). Indicators of climate change in agricultural systems. *Climatic Change* 163:1719–1732. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2222-2>
- Hattermann, F. F., Post, J., Krysanova, V., Conradt, T., Wechsung, F. (2008): Assessment of water availability in a Central-European River Basin (Elbe) under climate change. *Advances in Climate Change Research* 4:42-50.
- Havril, T., Tóth, Á., Molson, J.W., Galsa, A., Mádl-Szonyi, J. (2018): Impacts of predicted climate change on groundwater flow systems: Can wetlands disappear due to recharge reduction? *Journal of Hydrology* 563:1169–1180. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.020>.
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., Bryan, B. A. (2021): Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications* 12(1):1-11.
- Хидрогеолошка карта слива Јужне Мораве 1:200000.
- Hsu, K.C., Wang, C.H., Chen, K.C., Chen, C.T., Ma, K.W. (2007): Climate-induced hydrological impacts on the groundwater system of the Pingtung Plain, Taiwan. *Hydrogeology Journal* 15(5): 903–913.
- Huang, Y., Ma, Y., Liu, T., Luo, M. (2020): Climate change impacts on extreme flows under IPCC RCP scenarios in the mountainous Kaidu watershed, Tarim River basin. *Sustainability*, 12(5):2090.

- Iglesias, A., Quiroga, S., Moneo, M., Garrote, L. (2012): From climate change impacts to the development of adaptation strategies: challenges for agriculture in Europe. *Climatic Change* 112(1):143-168.
- Iglesias, A., Garrote, L. (2015): Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agricultural Water Management* 155:113–124. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014>.
- Идризовић, Ф. Џ., Матовић, С. Г., Грегорић, Н. Е., Стричевић, Ј. Р. (2018): Анализа седам индиректних метода за прорачун референтне евапотранспирације у климатским условима Србије. *Journal of Agricultural Sciences* 63(1):67-81.
- IPCC, (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC, (2018): *Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- IPCC, 2021: *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001
- Jackson, C.R., Meister, R., Prudhomme, C. (2011): Modelling the effects of climate change and its uncertainty on UK Chalk groundwater resources from an ensemble of global climate model projections. *Journal of Hydrology* 399(1-2): 12-28.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P. (2014): EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14:563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.

- Jacobs, C., Berglund, M., Kurnik, B., Dworak, T., Marras, S., Mereu, V., Michetti, M. (2019): Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe. European Environment Agency Report No. 4/2019.
- Jahani, B., Mohammadi, A.S., Albaji, M. (2016): Impact of climate change on crop water and irrigation requirement (case study: Eastern Dez Plain, Iran). *Polish Journal of Natural Sciences* 31:151–167.
- Jaiswal, R. K., Ali, S., Bharti, B. (2020): Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall–runoff models. *Applied Water Science* 10(1):1-14.
- Јанчић, М. (2015): Утицај климатских промена на биљну производњу. Докторска дисертација. Пољопривредни факултет, Универзитет у Новом Саду, Србија.
- Javadinejad, S., Dara, R., Jafary, F. (2020): Modelling groundwater level fluctuation in an Indian coastal aquifer. *Water SA* 46(4):665-671.
- Jeihouni, E., Eslamian, S., Mohammadi, M., Javad, M. (2019a): Simulation of groundwater level fluctuations in response to main climate parameters using a wavelet – ANN hybrid technique for the Shabestar Plain, Iran. *Environmental. Earth Sciences* 78:293 <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8283-3>
- Jeihouni, E., Mohammadi, M. (2019b): Potential impacts of climate change on groundwater level through hybrid soft-computing methods: a case study — Shabestar Plain, Iran. *Environmental monitoring and assessment* 191:620. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7784-6>
- Jha, M.K., Sahoo, S. (2015): Efficacy of neural network and genetic algorithm techniques in simulating spatio-temporal fluctuations of groundwater. *Hydrological Processes* 29:671–691. <https://doi.org/10.1002/hyp.10166>
- Jiang, T., Chen, Y.D., Xu, C.-Y., Chen, X.H., Chen, X., Singh, V.P. (2007): Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. *Journal of Hydrology* 336(3–4):316–333
- Joseph, J., Ghosh, S., Pathak, A., Sahai, A. K. (2018): Hydrologic impacts of climate change: Comparisons between hydrological parameter uncertainty and climate model uncertainty. *Journal of Hydrology* 566:1-22.
- Jyrkama, M.I., Sykes, J.F. (2007): The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario). *Journal of Hydrology* 338:237– 250. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.036>
- Kamyar, A., Yazdanpanah, H., Movahedi, S., Morimoto, D. (2020): Assessment of the impacts of climate change on agro-climatic indices in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 142(3):1359-1367.
- Karlsson, I.B., Sonnenborg, T.O., Christian, J., Trolle, D., Duus, C., Olesen, J.E., Jeppesen, E., Jensen, K.H., 2016. Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. *Journal of Hydrology* 535:301–317. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.069>
- Kaushika, G.S., K., Arora, H., Hari, H.P. (2019): Analysis of climate change effects on crop water availability for paddy, wheat and berseem. *Agricultural Water Management* 225:105734. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105734>
- Kay, A. L., Davies, H. N., Bell, V. A. Jones, R. G. (2009): Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change* 92(1–2):41–63.
- Kebede, A., Diekkrüger, B., Moges, S. A. (2014): Comparative study of a physically based distributed hydrological model versus a conceptual hydrological model for assessment of climate change

- response in the Upper Nile, Baro-Akobo basin: a case study of the Sore watershed, Ethiopia. *International Journal of River Basin Management* 12(4):299-318.
- Khalil, B., Broda, S., Adamowski, J.F., Ozga-Zielinski, B., Donohoe, A., 2015. Shortterm forecasting of groundwater levels under conditions of mine-tailings recharge using wavelet ensemble neural network models. *Hydrogeology Journal* 23 (1):121–141.
- Kim, I. Y., De Weck, O. L. (2006): Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization: a new method for Pareto front generation. *Structural and multidisciplinary optimization* 31(2):105-116. <https://doi.org/10.1007/s00158-005-0557>
- Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., Arnold, J.G. (2008): Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *Journal of Hydrology* 356:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.024>
- Kisi, O., Alizamir, M., Zounemat-Kermani, M. (2017): Modeling groundwater fluctuations by three different evolutionary neural network techniques using hydroclimatic data. *Natural Hazards* 87(1):367–381.
- Klemeš, V. (1986): Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* 31:13–24. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>
- Kløve, B., Ala-aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J.J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Bertacchi, C., Velasco, E., Pulido-velazquez, M. (2014): Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology* 518:250–266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037>.
- Кнежевић, И. (2020): Анализа динамичког понашања кугличних лежаја применом вештачких неуронских мрежа. Докторска дисертација. Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Србија.
- Kokkonen, T.S., Jakeman, A.J. (2001): A comparison of metric and conceptual approaches in rainfall-runoff modeling and its implications. *Water Resources Research* 37(9):2345–2352
- Kotsopoulos, S., Nastos, P., Lazogiannis, K., Alexiou, I., Poulos, S., Ilias, A., Panagopoulos, A., Ghionis, G., Matiatos, I., Pisinaras, V., Farsirotou, E., Alamanis, N., Arampatzis, G., Kakagiannis, G., n.d. (2015): Crop water requirements under present and future climate conditions. In: *Proceedings of the 10th International Congress of Hellenic Geographical Society*. October 22-24, Thessaloniki, Greece, pp.1118-1129
- Костадинов, С., Драговић, Н., Златић, М., Годосијевић, М. (2008): Утицај противерозионих радова у сливу реке Топлице узводно од бране „Селова“ на интензитет ерозије земљишта. *Водопривреда* 40:231-233.
- Kovačević-Majkić, J., Urošev, M. (2014): Trends of mean annual and seasonal discharges of rivers in Serbia. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijić* 64:143–160. <https://doi.org/10.2298/ijgi1402143k>.
- Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., Soussana, J.F. (2014): Europe. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1267-1326.

- Kresovic, B., Matovic, G., Gregoric, E., Djuricin, S., Bodroza, D. (2014): Irrigation as a climate change impact mitigation measure: An agronomic and economic assessment of maize production in Serbia. *Agricultural Water Management* 139:7-16.
- Kumar, P.S., Praveen, T.V., Prasad, M.A. (2016): Artificial Neural Network Model for Rainfall-Runoff - A Case Study. *International Journal of Hybrid Information Technology* 9(3):263-272. <https://doi.org/10.14257/ijhit.2016.9.3.24>
- Lalić, B., Mihailović, D. T., Podračanin, Z. (2011): Future state of climate in Vojvodina and expected effects on crop production. *Ratarstvo i povrtarstvo* 48(2):403-418.
- Lalic, B., Francia, M., Jacimovic, G. (2013): Assessment of climate change impact on crop water requirements in Serbia in 2030 using CROPWAT model. In: International scientific conference environmental changes and adaptation strategies. 9th-11th September 2013, Skalica, Slovakia.
- Лалић, Б., Јанковић, Д., Јанчић, Ејсinger, Ј., Фирањ, А. (2015): Загревање усева – како одговорити? Утицаји промене климе на српску пољопривреду (Crop warming-how to respond?: the effects of climate change on Serbian agriculture).
- Langsholt, E., Lawrence, D., Wong, W. K., Andjelic, M., Ivkovic, M., Vujadinovic, M. (2013): Effects of climate change in the Kolubara and Toplica catchments, Serbia. Report No. 62, Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Oslo.
- Laprise, R. (2008): Regional climate modelling. *Journal of Computational Physics* 227:3641–3666.
- Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., Prather, M. (2007): Historical overview of climate change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.
- Leduc, M., Mailhot, A., Frigon, A., Martel, J.L., Ludwig, R., Brietzke, G.B., Giguère, M., Brissette, F., Turcotte, R., Braun, M., Scinocca, J. (2019): The ClimEx Project: a 50-member ensemble of climate change projections at 12-km resolution over Europe and Northeastern North America with the Canadian regional climate model (CRCM5). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 58(4):663-693.
- Lee, S., Lee, K. K., Yoon, H. (2019): Using artificial neural network models for groundwater level forecasting and assessment of the relative impacts of influencing factors. *Hydrogeology Journal* 27(2):567-579.
- Li, Z., Fang, G., Chen, Y., Duan, W., Mukanov, Y. (2020): Agricultural water demands in Central Asia under 1.5 °C and 2.0 °C global warming. *Agricultural Water Management* 231:106020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106020>
- Lidén, R., Harlin, J. (2000): Analysis of conceptual rainfall–runoff modelling performance in different climates. *Journal of hydrology* 238(3-4):231-247.
- Lobanova, A., Liersch, S., Nunes, J.P., Didovets, I., Stagl, J., Huang, S., Koch, H., Rivas López, M. del R., Maule, C.F., Hattermann, F., Krysanova, V. (2018): Hydrological impacts of moderate and high-end climate change across European river basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 18:15–30. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.05.003>.
- Luković, J., Bajat, B., Blagojević, D., Kilibarda, M. (2014): Spatial pattern of recent rainfall trends in Serbia (1961–2009). *Regional Environmental Change* 14(5):1789-1799.

- Maheswaran, R., Khosa, R. (2013): Long term forecasting of groundwater levels with evidence of non-stationary and nonlinear characteristics. *Computers & Geoscience* 52:422–436. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.030>
- Makowski, D., Marajo-Petitzon, E., Durand, J.L., Ben-Ari, T. (2020): Quantitative synthesis of temperature, CO₂, rainfall, and adaptation effects on global crop yields. *European Journal of Agronomy* 115:126041.
- Malik, A., Bhagwat, A. (2020): Modelling groundwater level fluctuations in urban areas using artificial neural network. *Groundwater for Sustainable Development* 100484.
- Manabe, S., Wetherald R. T. (1967): Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of the Atmospheric Sciences* 24(3):241-259.
- Mann, H.B. (1945): Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245–259.
- Mann, H.B., Whitney, D.R. (1947): On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics* 18:50-60. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
- Markou, M., Moraiti, C.A., Stylianou, A., Papadavid, G. (2020): Addressing climate change impacts on agriculture: adaptation measures for six crops in Cyprus. *Atmosphere* 11(5):483.
- Марјановић, М.Н. (2015): Физиолошки и биохемијски механизми регулације растења плодова парадајза (*Lycopersicon esculentum Mill.*) у условима суше. Докторска дисертација. Пољопривредни факултет, Универзитет у Београду, Србија.
- Masia, S., Trabucco, A., Spano, D., Snyder, R.L., Sušnik, J., Marras, S. (2021): A modelling platform for climate change impact on local and regional crop water requirements. *Agricultural Water Management* 255:107005.
- Mathevet, T., Gupta, H., Perrin, C., Andréassian, V., Le Moine, N. (2020): Assessing the performance and robustness of two conceptual rainfall-runoff models on a worldwide sample of watersheds. *Journal of Hydrology* 585:124698.
- Mathieu, J. A., Aires, F. (2018): Assessment of the agro-climatic indices to improve crop yield forecasting. *Agricultural And Forest Meteorology* 253:15-30.
- Matović, G., Gregorić, E., Glamočlija, Dj. (2013): Crop production and drought in serbia in light of climate change. In: Redžepagić, S., Simoes, C.N.M. (Eds.), *Agriculture in Serbia and Portugal: Recent Developments and Economic Policy Implications*. Faculty of Economics of the University of Coimbra, Portugal, pp. 264-286.
- Matović, G., Počuča, V., Gregorić, E., Vujadinović Mandić, M. (2021a): Projection of the water regime parameters of Zemun chernozem for winter wheat production by the end of the 21st century. In: *Book of proceedings of the Third International Congress Serbian Society of Soil Science*. Sokobanja, Serbia, pp. 59.
- Матовић, Г., Почуча, В., Грегорић, Е. (2021б): Потреба за наводњавањем кукуруза на земунском чернозему у последњих пола века. *Земљиште и биљка* 70(1):1-12.
- Maurer, E.P. (2007): Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. *Climatic Change* 82(3–4):309–325.
- McMaster, G. S., Wilhelm, W. (1997): Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* 87:291-300.
- Medina-Garcia, G., Guadalupe Echavarria-Chairez, F., Ariel Ruiz-Corral, J., Manuel Rodriguez-Moreno, V., Soria-Ruiz, J., De la Mora-Orozco, C. (2020): Global warming effect on alfalfa production in Mexico. *Revista mexicana de ciencias pecuarias* 11:34-48

- Meresa, H. K., Gatachew, M. T. (2019): Climate change impact on river flow extremes in the Upper Blue Nile River basin. *Journal of Water and Climate Change* 10(4):759-781. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.154>
- Milovanović, B., Schuster, P., Radovanović, M., Vakanjac, V.R., Schneider, C. (2017): Spatial and temporal variability of precipitation in Serbia for the period 1961–2010. *Theoretical and Applied Climatology* 130(1):687-700.
- Mimić, G., Mihailović, D.T., Kapor, D. (2017): Complexity analysis of the air temperature and the precipitation time series in Serbia. *Theoretical and Applied Climatology* 127(3):891-898.
- Minville, M., Brissette, F., Leconte, R. (2008): Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of Hydrology* 358(1–2):70–83.
- Mirgol, B., Nazari, M., Eteghadipour, M. (2020): Modelling climate change impact on irrigation water requirement and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.), barley (*Hordeum vulgare* L.), and fodder maize (*Zea mays* L.) in the semi-arid Qazvin plateau, Iran. *Agriculture* 10(3):60.
- Mizyed, N. (2009): Impacts of Climate Change on Water Resources Availability and Agricultural Water Demand in the West Bank. *Water Resources Management* 23(10):2015–2029. doi:10.1007/s11269-008-9367-0
- Mo, X.G., Hu, S., Lin, Z.H., Liu, S.X., Xia, J. (2017): Impacts of climate change on agricultural water resources and adaptation on the North China Plain. *Advances in Climate Change Research* 8:93–98. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2017.05.007>
- Mondal, A., Kundu, S., Mukhopadhyay, A. (2012): Rainfall trend analysis by Mann-Kendall test: a case study of North-Eastern part of Cuttack district. Orissa. *International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences* 2(1):70–78.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747–756. doi:10.1038/nature08823
- Mulvaney, T. J. (1851): On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. *Proceedings of the institution of Civil Engineers of Ireland* 4:19-31.
- Najafi, M. R., Moradkhani, H., Jung, I. W. (2011): Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. *Hydrological Processes* 25(18):2814–2826.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, H.J.M., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Papper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z. (2000): Special Report on Emissions Scenarios, IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000. pp. 570.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., Ramirez-Villegas, J. (2020): High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Scientific data* 7(1):1-14.

- Nistor, M. M. (2019): Climate change effect on groundwater resources in South East Europe during 21st century. *Quaternary International* 504:171-180. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.05.019>
- Nistor, M. M. (2020): Groundwater vulnerability in Europe under climate change. *Quaternary International* 547:185-196. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.04.012>
- Nobrega, M.T., Collischonn, W., Tucci, C.E.M., Paz, A.R. (2011): Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(2):585–595.
- North G. R., Cahalan R. F., Coakley J. A. (1981): Energy balance climate models. *Reviews of Geophysics* 19(1):91-121. doi: <https://doi.org/10.1029/RG019i001p00091>.
- Novotny, E. V., Stefan, H.G. (2007): Stream flow in Minnesota: Indicator of climate change. *Journal of Hydrology* 334:319–333. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.011>
- Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., Micale, F. (2011): Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European journal of agronomy* 34(2):96-112.
- Orth, R., Staudinger, M., Seneviratne, S.I., Seibert, J., Zappa, M. (2015): Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. *Journal of Hydrology* 523:147–159. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.044>.
- Општине и региони у Републици Србији 2020. године. Републички завод за статистику.
- Ouda, S., Ewis, M., Badawi, M. (2015): Water requirements for clover and cotton under climate change conditions. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering* 6(3):375-383.
- 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 modelling. *Journal of Hydrology* 303:290-306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
- Oudin, L., Andréassian, V., Mathevet, T., Perrin, C., Michel, C. (2006): Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research* 42:1–10. <https://doi.org/10.1029/2005WR004636>
- Oyebode, O., Stretch, D. (2019): Neural network modeling of hydrological systems: a review of implementation techniques. *Natural Resource Modeling* 32(1):12189.
- Pan, S., Tian, H., Dangal, S.R.S., Yang, Q., Yang, J., Lu, C., Tao, B., Ren, W., Ouyang, Z. (2015): Earth's Future Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO₂ in the 21st century. *Earth's Future* 3:15–35. <https://doi.org/10.1002/2014EF000263>.
- Papadimitriou, L. V., Koutroulis, A.G., Grillakis, M.G., Tsanis, I.K. (2016): High-end climate change impact on European runoff and low flows - Exploring the effects of forcing biases. *Hydrology and Earth System Sciences* 20:1785–1808. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1785-2016>.
- Parker, W. S. (2013): Ensemble modeling, uncertainty and robust predictions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 4(3):213-223.
- Pechlivanidis, I.G., Jackson, B.M., McIntyre, N.R., Wheeler, H.S. (2011): Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST journal* 13(3):193-214.
- Педолошка карте Србије. Институт за земљиште, Београд 1:50000.

- Pereira, L. S., Alves, I. (2013): Crop Water Requirements. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.05129-0
- Piani, C., Haerter, J.O., Coppola, E. (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology* 99(1-2):187-192. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0134-9>.
- Попис пољопривреде 2012. Пољопривреда у Републици Србији. Републички завод за статистику.
- Поповић, Т., Ђурђевић, В., Живковић, М., Јовић, Б., Јовановић, М. (2009): Промена климе у Србији и очекивани утицаји. У: Пета регионална конференција ЕНЕ09 – Животна средина ка Европи, Амбасадори животне средине и ПКС. Београд, Србија, стр. 6-11.
- Поштић, Д.Ж. (2013): Утицај порекла садног материјала и величине кртоле на морфолошке и продуктивне особине кромпира. Докторска дисертација. Пољопривредни факултет, Универзитет у Београду, Србија.
- Pechlivanidis, I. G., Arheimer, B., Donnelly, C., Hundecha, Y., Huang, S., Aich, V., Samaniego, L., Eisner, S., Shi, P. (2017): Analysis of hydrological extremes at different hydro-climatic regimes under present and future conditions. *Climatic Change* 141(3): 467-481.
- Praskievicz, S., Chang, H. (2009): A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. *Progress in Physical Geography* 33(5): 650-671.
- Прохаска, С., Илић, А., Трипковић, В., Ђурђевић, В. (2013): Прелиминарна пројекција стања водних ресурса у Србији у условима промењене климе. У: Зборник са 17. Саветовања SDHI и SDH. 5-6. октобар, Вршац, Србија, стр. 424-433.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. (2012): Reference Manual AquaCrop - Annex I (Version 4.0). <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>
- Rakhshandehroo, G.R., Vaghefi, M., Aghbolaghi, M.A. (2012): Forecasting groundwater level in Shiraz plain using artificial neural networks. *Arabian Journal for Science and Engineering* 37(7):1871-1883. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0291-5>
- Rasmussen, S.B., Blenkinsop, S., Burton, A., Abrahamsen, P., Holm, P.E., Hansen, S. (2018): Climate change impacts on agro-climatic indices derived from downscaled weather generator scenarios for eastern Denmark. *European Journal of Agronomy* 101:222-238.
- Razali, N.M., Wah, Y.B. (2011): Power comparisons of Shapiro-Wilk, KolmogorovSmirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of statistical modeling and analytics* 2(1):21-33.
- Refsgaard, J.C., Sonnenborg, T.O., Butts, M.B., Christensen, J.H., Christensen, S., Jensen, K.H., Jørgensen, F., Jørgensen, L.F., Larsen, M.A.D., Rasmussen, S.H., Seaby, L.P., Seifert, D., Vilhelmsen, T.N. (2016): Climate change impacts on groundwater hydrology – where are the main uncertainties and can they be reduced? *Hydrological Sciences Journal* 61(31): 2312–2324. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1131899>
- Reshmidevi, T. V, Kumar, D.N., Mehrotra, R., Sharma, A. (2018): Estimation of the climate change impact on a catchment water balance using an ensemble of GCM. *Journal of Hydrology* 556:1192–1204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.016>.
- Rio, M., Rey, D., Prudhomme, C., Holman, I.P. (2018): Evaluation of changing surface water abstraction reliability for supplemental irrigation under climate change. *Agricultural Water Management* 206:200–208. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.005>.
- Ристић, Р., Радић, Б., Васиљевић, Н. (2009): Карактеристике великих вода на бујичним сливовима у Србији. *Гласник Српског географског друштва*, 89(4):161-189.

- Rojas, R., Feyen, L., Bianchi, A., Dosio, A. (2012): Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of bias-corrected regional climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117(D17). <https://doi.org/10.1029/2012JD017461>.
- Ruml, M., Vuković, A., Vujadinović, M., Djurdjević, V., Ranković-Vasić, Z., Atanacković, Z., Sivčev, B., Marković, N., Matijašević, S., Petrović, N. (2012): On the use of regional climate models: implications of climate change for viticulture in Serbia. *Agricultural and forest meteorology* 158:53-62.
- Ruml, M., Gregorić, E., Radovanović, S., Matović, G., Vujadinovic, M., Vukovic, A. (2015): Spatial analysis of temporal trends in growing season length for Serbia over the period 1961-2010. In: *Book of Proceedings of the Sixth International Scientific Agricultural Symposium Agrosym 2015*, University of East Sarajevo. October 15-18, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, pp. 690-695.
- Ruml, M., Gregorić, E., Matović, G., Radovanović, S., Vujadinović, M., Vuković, A. (2016): Temperature and precipitation changes in Serbia between 1961 and 2010. *Annals of the University of Craiova-Agriculture, Montanology, Cadastre Series* 46(2):260-265.
- Ruml, M., Gregorić, E., Vujadinović, M., Radovanović, S., Matović, G., Vuković, A., Počuča, V., Stojičić, Dj. (2017): Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961 – 2010. *Atmospheric Research* 183:26–41. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.08.013>
- Rummukainen, M. (2010): State-of-the-art with regional climate models. *Climate Change* 1(1):82–96.
- Републички Статистички Завод, РСЗ. (2021): Национални рачуни – Годишњи национални рачуни. Бруто домаћи производ 2020. Републички завод за статистику.
- PXM3. http://www.hidmet.gov.rs/ciril/hidrologija/podzemne/tabela.php?pd_pod_br=3np. Приступљено 26. јуна 2020. године.
- Saadi, M., Oudin, L., Ribstein, P. (2020): Crossing the rural–urban boundary in hydrological modelling: How do conceptual rainfall–runoff models handle the specificities of urbanized catchments? *Hydrological Processes* 34(15):3331-3346.
- Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., Lionello, P. (2015): Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management* 147:103-115.
- Saelthun, N.R. (1996): The 'Nordic' HBV Model. Description and documentation of the model version developed for the project Climate change and Energy Production. Norwegian Water Resources and Energy Administration, Oslo, Norway 7, pp. 26.
- Sahoo, S., Russo, T.A., Elliott, J., Foster, I. (2017): Machine learning algorithms for modeling groundwater level changes in agricultural regions of the U.S. *Water Resources Research* 53(5):3878–3895.
- Salem, G. S. A., Kazama, S., Shahid, S., Dey, N. C. (2018): Impacts of climate change on groundwater level and irrigation cost in a groundwater dependent irrigated region. *Agricultural Water Management* 208:33-42.
- Salman, S. A., Shahid, S., Afan, H. A., Shiru, M. S., Al-Ansari, N., Yaseen, Z. M. (2020): Changes in climatic water availability and crop water demand for Iraq region. *Sustainability* 12(8):3437.
- Sandstrom, K. (1995): Modeling the effects of rainfall variability on groundwater recharge in semi-arid Tanzania. *Nordic Hydrology* 26:313–330

- Sassi, M., Nicotina, L., Pall, P., Stone, D., Hilberts, A., Wehner, M., Jewson, S. (2019): Advances in Water Resources Impact of climate change on European winter and summer flood losses. *Advances in Water Resources* 129:165–177. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.05.014>
- Savé, R., De Herralde, F., Aranda, X., Pla, E., Pascual, D., Funes, I., Biel, C. (2012): Potential changes in irrigation requirements and phenology of maize, apple trees and alfalfa under global change conditions in Fluvia watershed during XXIst century: Results from a modeling approximation to watershed-level water balance. *Agricultural Water Management*, 114:78-87.
- Schneider, C., Laizé, C. L. R., Acreman, M. C., Florke, M. (2013): How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrology and Earth System Sciences* 17(1):325-339.
- Schneider, S. H., Dickinson, R. E. (1974). Climate modeling. *Reviews of Geophysics* 12(3):447-493.
- Seaby, L.P., Refsgaard, J.C., Sonnenborg, T.O., Højberg, A.L. (2015): Spatial uncertainty in bias corrected climate change projections and hydrological impacts. *Hydrological Processes* 29(20):4514–4532.
- Seibert, J. (2000): Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences* 4(2):215–224. <https://doi.org/10.5194/hess-4-215-2000>
- Seibert, J. (2005): HBV light version 2 User manual. https://www.geo.uzh.ch/dam/jcr:c8afa73c-ac90-478e-a8c7-929eed7b1b62/HBV_manual_2005.pdf. Приступљено 23. 8. 2020. године.
- Seibert, J., Vis, M.J.P. (2012): Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences* 16:3315–3325. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>.
- Seiller, G., Anctil, F., Perrin, C. (2012): Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrology and Earth System Sciences* 16:1171–1189. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1171-2012>.
- Senatore, A., G. Mendicino, G. Smiatek, Kunstmann, H. (2011): Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a Mediterranean basin in Southern Italy. *Journal of Hydrology* 399(1-2):70-92.
- Shen, M., Chen, J., Zhuan, M., Chen, H., Xu, C., Xiong, L., (2018): Estimating uncertainty and its temporal variation related to global climate models in quantifying climate change impacts on hydrology. *Journal of Hydrology* 556:10–24. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.114>
- Singh, R. D., Kumar, C. P. (2010): Impact of Climate Change on Groundwater Resources. In: *Proceedings of 2nd National Ground Water Congress, 22nd March 2010, New Delhi*, pp. 332–350.
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Muche, M. and Avant, B. (2017): An Overview of Rainfall-Runoff Model Types. EPA Report Number September 2017. Office of Research and Development National Exposure Research Laboratory, Athens, Georgia.
- Smeal, D., O'Neill, M. K., Owen, C. K., West, M. M., Allen, S. C., Arnold, R. N. (2014): Forty-three Years (1969-2011) of Climatological Data: NMSU's Agricultural Science Center at Farmington, NM. NM State University, Cooperative Extension Service.
- Sok, T., Ich, I., Tes, D., Chan, R., Try, S., Song, L., Oeurng, C. (2022): Change in Hydrological Regimes and Extremes from the Impact of Climate Change in the Largest Tributary of the Tonle Sap Lake Basin. *Water* 14(9):1426.
- Srivastav, A. L., Dhyani, R., Ranjan, M., Madhav, S., Sillanpää, M. (2021): Climate-resilient strategies for sustainable management of water resources and agriculture. *Environmental Science and Pollution Research* 28(31):41576-41595.

- Stoll, S., H.J. Hendricks Franssen, M. Butts, Kinzelbach, W. (2011): Analysis of the impact of climate change on groundwater related hydrological fluxes: a multimodel approach including different downscaling methods. *Hydrology Earth System Sciences* 15:21-38.
- Stolz, R., Prasch, M., Weber, M., Koch, F., Weidinger, R., Ebner, M., Mauser, W. (2018): Climate Change Impacts on the Water Resources in the Danube River Basin and Possibilities to Adapt—The Way to an Adaptation Strategy and its Update. *Journal of Environmental Geography* 11(3-4):13-24.
- Стричевић, Р. (2007): Наводњавање: основе пројектовања и управљања системима. Пољопривредни факултет, Београд.
- Стричевић, Р. Ј., Ђуровић, Н.Л., Вуковић, А.Ј., Вујадиновић, М. П., Ћосић, М., Д., Пејић, Б.С. (2014): Процена приноса и потребе шећерне репе за водом у условима климатских промена на подручју Републике Србије применом AQUACROP модела. *Journal of Agricultural Sciences* 59(3):301-317.
- Стричевић, Р, Срђевић, З., Вујадиновић Мандић, М., Срђевић, Б. (2017): Одрживо управљање водним ресурсима и *water footprint* концепт: Пример примене у воћарству. *Водопривреда* 49:4-6.
- Stričević, R., Trbić, G., Vujadinović, M., Vuković, A., Lipovac, A., Bogdan, I., Cupać, R. (2019a): Assessment of Climate Change Impact on Water Requirements of Orchards in Bosnia and Herzegovina. In: *Climate Change Adaptation in Eastern Europe* Springer, Cham, pp. 199-211.
- Стричевић, Р., Продановић, С., Ђуровић, Н., Петровић Обрадовић, О., Ђуровић, Д. (2019б): Извештај утицаја осматраних климатских промена на пољопривреду у Србији и пројекције утицаја будуће климе на основу различитих сценарија будућих емисија. Програм Уједињених нација за развој. Београд, Србија, пп. 52.
- Стричевић, Р., Мандић, В. М., Ђуровић, Н., Липовац, А., Ћосић, М. (2020): Процена утицаја климатских промена на приносе и потребе пшенице, кукуруза и сунцокрета за наводњавањем. У: Књига сажетака. Симпозијум са међународним учешћем Наводњавање и одводњавање у светлу климатских промена. Вршац, Србија, стр. 37.
- Стричевић, Р., Мандић, М. В., Ђуровић, Н., Липовац, А. (2021): Симулација примене две мере адаптације на климатске промене на принос пшенице, кукуруза и сунцокрета моделом AquaCrop. *Земљиште и биљка* 70(1):41-59.
- Sun, S.K., Li, C., Wu, P.T., Zhao, X.N., Wang, Y.B. (2018): Evaluation of agricultural water demand under future climate change scenarios in the Loess Plateau of Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators* 84:811–819. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.048>.
- Шево, Ј. (2015): Географске промене општине Прокупље крајем XX века и почетком XXI века. Мастер рад. Природно-математички факултет, Универзитет у Нишу, Србија.
- Tabari, H., Somee, B.S., Zadeh, M.R. (2011): Testing for long-term trends in climatic variables in Iran. *Atmospheric Research* 100:132-140. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.01.005>
- Thaler, S., Eitzinger, J., Trnka, M., Dubrovsky, M. (2012): Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe. *The Journal of Agricultural Science* 150(5):537-555.
- Taormina, R., Chau, K.W., Sethi, R. (2012): Artificial neural network simulation of hourly groundwater levels in a coastal aquifer system of the Venice lagoon. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25:1670–1676. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.02.009>
- Tapoglou, E., Trichakis, I.C., Dokou, Z., Nikolos, I.K., Karatzas, G.P. (2014): Groundwater-level forecasting under climate change scenarios using an artificial neural network trained with

particle swarm optimization. *Hydrological Sciences Journal* 59:1225–1239. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.838005>

- Tarekegn, N., Abate, B., Muluneh, A., Dile, Y. (2022): Modeling the impact of climate change on the hydrology of Andasa watershed. *Modeling Earth Systems and Environment* 8(1): 103-119.
- Taylor, R.G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., LeBlanc, M., Famiglietti, J., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T.R., Chen, J., Taniguchi, M., Birken, M.F.P., Macdonald, A., Fan, Y., Maxwell, R.M., Yechieli, Y., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P.J.F., Holman, I., Treidel, H. (2013): Ground water and climate change. *Nature Climate Change* 3:322–329.
- Teng, J., Vaze, J., Chiew, F.H.S., Wang, B., Perraud, J.M. (2012): Estimating the relative uncertainties sourced from GCMs and hydrological models in modeling climate change impact on runoff. *Journal of Hydrometeorology* 13(1):122–139.
- Teutschbein, C., Grabs, T., Laudon, H., Karlsen, R.H., Bishop, K. (2018): Simulating Streamflow in Ungauged Basins under a Changing Climate: The Importance of Landscape Characteristics. *Journal of Hydrology* 561:160-178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.060>
- Todorović, A.Đ. (2015): Impact of calibration period on parameter estimates in the conceptual hydrologic models of various structures. Doctoral dissertation. Faculty of Civil Engineering. University Of Belgrade, Serbia.
- Тодоровић, А., Плавшић, Ј. (2015): Утицај климатских промена на хидролошке режиме на сливовима Колубаре, Топлице и Млаве. У: Зборник са 17. Саветовања SDHI и SDH. 5-6. октобар, Вршац, Србија, стр. 325-340.
- Todorovic, A., Plavsic, J. (2016): The role of conceptual hydrologic model calibration in climate change impact on water resources assessment. *Journal of Water and Climate Change* 7(1):16-28.
- Todorović, A., Plavšić, J., Pavlović, D., Despotović, J. (2017): Assessment of climate change impact on flood flows in two catchments in Serbia. In: *Proceedings of the 5th International Conference Contemporary achievements in civil engineering* 21. April 2017. Subotica, Serbia.
- Tošić, I., Hrnjak, I., Gavrilov, M.B., Unkašević, M., Marković, S.B., Lukić, T. (2013): Annual and seasonal variability of precipitation in Vojvodina, Serbia. *Theoretical and applied climatology* 117(1):331-341.
- Tovjanin, M. J., Djurdjevic, V., Pejic, B., Novkovic, N., Mutavdzic, B., Markovic, M., Mackic, K. (2019): Modeling the impact of climate change on yield, water requirements, and water use efficiency of maize and soybean grown under moderate continental climate in the Pannonian lowland. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 123(4):469-486.
- Trajkovic, S. (2007): Hargreaves versus Penman-Monteith under Humid Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133:38–42. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:1\(38\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(38))
- Trnka, M., Olesen, J.E., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Eitzinger, J., Seguin, B., PELTONEN-SAINIO, P., Rötter, R., Iglesias, A.N.A., Orlandini, S., Dubrovský, M. (2011): Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology* 17(7):2298-2318.
- Trnka, M., Balek, J., Semenov, M.A., Semeradova, D., Belinova, M., Hlavinka, P., Olesen, J.E., Eitzinger, J., Schaumberger, A., Zahradnick, P., Kopecky, D. (2021): Future agroclimatic conditions and implications for European grasslands. *Biologia Plantarum* 64:865-880.

- Tsanis, I.K., Coulibaly, P., Daliakopoulos, I.N. (2008): Improving groundwater level forecasting with a feedforward neural network and linearly regressed projected precipitation. *Journal of Hydroinformatics* 10:317–330. <https://doi.org/10.2166/hydro.2008.006>.
- Te Linde, A.T.E., Hurkmans, R., Aerts, J., Dolman, H. (2007): Comparing model performance of the HBV and VIC models in the Rhine basin. *Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management. Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007, Perugia, July 2007*, pp. 278–285.
- Uhlenbrook, S., Roser, S., Tilch, N. (2004): Hydrological process representation at the meso-scale: the potential of a distributed, conceptual catchment model. *Journal of Hydrology* 291(3-4):278–296. doi:10.1016/j.jhydrol.2003.12.038
- van Vliet, M. T., Donnelly, C., Strömbäck, L., Capell, R., Ludwig, F. (2015): European scale climate information services for water use sectors. *Journal of Hydrology* 528:503-513.
- van Vliet, M.T.H., Franssen, W.H.P., Yearsley, J.R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D.P., Kabat, P. (2013): Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change* 23:450–464. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.11.002>.
- Vansteenkiste, T., Tavakoli, M., Ntegeka, V., De Smedt, F., Batelaan, O., Pereira, F., Willems, P., 2014. Intercomparison of hydrological model structures and calibration approaches in climate scenario impact projections. *Journal of Hydrology* 519:743-755.
- Vaze, J., Jordan, P., Beecham, R., Frost, A., Summerell, G. (2012): *Guidelines for Rainfall Runoff Modelling: Towards best practice model application*. eWater Cooperative Research Centre. Bruce, Australia, pp. 47.
- Velasco, M., Versini, P.A., Cabello, A., Centre, W.T. (2013): Assessment of flash floods taking into account climate change scenarios in the Llobregat River basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13:3145–3156. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3145-2013>
- Velázquez, J.A., Schmid, J., Ricard, S., Muerth, M.J., Gauvin St-Denis, B., Minville, M., Chaumont, D., Caya, D., Ludwig, R., Turcotte, R. (2013): An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(2):565-578.
- Вујадиновић Мандић, М. П. (2015): Моделирање хидролошког циклуса у интегрисаном геофизичком систему. Докторска дисертација. Физички факултет, Универзитет у Београду, Србија.
- Vujadinovic Mandic, M., Vuković Vimić, A., Ranković-Vasić, Z., Ćosić, M., Đurović, D., Dolijanović, Ž., Simić, A., Lipovac, A., Životić, L. (2022a): Climate change risks in agricultural plant production of Serbia, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10522, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10522>.
- Vujadinović Mandić, M., Vuković Vimić, A., Ranković-Vasić, Z., Đurović, D., Ćosić, M., Sotonica, D., Đurđević, V. (2022b): Observed Changes in Climate Conditions and Weather-Related Risks in Fruit and Grape Production in Serbia. *Atmosphere* 13(6):948.
- Vuković, A.J., Vujadinović, M.P., Rendulić, S.M., Djurdjevic, V.S., Ruml, M.M., Babic, V.P., Popović, D.P. (2018): Global warming impact on climate change in Serbia for the period 1961-2100. *Thermal. Science* 22(6A):2267–2280. <https://doi.org/10.2298/tsci180411168v>
- Wilby, R. L. (2005). Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment. *Hydrological Processes* 19(16):3201–3219.
- Wilby, R.L., Harris, I. (2006): A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research* 42(2). <https://doi.org/10.1029/2005WR004065>

- Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V., Lettenmaier, D.P. (2004): Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscale climate model outputs. *Climatic Change* 62:189–216.
- World Meteorological Organization (2017): WMO guidelines on the calculation of climate normals. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166 (Пристапљено 3. децембра 2019. године).
- Wunsch, A., Liesch, T., Broda, S. (2018): Forecasting groundwater levels using nonlinear autoregressive networks with exogenous input (NARX). *Journal of Hydrology* 567:743–758. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.045>.
- Xiang, Y., Wang, Y., Chen, Y., Zhang, Q. (2021): Impact of Climate Change on the Hydrological Regime of the Yarkant River Basin, China: An Assessment Using Three SSP Scenarios of CMIP6 GCMs. *Remote Sensing* 14(1):115.
- Xu, X., Huang, G., Zhan, H., Qu, Z., Huang, Q. (2012): Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas. *Journal of Hydrology* 412–413:170–181.
- Ye, Q., Yang, X., Dai, S., Chen, G., Li, Y., Zhang, C. (2015): Effects of climate change on suitable rice cropping areas, cropping systems and crop water requirements in southern China. *Agricultural Water Management* 159:35–44. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.022>
- Zhang, H., Huang, G. H. (2013): Development of climate change projections for small watersheds using multi-model ensemble simulation and stochastic weather generation. *Climate dynamics* 40(3): 805-821.
- Zhang, L., Yuan, F., Wang, B., Ren, L., Zhao, C., Shi, J., Liu, Y., Jiang, S., Yang, X., Chen, T., Liu, S. (2021). Quantifying uncertainty sources in extreme flow projections for three watersheds with different climate features in China. *Atmospheric Research* 249:105331.
- Zhang, S., Chen, J., Gu, L. (2022): Overall uncertainty of climate change impacts on watershed hydrology in China. *International Journal of Climatology* 42(1):507-520.
- Живковић, М., Ђорђевић, А. (2003): Педологија (прва књига) генеза, састав и особине земљишта. Пољопривредни факултет, Београд.

Биографија кандидата

Ценита Идризовић рођена је 18. новембра 1992. године у Новом Пазару. Завршила је средњу медицинску школу у Новом Пазару. Диплому основних студија стекла је 2015. године на Државном универзитету у Новом Пазару на студијском програму Пољопривредна производња, са просечном оценом 9,85. Мастер академске студије завршила је 2016. године на Пољопривредном факултету Универзитета у Београду, студијски програм Мелиорације земљишта, са просечном оценом 10,00. Одбранила је мастер рад под насловом: „Хидролошка анализа подручја Западне Мораве са освртом на одводњавање“. Школске 2016/2017. на Пољопривредном факултету Универзитета у Београду уписала је докторске академске студије, студијски програм Пољопривредне науке, модул Мелиорације земљишта. Стручну праксу обавила је у Институту за земљиште Београд. Стипендиста је Фонда за младе таленте Доситеја за школску 2014/2015. и 2015/2016. годину. Добитница је награде за најбољег студента на Департману за хемијско-технолошке науке Државног универзитета у Новом Пазару, 2012. године. Награђена је за најбољи рад у категорији Млади истраживачи на 18. Научном саветовању СДХИ и СДХ, у Нишу 2018. године. Објавила је 7 библиографских јединица од чега је једна у часопису са SCI листе. Научно интересовање: климатске промене, водни ресурси, моделирање хидролошких величина, моделирање биљне производње, евапотранспирација, потреба усева за водом. У периоду април 2017 – април 2021. године докторандкиња је била стипендиста Министарства просвете науке и технолошког развоја ангажована на научно-истраживачком пројекту „Савремени биотехнолошки приступ решавања проблема суше у пољопривреди Србије“ (ТР 31005).

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Џенита Идризовић

Број индекса: МЛ160041

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

Анализа утицаја климатских промена на водне ресурсе и обезбеђеност усева и засада водом на брдско-планинском подручју

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Ценита Идризовић

Број индекса: МЛ160041

Студијски програм: Мелиорације земљишта

Наслов рада: Анализа утицаја климатских промена на водне ресурсе и обезбеђеност усева и засада водом на брдско-планинском подручју

Ментор: Еника Грегорић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Анализа утицаја климатских промена на водне ресурсе и обезбеђеност усева и засада водом на брдско-планинском подручју

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.