

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ФИЗИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Милица Љ. Тошић

**УТИЦАЈ КЛИМАТСКИХ ПРОМЕНА НА  
ЕКСТРЕМНЕ ВРЕМЕНСКЕ И КЛИМАТСКЕ  
ДОГАЂАЈЕ У СРБИЈИ АНАЛИЗОМ  
КОМПОЗИТНИХ КЛИМАТСКИХ ИНДЕКСА И  
ПРИМЕНОМ СТОРИЛАЈН МЕТОДЕ**

докторска дисертација

Београд, 2026

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF PHYSICS

Milica Lj. Tošić

**THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON  
EXTREME WEATHER AND CLIMATE EVENTS IN  
SERBIA BY ANALYSING COMPOUND CLIMATE  
INDICES AND APPLYING THE STORYLINE  
METHOD**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026

# КОМИСИЈА ЗА ПРЕГЛЕД И ОЦЕНУ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ментор

**др Владимир Ђурђевић**  
*Редовни професор*  
*Универзитет у Београду, Физички факултет*

Чланови комисије

**др Ивана Тошић**  
*Редовни професор*  
*Универзитет у Београду, Физички факултет*

**др Сузана Путниковић**  
*Доцент*  
*Универзитет у Београду, Физички факултет*

**др Мирјам Вујадиновић Мандић**  
*Редовни професор*  
*Универзитет у Београду, Пољопривредни факултет*

Датум одбране:

# Утицај климатских промена на екстремне временске и климатске догађаје у Србији анализом композитних климатских индекса и применом сторилајн методе

## Сажетак

Ова докторска дисертација посвећена је свеобухватној анализи екстремних климатских догађаја у Србији, са посебним фокусом на сушу као централни феномен кроз који се испитује утицај климатских промена. Истраживање је мотивисано све учесталијом појавом температурних и падавинских екстрема, што захтева примену савремених статистичких и нумеричких метода за њихову карактеризацију и атрибуцију.

Методологија рада заснива се на примени композитних климатских индекса који се описују истовремени екстремни температура и падавина у одређеној сезони. Анализирани су осмотрени подаци, као и пројекције мултимоделског ансамбла, трендови и промене учесталости композитних индекса у прошлости и будућности.

Централни део дисертације чине две студије случаја које детаљније истражују физичке механизме и покретаче екстремних климатских догађаја. Прва студија реконструира екстремну сушу из 2012. године применом великог ансамбла глобалног климатског модела, што омогућава процену улоге унутрашње варијабилности климатског система. Друга студија је фокусирана на лето 2024. године и примени процеса атрибуције заснованој на осмотреном догађају. У том контексту примењен је сторилајн приступ коришћењем вишеструке линеарне регресије и експеримената псеудо-глобалног загревања, са циљем бољег разумевања узрочно-последичних веза између глобалног загревања и регионалних климатских екстрема.

Резултати дисертације потврђују да се климатски режим Србије систематски помера ка учесталијим и интензивираним топло-сувим екстремима, при чему термодинамички ефекат загревања значајно појачава сушу повећањем евапотранспирације, чак и када су дефицити падавина умерени. Кроз примену нумеричких експеримената псеудо-глобалног загревања и методе аналога, доказано је да исти циркулациони обрасци у топлијој клими воде ка екстремнијим сушама.

**Кључне речи:** климатске промене, композитни индекси, суша, атрибуција екстрема, нумеричко моделирање климе, сторилајн метода

**Научна област:** Метеорологија

**Ужа научна област:** Климатологија и примењена метеорологија

**УДК:** 551.58 (043.3)

# The impact of climate change on extreme weather and climate events in Serbia by analysing compound climate indices and applying the storyline method

## Abstract

This doctoral dissertation is dedicated to a comprehensive analysis of extreme climate events in Serbia, with a special focus on drought as a central phenomenon through which the impact of climate change is examined. The research is motivated by the increasing frequency of temperature and precipitation extremes, which requires the application of modern statistical and numerical methods for their characterization and attribution.

The methodology is based on the application of compound climate indices that describe simultaneous temperature and precipitation extremes in a given season. The observed data, as well as multimodel ensemble projections, trends and changes in the frequency of compound indices in the past and future are analyzed.

The central part of the dissertation consists of two case studies that investigate in more detail the physical mechanisms and drivers of extreme climate events. The first study reconstructs the extreme drought of 2012 using a large ensemble of global climate models, which allows for the assessment of the role of internal variability of the climate system. The second study focuses on the summer of 2024 and the application of the observed event-based attribution process. In this context, a storyline approach using multilinear regression and applying pseudo-global warming experiments, with the aim of better understanding the causal relationships between global warming and regional climate extremes.

The results of the dissertation confirm that the climate regime of Serbia is systematically shifting towards more frequent and intensified warm-dry extremes, with the thermodynamic effect of warming significantly intensifying drought by increasing evapotranspiration, even when precipitation deficits are moderate. Through the application of numerical pseudo-global warming experiments and the method of analogues, it is proven that the same circulation patterns in a warmer climate lead to more extreme droughts.

**Keywords:** climate change, compound indices, drought, attribution of extremes, numerical climate modeling, storyline method

**Scientific field:** Meteorology

**Scientific subfield:** Climatology and Applied Meteorology

**UDC:** 551.58 (043.3)

# Садржај

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Увод</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1 Композитни климатски догађаји у Србији: осматрања и пројекције</b>      | <b>5</b>  |
| 1.1 Екстремни догађаји у метеорологији                                       | 5         |
| 1.2 Композитни климатски догађаји  | 8         |
| 1.3 Коришћени подаци   | 9         |
| 1.3.1 Област истраживања   | 9         |
| 1.3.2 Подаци из осматрања (E-OBS)  | 11        |
| 1.3.3 EURO-CORDEX мултимоделски ансамбл                                      | 12        |
| 1.4 Методологија рада  | 14        |
| 1.4.1 Дефиниције композитних климатских индекса                              | 14        |
| 1.4.2 Статистичке оцене и статистички тестови                                | 15        |
| 1.4.3 Заједничка расподела климатских променљивих                            | 17        |
| 1.5 Резултати  | 18        |
| 1.5.1 Анализа климатских индекса и композитних догађаја у прошлости          | 18        |
| 1.5.2 Будуће пројекције мултимоделског ансамбла                              | 24        |
| <b>2 Реконструкција суше из 2012. године и пројекције аналогних догађаја</b> | <b>29</b> |
| 2.1 Контекст и мотивација: суше у Србији                                     | 29        |
| 2.2 Коришћени подаци и методологија рада                                     | 33        |
| 2.2.1 Подаци   | 33        |
| 2.2.2 Метрике суше засноване на дефициту падавина                            | 36        |
| 2.2.3 Стандардизовани падавинско-евапотранспирациони индекс                  | 37        |
| 2.2.4 Процес и критеријуми избора аналогних догађаја                         | 38        |
| 2.3 Резултати  | 39        |
| 2.3.1 Реконструкција суше 2012. године на основу осматрања                   | 39        |
| 2.3.2 Колико добро MPI-GE репродукује осмотрену климатологију?               | 42        |
| 2.3.3 Детекција аналогних догађаја суше у великом ансамблу                   | 42        |
| 2.3.4 Промене у метрикама дефицита падавина у различитим сценаријима         | 46        |
| <b>3 Атрибуција екстремних догађаја</b>                                      | <b>49</b> |
| 3.1 Увод у атрибуцију екстремних догађаја                                    | 49        |
| 3.1.1 Дефиниција детекције и атрибуције                                      | 49        |
| 3.1.2 Атрибуција екстремних догађаја на регионалним размерама                | 50        |
| 3.1.3 Атрибуција заснована на екстремном догађају који је осмотрен           | 51        |
| 3.1.4 Методе атрибуције екстремних догађаја                                  | 52        |
| 3.1.5 Сторилајн метода   | 53        |
| 3.2 Каузалност и узрочно закључивање   | 55        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.2.1    | Основни принципи узрочног закључивања . . . . .  | 55         |
| 3.2.2    | Узрочне (каузалне) мреже . . . . .   | 56         |
| 3.2.3    | Каузалност у контексту атрибуције климатских екстрема . . . . .  | 58         |
| 3.3      | Климатска варијабилност, циркулациони обрасци и избор студије случаја . . . . .                                    | 60         |
| 3.3.1    | Модови климатске варијабилности и телеконекије релевантне за Србију . . . . .                                      | 60         |
| 3.3.2    | Студија случаја: екстремно топло лето 2024. године . . . . .   | 65         |
| 3.4      | Коришћени подаци и методологија рада . . . . .   | 66         |
| 3.4.1    | Осматрања и реанализа . . . . .  | 66         |
| 3.4.2    | Подаци из глобалног климатског модела MPI-ESM1.2-LR . . . . .  | 67         |
| 3.4.3    | Конструисање каузалне мреже . . . . .  | 67         |
| 3.4.4    | Вишеструка линеарна регресија . . . . .  | 68         |
| 3.4.5    | Експерименти псеудо-глобалног загревања . . . . .  | 71         |
| 3.5      | Резултати . . . . .  | 75         |
| 3.5.1    | Карактеризација лета 2024. године у Србији . . . . .   | 75         |
| 3.5.2    | Статистичка декомпозиција климатских променљивих . . . . .   | 78         |
| 3.5.3    | Нумерички експерименти псеудо-глобалног загревања . . . . .  | 86         |
| <b>4</b> | <b>Дискусија и закључак</b>  | <b>93</b>  |
| 4.1      | Синтеза резултата: статистички и нумерички поглед на композитне екстреме   | 93         |
| 4.2      | Ограничења и методолошка разматрања . . . . .  | 95         |
| 4.3      | Закључак . . . . .   | 96         |
|          | <b>Прилог А Заједничке расподеле температуре и падавина</b>  | <b>97</b>  |
|          | <b>Прилог Б Поступак израчунавања SPEI индекса</b>   | <b>101</b> |
|          | <b>Прилог В Просторне корелације температурних климатских индекса и модова климатске варијабилности (NAO и EA)</b> | <b>103</b> |
|          | <b>Списак слика</b>  | <b>107</b> |
|          | <b>Списак табела</b>   | <b>113</b> |
|          | <b>Литература</b>  | <b>115</b> |

## Климатски систем и климатске промене

Климатски систем представља комплексан, интерактивни систем који чине атмосфера, процеси на тлу, снежни и ледени покривач, океани и мора и биосфера, укључујући и човека. Клима се најчешће дефинише кроз средње стање и варијабилност метеоролошких променљивих (нпр. температуре или падавина) у неком дужем временском периоду. Обично се под климатолошким периодом подразумева тридесетогодишњи период, при чему Светска Метеоролошка Организација (World Meteorological Organization, WMO) препоручује ажурирање стандардног референтног периода од 30 година сваке деценије како би се узеле у обзир и климатске промене.

Климатски систем се мења у времену под утицајем сопствене унутрашње динамике и услед промена спољашњих услова који утичу на климу (тзв. „форсирања” или „радијациона форсирања”). Појам форсирања односи се на природне појаве као што су вулканске ерупције и варијације у Сунчевој активности, као и на промене састава атмосфере које су последица људских делатности, и мери неравнотежу у енергетском буџету Земље узроковану пертурбацијом климатског система. Постоје три основна начина да се промени радијациони биланс Земље: 1) променом долазног Сунчевог зрачења (чији су узрок промене у астрономским факторима које је објаснио Милутин Миланковић [1] и промене у Сунчевој активности); 2) променом дела Сунчевог зрачења које се рефлектује (промене у албеду Земље); и 3) променом одлазног дуготаласног зрачења са Земље у свемир (нпр. променом концентрације гасова стаклене баште у атмосфери). Климатски систем реагује директно на ове промене, али и индиректно, кроз различите механизме повратне спреге [2].

## Климатски екстремни у условима глобалног загревања

У последњих неколико деценија уочен је значајан пораст средње глобалне температуре на Земљи [3], као и промене у другим променљивима којима се описује климатски систем (попут промена у режиму падавина или температуре површине мора), али и у временским и климатским екстремима, као што су суше, поплаве, топлотни таласи и таласи хладноће. Катастрофе повезане са временским, климатским или хидролошким опасностима дешавале су се у просеку сваког дана у последњих 50 година – узрокујући смрт 115 људи и проузрокујући губитке од 202 милиона долара дневно [4]. Од 10 највећих катастрофа, појаве које су довеле до највећих губитака људских живота током периода 1970–2019 биле су суше, олује, поплаве и екстремне температуре (55 736 смртних случајева) [4]. С обзиром на то да могу угрозити људске животе, биљни и животињски свет, проузроковати огромне штете у пољопривреди и узроковати економску нестабилност, од великог је

практичног значаја за друштво разумети и проучити климатске екстреме у прошлости и предвидети њихово појављивање и развој у будућности.

Међу екстремима са највећим утицајем у југоисточној Европи издвајају се суше и композитни догађаји истовремено веома топлих и сувих услова, и они су у фокусу ове докторске дисертације. Њихови директни утицаји на еколошке и социо-економске системе укључују:

- смањену влажност земљишта и обнављање подземних вода [5],
- повећану евапотранспирацију и дефицит воде током суше појачане истовременим топлотним таласом, што резултира смањењем водостаја река [6],
- повећан ризик од шумских пожара у условима дуготрајне врућине и суше [7, 8],
- топлотни стрес који утиче на људско здравље и продуктивност рада [9],
- деградацију екосистема, укључујући стрес вегетације, сушење шума и губитак биодиверзитета.

Поред ових непосредних утицаја, суше и композитни екстремно топли и суви услови могу изазвати индиректне веома озбиљне социо-економске последице као што је повећан притисак на системе управљања водним ресурсима, посебно у регионима са ограниченим капацитетом иригације, или економска нестабилност повезана са пољопривредним губицима.

### **Динамички и термодинамички механизми промена климатских екстрема**

Учесталост, интензитет и трајање осмотрених појединих екстремних догађаја променили су се упоредо са загревањем климатског система. Климатски модели који симулирају промену климе у будућности потврђују ове промене, и конкретни узроци који покрећу неке од њих су потпуно образложени и физички оправдани. На пример, загревање доводи до веће вероватноће екстремно топлих дана и ноћи, али такође омогућава појачану евапотранспирацију, чија последица може бити интензивнија суша. Загрејана атмосфера садржи већу количину водене паре [10], чиме се повећава ослобођена латентна топлота неопходна за одржавање олуја које доводе до екстремних падавина. Овим би се једноставно могло закључити да се у загрејаној атмосфери могу очекивати чешће и интензивније екстремне падавине. Међутим, ови процеси вођени су кретањима великих размера, која су последица разлике у енергији на планети. На пример, један од основних аспеката глобалног загревања је поларна амплификација [11], која доводи до смањења градијента температуре између екватора и полова, а који је основни покретач глобалне циркулације.

Иако је утицај глобалног загревања на глобалне аспекте добро изучен, јасан и очекиван, локално може доћи до одступања, те се природна варијабилност климе и динамички аспекти климатских промена не смеју занемарити, већ се мора пажљиво приступити проучавању регионалних екстрема. Са друге стране, сама појава рекордних догађаја не имплицира да се они дешавају искључиво услед климатских промена, али неке од ових

промена могу се приписати климатским променама узрокованим променама у емисијама гасова стаклене баште услед људског деловања или коришћењу земљишта, од индустријске револуције (око 1850. године). Да би се временски или климатски екстрем десио, за то су неопходни метеоролошки услови који нису уобичајени, па су климатске промене један од фактора који доприносе развоју оваквих догађаја. Међутим, важно је нагласити да због нелинеарних процеса у развоју екстремних догађаја и њихових последица, и мала промена може довести до огромних последица. Штавише, у многим случајевима однос сигнала и шума форсираних промена у динамичкој компоненти је мали [12]. Стога, као главни задатак намеће се одређивање доприноса климатских промена појави и интензитету екстремног догађаја. Комплексност и хаотичност климатског система представља изазов за изучавање екстремних климатских догађаја ван података из осматрања, за прошлу, садашњу и будућу климу. Допринос физичком разумевању климатских екстрема и истраживање њихових непознатих граница је оно што мотивише ову дисертацију.

Током последњих деценија, све израженија учесталост екстремно топлих и сувих лета у Европи указује на интензивирање климатских екстрема у условима глобалног загревања. Посебно у југоисточној Европи, композитни веома топли и сушни догађаји постоје чешће и дужи [13], при чему пораст температуре делује као кључни фактор који појачава интензитет сушних услова. Трендови указују да суша, као појава која интегрише дефицит падавина и повећану евапотранспирацију, представља један од најзначајнијих климатских ризика за регион. Суше се често сматрају једном од најсложенијих појава због свог постепеног развоја, комплексне просторне структуре и широког спектра утицаја на друштвене и природне системе. За разлику од временских екстрема који се развијају нагло, као што су олује или поплаве, суша се развија споро, а њен почетак, трајање и интензитет тешко је прецизно дефинисати. Дуготрајни дефицит падавина представља основну карактеристику суше, али њена појава зависи и од сложене интеракције локалних процеса и атмосферске циркулације великих размера.

У условима климатских промена, термодинамички фактори додатно појачавају интензитет суша. Пораст температуре доводи до повећане потенцијалне евапотранспирације, што значи да чак и умерени дефицит падавина може резултирати израженим сушним условима. Стога може се рећи да суше представљају здружене топло-суве екстреме, у којима динамички фактори (атмосферска циркулација) и термодинамички фактори (глобално загревање) делују заједно.

## **Истраживачки приступ и структура дисертације**

При проучавању екстремних временских и климатских догађаја анализира се дужина трајања, учесталост и интензитет конкретног догађаја. Као једноставна метода за униформно праћење екстрема у неком временском периоду (нпр. током једне године), Експертски тим за детекцију климатских промена и климатске индексе (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) [14] саставио је листу дефиниција климатских индекса. Климатски индекси су статистички робусни, квантитативни показатељи климатских екстрема и до данас у великој мери коришћени у научним истраживањима. Овај приступ подржан је и од стране Светске Метеоролошке Организације, наводећи да је коришћењем истих дефиниција екстрема и анализом података на стандардизован начин могуће упоредити резултате широм света и добити свеобухватну слику.

Истраживање је мотивисано осматреним догађајима који показују да се екстремне температуре и падавина у Србији све чешће јављају. Анализа композитних климатских индекса омогућава да се квантитативно опише заједничка појава ових екстрема, односно да се идентификују топло-суви, топло-влажни, хладно-суви и хладно-влажни догађаји и њихове промене у времену и простору. Овакав приступ открива да су топло-суви екстремни, који представљају истовремену комбинацију високих температура и дефицита падавина, посебно релевантни за Србију, како у осматрањима тако и у будућим пројекцијама мултимоделског ансамбла. У првом поглављу је зато најпре испитана временска и просторна расподела, као и трендови и будуће пројекције поменутих композитних индекса.

Осматрене суше, попут екстремне епизоде из 2012. године и недавног изузетно топлог и сувог лета 2024. године, указују на потребу за детаљном анализом механизма који доводе до оваквих догађаја и проценом улоге антропогеног загревања у њиховом интензитету. У овом контексту, суша се у овој дисертацији третира као централни феномен кроз који се испитује утицај климатских промена на појединачне екстремне догађаје у Србији користећи методе атрибуције екстремних догађаја [15, 16]. Полазећи од анализе композитних климатских индекса, који омогућавају идентификацију и статистичку карактеризацију топло-сувих екстрема, истраживање се продубљује кроз две студије случаја. Прва обухвата реконструкцију суше из 2012. године применом великог ансамбла климатског модела, што омогућава анализу унутрашње (природне) климатске варијабилности и понашања аналогних догађаја у различитим климатским стањима. Друга студија случаја је усредсређена на лето 2024. године и примењује метод атрибуције заснован на сторилајн методи и експериментима псеудо-глобалног загревања.

Суша се посматра истовремено као статистички дефинисан композитни екстрем, као појава унутар расподеле могућих климатских стања, и као конкретан физички догађај чији се интензитет може декомпоновати на различите узрочне факторе. На тај начин, ова дисертација повезује статистичку анализу, нумеричко моделирање и физичку интерпретацију у јединствен оквир за процену утицаја климатских промена на екстремне суше у Србији.

Ова дисертација организована је у четири поглавља.

У првом поглављу анализирају се композитни климатски индекси у Србији, израчунати на основу осматрања и пројекција мултимоделског ансамбла. Дефинишу се композитни индекси температуре и падавина и испитују промене у њиховој учесталости и интензитету, као и њихов тренд, у прошлости и будућим климатским условима.

Друго поглавље фокусирано је на сушу 2012. године као студију случаја. Применом великог ансамбла глобалног климатског модела врши се реконструкција догађаја и анализа аналогних сушних епизода у различитим климатским сценаријима, са циљем процене утицаја промене климатског стања на карактеристике суше.

У трећем поглављу разматра се екстремно топло и суво лето 2024. године кроз атрибуцију екстремних догађаја. Применом статистичке декомпозиције, каузалног приступа и нумеричких експеримената псеудо-глобалног загревања испитује се допринос динамичких и термодинамичких фактора интензитету суше.

Четврто поглавље садржи синтезу резултата, дискусију и закључке, као и значај и последице резултата за будућа истраживања екстремних климатских догађаја у Србији.

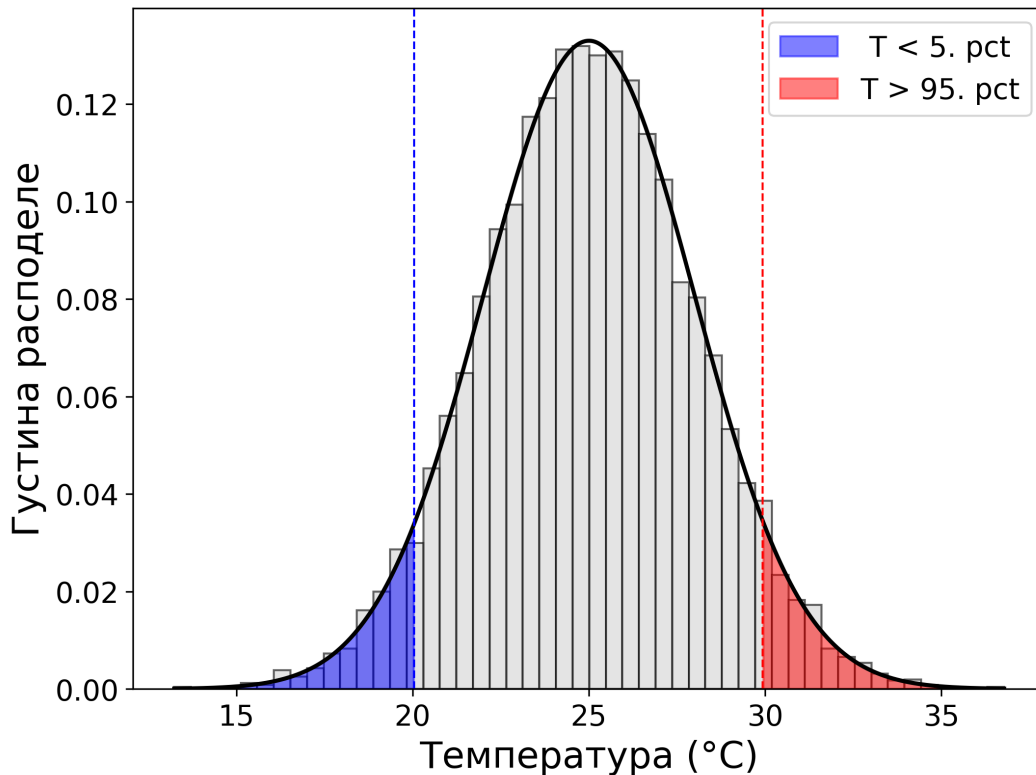
# Композитни климатски догађаји у Србији: осматрања и пројекције

## 1.1 Екстремни догађаји у метеорологији

Екстремни догађаји могу бити различитих просторних и временских размера. Према документима Међувладиног панела за климатске промене (енг. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) [17], екстремни временски догађај је дефинисан као „догађај који је редак на одређеној локацији и у одређеном тренутку у току године”, а екстремни климатски догађај као „образац екстремног времена који траје неко дуже време (нпр. током годишњег доба)”. И временски и климатски екстремни догађаји су ретки догађаји са великим одступањима у односу на климатологију разматране климатске променљиве, за дато место и време. Овим подразумевамо догађаје попут поплава, суша, топлотних таласа, таласа хладноће, екстремно високих и екстремно ниских температура.

Појам екстрем можемо сагледати на два начина. Први приступ је статистички и најчешће се користи у климатским истраживањима, када постоје дневна мерења метеоролошких променљивих у периоду од тридесет или више година. Тада је могуће добити статистичку расподела која описује њихово уобичајено понашање, односно климатологију. На пример, расподела максималне дневне температуре (слика 1.1) показује да се вредности око 25 °C јављају најчешће, док су дани са 15 °C или 35 °C знатно ређи и јављају се са малом учесталашћу. Битно је напоменути да, иако се у овом објашњењу ради једноставности користи симетрична нормална расподела, у стварности већина метеоролошких променљивих показује асиметрију у својој расподели [18]. Екстремни догађаји су онда дефинисани као вредности у крајевима расподеле, на слици 1.1 осенчени плавом и црвеном бојом испод црне криве, односно као појаве вредности изнад одређеног прага са горњег краја његове расподеле, или испод прага са доњег краја расподеле. На пример, за температуру би топли екстремни могли бити оне вредности које су више од 95. перцентиала расподеле, а екстремно хладни догађаји као вредности испод 5. перцентиала.

Са друге стране, екстремне можемо разматрати и са гледишта њиховог утицаја. Ретки догађаји не морају нужно остављати разорне последице за собом, док догађаји који су



Слика 1.1: Пример нормалне расподеле максималне дневне температуре. Пуна црна линија је теоријска функција расподеле са средњом вредношћу 25°C, а испрекиданим линијама су приказани 5. (плавом) и 95. (црвеном) перцентил. Вредности испод 5. и изнад 95. перцентила су осенчени плавом, односно црвеном бојом.

праћени великом разорном моћи нису нужно ретки. Пример за то су тропски циклони који у одређеним деловима света и одређеном делу године нису ретка појава, али за собом остављају озбиљне последице [19].

У истраживањима која се баве временским и климатским екстремима који се ретко појављују обично се користи пробабилистички приступ (примена статистичких модела) [20, 21] или статистичка експлоративна анализа климатских индекса којима се представљају специфичности екстрема, а изведени су из дневних вредности падавина и температуре [22, 23, 24]. Теорија екстрема (ТЕ) пружа теоријску основу за анализу екстремних догађаја користећи статистичке методе за моделирање крајева расподеле вероватноће [20, 21] и одређивање закона расподеле који најбоље апроксимира податке. Један од најчешће коришћених приступа у оквиру ТЕ је анализа функције расподеле генерализованих екстремних вредности (ГЕВ) [25]. На пример, студије користе ГЕВ за процену повратних периода екстремних падавина, што помаже у процени промене вероватноће таквих догађаја у климатским пројекцијама [26].

Да би се екстремни догађаји могли објективно и упоредиво анализирати за дуге временске периоде, неопходно је обезбедити јединствен начин њихове идентификације у времену и простору, користећи метрике које описују њихове кључне карактеристике, као што су интензитет, учесталост и трајање. Климатски индекси представљају такав приступ, јер омогућавају редуцију дневних података на једноставне, али физички значајне пока-

затеље екстремних услова. Што се тиче климатских индекса, за сваки се дефинише једначина чији су параметри одређене климатске променљиве и обично се користе индекси климатских екстрема које је дефинисао Експертски тим за детекцију климатских промена и климатске индексе [14].

Дефиниција оријентисана на интензитет екстрема повезана је са измереном вредношћу метеоролошке променљиве (или више њих). Код екстремних догађаја вредност променљиве прелази (или лежи испод) одређеног прага који може бити дефинисан на различите начине. На пример, за рачунање учесталости веома топлх дана могу се користити две метрике. Првом се израчунава број дана када је максимална дневна температура изнад релативног прага дефинисаног као 90. или виши перцентил максималне дневне температуре за календарски дан током одређеног референтног периода. Догађај заснован на таквој дефиницији може се десити у било које доба године, а утицај таквог догађаја би се разликовао у зависности од годишњег доба. Другом метриком се израчунава број дана током којих је максимална дневна температура изнад апсолутног прага, као што је на пример 35°C, јер прекорачење ове температуре може имати велики утицај на здравље (утицај такође може зависити и од локације и од тога да ли су екосистеми и становништво прилагођени таквим температурама). Иако су обе врсте индекса коришћене за анализу промена у учесталости топлх догађаја, они представљају различите догађаје који се дешавају у различито доба године, вероватно под утицајем различитих врста процеса и механизма, а могуће је и да су повезани са различитим утицајима.

Температура и падавине су два кључна фактора у анализи екстремних догађаја. Промене температуре и падавина утичу на влажност земљишта, што даље повратно утиче на падавине и температуру кроз хидролошки циклус и енергетски биланс. У многим деловима света, повећање средње глобалне температуре је такође повезано са променама локалних екстрема. Бројне националне и међународне студије откривају опште повећање учесталости, дужине трајања и интензитета екстремних догађаја.

Користећи податке о измереним температурама са 7000 метеоролошких станица и податке о падавинама са 11000 станица широм света, Донат и сарадници [27] су израчунали 29 климатских индекса и добили резултате који показују значајне промене у екстремним температурама широм света, које су у складу са глобалним загревањем. Њихови резултати су показали значајно загревање у свим сезонама, али више у хладнијим месецима. Током последњих неколико деценија, у област Западног Балкана забележен је пораст учесталости екстремних температура и топлотних таласа [28], што је потврђено студијама урађеним на националном нивоу за Хрватску [29] и Црну Гору [30], а резултати добијени за Румунију [31] указују на статистички значајне растуће трендове температурних екстрема током готово свих годишњих доба, са најинтензивнијим порастом током лета. Претходна истраживања за Србију углавном су била заснована на анализи станичних података сезонских и годишњих средњих вредности дневних максималних, минималних и средњих температура [32, 33, 34, 35].

Глобално, промене у падавинским екстремима су просторно хетерогеније у поређењу са променама температуре и указују да постоји више подручја са значајним трендовима раста интензитета и учесталости падавина него подручја са трендовима опадања [27]. У анализи индекса екстремних падавина у Србији [36] показано је да преовлађује растући тренд у периоду 1961–2020 на већини метеоролошких станица за све анализиране ЕТСС-ДІ индексе. Робустан сигнал је уочен за годишњи максимум једнодневних падавина, који

показује статистички значајан позитиван тренд на 12 од 14 станица. Сезонски, просторно конзистентно интензивирање екстремних падавина примећено је у јесен, док пролеће и зима показују просторно хетерогене обрасце, са локалним негативним трендовима у централној и источној Србији.

Поред анализе историјских података, климатски индекси се често користе и при проценама будућих климатских услова. Они омогућавају квантитативну процену очекиваних промена у екстремима у различитим сценаријима глобалног загревања. На пример, у студији о екстремним догађајима који се дешавају истовремено [37], анализирана је појава композитних климатских индекса у мултимоделском ансамблу СМIP6. Истраживање је показало да постоји значајан ризик од појаве истовремених топлих и сувих или топлих и влажних екстремних догађаја широм света при већим радијационим форсирањима, са истакнутим „врћим тачкама” – регионима као што су Медитеран, североисточни Бразил, субсахарска Африка, као и планинске области попут Анда и Хималаја. Овакве пројекције показују колико је важно користити климатске индексе у процени композитних екстрема како би се боље планирала адаптација и ублажавање ризика од климатских промена. Поред тога, климатски индекси се користе и при верификацији и евалуацији мултимоделских ансамбала, како би се процениле перформансе ансамбла и појединачних модела да симулирају екстремне догађаје. Тако је показано да глобални климатски модели у СМIP6 ансамблу имају сличну способност симулирања екстремних климатских појава као и модели из раније верзије ансамбла, СМIP5, уз побољшање у симулирању интензитета екстремних падавина [38].

## 1.2 Композитни климатски догађаји

Екстремне температуре, вантропски системи ниског притиска са веома јаким ветровима и обилним падавинама као изоловани догађаји могу оставити разарајуће последице. Комбиновани утицај више оваквих екстремних метеоролошких услова, било да се они дешавају један за другим у кратком временском периоду или се дешавају истовремено, повећава климатски ризик и оставља још разорније последице на друштво, животну средину и инфраструктуру. Овакви догађаји називају се композитни догађаји (енг. *compound events*) [39] и, премда су ретки, представљају један од најкомплекснијих проблема за изучавање у климатологији услед своје међусобне зависности и нелинеарних интеракција, те им научници посвећују све више пажње. IPCC дефинише композитне климатске догађаје [17] као (1) два или више екстремна догађаја који се дешавају истовремено или узастопно, (2) комбинација екстремног догађаја при постојећим климатским условима који појачавају утицај догађаја, или (3) комбинација догађаја који сами по себи нису екстреми или рекордни, али доводе до екстремног догађаја или утицаја када се комбинују.

У већини студија се испитују екстреми карактерисани само једном променљивом као што је температура или падавине, које су две кључне променљиве које описују климу. Међутим, сложени екстреми који укључују истовремену појаву различитих врста екстрема или се дешавају непосредно један за другим могли би довести до тежих последица по друштво и екосистем. На пример, истовремена појава врћих и сувих услова може интензивирати развој летњих топлотних таласа [40] и може бити повезана са специфичним опасностима, као што је ризик од пожара [41, 8].

Однос између температуре и падавина проучаван је у многим студијама у погледу њихових средњих вредности, на пример израчунавањем корелација између сезонске средње температуре и укупне количине падавина. За подручје Сједињених Америчких Држава и Европе откривено је да хладна лета имају тенденцију да буду влажна, док су суше чешће повезане са топлотним таласима [42]. На глобалном нивоу, Тренберт и Ши [43] су пронашли јаку негативну корелацију између средње месечне температуре и падавина изнад копна лети на обе хемисфере, што указује да лета имају тенденцију да буду или врућа и сува или хладна и влажна, што је условљено механизмима повратне спреге између тла и атмосфере. Током зиме, овај однос је обрнут изнад копна на вишим географским ширинама, што одражава повећани капацитет ваздуха за задржавање влаге при вишим температурама и улогу процеса топле, влажне адвекције у вантропским олујама.

Да би се могла објаснити изложеност на утицај здружених климатских екстрема, примењује се концепт композитних климатских индекса [41, 44]. Композитни климатски индекси за територију Србије први пут су систематски анализирани на основу дневних средњих температура и падавина са седам метеоролошких станица за период 1961–2010 у раду Арсеновића и сарадника [45]. Резултати су показали доминантне негативне трендове хладних и сувих и хладних и влажних, као и позитивне трендове топло-сувих дана током зиме, пролећа и лета, док трендови у јесен нису били статистички значајни. У овој дисертацији приступ анализи композитних климатских индекса проширен је продуженим анализираним периодом и коришћењем скупа података осматрених вредности на правилној мрежи тачака, чиме је омогућена просторна анализа трендова на нивоу целе територије Србије.

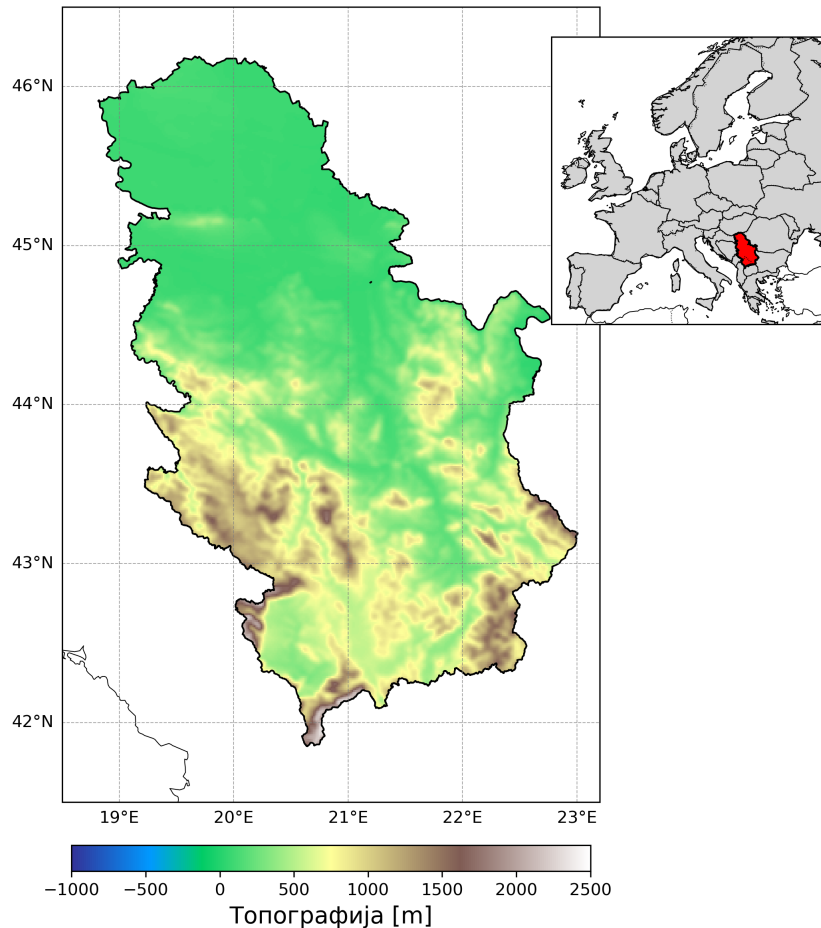
Први корак овог истраживања је да се испита међусобна повезаност између екстремних температурних и падавинских догађаја у Србији кроз анализу заједничке појаве топлих и сувих, топлих и влажних, хладних и сувих, као и хладних и влажних услова. Истраживање оваквих сложених екстрема омогућава боље разумевање физичких процеса који стоје иза њиховог настанка и интеракције између различитих климатских променљивих, као и процену потенцијалних утицаја климатских промена на њихову учесталост и интензитет. Поред тога, анализа омогућава процену колико климатски модели могу реално да репродукују односе између екстремних температура и падавина, што је кључно за поузданије пројекције будућих климатских услова у региону. Идентификација и карактеризација ових композитних екстремних режима представља неопходан први корак за каснију атрибуцију сушних догађаја у Србији, јер омогућава да се суше посматрају као последица специфичних комбинација термодинамичких и динамичких услова, а не искључиво као одговор једне климатске променљиве.

## 1.3 Коришћени подаци

### 1.3.1 Област истраживања

Подручје истраживања је Србија, смештена у западном делу Балканског полуострва, између централне и јужне Европе, између  $41.7^{\circ}$  и  $46.3^{\circ}$  северне географске ширине и  $18.7$ – $23.0^{\circ}$  источне географске дужине, као што је приказано на слици 1.2. Клима Србије је под великим утицајем њеног географског положаја и сложене топографије, са Панон-

ском низијом на северу, Динарским планинама на западу и југозападу, и са Карпатима и Родопским планинама у источним и југоисточним деловима и генерално се категорише у три главна климатска типа: континентална, умерено континентална и модификована медитеранска клима [46]. Јужни делови Србије су под утицајем Медитерана, што доприноси топлијим и сушнијим условима у поређењу са северним деловима земље.



Слика 1.2: Мапа Србије.

Највеће количине падавина се обично јављају у јуну [45], са вредностима које су у опсегу од 550 до 600 mm, па све до преко 1100 mm [47]. Упркос осматрањима и климатским пројекцијама које указују на смањење падавина у јужним деловима, није примећен статистички значајан дугорочни тренд укупних годишњих падавина на националном нивоу. Што се тиче температуре, низијска подручја Србије имају средњу годишњу температуру између 11 и 12 °C, док су планинска подручја хладнија, са средњим годишњим температурама испод 8 °C [48]. Опсег забележених апсолутних минималних и максималних температура ваздуха у Србији креће се од -39.5 °C до 44.9 °C. Најтоплији месец је јул, када средње температуре ваздуха достижу свој годишњи максимум [45], а климатске пројекције за будућност предвиђају пораст температуре ваздуха у Србији [49].

### 1.3.2 Подаци из осматрања (E-OBS)

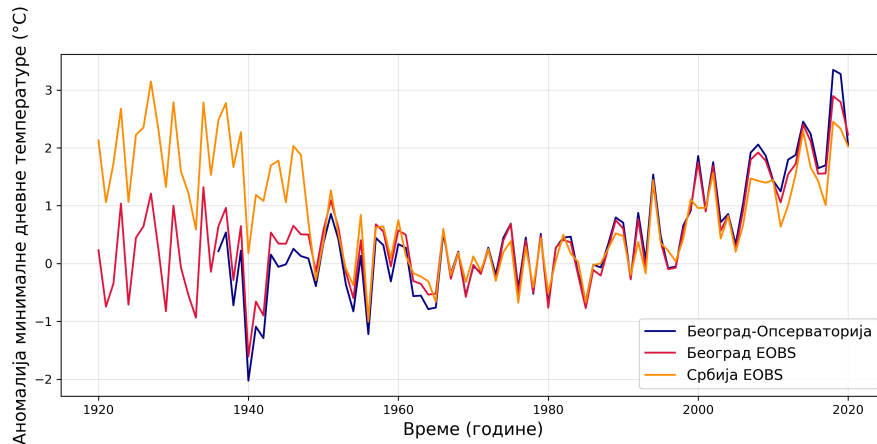
Сетови података на правилној мрежи тачака добијених из осматрања представљају примарни извор информација за праћење промена климатског система. Месечне вредности метеоролошких променљивих на глобалном нивоу пружају информацију о форсирањима великих размера у климатском систему. Међутим, за примену код синоптичких и мезо-размера, поготову за испитивање екстремних догађаја, потребно је познавати дневне вредности метеоролошких променљивих на што финијем просторном разлагању. За тако нешто неопходно је да постоји густа мрежа метеоролошких станица. Из разлога што је, осим за валидацију симулација климатских модела који су део пројекта EU ENSEMBLES [50], и за многе истраживаче неопходан такав један конзистентни сет дневних података високог просторног разлагања на правилној мрежи тачака и на већим (континенталним) областима, развијен је E-OBS, сет података за подручје Европе [51].

E-OBS представља сет података који садржи дневне осмотрене вредности метеоролошких променљивих са постојећих метеоролошких станица у Европи које су одговарајућом интерполацијом [52] унапређене у смислу боље просторне резолуције и униформности у простору и времену. Подаци су представљени средњом вредношћу ансамбла добијене из скупа од 100 чланова, конструисаних пертурбацијом осмотрених података са метеоролошких станица, при чему ансамбл представља највероватније осмотрено стање. Коначне вредности су засноване на средњој вредности ансамбла, при чему је неизвесност ансамбла одређена разликом између доњег и горњег репрезентативног квантила, тј. 5. и 95. перцентила расподеле ансамбла.

Квалитет дневних осматрања контролише међународни пројекат *European Climate Assessment and Data* (ECA&D) [50]. E-OBS подаци су доступни на правилној мрежи тачака просторног разлагања 0.1 и 0.25 степени. Сет података садржи следеће променљиве: средњу дневну температуру (TG), максималну дневну температуру (TX), минималну дневну температуру (TN), дневну количину падавину (PR), средњи дневни притисак на нивоу мора (PP) и глобално израчивање (QQ), за период од 1950. године (за поједине променљиве и од 1920. године) до садашњости, као и податке о брзини ветра од 1980. године до данас. Обухваћена је област копненог дела Европе, односно простор између 25.0° и 71.5° северне географске ширине и између 25° западне и 45° источне географске дужине. Верзија E-OBS сета података која је коришћена за потребе овог рада је *v30.0e*. Подаци [53] су јавно доступни у netCDF формату: [https://surfobs.climate.copernicus.eu/dataaccess/access\\_eobs.php](https://surfobs.climate.copernicus.eu/dataaccess/access_eobs.php), где се могу пронаћи детаљније карактеристике и разлике у односу на претходне верзије.

У овом раду коришћени су подаци о средњој дневној, дневној минималној и дневној максималној температури, као и дневна количина падавина, за период од 1951. до 2024. године. Иако база података обухвата и ранији период, почев од 1920. године, тај део временске серије није укључен у анализу услед недостатка довољног броја станица на територији Србије у том периоду. Недовољан број мерења за последицу има грешку у интерполацији, посебно у приказу просторно распоређених климатских променљивих, што може значајно утицати на поузданост израчунатих климатских индекса. Поред тога, постоје и могуће грешке у начину мерења дневних минималних температура у ранијем периоду, што додатно може смањити поузданост података. Овакав избор донет је на основу поређења аномалије средње годишње минималне температуре у Београду (на слици 1.3 пуна црвена линија) и осредњене вредности за територију Србије (на слици 1.3 пуна наранџа-

ста линија) из E-OBS базе података и аномалије средње годишње минималне температуре у Београду, које су добијене користећи станичне податке доступне од 1936. године (на слици 1.3 пуна плава линија). Аномалије су израчунате у односу на референтни период 1961–1990. Из овог поређења јасно се види да аномалије у периоду пре 1950. године за Србију значајно одступају од аномалија регистрованих у Београду, што није очекивано с обзиром на географску близину и представљеност Београда као репрезентативне станице. Такво одступање указује на потенцијалну ниску поузданост интерполације података у периоду пре 1950. године, као и могуће систематске грешке у мерењу, што оправдава одлуку да се у даљим анализама климатских индекса користи период након 1950. године.



Слика 1.3: Аномалија средње вредности минималне дневне температуре која је израчуната из E-OBS сета података за Београд (црвена линија) и Србију (наранџаста линија), и аномалија која је израчуната користећи податке са метеоролошке станице Београд-Опсерваторија (плава линија).

### 1.3.3 EURO-CORDEX мултимоделски ансамбл

Примарни извор информација о будућим климатским променама су глобални и регионални климатски модели. Резултати климатских модела, и то посебно регионалних због предности бољег хоризонталног разлагања, користе се као почетне информације за процену утицаја могућих климатских промена у будућности на поједине социоекономске или еколошке секторе.

У овом раду су резултати ансамбла регионалних климатских модела међународне иницијативе *Coordinated Regional-climate Downscaling Experiment over Europe* (EURO-CORDEX) [54] коришћени за процену будућих климатских промена у Србији. EURO-CORDEX представља европски огранак CORDEX иницијативе, успостављене у оквиру Светског програма за истраживање климе (World Climate Research Programme, WCRP) ради омогућавања климатских пројекција високе резолуције. Регионални модели динамичким разлагањем глобалних симулација обезбеђују излазне податке на високој просторној резолуцији. Регионални климатски модели у склопу EURO-CORDEX експеримента користе глобалне климатске моделе из међународне иницијативе CMIP5 и сценарије репрезентативних концентрација гасове стаклене баште (енг. *Representative Concentration Pathway*, RCP).

У овој студији, анализиран је ансамбл од осам регионалних климатских модела из скупа података EURO-CORDEX EUR-11 са просторним хоризонталним разлагањем 12.5 km. Симулације су спроведене за сценарије RCP4.5 и RCP8.5, који представљају путање средње и високе концентрације гасова стаклене баште, респективно. Детаљи појединачних упаривања регионалних и глобалних климатских модела коришћених у анализи сумирани су у Табели 1.1.

Табела 1.1: Списак регионалних климатских модела из EURO-CORDEX ансамбла који су коришћени у овој студији и глобалних модела помоћу којих су иницијализовани, са институцијама које су их реализовале.

| Регионални модел  | Глобални модел   | Институција                                       |
|-------------------|--|---|
| CLMcom-CCLM4-8-17 | ICHEC-EC-EARTH<br>MOHC-HadGEM2-ES<br>MPI-M-MPI-ESM-LR  | Climate Limited-area Modelling Community (CLMcom) |
| DMI-HIRHAM5       | ICHEC-EC-EARTH   | Danish Meteorological Institute (DMI)             |
| KNMI-RACMO22E     | ICHEC-EC-EARTH<br>MOHC-HadGEM2-ES                      | Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) |
| MPI-CSC-REMO2009  | MPI-M-MPI-ESM-LR (r1i1p1)<br>MPI-M-MPI-ESM-LR (r2i1p1) | Max Planck Institute for Meteorology (MPI-CSC)    |

Подаци EURO-CORDEX-а значајни су за студије утицаја и адаптације због своје високе просторне резолуције, што омогућава прецизнији приказ регионалне топографије и повезаних процеса у моделу. Претходна истраживања [54] су показала да EURO-CORDEX ансамбл успешно репродукује обрасце температуре и падавина великих размера, побољшавајући симулацију дневних интензитета падавина у поређењу са глобалним моделима грубље резолуције. Овај скуп података посебно је погодан за процену регионалних климатских промена у областима које имају сложену топографију, као што је то случај у Србији. Пошто резултати регионалних климатских модела могу показивати систематска одступања у односу на осмотране вредности, у овој студији коришћени су кориговани подаци (енг. *bias-adjusted*) [55, 56] ансамбла EURO-CORDEX, који представљају статистички кориговане резултате регионалних климатских модела са циљем усаглашавања симулација из модела са осматрањима. Ови подаци су се показали поузданим за подручје Србије и верификовани су у оквиру израде Дигиталног атласа климе Србије [57].

За анализу су коришћене следеће променљиве: средња дневна температура ваздуха, максимална дневна температура ваздуха, минимална дневна температура ваздуха и дневна количина падавина. Подаци су анализирани за период 1951–2100, у складу са доступношћу појединачних симулација. Ради омогућавања поређења са осматрањима и просторног уједначавања, сви подаци су регридовани на мрежу E-OBS података.

## 1.4 Методологија рада

### 1.4.1 Дефиниције композитних климатских индекса

Перцентилски температурни индекси: број дана са дневном максималном температуром изнад 90. перцентила ( $TX_{90p}$ ), број дана са дневном минималном температуром изнад 90. перцентила ( $TN_{90p}$ ), број дана са дневном максималном температуром испод 10. перцентила ( $TX_{10p}$ ) и број дана са дневном минималном температуром испод 10. перцентила ( $TN_{10p}$ ) коришћени су као основа за идентификацију топлих и хладних екстремних услова. Перцентилски прагови су израчунати из узорка у базном периоду 1961–1990, током 5-дневног периода, центрираним на сваки календарски дан за који се перцентилски праг израчунава. Даљи фокус ове дисертације је на композитним екстремним догађајима, те анализа појединачних температурних индекса представља неопходну основу за разумевање термодинамичке компоненте ових сложених догађаја.

За идентификацију композитних екстремних догађаја анализиране су четири комбинације екстремних температура и падавина: топли и суви (HD), топли и влажни (HW), хладни и суви (CD) и хладни и влажни (CW) догађаји. Ови догађаји су дефинисани на основу вредности перцентила температуре и падавина, где су екстремно високе температуре и обилне падавине дефинисане вредностима изнад 90. перцентила, израчунатим из узорка у базном периоду 1961–1990, током 5-дневног периода, центрираним на сваки календарски дан за који се перцентилски праг израчунава. Екстремно ниске температуре и суви услови дефинисани су вредностима испод 10. перцентила, израчунатим на исти начин и за исти базни период. Избор граничних перцентила заснован је на њиховој способности да обухвате најекстремније појаве у расподели, односно најтоплије, најхладније, најсушније и највлажније услове. Уместо средње дневне температуре коришћене су дневне максималне ( $T_{max}$ ) и минималне ( $T_{min}$ ) температуре како би се обухватио цео опсег термичких екстрема релевантних за композитне догађаје. Различите компоненте ових догађаја повезане су са различитим физичким процесима. На пример, код веома топлих и истовремено сушних догађаја  $T_{max}$  је релевантна јер загревање током дана покреће испаравање, сушење земљишта и стрес над вегетацијом, док код хладних и влажних догађаја  $T_{min}$  може бити релевантније због услова мраза, снега или ледене кише.

Нека су:

$T_{max_i}$  – максимална дневна температура,

$T_{min_i}$  – минимална дневна температура,

$PR_i$  – дневна количина падавина,

и нека су:

$T_{max_{90i}}, T_{max_{10i}}, T_{min_{90i}}, T_{min_{10i}}, PR_{90i}, PR_{10i}$

90. и 10. перцентили за максималну дневну температуру, минималну дневну температуру и падавине одређеног дана  $i$ , респективно.

Перцентилски температурни индекси дефинишу се као број дана у одређеном временском периоду (нпр. у току 1 године или сезоне), када су испуњени услови:

$$TX_{90p} : T_{max_i} > T_{max_{90i}} \quad (1.1)$$

$$TX_{10p} : T_{max_i} < T_{max_{10i}} \quad (1.2)$$

$$TN_{90p} : T_{min_i} > T_{min_{90i}} \quad (1.3)$$

$$TN_{10p} : T_{min_i} < T_{min_{10i}} \quad (1.4)$$

Анализа је спроведена посебно по сезонама и годинама у периоду 1951–2020, за податке из осматрања.

Композитни индекси дефинишу се при следећим условима:

$$HD : T_{max_i} > T_{max_{90i}} \wedge PR_i < PR_{10i} \quad (1.5)$$

$$HW : T_{max_i} > T_{max_{90i}} \wedge PR_i > PR_{90i} \quad (1.6)$$

$$CD : T_{min_i} < T_{min_{10i}} \wedge PR_i < PR_{10i} \quad (1.7)$$

$$CW : T_{min_i} < T_{min_{10i}} \wedge PR_i > PR_{90i} \quad (1.8)$$

Сваки од ових догађаја означава истовремену појаву екстремних вредности температуре и падавина током истог дана, а анализа је спроведена посебно по сезонама и годинама у периоду 1951–2024, како за осматрања тако и за климатске пројекције, у свакој тачки мреже. Неизвесност у израчунавању перцентилских прагова смањена је применом тзв. *bootstrap* технике [58] са 1000 понављања.

Израчунавање и обрада индекса изведени су помоћу софтвера *icclim* [59, 60], којим је омогућено израчунавање климатских индекса и композитних догађаја у складу са стандардима Светске метеоролошке организације и Експертског тима за детекцију климатских промена и климатске индексе.

#### 1.4.2 Статистичке оцене и статистички тестови

Трендови у климатским индексима могу показати где и колико брзо се дешавају климатске промене. У овом раду спроведена је статистичка анализа ради откривања трендова у временским серијама климатских индекса коришћењем непараметарског Ман-Кендаловог теста (МК тест) [61, 62] и израчунавањем Сеновог нагиба [63]. МК тест користи се за анализирање и утврђивање постојања растућег или опадајућег тренда у временским серијама различитих променљивих. То је непараметарски статистички тест. Тестира се хипотеза  $H_0$  да нема тренда у датом узорку, а алтернативна хипотеза је да тренд постоји и он може бити позитиван или негативан. Кендал дефинише статистику  $\tau$  [62, 64]:

$$\tau = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)}{\frac{n(n-1)}{2}} \quad (1.9)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1, & \text{if } x_j > x_k, \\ 0, & \text{if } x_j = x_k, \\ -1, & \text{if } x_j < x_k. \end{cases} \quad (1.10)$$

где је  $n$  обим узорка. За довољно велико  $n$  (веће од 10) расподела статистике  $\tau$  ће тежити нормалној расподели са средњом вредношћу једнакој нули и са варијансом:

$$\sigma_\tau^2 = \frac{2(2n + 5)}{9n(n - 1)} \quad (1.11)$$

Како се  $\tau$  покорава нормалној расподели, трансформишемо  $\tau$  тако да се покорава стандардизованој нормалној расподели са средњом вредношћу нула и стандардном девијацијом 1. За испитивање значајности тренда врши се поређење Кендалове статистике са:

$$\tau_t = \pm t_g \sqrt{\frac{2(2n + 5)}{9n(n - 1)}} \quad (1.12)$$

где је  $t_g$  жељена вероватноћа коју читамо из таблице за нормалну расподелу, за одређени ниво значајности, за двострани тест. Вредност  $t_g$  је једнака 1.96 за ниво поверења 5%, који је у овом раду одабран. У случају када је  $|\tau| > |t_g|$  нулта хипотеза се одбацује.

Осим тренда, испитивана је и промена вредности индекса између два референтна климатолошка периода и тестирана њена статистичка значајност помоћу  $t$ -теста. Конкретно, за сваку тачку мреже подаци су подељени на два подпериода. Историјски, референтни период обухвата 1961–1990, док је за податке из осматрања коришћен још период 1991–2020, а за климатске пројекције разматрана су још два будућа тридесетогодишња интервала 2041–2070 (средина XXI века) и 2071–2100 (крај XXI века). Израчунате су средње вредности за сваки период, а разлика је дефинисана као:

$$\Delta = \bar{I}_{\text{period}} - \bar{I}_{\text{ref}} \quad (1.13)$$

где  $\bar{I}_{\text{period}}$  представља средњу вредност анализираниог периода, а  $\bar{I}_{\text{ref}}$  средњу вредност референтног периода (1961–1990).

$t$ -тест је статистички поступак за одређивање статистичке значајности разлике између два узорка, тј. између две аритметичке средине. Нулта хипотеза је да су средње вредности два узорка једнаке, тј. између њих не постоји друга разлика до оне која може да се припише случајним грешкама. За испитивање значајности разлике коришћен је Велчов  $t$ -тест [65, 66], који не претпоставља једнаке варијансе између узорака, за разлику од стандардног Студентовог  $t$ -теста. Тестну статистику, упоређујемо са одговарајућом из таблице критичних вредности, за одређени ниво значајности, за двострани тест и број степени слобде. За ниво значајности изабрана је вредност 0.05. Ако је реализована  $t$ -вредност мања од граничне табличне вредности за одговарајући број степени слобде и ниво значајности, нулта хипотеза се прихвата као тачна. Тестна статистика је дата као:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (1.14)$$

са бројем степени слободе

$$\nu = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{(s_1^2/n_1)^2}{n_1-1} + \frac{(s_2^2/n_2)^2}{n_2-1}} \quad (1.15)$$

где су:

- $\bar{X}_1, \bar{X}_2$  – аритметичке средине првог и другог узорка,
- $s_1^2, s_2^2$  – варијансе узорака,
- $n_1, n_2$  – обим првог и другог узорка.

### 1.4.3 Заједничка расподела климатских променљивих

Премда се бројне досадашње студије углавном ослањају на примену расподела само једне променљиве, коваријабилност падавина и температуре је истраживана на различитим просторним и временским размерама [67, 68, 69], с обзиром на међусобну повезаност и интеракције ових двеју климатских променљивих. У претходним анализама композитних веома топлих и сувих догађаја за област Европе [69] Балканско полуострво је идентификовано као један од региона највише погођен овим екстремним догађајима, наглашавајући рањивост Балкана на истовремене екстремне топлотне таласе и суше. Конкретно, лето 2012. године се показало изузетно ретким, са вероватноћом појаве у тренутним климатским условима од само 0.002% [69], што указује на догађај далеко изнад природне варијабилности. Надовезујући се на ове резултате, са посебним фокусом на Србију, анализирани су композитни догађаји кроз биваријантну расподелу аномалија температуре и падавина за три одабрана периода у будућности, како би се боље разумела учесталост, интензитет и еволуција ових догађаја на националном нивоу.

За процену еволуције композитних веома топлих и сувих услова, анализирана је заједничка расподела аномалија температуре и падавина у Србији на основу EURO-CORDEX мултимоделског ансамбла, према сценарију RCP8.5.

Аномалије средње дневне температуре и падавина израчунате су у односу на референтни период 1991–2020. Подаци су осредњени за подручје Србије, а средње вредности ансамбла добијене су осредњавањем резултата свих модела из ансамбла коришћеног у овој студији (видети табелу 1.1). Анализа је фокусирана на три климатолошка тридесето-годишња периода: 1991–2020 (садашња клима), 2041–2070 (блиска будућност) и 2071–2100 (крај века). Негативне аномалије падавина коришћене су за представљање сушних услова (тако да веће позитивне вредности одговарају сушнијим условима).

Како би се визуелно представило заједничко понашање аномалија температуре и падавина, примењена је процена густине расподеле помоћу тзв. функције-језгра (енг. *Kernel Density Estimator*, KDE). KDE [70] је непараметарска статистичка метода за израчуна-

вање функције густине расподеле случајне променљиве. Док једноваријантна KDE процењује густину једне променљиве, мултиваријантна KDE процењује заједничку густину расподеле више променљивих истовремено. За разлику од хистограма, функција-језгра производи глатку процену густине расподеле и интегрише ове процене како би формирала коначну заједничку функцију густине расподеле. У овом раду коришћена је биваријантна KDE, представљена једначином:

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{nh_x h_y} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - x}{h_x}, \frac{y_j - y}{h_y}\right) \quad (1.16)$$

где је  $K$  симетрична функција-језгра,  $x_i, y_i, i = 1, 2, \dots, n$  су случајне променљиве из узорка чија се заједничка расподела одређује, и  $h_x$  и  $h_y$  коефицијенти заглађивања.

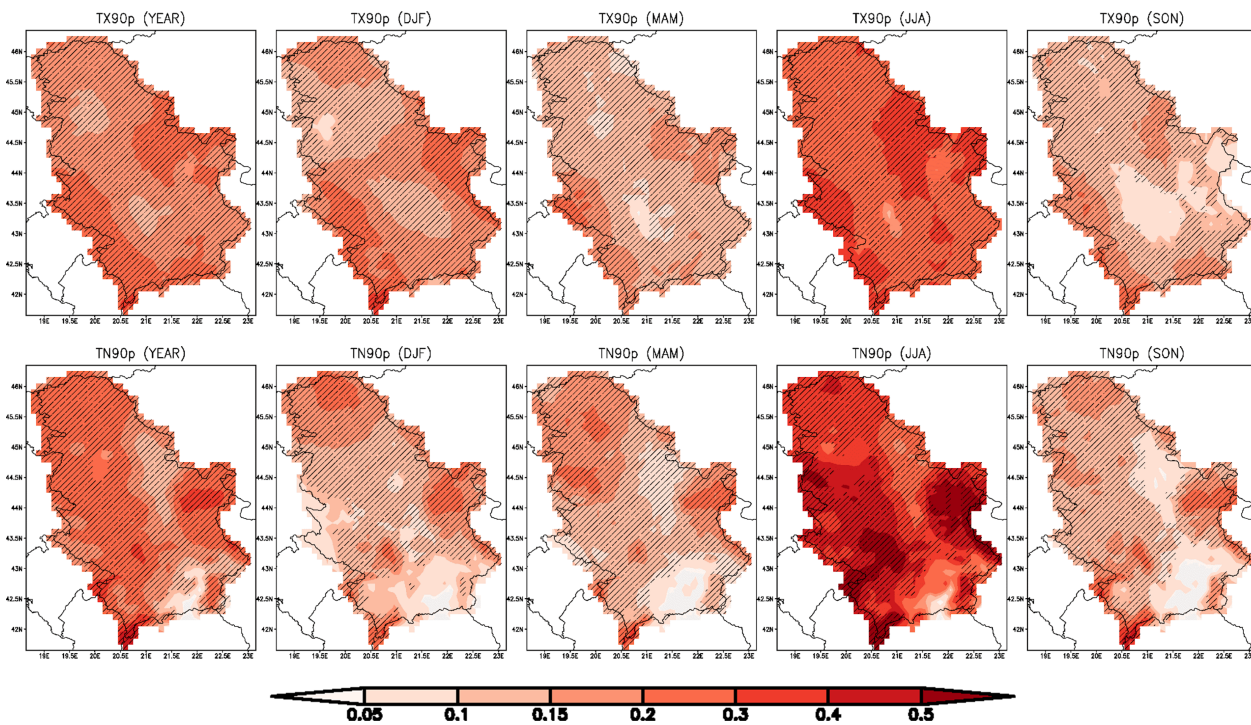
## 1.5 Резултати

### 1.5.1 Анализа климатских индекса и композитних догађаја у прошлости

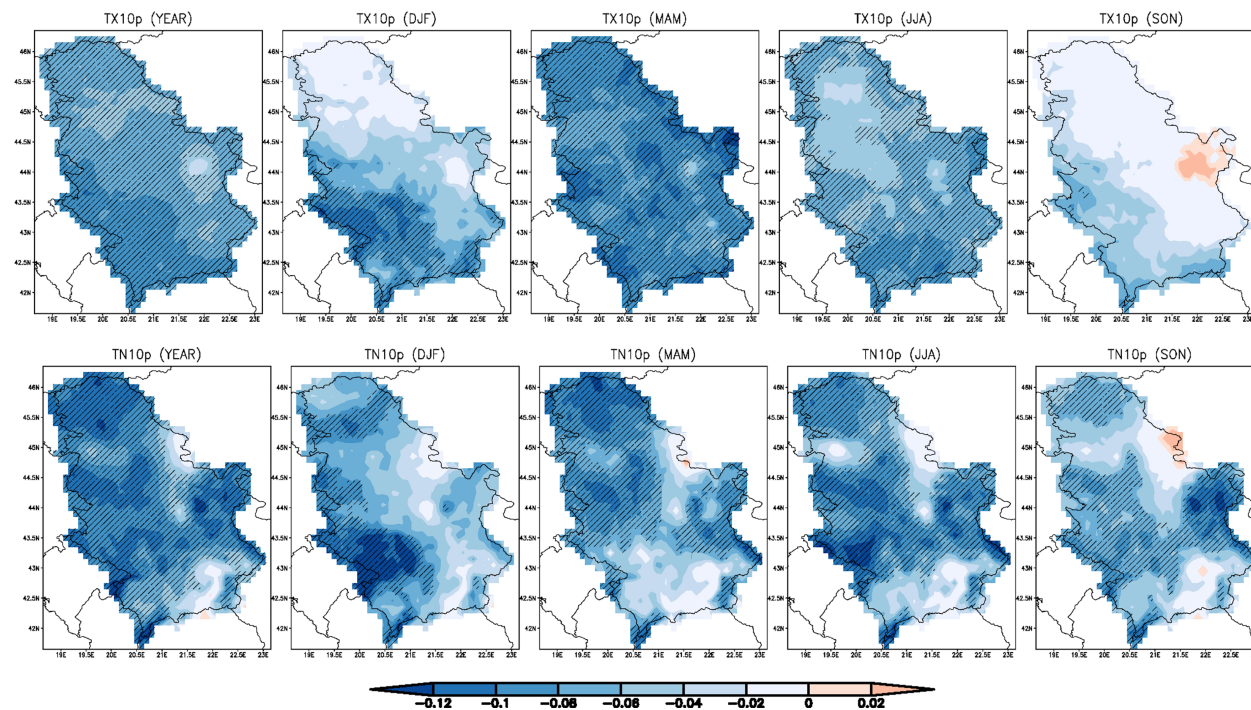
Дугорочне промене умерених и екстремних температурних климатских индекса у Србији детаљно су анализирани у раду [35], где су применом података из осматрања на правилној мрежи тачака (E-OBS) и стандардних ETCCDI индекса утврђени статистички значајни позитивни трендови максималних и минималних температура током периода 1951–2020. На слици 1.4 приказана је просторна расподела тренда индекса TX90p, TN90p, TX10p и TN10p. Посебно је изражен растући тренд топлих екстрема TX90p и TN90p (слика 1.4 (a)), док је број дана са хладним екстремима TX10p и TN10p, у опадању (слика 1.4 (б)). Упечатљив је пораст броја топлих ноћи (TN90p) током летње сезоне (7 дана по декади) и смањење броја хладних дана (TX10p) и ноћи (TN10p) у свим сезонама. Добијени резултати у складу су са регионалним студијама и потврђују уочене промене и загревање кроз значајан пораст учесталости топлих екстрема.

Анализа температурних екстрема представља неопходну основу за даљу анализу композитних екстремних догађаја и испитивања утицаја антропогеног загревања у њиховим променама у овој дисертацији, који се у наставку разматрају кроз истовремену појаву аномалија температуре и падавина. На слици 1.5 приказана је просторна расподела средњих вредности композитних екстрема температуре и падавина у Србији за период 1951–2020. Истиче се појава веома топлих и сувих (HD), као и хладно-влажних (CW) догађаја широм Србије, у свим сезонама. Топли и влажни (HW) и хладни и суви (CD) догађаји остају релативно ретки и просторно хомогени, што сугерише да су екстремни који комбинују супротне аномалије (нпр. вруће и влажно, или хладно и суво) мање карактеристични за климатски режим у Србији. Резултати представљени у овој докторској дисертацији су у складу са претходним налазима за Србију [45]. Због повратних спрега између тла и атмосфере, температура и падавине у топлој сезони су генерално негативно корелисане (са Пирсоновим коефицијентом корелације  $r \approx -0.3$  до  $r \approx -0.4$ ) [41] што чини вероватнијим појаву веома топлот и сувог лета у односу на веома топло и влажно. Ово је у складу са доминацијом сложених топло-сувих догађаја уочених у овој студији. Насупрот томе, слабе или скоро нулте зимске корелације одговарају већој учесталости хладно-влажних дога-

(a)



(б)



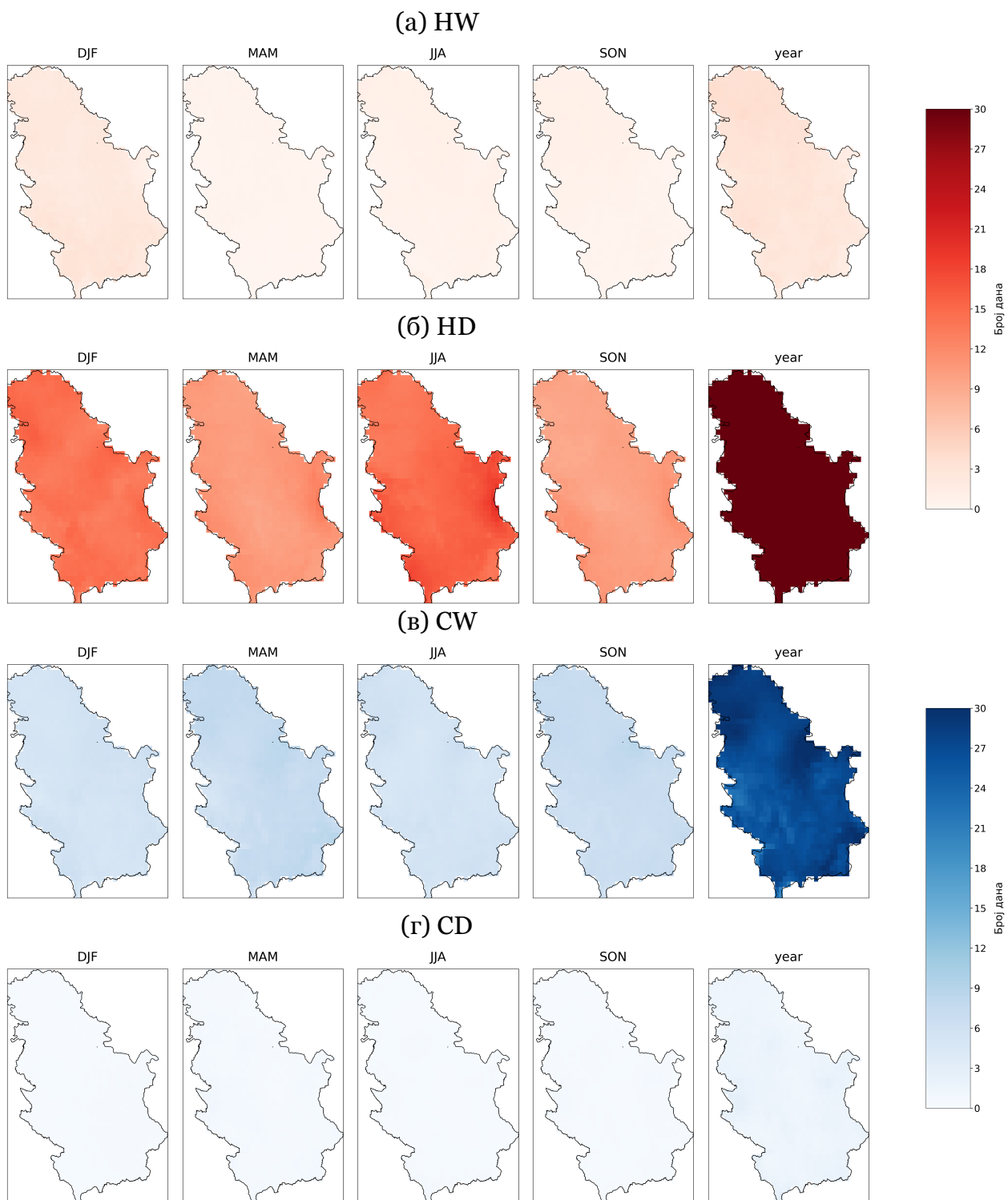
Слика 1.4: Просторна расподела тренда перцентилских температурних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за зимску (DJF), пролећну (MAM), летњу (JJA) и јесењу (SON) сезону. Значајни ( $p \leq 0.05$ ) позитивни/негативни трендови су шрафирани.

ђаја, типичних за зиме у Србији које су под утицајем продора хладног ваздуха из виших географских ширина и повећане циклонске активности.

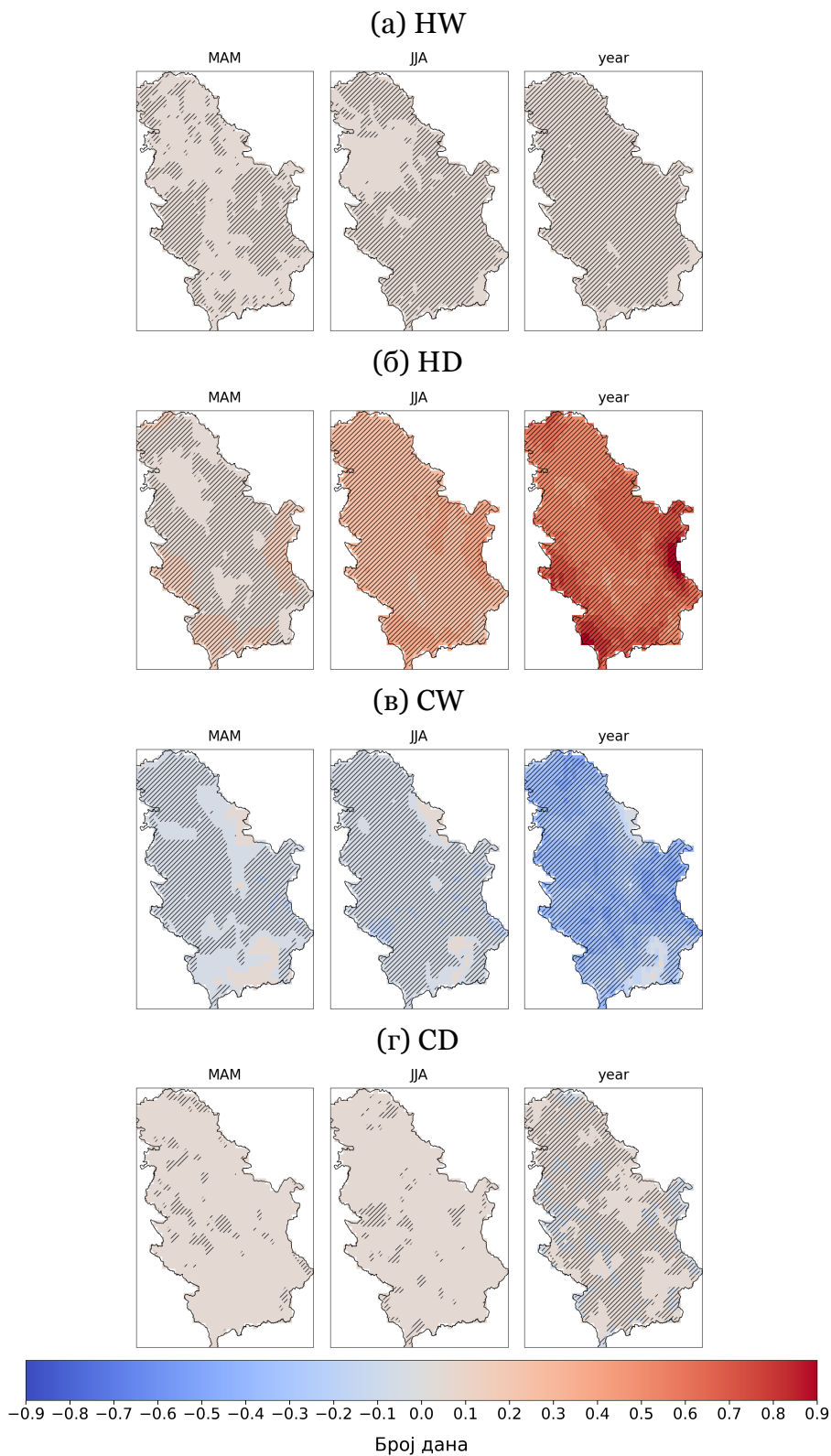
Затим су процењени трендови композитних климатских индекса и приказани су на слици 1.6. Није било значајних трендова климатских индекса током зимске и јесење сезоне. Током лета (ЈЈА) примећени су значајни трендови пораста индекса топлих и сувих дана (HD). Слично овим резултатима, највећи тренд раста у температурним индексима, као што је број топлих дана и ноћи, у Србији, осматран је у летњем периоду [71, 32]. Најизраженији трендови уочени су за индекс топлих и сувих дана (HD), посебно у источном делу Србије, где се број оваквих дана повећава за више од 0.8 дана годишње. Ови резултати потврђују пораст учесталости композитних топлих и сувих догађаја у складу са општим трендом загревања региона.

Насупрот томе, CW догађаји (хладни и влажни услови) били су чешћи у периоду 1961–1990 (слика 1.7). Смањење броја CW догађаја током године или сезоне указује на ређе појаве хладних и влажних ваздушних маса, што је у складу са општим загревањем тропосфере и смањењем хладних екстрема током свих сезона.

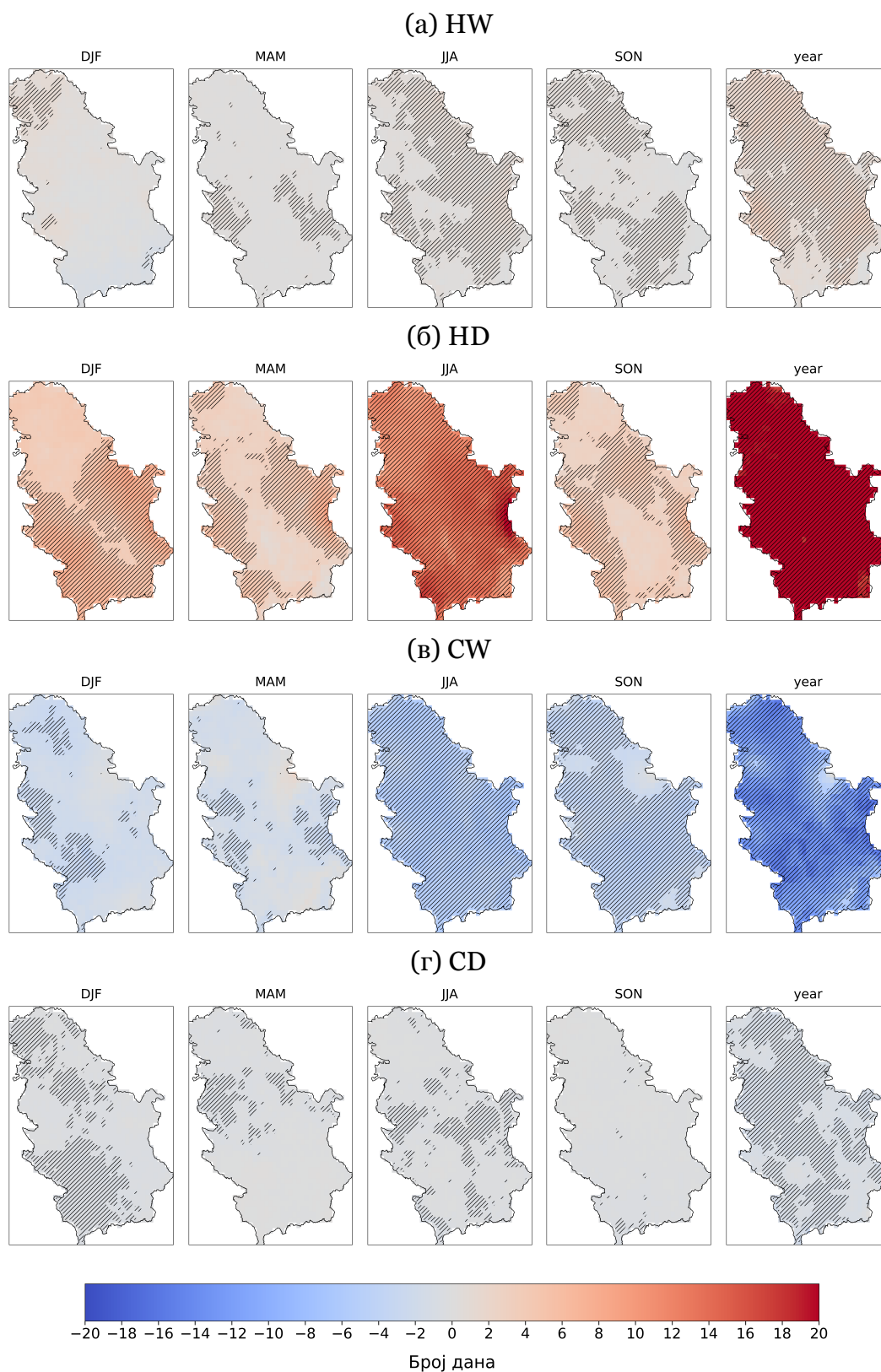
Као пример временске еволуције композитних индекса, претходне студије [45] представиле су индексе који описују услове хладно-суво и топло-суво за Београд током лета, израчунавајући их за различите перцентилске прагове температуре и падавина. Утврђена је тенденција смањења CD и тенденција повећања HD на свим праговима. Штавише, резултати студије [45] су показали да су индекси били осетљивији на температуру него на прагове падавина. Конкретно, промена перцентилског прага падавина са 25. на 10. перцентил смањила је број хладних и сувих дана само незнатно, док је повећање температурног прага са 75. на 90. перцентил довело до много упечатљивијег смањења топлих и сувих дана током године, што указује на доминантну улогу температурне компоненте у трансформацији режима композитних екстрема.



Слика 1.5: Просторна расподела композитних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за зимску (DJF), пролећну (MAM), летњу (JJA) и јесењу (SON) сезону. Приказана је средња вредност за период 1951–2020.



Слика 1.6: Просторна расподела тренда композитних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за пролећну (MAM) и летњу (JJA) сезону. Значајни ( $p \leq 0.05$ ) позитивни-/негативни трендови су шрафирани.

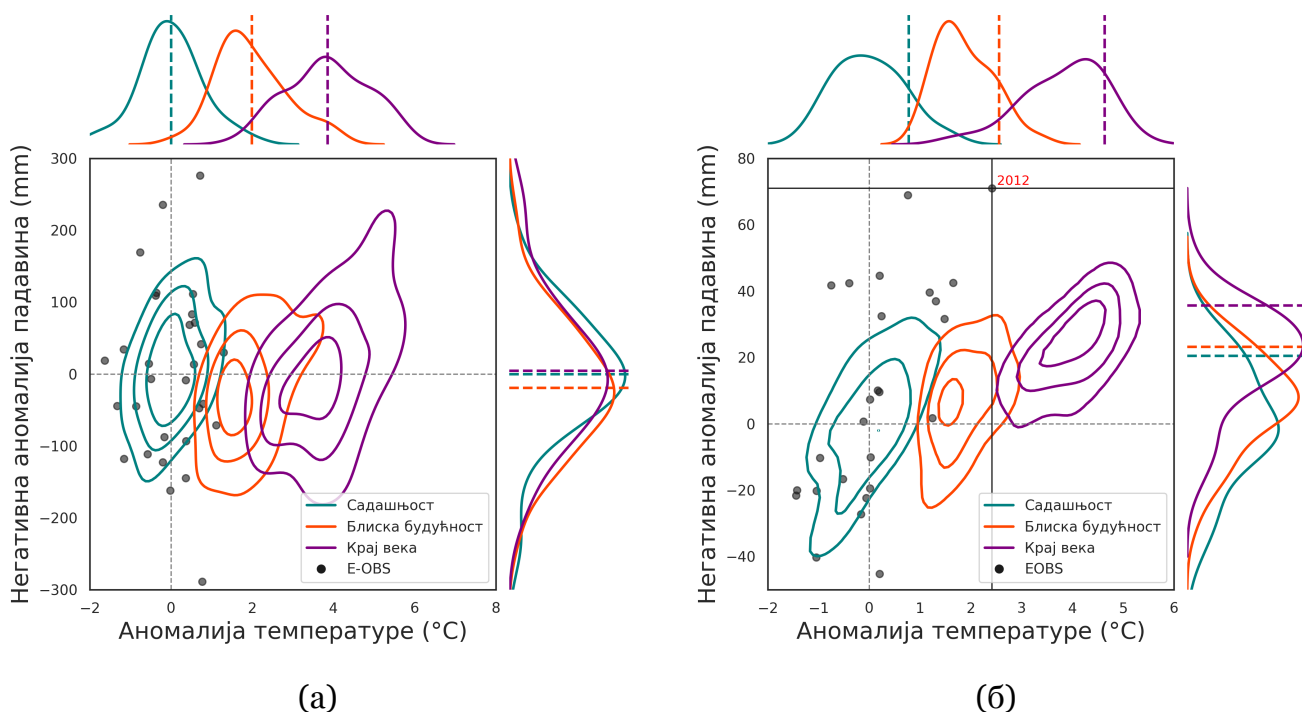


Слика 1.7: Просторна расподела промена композитних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за зимску (DJF), пролећну (MAM), летњу (JJA) и јесењу (SON) сезону, између 1961–1990 и 1991–2020. Значајне ( $p \leq 0.05$ ) позитивне/негативне промене су шрафиране.

## 1.5.2 Будуће пројекције мултимоделског ансамбла

У анализи су разматране средње годишње температуре и укупна годишња количина падавина, као и њихови сезонски просеци, односно суме за летњу сезону (јун-јул-август, ЈЈА). Посебан акценат стављен је на летњу сезону из разлога што је показано да је овај тромесечни период од највећег значаја при проучавању истовремено топлих и сушних услова, нарочито због утицаја на пољопривредне културе [72].

Добијене заједничке расподеле температуре и падавина приказане су на слици 1.8, којом је илустровано померање композитних аномалија температуре и падавина ка вишим температурама и сувљим условима до краја XXI века. Вредности заједничке густине расподеле приказане су контурама различитих боја за сваки анализирани период, заједно са одговарајућим маргиналним расподелама температуре и падавина. Аномалије добијене из осматрених података приказане су ради поређења са вредностима из климатских модела. Овакав приступ омогућава процену померања заједничке вероватноће, закључујући да је оно усмерено према топлијем и сувљем климатском режиму током времена.



Слика 1.8: Заједничка расподела температуре и падавина за (а) годишњу и (б) летњу (ЈЈА) сезону, за периоде: 1991–2020 (садашња клима), 2041–2070 (блиска будућност) и 2071–2100 (крај века). E-OBS подаци су означени сивим тачкама. Најекстремнија година за целу област (2012) истакнута је пуним црним хоризонталним и вертикалним линијама. Испрекидане хоризонталне и вертикалне линије у централном панелу означавају вредности аномалија температуре и падавина једнаке 0. Маргиналне расподеле аномалије температуре за три периода приказане су у горњем панелу, док је маргинална расподела негативне аномалије падавина приказана у десном панелу, при чему испрекидане линије означавају средњу вредност одговарајуће расподеле.

Посматрајући график са годишњим вредностима (слика 1.8 (а)), уочава се да су промене у расподели првенствено условљене повећањем температуре, док су промене у пада-

винама релативно мале. Цела расподела температуре помера се према вишим вредности-ма, уз повећање стандардне девијације, што указује на већу варијабилност и учесталију појаву екстремно топлих година. С друге стране, анализа летње сезоне показује јасније промене у режиму падавина, што указује на да то да би током лета преовладавали сушни услови. Промене у екстремним догађајима као што су истовремено веома топли и суви дани индуковане променама у средњој температури, додатно се појачавају израженим дефицитом падавина, што указује да ће идентификовани композитни топли и суви догађаји (HD) у будућности потенцијално постати чешћи — како са становишта температуре, тако и падавина. Резултати за преостале сезоне дати су у Прилогу А, будући да сезонски сигнали ван летњег периода не показују изражено померање ка сувљим условима.

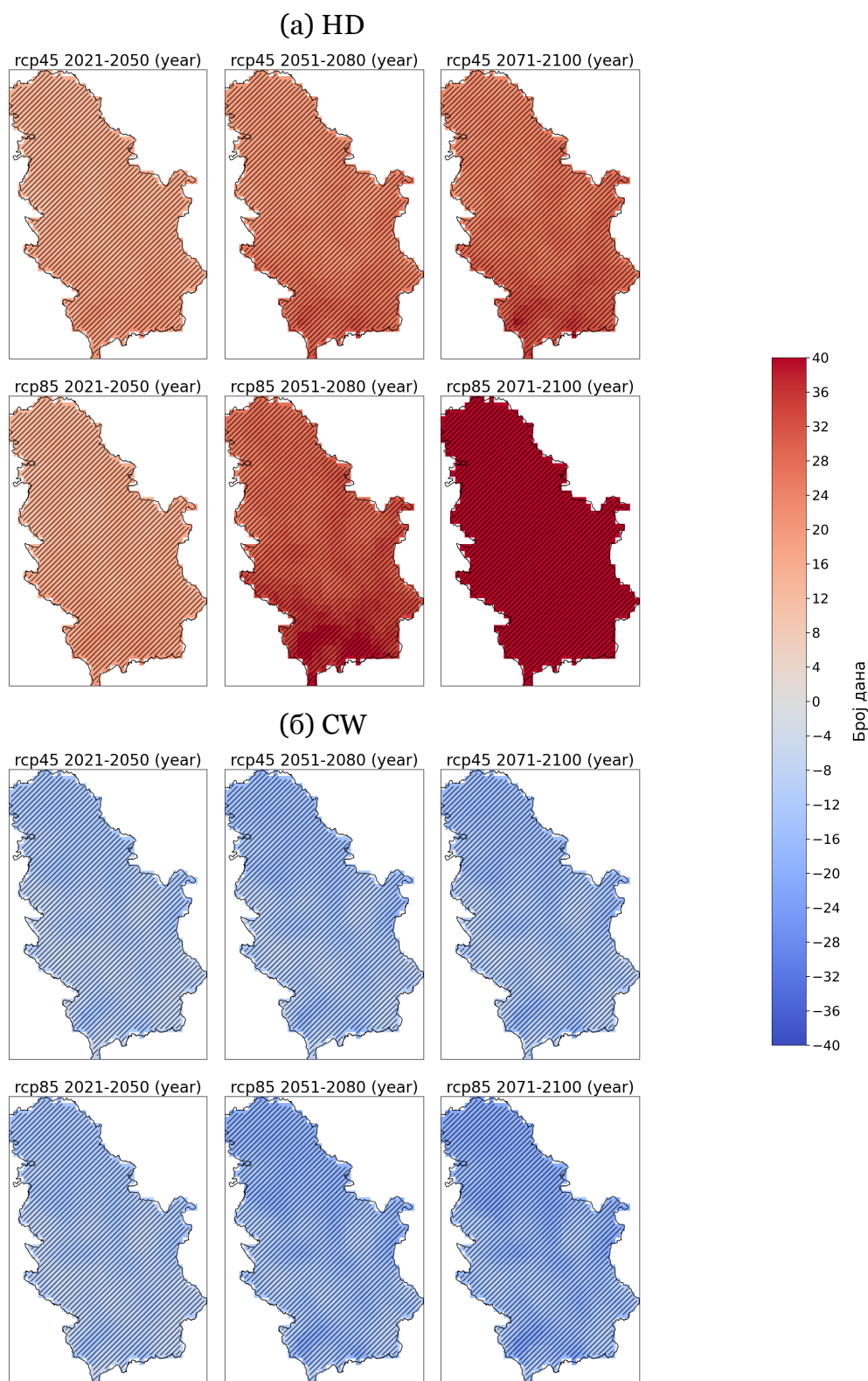
Најекстремнија година у референтном периоду, 2012, за целу област, истакнута је црним хоризонталним и вертикалним линијама. Средња температура за лето 2012. године налази се испод вредности 90. перцентила за период блиске будућности, док би овакво лето могло бити окарактерисано као прилично хладно у периоду који представља крај XXI века. Иако је промена у великој мери условљена температуром, смањење укупне летње количине падавина такође доприноси интензивирању HD догађаја.

KDE анализа ансамбла регионалних модела указује да број дана са истовремено екстремно високим температурама и сушним условима постаје већи у будућој клими. Истовремено, испитивањем разлика између 30-годишњих климатолошких периода за будућност у поређењу са 1991–2020 (слика 1.9), уочава се јасно интензивирање ових догађаја. У сценарију RCP8.5 број топлих и сувих дана (HD) повећава се у просеку за више од 40 дана у периоду 2071–2100 у односу на референтни период 1991–2020. Најизраженије промене уочене су у јужним деловима Србије. Просторна расподела промена хладно-влажних (CW) догађаја на годишњем нивоу показује просторно кохерентно смањење њихове учесталости над целом територијом Србије у резултатима регионалних климатских модела. Сигнал је уочљив већ у блиској будућности (2021–2050), а додатно се појачава ка средини века. Промене у осталим композитним индексима (HW, CD) су мање изражене и углавном нису статистички значајне.

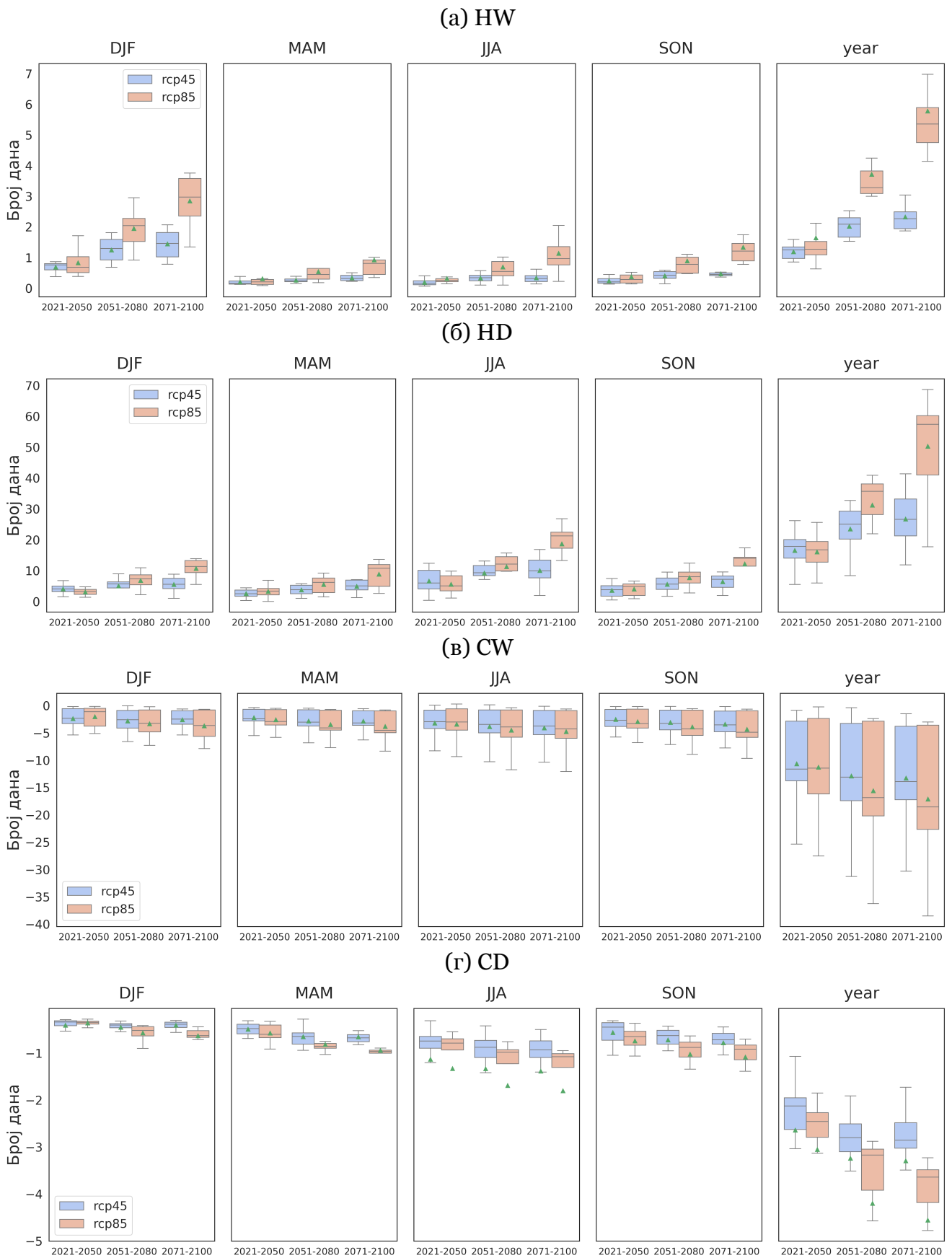
На слици 1.10 приказани су у виду *box-plot* дијаграма однос минимума, максимума, доњег и горњег квантила, медијана и средња вредност композитних индекса израчунатих за мултимоделски ансамбл и осредњених за Србију, за различите сезоне (DJF, MAM, JJA, SON) и годишњи просек, према оба RCP сценарија. Робустност сигнала процењена је квалитативно кроз сагласност већине модела у погледу промене индекса, док је квантитативни распон интерпретиран као процена структурне неизвесности. Током свих сезона, а посебно у годишњим укупним вредностима индекса HD, модели симулирају конзистентан тренд раста од почетка до краја века према оба RCP-а. Ово указује на то да се очекује да би сложени услови топло-суве сезоне могли постати много чешћи у будућности.

Према сценарију RCP8.5 до краја века (2071–2100), број дана са високим температурама (HD) се скоро удвостручује или утростручује у поређењу са почетком 21. века, у зависности од сезоне. ЈЈА (лето) показује највећи пораст, што потврђује да ће лето имати чешће и интензивније истовремене веома топле и сушне услове, што је у сагласности са постојећим студијама за Европу и подручје Балкана [69]. Током јесење сезоне такође се уочава повећање, што сугерише продужавање топло-суве сезоне у касне летње и јесење месеце.

Интерквартилни распони се шире према крају века, посебно за ЈЈА и годишње вредности што указује на већу структуралну неизвесност, али и већу варијабилност из године у годину, а самим тим и потенцијал за веома екстремна лета под сценаријом RCP8.5. За промене CW индекса током свих сезона доминирају негативне вредности, што указује на константно смањење учесталости хладних таласа. Промене су веће на крају века, посебно у сценарију RCP8.5, где средње вредности прелазе -10 у већини сезона.



Слика 1.9: Просторна расподела промена учесталости композитних (а) топло-сувих (HD) и (б) хладно-влажних (CW) догађаја на годишњем нивоу у Србији за три периода у будућности (2021–2050, 2051–2080 и 2071–2100) и два сценарија (RCP4.5 и RCP8.5), у односу на референтни период 1991–2020. Приказане вредности представљају средњу вредност ансамбла регионалних климатских модела. Шрафирани делови означавају статистички значајан сигнал промене у ансамблу.



Слика 1.10: *Box-plot* дијаграм композитних индекса мултимоделског ансамбла, за различите сезоне (DJF, MAM, JJA, SON) и годишње вредности, осредњене за Србију и 3 климатолошка периода, за два RCP сценарија.

# Реконструкција суше из 2012. године и пројекције аналогних догађаја

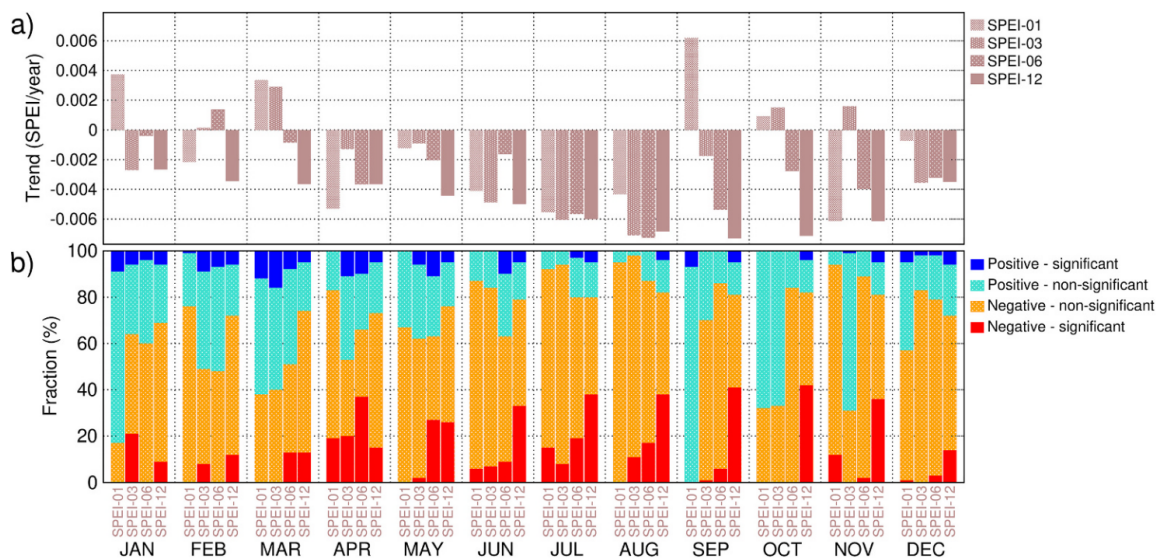
## 2.1 Контекст и мотивација: суше у Србији

Суше су постале један од најопаснијих климатских догађаја у последњих неколико деценија, погађајући бројна подручја широм света и велики број различитих сектора, као што су пољопривреда или шумарство [73, 74, 75]. Према Шестом извештају ИПСС-а [17], суша, као екстремни климатски догађај, нема једну универзалну дефиницију већ се може класификовати у различите типове (метеоролошка, пољопривредна, еколошка или социоекономска, хидролошка), при чему један тип суше може да прелази у други [76, 77]. Метеоролошка суша, обично дефинисана помоћу дефицита падавина, често еволвира у пољопривредну и хидролошку сушу, покрећући каскаду ефеката који се манифестују као смањена влажност земљишта, оштећење усева или низак водостај. Главни фактори који доприносе дефициту падавина су атмосферска динамика (синоптички процеси, обрасци циркулације великих размера, глобални обрасци циркулације океан-атмосфера), повратна спрега између тла и атмосфере и термодинамички процеси. У условима загревања, повећана потенцијална евапотранспирација (PET) може појачати дефицит воде, чак и ако падавине остану близу просека [78], чиме се интензивира суша. Као резултат тога, композитни догађаји који укључују истовремено високе температуре и смањење количине падавина препознају се као кључни за разумевање суша. Стога се климатски индекси као што су стандардизовани падавински индекс (SPI) [79], стандардизовани падавинско-евапотранспирациони (SPEI) [80] или Палмеров индекс суше (PDSI) [81] често користе за проучавање суше [82, 83].

Током XXI века, у Европи је забележен низ екстремно врућих и сувих лета. У централној и источној Европи, пет изузетно врућих лета догодило се у периоду од 2001. до 2010. године [84]. Лето 2018. године служи као пример истовремених екстремних врућина и суша у Европи, што је посебно погодило централне и северне делове континента [85]. Од 80-их година прошлог века, композитни веома топли и сушни догађаји постају чешћи, посебно у југоисточној Европи, са дужим и интензивнијим епизодама углавном вођеним порастом температура [13]. Недавне студије показују да су суше које захватају велике про-

сторне размере, као и веома интензивне суше постале све чешће широм Европе [86, 87]. Иако суше показују јаку просторну и временску варијабилност широм Европе, Спинони и сарадници [83] су показали да су медитеранске земље и балтички регион доживљавале најекстремније и учестале суше током 1990-их и 2000-их година, при чему су најтеже суше погодиле источну Европу и медитеранску област.

Као што је показано у претходном поглављу, али и у ранијим студијама [45], у Србији је такође примећен значајан пораст топлх и сувих летњих дана, при чему су ови услови снажно испреплетани са појавом и интензитетом суша, јер високе температуре интензивирају испаравање у атмосфери, додатно повећавајући дефицит падавина. У свом недавном раду, Ђурђевић и сарадници [88] анализирали су податке из осматрања високе просторне резолуције како би проценили недавне трендове суше у Србији, идентификујући значајан тренд, посебно у летњим месецима (слика 2.1).



Слика 2.1: Трендови индекса SPEI над територијом Србије: (а) просторно осредњени месечни трендови SPEI (SPEI-01, SPEI-03, SPEI-06 и SPEI-12 представљају краткорочне до дугорочне услове суше); (б) одговарајући удео тачака мреже са статистички значајним и безначајним, позитивним и негативним трендовима (ниво значајности  $p < 0.05$ ) за период 1950–2022. Слика је преузета из [88].

У последњим деценијама, Србија је доживела неколико јаких суша [88], међу којима је догађај из 2012. био један од најекстремнијих у погледу и интензитета и социоекономског утицаја. Лето 2012. било је друго најтоплије забележено у Србији од 1951. године, у односу на референтни период 1991–2020, при чему је само лето 2024. било топлије [89]. Иако су ово лето обележили услови са дуготрајним високим температурама и веома малом количином падавина, што је условило екстремну сушу, важно је напоменути да су услови суше почели већ у јесен 2011. године. Затим, након јаког зимског хладног таласа у фебруару, праћеног аномално топлим и влажним пролећним условима, суша се интензивирала и кулминирала током лета. Година 2012. стога представља једну од најтоплијих и најсушнијих година икада забележених у Србији, али истовремено и пример сложене природе различитих екстремних догађаја који се дешавају у истој години.

Привредна комора Србије [90] проценила је укупне губитке у пољопривредној производњи на око 2 милијарде америчких долара у 2012. години. Комбинација мале количине падавина у јуну и јулу, заједно са продуженим периодима високих температура, озбиљно је погодила пољопривредне културе као што су кукуруз, соја и сунцокрет. Важно је напоменути да Србија има најмању наводњавану површину у Европи, са мање од 5 процената пољопривредног земљишта опремљеног системима за наводњавање. Ово истиче важност истраживања услова суше у Србији, јер се пољопривредни сектор у великој мери ослања на природне падавине [91] и посебно је рањив на суше. Разумевање и решавање ризика од суша сличних онима из 2012. године које би се могле десити у будућности је кључно за заштиту пољопривреде и обезбеђивање хране у региону.

Пројекције будуће климе мултимоделских ансамбала, као што су CMIP или CORDEX, указују на то да ће се вероватноћа и озбиљност истовремених изузетно топлих и сувих услова повећати у различитим деловима света [85, 92]. Конкретно, за Европу је утврђено да ће се такви климатски услови проширити ка северу [93] и очекује се да ће појачати и јачину и учесталост суша. Чак и при нижим емисијама гасова са ефектом стаклене баште, резултати мултимоделског ансамбла CMIP6 потврђују да се очекује да ће Европа доживети повећање интензитета и распрострањености суша [94]. Са значајним регионалним варијацијама и великом неизвесношћу у пројекцијама падавина [17], истиче се хитна потреба за бољим разумевањем и карактеризацијом будућег ризика од суша у променљивим климатским условима, посебно у рањивим регионима као што су Јужна Америка, Медитеран и јужна Африка [92]. Према Спинонију и сар. [95], осматрања и пројекције средњих вредности мултимоделских ансамбала константно указују на растући тренд у трајању, интензитету и распрострањености суша, посебно у јужној и централној Европи.

Иако студије на глобалном и континенталном нивоу пружају вредне увиде, процене на регионалном и националном нивоу су важне за идентификовање локалне рањивости и информисање и подршку у доношењу одлука заснованих на конкретним доказима. У контексту Србије и Балкана, климатске пројекције указују на то да медитерански регион и Балкан показују сличан тренд повећања учесталости летњих суша [95].

Приликом анализе климатских екстрема, традиционални приступ коришћења средње вредности или медијане мултимоделског ансамбла обухвата међумоделску неизвесност, али може да прикрије важне регионалне детаље [96, 97]. Догађаји на које утиче атмосферска циркулација могу бити погрешно представљени у мултимоделским ансамблима, јер појединачни модели могу симулирати обрасце циркулације који се квалитативно разликују од средње вредности ансамбла [11], што додатно компликује тумачење утицаја климатских промена у будућности. Коришћење средње вредности или медијане ансамбла са моделима који показују контрадикторне сигнале може ублажити или поништити сигнал у екстремима, потенцијално потцењујући прави ризик.

Да би се решила ограничења мултимоделског ансамбла и боље разумеле будуће промене у догађајима суше у Србији, ова студија користи велики ансамбл једног модела иницијализованог са пертурбованим почетним условима (енг. *Single-Model Initial-Condition Large Ensemble*, SMILE) [98]. За разлику од традиционалних мултимоделских ансамбала, који узоркују структурну неизвесност модела у различитим климатским моделима, али често обухватају само једну реализацију по моделу, SMILE нуде више реализација из истог модела са благо поремећеним почетним условима [99].

Већина претходних студија које се баве проценом будућих ризика од суша у Србији ослања се на мултимоделски ансамбл и рачунање индекса суше (SPI, SPEI). Дигитални атлас климе Србије [57] пружа пројекције услова суше засноване првенствено на SPEI користећи резултате регионалних модела из EURO-CORDEX ансамбла. Поред тога, Кржич и сарадници [33] анализирали су промене у учесталости и интензитету суше користећи месечне вредности SPI и SPEI индекса заснованим на резултатима регионалних климатских модела, насталих у оквиру Специјалног извештаја о сценаријима емисија (SRES). Иако ове студије истичу растући ризик од суше, оне се ослањају на месечне индикаторе и не детаљан развој суше и динамичке и термодинамичке услове који могу довести до различитих суша. Међутим, Сипел и Ото [100] користили су у својој студији SMILE са симулацијама за два периода, 1960–1970. и 2000–2010, како би проучили сушне услове 2012. године, а затим применили пробабилистичку атрибуцију догађаја како би показали да су климатске промене повећале вероватноћу екстремних хидрометеоролошких догађаја у југоисточној Европи. Док су у раду [100] анализирани сезонски трендови суше широм југоисточне Европе, приступ коришћен у овој докторској дисертацији допуњује истраживање реконструкцијом суше у Србији 2012. године.

Србија је зона климатске транзиције [88], често под утицајем конкурентних медитеранске и континенталне климе, те је употреба SMILE-а посебно погодна за подручје Србије из неколико разлога. Она омогућава робусну процену унутрашње климатске варијабилности и статистичку анализу ретких догађаја, што је кључно при истраживању екстрема. Висока изложеност и осетљивост пољопривредног сектора Србије чине ризик од екстремних суша у будућности питањем од националног значаја. Као што је већ поменуто, средње вредности мултимоделских ансамбала могу маскирати промену у динамици кључну за развој и озбиљност композитних догађаја као што је суша, посебно када су они модулисани обрасцима циркулације великих размера и локалном термодинамиком. Штавише, показано је да анализа композитних догађаја захтева много већи узорак него што је обично потребно за проучавање екстрема једне променљиве [101]. Користећи SMILE, можемо стећи увид не само у вероватноћу јаких суша, већ и у опсег метеоролошких услова под којима би се могли догодити суше сличних карактеристика. SMILE су погодни за проучавање маловероватних екстрема са великим утицајем и атрибуцију догађаја, посебно тамо где је потребна доследност у одабиру форсирања и висока временска резолуција [101, 102, 103]. Претходне студије су показале важност SMILE за проучавање екстремних климатских догађаја у променљивој клими у различитим регионима и контекстима, нпр. за проучавање екстремних падавина и ветра изнад Португала [101], карактеристике олујних ветрова изнад САД [104], екстремне хладноће и обилне падавина изнад северозападне Русије и Иберијског полуострва [105], и екстремних температура и топлотних таласа изнад Северне Америке [106].

Надовезујући се на недавне студије које користе податке из осматрања високог просторног разлагања за испитивање трендова суше у Србији [88, 107, 108], ова студија прати методологију коју су развили ван дер Вил и сарадници [103], а који су истраживали будуће суше у Европи које су сличне суши из 2018. године која се догодила у западној Европи, на основу резултата симулација из SMILE. У овој студији коришћен је велики ансамбл модела MPI-ESM1.2-LR из CMIP6, са 50 чланова по сценарију (SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5) и излазним резултатима високе временске резолуције. Фокус није само на дугорочном тренду суше, већ се ова студија базира на осмотреном догађају, анализирајући развој и покретаче суша сличних примеру екстремне суше из 2012. године под различитим будућим

условима. Дефицит падавина је израчунат као разлика између потенцијалне евапотранспирације и падавина [103, 109], и користи се у овој студији за праћење дневне еволуције суше.

Један од циљева ове студије је да анализира могуће сценарије будућих суша у Србији користећи резултате SMILE како би се истражила вероватноћа догађаја сличних осмотреном из 2012. године и његови покретачи у променљивим климатским условима, а затим и да резултатима допринесе информисању доносиоца одлука за стратегије прилагођавања у пољопривредном сектору и робуснијим проценама климатских екстрема на националном нивоу. Посебан значај примене великог ансамбла лежи у експлицитном узимању у обзир улоге природне унутрашње варијабилности климатског система. Сваки члан великог ансамбла иницијализован је са пертурбованим почетним условима, што доводи до различитих реализација атмосферске циркулације и хидролошких услова, иако су спољашња форсирања и климатски сценарио идентични. На тај начин, велики ансамбл омогућава раздвајање утицаја спољашњих форсирања од ефеката природне варијабилности.

## 2.2 Коришћени подаци и методологија рада

### 2.2.1 Подаци

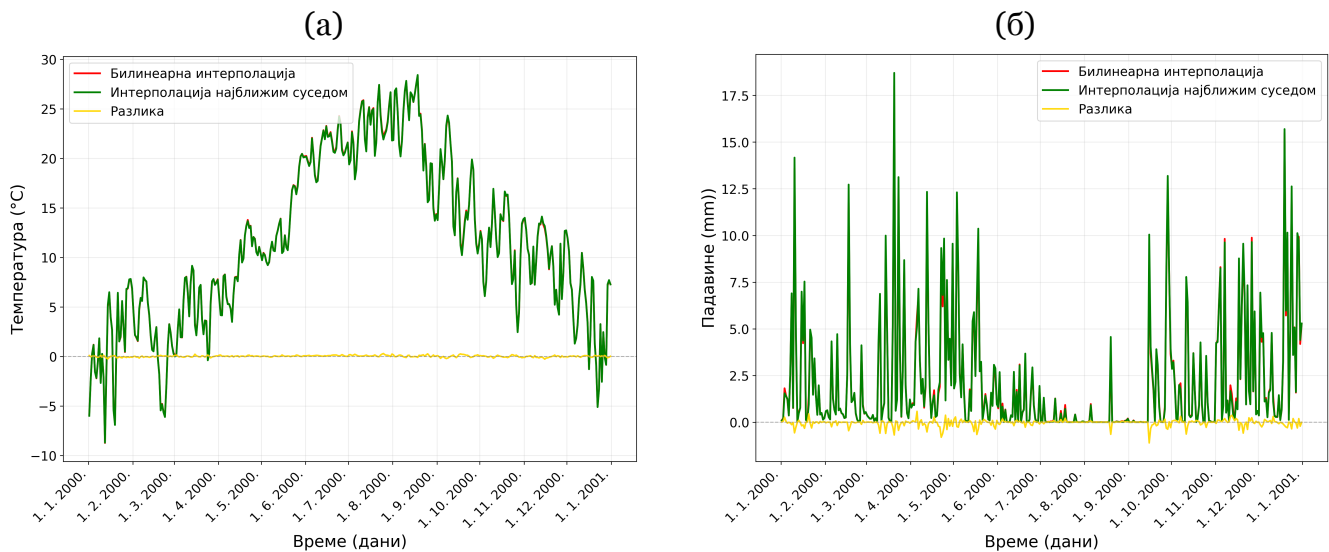
За опис и анализу посматраног догађаја коришћен је скуп података E-OBS за период 1950–2020. Подручје истраживања и E-OBS описани су у Поглављу 1.

За процену карактеристика суше у различитим климатским условима и да би догађај из 2012. године био постављен у шири контекст, коришћен је велики ансамбл једног модела са пертурбованим почетним условима (SMILE). SMILE нуде робустан начин за узорковање унутрашње климатске варијабилности обезбеђујући више чланова ансамбла из једног климатског модела. Свака од симулација унутар великог ансамбла има мало другачије почетне услове, али идентичну физику модела и спољашња форсирања [99]. Оваква структура ансамбла омогућава сваком члану да еволуира другачије само због унутрашње варијабилности, омогућавајући опсег различитих могућих климатских исхода при датом сценарију. Велики ансамбли су неопходни за идентификацију и разумевање веома ретких и екстремних сложених догађаја.

У овом раду, конкретно, коришћен је SMILE који је развио Институт Макс Планк (MPI-GE) [110], који је део светске иницијативе CMIP6. MPI-GE CMIP6 обезбеђује дневне податке, са најмање 30 реализација за историјски (1850–2014) и будући (2015–2100) период, са хоризонталном резолуцијом од 1.8 степени (приближно 200 km). Чланови ансамбла MPI-GE, генерисани су помоћу квазистационарне контролне симулације глобалног климатског модела MPI-ESM1.2, дуге 1000 година која користи преиндустријске услове. Контролна преиндустријска симулација представља дуготрајну интеграцију глобалног климатског модела у условима фиксних преиндустријских концентрација гасова стаклене баште и других спољашњих форсирања, карактеристичних за период око 1850. године [110]. Затим, за дати сценарио, сваки члан MPI-GE је иницијализован из различитог стања квазистационарне преиндустријске симулације, узетог у различитим временским тренуцима (приближно на сваких 25 година), како би широк опсег могућих почетних стања климатског система био обухваћен.

MPI-GE CMIP6 тренутно представља ансамбл сачињен од симулација спроведених помоћу глобалног климатског модела Института Макс Планк, верзије 1.2.01p7 (MPI-ESM1.2) [111] у конфигурацији грубе просторне резолуције (LR). Атмосферска компонента модела је ECHAM6 [112], која је директно спрегнута са компонентом тла JSBACH [113]. Океанска и компонента морског леда представљене су моделом МРИОМ [114], који укључује океанску биохемију [115]. Више детаља о подешавању модела, као и о евалуацији модела и поређењу са његовом претходном верзијом, могу се наћи у раду Олоншека и сарадника [110]. Важна предност конфигурације нове верзије МПИ великог ансамбла CMIP6 у односу на њену ранију верзију, MPI-GE CMIP5 [116], која је већ имала веома добро слагање са осматрањима [117, 118], је доступност дневних података, а са овим побољшањем омогућено је истраживање и анализа подсезонске варијабилности и идентификација краткорочних екстрема [110].

Пре анализе, подаци МПИ великог ансамбла су интерполирани на E-OBS мрежу тачака, коришћењем интерполације најближим суседним тачкама, путем Оператора климатских података (CDO) [120]. Билинеарна интерполација је такође тестирана и добијени су упоредиви резултати (слике 2.2 и 2.3), потврђујући робусност изабраног приступа. Циљ је био да подаци из модела буду просторно упоредиви са осматрањима и да се омогући конзистентно просторно осредњавање за подручје Србије.

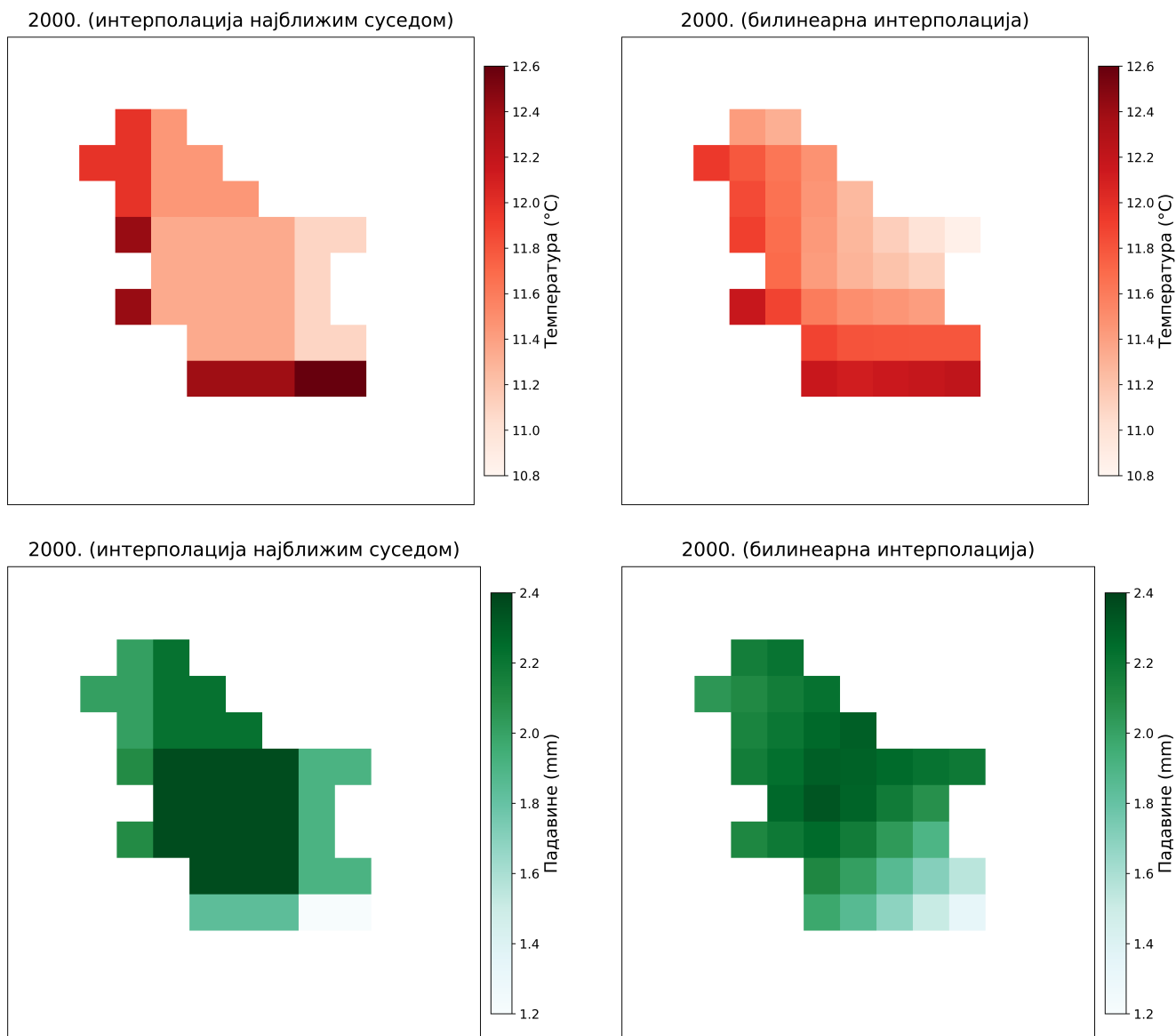


Слика 2.2: Дневне временске серије температуре ваздуха и падавина над Србијом за 2000. годину добијене применом метода најближег суседа (зелена линија) и билинеарне интерполације (црвена линија), са приказом њихових дневних разлика (жута линија). Приказани су репрезентативни резултати који илуструју да избор методе интерполације не утиче значајно на праћење дневне еволуције климатских променљивих.

У овој студији коришћене су све доступне године, од 1850. до 2100. године, и 50 реализација за сваки од сценарија емисије SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Три сценарија SSP-а коришћена у овој студији представљају различите будуће социо-економске одлуке и могуће будуће емисије гасова са ефектом стаклене баште [119]:

- SSP1-2.6 сценарио подразумева снажне напоре митигације, што доводи до ниског радијационог форсирања до 2100. године.

- SSP2-4.5 представља пут са умереним емисијама гасова са ефектом стаклене баште и изазовима адаптације, достижући ниво радијационог форсирања од  $4.5 \text{ W m}^{-2}$ .
- SSP5-8.5 подразумева велику употребу фосилних горива и сценарио са минималним ублажавањем, што резултује високим емисијама и радијационим форсирањем од  $8.5 \text{ W m}^{-2}$  до 2100. године.



Слика 2.3: Просторна расподела средњих годишњих вредности температуре (горњи ред) и падавина (доњи ред) за Србију за 2000. годину након интерполације података модела MPI-ESM1.2-LR на E-OBS мрежу. Лева колона приказује резултате добијене методом најближег суседа, док је десна колона добијена применом билинеарне интерполације.

## 2.2.2 Метрике суше засноване на дефициту падавина

Суша из 2012. године анализира се као студија случаја, која представља реално осмотрени пример еволуције метеоролошке суше ка пољопривредној суши. Избор овог догађаја омогућава реконструкцију временског развоја дефицита падавина на дневном нивоу и идентификацију карактеристичних фаза суше. Овај догађај посматран је као метеоролошка суша, али временом је пропагирао у пољопривредну сушу. Суша из 2012. године описана је онако како се одвијала током времена користећи податке осматрања (E-OBS). Променљива која се користи за анализу је аномалија дефицита падавина (PR\_deficit), који предлаже и IPCC, као погодан за анализу и праћење метеоролошке суше. Он пружа директан начин за праћење када и како атмосфера константно захтева више воде него што је обезбеђују падавине, што га чини погодним за испитивање еволуције суше на дневном нивоу, а што је тешко обухватити стандардизованим индексима попут SPI или SPEI који су засновани на месечним агрегацијама падавина.

Дефицит падавина је израчунат на основу дневне кумулативне разлике између дневне потенцијалне евапотранспирације (PET) и падавина (PR), са фокусом на вегетациону сезону (април–октобар). Разлог за одабир вегетационе сезоне је тај што током овог периода PR\_deficit може директно утицати на принос усева, па самим тим и безбедност хране, што га чини релевантним за пољопривреду и социо-економске системе. PR\_deficit дана  $d$  се израчунава на следећи начин:

$$PR\_deficit_d = \sum_{i=1}^d (PET_i - PR_i) \quad (2.1)$$

PR\_deficit је израчунат као разлика између дневног PET-а и дневних падавина (PR), као што је приказано у једначини (2.1), тако да позитивне вредности PR\_deficit указују на дане када потражња за водом у атмосфери премашује постојеће залихе воде која може да испари, тј. испаравање је веће од падавина. Кумулативне вредности PR\_deficit добијене су сабирањем дневних PR\_deficit од априла до децембра. Што дуже траје суша и што је јача, то је већи дефицит падавина. Након израчунавања дневних вредности дефицита падавина за сваку тачку мреже, резултати су просторно осредњени за цело подручје Србије, што је дало временску серију за земљу за сваку реализацију (осматрања и чланове ансамбла).

За процену дневне потенцијалне вредности евапотранспирације, примењена је Харгривсову једначину [121], као што је приказано једначином (2.2), методу засновану на температури која захтева податке о максималној и минималној температури ваздуха и сунчевој ирадијанси. Харгривсова једначина је дефинисана на следећи начин:

$$PET = 0.0023 R_a \sqrt{T_{max} - T_{min}} (T_{mean} + 17.8) \quad (2.2)$$

где је  $R_a$  сунчева ирадијанса које је функција географске ширине, а  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  и  $T_{mean}$  су дневна максимална, минимална и средња температура ваздуха, респективно. Овај приступ се често користи у климатским студијама [122, 123, 124] због своје једноставности и релативно малих ограничења у погледу потребних података. Потенцијална евапотранспирација је израчуната коришћењем Python библиотеке *pyet*, верзија 1.2.2 [125], и неопходни су улазни подаци о температури и географској ширини локације.

Како би се проценила валидност МРІ великог ансамбла за анализу суше у Србији 2012. године, анализирани су перформансе модела у репродукцији сезонског циклуса дефицита падавина. Аномалије су израчунате у односу на одговарајуће климатологије: за E-OBS, климатологија је израчуната за период 1950–2020, а за МРІ-GE CMIP6, модел климатологије је израчунат за историјски период 1850–2014 како би се избегао утицај загревања у пројекцијама. За оба скупа података примењен је 10-дневни покретни прозор у коме се израчунава средња вредност, а затим су израчунати перцентили (10, 25, 50, 75. и 90. перцентил) током целог периода. Анализа је заснована на аномалијама променљивих, чиме је омогућено конзистентно поређење скупова података са различитим климатолошким базним вредностима и смањен утицај систематске грешке модела у апсолутним вредностима.

Три квантитативне метрике које су коришћене у овој студији за описивање суше предложили су ван дер Вил и сарадници [103], и њима се карактеришу интензитет, еволуција и временска структура суше. Метрика 1 (M1) представља средњу вредност аномалије кумулативног дефицита падавина током периода август–октобар; метрика 2 (M2) је нагиб линеарне регресије кумулативне аномалије дефицита падавина од јуна до августа; а метрика 3 (M3) је временска корелација (Пирсонов коефицијент корелације,  $r$ ) кумулативне аномалије дефицита падавина података из осматрања и МРІ-GE за период април–октобар.

### 2.2.3 Стандардизовани падавинско-евапотранспирациони индекс

Анализа кумулативних дневних вредности дефицита падавина допуњена је и испитивањем развоја суше по месецима током 2012. године. Израчунат је шестомесечни стандардизовани падавинско-евапотранспирациони индекс (SPEI-6). SPEI интегрише и аномалије падавина и PET-а како би се проценио интензитет метеоролошке суше [80]. SPEI је израчунат коришћењем Python библиотеке *climate\_indices* [125], на основу разлике између падавина и потенцијалне евапотранспирације (PR – PET), при чему су месечне временске серије стандардизоване у складу са дефиницијом индекса применом Гама расподеле, користећи референтни климатолошки период 1961–1990. Месечне вредности SPEI су израчунате за сваку тачку мреже у Србији за 2012. годину, пружајући континуирану слику развоја суше током године. Детаљан опис методологије која се користи за израчунавање SPEI дат је у Прилогу Б.

У табели 2.1 је сумирана уобичајено коришћена класификација јачине суше на основу SPEI прагова. У складу са стандардним праговима класификације [126], екстремна суша (ED) је присутна ако је вредност SPEI била мања или једнака  $-2.0$ .

Табела 2.1: Класификација категорија суше и влажних услова на основу вредности SPEI [126].

| Ознака | Категорија             | Праг SPEI               |
|--------|------------------------|-------------------------|
| ED     | Екстремна суша         | $SPEI \leq -2.0$        |
| SD     | Јака суша              | $-2.0 < SPEI \leq -1.5$ |
| MD     | Умерена суша           | $-1.5 < SPEI \leq -1.0$ |
| NN     | Близу нормалних услова | $-1.0 < SPEI < 1.0$     |
| MW     | Умерено влажно         | $1.0 \leq SPEI < 1.5$   |
| SW     | Јако влажно            | $1.5 \leq SPEI < 2.0$   |
| EW     | Екстремно влажно       | $SPEI \geq 2.0$         |

#### 2.2.4 Процес и критеријуми избора аналогних догађаја

За испитивање како би се суша слична оној из 2012. године могла манифестовати под различитим климатским условима, примењује се метод [103] одабирања догађаја из симулација великог ансамбла глобалног климатског модела аналогних осмотреном. Одабир подразумева идентификацију догађаја из MPI великог ансамбла који имају сличне карактеристике дефицита падавина као и осмотрени догађај. Аналогни догађаји су идентификовани на основу метрика кумулативног дефицита падавина, поменутих у 2.2.2. Прво, три метрике, (M1) средња вредност аномалије кумулативног дефицита падавина, (M2) нагиб линеарне регресије аномалије кумулативног дефицита падавина и (M3) корелација временских серија аномалије кумулативног дефицита падавина са сушом 2012, израчунате су за Србију, на основу просторно осредњене вредности, из E-OBS података за 2012. годину. Затим, за сваку годину и члан ансамбла, израчунате су вредности исте три метрике током историјског периода (1850–2014) и будућих пројекција (2015–2100), за сва три сценарија: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Коначно, поступак селекције аналога је примењен на основу сличности између осмотрене суше 2012. године и симулираних догађаја у великом ансамблу, за сваку метрику посебно. Сличност је квантификована разликом између метрике израчунате из осматрања и исте из резултата модела, те су као аналогни догађаји одабрани они код којих је та разлика најмања. Аналогни догађаји омогућили су испитивање могућих верзија суше 2012. године и како би се оне могле потенцијално одвијати у алтернативним климатским стањима, која у овом случају подразумевају различите SSP.

За испитивање појединачних карактеристика аналога осмотрене суше, за сваку од три дефинисане метрике, одабрано је десет најсличнијих догађаја. Селекција је извршена израчунавањем апсолутне разлике између одговарајућих вредности метрика из осматрања и модела, а затим њиховим рангирањем. Затим је израчуната композитна средња вредност као просек десет одабраних најсличнијих догађаја, што коначно даје три композита, по један за сваку метрику. Ови композити пружају увид у типичне обрасце повезане са карактеристикама суше сличним оној из 2012. године под различитим климатским условима. На крају, композити су анализирани појединачно, како би се проценило како се свака карактеристика, приказана помоћу три различите метрике, суше из 2012. године манифестује у симулацијама модела и како се може развијати у будућим сценаријима. Аналогни догађаји идентификовани у оквиру различитих чланова ансамбла не представљају истоветне реплике осмотрене суше из 2012. године, већ различите могуће реализације суше сличних карактеристика, условљене унутрашњом варијабилношћу. Овај приступ омогу-

ћава да се иста врста догађаја посматра као део шире расподеле могућих исхода, уместо као јединствена и детерминистичка појава. Разматрањем аналога у различитим SSP сценаријима, могуће је проценити како се исти тип догађаја може манифестовати у различитим климатским стањима, уз истовремено очување природне варијабилности као кључног извора неизвесности. На тај начин, овај приступ пружа физички конзистентан оквир за разумевање потенцијалних будућих верзија суше из 2012. године, без претпоставке да ће се екстремни догађаји у будућности јављати на идентичан начин као у прошлости.

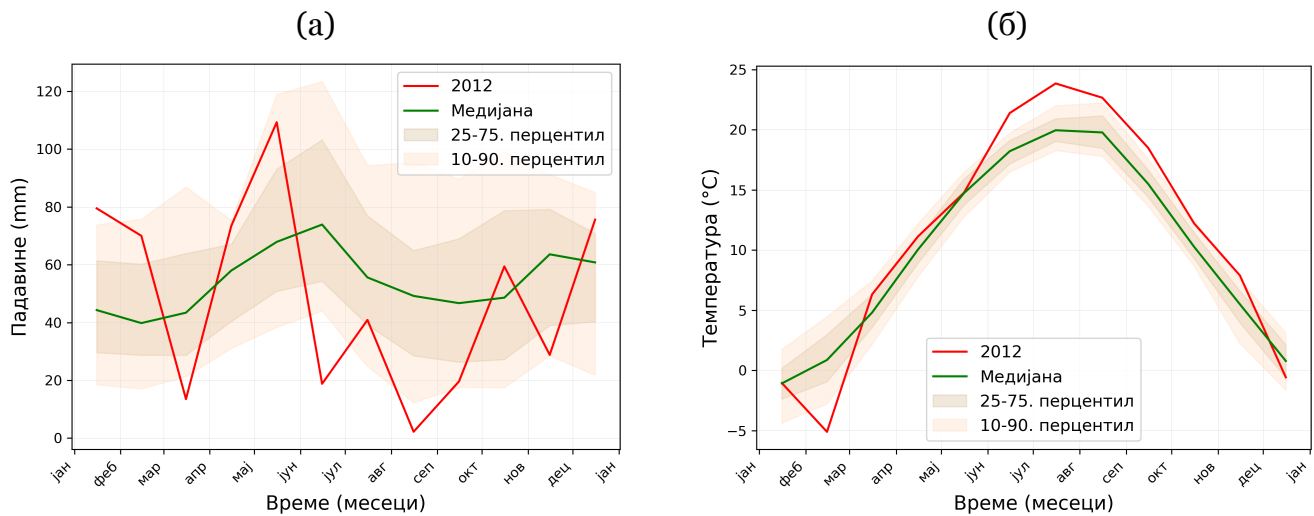
## 2.3 Резултати

### 2.3.1 Реконструкција суше 2012. године на основу осматрања

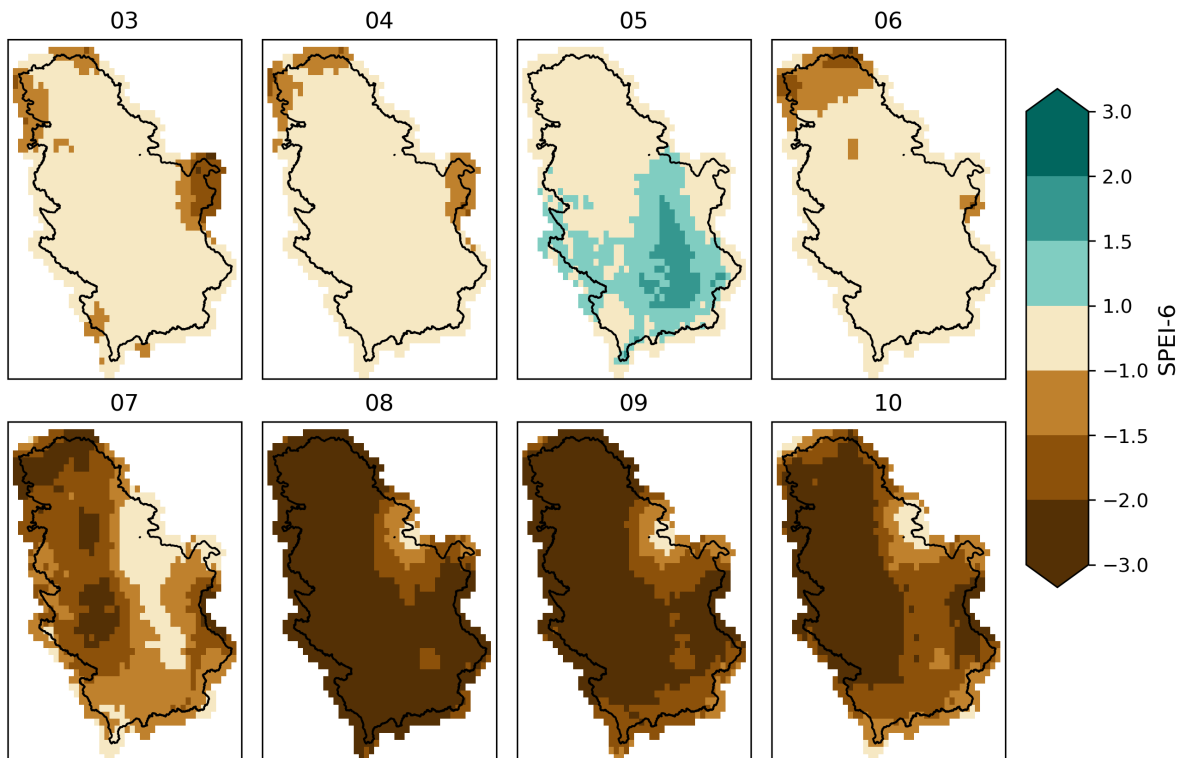
Година 2012. обележена је различитим екстремним климатским и временским условима у Србији. Током зимске сезоне, хладни талас је трајао око 2.5 недеље (од 29. јануара до 15. фебруара) [127], што је фебруар учинило најхладнијим месецом у историји мерења на већини метеоролошких станица у Србији, са температурама испод -20 степени Целзијуса, истовремено уз интензиван снег. Након хладног таласа током зиме, уследиле су пролећне температуре више од просечних, са веома влажним условима на крају сезоне, у мају. Иако су се пролећни месеци (април–јун) одликовали натпросечним падавинама, значајан дефицит је забележен током лета (јун–септембар), са вредностима које су биле испод 10. перцентила (слика 2.4 (а)). На кратко је сушни период прекинут захлађењем и падавинама крајем јула (слика 2.4 (а)), али је суша поново забележена у августу и септембру услед стабилних, сувих и топлих услова, уз повећану евапотранспирацију. Лето и јесен су били изузетно топли (слика 2.4 (б)), са топлотним таласима у септембру и октобру [127]. Летње температуре су константно биле изнад 90. перцентила (слика 2.4 (б)), што је 2012. годину учинило једним од најтоплијих лета икада забележених у земљи.

Читава земља се суочила са сталним јаким условима суше током целог лета, који су се наставили и у јесен. Суша је почела у јулу, врхунац достигла током августа и трајала све до новембра. Од јула до септембра, вредности SPEI-6 биле су испод -1.5 (јака суша) у целој земљи, са вредностима испод -2.0 (екстремна суша) у западном делу земље (слика 2.5).

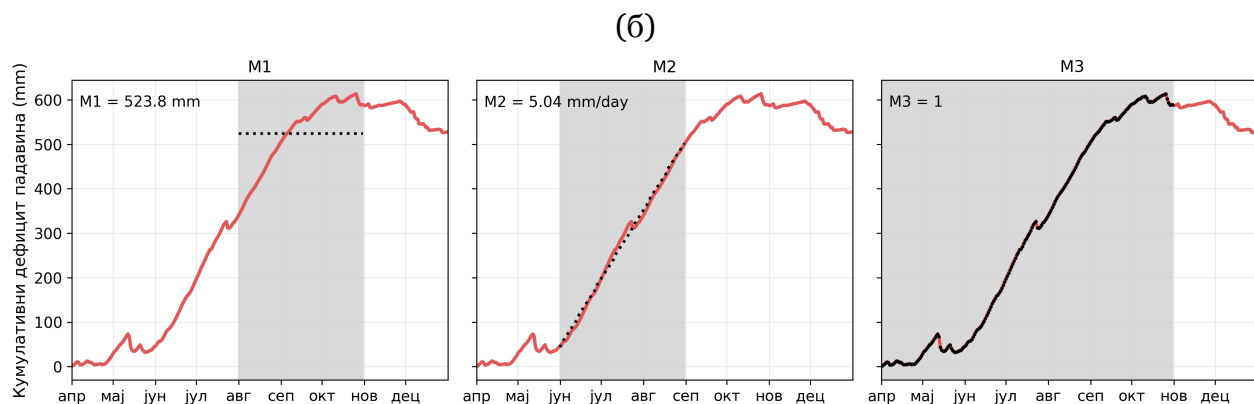
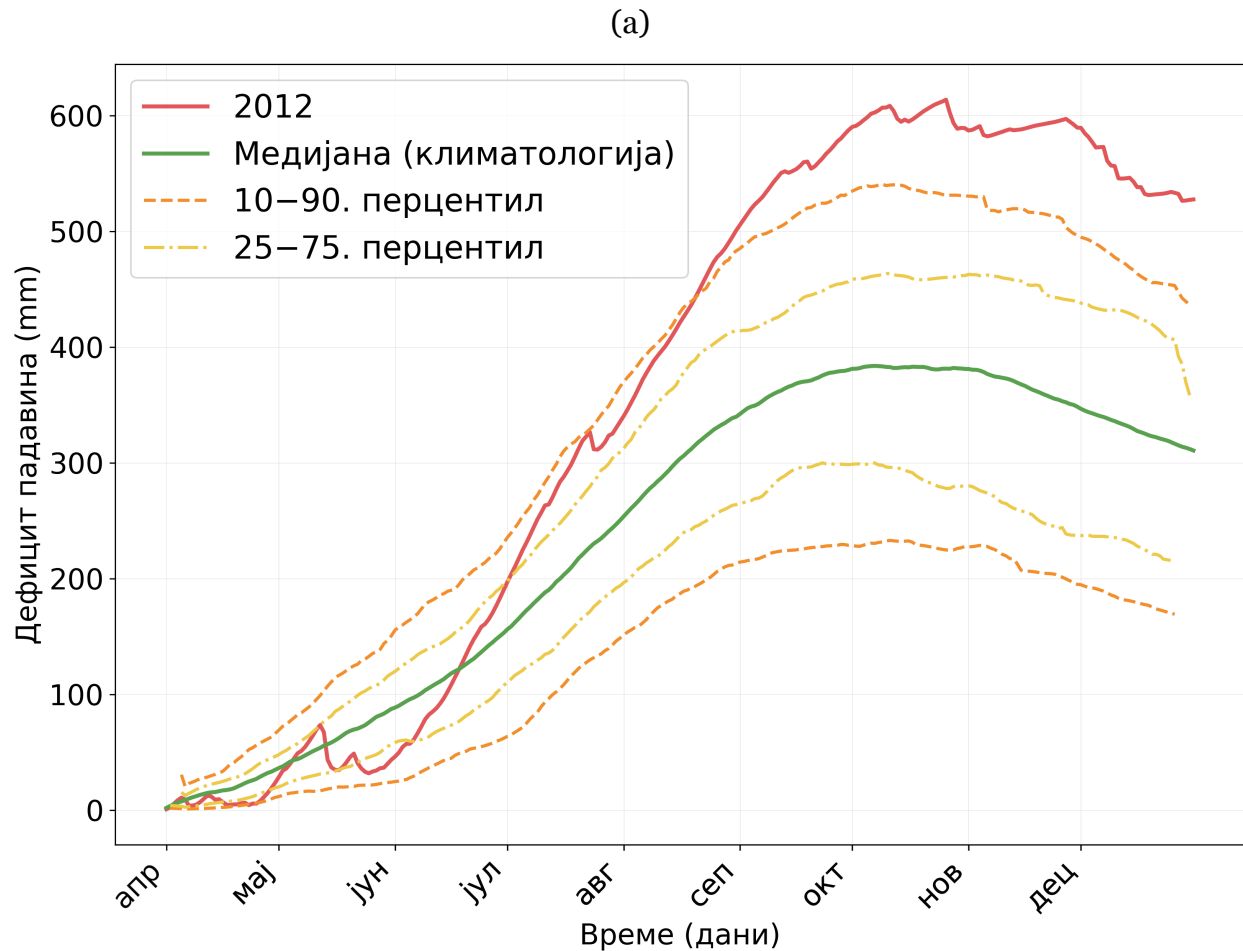
На слици 2.6 приказани су (а) дневни кумулативни дефицит падавина током периода април–децембар 2012. године, у поређењу са перцентилима (10, 25, 50, 75. и 90.) климатологије од 1950. до 2020. године, израчунати користећи податке из осматрања и илустрован је (б) начин рачунања метрика на примеру вредности кумулативног дневног дефицита падавина за осматрени догађај 2012. године. Кумулативни PR\_deficit током суше 2012. године константно је имао вредност већу од 90. перцентила из климатологије, почев од августа па надаље (слика 2.6 (а)). Након периода са падавинама које су биле изнад просека у мају, услови суше су се развијали и интензивирали брже него у типично сушним годинама, са дефицитом падавина који је нагло растао од јуна па надаље, што је у складу и са SPEI-6 вредностима (слика 2.5).



Слика 2.4: Месечне падавине (а) и средња месечна температура (б) у 2012. години (црвена линија) у поређењу са климатологијом за период 1950–2020, просторно осредњено за подручје Србије. Зелена линија представља медијану климатолошких вредности, док осенчена подручја приказују међуквартилни распон од 25. до 75. перцентиља (тамнија нијанса) и од 10. до 90. перцентиља (светлија нијанса).



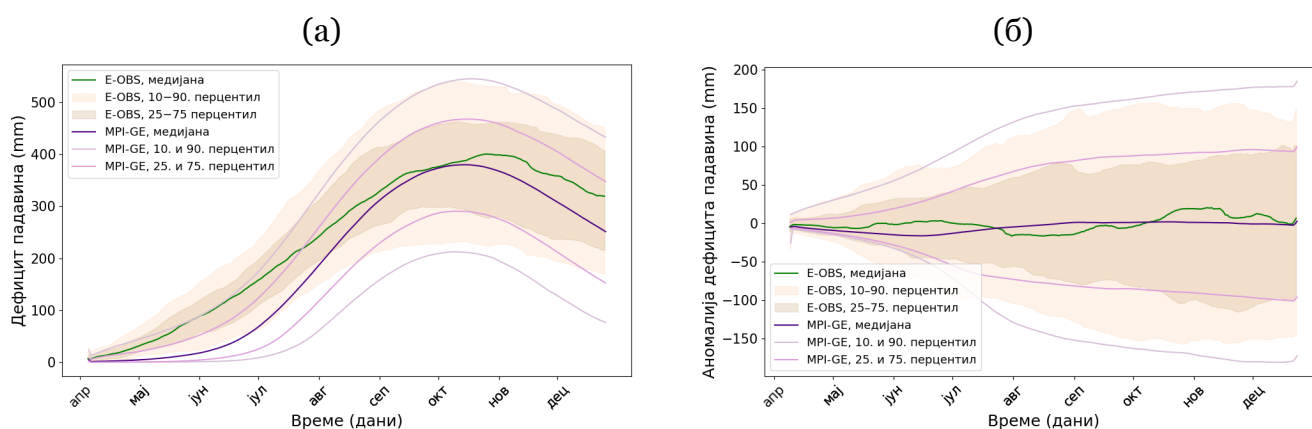
Слика 2.5: Месечна еволуција SPEI-6 у Србији за 2012. годину. Сваки панел одговара једном месецу (од марта до октобра), приказујући просторне варијације у интензитету суше на основу SPEI-6 вредности. Позитивне вредности (зелене нијансе) означавају влажније услове од просечних, док негативне вредности (смеђе нијансе) представљају сувље услове од просечних и одговарају категоријама из табеле 2.1.



Слика 2.6: (а) Дневни кумулативни дефицит падавина током периода април–децембар 2012. године, у поређењу са перцентилима (10, 25, 50, 75. и 90.) климатологије од 1950. до 2020. године. (б) Шематски приказ метрика за селекцију сушних догађаја. Црвена линија представља временску серију кумулативног дефицита падавина (mm) за осмотрени догађај, црна испрекидана линија приказује величину која се узима у обзир за дефиницију одговарајуће метрике: М1 – средња вредност дефицита падавина током периода август–октобар; М2 – нагиб линеарне регресије дефицита падавина у периоду јун–август; М3 – корелација (Пирсонов коефицијент корелације) временске серије дефицита падавина током периода април–октобар.

### 2.3.2 Колико добро MPI-GE репродукује осмотрену климатологију?

На слици 2.7 приказано је поређење кумулативног дефицита падавина (PR\_deficit) из осматрања и MPI-GE CMIP6 ансамбла, за период од 1. априла до 31. децембра, ради процене способности модела да репродукује средње стање, варијабилност и обухвати опсег осмотрених вредности. Медијана ансамбла PR\_deficit (слика 2.7 (а)) благо потцењује кумулативни дефицит током летњих месеци, што указује да модел потцењује еволуцију јаке суше. Након уклањања климатолошке средње вредности, варијабилност у MPI-GE CMIP6 ансамблу веома је блиска варијабилности аномалије PR\_deficit из осматрања (слика 2.7 (б)). Аномалија PR\_deficit осматрања (зелена линија) и аномалија израчуната као медијана ансамбла (љубичаста линија) показују добро слагање током скоро целе вегетационе сезоне. Варијабилност модела је већа од варијабилности осматрања, што је у складу са очекиваним јер велики ансамбл омогућава много шири спектар могућих исхода.

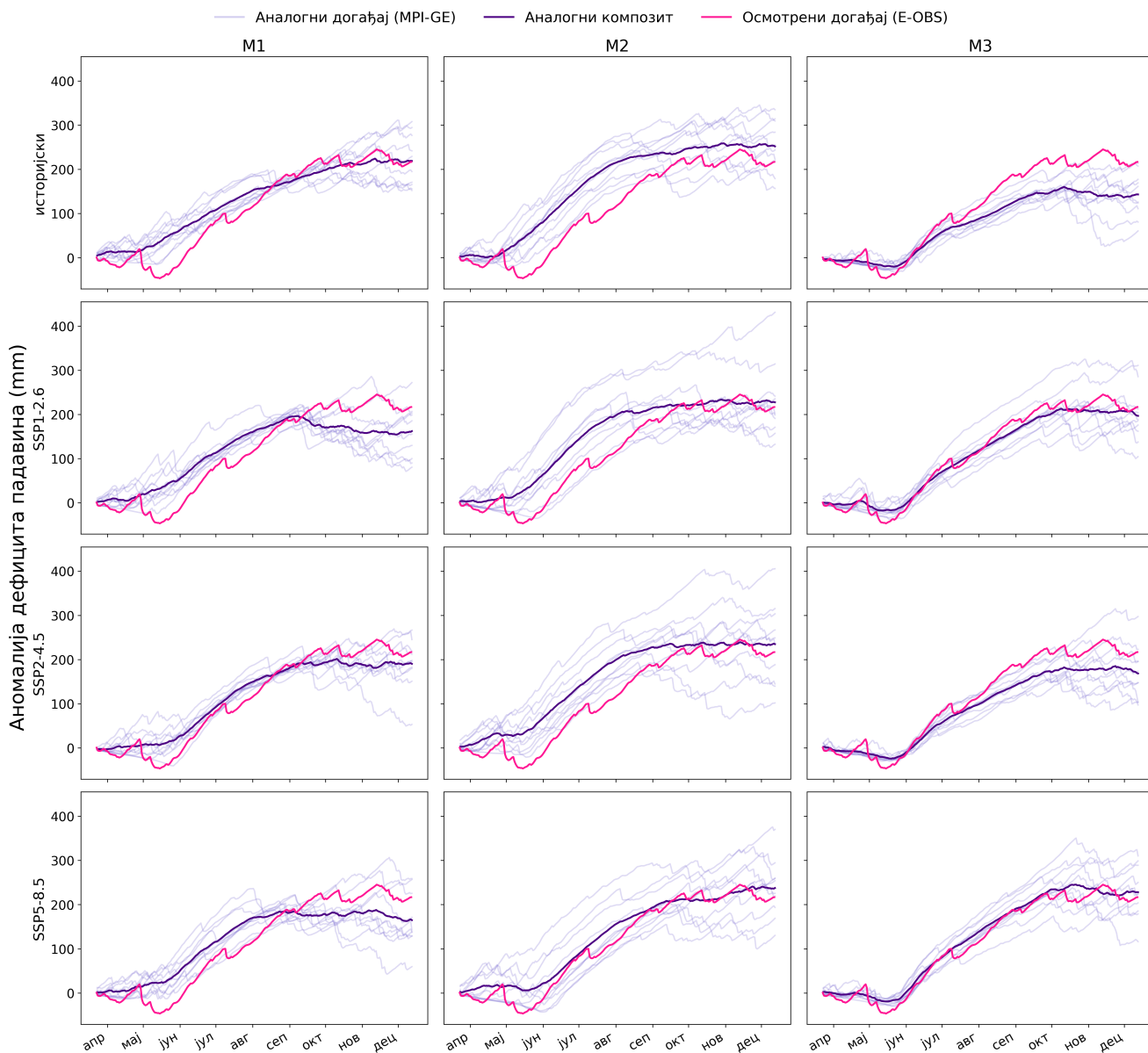


Слика 2.7: Дневни кумулативни (а) дефицит падавина и (б) аномалија дневног дефицита падавина (од 1. априла до 31. децембра) у односу на климатологију 1950–2020. за E-OBS и климатологију 1850–2014. за MPI-GE, приказани као средње вредности у 10-дневном прозору. Пуна зелена (љубичаста) линија означава медијану E-OBS (MPI-GE). Смеђом бојом представљени су опсеги од 25. до 75. (тамнија нијанса) и од 10. до 90. (светлија нијанса) перцентиала за осматрања (E-OBS), док су је опсег моделског ансамбла (MPI-GE) приказан љубичастим линијама.

### 2.3.3 Детекција аналогних догађаја суше у великом ансамблу

За испитивање како би се сушни услови слични онима из 2012. године могли развијати под различитим климатским условима, одабрани су аналогни догађаји на основу три метрике кумулативног дефицита падавина ( $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$ ) и конструисане композитне средње вредности за историјски период и три климатска сценарија (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5). Затим су идентификовани догађаји чија се структура и еволуција највише поклапају са осмотреном сушом из 2012. године. Аналогни догађаји су одабрани одвојено за сваку метрику и сценарио из MPI-GE CMIP6 ансамбла, на основу најбољег подударарања са догађајем из 2012. године. Слика 2.8 илуструје како се интензитет и развој током вегетационог периода суша сличних оној из 2012. године развијају у условима различитих нивоа

загревања. Током историјског периода (слика 2.8, први ред), добијени композити у великој мери репродукују сезонски развој суше из 2012. године. Међутим, аналогни догађаји одабрани на основу временске корелације (метрика М3) показују тенденцију да потцене наглу и изражену еволуцију суше која је уочена у осмотреном догађају.

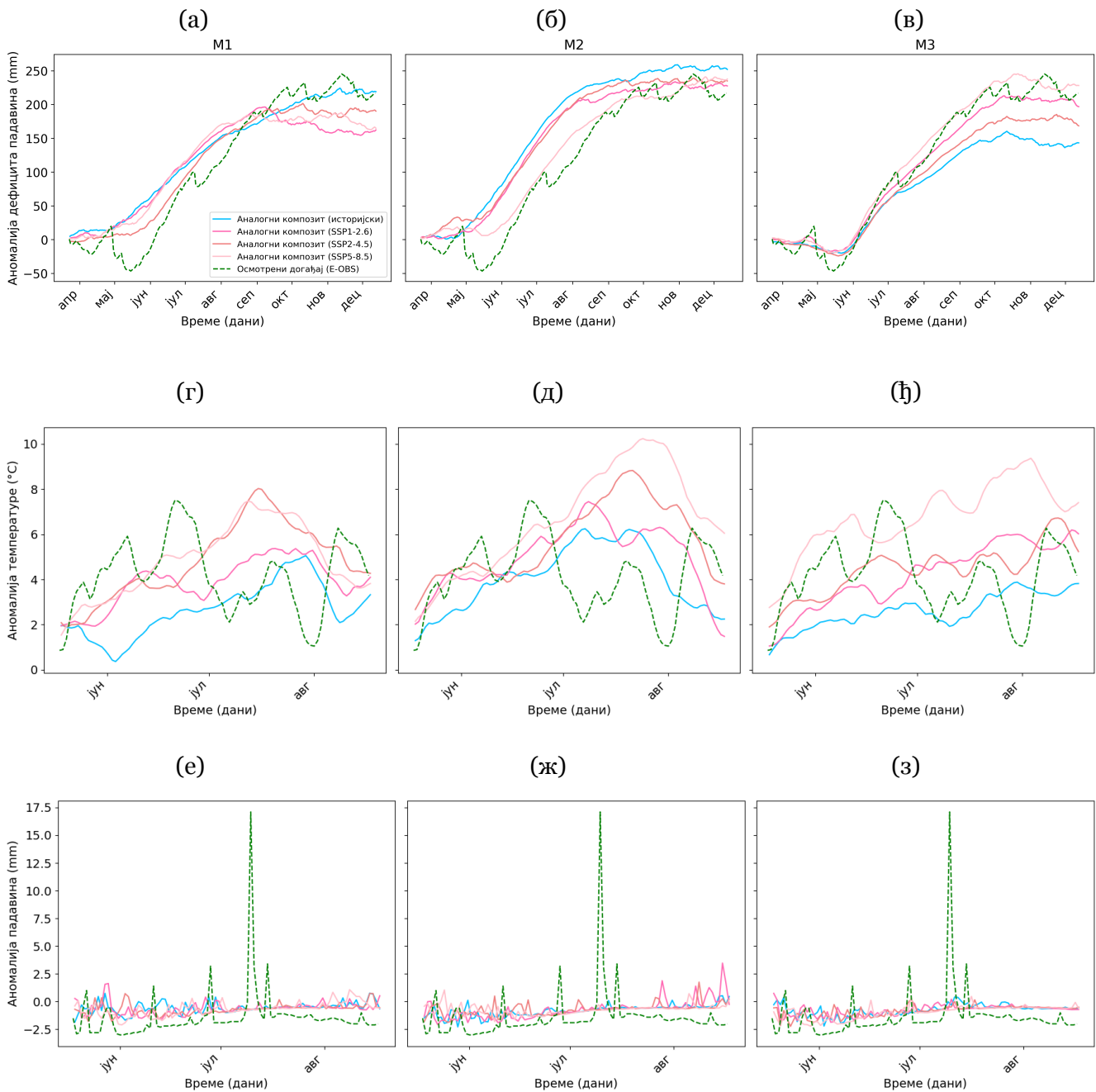


Слика 2.8: Аномалије кумулативног дефицита падавина за аналогне догађаје суше 2012. године, одабране на основу три метрике (М1: средња вредност интензитета август-октобар, М2: нагиб јун-август, М3: временска корелација април-октобар). Редови одговарају различитим климатским сценаријима (историјски период, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5), а колоне одговарају избору на основу сваке метрике. Танке лила линије представљају десет изабраних појединачних аналогних догађаја; пуне љубичасте линије приказују њихову композитну средњу вредност. Пуна ружичаста линија означава осмотрени догађај из 2012. године.

Слика 2.9 приказује дневне вредности аномалија кумулативног дефицита падавина (за период 1. април – 31. децембар) и аномалија средње дневне температуре и падавина за летњу сезону, за осмотрени догађај из 2012. године и његове композитне аналогне догађаје идентификоване у MPI-GE ансамблу. У климатским пројекцијама, посебно при сценаријима са јачим антропогеним загревањем, суви услови крајем лета и током јесени постају још израженији. Анализа еволуције температуре током аналогних догађаја указује на то да се аналогни догађаји идентификован у историјском периоду (1850–2014) одликују нижим средњим температурама током летње сезоне у односу на осмотрени догађај из 2012. године, док се у будућим аналогним сушама уочава јасна тенденција ка вишим температурама, која се појачава у зависности од одабраног сценарија (слика 2.9 (е)–(з)). Један од узрока одступања аналогних догађаја добијених метриком М3 од осмотреног, може се приписати разликама у температури (слика 2.9 (ђ)) која постоји између осмотрене и симулираних суша у историјском периоду. Према М3, ниже температуре у историјским аналогним догађајима вероватно доводе до мање потенцијалне евапотранспирације и, самим тим, смањеног кумулативног дефицита падавина (слика 2.9 (в)). Насупрот томе, у сценаријима са вишим емисијама, пораст температуре узрокује већи РЕТ, доводећи до већег дефицита падавина – што је посебно уочљиво у сценарију SSP5-8.5 (слика 2.9 (в)), где се суше сличне оној из 2012. године јављају у знатно топлијим и сушнијим условима.

Утврђено је да се у пројекцијама са нижим радијационим форсирањима (SSP1-2.6, SSP2-4.5) у највећој мери брзина интензивирања суше током летњег периода аналогна осмотреној може успешно симулирати, што је описано метриком М2 (нагиб линеарне регресије кумулативног дефицита падавина у периоду јун–август или колико брзо се суша погоршава током лета). Међутим, овим симулацијама не успевају да се репродукују апсолутне вредности дефицита падавина као оне које карактеришу осмотрени догађај из 2012. године. У наведеним сценаријима, дефицити падавина у аналогним догађајима имају тенденцију да почињу од нешто виших почетних вредности у односу на осматрања, што указује на одсуство аномално влажног пролећа какво је забележено у мају 2012. године. Као резултат тога, иако је брзина интензивирања суше адекватно репродукована, симулиране суше указују на ранији почетак развоја у односу на осматрања. Само у сценарију SSP5-8.5, аналогни догађаји истовремено репродукују и нагиб и еволуцију кумулативног дефицита падавина. Ови резултати указују да ранији почетак сушних услова у пролеће, који се јавља у сценаријима са интензивнијим загревањем, повећава вероватноћу да се суша током лета развије у догађај сличан екстремној суши из 2012. године. У одсуству влажног пролећног периода који би ублажио почетни дефицит, суша улази у летњу сезону са већ постојећим недостатком влаге, што у комбинацији са повишеним температурама и већом потенцијалном евапотранспирацијом доводи до већих апсолутних дефицита падавина.

Поређењем три примењене метрике, уочава се да метрика М2 показује највећи опсег могућих вредности у оквиру ансамбла у свим сценаријима (слика 2.8, друга колона). То сугерише да селекција аналога заснована на нагибу дефицита падавина обухвата шири спектар могућих реализација, при чему сличне брзине интензивирања суше могу настати као последица различитих атмосферских и хидролошких услова пре и након периода јун–август. Чак и када је динамика погоршања суше током лета слична у различитим симулацијама, свеукупно развој суше може значајно варирати услед случајних флукуација атмосферске циркулације и хидролошких услова. Управо ова разноликост реализација унутар великог ансамбла одражава природну варијабилност климатског система, која представља кључни извор неизвесности у анализи екстремних догађаја. Стога, резултати



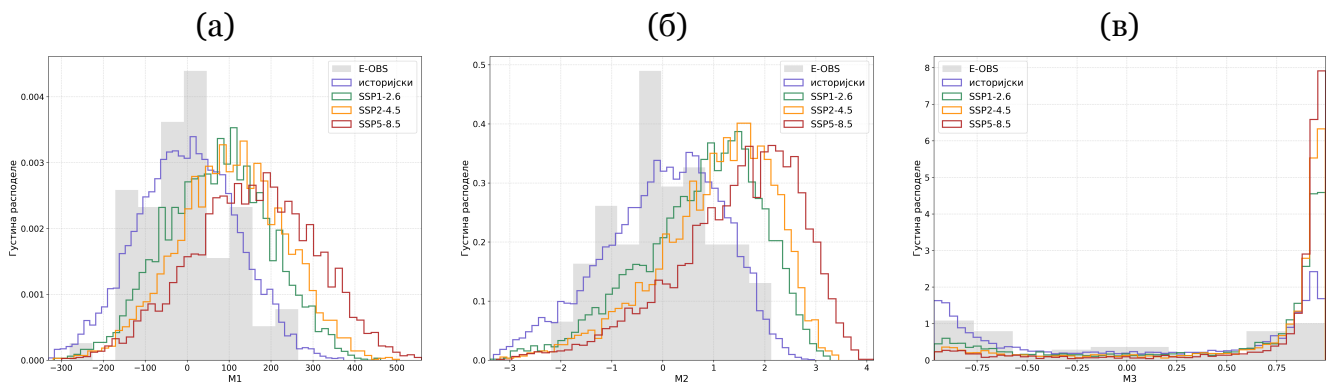
Слика 2.9: Временска еволуција аномалија дефицита падавина за период април–децембар (први ред, (а)–(в)) и летње аномалије температуре ваздуха (други ред, (г)–(ђ)) и аномалије дневних падавина (трећи ред, (е)–(з)), за осмотрени догађај (испрекидана зелена линија) и аналогне догађаје из MPI-GE у различитим SSP сценаријима и три метрике. Представљене су вредности добијене израчунавањем средње дневности у 10-дневном прозору за температуру. Различите боје представљају различите сценарије (историјски, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5).

засновани на M2 метрици не треба да се тумаче као једна „типична“ путања развоја суше, већ као скуп могућих сценарија са сличном брзином интензивирања, али различитим почетним условима дефицита падавина и тренутку у години у коме суша започиње, као и

по температурним условима у којима се она развија. Овај резултат показује да је природна варијабилност пресудна за разумевање суша у региону Србије и да она може значајно модификовати манифестацију екстремних догађаја чак и у оквиру истог климатског сценарија.

### 2.3.4 Промене у метрикама дефицита падавина у различитим сценаријима

Анализа хистограма приказаних на слици 2.10 указује на повећање учесталости повишених аномалија дефицита падавина у сценаријима са вишим емисијама гасова стаклене баште. У историјском периоду, аномалије средњег дефицита падавина у периоду од августа до октобра углавном су концентрисане око малих вредности, при чему се поједине године јављају као веома сушне или влажне, док је већина година блиска нултим вредностима или окарактерисана умереним дефицитом падавина (слика 2.10 (а, б)).



Слика 2.10: Хистограм релативне фреквенције метрике 1 (а), метрике 2 (б) и метрике 3 (в) према подацима из историјског периода и будућих пројекција (сценарија SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) резултата MPI-GE великог ансамбла. Пуне линије представљају процене густине расподеле за сваки сценарио. Хистограм за осмотрене догађаје је приказана у позадини као осенчена област.

У свим сценаријима уочава се померање расподеле ка вишим (позитивним) вредностима и најизраженије је у сценарију SSP5-8.5 (слика 2.10 (а, б)), што значи израженије и чешће дефиците падавина, али и већа варијабилност (неке године са екстремним дефицитом падавина). Хистограм временске корелације аномалија кумулативног дефицита падавина између суше из 2012. године и њених аналога (слика 2.10 (в)) указује на њихову све већу сличност у будућности. Ово сугерише да су догађаји суше симулирани помоћу MPI-GE за наредне деценије све сличнији по својој временској еволуцији и интензитету екстрему из 2012. године.

Приступ који су предложили ван дер Вил и сарадници [103] за сушу 2018. године у сливу реке Рајне показао се корисним и репликабилним и за друге регионалне суше. Великим ансамблом је обухваћена магнитуда осмотреног екстремног догађаја, а одабраним аналогним догађајима успешно се идентификују услови суше блиски осмотреним вредностима из 2012. године, потврђујући робусност методе. Резултати показују да се очекује да

ће суше сличне онима из 2012. године постати чешће и интензивније у условима континуираног загревања, посебно у сценаријима са већим емисијама (SSP5-8.5).

Резултати ове студије су у складу са претходним студијама које су се бавиле сушом у Србији и ширем медитеранском региону у условима климатских промена [95]. Резултати су усклађени са закључцима Сипела и Ота [100] о суши из 2012. године у Југоисточној Европи и Циндрића и сарадника [128], који су спровели анализу ове суше за Хрватску. У поређењу са претходним анализама заснованим на индексима суше, као што су SPEI и SPI [88, 33, 107], овај приступ мотивисан осмотреним догађајем обухвата временски развој суша и омогућава детаљније истраживање варијабилности током и између догађаја.



# 3

## Атрибуција екстремних догађаја

### 3.1 Увод у атрибуцију екстремних догађаја

#### 3.1.1 Дефиниција детекције и атрибуције

Иако су климатске промене несумњиво утицале на временске прилике и климатске екстреме [15], и постоје општа очекивања заснована на глобалним аспектима климатских промена, може се јавити локално одступање од тог општег понашања. Током било ког датог временског периода, природна варијабилност климе такође игра важну улогу у променама екстрема, те се намеће питање у којој је мери дати догађај заправо последица климатских промена услед антропогеног утицаја и како ће ове појаве изгледати у будућности? Добро разумевање проблематике природних промена климе важно је за објашњавање потенцијалних, будућних климатских екстрема, изазваних природним процесима и/или антропогеним активностима. Да ли ће се одређени екстрем појављивати ређе или чешће услед климатских промена које су последица антропогених активности? Да ли ће постати мање или више вероватан у будућности?

Према IPCC извештају [129], закључује се да је форсирање услед антропогеног утицаја допринело промени у фреквенцији и интензитету екстремних временских и климатских догађаја која је осматрена од средине 20. века. Приписивање ових промена у екстремима антропогеном утицају анализом различитих метода и скупова података назива се атрибуција екстремних догађаја. За разлику од детекције екстремних догађаја, којом се указује да се клима или нека компонента климатског система променила у статистичком смислу (без навођења разлога за ту промену), атрибуција подразумева процес при коме се процењују релативни доприноси фактора који су узрочници промене (приписујући тој промени одређени интервал поверења) [130]. Уопштено говорећи, компонента осматрене промене приписује се одређеним узрочним факторима (узроцима) ако се покаже да су осматрања у складу са резултатима модела заснованог на процесу који укључује тај узрочни фактор и да нису у складу са алтернативним, иначе идентичним, моделом који искључује овај фактор.

Приписивање осмотрених климатских промена није могуће без коришћења модела који описују однос између покретача климатских промена и посматраних променљивих. Пошто не можемо у реалности поставити експеримент у коме су антропогени или природни утицаји „искључени” на планети, неопходно је формулисати модел који омогућава постављање и квантитативну процену хипотеза о томе како би се климатски систем понашао у одсуству појединих форсирања, чиме обезбеђујемо процене очекиваних климатских одговора на антропогене и природне утицаје.

У пракси, модели који се користе за приписивање могу бити различите природе и разликовати се у нивоу сложености, физичком реализму и просторно-временској резолуцији. Најчешће се користе климатски модели опште циркулације, као и регионални климатски модели који омогућавају детаљнију симулацију процеса унутар ограниченог домена и којима се може експлицитно увести сигнал глобалног загревања у почетне и граничне услове [131, 132]. Поред динамичких модела, примењују се и статистички модели, који се ослањају на емпиријске односе између посматраних варијабли и спољашњих климатских форсирања. На пример, вишеструка линеарна регресија може да укључи низ телеконекија како би се проценио релативни утицај сваког фактора на променљиве од интереса [133].

### 3.1.2 Атрибуција екстремних догађаја на регионалним размерама

Регионално загревање се може објаснити и описати користећи термодинамичке законе и веома је добро проучено. Заједно са одговарајућим динамичким условима може довести до опасних појава у виду временских и климатских екстрема. У комбинацији са неклиматским антропогеним факторима рањивости и изложености таквим појавама, долази до стварања такозваног климатског утицаја (енг. climate impact).

Антропогени утицај на климатске промене је робусно детектован на глобалном нивоу [134], али за многе примене и студије утицаја, процена антропогеног доприноса постојећим трендовима климатских променљивих у неком одређеном региону је од велике користи. Међутим, детекција и атрибуција (приписивање) климатским променама на континенталним, националним и мањим размерама је знатно већи изазов него на глобалним јер шум постаје већи, а сигнал климатских промена слаби. Прво, релативни допринос унутрашње варијабилности у поређењу са одговором на спољашња форсирања на посматране промене је већи на мањим размерама, јер се просторне варијације на великим размерама могу поништити осредњавањем. Друго, пошто обрасци одговора на климатска форсирања имају тенденцију да буду великих размера [135], постоји мање просторних информација које би помогле у разликовању одговора на различите утицаје на регионалним размерама. Треће, утицаји изостављени у неким симулацијама глобалног климатског модела, нпр. промене у коришћењу земљишта постају важни на регионалним размерама. Коначно, симулирана унутрашња варијабилност и одговори на утицаје могу бити мање поуздани на мањим размерама него на глобалном нивоу. Детекција антропогеног утицаја на мањим просторним размерама је тежа због повећаног шума и неизвесности и нелинеарних веза на локалним размерама.

Када се разматрају ефекти климатских промена, морају се разликовати они који су повезани са чисто термодинамичким аспектима климатског система од оних који су по природи динамички. Термодинамичке промене су најчешће представљене величинама

које су углавном једноставне функције енергетског биланса климатског система, као што су средњи ниво мора, глобална и континентална температура ваздуха при тлу, количина морског леда или количина топлоте у горњим слојевима океана. Ове промене су генерално робусне, што значи да се јасно уочавају у осматрањима, теорији и у резултатима нумеричких модела. Међутим, регионални аспекти климатских промена – нарочито регионални режими падавина – у великој мери зависе од динамичких аспеката климатских промена повезаних са атмосферском и океанском циркулацијом. Управо ови динамички процеси су много мање робусни [15] и у осматрањима, и у теорији (због непотпуног знања о механизмима који их покрећу), и у резултатима модела (због процеса који се у моделима морају параметризовати). Термодинамичке промене имају снажан и јасан сигнал климатских промена, па доминирају над шумом унутрашње варијабилности. Динамичке промене имају много слабији сигнал и много већи шум, па је њихова атрибуција и предвиђање много теже.

Студије показују да се одговор атмосфере на климатске промене може боље разумети ако се сагледа као комбинација две компоненте: термодинамичке и динамичке. У пракси није тако једноставно издвојити ове две компоненте, с обзиром на то да су оне и у климатском систему повезане и нису међусобно независне. Обично се динамичка компонента дефинише тако да се подудара са унутрашњом варијабилношћу, док се термодинамичка компонента разматра као остатак, или се добија термодинамичка компонента у одсуству промена у циркулацији, а динамичка компонента је оно што остаје као остатак [136].

### 3.1.3 Атрибуција заснована на екстремном догађају који је осмотрен

Атрибуција климатским променама на основу осмотреног догађаја подразумева анализу специфичних, осмотрених временских или климатских догађаја како би се утврдило у којој мери су климатске промене изазване људским деловањем утицале на појаву таквог догађаја или његов интензитет [137]. Овај приступ се фокусира на разумевање узрочних фактора који условљавају одређене екстремне догађаје, као што су топлотни таласи, суше или поплаве, и на процену улоге антропогеног форсирања у овим догађајима. Метода пружа увид у то како климатске промене утичу на екстремне временске догађаје и резултати могу помоћи као полазна информација у осмишљавању стратегија управљања ризицима и прилагођавања. Коришћењем нумеричких и статистичких модела и података из осматрања, научници могу комбиновати различите приступе: статистичку процену промена вероватноће или интензитета, дијагностику атмосферске циркулације и повратних механизма, као и примену нумеричких експеримената који испитују осетљивост догађаја на измењене спољашње услове.

Екстремни временски или климатски догађаји као директни окидачи материјалних штета, поремећаја инфраструктурних система и губитака у пољопривреди, здрављу и екосистемима су најчешћи подстицај за студије атрибуције [137]. Полазна тачка је конкретан, осмотрени догађај – историјски екстрем који је оставио последице или је релевантан за одређено питање адаптације. Такав догађај служи као мотивациони и комуникациони оквир, јер се корисници и доносиоци одлука много лакше односе према конкретном догађају који је „реалан” (доживљен или осмотрен), него према апстрактним променама средњих вредности или повратних периода [137].

Полазак од конкретног, осмотреног догађаја омогућава да се атрибуција формулише као циљано и физички смислено питање, уместо као апстрактна анализа промена у дугорочним статистичким карактеристикама климе. Такав приступ омогућава да се сложеност климатског система сведе на ограничен скуп релевантних процеса и временских размера које су биле активне током самог догађаја. У том контексту, атрибуција се не односи само на промену учесталости екстрема у целини, већ и на промену услова под којима се конкретан догађај развио, укључујући термодинамичке и динамичке факторе који су га условили, што је чини релевантом у контексту управљања ризицима и прилагођавања, јер омогућава да се научни резултати директно повежу са стварним догађајима и последицама.

### 3.1.4 Методе атрибуције екстремних догађаја

Све методе атрибуције у општем случају укључују поређење осмотрених промена, симулираних под осмотреним утицајима, са контрафактуалном климом симулираном у одсуству свих или само неких компоненти антропогеног форсирања. Контрафактуални догађаји представљају хипотетичке догађаје који су контрадикторни осмотреним чињеницама. Њима се описују условне ситуације у форми: Ако се догађај  $X$  није догодио, онда се ни догађај  $Y$  не би догодио.

Поређење се може урадити или користећи статистичке методе и моделе, у ком случају се резултати исказују вероватноћом догађаја, или симулацијом еволуције догађаја у различитим условима (са различитим форсирањима) коришћењем глобалних или регионалних климатских модела. Прва метода се често назива пробабилистичка атрибуција догађаја, док се приступи који се фокусирају на развој догађаја под одређеним форсирањем називају сторилајн (енг. *storyline*).

Пошто је немогуће извршити статистичку анализу само једног догађаја, најчешће коришћени приступ за пробабилистичку атрибуцију је сврставање догађаја у класе [138]. Класа догађаја је група сличних догађаја истог типа (нпр. упоредиви топлотни таласи) за које се затим, коришћењем неке статистичке расподеле, израчунава вероватноћа и повратни период користећи податке из осматрања и симулација са и без климатских промена (добитних климатским моделима). Ова статистичка метода назива се пробабилистичка атрибуција, јер се утицај неког фактора на одређени догађај изражава променом вероватноће, или повратног периода, тог догађаја [139]. Конкретно, овим приступом се процењује да ли се и у којој мери вероватноћа класе догађаја променила услед присуства антропогеног форсирања (или неког другог форсирања). За осмотрени догађај, ефекат климатских промена може се изразити или у смислу измењене учесталости појаве догађаја са одређеним интензитетом или измењеног интензитета догађаја који има одређену учесталост у осмотреној клими. Ови модели су нарочито корисни када су потребни простији, транспарентни алати за процену утицаја појединачних форсирања, или када се анализирају специфични климатски индекси. Међутим, како је сваки екстремни догађај јединствен, сврставање догађаја у опште класе са њему сличним отежава атрибуцију климатским променама.

Уколико је временски или климатски догађај заиста екстреман у садашњој клими, онда су за то били неопходни неуобичајени климатски услови, што значи да су климатске промене само један део доприноса појави тог екстрема. Међутим, чак и мали допринос

неког фактора може имати огромне последице у контексту екстремних појава, услед нелинеарних механизма повратних спрега. Приступ сторилајн испитује улоге различитих фактора који доприносе томе да се екстремни догађај одвија на одређени начин, али не искључује природну варијабилност. Овај приступ фокусира се на физичке механизме који покрећу екстремне појаве и последице таквих услова. Сторилајн приступ је посебно коришћан за смањење грешака типа II, односно ситуација у којима се сигнал климатских промена погрешно одбацују као статистички нерелевантан, док истовремено омогућава избегавање претерано алармистичког тумачења резултата, односно смањује ризик од грешака типа I, које се односе на погрешно приписивање или прецењивање утицаја климатским променама [134].

### 3.1.5 Сторилајн метода

Иако коришћење SMILE, примењеног у претходном поглављу, омогућава процену вероватноће екстремних догађаја у различитим климатским условима, он не обезбеђује директну контролу над конкретном атмосферском циркулацијом која је довела до посматраног екстрема. Грешке у симулирању атмосферских образаца великих размера могу утицати на екстреме, на пример када модел не репродукује типичну синоптичку ситуацију која доводи до екстремних догађаја у одређеном региону [15].

У скорије време почео је да се развија нови метод атрибуције екстремних временских и климатских догађаја, који се не заснива на процени вероватноће догађаја, већ на анализи физички могућих и релевантних сценарија. Сторилајн је први пут описан у радовима [140, 15]. Основна идеја овог приступа јесте идентификација узрочно-последичног ланца фактора који су довели до конкретног догађаја, као и процена улоге сваког од тих фактора у његовом настанку.

Концептуално, сторилајн приступ је блиско повезан са начином на који људи интуитивно размишљају у контексту „шта ако” и „да је било другачије”. Уместо да се бави питањем да ли и када ће одређени ниво глобалног загревања бити достигнут, овај приступ разматра последице конкретне интервенције. На пример: *како би изгледала суша да није било климатских промена, или како би се исти догађај испољио у свету који је топлији за 2 °C?*

Посебан значај сторилајн приступа произилази из чињенице да је неизвесност у реакцији динамичке компоненте климатског система на климатске промене веома висока [15]. Атмосферска циркулација у средњим географским ширинама карактерише се снажним унутрашњом варијабилношћу и нелинеарним процесима, што отежава поуздану процену њених будућих промена. Сходно томе, сторилајн студије се фокусирају на конкретно стање или тип атмосферске циркулације који је довео до посматраног екстремног догађаја, и анализирају како би се исти тај динамички образац испољио у измењеним термодинамичким условима, услед глобалног загревања. Сторилајн приступ, стога, не пружа експлицитну процену вероватноће догађаја, већ испитује његову осетљивост на промене у стању климатског система.

На овај начин, елиминише се потреба за дефинисањем класе догађаја, а пажња се усмерава на појединачни, осматрени догађај. Догађај се затим поставља у различите климатске околности, као што су свет без антропогеног загревања или свет са појачаним глобалним загревањем, и испитује се како су те околности утицале на његов интензитет,

дужину трајања, област коју је захватио [141]. У оквиру сторилајн приступа, атрибуција екстремних догађаја се често спроводи условљавањем атмосферске циркулације великих размера како би се раздвојили динамички и термодинамички доприноси екстремном догађају [132]. Ограничавање условљавање атмосферске циркулације може се постићи на два основна начина: пасивно, коришћењем статистичких техника, и активно, применом нумеричких модела. У овој студији примењене су обе стратегије.

Статистичко ограничавање динамике реализовано је кроз декомпоновање променљивих вишеструком линеарном регресијом, чиме се варијабилност условљена циркулационим обрасцима третира као динамичка компонента, док се преостали сигнал интерпретира као термодинамички одговор климатског система на глобално загревање и резидуал повезан са регионалним процесима и нелинеарним ефектима. Овај приступ концептуално је сродан методама динамичког прилагођавања (енг. *dynamical adjustment*) [142, 143], које полазе од претпоставке да су дугорочне промене атмосферске циркулације у великој мери резултат унутрашње варијабилности. Концепт раздвајања динамичких утицаја и тумачења телеконекија примењен је у студији Кречмер и сарадника [133], који уводе каузалне мреже као оквир за анализу атмосферских телеконекија на основу осматрања и реанализе. Кроз експлицитно увођење експертског знања у структуру каузалне мреже, показали су да је могуће издвојити појединачне каузалне путање које повезују циркулационе обрасце великих размера са регионалним климатским аномалијама. Примену каузалног приступа у контексту екстремних догађаја и телеконекија представља и студија која анализира суше и пожаре у Борнеу, где се каузалним мрежама квантификују утицаји ENSO и SST аномалија у северном Пацифику на регионалне суше у летњој сезони [144]. Према резултатима ове студије, ризик од суша се повећава не само услед термодинамичког загревања, већ и кроз могуће промене у динамичким телеконекионим обрасцима, при чему недовољна репрезентација динамике у моделима може довести до потцењивања регионалних климатских ризика. Овај пример илуструје значај статистичког издвајања динамичких доприноса као предуслова за поуздану процену утицаја климатских промена на екстремне догађаје.

Затим је у истраживању примењен и приступ псеудо-глобалног загревања (енг. *pseudo-global warming*, PGW) као нумеричка имплементација сторилајн концепта [145, 131]. У PGW експериментима се исто синоптичко стање симулира у различитим термодинамичким условима, што омогућава директну процену утицаја глобалног загревања на интензитет и распрострањеност екстремног догађаја, док истовремено дозвољава краћи од типично коришћеног климатолошког периода ( $\sim 30$  година) као довољан за процену утицаја климатских промена [146]. PGW је веома успешно примењиван у анализама екстремних догађаја као што су тропски циклони, суше, топлотни таласи, екстремне падавине. У студијама које реконструишу тропске циклоне [147] помоћу PGW, показано је да глобално загревање доводи до значајног повећања интензитета тропских циклона (јачи максимални ветрови и нижи притисак у центру), док су промене путање и брзине кретања занемарљиве. PGW метод је такође коришћен у анализи екстремно сушних догађаја. На примеру суше на Тајвану из 2001. године [148] откривене су значајне варијације у сезонским падавинама на северу Тајвана. У анализи екстремних суша у западној и централној Европи [149], PGW је примењен као експлицитни сторилајн приступ, у којем је читав период 1980–2020 „померен“ у топлије услове, при чему је закључено да ризик од суше може значајно порастати чак и без промене у циркулацији, већ само услед термодинамичког загревања.

Комбиновањем статистички условљене атрибуције и PGW експеримената, ова докторска студија користи комплементарне методе сторилајн приступа за разумевање улоге климатских промена у настанку, развоју и интензитету екстремне суше у Србији током лета 2024. године.

## 3.2 Каузалност и узрочно закључивање

### 3.2.1 Основни принципи узрочног закључивања

У статистичком смислу, атрибуција подразумева идентификовање комбинације антропогених и природних сигнала која најбоље објашњава посматране промене. Методе засноване на корелацији и једноваријантној регресији су и даље најчешћи алати за анализу веза међу променљивим у климатском систему [150], и иако веома корисни у свакодневној пракси, пружају мало увида у узрочне механизме који леже у основи динамике система.

Наиме, у осматрањима однос између две променљиве ( $X$  и  $Y$ ) често је „контаминиран” утицајем других процеса који истовремено делују и на  $X$  и на  $Y$ . Такви процеси стварају статистичке корелације које могу личити на узрочност, али то нису. На пример, иако постоји јака корелација између осматреног пораста температура и моделом симулираног антропогеног форсирања, сама корелација између ове две променљиве није довољна за поуздану атрибуцију [151]. Неизвесност је последица присуства природних варијација и унутрашње варијабилности климатског система, које могу маскирати или појачати антропогени сигнал, стога је потребно контролисати постојање треће променљиве која би могла да доведе до лажних корелација или погрешног закључивања.

Узрочност се односи на везу између два догађаја где је један догађај (узрок) одговоран за појаву другог догађаја (последике). Методе узрочног закључивања имају за циљ откривање и квантификацију узрочних међузависности основног система. На пример, узрочност је кључна за боље разумевање микрофизичких процеса формирања облака [152], атмосферских телеконекција [133, 153, 144] као и за процену и побољшање физике климатских модела [154], али и при одређивању ефикасних стратегија коришћења земљишта и атрибуције екстремних догађаја путем контрафактуалних сценарија [155]. Узрочним закључивањем тежи се откривању узрочне структуре система и квантификацији утицаја појединачних процеса, комбиновањем експертског знања, модела машинског учења и климатских података.

У класичној статистици условна вероватноћа  $P(Y | X)$  описује како се променљива  $Y$  понаша када у посматраном скупу података променљива  $X$  има одређене вредности. Међутим, овај однос заснован је искључиво на осматрањима и не говори ништа о томе шта би се десило са  $Y$  када бисмо активно променили  $X$ . Насупрот томе, у узрочном закључивању желимо да одговоримо на питање: *како би изгледала расподела  $Y$  када бисмо систем присилно довели у стање  $X=x$ ?*

У теорији узрочног закључивања, утицај узрочног процеса ( $X$ ) на неки други процес ( $Y$ ), значи да било каквом интервенцијом у  $X$ , уз одржавање свега осталог фиксираним, мења расподелу  $Y$ . Такве (често хипотетичке) интервенција над системом се могу описати помоћу до-оператора [156, 133], па се математички то може представити расподелом  $Y$

када се  $X$  присилно постави на вредност  $x$  док се све остало држи непромењеним:

$$P(Y \mid \text{do}(X = x)). \quad (3.1)$$

при чему важи да

$$P(Y \mid X) \neq P(Y \mid \text{do}(X)). \quad (3.2)$$

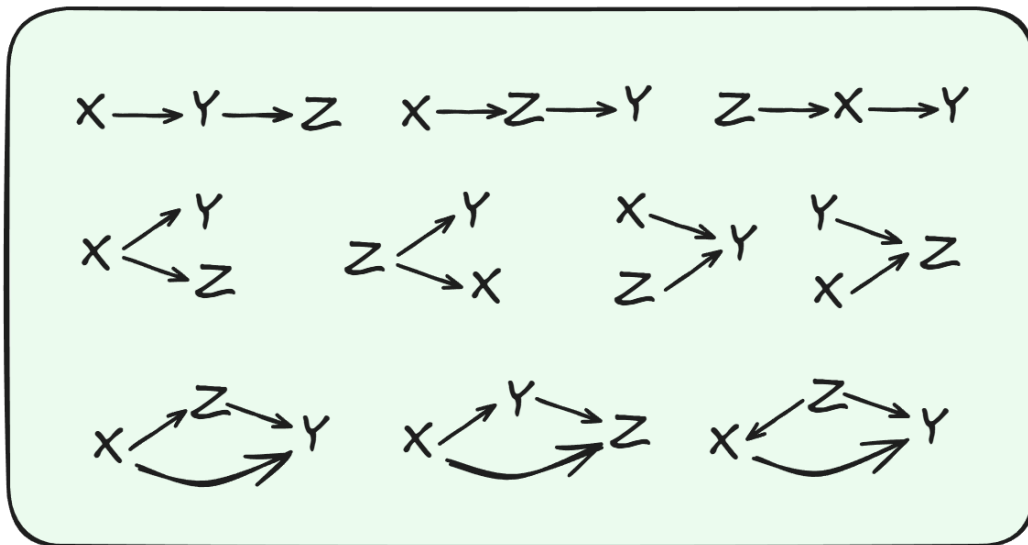
Осмотрена условна вероватноћа често садржи ефекте других процеса који могу да истовремено делују и на  $X$  и на  $Y$ , док  $\text{do}$ -оператор подразумева изолацију чисто узрочног ефекта. Ово представља математичку основу савремених приступа атрибуцији, где је циљ, на основу осматрања и модела, издвојити тачно онај део утицаја који одговара правом узроку, било да је реч о природним факторима, антропогеном форсирању или њиховој интеракцији.

### 3.2.2 Узрочне (каузалне) мреже

Код узрочног закључивања неопходно је најпре дефинисати веродостојни модел којим се могу описати узрочно-последичне везе међу појавама у сложеним системима, а који се графички може представити као узрочна мрежа помоћу структуре графа. Основна идеја која стоји иза узрочних (каузалних) мрежа јесте да свака променљива у систему има одређене непосредне узроке и одређене последице, и да те односе можемо формално математички описати помоћу директног ацикличног графа, у којем су чворови случајне променљиве (физички процеси или климатски индикатори), док стрелице описују усмерене узрочне везе.

На пример, ако све стрелице од неког чвора воде даље ка његовим потомцима, јасно је да тај чвор има узрочни утицај на њих; ако, међутим, два процеса имају заједнички узрок, биће статистички повезани чак и ако директна узрочна веза не постоји. На слици 3.1 су дијаграмом приказане могућности за узрочно повезивање три променљиве. Ради једноставности, како би се илустровале све могуће везе у примеру, уводе се још два ограничења. Прво, претпоставићемо да  $Y$  не може директно нити индиректно да узрокује  $X$ . На тај начин избегавамо повратне утицаје и кружне зависности који би нарушили здраворазумски критеријум за узрочност: да узрок мора да претходи последици, тј.  $X$  и  $Y$  не могу истовремено да претходе једно другом. Искључивање циклуса у графичким каузалним моделима не значи да у природи не постоје повратне спреге већ да оне увек морају укључити и временску компоненту, односно дешавају се кроз различите временске кораке, а не у истом тренутку. Друго, разматраћемо само оне конфигурације у којима је свака променљива повезана са бар још једном променљивом чиме се елиминишу тривијални случајеви изолованих чворова.

Свака узрочна мрежа се састоји од комбинација ланаца ( $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ ), виљушки ( $Y \leftarrow Z \rightarrow X$ ) и структура судара ( $X \rightarrow Z \leftarrow Y$ ). Док информације теку дуж ланаца и виљушки, што значи да је присутна статистичка повезаност (тј. корелација)  $X$  и  $Y$ , оне су „блокиране” заједничким ефектом  $Z$  у структури судара, што имплицира статистичку независност  $X$  и  $Y$  (тј. одсуство корелације). Када се контролише променљива  $Z$  у прва два случаја (тј. медијатор у ланцу или заједнички покретач у виљушки), што је исто што и блокирање тока информација,  $X$  и  $Y$  постају независни условно од  $Z$ . Насупрот томе, контролисање заједничког ефекта  $Z$  у структури судара „отвара” иначе блокиран пут од  $X$  до  $Y$  и уводи статистичку повезаност између  $X$  и  $Y$  условно од  $Z$ .



Слика 3.1: Приказ основних конфигурација узрочног повезивања три променљиве: ланца ( $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ ), виљушке ( $Y \leftarrow Z \rightarrow X$ ) и структуре судара ( $X \rightarrow Z \leftarrow Y$ ). У циљу поједностављења анализе, претпоставља се да променљива  $Y$  не може ни директно ни индиректно да узрокује  $X$ , чиме се искључују повратне везе и кружне зависности које би нарушиле основни критеријум узрочности, према коме узрок мора временски да претходи последици. Приказане су искључиво конфигурације у којима је свака променљива повезана са бар једном другом променљивом, чиме се елиминишу тривијални случајеви изолованих чворова.

Узрочне мреже омогућавају и јасну разлику између осмотрене условне вероватноће  $P(Y | X)$  и вероватноће  $P(Y | do(X))$  која описује како би систем реаговао када бисмо активно променили  $X$ . Ова разлика је фундаментална: условне вероватноће произилазе из корелација које су последица и узрочних и неузрочних (конфундирајућих) утицаја. Управо су узрочне мреже неопходне како бисмо формално одредили које променљиве треба „држати под контролом” да бисмо елиминисали утицај неузрочних фактора и добили прави узрочни ефекат.

У климатологији и за истраживања повезана са климатским променама почеле су се користити тек недавно [157]. Док климатским системом управљају сложени физички закони изражени кроз диференцијалне једначине, узрочне мреже пружају комплементарну слику о узрочно-последичним везама у климатском систему. Није неопходно (нити би било могуће) представити читав климатски систем таквом мрежом. Њихова улога није да замене климатске моделе, већ да идентификују и разјасне који су узрочни путеви релевантни за одређено питање атрибуције. Каузалне мреже имају значајну практичну улогу: омогућавају експлицитно формулисање експертског знања у структури графа. У климатском систему, где су процеси међусобно сложено повезани и где су експерименти у реалном свету практично немогући, каузалне мреже омогућавају да се знање о физичким механизмима формализује на начин који је усклађен са теоријом вероватноће и статистичким методама. Због ових особина, узрочне мреже постале су важан алат у анализи климатских екстрема, телеконекција, динамике атмосферских процеса, процени доприноса природних и антропогених фактора, као и у контрафактуалним анализама. Оне омо-

гућавају да се сложени системи разложе на јасно дефинисане узрочно-последичне, што значајно побољшава интерпретабилност анализа, смањује ризик од погрешне атрибуције и омогућава доследно и транспарентно извлачење узрочних закључака из осматрања.

### 3.2.3 Каузалност у контексту атрибуције климатских екстрема

Време у области средњих и виших географских ширина (укључујући екстремне догађаје) у великој мери је одређено нелинеарним динамичким интеракцијама између млазне струје, међусезонских осцилација и нискофреквентних модова варијабилности. Ови динамички процеси нису у потпуности савршено представљени ни у најновијим резултатима климатских модела. Због тога је разумевање начина на који спољашња форсирања и обрасци циркулације одређују време кључно за побољшање (суб)сезонских прогноза, евалуацију климатских модела и смањење неизвесности у регионалним климатским пројекцијама. Приступ детекције и атрибуције квантификују доказе за узрочну везу између спољашњих форсирања климатских промена и дугорочних промена климатских променљивих. Циљ је прво идентификовати промену (детекција), а затим приписати ту промену (атрибуција) доприносима антропогених и природних утицаја, као и унутрашњој варијабилности климе. Таква истраживачка питања захтевају „контрафактуалне светове” [150], који се најчешће конструишу помоћу климатских модела, а затим статистички анализирају.

У раду Ханарта и сарадника [158] представљена је узрочна контрафактуална теорија у контексту атрибуције екстремних догађаја. Узрочност се дефинише коришћењем контрафактуалне логике, која се заснива на идеји да је догађај  $Y$  узрокован догађајем  $X$  ако и само ако би у свету где се  $X$  не би догодио, и догађај  $Y$  би изостао. Контрафактуални услови се односе на хипотетичке могућности које описују шта би било истинито да су околности око неког догађаја биле другачије. Узрочно закључивање нам онда помаже да одговоримо на питања као што су:

- Како би се променили температурни екстремни када би се загревање услед антропогеног дејства уклонило?
- Како ENSO утиче на регионалне падавине када су ефекти других телеконекција контролисани?

У том контексту, до-оператор има директну интерпретацију као „активна интервенција”, односно контрафактуални свет. На пример:

$$P(Y \mid \text{do}(\text{GHG} = 0)) \quad (3.3)$$

представља расподелу екстремног догађаја у свету без утицаја гасова стаклене баште (GHG).

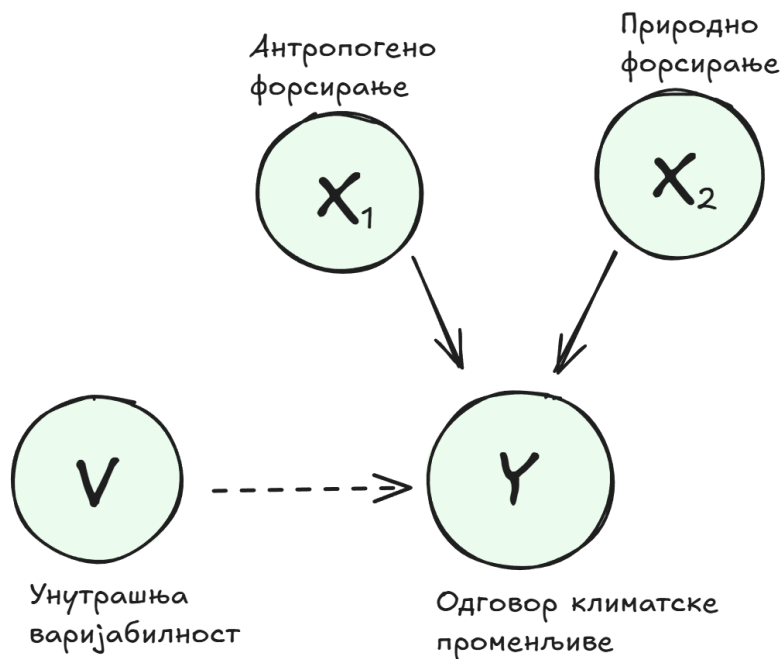
Следећи Ханарта и сараднике [158], каузални приступ атрибуцији екстремних догађаја структуриран је у неколико јасних фаза. Овај оквир уноси логичку строгост у процес атрибуције и једнозначно дефинише шта је „узрок”, а шта „последница”. Први корак је јасно дефинисати догађај од интереса помоћу климатске променљиве. Дефиниција мора бити усклађена са каузалним питањем које се поставља – нпр. „Како антропогено загревање утиче на вероватноћу овог догађаја?” Затим се формулише каузални граф тј. узрочна

мрежа који представља очекиване физичке односе између спољашњих форсирања (нпр. глобално загревање), осталих природних процеса (нпр. циркулациони обрасци) и самог екстремног догађаја. Даље се спроводе експерименти, у виду нумеричких симулација којима се конструишу различити светови:

- стварни свет, нпр. са антропогеним форсирањем (енг. *factual world*),
- контрафактуални свет, без поменутог форсирања (енг. *counterfactual world*),

или се на основу вишеструке линеарне регресије процењују доприноси сваког од фактора. Иако вишеструка линеарна регресија може да идентификује везе између променљивих, њоме се суштински не пружају информације о узročности.

Коришћење узрочних мрежа, чиме се „скицирају” хипотетичке узрочне везе између променљивих, омогућава тумачење коефицијената регресије у узрочном контексту, под условом да су основне узрочне претпоставке веродостојне. Ово подразумева идентификовање и контролу променљивих које би могле утицати и на независне и на зависне променљиве, чиме се изолује узрочно-последична веза која је од интереса за проучавање. Пример такве узрочне структуре приказан је на слици 3.2, где је одговор климатске променљиве моделиран као резултат комбинованог деловања антропогеног и природног форсирања, као и унутрашње варијабилности климатског система. Док су спољашња форсирања експлицитно представљена као детерминистички покретачи система, унутрашња варијабилност је означена испрекиданом линијом како би се нагласила њена стохастичка природа и чињеница да она није директно подложна контролисању или интервенцијама, већ уноси варијабилност око форсираног одговора.



Слика 3.2: Шематски приказ узрочне мреже која илуструје утицаје различитих извора форсирања на одговор климатске променљиве.

### 3.3 Климатска варијабилност, циркулациони обрасци и избор студије случаја

#### 3.3.1 Модови климатске варијабилности и телеконеције релевантне за Србију

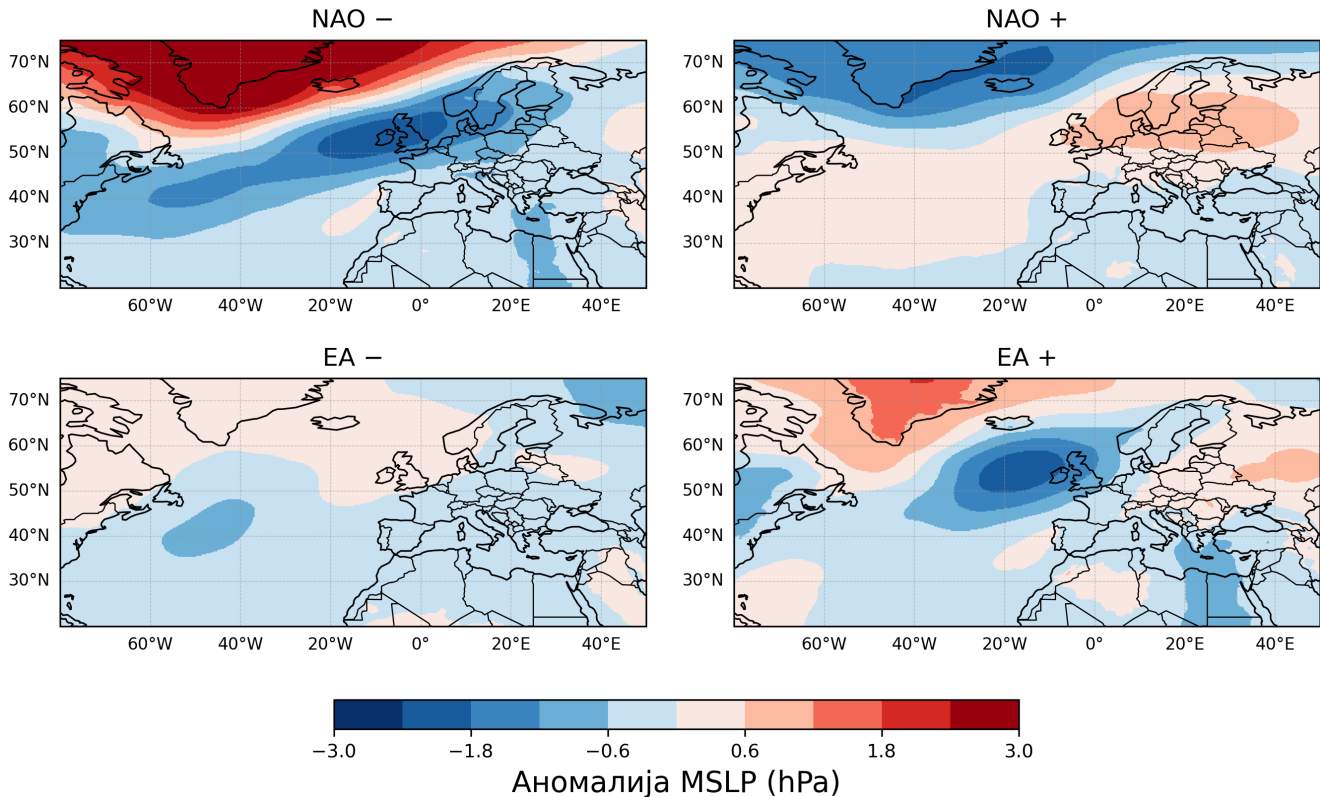
Међусобне интеракције компоненти климатског система заједно са спољашњим форсирањима, генеришу промене у средњем стању климе на различитим временским размерама – од сезонских и међугодишњих, до декадних и вишедекадних, условљавајући тиме време и климу на Земљи. Значајан део ове варијабилности организован је у периодичне обрасце познате као модови климатске варијабилности. Ови модови, најчешће се издвајају статистичком анализом података из осматрања и резултата климатских модела и представљају се временском серијом у виду климатског индекса. Истовремено, многи модови испољавају јасне телеконеције, тј. статистички значајне корелације између промена одређених величина на физички удаљеним областима, што омогућава да се њихово стање прати преко климатских аномалија на специфичним локацијама или путем просторних образаца у пољу атмосферске циркулације. Захваљујући својој стабилној структури и повезаности са екстремним временским појавама, модови климатске варијабилности представљају кључни концепт у разумевању и предвиђању регионалних климатских утицаја.

Модови климатске варијабилности најчешће се описују помоћу индекса, односно временских серија којима је квантитативно представљено стање и интензитет образаца циркулације. Индекси се могу тумачити као промене у пољу атмосферског притиска или других метеоролошких величина које одговарају једној стандардној девијацији варијације датог мода. Флукуације ових индекса одражавају међугодишње и декадне промене у атмосферским процесима великих размера и стога су кључни за разумевање варијабилности климе.

У области северног Атлантика, најзначајнији мод је северноатлантска осцилација (North Atlantic Oscillation, NAO) [159, 160], док источноатлантски (East Atlantic, EA) такође има важну улогу у региону [161]. NAO је диполарни мод, који се карактерише распоредом аномалија приземног притиска између два центра, Исланда и Азора. Дефинише се као разлика аномалија притиска на нивоу мора између локација које се налазе у области Исландског минимума и Азорског антициклона: Лисабон/Понта Делгаде на Азорима и Стикишхоулмур/Рејкјавик на Исланду. Израчунава се применом статистичких метода као што је анализа главних компонената, примењених на поље притиска на нивоу мора или 500-hPa геопотенцијалних висина [159]. Источноатлантски образац представља други по значају мод варијабилности у северноатлантском региону са центрима који су померени југоисточно у односу на NAO центре акције. EA у појединим случајевима представља доминантан мод у односу на NAO регионалним одзивом, нарочито у јужној Европи и Медитерану.

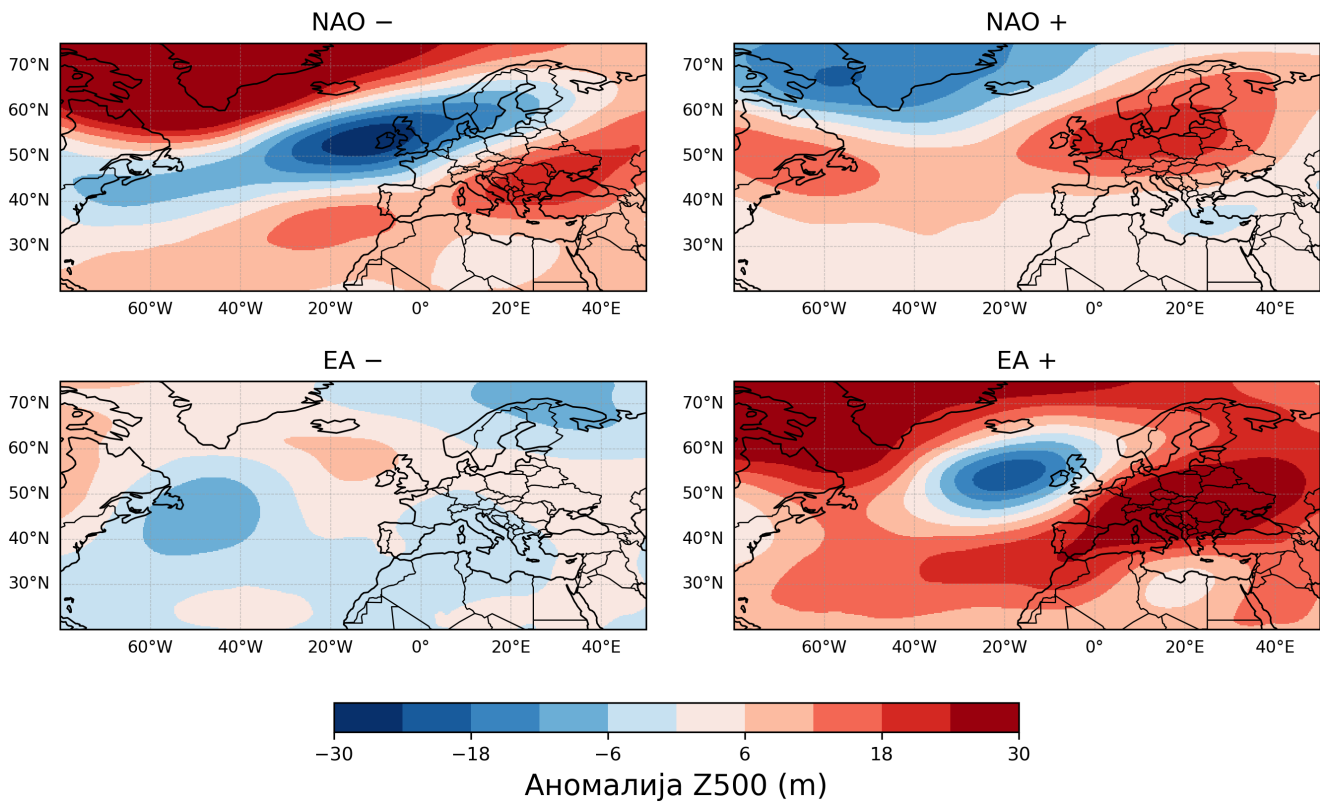
Просторни обрасци композита аномалија геопотенцијалних висина на 500 hPa и притиска на нивоу мора у летњој сезони (JJA) у складу су са познатим манифестацијама летњих фаза NAO и EA индекса и приказани су на сликама 3.3 и 3.4. Промене у фази и интензитету NAO значајно утичу на атмосферску циркулацију у области северног Атлан-

тика, као и на транспорт топлоте и влаге, положај и интензитет млазне струје, путање циклona и фреквенцију блокирајућих антициклона. Позитивна фаза летњег NAO индекса повезана је са температурама виших од просечних у северозападној Европи, централној Канади, северно-централном делу САД и деловима северне Африке, и нижим од просечних у медитеранском региону, јужном делу САД, северном Мексику и области Гренланда [162]. Што се тиче падавина, већа је вероватноћа сувљих услова у северозападној Европи, североисточној Канади и Сахелу у Африци, и интензивнијих падавина у Медитерану и деловима јужног Гренланда и Исланда. Када је летњи NAO индекс знатно испод нормале (негативна фаза), услови су углавном супротни у Европи, са повећаном вероватноћом да северозападна Европа буде хладнија и влажнија.



Слика 3.3: Композити аномалија притиска на нивоу мора (MSLP) током летње сезоне (ЈЈА) за негативну и позитивну фазу Северноатлантске осцилације (NAO) и Источноатлантског мода (EA). Негативна и позитивна фаза дефинисане су на основу доњег и горњег терцила расподеле одговарајућих ЈЈА индекса, при чему су у композитима укључене само године са негативним, односно позитивним вредностима индекса. Горњи ред приказује NAO- и NAO+, а доњи ред EA- и EA+ композите.

Позитивна фаза EA (EA+) индекса током лета повезана је са јачањем и ширењем Азорског антициклона и благим негативним аномалијама притиска на нивоу мора над североисточним Атлантиком (Атлантски гребен), али јасно израженим у пољу геопотенцијала на 500 hPa (слика 3.4). То доводи до позитивних температурних аномалија у скоро целој Европи и натпросечним падавинама (влажнији услови) у северној Европи и Скандинавији, али исподпросечним падавинама (сушнији услови) у јужној Европи и Медитерану. Супротно, у негативној фази (EA-), EA образац је повезан са развојем Атлантске долине, која може утицати на положај и интензитет Азорског антициклона. Ова фаза повезана је

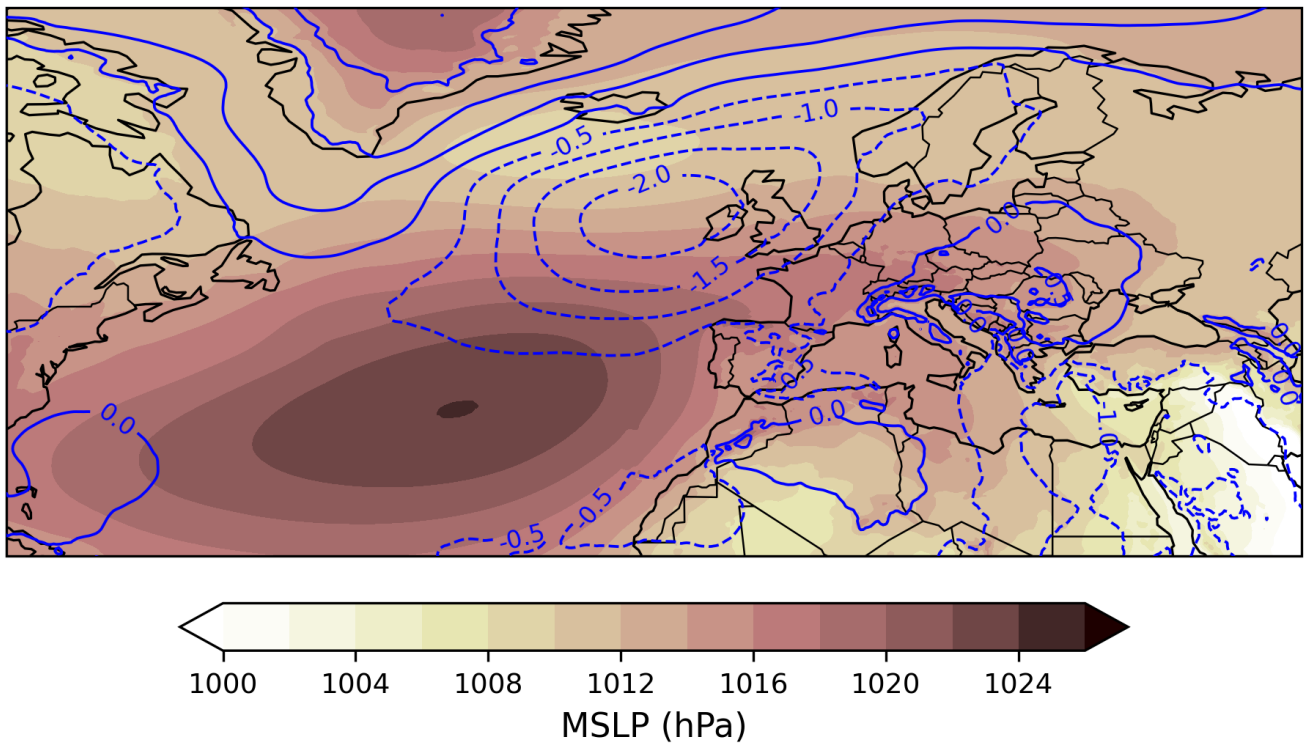


Слика 3.4: Композити аномалија геопотенцијала на 500hPa током летње сезоне (ЈЈА) за негативну и позитивну фазу Северноатлантске осцилације (NAO) и Источноатлантског мода (EA). Негативна и позитивна фаза дефинисане су на основу доњег и горњег терцила расподеле одговарајућих ЈЈА индекса, при чему су у композитима укључене само године са негативним, односно позитивним вредностима индекса. Горњи ред приказује NAO– и NAO+, а доњи ред EA– и EA+ композите.

са температурама испод просека у већем делу Европе и већом количином падавина. Појачана циклонска активност је осматрана изнад источног Медитерана и региона Црног мора. Слично као и за NAO, EA индекс може бити дефинисан применом анализе главних компоненти.

Србија се налази у региону где обрасци циркулације Северног Атлантика снажно утичу на промене температуре, падавина и суше, посебно током зимске и летње сезоне. Анализа корелација климатских променљивих и климатских индекса из ранијих истраживања урађеним за податке са метеоролошких станица [32, 163] указује да су индекси температурних екстрема у Србији најјаче повезани са EA током зиме, пролећа и лета, док је утицај NAO доминантнији током зиме. Негативна фаза EA у зимском периоду условљава већи број хладних ноћи и дана мрза [163], док позитивна фаза, када је циркулација на висини изнад Европе скоро потпуно зонална, утиче на повећање топлих дана и ноћи у топлом делу године. Током лета, позитиван EA омогућава продор сувог и топлог ваздуха са северне Африке ка Балкану, што доводи до учесталијих топлотних таласа и суша, као што је био случај 2000, 2003, 2007. и 2024. године.

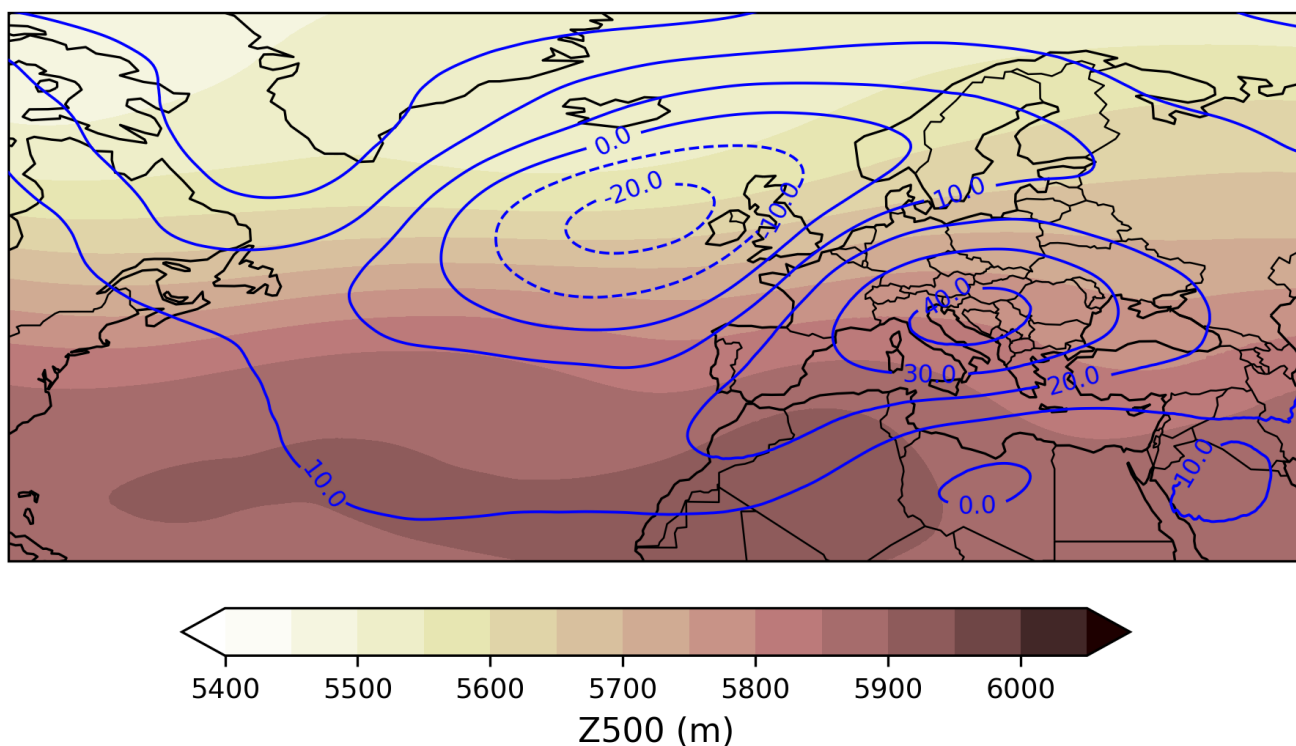
Екстремно сушни и влажни периоди често су одређени флукуацијама у циркулационим обрасцима великих размера, те је неопходно испитати утицај телеконекција и



Слика 3.5: Композит вредности притиска на нивоу мора (MSLP) током летње сезоне (ЈЈА) за екстремно сушне године у Србији, дефинисане просечном вредношћу за целу област када је SPEI-6а < -2. Нијансама смеђе боје су представљени композити вредности MSLP, док плаве контуре представљају аномалије у односу на референтни период 1961–1990. Композит је заснован на следећим сушним годинама: 1950, 1952, 1990, 2000, 2003, 2007, 2011, 2012, 2017, 2022. и 2024.

проценити њихов допринос екстремним догађајима. Композит притиска на нивоу мора (слика 3.5) и геопотенцијалне висине на нивоу 500 hPa (слика 3.6) током летње сезоне (ЈЈА) за екстремно сушне године у Србији показују позитивну аномалију над југоисточном и централном Европом, са максимумом који обухвата Балканско полуострво. Позитивне аномалије геопотенцијалне висине на нивоу 500 hPa одражавају јачање и проширење гребена високог притиска, што доводи до појачаног спуштања ваздуха (субсиденције), адијабатског загревања и инхибиције развоја конвекције. Као последица тога, стварају се услови повољни за постојане високе температуре и дефицит падавина, што је у складу са идентификованим екстремно сушним условима над Србијом.

На основу описаних телеконекција релевантних за климатску варијабилност и екстремне догађаје у Србији, намеће се потреба да се њихов утицај на регионалне климатске аномалије не посматра само кроз статистичку повезаност (корелација), већ и као систем међусобно повезаних узрочно-последичних процеса. Као друга студија случаја, са још израженијим екстремним карактеристикама у односу на лето 2012. године, одабрана је суша из 2024. године, која се користи за примену атрибуције засноване на осмотреном догађају. С обзиром на јаку повезаност источноатлантског обрасца и северноатлантске осцилације са температурним и падавинским екстремима у Србији, посебно током летње сезоне, ови модови природно представљају кандидате за анализу динамичке компоненте суше.



Слика 3.6: Композит вредности геопотенцијала на 500hPa током летње сезоне (ЈЈА) за екстремно сушне године у Србији, дефинисане просечном вредношћу за целу област када је SPEI-6a < -2. Нијансама смеђе боје су представљени композити вредности геопотенцијала на 500hPa док плаве контуре представљају аномалије у односу на референтни период 1961–1990. Композит је заснован на следећим сушним годинама: 1950, 1952, 1990, 2000, 2003, 2007, 2011, 2012, 2017, 2022. и 2024.

Истовремено, дугорочни тренд пораста температуре указује на значај термодинамичког форсирања повезаног са глобалним загревањем.

Корак ка дубљем разумевању механизма којима циркулациони обрасци великих размера утичу на промене у падавинама, температури и интензитету суше у Србији, јесте коришћење концепта каузалности и узрочног закључивања. У том контексту, Кречмер и сарадници [133] развили су једноставан приступ за разјашњавање односа између различитих телеконекција и њихових ефеката. Он омогућава да се имплементацијом експертског знања о регионалној клими, и коришћењем узрочних мрежа идентификују заједнички узрочни фактори и изолују директни и посредни утицаји на одређени метеоролошки или климатски догађај. За анализу суше, која зависи и од температуре и од дефицита у падавинама, различити обрасци атмосферске циркулације могу имати различите утицаје на сваку од ових компоненти. Интеграција каузалног приступа тиме представља природан корак ка атрибуцији екстремних догађаја, јер атрибуција у основи тражи одговор на питање шта је узроковало одређену аномалију или екстрем, а не само са чим је она статистички повезана.

Иако статистички приступи засновани на узрочним мрежама и вишеструкој линеарној регресији омогућавају квантификацију релативних доприноса појединих телеконекција и термодинамичког форсирања у осматраним временским серијама, они сами по себи не могу у потпуности да разреше питање физичке узрочности. Посебно статистичке

везе могу бити условљене заједничким узроцима или прикривеним зависностима између циркулационих образаца и локалних климатских аномалија. Због тога је у овом раду статистичко–каузални метод допуњен нумеричким експериментима псеудо-глобалног загревања (PGW), који омогућавају физички конзистентно раздвајање термодинамичког и динамичког доприноса екстремном догађају. У PGW приступу, атмосферска циркулација се задржава приближно непромењеном, док се термодинамичка компонента климатског система модификује у складу са сигналом глобалног загревања. На тај начин, PGW експерименти омогућавају директно тестирање утицаја повећане температуре на појаву, интензитет и дужину трајања екстрема, независно од промена у циркулацији. Комбиновањем ова два приступа, статистичке каузалне анализе засноване на осматрањима и нумеричких експериментата, ова студија омогућава робусну интерпретацију узрока екстремно сушног и топлог лета 2024. године у Србији. Такав приступ је у складу са концептом снажно условљене атрибуције [138], у којем се улога атмосферске циркулације експлицитно узима у обзир, али се истовремено раздваја од термодинамичког сигнала климатских промена.

### 3.3.2 Студија случаја: екстремно топло лето 2024. године

Екстремно топло и сушно лето 2024. године у Србији представља изузетно погодан догађај за примену комбинованог статистичког и нумеричког метода атрибуције. Година 2024. била је глобално најтоплија у историји мерења, на основу шест међународних скупова података, што је потврдила и Светска метеоролошка организација [164]. Година 2024. је била најтоплија у историји мерења за Европу, а такође и за Србију.

Изузетно сушна летња сезона у комбинацији са дуготрајним топлотним таласима који су достигали и до 40°C погодила је Србију 2024. године. Ова сушна сезона је погодила пољопривреду, водне ресурсе, шуме, енергетику, здравље, захвативши целу територију Србије, дуготрајно и интензивно. У Србији су током целог лета температурне аномалије биле знатно изнад просека. Пре тога, лето 2012. било је најтоплије у историји, али лето 2024. је надмашило чак и историјско лето 2012. Полазећи од описаних механизма климатске варијабилности и њихових телеконекција релевантних за Србију, као и од екстремних климатских услова који су обележили лето 2024. године, ова студија има за циљ да разјасни физичке узроке настанка и интензитета овог догађаја, кроз следећа истраживачка питања:

- Како се екстремно топло и сушно лето 2024. године у Србији уклапа у контекст дугорочне климатске варијабилности и трендова температуре и падавина?
- Који је допринос доминантних образаца атмосферске циркулације у северноатлантском региону (NAO и EA) варијабилности температуре, падавина и индекса суше у Србији, и како су ови доприноси модулирали екстрем лета 2024. године?
- У којој мери дугорочно термодинамичко форсирање повезано са порастом глобалне средње температуре доприноси порасту интензитета и учесталости екстремно топлих и сушних услова у Србији?
- Како би интензитет екстремно топлог и сушног лета 2024. године у Србији изгледао у климатским условима без антропогеног загревања?

## 3.4 Коришћени подаци и методологија рада

### 3.4.1 Осматрања и реанализа

Подаци о температури и падавинама потребни за израчунавање индекса суше SPEI-6 за август преузети су из скупа осматраних података E-OBS за период 1950–2024. E-OBS је коришћен као референтни извор за анализу регионалних сушних услова и идентификацију екстремно сушних година, док је његов детаљан опис дат у Поглављу 2. Израчунате су средње температуре и средње месечне суме падавина за летњу сезону (ЈЈА) и за сезону март–август (МAMЈЈА).

За потребе ове докторске дисертације коришћени су подаци из глобалне реанализе ERA5, која је један од продуката Европског центра за средњорочну прогнозу времена (ECMWF). ERA5 представља најновију генерацију реанализа која обезбеђује конзистентан приказ атмосферских, копнених и океанских услова. Реанализе комбинују нумерички модел атмосфере са подацима из осматрања из различитих извора (метеоролошких станица, радиосондажних мерења, авиона, сателита) да би се формирао глобално потпун, хомоген и временски конзистентан скуп података.

ERA5 подаци су доступни као сатни, дневни или месечни и на просторној резолуцији од  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  ( $\sim 9$  km). Висока хоризонтална резолуција омогућава детаљнију репрезентацију атмосферских процеса, посебно оних који су од кључног значаја за анализу екстремних временских догађаја и променљивости климе. У овом раду коришћене су средње месечне вредности променљивих из реанализе [165]: средњи притисак на нивоу мора и геопотенцијал на 500 hPa. За потребе PGW експеримената из архиве ECMWF преузете су 6-часовне вредности [166] на просторној резолуцији од  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  ( $\sim 50$  km) поља: геопотенцијала, меридионалне и зоналне компонента ветра и релативне влажност на стандардним изобарским нивоима: 925, 850, 700, 600, 500, 250, 50 hPa, као и температуре површине мора.

Коришћене су месечне временске серије индекса телеконекције: индекс северноатлантске осцилације (NAO) и индекс источноатлантске осцилације (EA), преузети са портала *Climate Explorer*. Индекси су израчунати као део оперативних производа Центра за климатске предикције (Climate Prediction Center, CPC) Националног центра за предикцију времена (NOAA). Индекси се израчунавају помоћу анализе ротирајућих главних компоненти (енг. *Rotated Principal Component Analysis* — RPCA) [159] користећи поље 500-hPa аномалија геопотенцијала у области  $20^\circ$  N –  $90^\circ$  N, са референтним периодом 1950–2000. Индекси су бездимензиони и стандардизовани.

Температура је кључни показатељ стања климатског система, а средња глобална температура Земље (GMST) је фундаментална величина која служи за карактеризацију и разумевање климатских промена. У овој дисертацији коришћена је временска серија аномалије GMST као индикатор сигнала климатских промена ради процене утицаја антропогенних активности на појаву и интензитет екстремних климатских догађаја. Аномалија GMST преузета је из базе података Met Office Hadley Centre-а, односно из најновије верзије глобалног сета података HadCRUT5 [167]. Подаци су доступни за период од 1850. до 2024. године, при чему су аномалије израчунате у односу на референтни климатолошки период 1961–1990.

### 3.4.2 Подаци из глобалног климатског модела MPI-ESM1.2-LR

За конструкцију експеримената псеудо-глобалног загревања (PGW) коришћени су резултати из глобалног климатског модела MPI-ESM1.2-LR (CMIP6), који су већ детаљно описани у претходном поглављу. У овом поглављу се наводе само променљиве и временска резолуција коришћени у PGW поступку. Коришћене су следеће месечне вредности променљивих

- температура површине тла ( $t_s$ ),

и на стандардним нивоима притиска:

- геопотенцијална висина ( $z$ )
- зонална компонента ветра ( $u$ )
- меридионална компонента ветра ( $v$ )
- специфична влажност ( $hus$ ),

за период 1850–2100, из реализације модела r11r1f1. Ове месечне временске серије коришћене су за израчунавање климатолошких средњих вредности и конструкцију климатског сигнала.

### 3.4.3 Конструисање каузалне мреже

Суша је сложен климатски догађај који настаје услед комбинованих ефеката дефицита падавина и повећане евапотранспирације услед повишених температура. Као таква, условљена је интеракцијама између атмосферске циркулације великих размера, регионалних термодинамичких услова и процеса који укључују интеракцију тло-атмосфера. Ова сложеност суше је мотивација за употребу узрочно-последичног оквира којим се експлицитно представљају односи између потенцијалних покретача и климатских променљивих повезаних са сушом помоћу узрочне мреже.

Конструкција узрочне мреже у овој студији се ослања на статистичке асоцијације (корелације) и физичке механизме утврђене претходном литературом [32, 163, 71] и истраживачком дијагностиком заснованом на анализи атмосферских поља и климатских индекса. Примарне променљиве које се разматрају укључују стандардизовани падавинско-евапотранспирациони индекс (SPEI) као индикатор суше, обрасце циркулације великих размера представљене северноатлантском осцилацијом (NAO) и источноатлантским обрасцем (EA), и аномалију средње глобалне температуре (GMST) као индикатора глобалног загревања (термодинамичке компоненте).

Позитивна или негативна фаза NAO и EA индекса повезана је са променама у положају и интензитету западних струјања и циклонске активности, што утиче на продоре топлог или хладног ваздуха ка југоисточној Европи. У складу са наведеним физичким механизмима, у овој дисертацији испитује се просторна повезаност индекса NAO и EA са перцентилским температурним индексима анализираним у Поглављу 1 (TX90p, TN90p, TX10p и TN10p), као и са индексом суше SPEI-6.

Просторна повезаност између индекса телеконекија (ЕА, NAO), аномалије средње глобалне температуре и индекса суше SPEI-6 анализирана је применом Пирсоновог коефицијента корелације. Корелације су израчунате за сваку просторну тачку над територијом Србије, користећи временске серије августовских вредности. Статистичка значајност процењена је *t*-тестом на нивоу значајности од 5%. Оваква дијагностика пружа увид у доминантне режиме циркулације повезане са сувим и влажним условима и помаже у идентификацији чланова и њихових веза у каузалној мрежи. Не користи се за директно закључивање узрочности, већ за конструисање хипотетичке узрочне мреже.

С обзиром на то да SPEI интегрише ефекте и температуре и падавина, поред мреже формулисане за SPEI, процес суше се даље разлаже на своје примарне компоненте конструисањем одвојених узрочних мрежа за температуру и падавине. Ова декомпозиција омогућава да се утицај образаца циркулације великих размера и термодинамичког форсирања испита одвојено за сваку компоненту.

Добијене узрочне мреже се стога састоје од мреже која повезује климатске индексе и променљиве са SPEI и две комплементарне мреже које повезују исте покретаче са температуром и падавинама појединачно. Ове мреже чине концептуалну основу за квантитативну анализу представљену у следећем одељку, где се вишеструка линеарна регресија користи као практична имплементација за процену релативних доприноса појединачних чланова узрочне мреже одређеном догађају.

#### 3.4.4 Вишеструка линеарна регресија

Како би се проценили релативни доприноси варијабилности условљене атмосферском циркулацијом (динамичка компонента) и термодинамичким форсирањем условима суше у Србији, коришћена је вишеструка линеарна регресија (енг. *Multilinear regression*, MLR). Фокус је на анализи летње сезоне, током периода 1950–2024. Временске серије свих променљивих су просторно осредњене за Србију.

Вишеструка линеарна регресија је примењена пратећи приступ Кречмер и сарадника [133] у којем су избор предиктора у каузалној мрежи и интерпретација коефицијената регресије вођени разумевањем физичких механизма телеконекија. У овој студији, као предиктори користе се GMST, EA и NAO. GMST се користи као представник термодинамичких промена повезаних са глобалним загревањем, док индекси EA и NAO представљају динамичку компоненту. Најпре је као показатељ суше коришћен индекс SPEI-6 за август (SPEI-6a), што је мотивисано чињеницом да овај индекс добро одражава осетљивост развоја усева на кумулативне услове влажности и температуре током лета. SPEI-6 за август има веома високу корелацију са годишњим одступањима приноса кукуруза у Србији [88, 168], те се показао као посебно добар индикатор производње кукуруза. Како би се обезбедила временска конзистентност између индекса суше и индекса циркулације великих размера, за NAO, EA и GMST су стога такође узете вредности за август.

Како би се проценила осетљивост резултата регресије и декомпозиције тренда на дужину анализираниог периода, методологија је примењена на два различита временска периода: 1950–2024 и 1975–2024. Дужи период обухвата вишедеценијску варијабилност, док краћи период скреће пажњу на период израженијег загревања. Да би се раздвојили допринос развоју суше услед циркулације од осталих фактора, примењује се вишеструка линеарна регресија. Пре регресије, све променљиве (SPEI6a, NAO, EA и GMST) су линеарно

детрендоване и потом стандардизоване. Детрендовање је извршено како би се обезбедило да коефицијенти регресије представљају односе у међугодишњој варијабилности, а не да су под утицајем заједничких дугорочних трендова. Као резултат тога, коефицијенти регресије могу се тумачити као „чисте” парцијалне осетљивости, које описују како годишње варијације у SPEI-6а реагују на флукуације у сваком предиктору, независно од осталих. Све временске серије су стандардизоване уклањањем вишегодишњег сезонског просека и дељењем са вишегодишњом стандардном девијацијом, израчунатим за целе анализирани период. Стандардизација је примењена како би се омогућило директно поређење релативног значаја предиктора, при чему коефицијенти регресије представљају промену у SPEI-6а повезану са променом од једне стандардне девијације у сваком предиктору. Користећи детрендоване и стандардизоване временске серије, вишеструком линеарном регресијом добијена је једначина:

$$\text{SPEI-6a}' = \beta_{EA} EA' + \beta_{NAO} NAO' + \beta_{GMST} GMST' + \varepsilon \quad (3.4)$$

где ' означава детрендоване и стандардизоване променљиве. Укључивање GMST као предиктора омогућава да се коефицијенти циркулације ( $\beta_{EA}$ ,  $\beta_{NAO}$ ) прилагоде за истовремену термодинамичку варијабилност великих размера.

Затим се квантификује колико се посматрана дугорочна промена у SPEI-6а може приписати трендовима у појединачним предикторима. Коефицијенти регресије изведени из детрендованих вредности комбинују се са осмотреним трендовима из оригиналних временских серија стандардизованих предиктора. Линеарни трендови су прво израчунати за EA, NAO и GMST током оба анализирани периода. Допринос тренду SPEI-6а који је посредован циркулацијом је затим процењен као збир производа коефицијената циркулације и њихових одговарајућих трендова:

$$\Delta \text{SPEI-6a}_{\text{dyn}} = \beta_{EA} \Delta EA + \beta_{NAO} \Delta NAO \quad (3.5)$$

Овим је представљен део тренда SPEI-6а повезан са систематским променама у атмосферској циркулацији великих размера. Преостали део осмотреног SPEI-6а тренда, добијен одузимањем доприноса посредованог циркулацијом од укупног тренда, интерпретиран је као нециркулациони резидуал:

$$\Delta \text{SPEI-6a}_{\text{res}} = \Delta \text{SPEI-6a}_{\text{obs}} - \Delta \text{SPEI-6a}_{\text{dyn}} \quad (3.6)$$

Овај резидуал обухвата термодинамичке утицаје повезане са антропогеним загревањем, као и друге процесе који нису експлицитно представљени индекси EA и NAO. Добијена декомпозиција пружа дијагностичко раздвајање доприноса варијабилности суше, формирајући основу за атрибуциону анализу. Надовезујући се на дијагностичку декомпозицију примењену на SPEI-6а, метод заснован на регресији примењује се на летњу (ЈЈА) температуру и падавине како би се конструисали физички интерпретабилни „наративи” за екстремно лето 2024. године у Србији. Док анализа заснована на SPEI пружа интегрисану метрику суше, раздвајање температуре и падавина омогућава експлицитније тумачење термодинамичких и циркулацијом вођених доприноса и омогућава поређење са симулацијама псеудоглобалног загревања.

Сезонска средња температура и сезонске акумулиране аномалије падавина израчунате су за ЈЈА сезону одузимањем климатолошког просека за период 1961–1990. Слично као у претходном поступку, све променљиве (осим GMST) су линеарно детрендоване, а затим стандардизоване, користећи податке за период 1950–2024. Пратећи уобичајену праксу у студијама атрибуције, како би се смањио утицај међугодишње варијабилности и изоловао сигнал спољашњег форсирања, за представљање глобалног загревања уобичајени избор је аномалија GMST осредњена у четворогодишњем прозору (GMST<sub>4y</sub>)[139]. Добијени коефицијенти се затим користе за формирање различитих веродостојних наратива, условљених претпоставкама о стању атмосферске циркулације и глобалног загревања.

Затим су направљена три експеримента за издвајање компоненти варијабилности из климатских променљивих којима се описује суша. У првом експерименту се изолује компонента варијабилности променљиве посредована циркулацијом, под претпоставком да сигнал повезан са GMST представља термодинамички одговор на спољашње форсирање. Прво је направљена једначина линеарне регресије за ЈЈА аномалије температуре и падавина у зависности од GMST<sub>4y</sub>:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_{GMST} GMST_{4y_t} + Y_t^{\text{resid}}, \quad (3.7)$$

где је  $Y_t$  сезонска аномалија температуре или падавина,  $Y_t^{\text{resid}}$  представља варијабилност која није објашњена спољашњим форсирањем и претпоставља се да првенствено одражава унутрашњу климатску варијабилност. Потом је користећи MLR направљена једначина за  $Y_t^{\text{resid}}$  у којој су регресори EA и NAO:

$$Y_t^{\text{resid}} = \beta_1 + \beta_{EA} EA_t + \beta_{NAO} NAO_t + \varepsilon_t. \quad (3.8)$$

Свака преостала варијанса ( $\varepsilon_t$ ) се третира као шум или као резултат процеса који нису представљени кроз EA и NAO.

У другом експерименту је утицај EA и NAO на аномалије температуре и падавина прво уклоњен вишеструком линеарном регресијом:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_{EA} EA_t + \beta_{NAO} NAO_t + Y_t^{\text{resid}}. \quad (3.9)$$

Резидуали из ове регресије су затим регресовани на GMST.

$$Y_t^{\text{resid}} = \beta_1 + \beta_{GMST_{4y}} GMST_t + \varepsilon_t. \quad (3.10)$$

Овиме се изолује термодинамички допринос повезан са глобалним загревањем под условима када су EA и NAO неутрални.

У трећем експерименту, GMST, EA и NAO су истовремено укључени као предиктори у један модел користећи MLR.

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 GMST_{4y_t} + \beta_2 EA_t + \beta_3 NAO_t + \varepsilon_t \quad (3.11)$$

Ова конфигурација пружа свеобухватну процену колико добро комбиновани скуп покретача објашњава посматрану варијабилност летње температуре и падавина и служи као провера конзистентности у односу на експерименте секвенцијалне регресије.

Користећи коефицијенте регресије изведене из детрендованих и стандардизованих аномалија, конструисани су физички конзистентни и веродостојни сценарији (сторилајн) селективним варирањем подскупова предиктора, док су остали фиксирани. Овај условни оквир омогућава наративе у стилу атрибуције без укључивања вероватноће догађаја. Важно је напоменути да су коефицијенти процењени из детрендованих података како би представили сензитивност у међугодишњој варијабилности, али су примењени на стандардизоване вредности предиктора. Студија случаја изузетно топлог и сувог лета 2024. у Србији коришћена је за илустрацију овог приступа.

Термодинамичка компонента изолована је фиксирањем индекса атмосферске циркулације (ЕА и NAO) на њихове климатолошке средње вредности, односно на нулу у стандардизованом простору, док је аномалија GMST подешена на осмотрену вредност из 2024. године. Овај сценарио изолује утицај загревања под условима неутралне циркулације. На супрот томе, динамичка компонента је издвојена фиксирањем GMST на преиндустријски ниво, док су индекси ЕА и NAO подешени на своје осмотрене вредности из 2024. године. Овај сценарио представља исход под осмотреном циркулацијом у одсуству термодинамичког сигнала глобалног загревања. Коначно, сценарио у којем су GMST, ЕА и NAO подешени на своје осмотрене вредности из 2024. године представља референтни, односно стварни случај, који одговара реалним климатским условима под којима се екстремни догађај развио.

Ради олакшања поређења са PGW симулацијама, доприноси засновани на регресији изражени у стандардизованим јединицама конвертовани су у физичке јединице множењем са осмотреном стандардном девијацијом одговарајуће променљиве.

### 3.4.5 Експерименти псеудо-глобалног загревања

Термин псеудоглобално загревање [145] односи се на приступ у нумеричком моделирању климе, мотивисан осмотреним екстремним догађајем, у коме се регионалним климатским моделом симулира појединачни временски догађај под измењеним климатским условима. Овај приступ се заснива на модификацији почетних и бочних граничних услова историјске симулације, дефинисане на основу реанализе, чиме се омогућава испитивање утицаја климатских промена уз задржавање реалистичне синоптичке еволуције догађаја [131]. За разлику од класичне динамичке регионализације, у којој се излазни резултати глобалних климатских модела директно користе као почетни и гранични услови регионалног модела ради постизања боље просторне резолуције, PGW приступ користи глобалне климатске моделе за издвајање сигнала климатских промена. Тај сигнал се затим додаје или одузима од почетних и бочних граничних услова регионалног модела дефинисаних реанализом. На овај начин, исти временски или климатски догађај може бити симулиран у различитим климатским стањима, као што су контрафактуални свет без антропогеног загревања и будући, знатно топлији климатски услови, што омогућава процену улоге термодинамичких промена у настанку и интензитету екстремних појава. Шематски приказ целокупног поступка дат је на слици 3.7.

Изузетност климатских услова током 2024. године, која се огледала у рекордно високим температурама на глобалном, континенталном и националном нивоу, као и у интензивној летњој суши у Србији, чини ову годину посебно погодном за детаљну анализу улоге климатских промена у настанку екстремних догађаја. У том контексту, PGW приступ

омогућава да се исти догађај из 2024. године анализира у различитим стањима климатског система.

Симулирана су три експеримента, које се могу тумачити као три различита света:

- *Factual*: Стварни свет, који представља свет какав познајемо са постојећим климатским променама
- *Counterfactual*: Контрафактуални свет, који је дефинисан као замишљени свет без антропогеног форсирања
- *Plus4K*: Плус 4 свет је свет који би могао бити са глобалним загревањем од 4 степена у поређењу са преиндустријским периодом.

Експерименти су изведени коришћењем модела EBU-POM [169], регионалног климатског модела развијеног на Институту за метеорологију, Физичког факултета Универзитета у Београду. EBU-POM је оригинално развијен као потпуно двосмерно повезани модела атмосфере, тла и океана, где атмосферску компоненту чини EBU модел (заснован на Eta/NCEP моделу), док океанску компоненту чини Пристонски модел океана (Princeton Ocean Model - POM) [170, 171]. У овом истраживању, EBU-POM је примењен у атмосферској (неповезаној) конфигурацији, при чему је температура површине мора (SST) преузета као доњи гранични услов из реанализе. Просторно разлагање модела је  $0.25^\circ$  ( $\sim 27$  km), са 7 вертикалних нивоа у атмосфери и временским кораком од 90 секунди. Период интеграције је 1. 1. 2024. – 31. 12. 2024. године. Као почетни и бочни гранични услови неопходни за симулацију контролног експеримента („стварни свет”) регионалним климатски моделом EBU-POM, коришћени су 6-часовни подаци из ERA5 реанализе.

За PGW експерименте, ERA5 поља су модификована суперпонирањем климатског сигнала ( $\Delta$ , тзв. делте климатских промена) добијеног из глобалног климатског модела MPI-ESM1.2-LR који је описан у поглављу 2.2.1. Модификована су поља: геопотенцијална висина, зонална компонента ветра, меридионална компонента ветра, специфична влажност, на стандардним нивоима притиска и температура површине тла. Најпре су подаци из глобалног климатског модела методом билинеарне интерполације представљени на мрежу ERA5 референтног поља. Делта поља су израчуната као разлика између климатолошких средњих вредности за одговарајуће временске периоде и референтног периода 2015–2034:

1) контрафактуални експеримент

$$\Delta X_{CF} = X_{1881-1900} - X_{2015-2034} \quad (3.12)$$

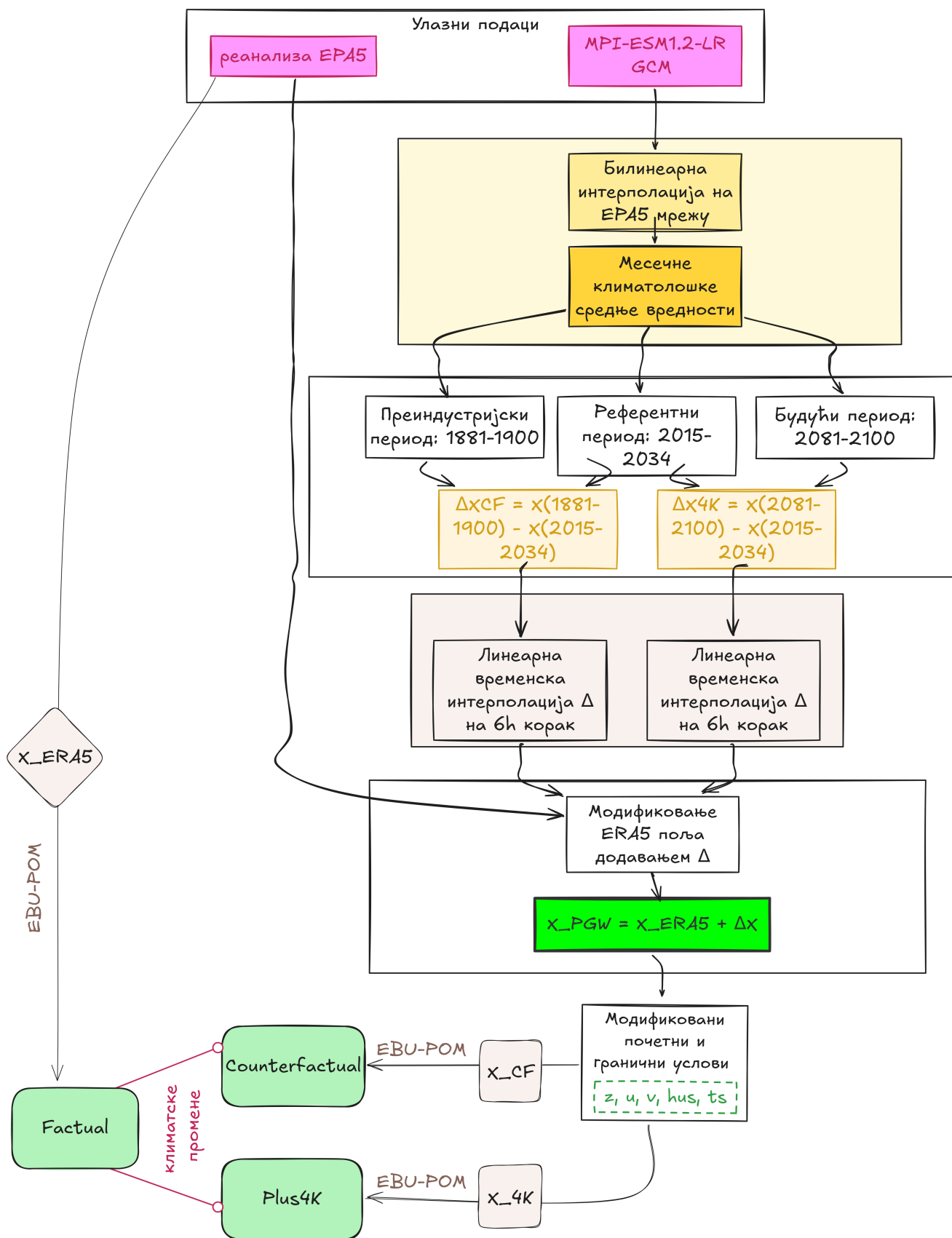
2) свет са променом средње глобалне температуре +4 K

$$\Delta X_{4K} = X_{2081-2100} - X_{2015-2034} \quad (3.13)$$

Потом су месечне климатологије временски интерполисане на 6-часовни корак, како би могле бити суперпониране на ERA5 поља. Модификовани почетни и бочни гранични услови добијени су као:

$$X_{PGW} = X_{ERA5} + \Delta X \quad (3.14)$$

За историјску интеграцију, концентрације гасова стаклене баште преузете су из скупа података који су описани у раду [172], а који садржи реконструисане историјске концентрације гасова стаклене баште. За будуће SSP сценарије, коришћене су концентрације дефинисане у [173], као репрезентативне концентрације гасова стаклене баште у оквиру CMIP6 пројекта. Подаци су преузети са ESGF портала као део званичног MIP скупа улазних података. Иако су доступне глобалне вредности, у овом истраживању су коришћене концентрације дефинисане за северну хемисферу, у складу са поставком модела и доменом симулације. Фајлови садрже годишње вредности концентрација следећих компоненти: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CFC-11, CFC-12.



Слика 3.7: Шематски приказ поступка конструисања PGW почетних и бочних граничних услова.

## 3.5 Резултати

### 3.5.1 Карактеризација лета 2024. године у Србији

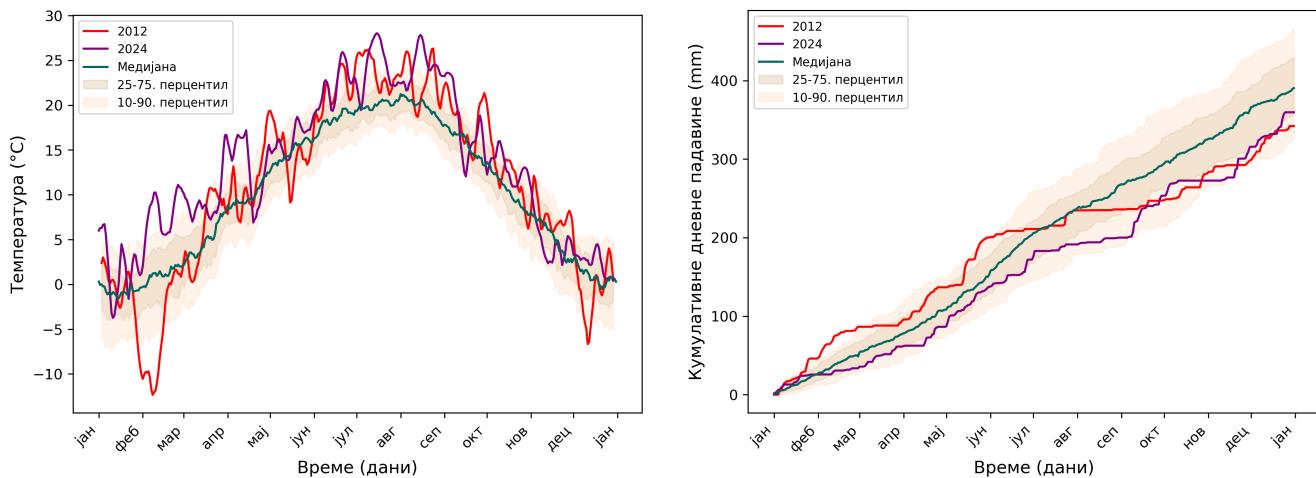
Иако се суше често дефинишу на основу трајања, краткотрајни сушни периоди могу имати подједнако озбиљне последице као и дуготрајне суше уколико се јаве током критичних фаза развоја усева. Овај аспект је од посебног значаја за пољопривредне области, као што је Србија, где су поклапања сушних услова и осетљивих фенофаза биљака кључни фактор губитака у приносу. Слично примерима из других региона [174], чак и релативно кратке, али интензивне летње суше могу резултирати значајним економским и друштвеним последицама.

Према Поглављу 2, анализа сушних услова у Србији, заснована на SPEI указује да је интензитет летњих суша у великој мери условљен порастом температуре, док су промене у укупним количинама падавина мање изражене. Овај резултат је у складу са општим климатским сигналом у региону југоисточне Европе, где се термодинамички утицај глобалног загревања испољава кроз појачано испаравање, што доводи до интензивирања сушних услова чак и у одсуству снажног негативног тренда падавина. Сличан механизам је идентификован и у хидролошким студијама за Европу. У раду Масарија и сарадника [175] показано је да током дугогодишњих суша дефицити протицаја у бројним сливовима постају знатно већи управо услед појачаног испаравања него што би се очекивало само на основу дефицита падавина. Ово појачано испаравање изазвано је повећаном потражњом влаге у атмосфери услед повишених температура ваздуха, па чак и у условима релативно умерених промена у падавинама загревање може нелинеарно интензивирати метеоролошке и хидролошке суше.

Резултати анализе података из осматрања и регионалних климатских модела, представљени у Поглављу 1 ове дисертације, додатно потврђују доминантну улогу температуре, показујући значајне позитивне трендове у учесталости како индекса температурних екстрема, тако и композитних екстремних догађаја који обухватају истовремено веома топле и суве дане. Ови трендови су превасходно условљени систематским померањем целе температурне расподеле ка вишим вредностима, уз истовремено повећање њене дисперзије, што указује на већу варијабилност и чешћу појаву екстремно топлих година. Иако су дугорочни трендови падавина слабији и просторно хетерогени, анализа летње сезоне у Србији указује на изражене промене у сезонском режиму падавина, са тенденцијом ка учесталијим и интензивнијим сушним епизодама. Ове сезонске промене указују на то да ће летњи период у будућој клими бити обележен већим ризиком од суше, посебно када се дефицит падавина поклопи са температурним екстремима.

С обзиром на то да пољопривредни губици у великој мери могу да зависе од временски кратких, али критичних сушних епизода током летње сезоне, [174] разумевање директног утицаја климатских промена на интензитет оваквих догађаја представља питање од јасног друштвеног и економског значаја. Овај аспект чини сушу из 2024. године посебно погодним случајем за примену сторилајн и PGW приступа у анализи утицаја климатских промена.

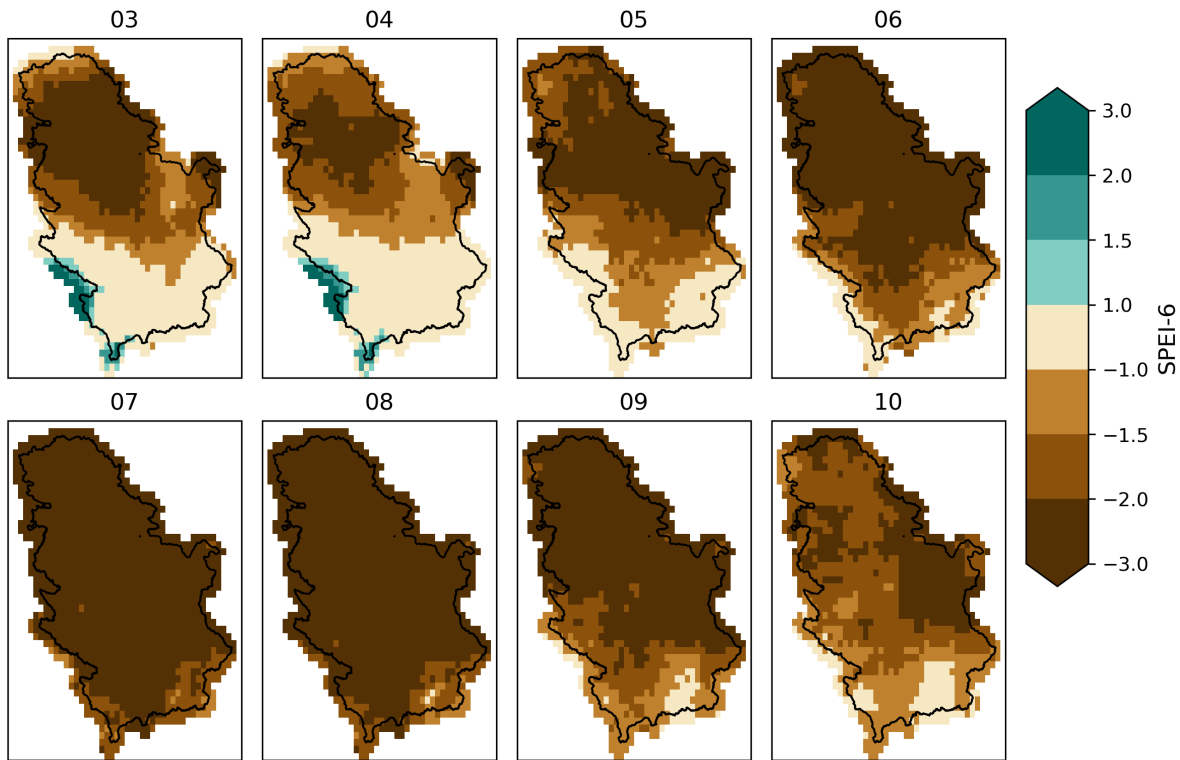
Према подацима E-OBS-а, аномалије средње дневне температуре су одређеним данима биле више и за 10°C у односу на климатологију за период од 1950. до 2020. године. Поред тога, почетак године (до маја) 2024. године био је неуобичајено топао (слика 3.8



Слика 3.8: Просторно осредњене временске серије (а) средње дневне температуре за летњу сезону (ЈЈА), приказане као средња вредност у петодневном прозору, и (б) дневне кумулативне падавине, у Србији. За сваку променљиву приказана је медијана, вредности за 2012. и 2024. годину, као и интерквartilни опсег (25–75. перцентил) и опсег варијабилности (10–90. перцентил), израчунати на основу референтне климатологије за период 1950–2020. године.

(а)), што је поставило основу за појаву летњих екстрема. Након кишног периода у мају, уследио је продужени сушни период. Укупне падавине су биле између 10. и 25. перцентила у фебруару, а од јуна до средине септембра, кумулативне падавине су константно остајале испод медијане, иако не испод 10. перцентила (слика 3.8 (б)). У поређењу са 2012. годином, дефицит падавина у 2024. години био је изразитији, посебно до средине септембра. SPEI за август је био у категорији *Екстремна суша* на подручју готово целе земље у јулу и августу, мада су сушни услови преовладавали у свим месецима од марта до октобра (слика 3.9).

Анализа индекса телеконекције (табела 3.1) указује да атмосферска циркулација током 2024. године није представљала екстремно или историјски изузетно стање, већ је у великој мери била унутар опсега природне варијабилности. NAO је имао умерене месечне флукуације, са вредностима које се смењују између слабо позитивних и слабо негативних фаза током године. Ни у једном месецу не бележе се изразито екстремне вредности NAO индекса, што указује да циркулациони услови повезани са NAO нису били атипични у односу на историјску расподелу. EA током већег дела године имао је претежно позитивне вредности, са израженијим аномалијама током пролећних и летњих месеци, посебно у јулу и августу. Иако су ове вредности релативно високе, оне и даље остају унутар историјске варијабилности EA индекса.



Слика 3.9: Месечна еволуција SPEI-6 индекса у Србији за 2024. годину. Сваки панел одговара једном месецу (од марта до октобра), приказујући просторне варијације у интензитету суше на основу SPEI-6 вредности. Позитивне вредности (зелене нијансе) означавају влажније услове од просечних, док негативне вредности (смеђе нијансе) представљају сувље услове од просечних.

Табела 3.1: Месечне вредности NAO и EA индекса за 2024. годину

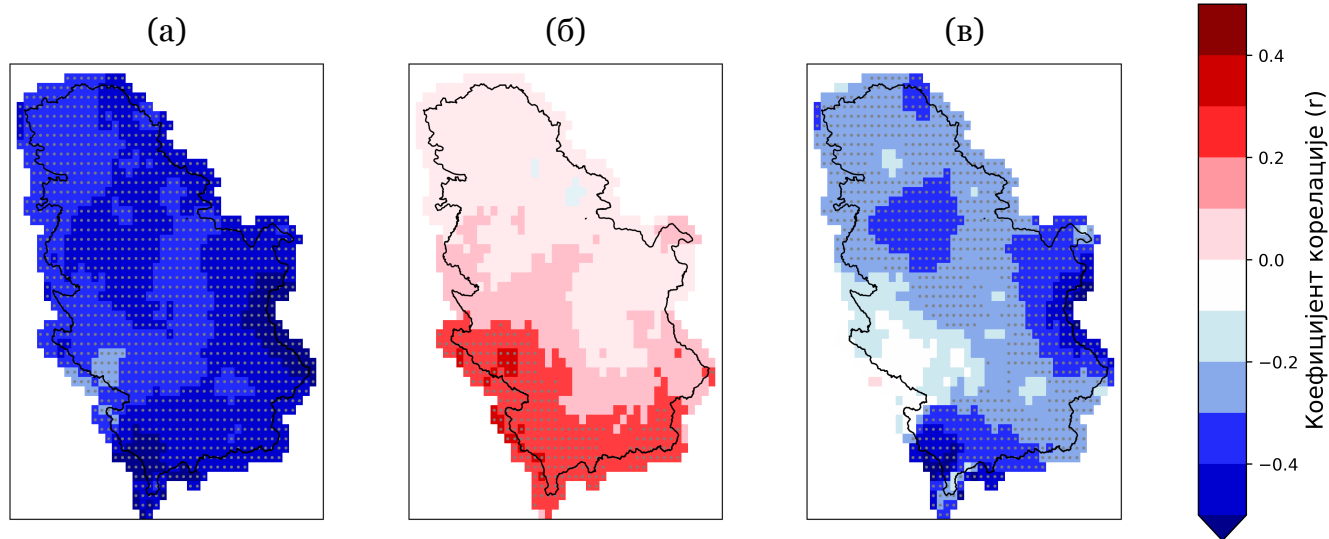
| Месец     | NAO   | EA    |
|-----------|-------|-------|
| Јануар    | 0.21  | 2.58  |
| Фебруар   | 1.09  | 1.70  |
| Март      | -0.21 | 1.55  |
| Април     | -0.78 | 2.96  |
| Мај       | -0.44 | -0.16 |
| Јун       | -0.09 | 1.32  |
| Јул       | 1.46  | 2.39  |
| Август    | 0.63  | 3.67  |
| Септембар | -1.43 | 1.26  |
| Октобар   | -0.38 | 0.97  |
| Новембар  | -0.23 | 1.10  |
| Децембар  | 1.21  | -0.08 |

### 3.5.2 Статистичка декомпозиција климатских променљивих

#### Корелација и трендови

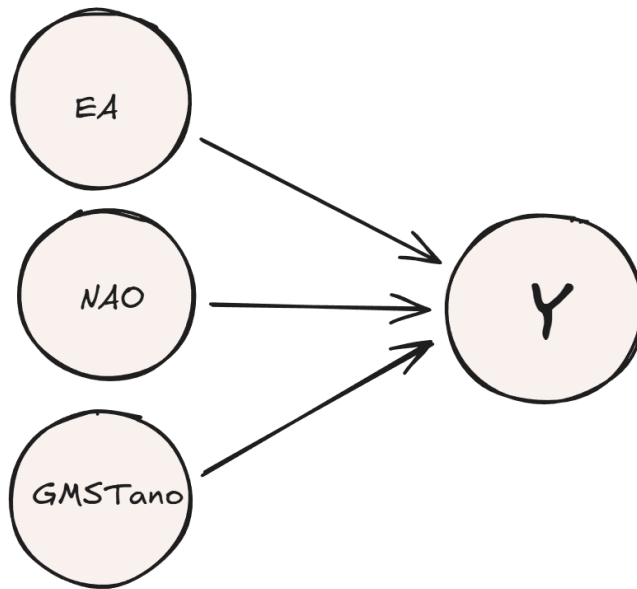
Према Пирсоновом коефицијенту корелације, негативна статистички значајна корелација, до  $-0.5$ , између ЕА обрасца и SPEI-6а пронађена је за простор целе Србије, са најмањим вредностим у југозападним деловима (слика 3.10). NAO индекс није имао снажан утицај на августовски SPEI у Србији, а позитивна корелација је доминирала, али је била значајна само у подручју на југозападу земље, са максималном вредношћу од  $0.4$  (слика 3.10). Негативна корелација је преовладала између аномалије средње глобалне температуре и SPEI-6а и статистички је значајна у целој области осим у југозападним деловима, док је корелација највећа у ширем подручју Београда, источној и јужној Србији, са максималном вредношћу од  $-0.5$ .

Поред анализе повезаности са индексом суше, испитана је и веза између телеконекционих образаца и перцентилских температурних индекса, на годишњем нивоу и сваку сезону понаособ. Просторна расподела Пирсоновог коефицијента корелације дата је у Прилогу В. Резултати показују да ЕА образац има доминантан утицај на топле екстреме, са статистички значајним позитивним корелацијама за TX90p и TN90p, које у летњој сезони достижу вредности од  $+0.5$  до  $+0.7$ . Насупрот томе, за хладне екстреме (TX10p, TN10p) уочена је значајна негативна корелација (до  $-0.6$ ). Утицај NAO индекса на температурне екстреме показује сезонску зависност и генерално је слабији од утицаја ЕА, при чему су током лета уочене негативне корелације са топлим екстремима и позитивне са хладним екстремима.



Слика 3.10: Коефицијент корелације ( $r$ ) између SPEI-6 за август и а) индекса источно-атлантског обрасца (ЕА), б) индекса северноатлантске осцилације (NAO), в) аномалије средње глобалне температуре, током периода 1950–2024. Шрафирана је значајна ( $p \leq 0.05$ ) позитивна/негативна корелација.

На основу резултата корелационе анализе, као и налаза претходних студија које указују на значај ЕА обрасца и NAO за климатску варијабилност у Србији, ови односи су формализовани у оквиру каузалног приступа (слика 3.11). Ова три фактора представљена

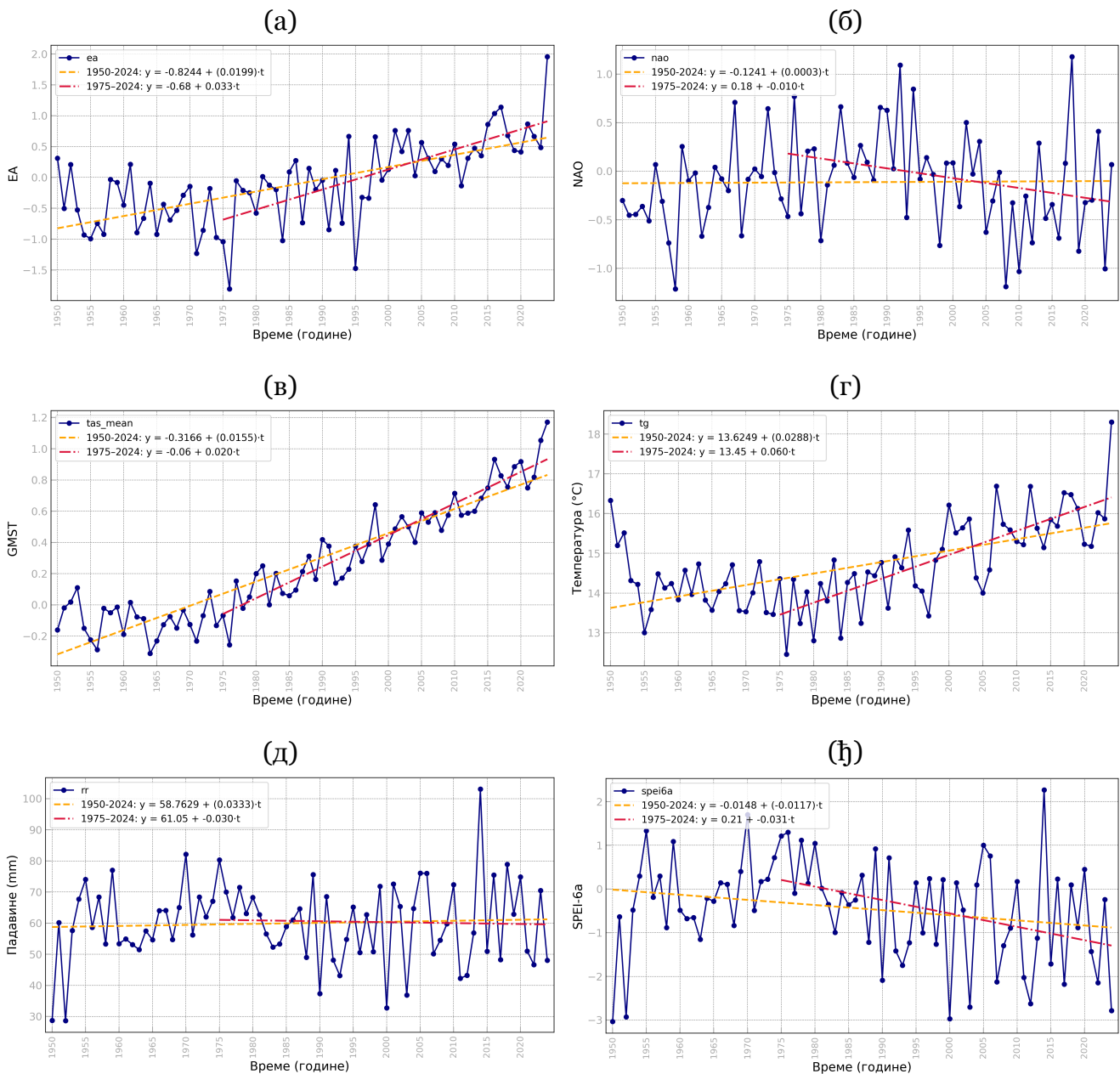


Слика 3.11: Узрочна мрежа која приказује хипотетски узрочни утицај летње северноатлантске осцилације (NAO), источноатлантског обрасца (EA) и аномалије средње глобалне температуре на променљиву  $Y$  која представља индекс суше SPEI-6a, температуру или падавине током сезоне МAMJJA, односно JJA у Србији.

су као узрочни чворови у каузалној мрежи, са усмереним утицајем ка циљној променљивој  $Y$ . У зависности од анализе,  $Y$  представља индекс суше SPEI, температуру или падавине, што омогућава доследну примену вишеструке линеарне регресије у раздвајању динамичких и термодинамичких доприноса. Унутрашња варијабилност је имплицитно садржана у резидуалима регресионог модела и представља ограничење предвидљивости, а не узрочни покретач у строгом смислу.

Индекси EA и NAO показују снажну међугодишњу варијабилност током целог анализираног периода (слика 3.12 (a) и (б)). Док EA испољава позитиван тренд (слика 3.12 (a)), нарочито након 1975. године, NAO не показује јасан дугорочни тренд (слика 3.12 (б)), што указује на њихову различиту улогу у обликовању регионалних климатских услова. Ови резултати потврђују да су EA и NAO погодни представници динамичке компоненте у анализи суше. Аномалија GMST за МAMJJA показује јасан и статистички робустан позитиван тренд током периода (слика 3.12 (в)) што је у складу са претходним студијама [176] и потврђује да GMST представља погодан индикатор за термодинамичко форсирање повезано са антропогеним загревањем.

Анализа МAMJJA температуре и падавина у Србији открива суштински различите карактеристике њихове дугорочне еволуције и међугодишње варијабилности (слика 3.12 (г) и (д)). Док температура показује јасан и робустан позитиван тренд током целог анализираног периода (слика 3.12 (г)), падавине карактерише изражена међугодишња варијабилност уз релативно слаб тренд (слика 3.12 (д)). За температуру, се може уочити јасно појачавање растућег тренда у периоду 1975–2024 у односу на 1950–2024, што указује на убрзање загревања у последњим деценијама. Овај резултат је конзистентан са појачаним глобалним загревањем и указује да је термодинамичка компонента доминантан покретач дугорочних промена температуре.

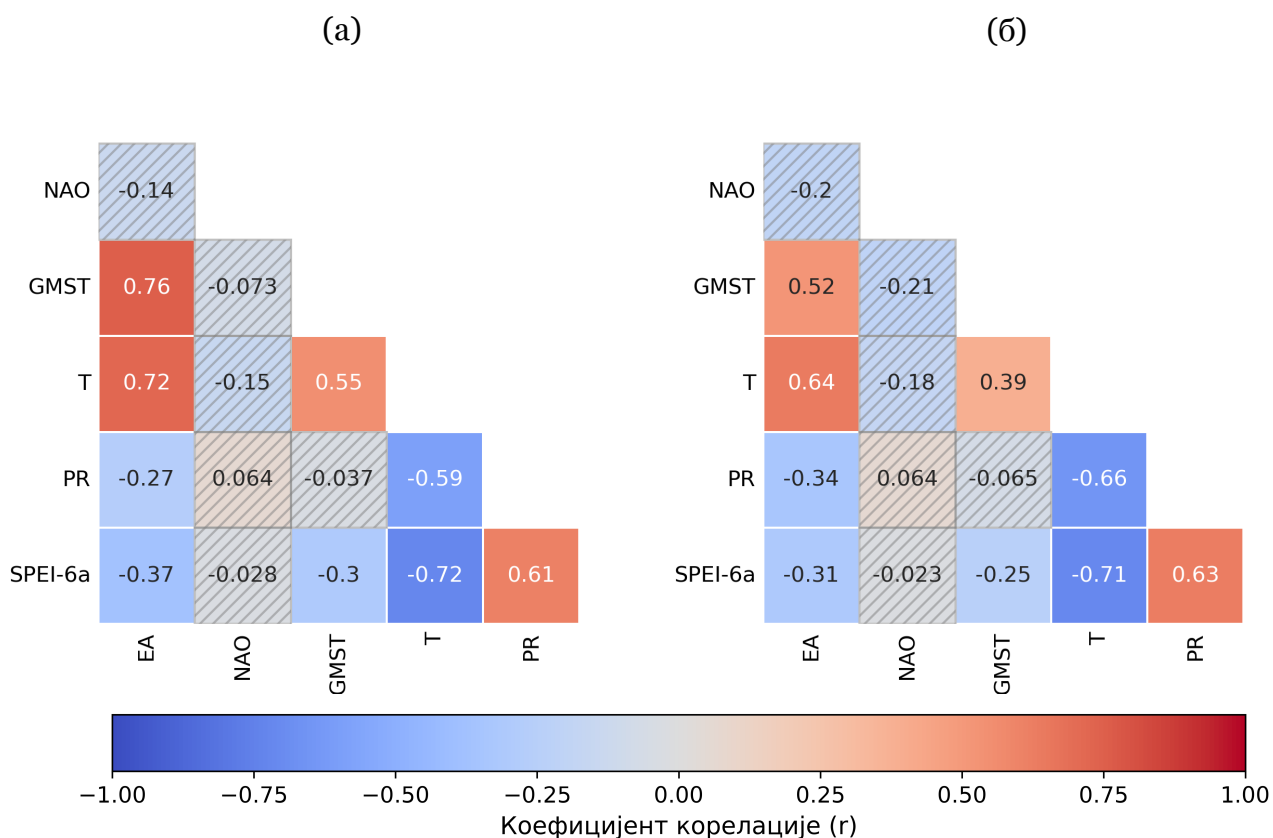


Слика 3.12: Временске серије ЕА, NAO аномалије GMST, температуре, месечне суме падавина, осредњених за период мај–август (МAMЈЈА), и SPEI-6а за период 1950–2024. Испрекиданим линијама представљене су линеарне регресије за периоде 1950–2024 (жута линија) и 1975-2024 (црвена линија), док су одговарајуће једначине линеарне регресије приказане на сваком графику за оба периода.

Насупрот томе, падавине у сезони МAMЈЈА не показују јасан монотони тренд током дужег периода, овај сигнал је знатно слабији у поређењу са трендом температуре и праћен је снажном варијабилношћу. Асиметрија између температуре и падавина указује да је развој сушних услова у Србији примарно последица пораста температуре и са тим у вези повећане евапотранспирације, док је улога падавина доминантно контролисана атмосферском циркулацијом и унутрашњом климатском варијабилношћу, као и регионалним процесима. Временска серија SPEI-6а показује снажну међугодишњу варијабилност,

са смењивањем екстремно сувих и влажних година (слика 3.12 (ђ)). Ипак, упркос израженој варијабилности, уочава се дугорочни негативан тренд, што указује на постепено појачавање сушних услова у Србији. Линеарни тренд у периоду 1950–2024 износи  $-0.11$  по декади, док је у периоду 1975–2024 знатно израженији ( $-0.31$  по декади).

Пирсонов коефицијент корелације израчунат за оригиналне временске серије указује на јаке међусобне корелације између индекса телеконекције, GMST, SPEI-6а, падавина и температуре и приказан је помоћу корелационе матрице на слици 3.13. Међутим, овакве вредности корелације не омогућавају раздвајање њихових физичких међугодишњих односа од заједничког тренда. Након уклањања линеарног тренда, корелациона структура се мења. Корелације између GMST и регионалних климатских променљивих се смањују (слика 3.13 (б)). Смањење корелација након детрендовања указује да је део корелационе структуре у оригиналним временским серијама био последица заједничког тренда, а не директне физичке повезаности. Ови резултати оправдавају примену детрендованих података у вишеструкој линеарној регресији и смањују ризик од колинеарности између предиктора. Мултиколинеарност међу предикторима је такође процењена коришћењем фактора инфлације варијансе (енг. *Variance Inflation Factor, VIF*), који за сваки предиктор износи мање од 1.5 (табела 3.2), потврђујући да су EA, NAO и GMST довољно независне променљиве.



Слика 3.13: Корелационе матрице Пирсоновог коефицијента корелације за (а) оригиналне и (б) детрендоване временске серије променљивих. Шрафиране су корелације које нису статистички значајне на нивоу поверења од 95%.

Табела 3.2: Фактор инфлације варијансе (VIF) за предикторе коришћене у моделу вишеструке линеарне регресије за различите периоде анализе.

| VIF               | EA   | NAO  | GMST |
|-------------------|------|------|------|
| $VIF_{1975-2024}$ | 1.19 | 1.15 | 1.31 |
| $VIF_{1950-2024}$ | 1.39 | 1.19 | 1.61 |

### Декомпозиција тренда SPEI-6a

Поређење коефицијената вишеструке линеарне регресије између периода 1950–2024 и 1975–2024, приказаних у табели 3.3, указује на промену релативне улоге појединачних покретача у обликовању међугодишње варијабилности SPEI-6a. У оба периода, EA индекс представља доминантан циркулациони предиктор, са сличним негативним коефицијентима, што указује на стабилан и робустан утицај овог телеконекционог обрасца на сушне услове у Србији.

Улога NAO индекса постаје израженија у периоду 1975–2024, где његов апсолутни коефицијент достиже вредност упоредиву са EA, у односу на слабији утицај у дужем периоду. Ово указује да је NAO играо важнију улогу у међугодишњој варијабилности суше у последњим деценијама.

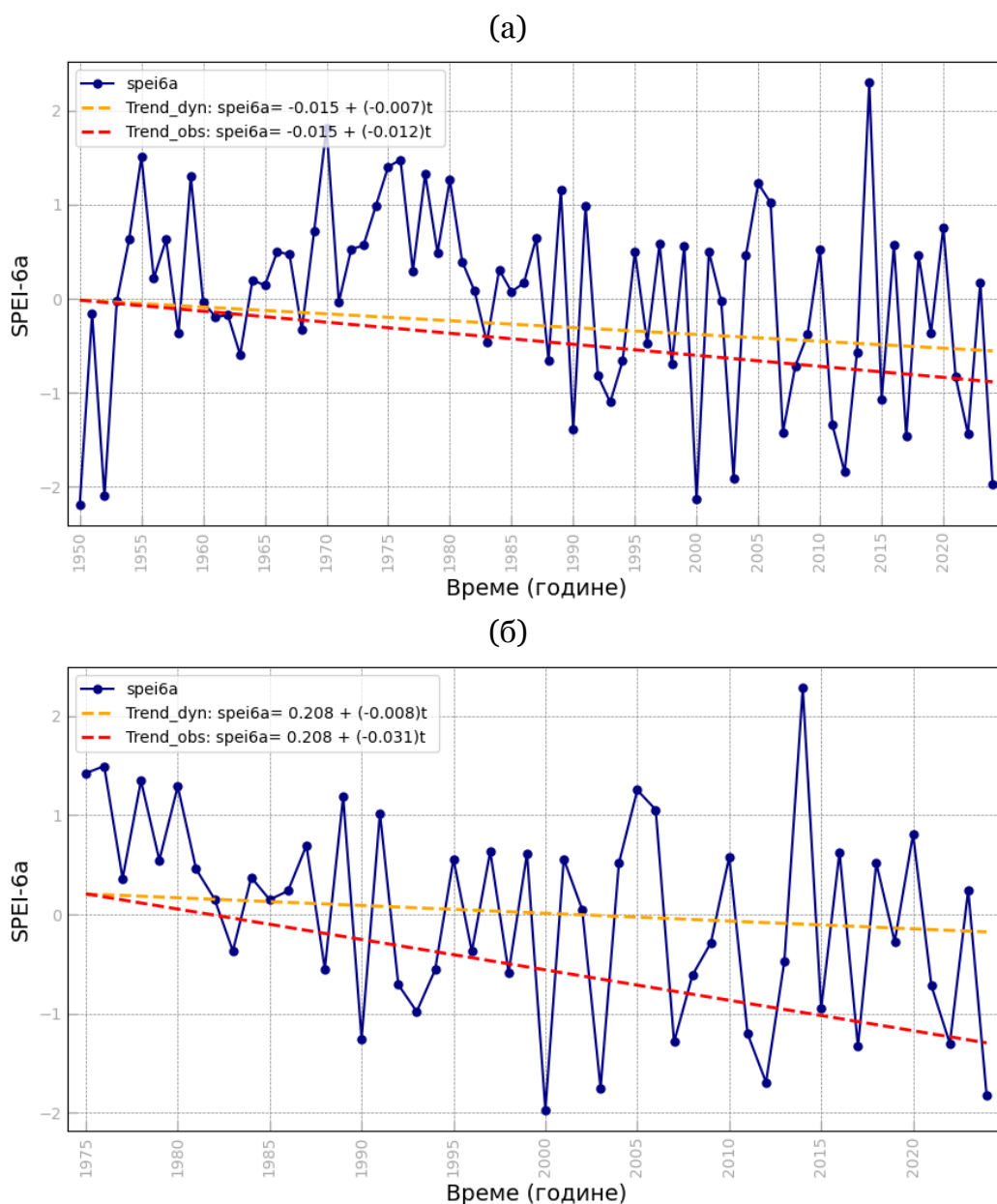
Табела 3.3: Коефицијенти вишеструке линеарне регресије за различите периоде, са одговарајућим стандардним грешкама (SE) и коефицијентом детерминације  $R^2$ .

| Период    | $\beta_{EA}$ | SE   | $\beta_{NAO}$ | SE   | $\beta_{GMST}$ | SE   | $R^2$ |
|-----------|--------------|------|---------------|------|----------------|------|-------|
| 1950–2024 | -0.37        | 0.11 | -0.02         | 0.12 | -0.04          | 0.14 | 0.15  |
| 1975–2024 | -0.28        | 0.14 | -0.15         | 0.15 | 0.08           | 0.16 | 0.1   |

Међутим, с обзиром на то да су вредности коефицијента мање од припадајућих стандардних грешака, не може се закључити да GMST има статистички значајан допринос међугодишњој варијабилности SPEI-6a. Ови резултати указују да се сигнал глобалног загревања у оквиру ове анализе не испољава кроз међугодишње осцилације, већ је вероватније повезан са дугорочном компонентом промене, која се разматра кроз анализу тренда.

Укупна објашњена варијанса модела је релативно мала ( $R^2 = 0.1$  и  $R^2 = 0.15$ ), што је очекивано с обзиром на високу унутрашњу варијабилност SPEI индекса и чињеницу да је анализа фокусирана на детрендоване међугодишње аномалије. Стога се регресиони модел овде користи као дијагностички алат за процену релативних утицаја појединачних покретача, а не као предиктивни модел.

На слици 3.14 приказане су временске серије SPEI-6a за период 1950–2024 (а) и 1975–2024 (б), заједно са линеарним трендом и реконструисаним доприносима атмосферске циркулације. Укупни негативан тренд SPEI-6a указује на појачавање сушних услова током анализираних периода. Компонента тренда посредована циркулацијом, добијена комбиновањем регресионих коефицијената са осматреним трендовима EA и NAO, објашњава значајан део укупног тренда, али не у потпуности. Након уклањања циркулационог доприноса, преостали резидуални тренд остаје негативан и износи -0.005 за период 1975–2024 и -0.023 за 1950–2024, што указује да, поред динамичких фактора, нециркулациони процеси играју важну улогу у дугорочној еволуцији суше. Овај резултат наглашава



Слика 3.14: Временске серије SPEI<sub>6a</sub> за период 1950–2024 (а) и 1975–2024 (б), заједно са линеарним трендом и реконструисаним доприносима атмосферске циркулације

да суша у Србији у последњим деценијама заиста јесте резултат интеракције промена у атмосферској циркулацији и термодинамичких утицаја, при чему релативни значај ових компоненти зависи од анализираниог временског периода.

### Декомпозиција временских серија падавина и температуре на динамичку и термодинамичку компоненту

Како би се раздвојили термодинамички и динамички доприноси летњим аномалијама температуре и падавина у Србији, секвенцијално је примењена вишеструка линеарна

регресија. Анализа је спроведена за летњу сезону (ЈЈА), користећи просторне средње вредности за Србију.

У првом кораку, приказани су резултати линеарне регресије између сезонске аномалије температуре, односно падавина, са аномалијом GMST, која представља споро варирајуће спољашње форсирање повезано са глобалним загревањем. Ова регресија интерпретира се као термодинамичка компонента варијабилности под утицајем спољашњих форсирања. Резидуали ове регресије садрже варијабилност која није линеарно повезана са глобалним загревањем. У другом кораку, за резидуале добијене након уклањања сигнала GMST аномалије направљена је једначина вишеструке линеарне регресије са телеконекционим индексима EA и NAO. Овај корак представља динамички допринос унутрашње климатске варијабилности посредован атмосферском циркулацијом великих размера. Преостала варијабилност након оба корака интерпретира се као варијабилност која није линеарно повезана ни са глобалним загревањем ни са одабраним циркулационим обрасцима и доминантно одражава унутрашњу климатску варијабилност.

Алтернативно, како би се испитала осетљивост резултата на редослед регресије, примењен је и обрнути приступ, у коме су у првом кораку уклоњени утицаји EA и NAO, а затим је на резидуале примењена регресија на GMST. Коначно, изведен је и статистички модел у коме су GMST, EA и NAO истовремено укључени као предиктори у једној вишеструкој линеарној регресији.

Резултати регресије приказани су у табели 3.4 и показују да је међугодишња варијабилност летње температуре у Србији снажно повезана са варијабилношћу EA обрасца, док NAO има секундарни утицај. Термодинамичка компонента представљена са GMST има мањи, али конзистентан позитиван допринос температурним аномалијама. За падавине, динамички допринос доминира над термодинамичким, при чему EA има снажан негативан утицај, док NAO делује у супротном смеру. Допринос GMST варијабилности падавина је занемарљив, што указује да термодинамички утицаји имају ограничену улогу у обликовању међугодишњих осцилација летњих падавина. Резултати су робусни у односу на редослед регресије, а истовремена вишеструка линеарна регресија даје упоредиве коефицијенте, што указује на стабилну поделу улога између термодинамичких и динамичких покретача.

Табела 3.4: Коефицијенти вишеструке линеарне регресије за летње (ЈЈА) аномалије температуре и падавина у Србији. Регресија је примењена на детрендоване и стандардизоване аномалије. Коефицијенти представљају осетљивост на промену од једне стандардне девијације у сваком предиктору.  $\beta^T$  и  $\beta^P$  означавају регресионе коефицијенте за температуру и падавине. Резидуали представљају варијабилност која није линеарно повезана са GMST, EA или NAO и доминантно одражава унутрашњу климатску варијабилност.

| Експеримент   | $\beta_{GMST}^T$ | $\beta_{EA}^T$ | $\beta_{NAO}^T$ | $\beta_{GMST}^P$ | $\beta_{EA}^P$ | $\beta_{NAO}^P$ |
|---|------------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------|
| Експ. 1: GMST $\rightarrow Y_t^{resid} \rightarrow$ EA, NAO | 0.229            | 0.549          | -0.202          | -0.076           | -0.308         | 0.210           |
| Експ. 2: EA, NAO $\rightarrow Y_t^{resid} \rightarrow$ GMST | 0.099            | 0.591          | -0.216          | 0.003            | -0.322         | 0.214           |
| Експ. 3: Сви предиктори (MLR)                               | 0.103            | 0.572          | -0.210          | 0.003            | -0.322         | 0.215           |

Да би се квантификовали релативни доприноси динамичких и термодинамичких покретача током екстремног лета 2024. године, даље је примењен метод сторилајн кроз

условне наративе засноване на вредностима регресионих коефицијената. Коначни резултати су представљени у Табели 3.5.

#### *Сторилајн А*

У првом сторилајну разматра се условни сценарио у коме се користи осмотрена атмосферска циркулација из 2024. године и термодинамичка позадина преиндустријског периода. У овом сценарију, аномалија GMST је фиксирана на средњу вредност за период 1850–1900, док су EA и NAO постављени на своје осмотрене вредности из 2024. године. Овај сторилајн не подразумева да би такви услови атмосферске циркулације могли настати независно од глобалног загревања, већ служи као дијагностички алат за изолацију циркулацијом посредованог доприноса екстремним условима током лета 2024. године. За температуру, овај сценарио даје позитивну аномалију од 1.95 °C, док преостали део 2.1 °C остаје необјашњен линеарним односима са GMST, EA и NAO и приписује се варијабилности која није линеарно повезана са овим покретачима. За падавине, исти сценарио доводи до дефицита од -14.31 mm.

#### *Сторилајн Б*

У другом сторилајну испитује се утицај глобалног загревања под условима неутралне циркулације. GMST је постављен на осмотрену вредност из 2024. године, док су EA и NAO фиксирани на нулту вредност у стандардизованом простору. Резултати показују да би, у одсуству атипичне атмосферске циркулације, загревање линеарном везом довело до умерених позитивних температурних аномалија, али да не би само по себи било довољно да објасни екстремно топле и суве услове посматране 2024. године. За падавине, термодинамички допринос је занемарљив (0.18 mm).

#### *Сторилајн В*

Коначно, у трећем сторилајну GMST, EA и NAO су постављени на своје осмотрене вредности из 2024. године, што представља реализовану комбинацију покретача. Реконструисане аномалије показују да ова комбинација значајно повећава интензитет екстремних услова. Преостали део аномалије интерпретиран је као варијабилност која није линеарно повезана са одабраним покретачима. Ови условни наративи показују да екстремно лето 2024. године у Србији није резултат једног доминантног фактора, већ настаје као последица интеракције глобалног загревања и циркулационих услова. Овај сценарио даје реконструисану температурну аномалију од 2.30 °C. Преостали део температурне аномалије од 1.81 °C, као и део дефицита падавина од -10.78 mm интерпретира се као варијабилност која није линеарно повезан са GMST, EA или NAO и укључује варијабилност која није представљена у регресионом моделу.

Табела 3.5: Декомпозиција аномалија температуре и падавина у Србији током ЈЈА 2024 на термодинамичку, динамичку и резидуалну компоненту коришћењем условних наратива.

|                  | <b>А</b> | <b>Б</b> | <b>В</b> | <b>Осмотрено</b> |
|------------------|----------|----------|----------|------------------|
| Температура (°C) | 1.95     | 0.35     | 2.30     | 4.11             |
| Резидуал (°C)    | 2.16     | 1.95     | 1.81     | –                |
| Падавине (mm)    | -14.31   | 0.18     | -14.13   | -24.91           |
| Резидуал (mm)    | 10.60    | 25.09    | -10.78   | –                |

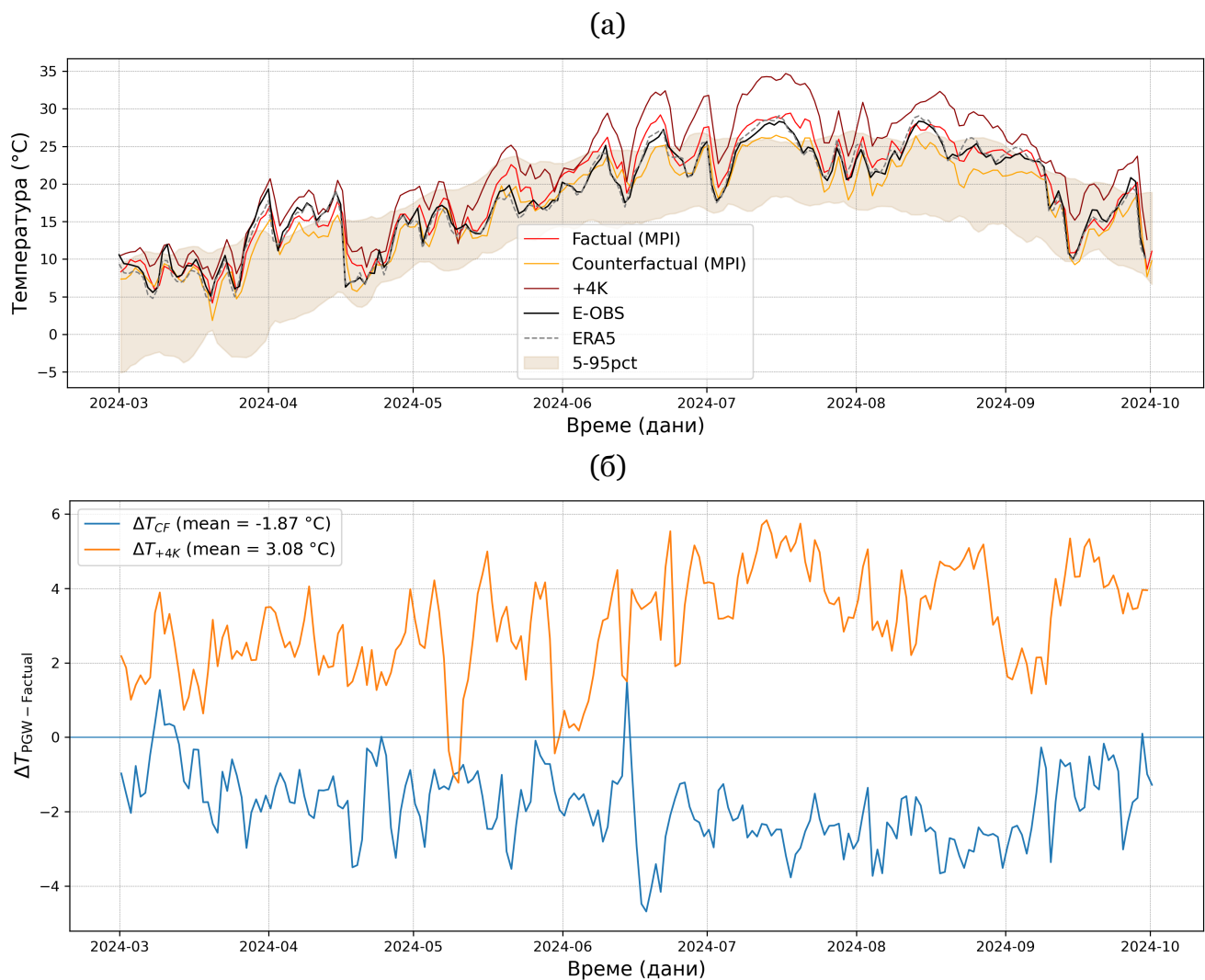
Треба нагласити да ови резултати представљају условне, линеарне реконструкције засноване на коефицијентима регресије. Они не имплицирају независност атмосферске циркулације од спољашњег форсирања, већ служе за квантитативну процену доприноса појединачних покретача датом исходу, под експлицитно дефинисаним условима.

### 3.5.3 Нумерички експерименти псеудо-глобалног загревања

На слици 3.15 приказана је вредност средње дневне температуре, просторно осредњене за област Србије, за сваки дан од 1. марта до 1. октобра 2024. године, за сваки експеримент, са климатологијом EBU-POM модела, осматрањима из E-OBS и ERA5 реанализом ради поређења. Температуре између три експеримента се мењају кроз време упоредиво, али су јасно раздвојене по вредности, откривајући снажан сигнал климатских промена (слика 3.15 (а)). Температуре добијене из експеримента „стварни свет“ (*Factual*) прелазе EBU-POM (1961–1990) 95. перцентил у неколико случајева. Од тога су три случаја током лета, у јуну, јулу и августу када су и према осматрањима забележене веома високе вредности температуре у континуитету и топлотни таласи. *Factual* је систематски топлији од *Counterfactual* током целе сезоне, са већим разликама у летњим екстремима што указује на јасан термодинамички допринос загревања, уз могуће нелинеарно појачање током топлих епизода. Експеримент *Plus4K*, међутим, достиже вредности изнад 95. перцентила скоро сваки или сваки други дан, што је око три пута чешће него у експерименту *Factual*, и 8 пута чешће него у контрафактуалном свету.

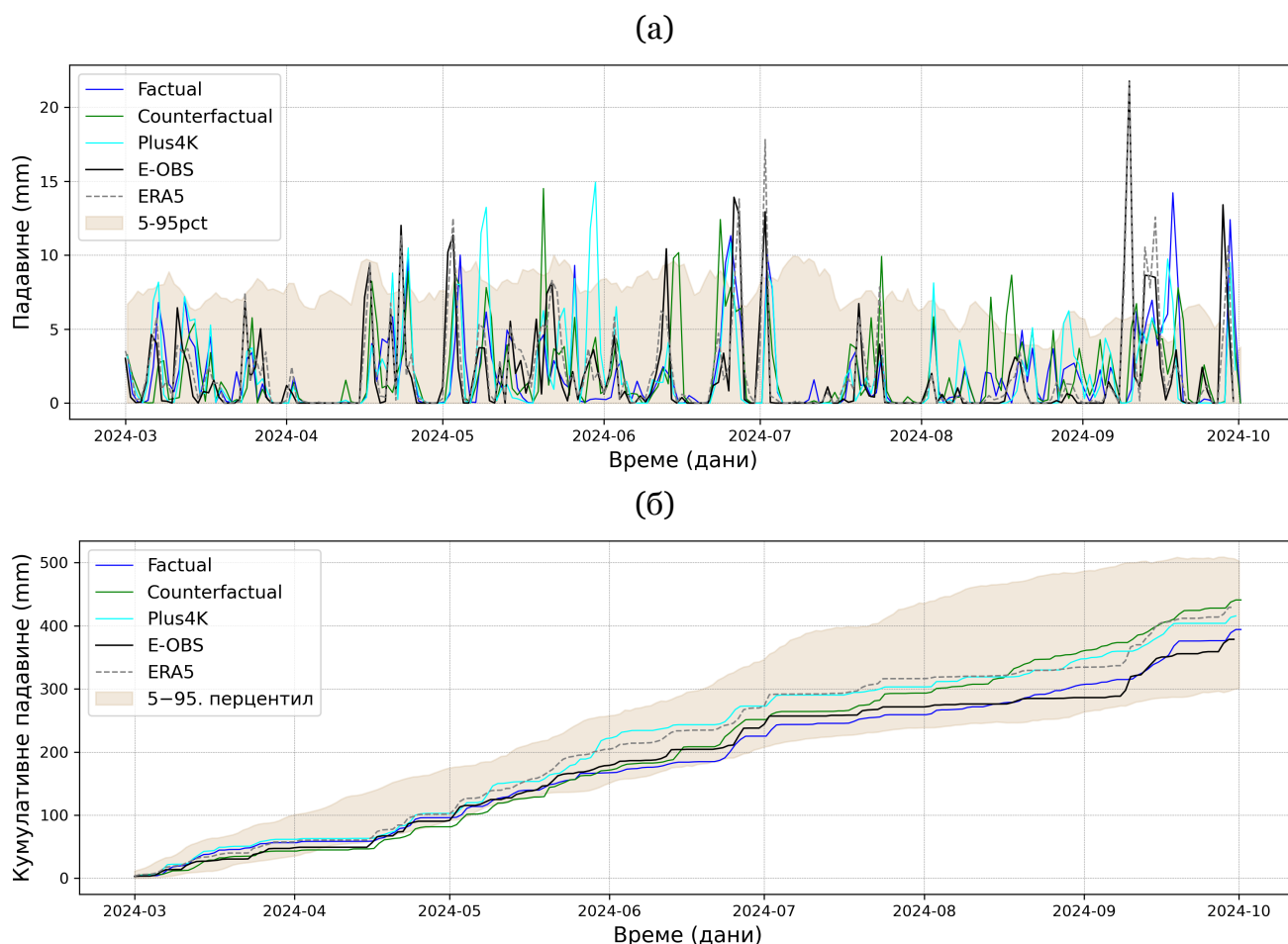
Просечна температурна разлика од марта до октобра између *Factual* и *Counterfactual* вредности је 1.9 °C; између *Factual* и *Plus4K* је 3.1 °C; а између *Plus4K* и *Counterfactual* је 5.0 °C (слика 3.15 (б)). Иако се вредности температуре веће од 95. перцентила јављају само спорадично у контрафактуалној клими, осматрени летњи топлотни таласи 2024. године су карактерисани честим и дуготрајним превазилажењем овог прага. Посебно изражени трендови симултане појаве топлотних таласа и суша уочени су у области Медитерана и југоисточном делу Европе, али и појава нових жаришта у централној и северној Европи, при чему је пораст пре свега вођен растућом учесталošћу и интензитетом топлотних таласа [177]. Топлотни таласи делују као појачивач суше: у контрафактуалној клими они су сувише ретки и краткотрајни да би произвели и/или интензивирали екстремну сушу, док у осматреној и +4 К клими њихова висока учесталост и постојаност доводе до брзог исушивања земљишта и продужавања сушних услова.

На слици 3.16 приказане су падавине, дневне и кумулативне вредности, просторно осредњене за област Србије, за период 1. март до 1. октобар 2024. године, за сваки експеримент, са климатологијом EBU-POM модела, осматрањима из E-OBS и ERA5 реанализом ради поређења. Резултати се добро подударују са E-OBS током целог периода, док се са подацима из реанализе подударују до средине маја (слика 3.16 (б)), након чега постоји извесна неусклађеност, која може бити објашњена чињеницом да су падавине у реанализи ERA5 у просеку прецењене, поготову током сувих дана (дана без падавина) [178]. Међу различитим експериментима не постоји систематска разлика у дневним падавинама, јер се максимум дневних вредности не јавља доследно у истом експерименту сваки дан (слика 3.16 (а)).



Слика 3.15: (а) Средња дневна температура за Србију, за експерименте *Factual* (црвена линија), *Counterfactual* (жута линија) и *Plus4K* (бордо линија), 5–95. перцентил климатологија за период 1961–1990 (осенчена област смеђом бојом), подаци из осматрања E-OBS (црна пуна линија) и реанализа ERA5 (сива испрекидана линија) и (б) разлика у дневној температури ваздуха између условних експеримената *Plus4k* и *Factual* симулације за период од 1. марта до 1. октобра 2024. године. На графику (б) плава линија приказује разлику између *Counterfactual* и *Factual* експеримента ( $Counterfactual - Factual$ ), док наранџаста линија приказује разлику између експеримента са повећањем глобалне температуре за *Plus4K* и *Factual* експеримента ( $Plus4K - Factual$ ).

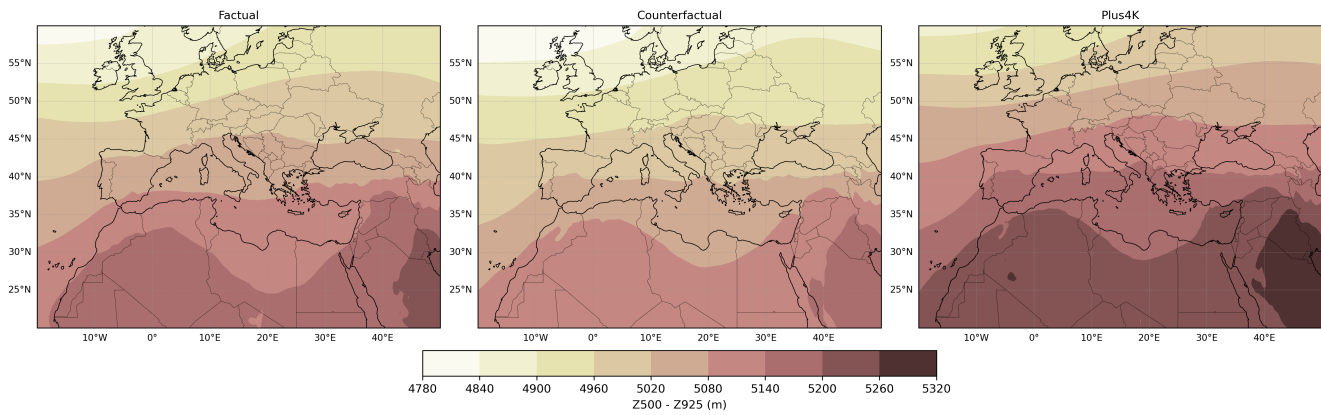
На слици 3.17 приказана је просторна расподела релативне топографије између 500 hPa и 925 hPa нивоа ( $Z_{500}-Z_{925}$ ),  $PT_{500/925}$ , за летњи период (ЈЈА) за сва три експеримента. Ова величина је директно повезана са средњом температуром ваздушног стуба и често се користи као дијагностички показатељ термодинамичког стања атмосфере. На слици 3.18 приказане су просторне расподеле разлике  $PT_{500/925}$ , за ЈЈА сезону, за два PGW сценарија у односу на експеримент стварни свет. Приказане вредности представљају одступања дебљине  $PT_{500/925}$  у односу на *Factual*, при чему негативне вредности (плаве нијансе) указују на смањену дебљину слоја, док позитивне вредности (црвене нијансе) ука-



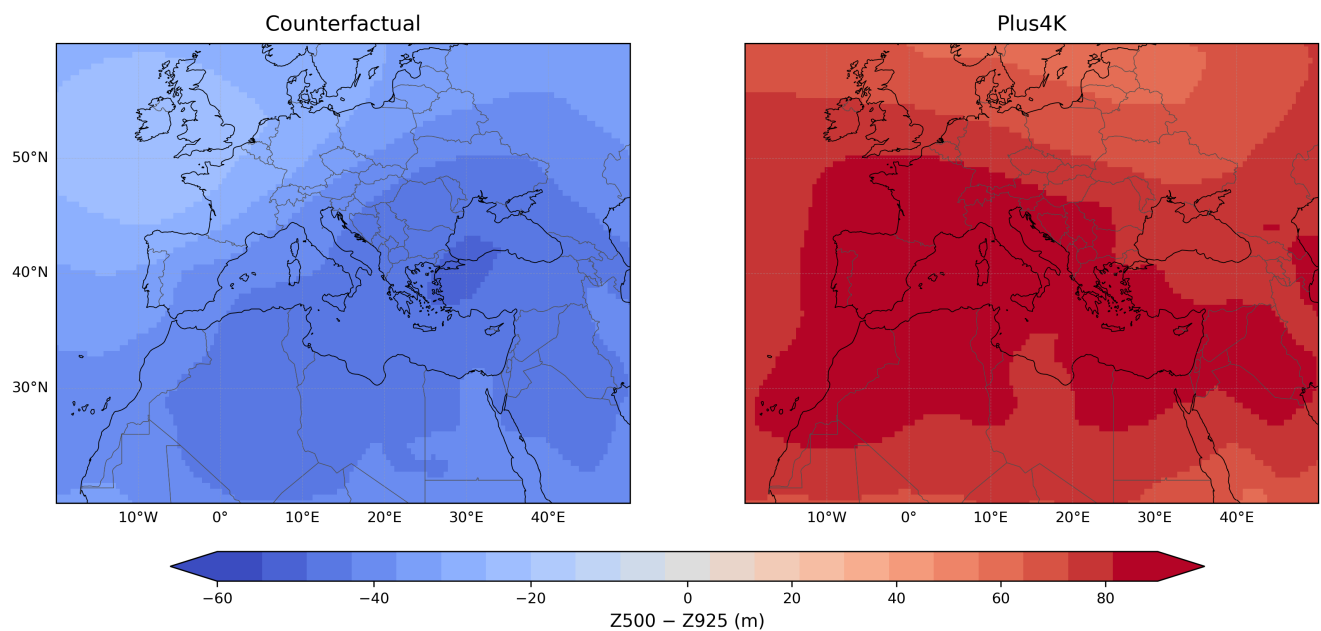
Слика 3.16: Укупне дневне падавине (а) и кумулативне падавине (б) за Србију, од 1. марта до 1. октобра 2024. године за експерименте *Factual* (плава линија), *Counterfactual* (зелена линија) и *Plus4K* (тиркизна линија), 5–95. перцентил климатологије за период 1961–1990 (осенчена област смеђом бојом), подаци из осматрања E-OBS (црна пуна линија) и реанализа ERA5 (сива испрекидана линија).

зују на њено повећање. Просторна расподела релативне топографије је сличне структуре у сва три експеримента, са меридионалним градијентом. У контрафактуалном експерименту су апсолутне вредности  $Z_{500}$ – $Z_{925}$  у просеку ниже над већим делом посматраног домена. Просторни обрасци и хоризонтални градијенти остају упоредиви са фактуалним сценаријем, што указује на очувану структуру атмосферске циркулације. У сценарију са додатним загревањем од +4 К, просторна расподела релативне топографије се одликује повећаним вредностима над читавим доменом. Упоредни приказ три експеримента показује да се промене између њих пре свега манифестују кроз разлике у апсолутним вредностима дебљине слоја, док је просторна структура поља у великој мери очувана.

Поређење два PGW сценарија показује јасну и симетричну реакцију релативне топографије на уклањање, односно појачавање термодинамичког сигнала. Док контрафактуални експеримент карактерише смањена дебљина овог слоја ваздуха у односу на симулацију реалног света, експеримент *Plus4K* показује њено повећање над истим. При детаљнијем увиду у просторну расподелу аномалија релативне топографије, уочава се извесна



Слика 3.17: Просторна расподела релативне топографије између 500 hPa и 925 hPa нивоа ( $Z_{500} - Z_{925}$ ),  $PT_{500/925}$ , за летњи период (ЈЈА) за сва три експеримента.



Слика 3.18: Просторне расподеле разлике  $PT_{500/925}$ , за ЈЈА сезону, за експеримент *Counterfactual* и *Plus4K*, у односу на експеримент стварни свет.

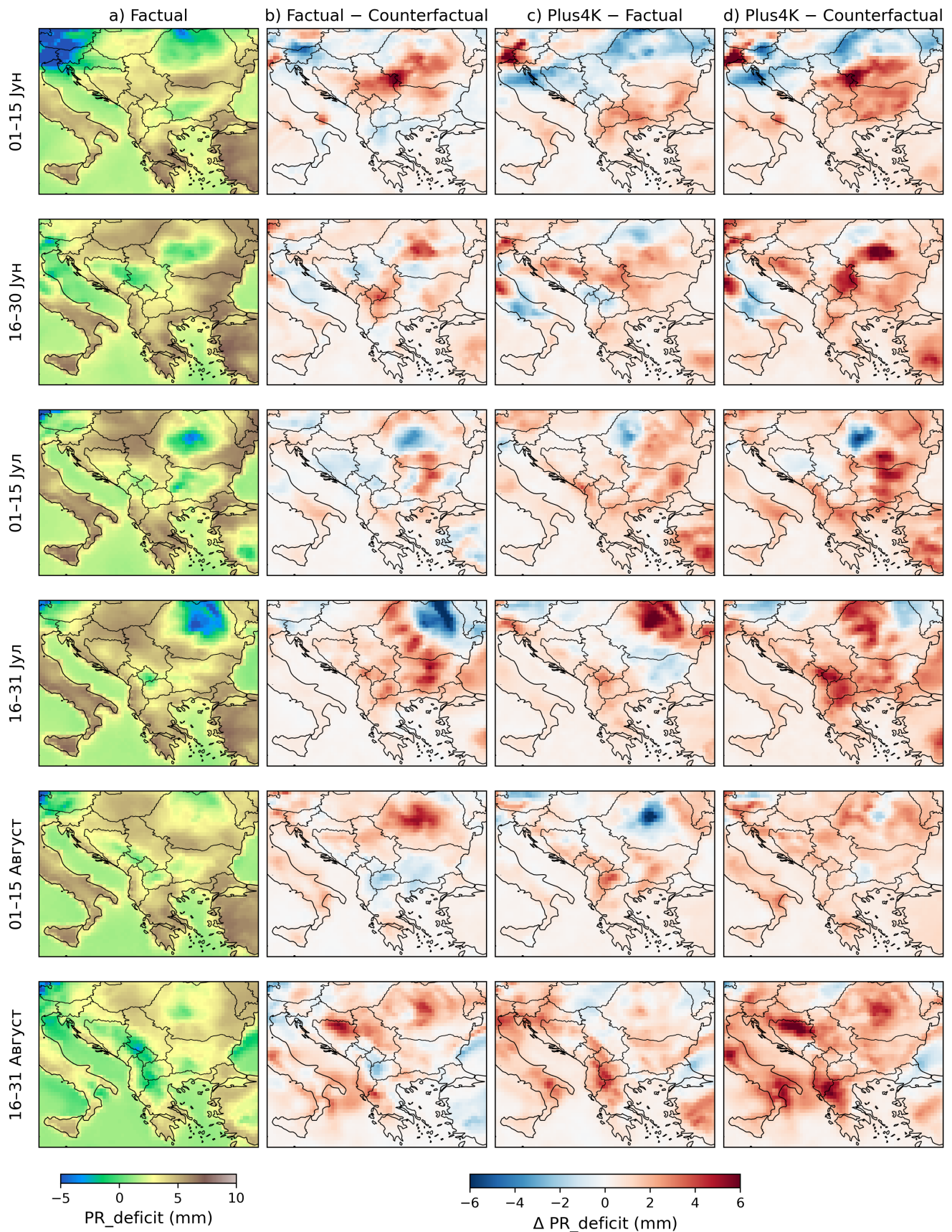
зонална асиметрија у оба PGW сценарија. У контрафактуалном случају, негативне аномалије  $PT_{500/925}$  показују тенденцију нешто израженијих вредности у источним и југоисточним деловима домена. Насупрот томе, у сценарију са додатним загревањем од +4 K, позитивне аномалије релативне топографије имају максимум који је благо умерен ка западном и централном делу домена, обухватајући западну Европу и цело подручје. Србија се налази у зони између ових просторних карактеристика, при чему се у оба сценарија уочавају релативно изражене разлике у односу на експеримент *Factual*.

У контексту суше, овакве промене релативне топографије имају директну физичку интерпретацију. Повећана дебљина ваздушног стуба повезана је са вишим температурама, израженом стабилношћу атмосфере и повећаним потенцијалом за испаравање, што може допринети интензивирању и продужавању сушних услова. Насупрот томе, смањена

дебљина слоја у контрафактуалном сценарију указује на услове који су термодинамички мање повољни за развој интензивне суше, при истој или сличној динамичкој поставци атмосфере.

На слици 3.19 приказана је просторна и временска еволуција дефицита падавина (PET – PR) над ширим регионом југоисточне Европе током лета 2024. године, анализирана кроз три поменута условна сторилајн сценарија. Прва колона (а) представља експеримент *Factual*, док преостале колоне приказују разлике у односу на *Factual*. У експерименту који описује осмотрене климатске услове уочава се просторно кохерентан и временски постојан дефицит падавина, са најизраженијим вредностима током јула и прве половине августа. Дефицит падавина је посебно изражен над централном и источном Србијом током већег дела летње сезоне. Иако падавине показују одређену просторну и временску варијабилност повишене температуре и повећане потенцијалне евапотранспирације, у комбинацији са приближно истим количинама падавина, резултују јасним и конзистентним сигналом појачаног дефицита падавина у различитим експериментима.

Са слике 3.16 може се уочити да се у експерименту *Plus4K* током друге половине маја и почетком јуна јављају интензивније падавине у односу на *Factual* и *Counterfactual*, услед чега је у првој половини јуна дефицит падавина нешто мањи него у сценарију *Factual* (слика 3.19, разлика *Plus4K* и *Factual*). Међутим, услед изузетно високих температура у *Plus4K*, већ у другој половини јуна долази до пораста дефицита падавина, што указује на бржи развој сушних услова у условима појачаног загревања. Сличан сигнал уочава се и у поређењу *Factual* или *Plus4K* са *Counterfactual* експериментом. Иако су кумулативне падавине током већег дела периода најмање у *Factual* експерименту, повишене температуре у *Factual* и *Plus4K* сценаријима доводе до повећане потенцијалне евапотранспирације и убрзаног исушивања тла. Последишно, сушни услови се у овим сценаријима потенцијално развијају брже и достижу већи интензитет у односу на *Counterfactual* експеримент, чак и у периодима са упоредивим количинама падавина.



Слика 3.19: Полумесечне просторне расподеле дефицита падавина у експерименту *Factual* (прва колона) и њихове разлике у односу на *Counterfactual* и *Plus4K*.



# 4

## Дискусија и закључак

### 4.1 Синтеза резултата: статистички и нумерички поглед на композитне екстреме

Екстремни догађаји у Србији разматрани кроз композитне климатске индексе су према резултатима ове докторске дисертације структурно асиметрични: доминирају веома топли и суви (HD) и хладно и влажни (CW) догађаји, док су комбинације супротних аномалија (HW и CD) ређе и у простору релативно хомогене. Ова асиметрија је физички очекивана у летњој сезони услед негативне корелације температуре и падавина и интеракција између тла и атмосфере. Анализа тренда композитних индекса додатно показује да је робустан и најјаснији сигнал током лета (JJA) за композитни индекс HD, са израженим регионалним максимумом у источном делу Србије. Резултати заједничке расподеле температуре и падавина у мултимоделском ансамблу указују да се климатски режим Србије помера ка учесталијим и интензивнијим топло-сувим условима, при чему је на годишњем нивоу доминантно померање расподеле температуре ка вишим вредностима, док се у летњој сезони јасније издваја и променљивост падавина ка сушнијим условима; истовремено сви модели показују висок степен сагласности у погледу промене индекса HD. Иако се апсолутне вредности и јачина тренда разликују међу моделима, већина чланова ансамбла симулира позитиван тренд током XXI века, што указује на робусност сигнала и смањује вероватноћу да је уочени пораст последица појединачних специфичних карактеристика модела. Резултати приказани у Поглављу 1 пружају директно оправдање за фокус ове докторске дисертације на сушу и композитне топло-суве догађаје током летње сезоне.

Интензивирање суша првенствено је покренуто вишим температурама, које повећавају испаравање чак и када су дефицити падавина умерени. Овај појачавајући ефекат температуре је кључан за разумевање озбиљности будућих суша, јер сложени веома топли и суви догађаји доводе до појачаног стреса на екосистеме, смањења пољопривредних приноса и повећан ризик за управљање водним ресурсима. Даља анализа заснована је на две репрезентативне екстремне суше, забележене током лета 2012. и 2024. године, а које служе као студије случаја за испитивање механизма и утицаја климатских промена. Суша

је разматрана као метеоролошка суша, описана кроз дефицит падавина односно помоћу података о дневним падавинама, температури и потенцијалној евапотранспирацији.

Даље истраживање било је засновно на конкретном, осмотреном догађају, суши 2012. године, користећи приступ идентификације аналогних догађаја осмотреном у великом ансамблу климатског модела (MPI-GE). Одабир аналога на основу метрика кумулативног дефицита падавина коришћењем великог ансамбла показује да се суше сличне 2012. у будућим сценаријима јављају у топлијим условима и да се у сценаријима са већим загревањем појачавају услови који омогућавају веће апсолутне дефиците падавина, пре свега преко пораста потенцијалне евапотранспирације. Кључни резултат је да је репродукција „брзине погоршања“ суше (M2) могућа у различитим сценаријима, али да је достизање екстремних апсолутних дефицита падавина вероватније када суша има ранији почетак и развија се на већ постојећем пролећном недостатку падавина. Унутрашња варијабилност остаје значајан фактор, јер слична брзина интензивирања суше током лета може бити последица различитих претходних услова и различитих реализација атмосферске циркулације, али и настати из различитих почетних услова који у овој докторској дисертацији нису детаљније разматрани (нпр. различите влажности тла у пролеће).

Анализа суше током лета 2024. године у Србији је извршена кроз метод атрибуције засноване на осмотреном догађају, укључивши и климатолошку позадину целог догађаја. Летња суша је такође повезана са атмосферским обрасцима великих размера који су представљени кроз климатске индексе NAO и EA. Корелациона и регресиона анализа указују да је EA доминантан динамички предиктор међугодишње варијабилности суше (SPEI-6a) и летње температуре. Преостали део аномалије (резидуал) додатно показује да линеарни статистички модел не може у потпуности да „ухвати“ све процесе релевантне за екстремни догађај, што је очекивано услед улоге локалних повратних спрега и фактора који нису узети у разматрање, с обзиром на то да SPEI има велику варијабилност.

Коначно, PGW нумерички експерименти пружају физичку проверу статистичких закључака: при истој (или веома сличној) циркулационој поставци, промене у термодинамичкој компоненти доводе до јасног раздвајања температурних исхода између *Counterfactual*, *Factual* и *Plus4K* експеримента. Средња дневна температура превазилазила је 95. перцентил чешће у експерименту *Plus4K* него у преостала два. Стога се може очекивати да ће се утицај и учесталост топлотних таласа такође повећати са загревањем од +4 степена у сезонама са сличним динамичким условима. PET је већи у експериментима *Factual* и *Plus4K* у односу на контрафактуални свет, али су кумулативне падавине нешто више у експериментеу са загревањем од +4 степена. У условима сличних падавина, повишене температуре и раст PET-а довољни су да произведу бржи развој и већи интензитет сушних услова. Анализа релативне топографије (Z500–Z925) додатно потврђује да PGW пре свега мења апсолутне термодинамичке вредности (дебљину слоја), док просторна структура поља остаје у великој мери очувана.

Резултати дисертације показују да се композитни топло-суви екстремни у Србији могу разумети као резултат двоструког механизма: (1) систематског термодинамичког померања климе ка топлијем стању, и (2) динамичке варијабилности која одређује режим и временску расподелу падавина и модификује регионалне аномалије. Статистичке анализе (трендови, расподеле, корелације и вишеструке линеарне регресије) обезбеђују квантитативно раздвајање доприноса утицаја на развој суша, док нумерички PGW експерименти

пружају физички доказ да исти тип циркулације у топлијој клими води ка значајно већем ризику од суша.

## 4.2 Ограничења и методолошка разматрања

Приступ заснован на конкретном осмотреном догађају и сторилајн приступ омогућавају анализу и атрибуцију климатских промена екстремног догађаја, без потребе за дефинисањем класе догађаја. Сторилајн приступ задржава специфичну временску еволуцију и физичке карактеристике догађаја, али пружа условну, а не пробабилистичку атрибуцију. PGW омогућава изоловање термодинамичког сигнала климатских промена уз задржавање осмотрене циркулационе еволуције догађаја. На овај начин, конкретна синоптичка поставка из 2024. године остаје очувана, док се мења позадинско термодинамичко стање атмосфере. Вишеструка линеарна регресија примењена у овој студији има дијагностички карактер и служи за квантитативну процену релативних доприноса термодинамичких и динамичких покретача. Међутим, стандардне грешке регресионих коефицијената указују на висок степен неизвесности при покушају прецизног квантитативног одвајања доприноса појединачних фактора. Каузална мрежа омогућава формулисање квантитативних хипотеза и развој физички доследних сторилајна, али резултати зависе од избора предиктора и претпоставке линеарности. Избор предиктора и веза у мрежи захтева експертско знање о динамици атмосфере, сезонској зависности телеконекиција и физичким процесима који контролишу сушу на локалном нивоу.

Ограничење великог ансамбла MPI-GE CMIP6 огледа се у познатом потцењивању варијабилности падавина [110]. Иако се аналогни догађаји добро подударују са карактеристикама осмотрене суше, они потцењују појаву кратких епизода са веома интензивним падавинама. Међутим, као и већина глобалних климатских модела са хоризонталном резолуцијом од приближно  $1.8^\circ$ , MPI-GE има ограничену способност експлицитног представљања конвективних процеса. Захваљујући великом броју чланова ансамбла (50) и високој временској резолуцији (дневни подаци) за више различитих сценарија, MPI-GE омогућава репрезентацију широког спектра могућих реализација суша.

Поред наведеног, употреба Харгривсове методе за процену PET-а, иако се често користи за студије суше великих размера, може потценити евапотранспирацију у условима екстремне врућине у поређењу са сложенијим формулацијама као што је Пенман-Монтеј.

Још једно потенцијално ограничење је то што је ова студија заснована на једном климатском моделу (MPI-GE CMIP6), и док велики ансамбли пружају важне увиде о унутрашњој варијабилности, структурна моделска неизвесност се не може проценити. Будући рад би могао да укључи коришћење више SMILE како би се могле боље разумети разлике неизвесности које произилазе из унутрашње климатске варијабилности и структурне неизвесности. Како је истакнуто у раду Десер и сарадника [102], доступност великих ансамбала је и даље ограничена, посебно за више модела, сценарија и на дневној временској резолуцији која је неопходна за анализу екстремних догађаја.

## 4.3 Закључак

Резултати ове докторске дисертације пружају конзистентну слику развоја композитних екстремних догађаја у Србији, у којој се тренд дугорочних промена (интензивирање топло-сувих услова и слабљење хладно-влажних екстрема) може повезати са физичким механизмима разјашњеним кроз статистичку анализу података из осматрања, пројекција мултимоделског ансамбла регионалних модела, резултата великог ансамбла и нумеричких PGW експеримената.

У контексту ове студије, добијени резултати и развијени нумерички приступ указују на потенцијал за даљу примену и проширење анализе на различите типове екстрема. Симулација једне године омогућава континуирано испитивање свих временских скала унутар тог периода, од олуја, краткотрајних топлотних таласа, преко сезонске суше, до кумулативних ефеката током вегетационог периода. Пошто је модел регионални, исти експеримент се може применити на било који екстремни догађај који се догодио током 2024. године унутар домена модела.

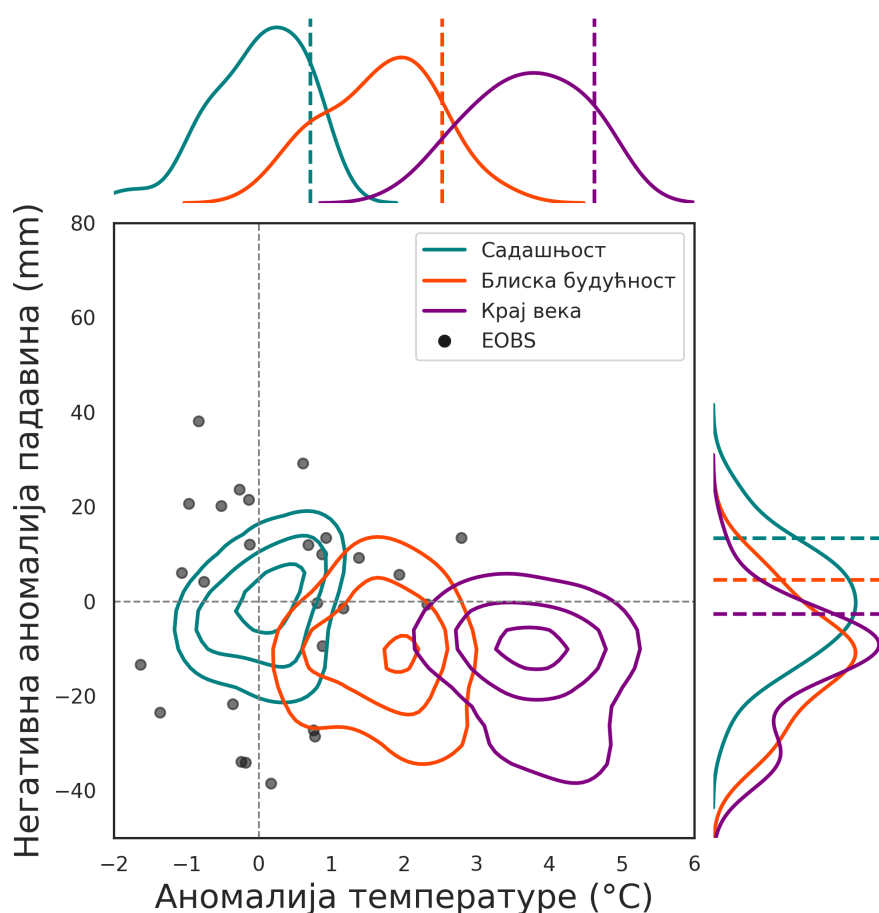
PGW приступ има потенцијал за делимичну операционализацију, јер се заснива на осматраним условима и може се применити у релативно кратком временском року након појаве екстремног догађаја, чиме допуњује постојеће пробабилистичке методе брзе атрибуције. Кратке симулације не захтевају ресурсе упоредиве са дугорочним климатским пројекцијама, што омогућава релативно брзу интеграцију више сценарија (*Counterfactual*, *Factual*, *Plus4K*) уз задржавање високе просторне резолуције. Ова ефикасност чини метод погодним за оперативну примену у анализи екстремних догађаја.

Будућа истраживања могла би унапредити анализу екстремних суша кроз повећање просторне и вертикалне резолуције модела, што би омогућило реалистичније представљање конвективних падавина и процеса у граничном слоју атмосфере. Друго, укључивање интерактивних процеса између тла, вегетације и атмосфере допринело би бољем представљању повратних спрега које контролишу развој и интензитет суше. Поред тога, будући рад могао би проширити PGW приступ формирањем регионалног ансамбла EBU-ROM симулација, при чему се користи више чланова MPI-GE или више глобалних модела за конструкцију почетних и бочних граничних услова.

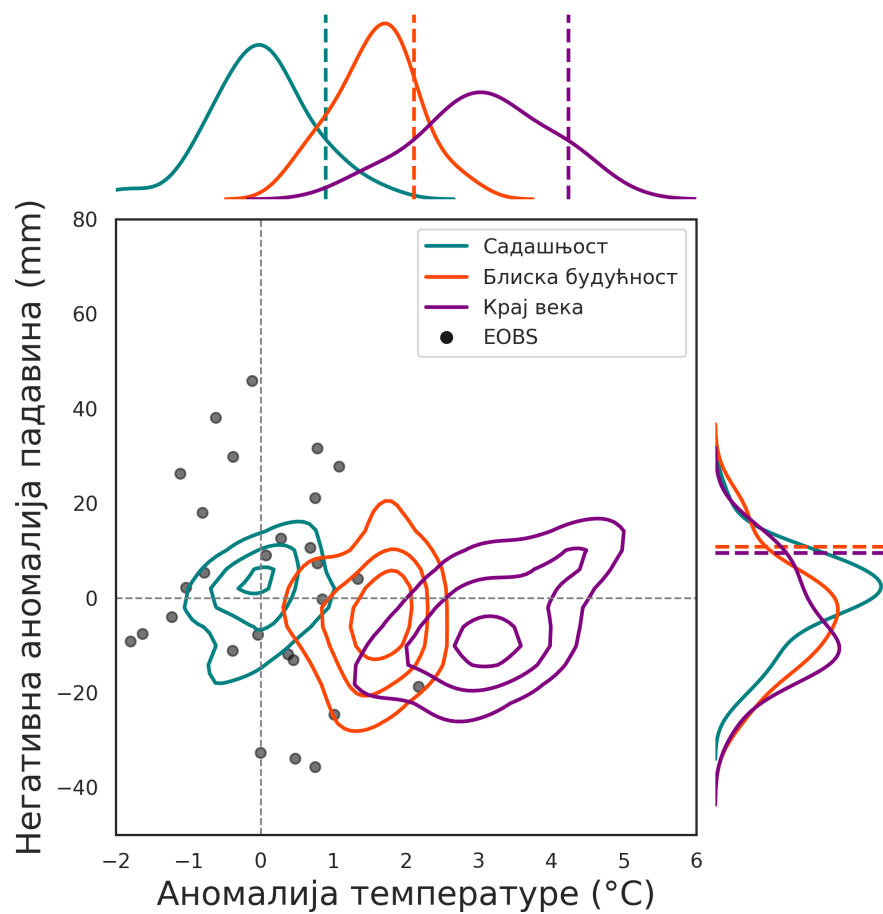
Резултати и закључци ове студије имају важне импликације за Србију, где је пољопривредни сектор веома осетљив на варијабилност падавина и где је инфраструктура за наводњавање и даље ограничена. Будуће управљање ризику од суше мора узети у обзир повећану вероватноћу екстремних догађаја сличних или озбиљнијих од оних из 2012. и 2024. године. Резултати добијени у овој студији могу послужити као основа за тестирање стратегија прилагођавања у физички вероватним сценаријима будуће суше, чиме се пружа подршка националном планирању адаптације на климатске промене.

# Прилог А

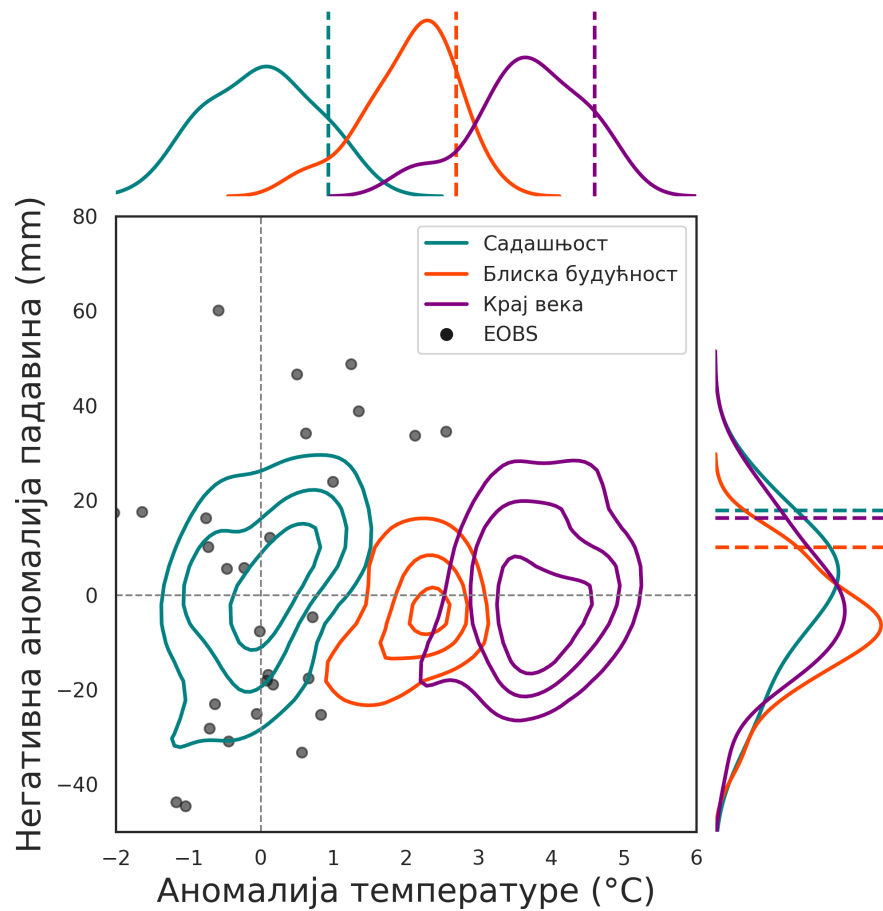
## Заједничке расподеле температуре и падавина



Слика А.1: Заједничка расподела температуре и падавина за зимску (DJF) сезону, за периоде: 1991–2020 (садашња клима), 2041–2070 (блиска будућност) и 2071–2100 (крај века).



Слика А.2: Заједничка расподела температуре и падавина за пролећну (МAM) сезону, за периоде: 1991–2020 (садашња клима), 2041–2070 (блиска будућност) и 2071–2100 (крај века).



Слика А.3: Заједничка расподела температуре и падавина за јесењу (SON) сезону, за периоде: 1991–2020 (садашња клима), 2041–2070 (блиска будућност) и 2071–2100 (крај века).



# Прилог Б

## Поступак израчунавања SPEI индекса

Стандардизовани падавинско-евапотранспирациони индекс (SPEI), који идентификује сушу на основу падавина и потенцијалне евапотранспирације (PET), увели су Вићенте Серано и сарадници [80]. SPEI користи месечну (или недељну) разлику (D) између падавина (PR) и PET:

$$D_i = PR_i - PET_i \quad (\text{Б.1})$$

Затим се израчунате вредности  $D_i$  сумирају на различитим временским размерама (нпр. 3 месеца). Израчунавање SPEI подразумева фитовање расподеле вредности  $D_i$  на Гама расподелу. Функција густине вероватноће Гама расподеле је:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \quad x > 0,$$

где су  $\alpha$  и  $\beta$  параметри расподеле,  $x$  је разлика између падавина и PET, а  $\Gamma(\alpha)$  је гама функција. За оцену параметара  $\alpha$  и  $\beta$  може се користити метод максималне веродостојности (енг. Maximum likelihood estimation) [179]:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \quad (\text{Б.2})$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}, \quad (\text{Б.3})$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i), \quad (\text{Б.4})$$

где је  $\bar{x}$  средња вредност узорка,  $n$  број података у узорку. Параметари  $\alpha$  и  $\beta$  се затим користе за рачунање кумулативне функције расподеле:

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx. \quad (\text{Б.5})$$

Након израчунавања, кумулативна функција расподеле се трансформише у стандардизовану нормалну случајну променљиву са средњом вредношћу 0 и варијансом 1. Коначно, израчунавање SPEI може се извршити апроксимацијом [80]:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}, \quad (\text{Б.6})$$

где је  $W$  дефинисано као:

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad \text{for } P < 0.5, \quad (\text{Б.7})$$

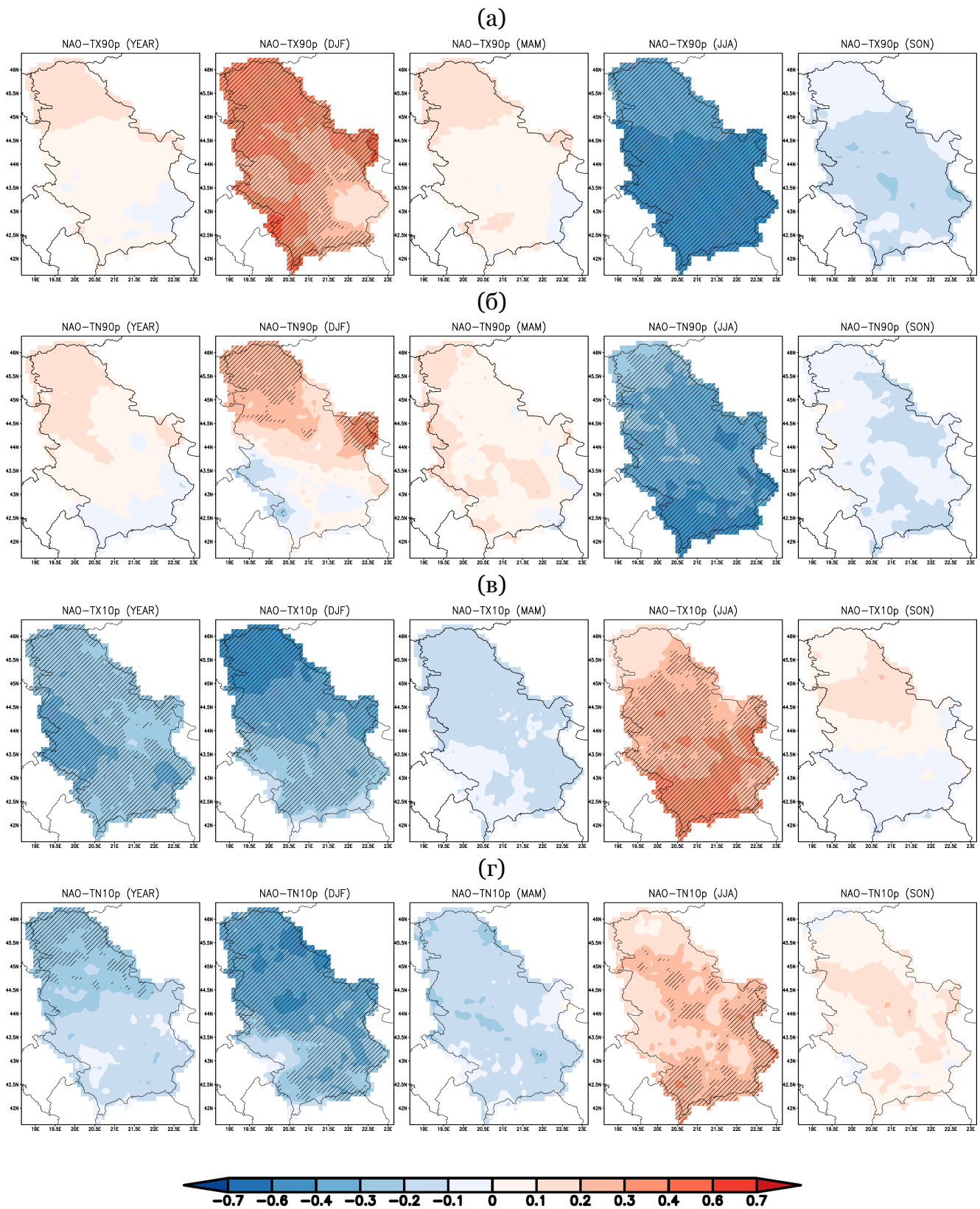
где је  $P$  вероватноћа да ће вредност  $D$  бити превазиђена:

$$P = 1 - G(x) \quad (\text{Б.8})$$

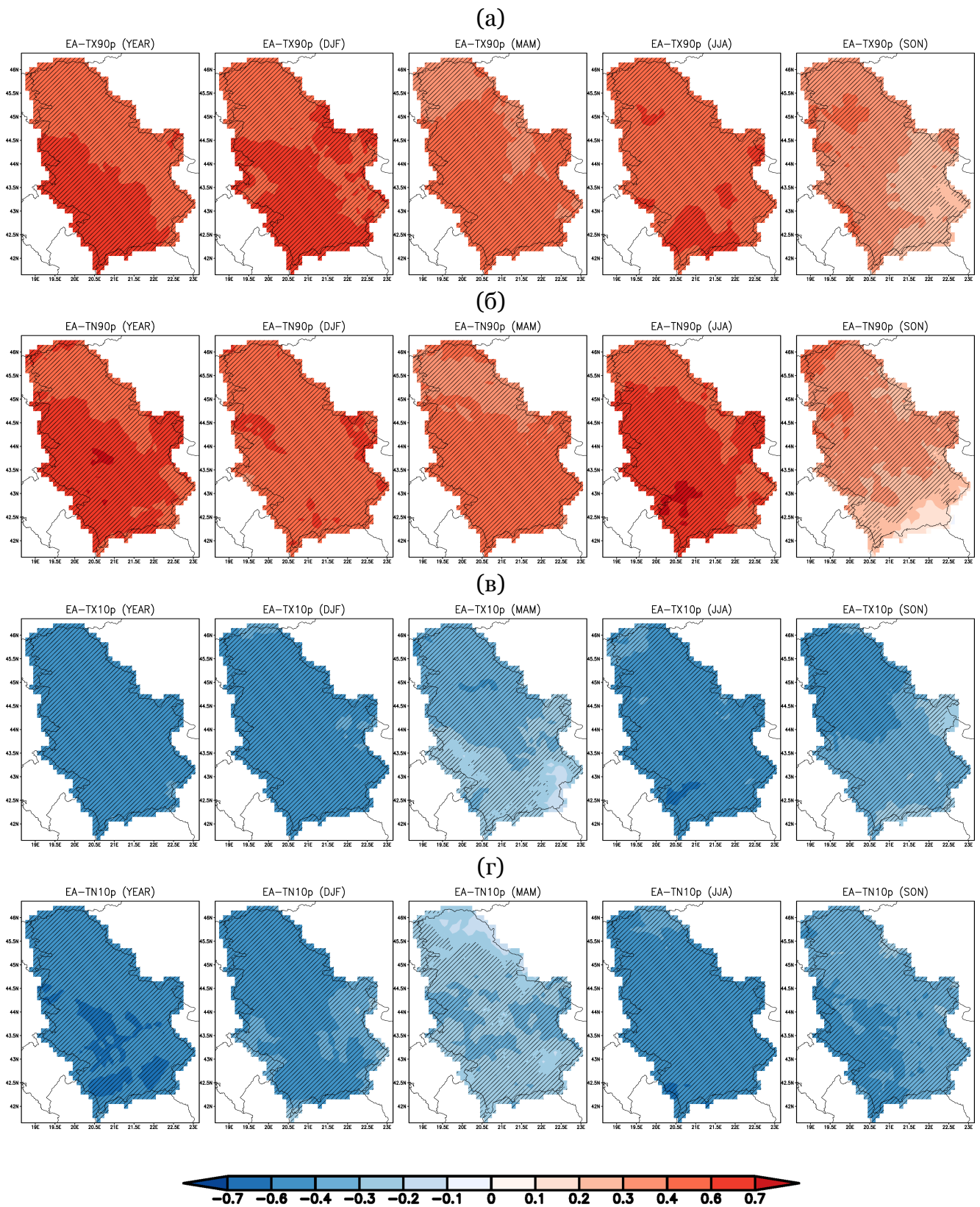
Ако је  $P > 0.5$ , тада се  $P$  замењује са  $1 - P$ , а добијени SPEI индекс добија супротан знак. Константе су:  $C_0 = 2.515517$ ,  $C_1 = 0.802853$ ,  $C_2 = 0.010328$ ,  $d_1 = 1.432788$ ,  $d_2 = 0.189269$ , и  $d_3 = 0.001308$ .

# Прилог В

Просторне корелације температурних  
климатских индекса и модова климатске  
варијабилности (NAO и EA)



Слика В.1: Просторна расподела коефицијента корелације између NAO и перцентилских температурних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за зимску (DJF), пролећну (MAM), летњу (JJA) и јесењу (SON) сезону. Статистички значајне ( $p \leq 0.05$ ) вредности Пирсоновог коефицијента корелације су шрафиране.



Слика В.2: Просторна расподела коефицијента корелације између ЕА и перцентилских температурних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за зимску (DJF), пролећну (MAM), летњу (JJA) и јесењу (SON) сезону. Статистички значајне ( $p \leq 0.05$ ) вредности Пирсоновог коефицијента корелације су шрафиране.



## Списак слика

- 1.1 Пример нормалне расподеле максималне дневне температуре. Пуна црна линија је теоријска функција расподеле са средњом вредношћу  $25^{\circ}\text{C}$ , а испрекиданим линијама су приказани 5. (плавом) и 95. (црвеном) перцентил. Вредности испод 5. и изнад 95. перцентила су осенчени плавом, односно црвеном бојом. . . . . 6
- 1.2 Мапа Србије. . . . . 10
- 1.3 Аномалија средње вредности минималне дневне температуре која је израчуната из E-OBS сета података за Београд (црвена линија) и Србију (наранџаста линија), и аномалија која је израчуната користећи податке са метеоролошке станице Београд-Опсерваторија (плава линија). . . . . 12
- 1.4 Просторна расподела тренда перцентилских температурних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за зимску (DJF), пролећну (MAM), летњу (JJA) и јесењу (SON) сезону. Значајни ( $p \leq 0.05$ ) позитивни/негативни трендови су шрафирани. . . . . 19
- 1.5 Просторна расподела композитних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за зимску (DJF), пролећну (MAM), летњу (JJA) и јесењу (SON) сезону. Приказана је средња вредност за период 1951–2020. . . . . 21
- 1.6 Просторна расподела тренда композитних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за пролећну (MAM) и летњу (JJA) сезону. Значајни ( $p \leq 0.05$ ) позитивни/негативни трендови су шрафирани. . . . . 22
- 1.7 Просторна расподела промена композитних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за зимску (DJF), пролећну (MAM), летњу (JJA) и јесењу (SON) сезону, између 1961–1990 и 1991–2020. Значајне ( $p \leq 0.05$ ) позитивне/негативне промене су шрафиране. . . . . 23
- 1.8 Заједничка расподела температуре и падавина за (а) годишњу и (б) летњу (JJA) сезону, за периоде: 1991–2020 (садашња клима), 2041–2070 (блиска будућност) и 2071–2100 (крај века). E-OBS подаци су означени сивим тачкама. Најекстремнија година за целу област (2012) истакнута је пуним црним хоризонталним и вертикалним линијама. Испрекидане хоризонталне и вертикалне линије у централном панелу означавају вредности аномалија температуре и падавина једнаке 0. Маргиналне расподеле аномалије температуре за три периода приказане су у горњем панелу, док је маргинална расподела негативне аномалије падавина приказана у десном панелу, при чему испрекидане линије означавају средњу вредност одговарајуће расподеле. . . . . 24

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.9  | Просторна расподела промена учесталости композитних (а) топло-сувих (HD) и (б) хладно-влажних (CW) догађаја на годишњем нивоу у Србији за три периода у будућности (2021–2050, 2051–2080 и 2071–2100) и два сценарија (RCP4.5 и RCP8.5), у односу на референтни период 1991–2020. Приказане вредности представљају средњу вредност ансамбла регионалних климатских модела. Шрафирани делови означавају статистички значајан сигнал промене у ансамблу. . . . . | 27 |
| 1.10 | <i>Box-plot</i> дијаграм композитних индекса мултимоделског ансамбла, за различите сезоне (DJF, MAM, JJA, SON) и годишње вредности, осредњене за Србију и 3 климатолошка периода, за два RCP сценарија. . . . .  | 28 |
| 2.1  | Трендови индекса SPEI над територијом Србије: (а) просторно осредњени месечни трендови SPEI (SPEI-01, SPEI-03, SPEI-06 и SPEI-12 представљају краткорочне до дугорочне услове суше); (б) одговарајући удео тачака мреже са статистички значајним и безначајним, позитивним и негативним трендовима (ниво значајности $p < 0.05$ ) за период 1950–2022. Слика је преузета из [88]. . . . .  | 30 |
| 2.2  | Дневне временске серије температуре ваздуха и падавина над Србијом за 2000. годину добијене применом метода најближег суседа (зелена линија) и билинеарне интерполације (црвена линија), са приказом њихових дневних разлика (жута линија). Приказани су репрезентативни резултати који илуструју да избор методе интерполације не утиче значајно на праћење дневне еволуције климатских променљивих. . . . .  | 34 |
| 2.3  | Просторна расподела средњих годишњих вредности температуре (горњи ред) и падавина (доњи ред) за Србију за 2000. годину након интерполације података модела MPI-ESM1.2-LR на E-OBS мрежу. Лева колона приказује резултате добијене методом најближег суседа, док је десна колона добијена применом билинеарне интерполације. . . . .  | 35 |
| 2.4  | Месечне падавине (а) и средња месечна температура (б) у 2012. години (црвена линија) у поређењу са климатологијом за период 1950–2020, просторно осредњено за подручје Србије. Зелена линија представља медијану климатолошких вредности, док осенчена подручја приказују међуквartilни распон од 25. до 75. перцентила (тамнија нијанса) и од 10. до 90. перцентила (светлија нијанса). . . . .   | 40 |
| 2.5  | Месечна еволуција SPEI-6 у Србији за 2012. годину. Сваки панел одговара једном месецу (од марта до октобра), приказујући просторне варијације у интензитету суше на основу SPEI-6 вредности. Позитивне вредности (зелене нијансе) означавају влажније услове од просечних, док негативне вредности (смеђе нијансе) представљају сувље услове од просечних и одговарају категоријама из табеле 2.1. . . . .   | 40 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.6  | (а) Дневни кумулативни дефицит падавина током периода април–децембар 2012. године, у поређењу са перцентилима (10, 25, 50, 75. и 90.) климатологије од 1950. до 2020. године. (б) Шематски приказ метрика за селекцију сушних догађаја. Црвена линија представља временску серију кумулативног дефицита падавина (mm) за осмотрени догађај, црна испрекидана линија приказује величину која се узима у обзир за дефиницију одговарајуће метрике: М1 – средња вредност дефицита падавина током периода август–октобар; М2 – нагиб линеарне регресије дефицита падавина у периоду јун–август; М3 – корелација (Пирсонов коефицијент корелације) временске серије дефицита падавина током периода април–октобар. . . . . | 41 |
| 2.7  | Дневни кумулативни (а) дефицит падавина и (б) аномалија дневног дефицита падавина (од 1. априла до 31. децембра) у односу на климатологију 1950–2020. за E-OBS и климатологију 1850–2014. за MPI-GE, приказани као средње вредности у 10-дневном прозору. Пуна зелена (љубичаста) линија означава медијану E-OBS (MPI-GE). Смеђом бојом представљени су опсеги од 25. до 75. (тамнија нијанса) и од 10. до 90. (светлија нијанса) перцентила за осматрања (E-OBS), док су је опсег моделског ансамбла (MPI-GE) приказан љубичастим линијама. . . . .  | 42 |
| 2.8  | Аномалије кумулативног дефицита падавина за аналогне догађаје суши 2012. године, одабране на основу три метрике (М1: средња вредност интензитета август–октобар, М2: нагиб јун–август, М3: временска корелација април–октобар). Редови одговарају различитим климатским сценаријима (историјски период, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5), а колоне одговарају избору на основу сваке метрике. Танке лила линије представљају десет изабраних појединачних аналогних догађаја; пуне љубичасте линије приказују њихову композитну средњу вредност. Пуна ружичаста линија означава осмотрени догађај из 2012. године. . . . .   | 43 |
| 2.9  | Временска еволуција аномалија дефицита падавина за период април–децембар (први ред, (а)–(в)) и летње аномалије температуре ваздуха (други ред, (г)–(ђ)) и аномалије дневних падавина (трећи ред, (е)–(з)), за осмотрени догађај (испрекидана зелена линија) и аналогне догађаје из MPI-GE у различитим SSP сценаријима и три метрике. Представљене су вредности добијене израчунавањем средње дневности у 10-дневном прозору за температуру. Различите боје представљају различите сценарије (историјски, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5). . . . .  | 45 |
| 2.10 | Хистограм релативне фреквенције метрике 1 (а), метрике 2 (б) и метрике 3 (в) према подацима из историјског периода и будућих пројекција (сценарија SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) резултата MPI-GE великог ансамбла. Пуне линије представљају процене густине расподеле за сваки сценарио. Хистограм за осмотрене догађаје је приказана у позадини као осенчена област. . . . .  | 46 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | Приказ основних конфигурација узрочног повезивања три променљиве: ланца ( $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ ), виљушке ( $Y \leftarrow Z \rightarrow X$ ) и структуре судара ( $X \rightarrow Z \leftarrow Y$ ). У циљу поједностављења анализе, претпоставља се да променљива $Y$ не може ни директно ни индиректно да узрокује $X$ , чиме се искључују повратне везе и кружне зависности које би нарушиле основни критеријум узрочности, према коме узрок мора временски да претходи последици. Приказане су искључиво конфигурације у којима је свака променљива повезана са бар једном другом променљивом, чиме се елиминишу тривијални случајеви изолованих чворова. . . . . | 57 |
| 3.2 | Шематски приказ узрочне мреже која илуструје утицаје различитих извора форсирања на одговор климатске променљиве. . . . .   | 59 |
| 3.3 | Композити аномалија притиска на нивоу мора (MSLP) током летње сезоне (ЈЈА) за негативну и позитивну фазу Северноатлантске осцилације (NAO) и Источноатлантског мода (EA). Негативна и позитивна фаза дефинисане су на основу доњег и горњег терцила расподеле одговарајућих ЈЈА индекса, при чему су у композитима укључене само године са негативним, односно позитивним вредностима индекса. Горњи ред приказује NAO– и NAO+, а доњи ред EA– и EA+ композите. . . . .   | 61 |
| 3.4 | Композити аномалија геопотенцијала на 500hPa током летње сезоне (ЈЈА) за негативну и позитивну фазу Северноатлантске осцилације (NAO) и Источноатлантског мода (EA). Негативна и позитивна фаза дефинисане су на основу доњег и горњег терцила расподеле одговарајућих ЈЈА индекса, при чему су у композитима укључене само године са негативним, односно позитивним вредностима индекса. Горњи ред приказује NAO– и NAO+, а доњи ред EA– и EA+ композите. . . . .  | 62 |
| 3.5 | Композит вредности притиска на нивоу мора (MSLP) током летње сезоне (ЈЈА) за екстремно сушне године у Србији, дефинисане просечном вредношћу за целу област када је SPEI-6a < -2. Нијансама смеђе боје су представљени композити вредности MSLP, док плаве контуре представљају аномалије у односу на референтни период 1961–1990. Композит је заснован на следећим сушним годинама: 1950, 1952, 1990, 2000, 2003, 2007, 2011, 2012, 2017, 2022. и 2024. . . . .  | 63 |
| 3.6 | Композит вредности геопотенцијала на 500hPa током летње сезоне (ЈЈА) за екстремно сушне године у Србији, дефинисане просечном вредношћу за целу област када је SPEI-6a < -2. Нијансама смеђе боје су представљени композити вредности геопотенцијала на 500hPa док плаве контуре представљају аномалије у односу на референтни период 1961–1990. Композит је заснован на следећим сушним годинама: 1950, 1952, 1990, 2000, 2003, 2007, 2011, 2012, 2017, 2022. и 2024. . . . .  | 64 |
| 3.7 | Шематски приказ поступка конструисања PGW почетних и бочних граничних услова. . . . .   | 74 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.8  | Просторно осредњене временске серије (а) средње дневне температуре за летњу сезону (ЈЈА), приказане као средња вредност у петодневном прозору, и (б) дневне кумулативне падавина, у Србији. За сваку променљиву приказана је медијана, вредности за 2012. и 2024. годину, као и интерквartilни опсег (25–75. перцентил) и опсег варијабилности (10–90. перцентил), израчунати на основу референтне климатологије за период 1950–2020. године. . . . .  | 76 |
| 3.9  | Месечна еволуција SPEI-6 индекса у Србији за 2024. годину. Сваки панел одговара једном месецу (од марта до октобра), приказујући просторне варијације у интензитету суше на основу SPEI-6 вредности. Позитивне вредности (зелене нијансе) означавају влажније услове од просечних, док негативне вредности (смеђе нијансе) представљају сувље услове од просечних. . . . .   | 77 |
| 3.10 | Коефицијент корелације ( $r$ ) између SPEI-6 за август и а) индекса источноатлантског обрасца (ЕА), б) индекса северноатлантске осцилације (NAO), в) аномалије средње глобалне температуре, током периода 1950–2024. Шрафирана је значајна ( $p \leq 0.05$ ) позитивна/негативна корелација. . . . .   | 78 |
| 3.11 | Узрочна мрежа која приказује хипотетски узрочни утицај летње северноатлантске осцилације (NAO), источноатлантског обрасца (ЕА) и аномалије средње глобалне температуре на променљиву $Y$ која представља индекс суше SPEI-6а, температуру или падавине током сезоне МAMЈЈА, односно ЈЈА у Србији. . . . .  | 79 |
| 3.12 | Временске серије ЕА, NAO аномалије GMST, температуре, месечне суме падавина, осредњених за период мај–август (МAMЈЈА), и SPEI-6а за период 1950–2024. Испрекиданим линијама представљене су линеарне регресије за периоде 1950–2024 (жута линија) и 1975–2024 (црвена линија), док су одговарајуће једначине линеарне регресије приказане на сваком графику за оба периода. . . . .  | 80 |
| 3.13 | Корелационе матрице Пирсоновог коефицијента корелације за (а) оригиналне и (б) детрендоване временске серије променљивих. Шрафиране су корелације које нису статистички значајне на нивоу поверења од 95%. . . . .   | 81 |
| 3.14 | Временске серије SPEI6а за период 1950–2024 (а) и 1975–2024 (б), заједно са линеарним трендом и реконструисаним доприносима атмосферске циркулације . . . . .  | 83 |
| 3.15 | (а) Средња дневна температура за Србију, за експерименте <i>Factual</i> (црвена линија), <i>Counterfactual</i> (жута линија) и <i>Plus4K</i> (бордо линија), 5–95. перцентил климатологија за период 1961–1990 (осенчена област смеђом бојом), подаци из осматрања Е-OBS (црна пуна линија) и реанализа ERA5 (сива испрекидана линија) и (б) разлика у дневној температури ваздуха између условних експеримената <i>Plus4k</i> и <i>Factual</i> симулације за период од 1. марта до 1. октобра 2024. године. На графику (б) плава линија приказује разлику између <i>Counterfactual</i> и <i>Factual</i> експеримента ( <i>Counterfactual</i> – <i>Factual</i> ), док наранџаста линија приказује разлику између експеримента са повећањем глобалне температуре за <i>Plus4K</i> и <i>Factual</i> експеримента ( <i>Plus4K</i> – <i>Factual</i> ). . . . . | 87 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 3.16 | Укупне дневне падавине (а) и кумулативне падавине (б) за Србију, од 1. марта до 1. октобра 2024. године за експерименте <i>Factual</i> (плава линија), <i>Counterfactual</i> (зелена линија) и <i>Plus4K</i> (тиркизна линија), 5–95. перцентил климатологије за период 1961–1990 (осенчена област смеђом бојом), подаци из осматрања E-OBS (црна пуна линија) и реанализа ERA5 (сива испрекидана линија). . . . . | 88  |
| 3.17 | Просторна расподела релативне топографије између 500 hPa и 925 hPa нивоа ( $Z_{500}–Z_{925}$ ), $PT_{500/925}$ , за летњи период (ЈЈА) за сва три експеримента.  | 89  |
| 3.18 | Просторне расподеле разлике $PT_{500/925}$ , за ЈЈА сезону, за експеримент <i>Counterfactual</i> и <i>Plus4K</i> , у односу на експеримент стварни свет. . . . .   | 89  |
| 3.19 | Полумесечне просторне расподеле дефицита падавина у експерименту <i>Factual</i> (прва колона) и њихове разлике у односу на <i>Counterfactual</i> и <i>Plus4K</i> . . . . .   | 91  |
| A.1  | Заједничка расподела температуре и падавина за зимску (DJF) сезону, за периоде: 1991–2020 (садашња клима), 2041–2070 (блиска будућност) и 2071–2100 (крај века). . . . .   | 97  |
| A.2  | Заједничка расподела температуре и падавина за пролећну (MAM) сезону, за периоде: 1991–2020 (садашња клима), 2041–2070 (блиска будућност) и 2071–2100 (крај века). . . . .   | 98  |
| A.3  | Заједничка расподела температуре и падавина за јесењу (SON) сезону, за периоде: 1991–2020 (садашња клима), 2041–2070 (блиска будућност) и 2071–2100 (крај века). . . . .   | 99  |
| V.1  | Просторна расподела коефицијента корелације између NAO и перцентилских температурних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за зимску (DJF), пролећну (MAM), летњу (JJA) и јесењу (SON) сезону. Статистички значајне ( $p \leq 0.05$ ) вредности Пирсоновог коефицијента корелације су шрафиране. . . . .   | 104 |
| V.2  | Просторна расподела коефицијента корелације између EA и перцентилских температурних климатских индекса на годишњем нивоу (year) и за зимску (DJF), пролећну (MAM), летњу (JJA) и јесењу (SON) сезону. Статистички значајне ( $p \leq 0.05$ ) вредности Пирсоновог коефицијента корелације су шрафиране. . . . .  | 105 |

# Списак табела

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Списак регионалних климатских модела из EURO-CORDEX ансамбла који су коришћени у овој студији и глобалних модела помоћу којих су иницијализовани, са институцијама које су их реализовале. . . . .   | 13 |
| 2.1 | Класификација категорија суше и влажних услова на основу вредности SPEI [126]. . . . .   | 38 |
| 3.1 | Месечне вредности NAO и EA индекса за 2024. годину . . . . .   | 77 |
| 3.2 | Фактор инфлације варијансе (VIF) за предикторе коришћене у моделу вишеструке линеарне регресије за различите периоде анализе. . . . .  | 82 |
| 3.3 | Коефицијенти вишеструке линеарне регресије за различите периоде, са одговарајућим стандардним грешкама (SE) и коефицијентом детерминације $R^2$ . . . . .  | 82 |
| 3.4 | Коефицијенти вишеструке линеарне регресије за летње (ЈЈА) аномалије температуре и падавина у Србији. Регресија је примењена на детрендоване и стандардизоване аномалије. Коефицијенти представљају осетљивост на промену од једне стандардне девијације у сваком предиктору. $\beta^T$ и $\beta^P$ означавају регресионе коефицијенте за температуру и падавине. Резидуали представљају варијабилност која није линеарно повезана са GMST, EA или NAO и доминантно одражава унутрашњу климатску варијабилност. . . . . | 84 |
| 3.5 | Декомпозиција аномалија температуре и падавина у Србији током ЈЈА 2024 на термодинамичку, динамичку и резидуалну компоненту коришћењем условних наратива. . . . .  | 85 |



## Литература

- [1] Milankovitch, MK. „Kanon Der Erdbestahlung Und Seine Anwendung Auf Das Eiszeitenproblem”. *Royal Serbian Academy Special Publication* **133** (1941.), стр. 1–633.
- [2] J. Hansen, A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy и J. Lerner. „Climate Sensitivity: Analysis of Feedback Mechanisms”. *Geophysical Monograph Series*. Св. 29. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1984., стр. 130–163. doi: 10.1029/GM029p0130.
- [3] J. F. B. Mitchell, D. J. Karoly, G. C. Hegerl, F. W. Zwiers, M. R. Allen, J. Marengo, V. Barros, M. Berliner, G. Boer, T. Crowley, C. Folland, M. Free, N. Gillett, P. Groisman, J. Haigh, K. Hasselmann, P. Jones, M. Kandlikar, V. Kharin, H. Kheshgi, T. Knutson, M. MacCracken, M. Mann, G. North, J. Risbey, A. Robock, B. Santer, R. Schnur, C. Schönwiese, D. Sexton, P. Stott, S. Tett, K. Vinnikov, T. Wigley, F. Semazzi и J. Zillman. „Detection of Climate Change and Attribution of Causes”. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Third Assessment Report*. United Kingdom: Cambridge University Press., 2001., стр. 696–738.
- [4] A. Smith. „The Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)” (2021.)
- [5] Z. Gan, X. Xie, C. Su, W. Ge, H. Pan и L. Yang. „Understanding the Evolutionary Processes and Causes of Groundwater Drought Using an Interpretable Machine Learning Model”. *Scientific Reports* **15** (2025.), стр. 20981. doi: 10.1038/s41598-025-05316-2.
- [6] S. I. Seneviratne. „Climate Science: Historical Drought Trends Revisited”. *Nature* **491** (2012.), стр. 338–339. doi: 10.1038/491338a.
- [7] D. Richardson, A. S. Black, D. Irving, R. J. Matear, D. P. Monselesan, J. S. Risbey, D. T. Squire и C. R. Tozer. „Global Increase in Wildfire Potential from Compound Fire Weather and Drought”. *npj Climate and Atmospheric Science* **5** (2022.), стр. 23. doi: 10.1038/s41612-022-00248-4.
- [8] I. Tošić, S. Živanović и M. Tošić. „Influence of Extreme Climate Conditions on the Forest Fire Risk in the Timočka Krajina Region (Northeastern Serbia)”. *Időjárás* **124** (2020.), стр. 331–347. doi: 10.28974/idojaras.2020.3.2.

- [9] H. Yao, L. Zhao, Y. He, W. Dong, X. Shen, J. Wang, Y. Hu, J. Ling, Z. Xiao и C. Huang. „Changes Caused by Human Activities in the High Health-Risk Hot-Dry and Hot-Wet Events in China”. *Communications Earth & Environment* **5** (2024.), стр. 464. doi: 10.1038/s43247-024-01625-y.
- [10] M. Olmo, M. L. Bettolli и M. Rusticucci. „Atmospheric Circulation Influence on Temperature and Precipitation Individual and Compound Daily Extreme Events: Spatial Variability and Trends over Southern South America”. *Weather and Climate Extremes* **29** (2020.), стр. 100267. doi: 10.1016/j.wace.2020.100267.
- [11] G. Zappa и T. G. Shepherd. „Storylines of Atmospheric Circulation Change for European Regional Climate Impact Assessment”. *Journal of Climate* **30** (2017.), стр. 6561–6577. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0807.1.
- [12] C. Deser, L. Terray и A. S. Phillips. „Forced and Internal Components of Winter Air Temperature Trends over North America during the Past 50 Years: Mechanisms and Implications\*”. *Journal of Climate* **29** (2016.), стр. 2237–2258. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0304.1.
- [13] C. Manning, M. Widmann, E. Bevacqua, A. F. Van Loon, D. Maraun и M. Vrac. „Increased Probability of Compound Long-Duration Dry and Hot Events in Europe during Summer (1950–2013)”. *Environmental Research Letters* **14** (2019.), стр. 094006. doi: 10.1088/1748-9326/ab23bf.
- [14] Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). *Indices of Climate Extremes*. 2024. url: <https://www.ecad.eu/indicesextremes/indicesdictionary.php#1>.
- [15] T. G. Shepherd. „A Common Framework for Approaches to Extreme Event Attribution”. *Current Climate Change Reports* **2** (2016.), стр. 28–38. doi: 10.1007/s40641-016-0033-y.
- [16] T. Huppé, C. Barnes, R. Noyelle, R. Hamed, S. Philip и T. Shepherd. „How Can We Attribute Weather Extremes to Climate Change?” (2020.)
- [17] Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1. издање. Cambridge University Press, 2023. doi: 10.1017/9781009157896.
- [18] T. Tamarin-Brodsky, K. Hodges, B. J. Hoskins и T. G. Shepherd. „A Dynamical Perspective on Atmospheric Temperature Variability and Its Response to Climate Change”. *Journal of Climate* **32** (2019.), стр. 1707–1724. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0462.1.
- [19] E. A. Lloyd и T. G. Shepherd. „Environmental Catastrophes, Climate Change, and Attribution”. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1469** (2020.), стр. 105–124. doi: 10.1111/nyas.14308.
- [20] S. Coles. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Springer London, 2001. doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0.
- [21] T. DelSole и M. Tippett. *Statistical Methods for Climate Scientists*. Cambridge, United Kingdom New York, NY, USA Port Melbourne, VIC, Australia New Delhi, India Singapore: Cambridge University Press, 2022. 1 стр. doi: 10.1017/9781108659055.

- [22] L. V. Alexander, X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci и J. L. Vazquez-Aguirre. „Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **111** (2006.), 2005JD006290. doi: 10.1029/2005JD006290.
- [23] X. Zhang, L. Alexander, G. C. Hegerl, P. Jones, A. K. Tank, T. C. Peterson, B. Trewin и F. W. Zwiers. „Indices for Monitoring Changes in Extremes Based on Daily Temperature and Precipitation Data”. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* **2** (2011.), стр. 851–870. doi: 10.1002/wcc.147.
- [24] M. Ruml, E. Gregorić, M. Vujadinović, S. Radovanović, G. Matović, A. Vuković, V. Počuča и D. Stojičić. „Observed Changes of Temperature Extremes in Serbia over the Period 1961 – 2010”. *Atmospheric Research* **183** (2017.), стр. 26–41. doi: 10.1016/j.atmosres.2016.08.013.
- [25] D. Rypkema и S. Tuljapurkar. „Modeling Extreme Climatic Events Using the Generalized Extreme Value (GEV) Distribution”. *Handbook of Statistics*. Св. 44. Elsevier, 2021., стр. 39–71. doi: 10.1016/bs.host.2020.12.002.
- [26] M. F. Wehner. „Characterization of Long Period Return Values of Extreme Daily Temperature and Precipitation in the CMIP6 Models: Part 2, Projections of Future Change”. *Weather and Climate Extremes* **30** (2020.), стр. 100284. doi: 10.1016/j.wace.2020.100284.
- [27] M. G. Donat, L. V. Alexander, H. Yang, I. Durre, R. Vose, R. J. H. Dunn, K. M. Willett, E. Aguilar, M. Brunet, J. Caesar, B. Hewitson, C. Jack, A. M. G. Klein Tank, A. C. Kruger, J. Marengo, T. C. Peterson, M. Renom, C. Oria Rojas, M. Rusticucci, J. Salinger, A. S. Elrayah, S. S. Sekele, A. K. Srivastava, B. Trewin, C. Villarroya, L. A. Vincent, P. Zhai, X. Zhang и S. Kitching. „Updated Analyses of Temperature and Precipitation Extreme Indices since the Beginning of the Twentieth Century: The HadEX2 Dataset”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **118** (2013.), стр. 2098–2118. doi: 10.1002/jgrd.50150.
- [28] J. Spinoni, S. Szalai, T. Szentimrey, M. Lakatos, Z. Bihari, A. Nagy, Á. Németh, T. Kovács, D. Mihic, M. Dacic, P. Petrovic, A. Kržič, J. Hiebl, I. Auer, J. Milkovic, P. Štěpánek, P. Zahradníček, P. Kilar, D. Limanowka, R. Pyrc, S. Cheval, M.-V. Birsan, A. Dumitrescu, G. Deak, M. Matei, I. Antolovic, P. Nejedlík, P. Štastný, P. Kajaba, O. Bochníček, D. Galo, K. Mikulová, Y. Nabyvanets, O. Skrynyk, S. Krakovska, N. Gnatiuk, R. Tolasz, T. Antofie и J. Vogt. „Climate of the Carpathian Region in the Period 1961-2010: Climatologies and Trends of 10 Variables: CLIMATE CHANGE IN THE CARPATHIAN REGION”. *International Journal of Climatology* **35** (2015.), стр. 1322–1341. doi: 10.1002/joc.4059.
- [29] I. Nimac, I. Herceg-Bulić, K. Cindrić Kalin и M. Perčec Tadić. „Changes in Extreme Air Temperatures in the Mid-Sized European City Situated on Southern Base of a Mountain (Zagreb, Croatia)”. *Theoretical and Applied Climatology* **146** (2021.), стр. 429–441. doi: 10.1007/s00704-021-03689-8.

- [30] D. Burić и M. Doderović. „Changes in Temperature and Precipitation in the Instrumental Period (1951–2018) and Projections up to 2100 in Podgorica (Montenegro)”. *International Journal of Climatology* **41** (2021.) doi: 10.1002/joc.6671.
- [31] A. Busuioc, A. Dobrinescu, M.-V. Birsan, A. Dumitrescu и A. Orzan. „Spatial and Temporal Variability of Climate Extremes in Romania and Associated Large-scale Mechanisms”. *International Journal of Climatology* **35** (2015.), стр. 1278–1300. doi: 10.1002/joc.4054.
- [32] M. Unkašević и I. Tošić. „Trends in Temperature Indices over Serbia: Relationships to Large-Scale Circulation Patterns”. *International Journal of Climatology* **33** (2013.), стр. 3152–3161. doi: 10.1002/joc.3652.
- [33] Krzič Aleksanda, Djurdjević Vladimir и Tošić Ivana. „Future Changes in Drought Characteristics in Serbia”. *Proceedings of DailyMeteo.Org/2014 Conference Belgrade, Serbia, 26-27 June 2014*. DailyMeteo.Org/2014 Conference. Belgrade: Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, 2014.
- [34] M. Ruml, E. Gregorić, M. Vujadinović, S. Radovanović, G. Matović, A. Vuković, V. Počuča и D. Stojičić. „Observed Changes of Temperature Extremes in Serbia over the Period 1961 – 2010”. *Atmospheric Research* **183** (2017.), стр. 26–41. doi: 10.1016/j.atmosres.2016.08.013.
- [35] I. Tošić, S. Putniković, M. Tošić и I. Lazić. „Extreme Temperature Events in Serbia in Relation to Atmospheric Circulation”. *Atmosphere* **12** (2021.), стр. 1584. doi: 10.3390/atmos12121584.
- [36] I. Tošić, A. S. A. Da Silva, L. Filipović, M. Tošić, I. Lazić, S. Putniković, T. Stosic, B. Stosic и V. Djurdjević. „Trends of Extreme Precipitation Events in Serbia Under the Global Warming”. *Atmosphere* **16** (2025.), стр. 436. doi: 10.3390/atmos16040436.
- [37] M. M. Vogel, M. Hauser и S. I. Seneviratne. „Projected Changes in Hot, Dry and Wet Extreme Events’ Clusters in CMIP6 Multi-Model Ensemble”. *Environmental Research Letters* **15** (2020.) doi: 10.1088/1748-9326/ab90a7.
- [38] Y.-H. Kim, S.-K. Min, X. Zhang, J. Sillmann и M. Sandstad. „Evaluation of the CMIP6 Multi-Model Ensemble for Climate Extreme Indices”. *Weather and Climate Extremes* **29** (2020.), стр. 100269. doi: 10.1016/j.wace.2020.100269.
- [39] J. Zscheischler, J. Sillmann и L. Alexander. „Introduction to the Special Issue: Compound Weather and Climate Events”. *Weather and Climate Extremes* **35** (2022.), стр. 100381. doi: 10.1016/j.wace.2021.100381.
- [40] S. I. Seneviratne, T. Corti, E. L. Davin, M. Hirschi, E. B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky и A. J. Teuling. „Investigating Soil Moisture–Climate Interactions in a Changing Climate: A Review”. *Earth-Science Reviews* **99** (2010.), стр. 125–161. doi: 10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- [41] J. Zscheischler, S. Westra, B. J. J. M. Van Den Hurk, S. I. Seneviratne, P. J. Ward, A. Pitman, A. AghaKouchak, D. N. Bresch, M. Leonard, T. Wahl и X. Zhang. „Future Climate Risk from Compound Events”. *Nature Climate Change* **8** (2018.), стр. 469–477. doi: 10.1038/s41558-018-0156-3.

- [42] R. A. Madden и J. Williams. „The Correlation between Temperature and Precipitation in the United States and Europe”. *Monthly Weather Review* **106** (1978.), стр. 142–147. doi: 10.1175/1520-0493(1978)106<0142:TCBTAP>2.0.CO;2.
- [43] K. E. Trenberth и D. J. Shea. „Relationships between Precipitation and Surface Temperature”. *Geophysical Research Letters* **32** (2005.), 2005GL022760. doi: 10.1029/2005GL022760.
- [44] J. Zscheischler и S. I. Seneviratne. „Dependence of Drivers Affects Risks Associated with Compound Events”. *Science Advances* **3** (2017.), e1700263. doi: 10.1126/sciadv.1700263.
- [45] P. Arsenović, I. Tošić и M. Unkašević. „Trends in Combined Climate Indices in Serbia from 1961 to 2010”. *Meteorology and Atmospheric Physics* **127** (2015.), стр. 489–498. doi: 10.1007/s00703-015-0380-6.
- [46] B. Bajat, D. Blagojević, M. Kilibarda, J. Luković и I. Tošić. „Spatial Analysis of the Temperature Trends in Serbia during the Period 1961–2010”. *Theoretical and Applied Climatology* **121** (2015.), стр. 289–301. doi: 10.1007/s00704-014-1243-7.
- [47] E. Manić, V. Nikitović и P. Đurović. *The Geography of Serbia: Nature, People, Economy*. Cham, Switzerland: Springer, 2022.
- [48] M. Vujadinović Mandić, A. Vuković Vimić, Z. Ranković-Vasić, D. Đurović, M. Ćosić, D. Sotonica, D. Nikolić и V. Đurđević. „Observed Changes in Climate Conditions and Weather-Related Risks in Fruit and Grape Production in Serbia”. *Atmosphere* **13** (2022.), стр. 948. doi: 10.3390/atmos13060948.
- [49] Z. Rankovic-Vasic, A. Vukovic-Vimic и M. Vujadinovic-Mandic. „Priority Measures of Adaptation to Climate Change in the Viticulture Sector in Serbia”. *Zbornik Matice srpske za prirodne nauke* (2024.), стр. 67–79. doi: 10.2298/ZMSPN2447067R.
- [50] van der Linden, Paul и Mitchell, J. E. „ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project”. *Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK* **160** (2009.)
- [51] R. C. Cornes, G. Van Der Schrier, E. J. M. Van Den Besselaar и P. D. Jones. „An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **123** (2018.), стр. 9391–9409. doi: 10.1029/2017JD028200.
- [52] N. Hofstra, M. Haylock, M. New и P. D. Jones. „Testing E-OBS European High-resolution Gridded Data Set of Daily Precipitation and Surface Temperature”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **114** (2009.), 2009JDO11799. doi: 10.1029/2009JDO11799.
- [53] Copernicus Climate Change Service. *E-OBS Daily Gridded Meteorological Data for Europe from 1950 to Present Derived from in-Situ Observations*. ECMWF, 2020. url: <https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.151d3ec6> (посећено 9. 10. 2025.).

- [54] D. Jacob, J. Petersen, B. Eggert, A. Alias, O. B. Christensen, L. M. Bouwer, A. Braun, A. Colette, M. Déqué, G. Georgievski, E. Georgopoulou, A. Gobiet, L. Menut, G. Nikulin, A. Haensler, N. Hempelmann, C. Jones, K. Keuler, S. Kovats, N. Kröner, S. Kotlarski, A. Kriegsmann, E. Martin, E. Van Meijgaard, C. Moseley, S. Pfeifer, S. Preuschmann, C. Radermacher, K. Radtke, D. Rechid, M. Rounsevell, P. Samuelsson, S. Somot, J.-F. Soussana, C. Teichmann, R. Valentini, R. Vautard, B. Weber и P. Yiou. „EURO-CORDEX: New High-Resolution Climate Change Projections for European Impact Research”. *Regional Environmental Change* **14** (2014.), стр. 563–578. doi: 10.1007/s10113-013-0499-2.
- [55] G. Nikulin и S. Legutke. *Data Reference Syntax (DRS) for Bias-Adjusted CORDEX Simulations*. 2016.
- [56] M. Matiu, A. Napoli, S. Kotlarski, D. Zardi, A. Bellin и B. Majone. „Elevation-Dependent Biases of Raw and Bias-Adjusted EURO-CORDEX Regional Climate Models in the European Alps”. *Climate Dynamics* **62** (2024.), стр. 9013–9030. doi: 10.1007/s00382-024-07376-y.
- [57] *Digital Climate Atlas of Serbia*. url: <https://atlas-klime.eko.gov.rs/eng/map?dataType=mod&visualization=vre&variableUuid=d06081ce-1b51-4296-b8f8-c7eeba3fc26b&area=serbia> (посећено 27. 4. 2025.).
- [58] X. Zhang, G. Hegerl, F. W. Zwiers и J. Kenyon. „Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes”. *Journal of Climate* **18** (2005.), стр. 1641–1651. doi: 10.1175/JCLI3366.1.
- [59] C. Pagé, A. Aoun и A. Spinuso. „Icclim: Calculating Climate Indices and Indicators Made Easy”. *Earth and Space Science Open Archive*. 2022. doi: 10.1002/essoar.10510322.1.
- [60] Christian Page и Abel Aoun. *Icclim*. Верзија 7.0.3. CERFACS, 2025. url: <https://icclim.readthedocs.io/en/stable/#>.
- [61] H. B. Mann. „Nonparametric Tests Against Trend”. *Econometrica* **13** (1945.), стр. 245. doi: 10.2307/1907187.
- [62] M. G. Kendall. „A NEW MEASURE OF RANK CORRELATION”. *Biometrika* **30** (1938.), стр. 81–93. doi: 10.1093/biomet/30.1-2.81.
- [63] P. K. Sen. „Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall’s Tau”. *Journal of the American Statistical Association* **63** (1968.), стр. 1379–1389. doi: 10.1080/01621459.1968.10480934.
- [64] M. G. Kendall. *Rank Correlation Methods*. 4th ed. London: Griffin, 1970. 202 стр.
- [65] B. L. Welch. „THE GENERALIZATION OF ‘STUDENT’S’ PROBLEM WHEN SEVERAL DIFFERENT POPULATION VARIANCES ARE INVOLVED”. *Biometrika* **34** (1947.), стр. 28–35. doi: 10.1093/biomet/34.1-2.28.
- [66] B. Derrick и P. White. „Why Welch’s Test Is Type I Error Robust”. *The Quantitative Methods for Psychology* **12** (2016.), стр. 30–38. doi: 10.20982/tqmp.12.1.p030.
- [67] Z. Hao, A. Aghakouchak и T. J. Phillips. „Changes in Concurrent Monthly Precipitation and Temperature Extremes”. *Environmental Research Letters* **8** (2013.) doi: 10.1088/1748-9326/8/3/034014.

- [68] P. De Luca, G. Messori, D. Faranda, P. J. Ward и D. Coumou. „Compound Warm–Dry and Cold–Wet Events over the Mediterranean”. *Earth System Dynamics* **11** (2020.), стр. 793–805. doi: 10.5194/esd-11-793-2020.
- [69] E. Felsche, A. Böhnisch, B. Poschlod и R. Ludwig. „European Hot and Dry Summers Are Projected to Become More Frequent and Expand Northwards”. *Communications Earth & Environment* **5** (2024.), стр. 410. doi: 10.1038/s43247-024-01575-5.
- [70] S. Węglarczyk. „Kernel Density Estimation and Its Application”. *ITM Web of Conferences* **23** (2018.), стр. 00037. doi: 10.1051/itmconf/20182300037.
- [71] I. Tošić, M. Tošić, I. Lazić, N. Aleksandrov, S. Putniković и V. Djurdjević. „Spatio-temporal Changes in the Mean and Extreme Temperature Indices for Serbia”. *International Journal of Climatology* **43** (2023.), стр. 2391–2410. doi: 10.1002/joc.7981.
- [72] J. Zscheischler, R. Orth и S. I. Seneviratne. „Bivariate Return Periods of Temperature and Precipitation Explain a Large Fraction of European Crop Yields”. *Biogeosciences* **14** (2017.), стр. 3309–3320. doi: 10.5194/bg-14-3309-2017.
- [73] V. Blauhut, L. Gudmundsson и K. Stahl. „Towards Pan-European Drought Risk Maps: Quantifying the Link between Drought Indices and Reported Drought Impacts”. *Environmental Research Letters* **10** (2015.), стр. 014008. doi: 10.1088/1748-9326/10/1/014008.
- [74] L. Deng, C. Peng, D.-G. Kim, J. Li, Y. Liu, X. Hai, Q. Liu, C. Huang, Z. Shanguan и Y. Kuzyakov. „Drought Effects on Soil Carbon and Nitrogen Dynamics in Global Natural Ecosystems”. *Earth-Science Reviews* **214** (2021.), стр. 103501. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103501.
- [75] J. Qiu, Z. Shen и H. Xie. „Drought Impacts on Hydrology and Water Quality under Climate Change”. *Science of The Total Environment* **858** (2023.), стр. 159854. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159854.
- [76] A. F. Van Loon. „Hydrological Drought Explained”. *WIREs Water* **2** (2015.), стр. 359–392. doi: 10.1002/wat2.1085.
- [77] W. Wang, M. W. Ertsen, M. D. Svoboda и M. Hafeez. „Propagation of Drought: From Meteorological Drought to Agricultural and Hydrological Drought”. *Advances in Meteorology* **2016** (2016.), стр. 1–5. doi: 10.1155/2016/6547209.
- [78] S. M. Vicente-Serrano, D. Peña-Angulo, S. Beguería, F. Domínguez-Castro, M. Tomás-Burguera, I. Noguera, L. Gimeno-Sotelo и A. El Kenawy. „Global Drought Trends and Future Projections”. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **380** (2022.), стр. 20210285. doi: 10.1098/rsta.2021.0285.
- [79] McKee, T. B., N. J. Doesken и J. Kleist. „The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales”. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Eighth Conf. on Applied Climatology. Anaheim, CA: Amer. Meteor. Soc., стр. 179–184.
- [80] S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería и J. I. López-Moreno. „A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index”. *Journal of Climate* **23** (2010.), стр. 1696–1718. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.

- [81] W. C. Palmer. *Meteorological Drought*. U.S. Department of Commerce, Weather Bureau Research Paper 45, 1965., стр. 58. url: [https://www.droughtmanagement.info/literature/USWB\\_Meteorological\\_Drought\\_1965.pdf](https://www.droughtmanagement.info/literature/USWB_Meteorological_Drought_1965.pdf).
- [82] J. Sheffield, E. F. Wood и M. L. Roderick. „Little Change in Global Drought over the Past 60 Years”. *Nature* **491** (2012.), стр. 435–438. doi: 10.1038/nature11575.
- [83] J. Spinoni, G. Naumann, J. Vogt и P. Barbosa. „European Drought Climatologies and Trends Based on a Multi-Indicator Approach”. *Global and Planetary Change* **127** (2015.), стр. 50–57. doi: 10.1016/j.gloplacha.2015.01.012.
- [84] R. Twardosz и U. Kossowska-Cezak. „Exceptionally Hot Summers in Central and Eastern Europe (1951–2010)”. *Theoretical and Applied Climatology* **112** (2013.), стр. 617–628. doi: 10.1007/s00704-012-0757-0.
- [85] J. Zscheischler и E. M. Fischer. „The Record-Breaking Compound Hot and Dry 2018 Growing Season in Germany”. *Weather and Climate Extremes* **29** (2020.), стр. 100270. doi: 10.1016/j.wace.2020.100270.
- [86] M. Hanel, O. Rakovec, Y. Markonis, P. Máca, L. Samaniego, J. Kyselý и R. Kumar. „Revisiting the Recent European Droughts from a Long-Term Perspective”. *Scientific Reports* **8** (2018.), стр. 9499. doi: 10.1038/s41598-018-27464-4.
- [87] T. Caloiero, G. N. Caroletti и R. Coscarelli. „IMERG-Based Meteorological Drought Analysis over Italy”. *Climate* **9** (2021.), стр. 65. doi: 10.3390/cli9040065.
- [88] V. Djurdjević, B. Stosic, M. Tošić, I. Lazić, S. Putniković, T. Stosic и I. Tošić. „Analysis of Recent Trends and Spatiotemporal Changes of Droughts over Serbia Using High-Resolution Gridded Data”. *Atmospheric Research* **304** (2024.), стр. 107376. doi: 10.1016/j.atmosres.2024.107376.
- [89] RHMZ. *Sezonski bilten za Srbiju: Leto 2024. godine*. Republic Hydrometeorological Service of Serbia, 12. 9. 2024., стр. 19. url: <https://www.hidmet.gov.rs/data/klimatologija/latin/leto.pdf>.
- [90] U. F. A. S. ( can enter as "United States. Foreign Agricultural Service"). *Drought Driven Declines in Serbian Crops Increased Food Prices*. U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service, 2012. url: [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Drought%20Driven%20Declines%20in%20Serbian%20Crops%20Increased%20Food%20Prices%20\\_Belgrade\\_Serbia\\_8-15-2012.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Drought%20Driven%20Declines%20in%20Serbian%20Crops%20Increased%20Food%20Prices%20_Belgrade_Serbia_8-15-2012.pdf).
- [91] M. Gocic и S. Trajkovic. „Spatiotemporal Characteristics of Drought in Serbia”. *Journal of Hydrology* **510** (2014.), стр. 110–123. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.12.030.
- [92] P. De Luca и M. G. Donat. „Projected Changes in Hot, Dry, and Compound Hot-Dry Extremes Over Global Land Regions”. *Geophysical Research Letters* **50** (2023.), e2022GL102493. doi: 10.1029/2022GL102493.
- [93] E. Felsche, A. Böhnisch, B. Poschlod и R. Ludwig. „European Hot and Dry Summers Are Projected to Become More Frequent and Expand Northwards”. *Communications Earth & Environment* **5** (2024.), стр. 410. doi: 10.1038/s43247-024-01575-5.
- [94] B. I. Cook, J. S. Mankin, K. Marvel, A. P. Williams, J. E. Smerdon и K. J. Anchukaitis. „Twenty-First Century Drought Projections in the CMIP6 Forcing Scenarios”. *Earth's Future* **8** (2020.), e2019EF001461. doi: 10.1029/2019EF001461.

- [95] J. Spinoni, J. V. Vogt, G. Naumann, P. Barbosa и A. Dosio. „Will Drought Events Become More Frequent and Severe in Europe?” *International Journal of Climatology* **38** (2018.), стр. 1718–1736. doi: 10.1002/joc.5291.
- [96] A. Katzenberger, N. Črnivec, P. Puthukulangara, E. Galytska, K. Gemell, C. Leclerc, J. S. Perez-Carrasquilla, I. Roy, A. Varuolo-Clarke и M. Tošić. „Guidelines for Working with Multi-Model Ensembles in CMIP”. 2025. doi: 10.5194/egusphere-egu25-16927.
- [97] A. Katzenberger, J. S. Perez-Carrasquilla, K. Gemell, E. Galytska, C. Leclerc, P. Punya, I. Roy, A. Varuolo-Clarke, M. Tošić и N. Črnivec. *Developing Guidelines for Working with Multi-Model Ensembles in CMIP*. 2025. url: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2025/egusphere-2025-4744/> (посећено 8. 1. 2026.). Прелиминарно издање.
- [98] M. Tošić, I. Tošić, I. Lazić и V. Djurdjević. „Reconstructing and Projecting 2012-like Drought in Serbia Using the Max Planck Institute Grand Ensemble”. *Atmosphere* **16** (2025.), стр. 668. doi: 10.3390/atmos16060668.
- [99] N. Maher, S. Milinski и R. Ludwig. „Large Ensemble Climate Model Simulations: Introduction, Overview, and Future Prospects for Utilising Multiple Types of Large Ensemble”. *Earth System Dynamics* **12** (2021.), стр. 401–418. doi: 10.5194/esd-12-401-2021.
- [100] S. Sippel и F. E. L. Otto. „Beyond Climatological Extremes - Assessing How the Odds of Hydrometeorological Extreme Events in South-East Europe Change in a Warming Climate”. *Climatic Change* **125** (2014.), стр. 381–398. doi: 10.1007/s10584-014-1153-9.
- [101] E. Bevacqua, L. Suarez-Gutierrez, A. Jézéquel, F. Lehner, M. Vrac, P. Yiou и J. Zscheischler. „Advancing Research on Compound Weather and Climate Events via Large Ensemble Model Simulations”. *Nature Communications* **14** (2023.) doi: 10.1038/s41467-023-37847-5.
- [102] C. Deser, F. Lehner, K. B. Rodgers, T. Ault, T. L. Delworth, P. N. DiNezio, A. Fiore, C. Frankignoul, J. C. Fyfe, D. E. Horton, J. E. Kay, R. Knutti, N. S. Lovenduski, J. Marotzke, K. A. McKinnon, S. Minobe, J. Randerson, J. A. Screen, I. R. Simpson и M. Ting. „Insights from Earth System Model Initial-Condition Large Ensembles and Future Prospects”. *Nature Climate Change* **10** (2020.), стр. 277–286. doi: 10.1038/s41558-020-0731-2.
- [103] K. van der Wiel, G. Lenderink и H. de Vries. „Physical Storylines of Future European Drought Events like 2018 Based on Ensemble Climate Modelling”. *Weather and Climate Extremes* **33** (2021.), стр. 100350. doi: 10.1016/j.wace.2021.100350.
- [104] J. Coburn, R. J. Barthelmie и S. C. Pryor. „Changing Windstorm Characteristics over the US Northeast in a Single Model Large Ensemble”. *Environmental Research Letters* **19** (2024.), стр. 114045. doi: 10.1088/1748-9326/ad801b.
- [105] S. Sippel, D. Mitchell, M. T. Black, A. J. Dittus, L. Harrington, N. Schaller и F. E. Otto. „Combining Large Model Ensembles with Extreme Value Statistics to Improve Attribution Statements of Rare Events”. *Weather and Climate Extremes* **9** (2015.), стр. 25–35. doi: 10.1016/j.wace.2015.06.004.

- [106] V. Thompson, A. T. Kennedy-Asser, E. Vosper, Y. T. E. Lo, C. Huntingford, O. Andrews, M. Collins, G. C. Hegerl и D. Mitchell. „The 2021 Western North America Heat Wave among the Most Extreme Events Ever Recorded Globally”. *Science Advances* **8** (2022.), eabm6860. doi: 10.1126/sciadv.abm6860.
- [107] L. Filipović, S. Putniković, B. Stosic, T. Stosic, V. Djurdjević и I. Tošić. „Analysis of Spatio-Temporal Characteristics of Drought in Serbia From 1961 to 2020 Using SPI and SPEI”. *International Journal of Climatology* (2025.), e8803. doi: 10.1002/joc.8803.
- [108] M. A. Amiri и M. Gocic. „Analysis of Temporal and Spatial Variations of Drought over Serbia by Investigating the Applicability of Precipitation-Based Drought Indices”. *Theoretical and Applied Climatology* **154** (2023.), стр. 261–274. doi: 10.1007/s00704-023-04554-6.
- [109] S. Y. Philip, S. F. Kew, K. Van Der Wiel, N. Wanders и G. Jan Van Oldenborgh. „Regional Differentiation in Climate Change Induced Drought Trends in the Netherlands”. *Environmental Research Letters* **15** (2020.), стр. 094081. doi: 10.1088/1748-9326/ab97ca.
- [110] D. Olonscheck, L. Suarez-Gutierrez, S. Milinski, G. Beobide-Arsuaga, J. Baehr, F. Fröb, T. Ilyina, C. Kadow, D. Krieger, H. Li, J. Marotzke, É. Plésiat, M. Schupfner, F. Wachsmann, L. Wallberg, K. H. Wieners и S. Brune. „The New Max Planck Institute Grand Ensemble With CMIP6 Forcing and High-Frequency Model Output”. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **15** (2023.), стр. 1–21. doi: 10.1029/2023MS003790.
- [111] T. Mauritsen, J. Bader, T. Becker, J. Behrens, M. Bittner, R. Brokopf, V. Brovkin, M. Claussen, T. Crueger, M. Esch, I. Fast, S. Fiedler, D. Fläschner, V. Gayler, M. Giorgetta, D. S. Goll, H. Haak, S. Hagemann, C. Hedemann, C. Hohenegger, T. Ilyina, T. Jahns, D. Jimenez-de-la-Cuesta, J. Jungclaus, T. Kleinen, S. Kloster, D. Kracher, S. Kinne, D. Kleberg, G. Lasslop, L. Kornbluh, J. Marotzke, D. Matei, K. Meraner, U. Mikolajewicz, K. Modali, B. Möbis, W. A. Müller, J. E. M. S. Nabel, C. C. W. Nam, D. Notz, S.-S. Nyawira, H. Paulsen, K. Peters, R. Pincus, H. Pohlmann, J. Pongratz, M. Popp, T. J. Raddatz, S. Rast, R. Redler, C. H. Reick, T. Rohrschneider, V. Schemann, H. Schmidt, R. Schnur, U. Schulzweida, K. D. Six, L. Stein, I. Stemmler, B. Stevens, J.-S. Von Storch, F. Tian, A. Voigt, P. Vrese, K.-H. Wieners, S. Wilkenskjaeld, A. Winkler и E. Roeckner. „Developments in the MPI-M Earth System Model Version 1.2 (MPI-ESM1.2) and Its Response to Increasing CO<sub>2</sub>”. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **11** (2019.), стр. 998–1038. doi: 10.1029/2018MS001400.
- [112] B. Stevens, M. Giorgetta, M. Esch, T. Mauritsen, T. Crueger, S. Rast, M. Salzmann, H. Schmidt, J. Bader, K. Block, R. Brokopf, I. Fast, S. Kinne, L. Kornbluh, U. Lohmann, R. Pincus, T. Reichler и E. Roeckner. „Atmospheric Component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6”. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **5** (2013.), стр. 146–172. doi: 10.1002/jame.20015.
- [113] C. H. Reick, T. Raddatz, V. Brovkin и V. Gayler. „Representation of Natural and Anthropogenic Land Cover Change in MPI-ESM”. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **5** (2013.), стр. 459–482. doi: 10.1002/jame.20022.

- [114] J. H. Jungclaus, N. Fischer, H. Haak, K. Lohmann, J. Marotzke, D. Matei, U. Mikolajewicz, D. Notz и J. S. Von Storch. „Characteristics of the Ocean Simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the Ocean Component of the MPI-Earth System Model”. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **5** (2013.), стр. 422–446. doi: 10.1002/jame.20023.
- [115] T. Ilyina, K. D. Six, J. Segschneider, E. Maier-Reimer, H. Li и I. Núñez-Riboni. „Global Ocean Biogeochemistry Model HAMOCC: Model Architecture and Performance as Component of the MPI-Earth System Model in Different CMIP5 Experimental Realizations”. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **5** (2013.), стр. 287–315. doi: 10.1029/2012MS000178.
- [116] N. Maher, S. Milinski, L. Suarez-Gutierrez, M. Botzet, M. Dobrynin, L. Kornblueh, J. Kröger, Y. Takano, R. Ghosh, C. Hedemann, C. Li, H. Li, E. Manzini, D. Notz, D. Putrasahan, L. Boysen, M. Claussen, T. Ilyina, D. Olonscheck, T. Raddatz, B. Stevens и J. Marotzke. „The Max Planck Institute Grand Ensemble: Enabling the Exploration of Climate System Variability”. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **11** (2019.), стр. 2050–2069. doi: 10.1029/2019MS001639.
- [117] L. Suarez-Gutierrez, S. Milinski и N. Maher. „Exploiting Large Ensembles for a Better yet Simpler Climate Model Evaluation”. *Climate Dynamics* **57** (2021.), стр. 2557–2580. doi: 10.1007/s00382-021-05821-w.
- [118] R. R. Wood, F. Lehner, A. G. Pendergrass и S. Schlunegger. „Changes in Precipitation Variability across Time Scales in Multiple Global Climate Model Large Ensembles”. *Environmental Research Letters* **16** (2021.), стр. 084022. doi: 10.1088/1748-9326/ac10dd.
- [119] B. C. O’Neill, C. Tebaldi, D. P. Van Vuuren, V. Eyring, P. Friedlingstein, G. Hurtt, R. Knutti, E. Kriegler, J.-F. Lamarque, J. Lowe, G. A. Meehl, R. Moss, K. Riahi и B. M. Sanderson. „The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6”. *Geoscientific Model Development* **9** (2016.), стр. 3461–3482. doi: 10.5194/gmd-9-3461-2016.
- [120] U. Schulzweida, R. Mueller, O. Heidmann, C. Ansorge, L. Kornblueh, F. Wachsmann, M. Kameswarrao и R. Quast. *Climate Data Operator (CDO)*. Верзија 1.9.6. Zenodo, 2019. url: <https://zenodo.org/record/3991594> (посећено 9. 2. 2026.).
- [121] George H. Hargreaves и Zohrab A. Samani. „Reference Crop Evapotranspiration from Temperature”. *Applied Engineering in Agriculture* **1** (1985.), стр. 96–99. doi: 10.13031/2013.26773.
- [122] J. H. Stagge, D. G. Kingston, L. M. Tallaksen и D. M. Hannah. „Observed Drought Indices Show Increasing Divergence across Europe”. *Scientific Reports* **7** (2017.), стр. 14045. doi: 10.1038/s41598-017-14283-2.
- [123] N. Haied, A. Fougou, S. Chaab, M. Azlaoui, S. Khadri, K. Benzahia и I. Benzahia. „Drought Assessment and Monitoring Using Meteorological Indices in a Semi-Arid Region”. *Energy Procedia* **119** (2017.), стр. 518–529. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.064.

- [124] Y. H. Song, E.-S. Chung и S. Shahid. „Global Future Potential Evapotranspiration Signal Using Penman-Monteith and Hargreaves-Samani Method by Latitudes Based on CMIP6”. *Atmospheric Research* **304** (2024.), стр. 107367. doi: 10.1016/j.atmosres.2024.107367.
- [125] J. Adams. *Climate\_indices, an Open Source Python Library Providing Reference Implementations of Commonly Used Climate Indices*. 2017. url: [https://github.com/monocongo/climate\\_indices](https://github.com/monocongo/climate_indices).
- [126] V. Potop, C. Boroneanț, M. Možný, P. Štěpánek и P. Skalák. „Observed Spatiotemporal Characteristics of Drought on Various Time Scales over the Czech Republic”. *Theoretical and Applied Climatology* **115** (2014.), стр. 563–581. doi: 10.1007/s00704-013-0908-y.
- [127] RHMZ. *Bilten RHMZ*. 10. 2010., стр. 119–135. url: <https://www.hidmet.gov.rs/data/klimatologija/latin/2012.pdf>.
- [128] K. Cindrić, M. Telišman Prtenjak, I. Herceg-Bulić, D. Mihajlović и Z. Pasarić. „Analysis of the Extraordinary 2011/2012 Drought in Croatia”. *Theoretical and Applied Climatology* **123** (2016.), стр. 503–522. doi: 10.1007/s00704-014-1368-8.
- [129] Nathaniel L. Bindoff, Peter A. Stott, Krishna Mirle AchutaRao, Myles R. Allen, Nathan Gillett, David Gutzler, Kabumbwe Hansingo, Gabriele Hegerl, Yongyun Hu, Suman Jain, Igor I. Mokhov, James Overland, Judith Perlwitz, Rachid Sebbari и Xuebin Zhang. „Detection and Attribution of Climate Change: From Global to Regional”. *Change 2013 – The Physical Science Basis*. 1. издање. Cambridge University Press, 2014., стр. 867–952. doi: 10.1017/CBO9781107415324.022.
- [130] Hegerl, Gabriele C., O. Hoegh-Guldberg, G. Casassa, M. P. Hoerling, R. S. Kovats, C. Parmesan, D. W. Pierce и P. A. Stott. „Good Practice Guidance Paper on Detection and Attribution Related to Anthropogenic Climate Change”. Bern, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, 2010.
- [131] R. Brogli, C. Heim, J. Mensch, S. L. Sørland и C. Schär. „The Pseudo-Global-Warming (PGW) Approach: Methodology, Software Package PGW4ERA5 v1.1, Validation, and Sensitivity Analyses”. *Geoscientific Model Development* **16** (2023.), стр. 907–926. doi: 10.5194/gmd-16-907-2023.
- [132] F. Feser и T. G. Shepherd. „The Concept of Spectrally Nudged Storylines for Extreme Event Attribution”. *Communications Earth & Environment* **6** (2025.), стр. 677. doi: 10.1038/s43247-025-02659-6.
- [133] M. Kretschmer, S. V. Adams, A. Arribas, R. Prudden, N. Robinson, E. Saggioro и T. G. Shepherd. „Quantifying Causal Pathways of Teleconnections”. *Bulletin of the American Meteorological Society* **102** (2021.), E2247–E2263. doi: 10.1175/BAMS-D-20-0117.1.
- [134] T. G. Shepherd. „Storyline Approach to the Construction of Regional Climate Change Information”. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **475** (2019.) doi: 10.1098/rspa.2019.0013.

- [135] T. G. Shepherd, E. Boyd, R. A. Calel, S. C. Chapman, S. Dessai, I. M. Dima-West, H. J. Fowler, R. James, D. Maraun, O. Martius, C. A. Senior, A. H. Sobel, D. A. Stainforth, S. F. Tett, K. E. Trenberth, B. J. van den Hurk, N. W. Watkins, R. L. Wilby и D. A. Zenghelis. „Storylines: An Alternative Approach to Representing Uncertainty in Physical Aspects of Climate Change”. *Climatic Change* **151** (2018.), стр. 555–571. doi: 10.1007/s10584-018-2317-9.
- [136] C. Deser, A. S. Phillips, M. A. Alexander и B. V. Smoliak. „Projecting North American Climate over the Next 50 Years: Uncertainty Due to Internal Variability\*”. *Journal of Climate* **27** (2014.), стр. 2271–2296. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00451.1.
- [137] J. Sillmann, T. G. Shepherd, B. Van Den Hurk, W. Hazeleger, O. Martius, J. Slingo и J. Zscheischler. „Event-Based Storylines to Address Climate Risk”. *Earth’s Future* **9** (2021.), e2020EF001783. doi: 10.1029/2020EF001783.
- [138] Committee on Extreme Weather Events and Climate Change Attribution, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division on Earth and Life Studies и National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2016. doi: 10.17226/21852.
- [139] S. Philip, S. Kew, G. J. Van Oldenborgh, F. Otto, R. Vautard, K. Van Der Wiel, A. King, F. Lott, J. Arrighi, R. Singh и M. Van Aalst. „A Protocol for Probabilistic Extreme Event Attribution Analyses”. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography* **6** (2020.), стр. 177–203. doi: 10.5194/ascmo-6-177-2020.
- [140] W. Hazeleger, B. J. Van Den Hurk, E. Min, G. J. Van Oldenborgh, A. C. Petersen, D. A. Stainforth, E. Vasileiadou и L. A. Smith. „Tales of Future Weather”. *Nature Climate Change* **5** (2015.), стр. 107–113. doi: 10.1038/nclimate2450.
- [141] L. Van Garderen, F. Feser и T. G. Shepherd. „A Methodology for Attributing the Role of Climate Change in Extreme Events: A Global Spectrally Nudged Storyline”. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **21** (2021.), стр. 171–186. doi: 10.5194/nhess-21-171-2021.
- [142] B. V. Smoliak, J. M. Wallace, P. Lin и Q. Fu. „Dynamical Adjustment of the Northern Hemisphere Surface Air Temperature Field: Methodology and Application to Observations”. *Journal of Climate* **28** (2015.), стр. 1613–1629. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00111.1.
- [143] L. Terray. „A Dynamical Adjustment Perspective on Extreme Event Attribution”. *Weather and Climate Dynamics* **2** (2021.), стр. 971–989. doi: 10.5194/wcd-2-971-2021.
- [144] T. Lam, J. L. Catto, R. Barciela, A. B. Harper, P. Challenor и A. Arribas. „Quantifying Causal Teleconnections to Drought and Fire Risks in Indonesian Borneo”. *International Journal of Climatology* **44** (2024.), стр. 2087–2105. doi: 10.1002/joc.8442.
- [145] C. Schär, C. Frei, D. Lüthi и H. C. Davies. „Surrogate Climate-change Scenarios for Regional Climate Models”. *Geophysical Research Letters* **23** (1996.), стр. 669–672. doi: 10.1029/96GL00265.

- [146] T. Yoshikane, F. Kimura, H. Kawase и Т. Nozawa. „Verification of the Performance of the Pseudo-Global-Warming Method for Future Climate Changes during June in East Asia”. *SOLA* **8** (2012.), стр. 133–136. doi: 10.2151/sola.2012-033.
- [147] R. J. Delfino, P. L. Vidale, G. Bagtasa и K. Hodges. „Response of Damaging Philippines Tropical Cyclones to a Warming Climate Using the Pseudo Global Warming Approach”. *Climate Dynamics* **61** (2023.), стр. 3499–3523. doi: 10.1007/s00382-023-06742-6.
- [148] S.-M. Huang, T.-Y. Lee, C.-Y. Lin, Y.-Y. Lin и H.-H. Hsu. „Impacts of Global Warming on Severe Drought in Northern Taiwan: A Future Projection Based on the Year 2021”. *International Journal of Climatology* **45** (2025.), e70094. doi: 10.1002/joc.70094.
- [149] E. E. Aalbers, E. Van Meijgaard, G. Lenderink, H. De Vries и B. J. J. M. Van Den Hurk. „The 2018 West-Central European Drought Projected in a Warmer Climate: How Much Drier Can It Get?” *Natural Hazards and Earth System Sciences* **23** (2023.), стр. 1921–1946. doi: 10.5194/nhess-23-1921-2023.
- [150] J. Runge, S. Bathiany, E. Bollt, G. Camps-Valls, D. Coumou, E. Deyle, C. Glymour, M. Kretschmer, M. D. Mahecha, J. Muñoz-Marí, E. H. Van Nes, J. Peters, R. Quax, M. Reichstein, M. Scheffer, B. Schölkopf, P. Spirtes, G. Sugihara, J. Sun, K. Zhang и J. Zscheischler. „Inferring Causation from Time Series in Earth System Sciences”. *Nature Communications* **10** (2019.), стр. 2553. doi: 10.1038/s41467-019-10105-3.
- [151] T. G. Shepherd. „Bringing Physical Reasoning into Statistical Practice in Climate-Change Science”. *Climatic Change* **169** (2021.), стр. 1–19. doi: 10.1007/s10584-021-03226-6.
- [152] J. Fan, Y. Wang, D. Rosenfeld и X. Liu. „Review of Aerosol–Cloud Interactions: Mechanisms, Significance, and Challenges”. *Journal of the Atmospheric Sciences* **73** (2016.), стр. 4221–4252. doi: 10.1175/JAS-D-16-0037.1.
- [153] J. Carvalho-Oliveira, G. Di Capua, L. F. Borchert, R. V. Donner и J. Baehr. „Causal Relationships and Predictability of the Summer East Atlantic Teleconnection”. *Weather and Climate Dynamics* **5** (2024.), стр. 1561–1578. doi: 10.5194/wcd-5-1561-2024.
- [154] E. Galytska, K. Weigel, D. Handorf, R. Jaiser, R. Köhler, J. Runge и V. Eyring. „Evaluating Causal Arctic-Midlatitude Teleconnections in CMIP6”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **128** (2023.), e2022JD037978. doi: 10.1029/2022JD037978.
- [155] „Detection and Attribution of Climate Change: From Global to Regional”. *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*. 1. издање. Cambridge University Press, 2014., стр. 867–952. doi: 10.1017/CBO9781107415324.022.
- [156] J. Pearl. „Causal Inference in Statistics: An Overview”. *Statistics Surveys* **3** (2009.) doi: 10.1214/09-SS057.
- [157] I. Ebert-Uphoff и Y. Deng. „Causal Discovery for Climate Research Using Graphical Models”. *Journal of Climate* **25** (2012.), стр. 5648–5665. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00387.1.
- [158] A. Hannart, J. Pearl, F. E. L. Otto, P. Naveau и M. Ghil. „Causal Counterfactual Theory for the Attribution of Weather and Climate-Related Events”. *Bulletin of the American Meteorological Society* **97** (2016.), стр. 99–110. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00034.1.

- [159] A. G. Barnston и R. E. Livezey. „Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns”. *Monthly Weather Review* **115** (1987.), стр. 1083–1126. doi: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
- [160] J. W. Hurrell. „Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation”. *Science* **269** (1995.), стр. 676–679. doi: 10.1126/science.269.5224.676.
- [161] A. Halifa-Marín, M. A. Torres-Vázquez, R. Trigo, S. M. Vicente-Serrano, M. Turco, P. Jiménez-Guerrero и J. P. Montávez. „Beyond the NAO : The East Atlantic Pattern’s Role in Early 20th-Century Meteorological Droughts in Western Europe”. *International Journal of Climatology* **45** (2025.), e70045. doi: 10.1002/joc.70045.
- [162] C. K. Folland, J. Knight, H. W. Linderholm, D. Fereday, S. Ineson и J. W. Hurrell. „The Summer North Atlantic Oscillation: Past, Present, and Future”. *Journal of Climate* **22** (2009.), стр. 1082–1103. doi: 10.1175/2008JCLI2459.1.
- [163] S. Knežević, I. Tošić, M. Unkašević и G. Pejanović. „The Influence of the East Atlantic Oscillation to Climate Indices Based on the Daily Minimum Temperatures in Serbia”. *Theoretical and Applied Climatology* **116** (2014.), стр. 435–446. doi: 10.1007/s00704-013-0959-0.
- [164] World Meteorological Organization. *State of the Global Climate 2024*. WMO-No. 1368. Geneva, 2025. url: [https://wmo.int/sites/default/files/2025-03/WMO-1368-2024\\_en.pdf](https://wmo.int/sites/default/files/2025-03/WMO-1368-2024_en.pdf).
- [165] Copernicus Climate Change Service. *ERA5 Monthly Averaged Data on Pressure Levels from 1940 to Present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. url: <https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.6860a573> (посећено 13. 1. 2026.).
- [166] Copernicus Climate Change Service. *ERA5-Land Hourly Data from 1950 to Present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. url: <https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.e2161bac> (посећено 22. 11. 2025.).
- [167] C. P. Morice, J. J. Kennedy, N. A. Rayner, J. P. Winn, E. Hogan, R. E. Killick, R. J. H. Dunn, T. J. Osborn, P. D. Jones и I. R. Simpson. „An Updated Assessment of Near-Surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **126** (2021.), e2019JD032361. doi: 10.1029/2019JD032361.
- [168] B. Stosic, V. Djurdjević, M. Tošić, I. Lazić, I. Tošić и T. Stosic. „Generalized Weighted Permutation Entropy Analysis of SPEI Index in Serbia as a Proxy of Corn Production”. *International Journal of Climatology* **44** (2024.), стр. 3514–3528. doi: 10.1002/joc.8536.
- [169] V. Djurdjevic и B. Rajkovic. „Verification of a Coupled Atmosphere–Ocean Model Using Satellite Observations over the Adriatic Sea”. *Annales Geophysicae* **26** (2008.), стр. 1935–1954. doi: 10.5194/angeo-26-1935-2008.
- [170] A. F. Blumberg и G. L. Mellor. „A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model”. *Coastal and Estuarine Sciences*. Св. 4. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1987., стр. 1–16. doi: 10.1029/CO004p0001.

- [171] G. L. Mellor. *USERS GUIDE for A THREE-DIMENSIONAL, PRIMITIVE EQUATION, NUMERICAL OCEAN MODEL*. 2004. url: [http://jes.apl.washington.edu/modsims\\_two/usersguide0604.pdf](http://jes.apl.washington.edu/modsims_two/usersguide0604.pdf).
- [172] M. Meinshausen, E. Vogel, A. Nauels, K. Lorbacher, N. Meinshausen, D. M. Etheridge, P. J. Fraser, S. A. Montzka, P. J. Rayner, C. M. Trudinger, P. B. Krummel, U. Beyerle, J. G. Canadell, J. S. Daniel, I. G. Enting, R. M. Law, C. R. Lunder, S. O'Doherty, R. G. Prinn, S. Reimann, M. Rubino, G. J. M. Velders, M. K. Vollmer, R. H. J. Wang и R. Weiss. „Historical Greenhouse Gas Concentrations for Climate Modelling (CMIP6)”. *Geoscientific Model Development* **10** (2017.), стр. 2057–2116. doi: 10.5194/gmd-10-2057-2017.
- [173] M. Meinshausen, Z. R. J. Nicholls, J. Lewis, M. J. Gidden, E. Vogel, M. Freund, U. Beyerle, C. Gessner, A. Nauels, N. Bauer, J. G. Canadell, J. S. Daniel, A. John, P. B. Krummel, G. Luderer, N. Meinshausen, S. A. Montzka, P. J. Rayner, S. Reimann, S. J. Smith, M. Van Den Berg, G. J. M. Velders, M. K. Vollmer и R. H. J. Wang. „The Shared Socio-Economic Pathway (SSP) Greenhouse Gas Concentrations and Their Extensions to 2500”. *Geoscientific Model Development* **13** (2020.), стр. 3571–3605. doi: 10.5194/gmd-13-3571-2020.
- [174] L. van Garderen и J. Mindlin. „A Storyline Attribution of the 2011/2012 Drought in Southeastern South America”. *Weather* **77** (2022.), стр. 212–218. doi: 10.1002/wea.4185.
- [175] C. Massari, F. Avanzi, G. Bruno, S. Gabellani, D. Penna и S. Camici. „Evaporation Enhancement Drives the European Water-Budget Deficit during Multi-Year Droughts”. *Hydrology and Earth System Sciences* **26** (2022.), стр. 1527–1543. doi: 10.5194/hess-26-1527-2022.
- [176] S. Rahmstorf, G. Foster и N. Cahill. „Global Temperature Evolution: Recent Trends and Some Pitfalls”. *Environmental Research Letters* **12** (2017.), стр. 054001. doi: 10.1088/1748-9326/aa6825.
- [177] S. Mathbout, G. Boustras, J. A. Lopez Bustins, J. Martin Vide и P. Papazoglou. „Europe’s Double Threat: Evolving Patterns of Compound Heatwaves and Droughts”. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **145** (2025.), стр. 104987. doi: 10.1016/j.jag.2025.104987.
- [178] D. A. Lavers, A. Simmons, F. Vamborg и M. J. Rodwell. „An Evaluation of ERA5 Precipitation for Climate Monitoring”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **148** (2022.), стр. 3152–3165. doi: 10.1002/qj.4351.
- [179] H. C. S. Thom. „A NOTE ON THE GAMMA DISTRIBUTION”. *Monthly Weather Review* **86** (1958.), стр. 117–122. doi: 10.1175/1520-0493(1958)086<0117:ANOTGD>2.0.CO;2.

# Биографија

## Биографски подаци

Милица Тошић је рођена 11. јуна 1995. године у Зајечару, где је завршила Гимназију 2014. године. Исте године је уписала Физички факултет Универзитета у Београду, смер Метеорологија, који је завршила 6. септембра 2018. године са просечном оценом 9.21. Године 2018. је уписала мастер академске студије на којима је положила све испите предвиђене програмом студија са оценом 10. Мастер рад, под називом: „Утицај промене дефиниције климатских индекса на њихове пројекције за будућност” је урадила под менторством проф. др Владимира Ђурђевића и одбранила га са оценом 10, 10. септембра 2019. године. У октобру 2019. године се уписала на докторске академске студије на Физичком факултету и свој истраживачки рад наставља у ужој научној области Метеорологија. На првој години докторских студија добија награду „Проф. др Завиша Јањић” која се додељује за изузетне студенте из области нумеричког моделирања атмосфере. Добитница је Годишње награда за младе истраживаче Физичког факултета за 2025. годину.

## Наставна активност

Милица Тошић је као студент сарадник у настави, истраживач приправник и истраживач сарадник од 2018. године до данас ангажована на извођењу наставе за студенте Физичког факултета на катедри за Метеорологију, из следећих предмета: Динамичка метеорологија 1, Динамика облака, Ваздухопловна метеорологија, Примењена метеорологија, Климатологија, Модификација времена и Климатске промене (Б).

## Научна активност

Од децембра 2019. године је у звању истраживач приправник, а од новембра 2022. године је у звању истраживач-сарадник на Физичком факултету. Објавила је укупно 17 радова у међународним часописима и 23 рада на међународним конференцијама, који су разврстани по следећим групама и вредностима остварених резултата: 16 радова у међународним часописима чији је импакт фактор већи од 1 (један у М21а, четири у М21, десет у М22 и један у М23), један рад чији је импакт фактор већи од 0.5 (М23), 2 рада штампана у целини у зборницима међународних конференција (М33), као и 21 рад штампан у изводу у зборницима међународних конференција (М34). Ангажована је на пројектима Фонда за науку Републике Србије и на другим државним и међународним пројектима.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Милица Тошић

Број индекса 8006/2019

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Утицај климатских промена на екстремне временске и климатске догађаје у Србији  
анализом композитних климатских индекса и применом сторилајн методе

- 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 Милица Тошић

Број индекса 8006/2019

Студијски програм Метеорологија

Наслов рада Утицај климатских промена на екстремне временске и климатске догађаје у Србији анализом композитних климатских индекса и применом сторилајн методе

Ментор Владимир Ђурђевић

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:

Утицај климатских промена на екстремне временске и климатске догађаје у Србији анализом композитних климатских индекса и применом сторилајн методе

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)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**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.