

Obilježja i modeliranje urbanoga toplinskoga otoka

Nimac, Irena

Doctoral thesis / Disertacija

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:717147>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Irena Nimac

OBILJEŽJA I MODELIRANJE URBANOGA TOPLINSKOGA OTOKA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2022.



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Irena Nimac

OBILJEŽJA I MODELIRANJE URBANOGA TOPLINSKOGA OTOKA

DOKTORSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivana Herceg Bulić

Zagreb, 2022.



University of Zagreb

Faculty of Science
Department of Geophysics

Irena Nimac

CHARACTERISTICS AND MODELLING OF THE URBAN HEAT ISLAND

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: Assoc. prof. Ivana Herceg Bulić

Zagreb, 2022.

Ova doktorska disertacija izrađena je pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Ivane Herceg Bulić u sklopu Sveučilišnog poslijediplomskog dokorskog studija fizike, smjer geofizika. Mentorica izv. prof. dr. sc. Ivana Herceg Bulić je izvanredna profesorica na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu. Autorica je više od dvadeset znanstvenih radova objavljenih u međunarodnim časopisima. Voditeljica je projekata *Klimatska ranjivost Hrvatske i mogućnosti prilagodbe urbanih i prirodnih okoliša (Klima-4HR)* i *Klimatske promjene i varijabilnost u Hrvatskoj – od globalnih utjecaja do lokalnih zelenih rješenja (CroClimGoGreen)*. Ovo istraživanje dio je projekta Hrvatske zaklade za znanost UIP-2017-05-6396 *Klimatske promjene i varijabilnost u Hrvatskoj – od globalnih utjecaja do lokalnih zelenih rješenja (CroClimGoGreen)*.

Zahvala

Izrada ove doktorske disertacije ne bi bila moguća bez pomoći i podrške pojedinih osoba i institucija. Zahvaljujem institucijama čiji su podaci i alati omogućili izradu ovog istraživanja:

- Državni hidrometeorološki zavod – za ustupanje izmjerenih podataka s meteoroloških postaja
- Grad Zagreb, Gradski ured za stratezijsko planiranje i razvoj grada – za ustupanje podataka visine terena i površina te topografske osnove
- Državna geodetska uprava – na javno dostupnoj ortofoto karti iz 1968. godine
- Deutscher Wetterdienst – na ustupljenom kodu modela MUKLIMO_3
- EURO-CORDEX grupa – za dostupne podatke regionalnih klimatskih simulacija.

Hvala Državnom hidrometeorološkom zavodu na pruženoj mogućnosti doktorskog studija, kao i svim kolegama i prijateljima koji su bili dio tog procesa.

Zahvaljujem članovima povjerenstva za ocjenu doktorskog rada prof. dr. sc. Zvezdani Bencetić Klaić, izv. prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak i dr. sc. Ivanu Güttleru na komentarima i sugestijama koji su doprinijeli kvaliteti ovog rada.

Veliko hvala mentorici izv. prof. dr. sc. Ivani Herceg Bulić na ukazanom povjerenju, prenesenom iskustvu i znanju te iznimno ugodnoj i motivirajućoj radnoj atmosferi.

Najveće zahvale mojoj obitelji koja mi je najveća podrška i nit vodilja u životu. Hvala mojim roditeljima što su od samih početaka mog školovanja imali strpljenja i vjerovali u mene. Hvala sestrama, bratu i nećacima za sve sretne i bezbrižne trenutke koji su mi olakšali ovo razdoblje u životu. Na kraju, hvala mom Borisu na razumijevanju te motivaciji i potpori u trenucima kada mi je to najviše trebalo.

Životopis

Irena Nimac rođena je 21. prosinca 1988. godine u Zagrebu. Titulu magistre fizike-geofizike stekla je u lipnju 2013. godine nakon završenog diplomskog studija fizike-geofizike Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu. Iste godine u prosincu, počinje raditi u Državnom hidrometeorološkom zavodu u Sektoru za meteorološka istraživanja i razvoj. Poslijediplomski doktorski studij fizike – smjer geofizika upisuje 2014. godine. U svojim istraživanjima bavi se statističkom analizom vremenskih promjena i varijabilnosti te ekstremnih vrijednosti različitih klimatskih varijabli (npr. temperature zraka, kratkotrajne oborine, opterećenja snijegom). Dio rezultata tih istraživanja objavljen je u niže navedenim znanstvenim i stručnim radovima u domaćim i međunarodnim časopisima. Sudjelovala je na brojnim domaćim i međunarodnim radionicama i konferencijama te je na konferenciji Europskog meteorološkog društva (EMS) 2018. godine dobila EMS Tromp nagradu za mlade znanstvenike za prezentirani rad na temu obilježja i promjena urbane klime Zagreba. U sklopu dokorskog istraživanja, u siječnju 2019. dodatno se usavršavala u Austrijskoj meteorološkoj službi (ZAMG). Uz potporu Europske agencije za eksploataciju satelita (EUMETSAT) sudjelovala je na nekoliko međunarodnih radionica i konferencija na temu primjene satelitskih podataka u klimatskim analizama, te je u studenom 2019. kao dio znanstvenog usavršavanja boravila u Njemačkoj meteorološkoj službi (DWD). Osim kao sudionik, bila je dio organizacijskog odbora znanstveno-stručnog skupa s međunarodnim sudjelovanjem *Meteorološki izazovi 4* i *Meteorološki izazovi 6*. Suradnik je na projektu Hrvatske zaklade za znanost *Klimatske promjene i varijabilnost u Hrvatskoj – od globalnih utjecaja do lokalnih zelenih rješenja (CroClimGoGreen)*. Član je Hrvatskog meteorološkog društva. Od travnja 2022. godine zaposlena je na projektu *StratoClim* Wegener Centra za klimu i globalne promjene, Sveučilište u Grazu, Austrija.

Znanstveni radovi u časopisima indeksiranim u bazi *Current Contents*:

Objavljeni radovi:

1. **Nimac, I.**, Cindrić Kalin, K., Renko, T., Vujnović, T. i Horvath, K. (2022): The analysis of summer 2020 urban flood in Zagreb (Croatia) from hydro-meteorological point of view. *Natural hazards*, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05210-4>
2. **Nimac, I.**, Herceg-Bulić, I., Žuvela-Aloise, M. i Žgela, M. (2022): Impact of North Atlantic Oscillation and drought conditions on summer urban heat load - a case study for Zagreb. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.7507>

3. **Nimac, I.**, Herceg-Bulić, I., Cindrić Kalin, K. i Perčec Tadić, M. (2021): 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, 429-441. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03689-8>
4. Lakatos, M., Szentes, O., Cindrić Kalin, K., **Nimac, I.** i sur. (2021): Analysis of Sub-Daily Precipitation for the PannEx Region. *Atmosphere*, 12, 7; 1-18. <https://doi.org/10.3390/atmos12070838>
5. Šoljan, V., Belušić, A., Šarović, K., **Nimac, I.** i sur. (2018): Micro-Scale Properties of Different Bora Types. *Atmosphere*, 9, 4; 116, 25. <https://doi.org/10.3390/atmos9040116>
6. **Nimac, I.** i Perčec Tadić, M. (2017): Complete and homogeneous monthly temperature series for construction of the new 1981-2010 climatological normals for Croatia. *Geofizika*, 34, 2; 225-249. <https://doi.org/10.15233/gfz.2017.34.13>
7. **Nimac, I.** i Herceg Bulić, I. (2017): An intermediate complexity AGCM simulations of climate response to a doubling of atmospheric carbon dioxide. *Geofizika*, 34, 1; 175-197. <https://doi.org/10.15233/gfz.2017.34.8>

Radovi u postupku recenzije:

1. **Nimac, I.**, Herceg-Bulić, I. i Žuvela-Aloise, M. Modelling the increase in urban heat load in Zagreb (Croatia) since the 1960s due to urbanization and changes in climate conditions. *Climatic Change* (prvi krug recenzije).
2. Lukačević, I., Cindrić Kalin, K., **Nimac, I.** i Perčec Tadić, M. Ground snow load analysis for greenhouse structures in Croatia. *Cold Regions Science and Technology* (drugi krug recenzije).

Znanstveni radovi u drugim časopisima:

1. Cindrić, K., **Nimac, I.**, Gajić-Čapka, M. i Rubinić, J. (2014): Vremenske promjene kratkotrajnih jakih oborina u razdoblju 1955.-2010. za Split i Varaždin. *Hrvatske vode: časopis za vodno gospodarstvo*, 22, 89; 239-250.

Znanstveni radovi u zbornicima skupova:

1. Perčec Tadić, M. i **Nimac, I.** (2018): Klimatološke karte mjesečne količine oborine s procjenom pouzdanosti. Hidrologija u službi zaštite i korištenja voda te smanjenja

poplavnih rizika - suvremeni trendovi i pristupi. Rubinić, Josip; Ivanković, Ivana; Bušelić, Gordana (ur.). Zagreb: Hrvatsko hidrološko društvo, 81-89.

2. **Nimac, I.** i Perčec Tadić, M. (2016): New 1981–2010 climatological normals for Croatia and comparison to previous 1961–1990 and 1971–2000 normals. Proceedings from GeoMLA conference. Beograd: University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering, 79-85.
3. **Nimac, I.**, Cindrić Kalin, K., Perčec Tadić M. i Gajić-Čapka, M. (2015): Analiza maksimalnih trodnevnih količina oborine u Hrvatskoj. 6. hrvatska konferencija o vodama s međunarodnim sudjelovanjem: hrvatske vode na investicijskom valu. Zbornik radova, Opatija, 20.-23. svibnja 2015. Biondić, Danko; Holjević, Danko (ur.). Zagreb: Hrvatske vode, 2015. 151-160.

Stručni radovi u zbornicima skupova:

1. **Nimac, I.** i Perčec Tadić, M. (2021): Klimatske prilike Grobnišćine prema digitalnih kartama Klimatskog atlasa Hrvatske. Grobnički zbornik. Grobnik, Hrvatska. Zubčić, Sanja (ur.). Rijeka: Katedra Čakavskoga sabora Grobnišćine. 208-225.
2. Sokol Jurković, R., **Nimac, I.** i Cindrić Kalin, K. (2019): O metodi i problemima izrade krivulja intenziteta – trajanja – povratnog razdoblja. 7. hrvatska konferencija o vodama s međunarodnim sudjelovanjem „Hrvatske vode u zaštiti okoliša i prirode” – zbornik radova. Biondić, Danko; Holjević, Danko; Vizner, Marija (ur.). Opatija: Hrvatske Vode. 76-83.

Kratki sažetak

Zbog korištenja umjetnih materijala u gradnji koji imaju bitno različita toplinska svojstva u odnosu na prirodne materijale, u gradskim sredinama dolazi do narušavanja bilance energije, promjena u hidrološkom ciklusu, sastavu atmosfere, itd. Kao posljedica tih promjena, javlja se fenomen tzv. urbanog toplinskog otoka koji se odražava u bitno višim temperaturama u izgrađenom dijelu grada u usporedbi s ruralnom okolinom.

U ovom istraživanju analizirana su obilježja i promjene urbane klime Zagreba na temelju mjerenja s meteoroloških postaja, modeliranja urbanim klimatskim modelom te analizom satelitskih podataka. U prvom dijelu ovog rada diskutirane su opažene vremenske promjene klime na temelju podataka mjerenja s četiri postaje na području Zagreba u razdoblju 1960. – 2019. Drugi dio analize urbanog toplinskog otoka Zagreba se temelji na rezultatima urbanog klimatskog modeliranja i analizi utjecaja procesa različitih vremenskih i prostornih skala. Kao jedan od mogućih modifikatora urbane klime Zagreba na većoj prostornoj skali odabrana je Sjeverno-Atlantska oscilacija (NAO). Istražen je utjecaj različitih kombinacija polariteta zimskih i ljetnih NAO događaja na promjene i karakteristike toplinskog opterećenja grada. Rezultati impliciraju vlažnost tla kao značajan faktor povezanosti zimskog NAO-a i obilježja ljetne urbane klime. Ta je pretpostavka provjerena analognom analizom s obzirom na vrijednosti standardiziranog oborinskog evapotranspiracijskog indeksa (SPEI). Nadalje, procijenjen je doprinos utjecaja lokalnih promjena u namjeni zemljišta između 1968. i 2012. godine i promjena u klimatskim uvjetima na ukupnu promjenu toplinskog opterećenja grada. Konačno, korištenjem regionalnih klimatskih simulacija modela iz EURO-CORDEX inicijative procijenjeno je očekivano toplinsko opterećenje grada Zagreba u uvjetima buduće klime za scenarije emisija stakleničkih plinova RCP4.5 i RCP8.5.

Ključne riječi: urbani toplinski otok, Sjeverno-atlantska oscilacija (NAO), standardizirani oborinski evapotranspiracijski indeks (SPEI), modifikacije namjene zemljišta, klimatske promjene, klimatske varijacije.

Extended abstract

1. Introduction

With the usage of artificial materials in construction, urban areas are experiencing changes in albedo, emissivity, thermal capacity and surface roughness compared to rural surrounding. Due to land-atmosphere interactions through the exchanges of energy and water, any change in land cover can result alterations in surface energy and water balance. Consequently, temperatures in built-up areas can be significantly higher compared to rural surroundings, a phenomenon known as an Urban Heat Island (UHI).

The urban climate is under the influence of processes on different spatial and temporal scales such as global warming, North-Atlantic oscillation (NAO), heat waves, drought, etc. Besides, climate factors as mountains, hills, oceans, seas, lakes and rivers also affect urban climate. However, due to the interactions and feedbacks within the climate system, UHI can affect processes related to mentioned factors such as up- and down-slope circulation, sea-breeze circulation, fog formation, etc. Characteristics of land-cover in the cities also have an important role in modifying urban climate.

Besides large-scale drivers (e.g., teleconnections, atmospheric blocking) and feedbacks (e.g. land-atmosphere interactions), initial conditions (e.g. soil moisture, sea surface temperature, snow cover) are also important for development of extreme events. For example, several studies found that extremely warm European summers were preceded by winter precipitation deficit over Mediterranean area.

Therefore, for specific purposes such as the estimation of the efficiency of certain adaptation and/or mitigation measures, it is important to include as many as possible of the mentioned processes and factors. In this research, the response of Zagreb's urban climate to some global and local modifiers was investigated. First, characteristics and changes in climate classes were determined using meteorological measurements. Further, changes in extreme air temperatures and related indices were analysed. The influence of different combinations of winter and summer NAO on the urban heat load in Zagreb was examined from the perspective of its direct (summer NAO) and indirect (winter NAO) effect. Similarly, the importance of drought conditions not only during but also during preceding summertime was considered. The effects of local impacts were studied through the contribution of urbanization and changes in climate conditions to total heat load change from late 1960s. Finally, future urban heat load was estimated for two climate change scenarios using regional climate projections.

2. Data and methods

General characteristics and changes in the urban climate of Zagreb were analyzed using meteorological measurements, urban climate model and satellite data. Daily data measurements from stations Zagreb-Grič (urban), Zagreb-Maksimir (suburban), Zagreb-Pleso (suburban) and Puntijarka (mountain) in the period 1960–2019 were used. Temporal changes in temperature and precipitation parameters needed for the estimation of Köppen-Geiger climate classes were examined, as well as possible changes in climate classes. For the same set of the stations in the same time period, characteristics and changes in extreme air temperatures were examined by both stationary and non-stationary generalized extreme value (GEV) distribution. For non-stationary models, linear temporally dependent location and/or scale parameters were chosen. Linear trends in extreme temperature indices were estimated using Sen's slope, while its significance was tested with Mann Kendall's test.

Modeling of the urban climate was performed using urban climate model MUKLIMO_3 (dynamical part) combined with cuboid method (statistical part). Such approach enabled spatial and temporal evaluation of the urban heat load and involving of mentioned climate factors and processes that affect the urban climate. Satellite Landsat-8 land surface temperature (LST) data were compared with some of the modeled results.

To investigate winter and summer NAO effect to the climate of Zagreb, principal component based NAO index in the period 1947–2019 was used. Drought conditions were defined by standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) calculated using meteorological data from station Zagreb-Maksimir in the period 1947–2019. Preceding drought conditions were defined by SPEI calculated for the period January-May, while current conditions referred to June-August period.

To examine the contribution of urbanization and changes in climate conditions to total heat load change in Zagreb from late 1960s, land-use data describing city situation in the years 1968 and 2012 were used. Corresponding climate conditions were defined by meteorological data in the periods 1961–1990 and 1991–2020.

Future climate conditions were extracted from EURO-CORDEX data for three selected regional climate models (RCM) initialized by two global climate models (GCM). Two representative concentration scenarios (RCP) were selected: moderate RCP4.5 and worst-case RCP8.5. Period 1981–2010 was used as a reference climate, while expected changes were estimated for two future periods: 2011–2040 and 2041–2070.

3. Results

3.1. Climate characteristics and changes of the area of study

The analysis of changes in climate characteristics at four meteorological stations in the period 1961-2019 revealed that all stations experienced transition in climate class based on the definition by Köppen-Geiger. The first change from boreal-forest to moderate climate had occurred at mountain station Puntijarka due to an increase in temperature of the coldest month (January). At lowland stations, observed changes in climate class were associated with an increase in air temperature of the warmest month (July). Hence, the next climate shift was detected at the urban station Zagreb-Grič where moderate climate with warm summer changed to moderate climate with hot summer. At the other two stations, climate shift occurred around 10 years later.

3.2. Observed changes in extreme air temperatures

Based on the data for the same period, differences in characteristics of extreme air temperatures at selected stations were depicted. The strongest cold and warm extremes were found at the airport Zagreb-Pleso station. This was a result of specific weather situations, as well as characteristics of the station. The lowest minimum air temperatures at the mentioned station could be explained by common winter temperature inversions over Zagreb. On the other hand, the highest maximum air temperatures at this station were the result of several factors like openness of station in terms of its sky-view factor, as well as being surrounded by lawns. Similar characteristics were observed at the suburban station Zagreb-Maksimir. The highest minimum air temperature values at the urban station Zagreb-Grič were partially due to its location and characteristics which are not fully following measuring standards defined by World Meteorological Organization. The lowest maximum air temperatures are observed at the mountain station Puntijarka. The exceedance of maximum (minimum) air temperature above (below) the corresponding 5-year return value revealed more (less) frequent occurrence of such events in the later compared to the earlier time period. Consequently, return level curves for non-overlapping 30-year periods showed that for both minimum and maximum air temperatures, higher values correspond to the later period. Additionally, employing non-stationary GEV distribution confirmed the necessity of including temporally dependent location parameter in estimating extreme air temperature return values. Generally, including linear location parameter showed to be more important for maximum than for minimum air temperature. The trend analysis results gave a clear signal of a significant increase in warm and

decrease in cold indices. Besides, it was shown that the selection of reference period used for percentile-based indices affects the results of trend analysis by enhancing increase (decrease) in warm (cold) indices when period 1981–2010 (1961–1990) was used as a reference. Still, regardless of period used as a reference, increasing trend in warm summer indices was considerably stronger than corresponding trend in winter indices.

3.3. The effect of North-Atlantic oscillation and drought conditions on the urban heat load

In the first part, the influence of North-Atlantic Oscillation (NAO) on summer climate conditions in Zagreb area was investigated. The combinations of different phases of winter and summer NAO were examined in terms of indirect (lagged) and direct effect. Based on the data measurements from Zagreb-Maksimir station, it was found that the largest heat load is obtained when positive winter NAO is followed by negative summer NAO, and the lowest for the opposite combination. On the other hand, combinations of the same polarity of winter and summer NAO phases resulted in lower changes compared to the mean state, due to its opposing effect over this area. Simulations with MUKLIMO_3 model showed generally good agreement with the station data for the period 1981–2010. The highest heat load was simulated in built-up areas, while the lowest was obtained for areas with vegetation and water bodies. Analysis of NAO effect indicated similar conclusions to those based on the analysis of the station data: the highest heat load increase compared to the mean state was found for positive winter – negative summer NAO combination and the strongest decrease was obtained for the opposite situation (negative winter – positive summer NAO). Our results indicated that not only the amplitude of the heat load, but also its spatial variability is affected by NAO. Thus, for winter – summer NAO combination associated with longer dry conditions, a higher increase in heat load was simulated over regions with vegetation, probably due to suppressed evapotranspiration cooling effect. This result points to soil moisture as a potential factor that affects cooling efficiency of areas with vegetation. This assumption was additionally investigated in a similar way as for NAO events, but with drought conditions using standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) applied on the Zagreb-Maksimir station data. Similarly, as for NAO, the lagged (direct) effect on the summer heat load was examined using SPEI calculated for the period January-May (June-August) period. The results of SPEI analysis supported the conclusions based on the analysis of NAO effect and pointed to the soil moisture as an important factor linking atmospheric conditions and cooling efficiency of green infrastructure. Similar analysis of satellite data of land surface temperature upheld this result.

3.4. The effect of urbanization and changes in climate conditions on the urban heat load

The second part of the modeling analysis was focused on the estimation of contribution of changes in climate conditions and land-use modifications to changes in the heat load. For these purposes, two city land-use situations were defined: earlier city state based on the city structure for the year 1968 and more recent state for the year 2012. Corresponding climate conditions were defined for two standard climatological periods: 1961–1990 and 1991–2020. It is important to mention that climate conditions defined this way consist of both climate change and climate variability components. It was shown that changes in climate conditions dominantly contributed to the amplitude of heat load change, while land-use modifications influenced its spatial variability. The changes in heat load due to climate effect were significant over the whole domain, but for land-use effect significant changes were found only over limited areas, mainly those where some modification in land-use has occurred. Besides, changes in climate conditions resulted in a relatively uniform increase of heat load over lowland parts of the city, while the changes due to land-use modifications were found to be both positive and negative. Generally, an increase in heat load was observed for areas where some of the vegetation classes were replaced by built-up classes and vice versa. Also, obtained results indicate the importance of location of the land-use change (due to its interaction with the surrounding) as well as its form (i.e., grouped or scattered). When analyzing climate effect on changes in heat load, dependence on land-use class was still obtained. Also, slight differences in the heat load response to the changes in land-use were detected for different climate conditions. This result indicates that due to the nonlinear interactions within the system it is not possible to separate climate and land-use effects on changes in heat load.

3.5. Expected future urban heat load

To estimate the heat load in future climate conditions, selected RCMs from EURO-CORDEX initiation were used. Bias correction of RCM data was performed using quantile mapping method in comparison to measurements from meteorological station Zagreb-Maksimir for the reference period 1981–2010. All three variables needed for cuboid method (air temperature, relative humidity and wind speed) were corrected. Comparison of results of urban climate modeling based on the raw and corrected RCM data revealed the importance of bias correction. Generally, cooler and windier simulated conditions of RCMs, lead to underestimated amplitude of heat load and much lower spatial variability compared to the control field obtained using measurements from meteorological station. On the other hand, after bias correction, heat load field in the reference period was well represented for all selected

models. The estimation of expected heat load in a future climate revealed a general increase in heat load, however with differences in the amplitudes of projected increase for different RCMs. The increase is expected to be stronger in the later projection period (2041–2070) compared to the earlier one (2011–2040), as well as for RCP8.5 compared to RCP4.5.

4. Conclusion

The results shown in this research point to significant changes in urban climate of Zagreb which generally became warmer. These changes are partially result of climate change and climate variation, as well as due to urbanization and local changes in the city. Detected climate changes, as well as expected increase in the future heat load point to a necessity for climate adaptation and mitigation measures. The analysis of changes in land-use showed that the strongest heat load increase was related to areas where some vegetation areas were replaced by built-up classes, and the strongest decrease for the opposite situation. Such results indirectly indicated the efficiency of green infrastructure in mitigating urban heat load which was widely commented in the literature. As shown in this research, the cooling efficiency of the vegetation depends on the soil moisture conditions. This finding is especially important from the aspect of the predictability of such situations (e.g., via winter and summer NAO modes) which helps in better preparedness of the irrigation system. Besides, expected drier future conditions highlight the importance of well-planned water management and irrigation system.

Key words: urban heat island, North-Atlantic Oscillation (NAO), standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), land-use modifications, climate change, climate variability.

Popis kratica i simbola

CLM – regionalni klimatski model CLMcom-CCLM4-8-17

CN – globalni klimatski model CNRM-CERFACS-CM5

ETCCDI – engl. *Expert Team on Climate Change Detection Indices*

EURO-CORDEX – (engl. *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – European Domain*)

GCM – globalni klimatski model (engl. *Global Climate model*)

GEV razdioba – opća razdioba ekstrema (engl. *Generalized Extreme Value distribution*)

GEV.Loc – nestacionarna GEV razdioba s linearno ovisnim parametrom lokacije

GEV.LocSc – nestacionarna GEV razdioba s linearno ovisnim parametrima lokacije i skale

GEV.Sc – nestacionarna GEV razdioba s linearno ovisnim parametrom skale

LR test – test omjera vjerodostojnosti (engl. *Likelihood Ratio test*)

LST – površinska temperatura tla (engl. *Land Surface Temperature*)

MP – globalni klimatski model MPI-M-MPI-ESM-MR(LR)

NAO – Sjeverno-atlantska oscilacija (engl. *North-Atlantic Oscillation*)

PUN – postaja Puntijarka

RANS – *Raynolds-Averaged Navier-Stokes*

RCA – regionalni klimatski model SMHI-RCA4

RCM – regionalni klimatski model (engl. *Regional Climate Model*)

RCP – scenarij emisija stakleničkih plinova (engl. *Representative Concentration Pathways*)

REG – regionalni klimatski model DHMZ-RegCM4-2

SPEI – standardizirani oborinski evapotranspiracijski indeks (engl. *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*)

Tmax – apsolutna maksimalna temperatura zraka

Tmin – apsolutna minimalna temperatura zraka

Tx25 – ljetni dani prema definiciji u kuboidnoj metodi ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$)

UCM – urbani klimatski model (engl. *Urban Climate Model*)

UHI – urbani toplinski otok (engl. *Urban Heat Island*)

WMO – Svjetska meteorološka organizacija (engl. *World Meteorological Organization*)

WHO – Svjetska zdravstvena organizacija (engl. *World Health Organization*)

xT5 – 5-godišnja povratna vrijednost

ZGM – postaja Zagreb-Maksimir

ZGP – postaja Zagreb-Pleso

ZGG – postaja Zagreb-Grič

Sadržaj

1. UVOD	1
2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA	8
3. PODACI	9
4. METODE	13
5. REZULTATI	20
5.1. Klimatska obilježja promatranog područja	20
5.1.1 Prosječne temperaturne i oborinske prilike	20
5.1.2 Promjene temperaturnog režima	21
5.1.3 Promjene oborinskog režima	21
5.1.4 Promjene klimatskih klasa	23
5.1.5 Diskusija	24
5.2. Uočene vremenske promjene ekstremnih temperatura zraka	26
5.2.1 Apsolutni ekstremi temperature zraka	26
5.2.2 Indeksi temperaturnih ekstrema definirani fiksnim pragom	30
5.2.3 Indeksi temperaturnih ekstrema definirani percentilnim pragom	33
5.2.4 Diskusija	36
5.3. Utjecaj Sjeverno-atlantske oscilacije i sušnih uvjeta na toplinsko opterećenje grada..	38
5.3.1 Veza indeksa NAO i klimatskih parametara na postaji Zagreb-Maksimir	38
5.3.2 Utjecaj zimskih i ljetnih NAO uvjeta	43
5.3.3 Utjecaj kasno zimskih-proljetnih i ljetnih sušnih uvjeta	45
5.3.4 Odnos amplitude i varijabilnosti toplinskog opterećenja	48
5.3.5 Prostorna varijabilnost na temelju satelitskih podataka	49
5.3.6 Diskusija	51
5.4. Utjecaj promjena namjene zemljišta i klimatskih uvjeta na toplinsko opterećenje.....	55
5.4.1 Promjene namjene zemljišta i klimatskih uvjeta	55
5.4.2 Procjena iznosa i promjena toplinskog opterećenja za dvije situacije u gradu.....	57
5.4.3 Promjene toplinskog opterećenja zbog promjene klimatskih uvjeta	59
5.4.4 Promjene toplinskog opterećenja zbog promjene namjene zemljišta	61
5.4.5 Diskusija	65
5.5. Procjena toplinskog opterećenja u uvjetima buduće klime	68
5.5.1 Korekcija pristranosti u modelima	68
5.5.2 Procjena toplinskog opterećenja u referentnom razdoblju	70
5.5.3 Procjena toplinskog opterećenja u uvjetima buduće klime	72
5.5.4 Diskusija	74
6. ZAKLJUČAK	76
7. LITERATURA	82
8. PRILOZI	97

1. UVOD

Prema UN-u (2019) gradsko stanovništvo čini oko 55 % ukupne svjetske populacije, a prema projekcijama očekuje se da će taj udio do 2050. godine porasti na 65 % te se može očekivati daljnje širenje postojećih i nastanak novih urbanih sredina. Stoga je održivi razvoj gradova iznimno važan i predstavlja jedan od sedamnaest UN ciljeva održivog razvoja (<https://sdgs.un.org/goals>). Osim toga, i neki od drugih UN ciljeva održivog razvoja tiču se života u gradovima. Korištenjem umjetnih građevnih materijala koji imaju različita toplinska (kapacitet i konduktivnost) i radijacijska (albedo i emisivnost) svojstva u usporedbi s prirodnim materijalima, mijenjaju se karakteristike Zemljine površine te je time narušena bilanca energije i hidrološki ciklus u takvim sredinama (npr. Bounova i sur. 2015, Harmay i sur. 2021, Oleson i sur. 2015, Pauleit i sur. 2005)). Izgrađena područja tijekom dana apsorbiraju više topline koju pak tijekom noći sporije otpuštaju. Kao posljedica javlja se tzv. urbani toplinski otok (engl. *Urban Heat Island*, UHI) koji odražava znatno više temperature u gusto izgrađenom dijelu grada u odnosu na okolno ruralno područje (Oke i sur. 2017). Zbog manjeg udjela vegetacije i većeg udjela nepropusnih površina, u urbanim sredinama je smanjeno hlađenje evaporacijom i transpiracijom. Također, u gradskim sredinama cirkulacija zraka i strujanje vjetra mogu biti direktno oslabljeni zbog visokih i gusto izgrađenih dijelova grada (npr. Klaić i sur. 2002, Žuvela-Aloise 2017) ili pak indirektno pojačani za vrijeme stabilnih anticiklona (Nitis i sur. 2010). Osim toga, zbog velikog udjela nepropusnih površina, opasnost od tzv. urbanih poplava također je veća, pogotovo u gradovima smještenim u blizini planina za koje je detektirana intenzifikacija kratkotrajne oborine (npr. Hammond i sur. 2015, Nimac i sur. 2022a).

Urbana klima je pod utjecajem različitih procesa velike prostorne skale kao što je npr. globalno zatopljenje (npr. Oleson i sur. 2015), Sjeverno-atlantska oscilacija (engl. *North-Atlantic Oscillation*, NAO), El Niño-južna oscilacija, zatim regionalnih klimatskih faktora poput klimatskih zona (npr. Arnfield 2003 i navedene reference), suša (npr. Winguth i Kelp 2013), toplinskih valova (npr. Founda i Santamouris 2017), sinoptičkih poremećaja, te lokalnih faktora među koje spadaju planine i mora u neposrednoj blizini, veličina i morfologija grada (npr. Holec i sur. 2020, Zhou i sur. 2017), itd. Čak i umjetno stvorena jezera mogu imati utjecaja na klimatske uvjete okolnog područja (Klaić i Kvakić 2014). Osim toga, zbog interakcija i povratnih sprega klimatskog sustava i urbani toplinski otok utječe na procese povezane s navedenim prirodnim faktorima poput obalne cirkulacije (npr. Bauer 2020), cirkulacije obronka (npr. Nitis i sur. 2010, Telišman-Prtenjak i sur. 2018), pojave magle (npr. Telišman-Prtenjak i

sur. 2018) i sl. Tako su npr. Telišman Prtenjak i sur. (2018) pokazali kako interakcija između Medvednice, rijeke Save i urbanog dijela Zagreba može značajno utjecati na formiranje magle i cirkulaciju obronka. Iako atmosferski procesi na makro-skali utječu na procese manje skale (tj. na mezoskalne procese koja pak utječu na one na lokalnoj skali), zbog povratnih sprega i međusobnih interakcija, promjene na maloj skali utječu na procese veće prostorne skale.

Signal globalnog zatopljenja može u pojedinim područjima biti dodatno amplificiran ovisno o regionalnim klimatskim obilježjima i faktorima. Tako npr. porast srednje globalne temperature zrake u odnosu na predindustrijsko doba iznosi oko 0.87 °C, dok je iznad kopna taj porast temperature još izraženiji te iznosi oko 1.53 °C (Jia i sur. 2019). Pojedina područja pokazala su se kao posebno topla, tzv. vruće točke (engl. *hot spots*), a među takvima je i područje Sredozemlja (Giorgi 2006). U skladu s opaženim porastom učestalosti i intenziteta sušnih razdoblja (npr. Trambly i sur. 2020), spomenuto područje vrlo je ranjivo s obzirom na negativne učinke suše. Regionalni signal globalnog zatopljenja može zatim biti još više pojačan ili oslabljen na manjoj lokalnoj skali. Tako su npr. prema nekim istraživanjima planinska područja osjetljivija na klimatske promjene u usporedbi s područjima na istoj geografskoj širini niže nadmorske visine (npr. Jungo i Beniston 2001, Rangwala i Miller 2012 i navedene reference, Scorzini and Leopardi 2019).

Iako se istraživanja klimatskih promjena većinom temelje na analizi prosječnih vrijednosti klimatskih parametara, upravo su promjene u varijabilnosti i ekstremima od izuzetne važnosti (npr. Katz i Brown 1992, Schär i sur. 2004). Iako su živa bića sposobna postupno se prilagoditi na nove klimatske uvjete, upravo nagle i dugotrajne ekstremne situacije mogu izazvati ozbiljne štete. Zaninović i Matzarakis (2014) detektirali su povećanu smrtnost kao posljedicu toplinskih valova te komentiraju kako je taj utjecaj izraženiji u kontinentalnoj Hrvatskoj nego u obalnom području gdje je prisutan rashlađujući utjecaj mora. Slično, WMO i WHO (2015) napominju kako je smrtnost povezana s toplinskim valovima veća početkom ljeta.

Ekstremni događaji mogu biti definirani na različite načine te sama definicija može utjecati na rezultate analize (Sulikowska i Wypych 2020, Yosef i sur. 2020). U skladu s time, Svjetska meteorološka organizacija (engl. *World Meteorological Organization* – WMO) preporučila je set ETCCDI (engl. *Expert Team on Climate Change Detection*) indeksa ekstrema vezanih uz temperaturne i oborinske prilike (WMO 2004 i navedene reference). Zabilježen je generalni porast toplih i smanjenje hladnih indeksa na globalnom (Alexander i sur. 2006), regionalnom (Klein Tank i Konnen 2003, Moberg i sur. 2006, Spinoni i sur. 2015) kao i na nacionalnom nivou (Bartholy i Pongratz 2007, Kioutsoukis i sur. 2010, Nemec i sur. 2013, Santo i sur. 2014).

Ipak, malo je radova u kojima je dana analiza indeksa ekstrema za malo području poput gradskog.

Klimatska varijabilnost Europe pod snažnim je utjecajem NAO-a. Utjecaj NAO-a reflektira se u različitim meteorološkim parametrima: temperaturi, oborini, intenzitetu i poziciji putanja Atlantskih oluja (npr. Woolings i sur. 2015). Iako se NAO manifestira tijekom cijele godine, najveći je fokus na proučavanju zimskog NAO-a kada je sama pojava kao i njen utjecaj najizraženiji (Hurrell i sur. 2003 i reference tamo navedene). Tijekom pozitivne faze zimskog NAO-a, južna Europa je sušnija i toplija nego inače, dok je obrnuto kod njegove negativne faze. Iako je znatno slabiji i prostorno manji u usporedbi sa zimskim NAO-om, ljetni NAO također utječe na klimu u Europi (Folland i sur. 2009). Tako pozitivna ljetna NAO faza je povezana s toplim, sušnim i vedrim anticiklonalnim ljetnim uvjetima nad sjeverozapadnom Europom, dok tada iznad Sredozemlja i jugoistočne Europe prevladavaju nešto hladniji, vlažniji i oblačniji uvjeti. Suprotna veza vrijedi za negativnu fazu ljetnog NAO-a. Povezanost ljetnog NAO-a i ljetnih klimatskih ekstrema poput toplinskih valova, suša i poplava već je diskutirana u nekoliko radova (npr. Folland i sur. 2009, Vicente-Serrano i sur. 2011). Osim izravnog utjecaja ljetnog NAO-a na ljetnu klimatsku varijabilnost, postoji i neizravni (tj. vremenski odgođen) utjecaj zimskog NAO-a na klimatske prilike nadolazećeg proljeća/ljeta. Neizravni utjecaj NAO-a može biti ostvaren putem procesa koji uključuju sporije komponente klimatskog sustava poput morskog leda, snježnog pokrova, tla i mora (Herceg-Bulić i Kucharski 2014, Ogi i sur. 2003, Rigor i sur. 2002). Zbog toplinskog kapaciteta tih komponenti, anomalije generirane zimskim NAO-om mogu perzistirati dulje vrijeme i tako utjecati na ljetnu atmosfersku cirkulaciju. Tim putem, zimski NAO može pospješiti razvoj i perzistenciju ekstremno toplih ljetnih uvjeta u Europi (Fischer i sur. 2007, Ogi i sur. 2003, Vautard i sur. 2007).

Prema Sillmann i sur. (2017), za razvoj nekog ekstremnog događaja neki (ili svi) od navedenih uvjeta trebaju biti zadovoljeni poput pogodnih inicijalnih uvjeta (npr. vlažnost tla, snježni pokrov, površinska temperatura mora), prisutnih pokretača velike skale (npr. atmosferska blokirajuća polja, daljinske veze), lokalnih povratnih sprega (npr. interakcija tlo-atmosfera) i stohastičkih procesa (npr. šum). Među ekstremne događaje sa snažnim utjecajem na okoliš i društvo spadaju i toplinski valovi koji mogu biti posebno opasni za ljudsko zdravlje (WMO i WHO 2015). Porast u maksimalnom trajanju toplinskih valova detektiran je nad područjem Europe (Della-Marta i sur. 2007), kao i nad Hrvatskom i okolnim područjem (Spinoni i sur. 2015). Toplinski valovi su općenito vezani uz stacionarne anticiklonalne situacije tijekom kojih je povećano Sunčevo zračenje uz vedro nebo i slab vjetar (Cassou i sur.

2005). Tijekom takvih situacija i kvaliteta zraka je narušena zbog smanjene cirkulacije zraka uz proizvodnju polutanata te su česte i visoke koncentracije štetnog troposferskog ozona (Vautard i sur. 2005). Nekoliko radova pokazalo je kako manjak oborine nad područjem Sredozemlja u kasnu zimu – proljeće zbog smanjene vlage u tlu podupire razvoj ekstremno toplih ljeta u Europi (Della-Marta i sur. 2007, Fischer i sur. 2007, Vautard i sur. 2007). Stoga uvjeti u tlu mogu utjecati na intenzitet i trajanje toplinskih valova (Cassou i sur. 2005, Folland i sur. 2009). Utjecaj toplinskih valova na UHI već je istražen na primjeru više gradova (npr. Herbel i sur. 2018, Tewari i sur. 2019, Zhao i sur. 2018). Korištenjem različitih izvora podataka i metoda, neki od radova diskutiraju sinergijsku interakciju toplinskih valova i UHI-a za gradove u različitim dijelovima svijeta (npr. Li i Bou-Zeid 2013, Ramamurthy i Bou-Zeid 2019). Za područje Sredozemlja, uočen je porast intenziteta UHI-a tijekom toplinskih valova (Founda i Santamouris 2017, Pyrgou i sur. 2020). S druge strane, Richard i sur. (2021) nisu našli takvu vezu za grad Dijon (Francuska). Herbel i sur. (2018) su detektirali širenje površinskog UHI-a nad poljoprivredna područja bez vegetacije u Cluj Napoci (Rumunjska) za vrijeme ekstremno snažnog toplinskog vala. Dakle veza između toplinskih valova i intenziteta UHI-a nije u potpunosti objašnjena. Ipak, ova tema je od iznimne važnosti za područje Sredozemlja i jugoistočne Europe gdje se u budućnosti očekuju češći i intenzivniji toplinski valovi (Meehl i Tebaldi 2004).

Osim utjecaja veće prostorne skale, i lokalni faktori utječu na urbano toplinsko opterećenje. Tako npr. neki prirodni faktori poput reljefa (npr. Bokwa i sur. 2015, Holec i sur. 2020, Schau-Noppel i sur. 2020, Žuvela-Aloise 2017), blizine mora (Žuvela-Aloise 2017), jezera i rijeka (npr. Schau-Noppel i sur. 2020, Žuvela-Aloise 2014, Žuvela-Aloise i sur. 2017) mogu utjecati na magnitudu toplinskog opterećenja. Osim prirodnih faktora, kako je već spomenuto i karakteristike zemljišnog pokrova utječu na toplinsko opterećenje (npr. Gal i sur. 2021, Schau-Noppel i sur. 2020). Značajnije promjene u zemljišnom pokrovu često su vezane uz proces urbanizacije. Kalnay i Cai (2003) su pokazali kako je polovica opaženog smanjenja dnevne temperaturne amplitude u kontinentalnom dijelu Sjedinjenih Američkih Država povezana s urbanizacijom i drugim promjenama namjene zemljišta. Schau-Noppel i sur. (2020) komentiraju kako je toplinsko opterećenje gusto izgrađenog dijela grada Mainza (Njemačka) u simulaciji s izgrađenim gradom za skoro 100 % veći u usporedbi s hipotetskom simulacijom bez izgrađenog grada. Također, komentiraju kako je ovaj utjecaj UHI-a usporedive magnitude s utjecajem klimatskih promjena. Žuvela-Aloise (2017) je za fiktivni grad King's Landing (koji lokacijom i strukturom odgovara gradu Dubrovniku), pokazala kako dodavanje zidina i

građevina rezultira porastom toplinskog opterećenja i smanjenom ventilacijom u odnosu na situaciju bez izgrađenosti grada. Klaić i sur. (2002) su pokazali kako se za hipotetski scenarij urbanizacije Zagreba može očekivati smanjenje brzine vjetera u području gdje je scenarij primijenjen, dok promjene u strujanju nad ostatkom domene nisu značajne. Osim hipotetskih simulacija, analiziran je i utjecaj stvarnih promjena struktura grada na gradsku klimu. Tako su npr. Žuvela-Aloise i sur. (2014) na temelju karata grada Beča iz 18. stoljeća i recentne situacije grada analizirali utjecaj urbanizacije na toplinsko opterećenje. Pokazali su da uz proces urbanizacije i zahvati poput regulacije Dunava mogu utjecati na toplinsko opterećenje. Holec i sur. (2020) su za situacije zemljišnog pokrova grada Bratislave i Trnave u 1998., 2007. i 2016. godini detektirali zatopljenje uzrokovano urbanizacijom.

Ovisno o vrsti korištenih podataka, analize klimatskih karakteristika i promjena mogu se podijeliti na opservacijske i modelirane. Opservacijske analize najčešće se temelje na *in situ* mjerenjima s meteoroloških postaja koje često imaju bolju vremensku rezoluciju i veću duljinu niza ili na satelitskim podacima čija je prednost bolja prostorna pokrivenost, ali često obuhvaćaju relativno kratko vremensko razdoblje. S druge strane, klimatski modeli omogućavaju istraživanja utjecaja pojedinačnih promjena u klimatskom sustavu (npr. promjena u sastavu atmosfere, temperaturi mora/oceana, temperaturi tla, promjena u biljnom i zemljišnom pokrovu, itd.) na klimatska obilježja. Globalni klimatski modeli (engl. *Global Climate Model*, GCM) sastoje se od niza modela povezanih s različitim komponentama klimatskog sustava (model opće cirkulacije atmosfere, model cirkulacije oceana, model procesa u tlu i vegetacije, model ledenog pokrova, itd.) koji opisuju stanje klime na području cijele Zemlje. Budući da pokrivaju veliko područje, često imaju relativno grubu prostornu i vremensku rezoluciju pa nisu prikladni za većinu regionalnih i lokalnih analiza. S tim ciljem radi se prilagodba (engl. *downscaling*) koja može biti empirijsko-statistička koja se temelji se na primjeni pojedinih statističkih metoda, ili dinamička-ugnježđivanjem u neki od regionalnih klimatskih modela (engl. *Regional Climate Model*, RCM). RCM-ovi pokrivaju manje područje u usporedbi s GCM-ovima, no u pravilu imaju znatno bolju prostornu i vremensku rezoluciju. Ipak, potrebne početne i rubne uvjete RCM-ovi najčešće dobivaju od GCM-ova. Urbani klimatski modeli (engl. *Urban Climate Model*, UCM) spuštaju se pak na skalu grada i imaju još finiju prostornu rezoluciju u usporedbi s RCM-ovima. Zbog računalne zahtjevnosti i resursa potrebnih za izračun klimatskih varijabli na tako finoj rezoluciji, takve simulacije su najčešće ograničene na vrlo malo područje i/ili kraće vremensko razdoblje. Ipak, za potrebe klimatskih

analiza za dulje vremensko razdoblje, moguće ih je koristiti u kombinaciji s određenim statističkim metodama (Früh i sur. 2011).

Jedna od prednosti klimatskih modela je da se oni mogu koristiti u svrhu procjene budućih klimatskih uvjeta. S tom svrhom, potrebno je pretpostaviti scenarije budućih koncentracija stakleničkih plinova koje prate društveni i ekonomski razvoj čovječanstva. Kada se takvi scenariji uključe u izračun klimatskih modela, moguće su projekcije budućeg stanja klime. Scenariji koncentracije stakleničkih plinova (engl. *Representative Concentration Pathways*, RCP) su putanje koncentracija stakleničkih plinova za moguće buduće klime (Moss i sur. 2010): RCP2.6, RCP4.5, RCP6 i RCP8.5. Scenarij RCP2.6 je najoptimističniji, scenariju RCP4.5 predstavlja umjereni scenarij, dok je scenarij RCP8.5 najgori. Ipak, scenarij RCP8.5 postaje sve manje vjerojatan, dok je scenarij RCP4.5 ipak realističniji.

Izvori neizvjesnosti rezultata klimatskih modela kriju se prirodnoj varijabilnosti klimatskog sustava, nesavršenosti klimatskih modela te nepouzdanosti procjena budućih koncentracija stakleničkih plinova (Hawkins i Sutton 2009). Zbog nesavršenosti klimatskih modela preporuča se u analizama koristiti skup različitih modela, tzv. ansambl numeričkih simulacija. U tu svrhu često se za potrebe istraživanja učinaka i adaptacije na klimatske promjene koriste simulacije koje su dostupne kroz međunarodnu inicijativu EURO-CORDEX (engl. *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – European Domain*). Rezultati simulacija unutar inicijative EURO-CORDEX često ne mogu biti korišteni izravno kao ulaz u modele utjecaja (engl. *impact models*) pa je prije toga potrebno korigirati podatke u odnosu na izmjerene podatke nekim od metoda korekcija pristranosti (engl. *bias correction*).

Dakle, vremenske promjene klimatskih parametara rezultat su interakcije različitih procesa) te zbog toga nije jednostavno odrediti njihov pojedinačni doprinos. U ovom radu analizirani su neki od navedenih utjecaja na toplinsko opterećenje Zagreba. Radnja je podijeljena u pet tematskih cjelina te se ovisno o korištenim podacima može podijeliti na dva dijela: analiza izmjerenih podataka s meteoroloških postaja i analiza numeričkih simulacija dobivenih primjenom urbanog klimatskog modela. U prvom dijelu diskutirane su vremenske promjene i karakteristike klimatskih obilježja područja istraživanja. U drugom dijelu fokus je na analizi obilježja i promjena ekstremnih temperatura zraka i dio ovih rezultata objavljen je u radu Nimac i sur. (2021). Treći dio analize bavi se utjecajem veće prostorne skale na toplinsko opterećenje grada (konkretno NAO-a i sušnih uvjeta) i dio ovih rezultata objavljen je u radu Nimac i sur. (2022b). U četvrtom dijelu istražen je doprinos utjecaja promjena u zemljišnom pokrovu i klimatske varijabilnosti/promjena na porast toplinskog opterećenja u gradu. U

zadnjem dijelu analizirano je toplinsko opterećenje u uvjetima buduće (toplije) klime primjenom simulacija dobivenih unutar inicijative EURO-CORDEX.

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Područje istraživanja obuhvaća šire područje Zagreba, glavnog grada Hrvatske smještenog u središnjem kontinentalnom dijelu s južne strane planine Medvednice. Budući da na klimu Hrvatske utječu tri velike geografske cjeline - Panonska nizina, Dinaridi i Jadransko more (Slika 2.1 lijevo), zbog njegovog položaja, na području Zagreba osjećaju se utjecaji ta tri klimatska tipa. Dodatno, na klimu ovog područja utječu i lokalni faktori poput planine Medvednice, rijeke Save i vrste površinskog pokrova (Slika 2.1 desno). Medvednica ima bitnu ulogu u modificiranju klime grada jer omogućava formiranje cirkulacije obronka (Jurčec 1985, Lisac 1984; Telišman Prtenjak i sur. 2018), podupire razvoj fenskog silaznog strujanja (Lisac 1984; Volarić 1999), sprječava prodore hladnog vjetera sa sjevera (Zaninović i sur. 2008), itd. Tijekom mirnih anticiklona, posebno tijekom zimskih noći, temperaturne inverzije su česta pojava u Zagrebu (Lončar 1991).

Veliki doprinos poznavanju klime Grada Zagreba dali su Makjanić i sur. (1977) analizom 100-godišnjih nizova različitih klimatskih parametara (sunčevo zračenje, temperatura zraka, insolacija, naoblaka, meteorološke pojave). Nešto kasnije su Lisac (1984) i Lukšić (1984) dopunili analizu karakteristikama vjetera, odnosno vlažnosti zraka. Klimatske fluktuacije kroz nešto dulje vremensko razdoblje 1862. – 1990. analizirane su detaljno u radu Penzar i sur. (1992), dok je Juras (1985) dao analizu klimatskih promjena u razdoblju 1951. – 1980. u usporedbi s ranijim 30-godišnjim razdobljima. Još je bilo radova na temu klime Zagreba, no bitno je spomenuti kako je većina tih radova objavljena prije ili tijekom ranih 90-tih.



Slika 2.1 Geografski položaj Hrvatske (lijevo) te položaj Zagreba i postaja korištenih u analizi (desno). Slike su izrađene programom Google Earth.

3. PODACI

Prvi dio analize temelji se na podacima izmjerenim na meteorološkim postajama Državnog hidrometeorološkog zavoda u preklapajućem vremenskom razdoblju 1960. – 2019. Postaje su smještene u različitim dijelovima grada, kao i na različitim nadmorskim visinama pri čemu je Puntijarka (PUN) postaja s najvišom nadmorskom visinom, Zagreb-Pleso (ZGP) najjužnija postaja, Zagreb-Maksimir (ZGM) najistočnija, a Zagreb-Grič (ZGG) centralna urbana postaja (Tablica 3.1). Korišteni su dnevni podaci za razdoblje prosinac 1959. – prosinac 2019., pri čemu na postaji PUN nedostaju podaci u rujnu 1991, a na postaji ZGP u razdoblju rujna – prosinac 1991. Za određivanje klimatskih klasa definiranih Köppen-Geigerovom klasifikacijom (Kottek i sur. 2006) korišteni su dnevni podaci temperature zraka i količine oborine, dok su za analizu promjena ekstremnih temperatura korištene dnevne maksimalne i minimalne temperature zraka.

Na gotovo svim postajama, temperatura zraka mjeri se u meteorološkoj kućici na visini od 2 m, osim ZGG gdje se kućica nalazi na sjeverno orijentiranom zidu zgrade na visini od 5 m što je u vrijeme uspostavljanja te postaje bilo često (Brugnara i sur. 2016). Budući da je ZGG jedna od tri Hrvatske postaje među 140-stoljetnih postaja priznatih od strane WMO-a, korištena je i u ovoj analizi. Ipak treba imati na umu kako će spomenuti položaj kućice na postaji ZGG utjecati na same amplitude parametara, dok bi relativne vrijednosti i trendovi ipak trebali biti usporedivi s onima na ostale tri postaje. Također, navedena postaja se ujedno nalazi i u setu podataka ECA&D (Klein Tank i sur. 2002).

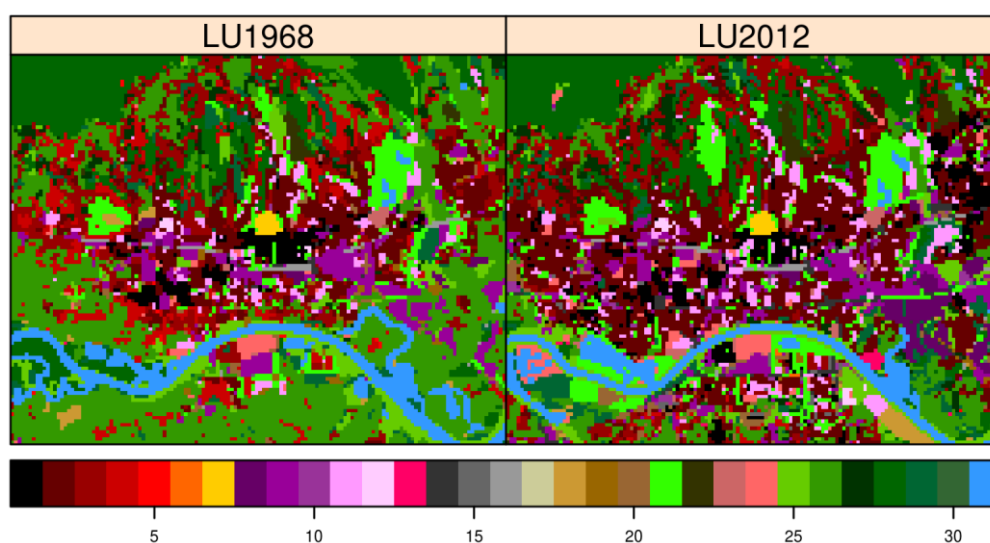
Tablica 3.1 Obilježja meteoroloških postaja.

Naziv postaje	Oznaka	Tip	H (m)	Lon (°)	Lat (°)
Zagreb-Grič	ZGG	Urbana	157	15.9719	45.8144
Zagreb-Maksimir	ZGM	Suburbana	123	16.0336	45.8219
Zagreb-Pleso	ZGP	Suburbana	106	16.0539	45.7292
Puntijarka	PUN	Planinska	991	15.9683	45.9075

Homogenost srednjih mjesečnih minimalnih i maksimalnih temperatura zraka testirana je *R* paketom *Climatol* (Guijaro 2019) koji se pokazao uspješnim u interpolaciji i homogenizaciji srednjih mjesečnih temperatura zraka u Hrvatskoj (Nimac i Perčec Tadić 2017). Dobiveno je kako postaja ZGG ima prekid u homogenosti maksimalne temperature zraka u ožujku 1993. godine, dok postaja ZGM ima prekid u homogenosti minimalne temperature zraka u studenom

1995. Ipak, nije odrađena korekcija podataka budući da proces homogenizacije može ukloniti utjecaj urbanizacije u podacima što je vrlo vjerojatno razlog detektiranih nehomogenosti (Pandžić i Likso 2010). Detektirani prekidi u homogenosti uzeti su u obzir pri interpretaciji rezultata.

S obzirom da je za izradu podloga potrebnih za pokretanje modela bilo nužno imati detaljne podatke digitalnog modela reljefa, digitalnog modela površina i topografsku osnovu, prema podacima dobivenima od Grada Zagreba i Urbanog Atlasa 2012 (<https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2012>) kreirane su podloge digitalnog modela reljefa (Slika S1 u prilogu), klase namjene zemljišta (Slika 3.1 desno) i opisa klasa (Tablica S1 u prilogu). Također, za opis izgrađenosti grada u prošlosti, korištene su ortofoto karte koje odgovaraju situaciji grada iz 1968. godine (<https://geoportal.dgu.hr/>) na temelju kojih je izrađena odgovarajuća karta klase namjene zemljišta (Slika 3.1 lijevo). Ta ortofoto karta je vrijedan izvor informacija te je već korištena u nekoliko radova za potrebe npr. analize klizišta 2018. godine (Podolszki i sur. 2021) ili razornog potresa 2020. godine (Markušić i sur. 2021) u blizini Zagreba.



Slika 3.1 Klase namjene zemljišta prema stanju grada iz 1968. (lijevo) i 2012. (desno) godine. Naziv i opis pojedine klase dani su u Tablici S1 u prilogu.

Kako bi se istražio utjecaj procesa velike skale na urbano toplinsko opterećenje, razdoblje analize odabrano je prema maksimalnoj duljini niza na postaji ZGM, 1949. – 2019. Za analizu utjecaja NAO-a na ovo područje, korišten je indeks definiran kao vremenski niz glavne komponente koja se dobije analizom empirijskih ortogonalnih funkcija primijenjenih na

anomalije tlaka zraka na morskoj razini iznad Atlantika u razdoblju 1949. – 2019. (Hurrell i sur. 2003). Zimski NAO je ovdje definiran za sezonu prosinac – veljača, dok se ljetni odnosi na sezonu lipanj – kolovoz. Standardizirani oborinski evapotranspiracijski indeks SPEI (Vicente-Serrano i sur. 2010) korišten je za opis sušnih uvjeta. Proračun indeksa SPEI temelji se na procjeni vodne bilance, tj. razlici oborine i evapotranspiracije koja je kasnije standardizirana. Prednost indeksa SPEI u usporedbi s drugim indeksima suše je to što uzima u obzir i evaporaciju te se može računati na različitim vremenskim skalama. Sušne uvjeti u sezoni koja je prethodila ljetu opisuje 5-mjesečni indeks SPEI za sezonu siječanj – svibanj (MaySPEI5) koji omogućava analizu odgođenog utjecaja. Izravan utjecaj je analiziran pomoću 3-mjesečnog indeksa SPEI za sezonu lipanj – kolovoz (AugSPEI3). Za procjenu referentne evapotranspiracije korištena je Penman-Monteithova metoda te mjesečne vrijednosti srednje minimalne, maksimalne temperature zraka, brzine vjetera na 2 m (procijenjene iz brzine vjetera na 10 m kako je opisano u Allen i sur. 1998), relativne vlažnosti, naoblake (za procjenu sunčevog zračenja) i tlaka zraka. Referentno razdoblje za procjenu parametara log-Logističke razdiobe je standardno klimatološko razdoblje 1961. – 1990. Dodatno su podaci s postaje ZGG za razdoblje 1981. – 2010. korišteni za validaciju rezultata modela. Za određivanje indeksa SPEI korišten je R paket *SPEI* (Begueria i Vicente-Serrano 2017). Osim podataka modela, korišteni su i satelitski podaci Landsat-8. Iako su površinska temperatura (LST) i temperatura zraka na 2 m različiti parametri, ipak je temperatura na 2 m pod utjecajem površinske temperature. Površinski UHI koji je definiran vrijednostima LST-a već je uvelike analiziran i opisan u znanstvenim radovima (npr. Geletić i sur. 2019a, Grigoras i Uritescu 2019, Herbel i sur. 2018, Pongracz i sur. 2010).

Analiza utjecaja promjena namjene zemljišta i promjena klimatskih uvjeta na ljetno urbano toplinsko opterećenje napravljena je za dva uzastopna klimatološka razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. Ova dva klimatološka razdoblja preporučena su od strane WMO (2017) za potrebe praćenja klime.

S ciljem analize ljetnog urbanog toplinskog opterećenja u uvjetima buduće (toplije) klime, korišteni su podaci RCM-a iz EURO-CORDEX inicijative za lokaciju postaje ZGM (Tablica 3.2). Spomenuti RCM-ovi forsirani su GCM-ovima CMIP5 (engl. *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*). Odabir modela temeljio se na raspoloživosti dnevnih podataka potrebnih za kuboidnu metodu. Budući da većina modela iz inicijative EURO-CORDEX-a uglavnom sadrži podatke specifične vlažnosti, relativna vlažnost izračunata je na temelju temperature zraka, specifične vlažnosti i tlaka zraka. Također, još jedan od uvjeta za

odabir modela je tzv. puna matrica, odnosno da za odabrane RCM-ove, imamo iste GCM-ove. Konačno, odabrana su tri RCM-a inicijalizirana s dva različita GCM-a što je rezultiralo ansamblom od 6 realizacija (Tablica 3.2). Odabrana su dva scenarija emisije stakleničkih plinova: povoljniji (RCP 4.5) i nepovoljniji (RCP 8.5), dok su za referentno razdoblje korišteni povijesni podaci u razdoblju 1981. – 2005. te podaci scenarija RCP 4.5 za razdoblje 2006. – 2010. Za analizu budućih klimatskih uvjeta odabrana su dva razdoblja, ranije razdoblje 2011. – 2040. i buduće razdoblje 2041. – 2070. Podaci polja modela za lokaciju ZGM dobiveni su na dva načina: bilinearnom interpolacijom i u najbližoj točki. Budući da je analiza pokazala kako su razlike u podacima za te dvije metode vrlo male, odabrana je bilinearna interpolacija kako bi se izbjegle moguće lokalne nestabilnosti.

Tablica 3.2 Popis klimatskih modela korištenih u analizi, skraćenica korištena u radu, horizontalna razlučivost i referenca.

Kratica	Model	Hor. razlučivost	Referenca
EURO-CORDEX regionalni klimatski modeli			
CLM	CLMcom-CCLM4-8-17	$0.11^{\circ} \times 0.11^{\circ}$	Rockel i sur. (2008)
RCA	SMHI-RCA4	$0.11^{\circ} \times 0.11^{\circ}$	Samuelsson i sur. (2011)
REG	DHMZ-RegCM4-2	$12.5 \text{ km} \times 12.5 \text{ km}$	Giorgi i sur. (2012)
CMIP5 globalni klimatski modeli			
CN	CNRM-CERFACS-CM5	$1.40^{\circ} \times 1.41^{\circ}$	
MP	MPI-M-MPI-ESM-MR(LR)	$1.87^{\circ} \times 1.88^{\circ}$	

4. METODE

Kao prvi uvid u klimatske karakteristike područja istraživanja, prema podacima s meteoroloških postaja određene su odgovarajuće klimatske klase prema Köppen-Geigerovoj klasifikaciji (Kottek i sur. 2006). To je tip klimatske klasifikacije koji je najčešće u upotrebi, a temelji se na temperaturnim i oborinskim karakteristikama u toplom i hladnom dijelu godine. Opis i definicija pojedinog simbola relevantnog za Hrvatsku dani su u Tablici 4.1. Klimatska klasa određena je prvo na temelju podataka za razdoblje 1960. – 2019., a zatim i za svako 30-godišnje klizno razdoblje s pomakom od 1 godine. Cilj ovakvog pristupa je odrediti postoje li vremenske promjene u klimatskoj klasi te u kojem je razdoblju nastupila promjena.

Tablica 4.1 Kriteriji za određivanje Köppen-Geigerovih klimatskih klasa relevantnih za područje Hrvatske.

1. simbol – glavni tip klime		
C	Umjerena	$T_{wm} \geq 10\text{ °C}$ i $-3\text{ °C} < T_{cm} < 18\text{ °C}$
D	Snježno šumska	$T_{wm} \geq 10\text{ °C}$ i $T_{cm} \leq -3\text{ °C}$
2. simbol – oborinski režim		
s	Suha ljeta	$P_{sdm} < 40\text{ mm}$ i $< 1/3 P_{wwm}$
w	Suhe zime	$P_{wdm} < 1/10 P_{swm}$
f	Nema sušne sezone	Ako kriteriji s i w nisu zadovoljeni
3. simbol – temperaturni režim		
a	Vruća ljeta	$T_{wm} \geq 22\text{ °C}$
b	Topla ljeta	$T_{wm} < 22\text{ °C}$ i $T_{4wm} > 10\text{ °C}$
c	Hladna ljeta	Ako kriteriji a i b nisu zadovoljeni
T_{wm} – temperatura najtoplijeg mjeseca T_{cm} – temperatura najhladnijeg mjeseca T_{4wm} – temperatura četvrtog najtoplijeg mjeseca P_{sdm} – količina oborine najsušnijeg mjeseca toplog dijela godine P_{swm} – količina oborine najkišnijeg mjeseca toplog dijela godine P_{wdm} – količina oborine najsušnijeg mjeseca hladnog dijela godine P_{wwm} – količina oborine najkišnijeg mjeseca hladnog dijela godine		

U svrhu analize vremenskih promjena minimalne i maksimalne temperature zraka, korišteni su indeksi ETCCDI. Odabrano je osam indeksa temperaturnih ekstrema povezanih s ekstremno toplim i hladnim temperaturnim uvjetima te su definirani s obzirom na apsolutne vrijednosti, fiksne pragove ili percentilne pragove (Tablica 4.2). Indeksi s fiksnim pragom prikladniji su za usporedbu postaja sa sličnim klimatskim karakteristikama, dok indeksi definirani percentilnim pragom predstavljaju anomalije u odnosu na lokalnu klimu pa su prikladniji za usporedbu postaja u različitim klimatskim područjima. Spomenuti pragovi mogu biti povezani s uvjetima koji su neugodni za živa bića i/ili opasni za ekosustave i infrastrukturu.

Za izračun percentilnih indeksa korišten je paket *R climdex.pcic* (Bronaugh D for *Pacific Climate Impacts Consortium*, 2020) koji uključuje i metodu ponovnog uzorkovanja (engl. *bootstrap*) preporučenu od Zhang i sur. (2005). Također je ispitan utjecaj odabira referentnog razdoblja za određivanje percentilnih pragova te su odabrana tri razdoblja: standardno (1961. – 1990.), recentno (1981. – 2010.) i kompletno (1960. – 2019.). Standardno razdoblje 1961. – 1990. najčešće se koristi u analizama percentilnih indeksa, iako je recentno razdoblje 1981. – 2010. preporučeno za potrebe praćenja klime (WMO 2017).

Tablica 4.2 Definicija odabranih indeksa temperaturnih ekstrema.

Indeks	Simbol	Definicija
Apsolutni indeksi		
Minimalna temperatura	Tmin	Godišnja minimalna temperatura zraka
Maksimalna temperatura	Tmax	Godišnja maksimalna temperatura zraka
Indeksi definirani u odnosu na fiksni prag		
Ledeni dani	ID	Broj dana s dnevnom Tmax < 0 °C
Mrzli dani	FD	Broj dana s dnevnom Tmin < 0 °C
Ljetni dani	SU	Broj dana s dnevnom Tmax > 25 °C
Tropske noći	TR	Broj dana s dnevnom Tmin > 20 °C
Indeksi definirani u odnosu na percentilni prag		
Hladni dani	CD	Postotak broja dana s dnevnom Tmax < Tmax10p
Hladne noći	CN	Postotak broja dana s dnevnom Tmin < Tmin10p
Topli dani	WD	Postotak broja dana s dnevnom Tmax > Tmax90p
Tople noći	WN	Postotak broja dana s dnevnom Tmin > Tmin90p

Godišnji apsolutni minimumi i maksimumi temperature zraka analizirani su korištenjem opće razdiobe ekstrema (engl. *Generalized Extreme Value*, GEV). To je teorijska razdioba za modeliranje ekstrema i često se koristi u meteorološkoj praksi (Cindrić i Pasarić 2018, Kioutsioukis i sur. 2010, Unkašević i Tošić 2009). Prema Colesu (2001), funkcija razdiobe GEV ima oblik:

$$P(x) = \exp(-\exp(-y(x))) \quad (1)$$

gdje je $P(x)$ vjerojatnost da se x dogodi prosječnom jednom u T godina, a $y(x)$ reducirana varijata:

$$y = -\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right) \quad (2)$$

Procjena ekstremne vrijednosti za povratno razdoblje T (tj. povratna vrijednost) računa se kao:

$$x_T = x_0 - \frac{\alpha}{k}(1 - y^{-k}) \quad (3)$$

gdje je x_0 parametar lokacije, α parametar skale, a k parametar oblika. U slučaju nestacionarnog modela GEV, parametri lokacije i skale sadrže dodatan član koji je linearno ovisan o vremenu. Da bi se testirala značajnost uključivanja dodatnih parametara, korišten je test omjera vjerodostojnosti (engl. *Likelihood Ratio*, LR) (Coles 2001; Wilks 2006). Prema Colesu (2001), statistika odstupanja (engl. *Deviance statistics*, D) definirana je kao:

$$D = 2(l_1(M_1) - l_0(M_0)) \quad (4)$$

gdje su $l_0(M_0)$ i $l_1(M_1)$ maksimizirane log-vjerodostojnosti (engl. *log-likelihoods*) za model M_0 (ovdje stacionarni GEV) i M_1 (nestacionarni GEV). Za odabrani nivo značajnosti alfa (ovdje 5 %), ako je D veći od kritične vrijednosti određene iz χ^2 razdiobe, model M_0 je odbačen, odnosno M_1 se prihvaća.

Za prilagodbu razdiobe GEV, korišten je pristup *block-maxima* koji se temelji na određivanju ekstremne vrijednosti unutar definiranog vremenskog bloka pri čemu ovdje svaki blok odgovara kalendarskoj godini. Parametri razdiobe GEV procijenjeni su metodom maksimalne vjerodostojnosti (engl. *maximum likelihood estimation*) (Wilks 2006) budući da je ta metoda prikladna i kada promatrani parametar nije stacionaran (Klein Tank i sur. 2009). Za potrebe modeliranja razdiobe GEV korišten je R paket *extRemes* (Gilleland i Katz 2016).

Za potrebe procjene linearnog trenda korišten je neparametarski Senov nagib (Sen 1968) s obzirom da je spomenuta metoda otpornija na stršće vrijednosti u usporedbi s klasičnom linearnom regresijom. Prvo se izračuna set linearnih nagiba kao:

$$d_k = (x[j] - x[i]) / (j - i), \text{ za } 1 \leq i < j \leq n \quad (5)$$

gdje je d nagib, x analizirana varijabla, n duljina niza, a i i j indeksi. Senov nagib se zatim dobije kao medijan svih vrijednosti d_k .

Nadalje je Mann Kendallov test (Hipel i McLeod 2005) korišten za testiranje značajnosti trenda. Statistika testa MK je dana kao:

$$Z_{MK} = \frac{S-1}{\sqrt{varS}}, zaS > 0 \quad (6)$$

$$Z_{MK} = 0, zaS = 0 \quad (7)$$

$$Z_{MK} = \frac{S+1}{\sqrt{varS}}, zaS < 0 \quad (8)$$

pri čemu je S jednak:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sgn(x_j - x_i) \quad (9)$$

gdje je *sgn* funkcija predznaka, dok je varijanca od S jednaka:

$$varS = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (10)$$

gdje je *g* ukupan broj povezanih grupa, a *t_p* broj članova unutar svake grupe *p*.

Trend se ocjenjuje značajnim ako je za odabrani nivo značajnosti (ovdje 5 %) apsolutna vrijednost Z_{MK} veća od kritične vrijednosti određene iz normalne razdiobe. Budući da test značajnosti ovisi o samoj magnitudi kao i varijabilnosti varijable koja se istražuje, često je teško na taj način dokazati prisutnost vremenskih promjena ekstremnih vrijednosti.

Značajnost promjena u toplinskom opterećenju između dva eksperimenta testirana je *t*-testom za razliku u srednjoj vrijednosti (Wilks 2006). Test se temelji na izračunu parametra *t* prema relaciji:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{(s_1^2 + s_2^2)/n}} \quad (11)$$

gdje su $\bar{x}_1$ i $\bar{x}_2$ prosječne vrijednosti svake od testiranih varijabli, dok su s_1 i s_2 odgovarajuće standardne devijacije, a *n* duljina niza. Osnovna hipoteza je da ne postoji razlika između srednjih vrijednosti, a ukoliko je parametar *t* veći od određene kritične vrijednosti ovisne o broju stupnjeva slobode i nivou značajnosti, hipoteza o nepostojanju razlike između srednjih vrijednosti se može odbaciti.

Za potrebe urbanog klimatskog modeliranja, korišten je model MUKLIMO_3 (njem. *3D Mikroskaliges Urbanes KLImaMOdell*). To je nehidrostatički z-koordinatni RANS (engl. *Raynolds-Averaged Navier-Stokes*) mikroskalni model razvijen s ciljem simuliranja polja atmosferskog strujanja uz prisustvo zgrada (Früh i sur. 2011, Sievers and Zdunkowski 1986, Sievers 1995). Osnovne karakteristike modela opisane su u radovima danim u Tablici 4.3. Kako bi se pojednostavio zahtjevan proces izračuna, urbana područja reprezentirana su kao porozan

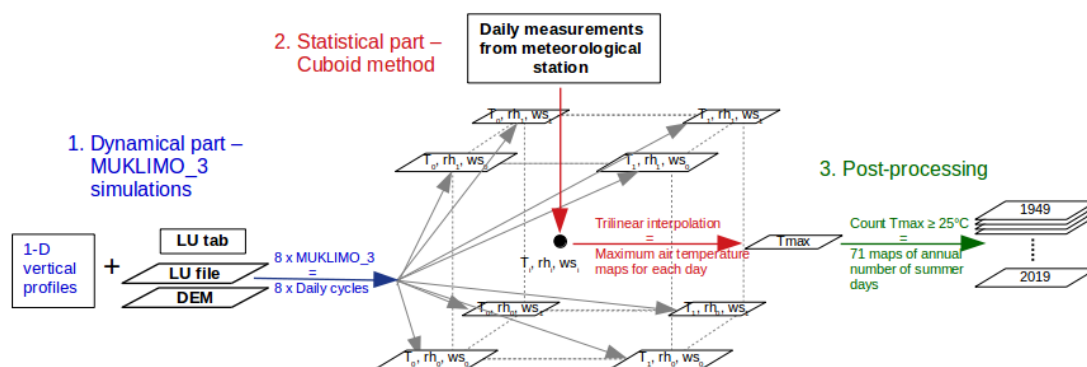
medij u kojem pore predstavljaju prostor između zgrada. Za potrebe 3-D simulacije, osnovna verzija modela poopćena je metodom strujne funkcije vrtložnosti (Sievers 1995). Horizontalna razlučivost može biti u intervalu od 20 do 300 m te mreža može biti promjenjiva tako da je u izgrađenim područjima razlučivost povećana, a grublja u ruralnoj okolini (npr. Früh i sur 2011). Vertikalna razlučivost je u intervalu od 10 do 100 m pri čemu je ona finija blizu površine. Početni uvjeti za 3-D simulaciju su dobiveni iz 1-D simulacije započete prethodni dan definirane setom početnih temperatura zraka, relativne vlažnosti i brzine vjetra za određene situacije koje odgovaraju vrhovima kuboida (Žuvela-Aloise 2017). Detaljan shematski prikaz metode dan je na Slici 4.1. Ulazna polja za model MUKLIMO_3 su digitalni model reljefa (Slika S1 u prilogu) i LU (Slika 3.1) čija je horizontalna rezolucija u ovom radu 100 m. Polje LU-a dodatno je opisano tablicom LU-a u kojoj su definirane karakteristike svake od klasa. Model MUKLIMO_3 već je korišten u razne svrhe kao npr.: za procjenu utjecaja urbanizacije na promjene toplinskog opterećenja (npr. Holec i sur. 2020, Schau-Noppel i sur. 2020, Žuvela-Aloise i sur. 2014), procjenu efikasnosti implementacije različitih mjera prilagodbe (npr. Gal i sur. 2021, Geletič i sur. 2020, Straka i Soudoudi 2019, Žuvela-Aloise i sur. 2016, Žuvela-Aloise i sur. 2018), procjenu očekivanog toplinskog opterećenja u uvjetima buduće klime (npr. Früh i sur. 2011, Geletič i sur. 2019b, Oswald i sur. 2020, Schau-Noppel i sur. 2020, Skarbit i Gal 2016). Također, model je uspješno primijenjen u prognostičkom modu za austrijske gradove (Hollósi i sur. 2021).

Tablica 4.3 Osnovne karakteristike modela MUKLIMO_3.

Proces	Referenca
Kratkovalno zračenje	Sievers i Früh (2012)
Dugovalno zračenje i utjecaj oblaka	Moller (1954), Zdunkowski i sur. (1975)
Parametrizacija strujanja u izgrađenom području	Gross (1989)
Turbulencija	Sievers (2012)
Vegetacijski model	Siebert i sur. (1992)
Model tla	Sievers i sur. (1983)

Za procjenu toplinskog opterećenja kroz dulje vremensko razdoblje korištena je tzv. kuboidna metoda (Früh i sur. 2011, Žuvela-Aloise i sur. 2014). Kuboidna metoda je dinamičko-statistička tehnika koja se temelji na osam idealiziranih simulacija modelom MUKLIMO_3 koje obuhvaćaju situacije u kojima se javlja toplinsko opterećenje u centru grada (Slika 4.1). Ulazni podaci za kuboidnu metodu su dnevne vrijednosti temperature zraka, relativne vlažnosti

te brzine i smjera vjetra. Trilinearna interpolacija izvršava se za svaki dan kada je dnevna vrijednost temperature zraka iznad minimalne temperature definirane kao granice za kuboidnu metodu (ovdje 15 °C). Za svaki dan računaju se odgovarajući težinski faktori (potrebni za trilinearnu interpolaciju) ovisno o vrijednostima temperature zraka, relativne vlažnosti i brzine vjetra u odnosu na vrijednosti koje odgovaraju vrhovima kuboida. Simulacije su rađene za dva prevladavajuća smjera vjetra uzduž Medvednice, sjeveroistočni i jugozapadni. Urbano toplinsko opterećenje definirano je u ovom radu kao broj ljetnih dana (Tx25), odnosno kao broj dana s maksimalnom temperaturom većom ili jednakom 25 °C. Valja istaknuti kako se ova definicija Tx25 razlikuje od ljetnih dana definiranih od strane ETCCDI (SU) koji su topliji od 25 °C.



Slika 4.1 Dijagram toka modeliranja urbanog toplinskog opterećenja za dulje vremensko razdoblje. U prvom koraku (dinamičkom) za svaku situaciju koja predstavlja vrhove kuboida primjenjuje se model MUKLIMO_3 kako bi se simulirala polja temperature (T), relativne vlažnosti (rh) i brzine vjetra (ws). U drugom koraku (statističkom) trilinearnom interpolacijom se za svaki dan kada je srednja dnevna temperatura zraka bila iznad 15 °C kreiraju polja maksimalne temperature zraka (Tmax). Zadnji korak je naknadna obrada podataka u kojem se za svaku godinu računa broj ljetnih dana, odnosno dana s $T_{max} \geq 25$ °C.

Metoda korekcije pristranosti podataka RCM-a temelji se na pretpostavci stacionarnosti, odnosno da se veza između mjerenja i modela u povijesnom razdoblju ne mijenja u budućnosti. Dakle, prvo se na temelju podataka u odabranom referentnom razdoblju određuje odgovarajuća veza koja se zatim primjeni na izlazna polja RCM-a dobivena za povijesno i projekcijsko razdoblje. Nekoliko je vrsta ove metode koje se koriste za korekciju temperature kao npr. linearno skaliranje, skaliranje varijance te mapiranje razdiobe (Teutschbein i Seibert 2012 i u radu navedene reference). Dok je linearno skaliranje učinkovito za korekciju prosječnih

vrijednosti, skaliranjem varijance korigiraju se i prosječna vrijednost i varijance temperature. Mapiranjem razdiobe korigira se funkcija distribucije te je na taj način korigirana većina statističkih karakteristika razdiobe varijable (Teutschbein i Seibert 2012). Nekoliko je pristupa mapiranja razdiobe poput mapiranja vjerojatnosti (engl. *probability mapping*) i mapiranja kvantila (engl. *quantile-quantile mapping*). Teutschbein i Seibert (2012) pokazali su kako se upravo mapiranje razdiobe pokazalo kao najučinkovitija metoda korekcije temperature i oborine simulirane RCM-ovima. Stoga je u ovom radu korištena metoda mapiranja kvantila. Ova se metoda temelji na usporedbi kumulativnih distribucija varijable u odgovarajućim razdobljima za koja su zatim metodom linearne regresije određeni koeficijenti regresije. Na ovaj način, osim korekcije pristranosti rezultatima modela, na neki je način izvršena i statistička prilagodba.

Analiza podataka i vizualizacija odrađena je u programskom jeziku R (R Core Team 2020)

5. REZULTATI

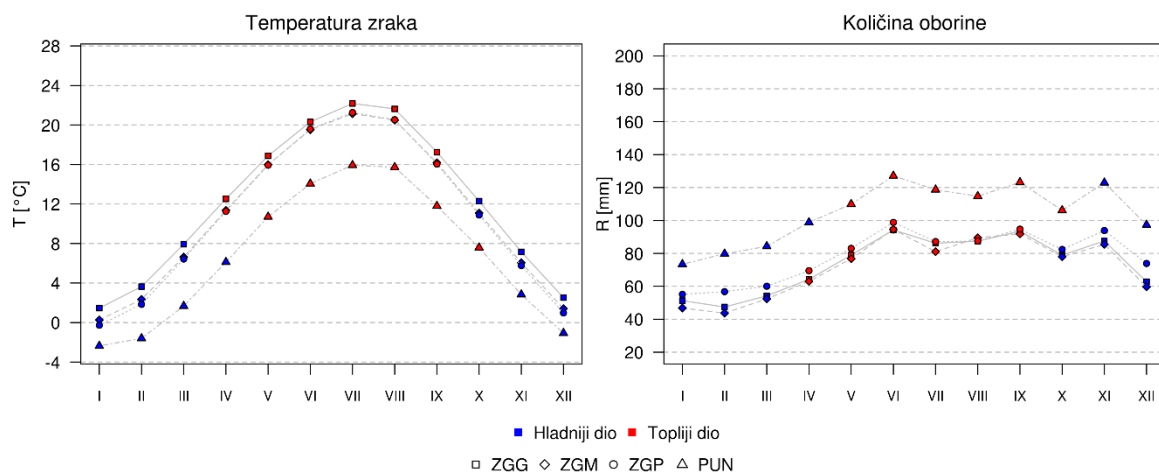
U idućim će poglavljima biti predstavljeni rezultati istraživanja od kojih su neki objavljeni u radovima Nimac i sur. (2021) i Nimac i sur. (2022b), a povezani su s klimatskim obilježjima grada Zagreba i njegovim toplinskim opterećenjem.

5.1. Klimatska obilježja promatranog područja

5.1.1 Prosječne temperaturne i oborinske prilike

Temperaturne i oborinske klimatske prilike na području Zagreba analizirane su na temelju meteoroloških mjerenja na postajama navedenim u Tablici 3.1. Godišnji hod temperature na sve četiri postaje ima maksimum u srpnju i minimum u siječnju (Slika 5.1.1). Ipak, razlika među postajama javlja se pri određivanju tople i hladne polovice godine jer je na postaji PUN toplo razdoblje od svibnja do listopada, a na nizinskim gradskim postajama od travnja do rujna. Kad se promotre razlike u temperaturi između travnja i listopada, uočava se kako je na postaji PUN ta razlika veća nego na gradskim postajama, odnosno na gradskim postajama su prosječne temperature u travnju i listopadu podjednake.

Oborinski režim ima primarni maksimum u lipnju te sekundarne relativno podjednake maksimume u rujnu i studenom. Minimum oborine na postajama ZGG i ZGM javlja se u veljači, dok je na postajama PUN i ZGP u siječnju.



Slika 5.1.1 Godišnji hod temperatura zraka (lijevo) i količine oborine (desno) na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN) u razdoblju 1960. – 2019. Prema vrijednostima srednjih mjesečnih temperatura zraka godina je podijeljena na topliju (crveno) i hladniju (plavo) polovicu.

Prema kriterijima za određivanje klimatske klase navedenim u Tablici 4.1, u promatranom 60-godišnjem razdoblju, jedino postaja ZGG ima umjereno toplu klimu s vrućim ljetima *Cfa*, dok je na preostale tri postaje karakteristična umjereno topla klima s toplim ljetima *Cfb* (Tablica 5.1.1). Dakle, simbol koji čini razliku među postajama vezan je uz temperaturu najtoplijeg mjeseca koji je na postaji ZGG viši od praga od 22 °C.

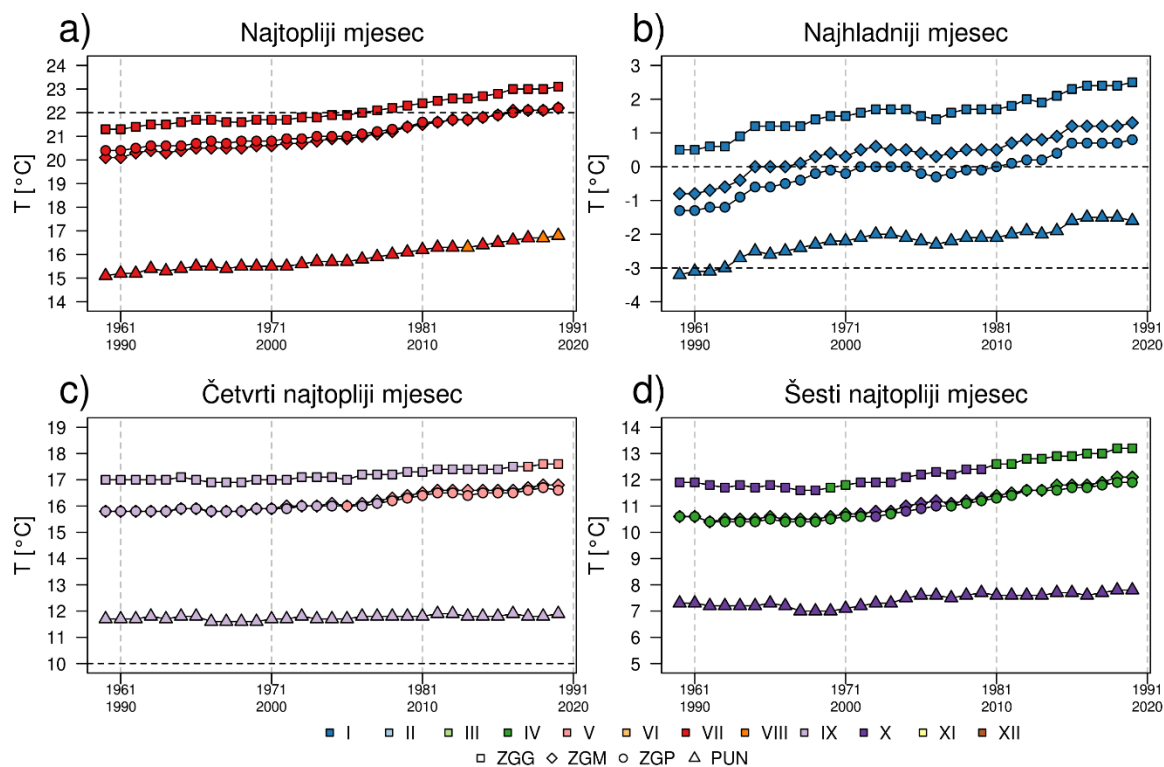
5.1.2 Promjene temperaturnog režima

Dodatno je istraženo jesu li se klimatske klase mijenjale u promatranom razdoblju i kakve su bile eventualne promjene parametara potrebnih za određivanje tih klasa. Temperature najtoplijeg, najhladnijeg, četvrtog i šestog najtoplijeg mjeseca su određene uz odgovarajući mjesec u kojem se one javljaju za klizna 30-godišnja razdoblja. Na sve tri nizinske postaje, srpanj je u svim kliznim razdobljima bio najtopliji mjesec, dok je na postaji PUN srpanj bio također najtopliji, ali je posljednjih godina kolovoz ponekad bio topliji od srpnja (Slika 5.1.2a). Na svim postajama uočen je uzlazni trend temperature najtoplijeg mjeseca. Najhladniji mjesec, u svim razdobljima i na svim postajama bio je siječanj koji također pokazuje pozitivan trend prosječne temperature (Slika 5.1.2b). Četvrti najtopliji mjesec na postaji PUN u svim razdobljima bio je rujan, dok je na postaji ZGG tek za posljednja tri 30-godišnja razdoblja to svibanj, a u ostalima rujan. Na preostale dvije postaje u prvoj polovici razdoblja četvrti najtopliji mjesec bio je rujan, dok je u drugoj polovici to uglavnom bio svibanj (Slika 5.1.2c). I za šesti najtopliji mjesec na nekim postajama dolazi do promjene, dok je na postaji PUN za sva klizna razdoblja to bio listopad (Slika 5.1.2d). Na postajama ZGM i ZGP travanj je u većini kliznih razdoblja šesti najtopliji mjesec, osim u nekoliko godina u sredini niza kada su listopadske temperature bile ipak više od travanjskih. Na postaji ZGG, u većini razdoblja listopad je bio topliji od travnja, osim pred kraj prve deкаде i u cijeloj posljednjoj dekadi kada su travanjske temperature ipak nešto više. U nastavku analize klase su određene tako da je za topliji dio godine odabrano razdoblje travanj – rujan.

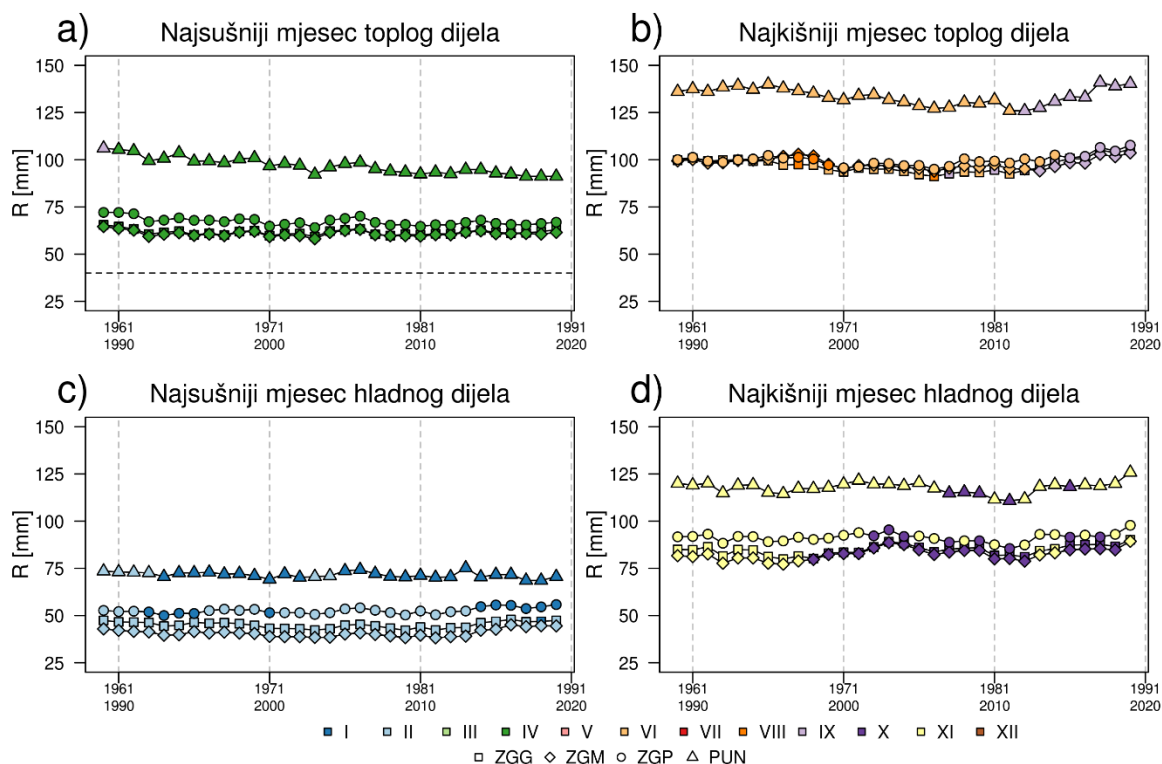
5.1.3 Promjene oborinskog režima

Najsušniji mjesec u toplijem dijelu godine je na svim postajama i u gotovo svim razdobljima bio travanj (Slika 5.1.3a). Jedino je na samom početku promatranog razdoblja rujanska količina oborine bila nešto niža na postaji PUN. Uočeno je kako postoji silazni trend travanjske količine oborine na svim postajama, a koji je najistaknutiji na postaji PUN. S druge strane, najkišniji mjesec u toplijem dijelu godine je uglavnom bio lipanj, ponekad kolovoz, dok je u posljednjoj dekadi to uglavnom bio rujan (Slika 5.1.3b). Najsušniji mjesec u hladnom dijelu godine je na postajama ZGM i ZGP uglavnom bila veljača, dok je na postaji ZGG i siječanj bio

povremeno najsušniji (Slika 5.1.3c). Na postaji PUN je pak siječanj bio uglavnom najsušniji, dok je veljača bila tek u par razdoblja sušnija. Najkišniji mjesec u hladnom dijelu godine na postajama PUN i ZGG je uglavnom bio studeni te u tek par razdoblja listopad (Slika 5.1.3d). S druge strane, na druge dvije postaje najkišniji je uglavnom bio listopad, dok je studeni bio kišniji samo u početku razdoblja i povremeno u zadnjoj dekadi.



Slika 5.1.2 Prosječne vrijednosti temperature zraka a) najtoplijeg, b) najhladnijeg, c) četvrtog najtoplijeg i d) šestog najtoplijeg mjeseca za klizna 30-godišnja razdoblja u razdoblju 1960. – 2019. Odgovarajući kalendarski mjesec označen je bojom simbola, dok oblik simbola odgovara pojedinoj postaji.



Slika 5.1.3 Prosječne vrijednosti količine oborine a) najsušnijeg i b) najkišnijeg mjeseca u toplijoj polovici godine te c) najsušnijeg i d) najkišnijeg mjeseca u hladnijoj polovici godine za klizna 30-godišnja razdoblja u razdoblju 1960. – 2019. Odgovarajući kalendarski mjesec označen je bojom simbola, dok oblik simbola odgovara pojedinoj postaji.

5.1.4 Promjene klimatskih klasa

S obzirom na kriterije u Tablici 5.1.1, za svako klizno 30-godišnje razdoblje određena je klimatska klasa. Prva promjena u klasi uočena je za postaju PUN gdje se još na početku niza iz snježno-šumske klime s toplim ljetima *Dfb*, klima promijenila u umjereno toplu klimu s toplim ljetima *Cfb* (Tablica 5.1.1). Iduća promjena uočena je za postaju ZGG oko sredine promatranog razdoblja kada je klima iz umjereno tople s toplim ljetima *Cfb* postala umjereno topla s vrućim ljetima *Cfa*. Na preostale dvije postaje promjena je detektirana u istom razdoblju, oko 10-ak godina nakon promjene na postaji ZGG, gdje je uočen isti prelazak iz *Cfb* u *Cfa* klimatsku klasu. Dakle, promjena u klimatskoj klasi na najvišoj postaji PUN posljedica je porasta temperature najhladnijeg mjeseca na vrijednosti iznad -3°C , dok je na nizinskim gradskim postajama temperatura najtoplijeg mjeseca porasla na vrijednosti iznad 22°C . Promjene klasa zbog promjena oborinskog režima nisu uočene u promatranom 60-godišnjem razdoblju.

Tablica 5.1.1 Köppen-Geigerove klimatske klase za u 60-godišnjem razdoblju 1960. – 2019. (KG60) te detektirane promjene klasa za klizna 30-godišnja razdoblja i odgovarajuće vremensko razdoblje promjene.

Postaja	KG60	Promjena klase	Razdoblje
ZGG	Cfa	Cfb → Cfa	1977. – 2006.
ZGM	Cfb	Cfb → Cfa	1987. – 2016.
ZGP	Cfb	Cfb → Cfa	1987. – 2016.
PUN	Cfb	Dfb → Cfb	1963. – 1992.

5.1.5 Diskusija

Prema izmjeranim klimatskim parametrima za razdoblje 1960. – 2019. pokazalo se kako je podjela godine na topliju i hladniju polovicu različita za nizinske i planinske postaje pa je tako na postaji PUN topliji dio godine od svibnja do listopada, dok je na ostalim postajama od travnja do rujna, što odgovara vegetacijskom razdoblju. Razlike u temperaturama travnja i listopada su jako male na nizinskim postajama za razliku od planinske, gdje je listopad ipak znatno topliji od travnja. U prosjeku je na svim postajama najtopliji mjesec bio srpanj, najhladniji siječanj, najkišniji lipanj, dok je siječanj na PUN i ZGP bio najsušniji, a veljača na druge dvije postaje. U promatranom 60-godišnjem razdoblju pokazalo se kako je na većini postaja prema Köppen-Geigerovim klimatskim klasama klima umjereno topla s toplim ljetima. Jedino je na urbanoj postaji ZGG umjereno topla s vrućim ljetima. Ipak, postoje vremenske varijacije i promjene spomenutih klimatskih parametara potrebnim za određivanje klimatskih klasa. Tako je npr. za klizna 30-godišnja razdoblja posljednjih godina na postaji PUN kolovoz bio topliji od srpnja. Slično se uočavaju promjene četvrtog i šestog najtoplijeg mjeseca na većini postaja. Osim promjena odgovarajućeg mjeseca, prisutan je i uzlazni trend za sve promatrane temperaturne parametre. Oborinski parametri također pokazuju određene vremenske promjene tako je npr. na svim postajama najkišniji mjesec toplog dijela godine tijekom većine razdoblja bio srpanj, dok je u posljednjoj dekadi to rujna.

U skladu sa spomenutim promjenama amplituda temperaturnih i oborinskih parametara, uočene su promjene klimatskih klasa na sve četiri postaje. Prva promjena zamijećena je na najvišoj postaji PUN u razdoblju 1963. – 1992. kada je klima iz snježno-šumskog tipa klime prešla u umjereno toplu klimu. Iduća promjena dogodila se 15-ak godina kasnije kada se klima na postaji ZGG promijenila iz umjereno tople s toplim ljetima u umjereno toplu s vrućim

ljetima. Ista tranzicija detektirana je i na drugim dvjema nizinskim postajama, ali 10-ak godina kasnije.

Dobiveni rezultati u skladu su s drugim istraživanjima koja ukazuju na horizontalni pomak klimatskih klasa prema sjeveru te vertikalni pomak u planinskim područjima (npr. Beck i sur. 2018, Ceglar i sur. 2019, Jylhä i sur. 2010). Promjene klimatskih klasa uočene su i u alpskom području (Rubel i sur. 2017) gdje je uočen i vertikalni pomak granice klimatskih klasa u projekcijskom razdoblju. Jylhä i sur. (2010) napominju kako se ovisno o korištenom klimatskom scenariju, može očekivati promjena prema toplijem i sušnijem tipu klimatske klase za čak polovinu do dvije trećine područja Europe.

S promjenama klimatskih klasa, mogu se očekivati i promjene ekosustava, a samim time i potencijalnim prenosiocima bolesti poput krpelja, mušica, komaraca itd. (npr. Rubel i sur. 2018, Brugger i Rubel 2013). Osim toga, promjene u klimatskim klasama mogu rezultirati i promjenama u poljoprivrednim kulturama (Omazić i sur. 2020). Također, mogu se očekivati i promjene početka i trajanja peludne sezone te vrste i koncentracije alergena budući da je pokazano kako koncentracije alergena ovise o meteorološkim karakteristikama (npr. Peternel i sur. 2004, Telišman Prtenjak i sur. 2012).

S obzirom da se pokazalo kako je na nizinskim gradskim postajama do promjena klimatskih klasa došlo zbog porasta temperature najtoplijeg mjeseca, a na PUN zbog porasta temperature najhladnijeg mjeseca, nastavak analize usmjeren je na istraživanje promjena ekstremnih minimalnih i maksimalnih temperatura zraka. Upravo takve situacije mogu biti opasne po ljudsko zdravlje i biosferu, ali i infrastrukturu.

5.2. Uočene vremenske promjene ekstremnih temperatura zraka

5.2.1 Apsolutni ekstremi temperature zraka

Prema izmjeranim podacima klimatskih parametara, godišnji hladni ekstremi najčešće su zabilježeni u siječnju, nešto manje češće u prosincu, rjeđe u veljači te rijetko u studenom i ožujku (Slika S2a u prilogu). S obzirom da na postaji PUN nedostaju podaci za rujnu 1991., minimalna vrijednost na istoj postaji korištena je u analizi ekstrema jer godišnji minimum nikada nije bio zabilježen u tom mjesecu. Na postaji ZGP nedostaju podaci u razdoblju rujna-prosinac 1991. pa je nakon detaljnije analize i minimalna vrijednost na postaji ZGP korištena budući da je detektirani minimum te godine bio u veljači, baš kao i na druge dvije nizinske gradske postaje.

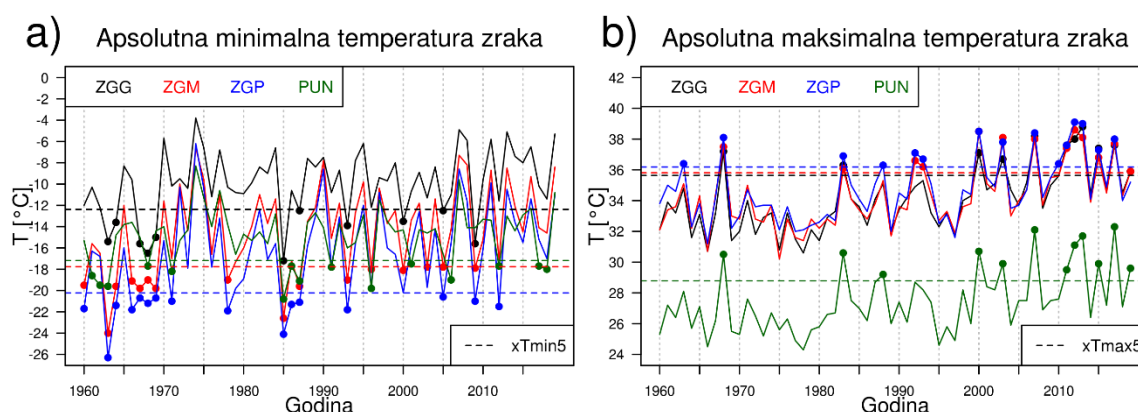
Najjači hladni ekstremi zabilježeni su tek u 38.3 % slučajeva na postaji PUN s najvišom nadmorskom visinom (Slika 5.2.1a). U ostalih 61.7 % slučajeva, T_{min} je bila niža na postajama ZGP i ZGM. Ovaj rezultat može biti objašnjen čestim zimskim temperaturnim inverzijama, na što ukazuju i sondažni podaci dostupni na internetskim stranicama Sveučilišta Wyoming (dostupni za Zagreb od 1999. godine). Najviše minimalne temperature zraka zabilježene su na postaji ZGG, što je djelomično i zbog utjecaja okoline. U samo 13 % slučajeva je T_{min} izmjerena na sve četiri postaje isti dan (uglavnom u nedavnom razdoblju od 2000. godine nadalje). Prema Biltenu Državnog hidrometeorološkog zavoda (dostupan od 1987. godine), ovi specifični događaji uglavnom su vezani uz anticiklonalne situacije praćene dotokom svježeg zraka iz sjevernih područja.

Godišnji topli ekstremi većinom su zabilježeni u srpnju i kolovozu, manje često u lipnju te vrlo rijetko u svibnju i rujnu (Slika S2b u prilogu). S obzirom da je maksimum u 1991. godini prema dostupnim podacima na postajama PUN i ZGP detektiran u srpnju, baš kao i na postajama ZGG i ZGM, i taj podatak korišten je u analizi ekstrema.

Najjači topli ekstremi također se uglavnom javljaju na postaji ZGP (64.2 % slučajeva) i manje često na postajama ZGM (20.0 %) i ZGG (15.8 %) (Slika 5.2.1b). Očekivano, najniže T_{max} javljaju se na postaji PUN. U 55 % slučajeva je T_{max} na sve četiri postaje izmjerena isti dan i takvi događaji su uglavnom vezani uz anticiklonalne situacije u kombinaciji s dotokom toplog zraka iz južnih krajeva.

Stacionarnim GEV-om primijenjenim na cijeli 60-godišnji niz određena je 5-godišnja povratna vrijednost (x_{T5}) za apsolutnu maksimalnu i minimalnu temperaturu zraka. Kao referentni prag odabrana je 5-godišnja povratna vrijednost budući da se u analiziranom

razdoblju u prosjeku može očekivati oko 12 premašaja tog praga. Isti prag korišten je i u Kioutsoukis i sur. (2010). Zatim su promatrani premašaji pojedinog temperaturnog parametra ispod/iznad spomenute $xT5$ vrijednosti kako bi se uočilo moguće grupiranje takvih događaja. Uočena je nejednolika učestalost premašaja odgovarajuće 5-godišnje povratne vrijednosti ($xT5$) i za T_{min} (Slika 5.2.1a) i T_{max} (Slika 5.2.1b). Vidi se kako je u prvom 30-godišnjem razdoblju premašaj odgovarajuće $xT5$ više (manje) učestao za T_{min} (T_{max}) u usporedbi s premašajima u posljednjih 30 godina. Slični rezultati dobiveni su i za Grčku (Kioutsoukis i sur. 2010), no za nešto drugačije i kraće vremensko razdoblje.



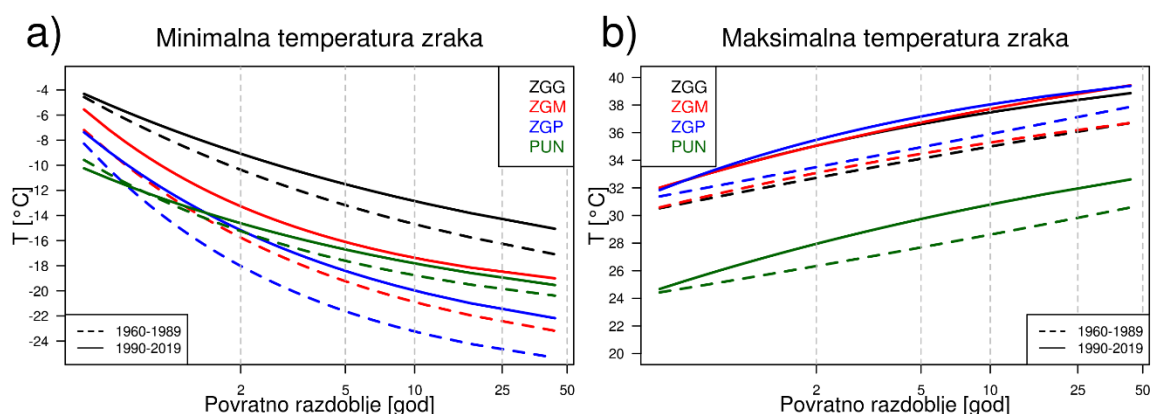
Slika 5.2.1 Godišnje apsolutne a) minimalne i b) maksimalne temperature zraka na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN) u razdoblju 1960. – 2019. Odgovarajuće 5-godišnje povratne vrijednosti označene su isprekidanom linijom, dok su premašaji tog praga označeni točkama.

Nejednolika učestalost premašaja $xT5$ ukazuje na postojanje vremenskih promjena ekstremnih temperatura. Kako bi se detaljnije analizirale vremenske promjene u T_{min} i T_{max} , u prvom je koraku za svako 30-godišnje podrazdoblje zasebno prilagođena stacionarna razdioba GEV za svaki parametar i za svaku od postaja (Slika 5.2.2a i 5.2.2b). Za sve četiri postaje i oba temperaturna parametra detektiran je pomak krivulja povratnih vrijednosti ka višim (toplijim) vrijednostima. Ovakav rezultat ukazuje na porast (smanjenje) učestalosti toplih (hladnih) ekstrema u posljednjem 30-godišnjem razdoblju. Promjene povratnih vrijednosti posljedica su promjena parametara lokacije i skale razdiobe GEV (Tablica 5.2.1).

Za odabrana povratna razdoblja od 2, 5, 10, 25 i 50 godina (Slika 5.2.2a), razlika očekivanih T_{min} između dva podrazdoblja je manja za postaje ZGG i PUN (0.9 – 2.0 °C) nego za ZGP i ZGM (2.6 – 4.2 °C). Ovakva razlika rezultat je promjena parametra lokacije, dok su promjene parametra skale uglavnom usporedive među postajama (osim ZGP gdje je porast u

parametru skale nešto veći). Najveći porast parametra skale bilježi postaja ZGP (2.6 °C), dok je najmanji na PUN (0.5 °C).

Razlike očekivanih T_{max} između dva podrazdoblja su podjednake na svim postajama (1.4 – 2.6 °C) budući da su razlike promjena parametara lokacije i skale među postajama male (Tablica 5.2.1). Ipak, najjači porast parametra lokacije (2.2 °C) javlja se na postaji ZGG, a najmanji (1.4 °C) na postaji PUN. Također, porast parametra skale (dulji repovi u recentnom razdoblju) rezultirao je većom zakrivljenošću krivulja.



Slika 5.2.2 Krivulje povratnih vrijednosti a) minimalne i b) maksimalne temperatura zraka procijenjene korištenjem razdiobe GEV za nepreklapajuća razdoblja 1960. – 1989. i 1990. – 2019. na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN).

Još jedan način analize vremenskih promjena ekstremnih vrijednosti je primjena nestacionarnog modela GEV. Tri zasebna nestacionarna modela su primijenjena na podatke: GEV.Loc (parametar lokacije linearno ovisan o vremenu), GEV.Sc (parametar skale linearno ovisan o vremenu) i GEV.LocSc (simultana linearna ovisnost parametra lokacije i skale o vremenu). Svaki od modela uspoređen je sa stacionarnim modelom GEV i značajnost uključivanja linearno ovisnih parametara testirana je testom LR na nivou značajnosti 5 %. Rezultati testa LR pokazuju kako i za T_{min} i T_{max} korištenje nestacionarnog GEV-a bolje opisuje podatke u usporedbi sa stacionarnim GEV-om (Tablica 5.2.2). Izuzetak je postaja PUN gdje za T_{min} stacionarni GEV dovoljno dobro opisuje podatke, odnosno uvođenje dodatnih parametara ne poboljšava značajno prilagodbu modela podacima. Uključivanje linearno ovisnog parametra skale pokazao se značajnim jedino za T_{min} na postaji ZGP, koja je ujedno imala i najveću promjenu tog parametra između dva nepreklapajuća 30-godišnja razdoblja (Tablica 5.2.1). Iako su vrijednosti D statistike za GEV.LocSc nešto veće u odnosu na GEV.Loc, odgovarajuće kritične vrijednosti ovdje su, u skladu s većim brojem stupnjeva

slobode, veće. Tako se uključivanje simultane ovisnosti parametra lokacije i skale pokazalo značajnim za T_{min} jedino na postajama ZGP i ZGM, dok je ono značajno za T_{max} na svim postajama. Dakle, možemo zaključiti kako nestacionarni GEV s linearno ovisnim parametrom lokacije zadovoljavajuće opisuje nizove ekstremnih temperatura zraka s evidentnim vremenskim porastom. Ovi rezultati su u skladu s onima koje navode Kioutsoukis i sur. (2010) koji komentiraju kako su promjene u temperaturnim ekstremima u Grčkoj najosjetljivije na promjene u parametru lokacije.

Tablica 5.2.1 Procijenjene parametri razdiobe GEV: lokacija (X_0), skala (alfa) i oblik (k) za minimalnu (T_{min}) i maksimalnu (T_{max}) temperaturu zraka u početnom 1960. – 1989. (P6089) i posljednjem 1990. – 2019. (P9019) 30-godišnjem razdoblju i njihova razlika (Δ) na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN).

Postaja	Tmin			Tmax		
	P6089	P9019	Δ	P6089	P9019	Δ
X_0						
ZGG	-9.3	-8.2	1.1	32.3	34.5	2.2
ZGM	-14.3	-12.0	2.3	32.6	34.5	1.9
ZGP	-16.4	-13.8	2.6	33.0	34.8	1.8
PUN	-14.3	-13.8	0.5	25.9	27.3	1.4
α						
ZGG	-3.1	-2.6	0.5	1.3	1.7	0.4
ZGM	-4.2	-3.7	0.5	1.4	1.7	0.3
ZGP	-4.6	-3.9	0.7	1.3	1.9	0.6
PUN	-2.8	-2.3	0.5	1.1	1.8	0.7
k						
ZGG	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2
ZGM	0.3	0.4	0.1	0.1	0.1	0.0
ZGP	0.4	0.3	-0.1	0.0	0.3	0.3
PUN	0.3	0.2	-0.1	0.0	0.1	0.1

Vremenski ovisan parametar lokacije nestacionarnog GEV-a relativno je u skladu s promjenama parametra lokacije stacionarnog GEV-a za dva podrazdoblja (Tablica 5.2.3). Za postaje ZGP i ZGM, promjena parametra lokacije veća je za T_{min} nego za T_{max} , dok je za druge dvije postaje obrnuto. Sličan odnos uočen je i kod linearnih članova lokacije. Linearni

parametar lokacije najveći je za T_{min} na postaji ZGM, a za T_{max} na ZGG. Najmanje vrijednosti za oba parametra su na postaji PUN.

Tablica 5.2.2 Rezultati test omjera vjerodostojnosti između nestacionarnog modela GEV s linearnim vremenski ovisnim parametrom lokacije (GEV.Loc), skale (GEV.Sc) i oboje (GEV.LocSc) u usporedbi sa stacionarnim GEV-om (GEV) za minimalnu (T_{min}) i maksimalnu (T_{max}) temperaturu zraka na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN). Statistički značajne vrijednosti na nivou 5 % su podebljane.

Postaja	GEV.Loc vs GEV	GEV.Sc vs GEV	GEV.LocSc vs GEV
T_{min}			
ZGG	4.8	0.7	5.4
GM	9.2	3.7	10.4
ZGP	7.2	4.4	9.2
PUN	1.2	0.5	1.4
T_{max}			
ZGG	29.6	3.8	29.6
ZGM	19.7	2.4	19.7
ZGP	12.7	1.9	13.1
PUN	12.7	3.1	15.3

Tablica 5.2.3 Vrijednosti linearnog vremenski ovisnog parametra lokacije ($^{\circ}\text{C} / 10 \text{ god}$) za minimalnu (T_{min}) i maksimalnu (T_{max}) temperaturu zraka na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN).

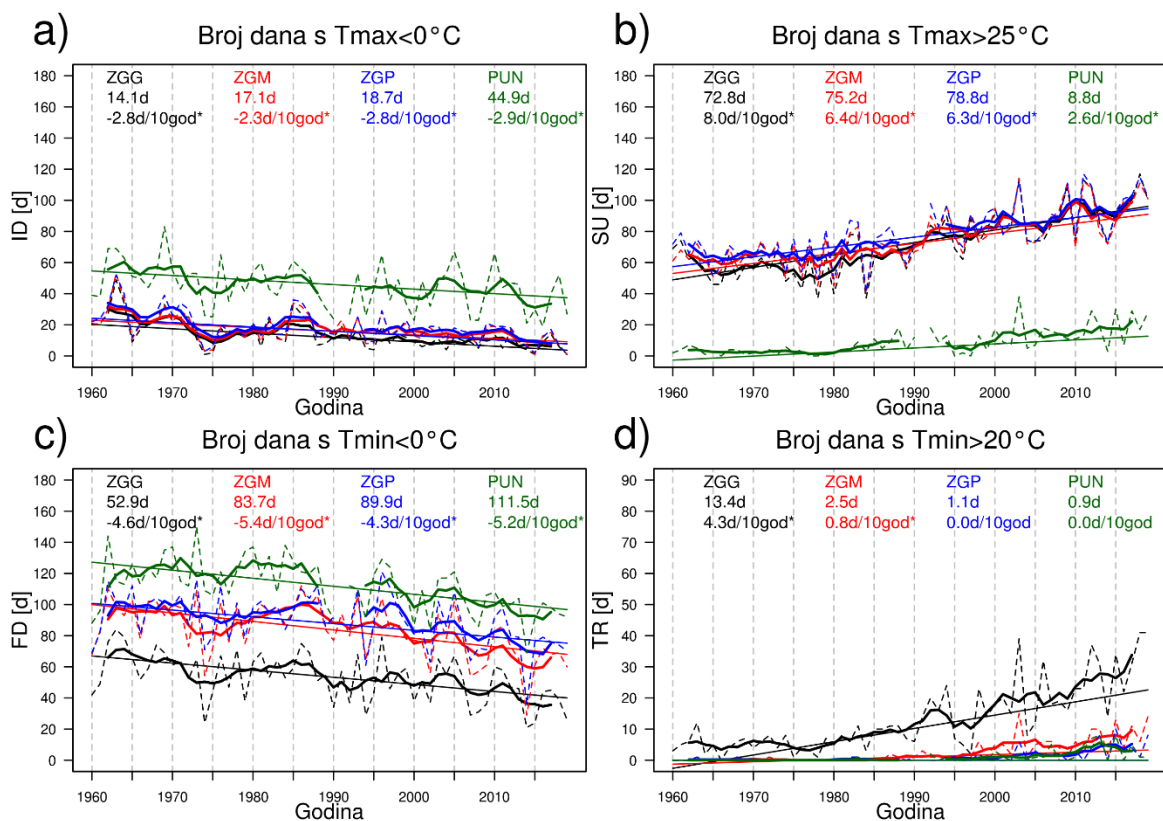
Postaja	T_{min}	T_{max}
ZGG	0.5	0.7
ZGM	0.8	0.6
ZGP	0.6	0.5
PUN	0.2	0.4

5.2.2 Indeksi temperaturnih ekstrema definirani fiksnim pragom

Prema podacima s meteoroloških postaja, ledenih je dana očekivano najviše bilo na postaji PUN gdje se takvi dani bilježe od studenog do ožujka, iako je bilo i rijetkih slučajeva kada je takav dan zabilježen u travnju i listopadu (Slika S3a u prilogu). Na nizinskim postajama ledeni

se dani javljaju u zimskim mjesecima, te rijetko i u studenom i ožujku. U prosjeku se najviše ledenih dana na svim postajama bilježi u siječnju. Mrzli dani se na nizinskim postajama javljaju u razdoblju od listopada do travnja, dok se na PUN rijetko mogu javiti i u svibnju (Slika S3c). Najviše takvih dana bilježi se u siječnju na svim postajama. Ljetni dani javljaju se u toplijem dijelu godine, pri čemu na nizinskim postajama u razdoblju od svibnja do rujna, te rijetko i u travnju i listopadu (Slika S3b). Na postaji PUN, ljetni dani su očekivano zabilježeni u ljetnim mjesecima. Najviše ljetnih dana na svim je postajama u srpnju. Tropske noći uglavnom su karakteristika obalnog dijela Hrvatske. Od ovdje promatranih postaja, ZGG bilježi najviše takvih događaja, dok su na ostale te tri postaje takve noći rijetke (Slika S3d). Najviše takvih događaja zabilježeno je na nizinskim postajama u srpnju, a na PUN u kolovožu.

Godišnji nizovi temperaturnih indeksa ukazuju na postojanje vremenskih promjena (Slika 5.2.3). Općenito se na svim postajama uočava značajan porast toplih i smanjenje hladnih indeksa. Amplitude indeksa definiranih preko T_{max} podjednake su na nizinskim gradskim postajama, dok su na postaji PUN značajno različiti (Slika 5.2.3a i b). Slično, indeksi definirani pomoću T_{min} razlikuju se na postajama ZGG i PUN u odnosu na druge dvije nizinske postaje (Slika 5.2.3c i d). Najveće smanjenje broja ledenih dana (-2.9 dana / 10 god) bilježi upravo postaja PUN gdje je i najviše takvih dana, dok je trend najmanji na postaji ZGM (-2.3 dana/10 god). Kada se promotre iznosi relativnog trenda (u odnosu na prosječan broj dana), tada je trend najjači na postaji ZGG (-19.9 %), a najslabiji na PUN (-6.5 %). S druge strane, smanjenje broja mrzlih dana najjače je na postaji ZGM (-5.4 dana / 10 god), dok je ono najmanje na postaji ZGP (-4.3 dana / 10god). U smislu relativnih vrijednosti, trend je najjači na postaji ZGG (-8.6 %), a najslabiji na postaji PUN (-4.6 %). Najveći porast broja ljetnih dana bilježi postaja ZGG (8.0 dana / 10 god), dok je porast najmanji na postaji PUN (2.6 dana / 10 god). U odnosu na odgovarajuće prosječne vrijednosti, porast broja ljetnih dana najjači je postaji PUN (29.6 %), a najslabiji na ZGP (8.0 %). Porast broja tropskih noći najveći je na postaji ZGG (4.3 dana / 10 god), dok se na ostalim postajama takve noći javljaju tek u novijem razdoblju.



Slika 5.2.3 Godišnji broj a) ledenih dana (ID), b) ljetnih dana (SU), c) mrzlih dana (FD) i d) tropskih noći (TN) na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN) u razdoblju 1960. – 2019. Podebljana linija odgovara 5-godišnjoj kliznoj prosječnoj vrijednosti, dok su prosječne vrijednosti i vrijednosti linearnog trenda dane u svakom od panela pri čemu je značajan trend na nivou 5 % označen zvjezdicom (*).

Analiza trenda napravljena je i za dva 30-godišnja nepreklapajuća razdoblja. Uočava se nešto jače smanjenje broja ledenih dana u prvom pod-razdoblju i mnogo jači porast ljetnih dana i tropskih noći u recentnom razdoblju (Tablica 5.2.4). Jedino su za broj mrzlih dana uočene razlike predznaka trenda za dva podrazdoblja: od pozitivnog (PUN, ZGM) ili bez trenda (ZGP) do jakog padajućeg trenda u posljednjem razdoblju na svim postajama. Za gotovo sve indekse, osim ledene dane, je trend posljednjih 30 godina značajan, za razliku od trenda u prvom 30-godišnjem razdoblju.

Kako bi se bolje razumjele detektirane razlike, za svaku postaju i pojedini temperaturni prag, procijenjen je odgovarajući percentil. Tako maksimalnoj temperaturi od 0°C odgovara 12. percentil na postaji PUN, dok je na nizinskim gradskim postajama to 5. percentil. Maksimalna temperatura od 25°C na gradskim postajama odgovara 80. percentilu, a na PUN

98. percentilu. Minimalna temperatura od 0 °C odgovara percentilima u rasponu od 15. (ZGG) do 31. (PUN), dok minimalna temperatura od 20 °C za sve postaje predstavlja percentil veći od 96. Dakle, pojedini pragovi korišteni pri definiranju indeksa na nekim postajama ne predstavljaju repove razdioba, odnosno ekstremne situacije. Kako bi se analizirale ekstremne situacije, definirani su i analizirani temperaturni indeksi na temelju percentilnih pragova.

Tablica 5.2.4 Dekadni trend (dana / 10 god) broja ledenih (ID), ljetnih (SU), mrzlih dana (FD) i tropskih noći (TR) u početnom 1960. – 1989. (P6089) i završnom 1990. – 2019. (P9019) 30-godišnjem razdoblju na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN). Statistički značajne vrijednosti na nivou 5 % su podebljane.

Postaja	ID		SU		FD		TR	
	P6089	P9019	P6089	P9019	P6089	P9019	P6089	P9019
ZGG	-4.1	-2.5	0.4	9.0	-2.2	-5.3	1.8	8.2
ZGM	-3.8	-3.3	1.6	8.1	0.6	-9.0	0.0	2.5
ZGP	-4.1	-3.0	1.3	6.6	0.0	-8.1	0.0	1.2
PUN	-2.9	-1.3	1.0	5.1	2.9	-6.9	0.0	0.4

5.2.3 Indeksi temperaturnih ekstrema definirani percentilnim pragom

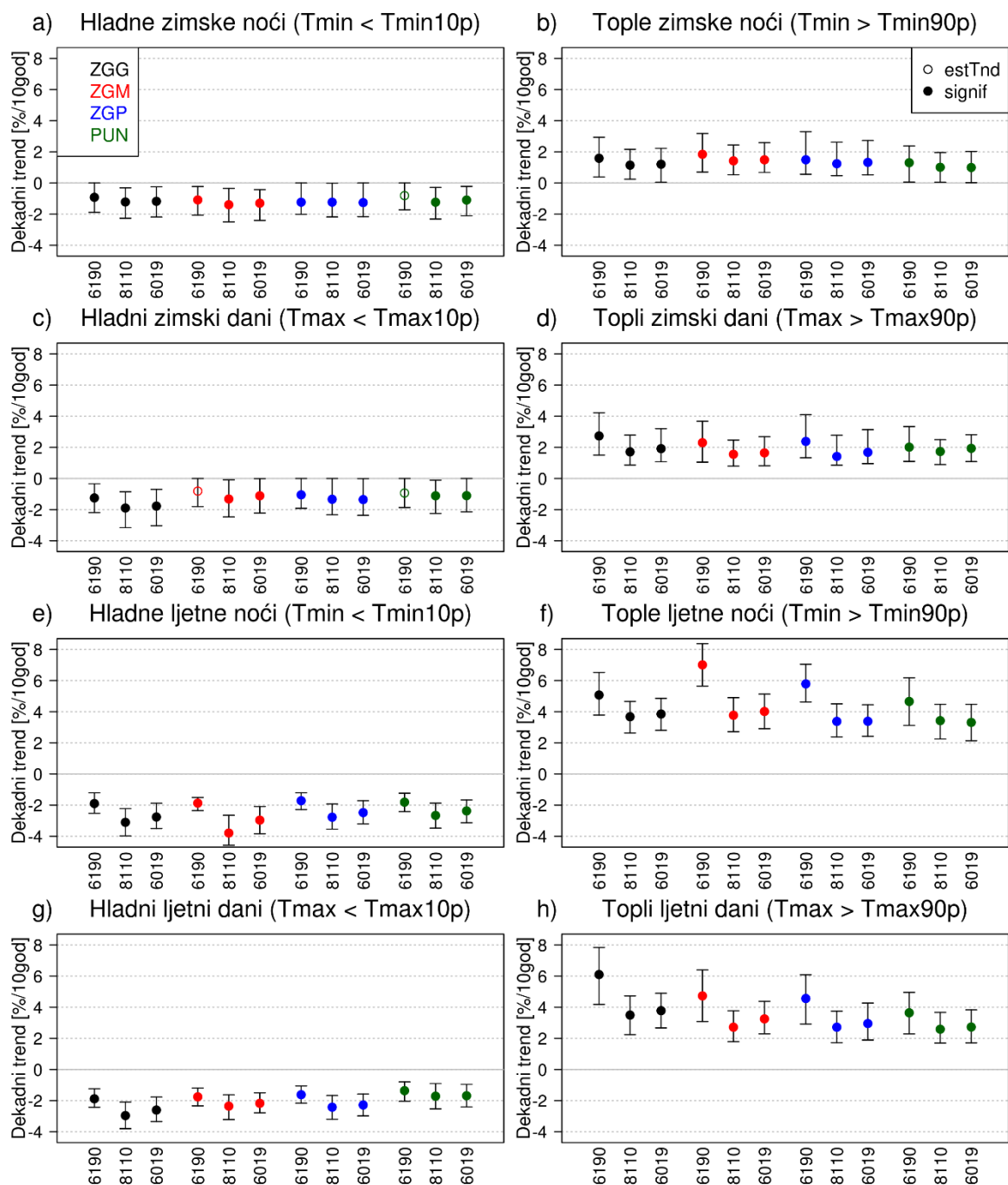
U nastavku je analiziran utjecaj odabira referentnog razdoblja za procjenu percentilnih pragova na rezultate trendova. Kao referentna razdoblja korištena su razdoblja: standardno (1961. – 1990.), recentno (1981. – 2010.) i cijelo razdoblje (1960. – 2019.). Analiza toplih i hladnih dana i noći napravljena je samo na zimsku i ljetnu sezonu. Godišnji nizovi promatranih indeksa za pojedino referentno razdoblje prikazani su na Slikama S4-S6 u prilogu.

Neovisno o odabiru referentnog razdoblja za procjenu percentilnih pragova, značajan uzlazni (silazni) trend toplih (hladnih) indeksa zamijećen je na svim postajama (Slika 5.2.4). Uočava se kako su ljetne vrijednosti trenda veće od odgovarajućih zimskih, pogotovo za tople indekse. Kada se kao referentno razdoblje odabere standardno (hladnije) 1961. – 1990., i 10. i 90. percentil maksimalnih i minimalnih temperatura zraka su najniži među tri promatrana referentna razdoblja. Kao rezultat, porast (smanjenje) toplih (hladnih) indeksa tada je najjači. Ipak, budući da je ovo razdoblje na početku analiziranog niza kada je u prosjeku 9 pojedinih broja dana ili noći po sezoni, magnituda padajućeg trenda ograničena je malom učestalošću ili čak izostankom takvih dana/noći u recentnom (toplijem) razdoblju. Recentno (toplije) razdoblje 1981. – 2010., nalazi se približno u sredini promatranog niza podataka pa pojava toplih i hladnih

indeksa može biti očekivana prije i poslije tog razdoblja. Ovdje su 10. i 90. percentil viši u usporedbi s onim za 1961. – 1990. razdoblje, pa je posljedično tada i slabiji porast toplih, a smanjenje hladnih indeksa je jače.

Kako bi se obuhvatilo i hladnije i toplije razdoblje, za procjenu percentilnih pragova odabrano je i kompletno razdoblje analize 1960. – 2019. Rezultati su vrlo slični onima za recentno razdoblje 1981. – 2010. uz nešto jači (slabiji) porast (smanjenje) toplih (hladnih) indeksa (Slika 5.2.4).

Neovisno o odabiru referentnog razdoblja za procjenu percentila, analiza trenda za dva nepreklapajuća 30-godišnja razdoblja pokazala je najveće razlike među razdobljima za tople ljetne indekse pri čemu je u posljednjem razdoblju uočen mnogo jači porast (nije prikazano). Nešto jače promjene hladnih ljetnih indeksa također su uočene u posljednjem razdoblju neovisno o odabiru referentnog niza. Za zimske indekse, razlike između dva podrazdoblja nisu toliko izražene kao za ljetne.



Slika 5.2.4 Dekadni trend (% / 10 god) broja a) hladnih zimskih noći, b) toplih zimskih noći, c) hladnih zimskih dana, d) toplih zimskih dana, e) hladnih ljetnih noći, b) toplih ljetnih noći, c) hladnih ljetnih dana, d) toplih ljetnih dana na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN) u razdoblju 1960. – 2019. ovisno o odabiru referentnog razdoblja: 1961. – 1990. (6190), 1981. – 2010. (8110) i 1960. – 2019. (6019). Statistički značajan trend na nivou pouzdanosti 5 % prikazan je popunjenim točkama.

5.2.4 Diskusija

Najjači topli i hladni ekstremi na postaji ZGP (te približne vrijednosti na postaji ZGM) mogu, barem djelomično, biti posljedica manje zaklonjenosti postaje okolnim objektima. Dok su postaje ZGP i ZGM smještene na livadama bez većih prepreka u okolini, postaja ZGG nalazi se okružena zidovima zgrade dok je postaja PUN okružena šumom. Analiza ekstrema stacionarnom općom razdiobom ekstrema (GEV) za dva nepreklapajuća 30-godišnja razdoblja pokazala je kako se pojedini topli (hladni) ekstremi mogu češće (rjeđe) očekivati u recentnom razdoblju u odnosu na prethodno. Navedeni rezultati ukazuju kako je pri analizi ekstremnih temperatura bitno uključiti i vremenske promjene korištenjem nestacionarnog pristupa. Uključivanje vremenski ovisnog parametra lokacije značajno doprinosi boljoj prilagodbi nestacionarnog modela GEV u usporedbi sa stacionarnim te se pokazalo kako je to poboljšanje više izraženo za T_{max} nego za T_{min} . Unkašević i sur. (2005) komentiraju kako je porast prosječnih ljetnih temperatura u Beogradu povezan s povećanom učestalošću ekstremnih maksimalnih temperatura. Neovisno o odabiru metode i načinu analize, najmanji porast ekstremnih temperatura detektiran je za postaju PUN što može biti posljedica različitih faktora poput nadmorske visine, okolne šume itd.

Općenito je uočen značajan porast učestalosti pojavljivanja toplih indeksa te silazni trend hladnih indeksa. Slično je uočeno i za okolne zemlje: Mađarsku (Bartholy i Pongratz 2007), Austriju (Nemec i sur. 2013) i Srbiju (Unkašević i Tošić 2013).

Uočene su i razlike trendova indeksa temperaturnih ekstrema definiranih premašajima fiksnih pragova. Kod interpretacije ovih rezultata treba biti oprezan jer pragovi spomenutih indeksa ne odgovaraju istim percentilnim vrijednostima na svim postajama. Za jednak porast temperature, odnosno pomak razdiobe udesno, promjene broja dana su različite za različite percentilne pragove.

Analiza trendova percentilnih indeksa pokazala se ovisnom o odabiru referentnog razdoblja u smislu iznosa trenda, dok je neovisno o odabranom razdoblju detektiran značajan porast toplih i smanjenje hladnih indeksa u obje sezone. Korištenje standardnog (hladnijeg) razdoblja 1961. – 1990. rezultira jačim (slabijim) porastom (smanjenjem) toplih (hladnih) indeksa i obrnuto kada se recentno (koje je i toplije) razdoblje 1981. – 2010. koristi kao referentno. Generalno su ljetni trendovi jači od odgovarajućih zimskih, pogotovo za tople indekse zbog izraženog porasta u posljednjih 30 godina. Slične rezultate navode i drugi autori (npr. Sulikowska i Wypych 2020, Yosef i sur. 2020). Dobivena veća osjetljivost ljetnih

trendova na odabir referentnog razdoblja u skladu je s rezultatima koje su dobili Yosef i sur. (2020).

Dobiveni rezultati ukazuju na povećan (smanjen) toplinski rizik za infrastrukturu i zdravlje ljudi u ljetnim (zimskim) mjesecima. Budući da su hladni indeksi vezani uz meteorološke uvjete koji pogoduju stvaranju poledice i mraza, smanjenje njihove učestalosti može imati s jedne strane pozitivne učinke na promet, dok s druge strane utjecaj na vegetaciju u urbanom području može biti pozitivan i negativan. Ukoliko zbog viših temperatura nastupi ranija fenofaza te uslijedi mraz, takav događaj potencijalno može uzrokovati oštećenja dijelova biljke. Porast toplih indeksa može imati negativne posljedice na biosferu i zdravlje ljudi. Također, prikazani rezultati ukazuju na mogućnost daljnjeg istraživanja s aspekta racionalizacije potrošnje energije za grijanje i hlađenje. Budući da je porast ljetnih toplih indeksa znatno izraženiji u odnosu na smanjenje zimskih hladnih indeksa, kao i jači trend apsolutne maksimalne temperature u odnosu na minimalnu, može se očekivati da bi potreba energije za hlađenje ljeti mogla nadmašiti uštedu energije potrebne za grijanje zimi.

S obzirom da su prikazani rezultati ukazali na izražen jači trend toplih ljetnih indeksa, u nastavku istraživanja fokus je na modeliranju ljetnog urbanog toplinskog opterećenja korištenjem urbanog klimatskog modela.

5.3. Utjecaj Sjeverno-atlantske oscilacije i sušnih uvjeta na toplinsko opterećenje grada

5.3.1 Veza indeksa NAO i klimatskih parametara na postaji Zagreb-Maksimir

U prvom dijelu, koristeći podatke o indeksu NAO-a (koji opisuje polaritet i jačinu NAO-a) i prosječne vrijednosti količine oborine, prosječne maksimalne i minimalne temperature zraka na postaji Zagreb-Maksimir u razdoblju 1949. – 2019. ispitana je povezanost NAO-a i odabranih parametara. Izračunati su koeficijenti korelacije između indeksa koji opisuje zimski NAO i zimskih (DJF), proljetnih (MAM), kasno zimskih-proljetnih (JFMAM) i ljetnih (JJA) oborinskih i temperaturnih parametara kako bi se detektirao eventualni odgođeni (indirektni) utjecaj zimskog NAO-a na nadolazeće ljeto. Za ljetni NAO, korelacija je izračunata samo u odnosu na ljetne temperature i količinu oborine.

U usporedbi s ljetnom sezonom, korelacija dobivena za zimsku sezonu je veća (Tablica 5.3.1). Zimi, korelacija sa zimskim NAO-om je najjača i značajna (na nivou 1 %) za količinu oborine (-0.40) i prosječnu maksimalnu temperaturu zraka (0.40). Istodobno, jako slaba korelacija dobivena je za prosječnu minimalnu temperaturu (0.17). Kasnije u proljeće, zimski NAO je i dalje značajno koreliran s maksimalnom temperaturom zraka, no s nešto manjim koeficijentom nego zimi. Paralelno, u proljeće raste korelacija između zimskog NAO-a i minimalne temperature zraka (0.27) koja tada postaje i statistički značajna (na nivou 5 %), dok zimski NAO više nije značajno koreliran s količinom oborine. Kada se kasna zima i proljeće promatraju zajedno kao jedna sezona, sva tri parametra su značajno korelirana sa zimskim NAO-om. Dok temperaturni parametri bilježe slab porast korelacije u odnosu na zimsku sezonu, to nije slučaj za količinu oborine. Pozitivna i značajna korelacija zimskog NAO-a i ljetnih maksimalnih temperatura zraka sugerira odgođen utjecaj zimskog NAO-a na ljetne temperature. Suprotna korelacija je dobivena između ljetnog NAO-a i klimatskih parametara, odnosno negativna je korelacija dobivena za temperaturne parametre (ali je značajna jedino za maksimalnu temperaturu zraka), a pozitivna za oborinu.

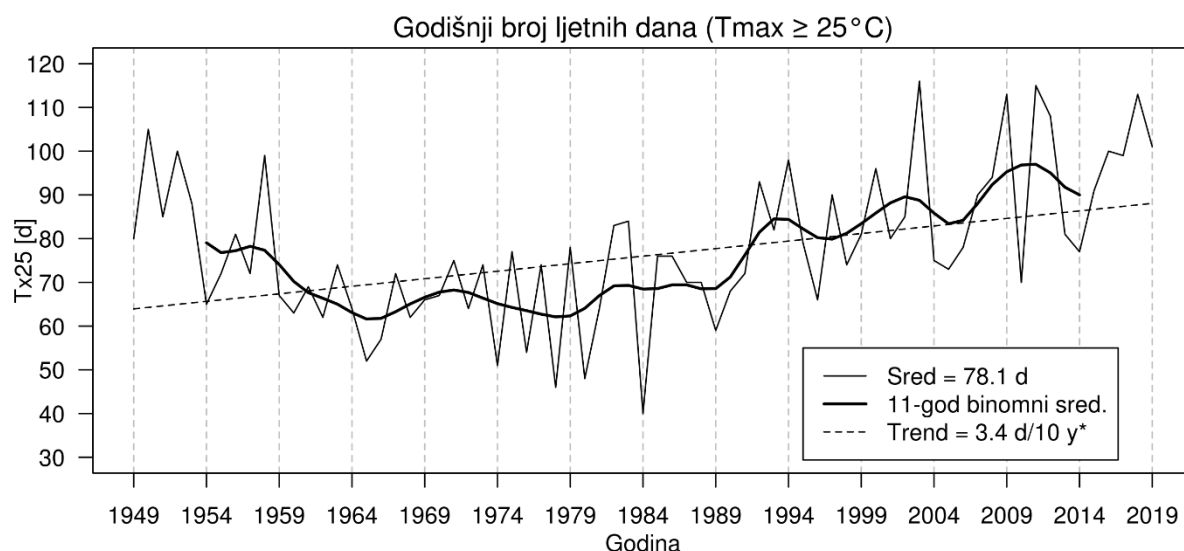
Budući da NAO utječe paralelno i na temperaturu i na oborinu, za daljnju je analizu odabran indeks SPEI. Prema Tablici 5.3.1, značajna korelacija između SPEI-a i zimskog te ljetnog NAO-a je dobivena za sve promatrane sezone. Korelacija zimskog NAO-a i zimskog SPEI-a je statistički značajna i negativna uz koeficijent usporediv s onim za količinu oborine i prosječnu maksimalnu temperaturu zraka. Statistički značajna negativna korelacija nastavila se i u proljeće uglavnom zbog utjecaja zimskog NAO-a na temperaturu, pa je korelacija bila

značajna i u sezoni JFMAM. Ljeti, koreliranost SPEI-a i obje faze NAO-a je statistički značajna pri čemu je pozitivna za zimski, a negativna za ljetni NAO.

Tablica 5.3.1 Koeficijent korelacije između zimskog (wNAO) i ljetnog (sNAO) NAO indeksa te prosječne maksimalne (mTmax) i minimalne (mTmin) temperature zraka, količine oborine (Prec) i standardiziranog oborinskog evapotranspiracijskog indeksa (SPEI) na postaji Zagreb-Maksimir u zimu (DJF), proljeće (MAM), kasnu zimu-proljeće (JFMAM) i ljeto (JJA) u razdoblju 1949. – 2019. Statistički značajne vrijednosti na nivou značajnosti 1 % (5 %) su podebljane (ukošene).

	wNAO				sNAO
	DJF	MAM	JFMAM	JJA	JJA
mTmax	0.40	0.37	0.46	0.24	-0.33
mTmin	0.17	0.27	0.27	0.20	-0.18
Prec	-0.40	-0.18	-0.28	-0.17	0.21
SPEI	-0.40	-0.26	-0.35	-0.25	0.24

Kako se pokazalo da je prosječna maksimalna temperatura zraka značajno korelirana i sa zimskim i s ljetnim NAO-om, istražena je povezanost broja ljetnih dana Tx25 i NAO-a. Prema Slici 5.3.1, niz Tx25 obilježava značajan rastući linearni trend (oko 3.4 dana u 10 god) te dugoperiodične i kratkoperiodične oscilacije. Uočava se kako je u godinama s jakim toplinskim valovima u Europi (npr. 2003., 2009., 2011., 2012.), registriran i veći broj ljetnih dana. Korelacija indeksa NAO-a i Tx25 pokazala se statistički značajnom jedino za ljetni NAO kada koeficijent poprima vrijednost -0.32 (Tablica 5.3.2). Iako je korelacija sa zimskim NAO-om slaba (0.19), njegovo uključivanje u višestruku linearnu regresiju zajedno s ljetnim NAO-om je rezultiralo većim (i statistički značajnim) koeficijentom korelacije (0.39) nego kad je uvažen samo ljetni NAO. Korelacije Tx25 i SPEI-a su jače nego one s kombinacijama NAO-a. Značajna negativna korelacija dobivena je između Tx25 i oba SPEI parametra – kasno zimskog-proljetnog (-0.37) i ljetnog (-0.48) SPEI-a. Ponovo, uključivanje oba parametra SPEI-a u višestruku linearnu regresiju rezultiralo je jačanjem veze i većim koeficijentom korelacije s Tx25 (0.53).



Slika 5.3.1 Godišnji broj ljetnih dana Tx25 (puna linija), 11-godišnji binomni klizni srednjak (podebljana linija) i linearni trend (isprekidana linija) prema podacima s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1949. – 2019.

Tablica 5.3.2 Jednadžba linearne regresije (JLR) i koeficijent korelacije (R) godišnjeg broja ljetnih dana na postaji Zagreb-Maksimir i: prethodnih - x_p (zimski NAO i kasno zimski-proljetni SPEI), trenutnih - x_c (ljetni NAO i ljetni SPEI) te združenih prethodnih i trenutnih NAO i SPEI uvjeta u razdoblju 1949. – 2019. Statistički značajne R vrijednosti na nivou značajnosti 1 % (5 %) su podebljane (ukošene).

	NAO		SPEI	
	JLR	R	JLR	R
Prethodni	$78.0 + 3.0x_p$	0.19	$77.7 - 6.0x_p$	-0.37
Trenutni	$78.7 - 5.1x_c$	-0.32	$76.0 - 6.4x_c$	-0.48
Oba	$78.7 + 3.5x_p - 5.5x_c$	0.39	$76.1 - 3.8x_p - 5.4x_c$	0.53

Nadalje, rezultati ukazuju da je rastući trend prosječne minimalne i maksimalne temperature zraka značajan u svim promatranim sezonama i najjači u ljeto (Tablica 5.3.3). Značajnost trendova količine oborine i indeksa SPEI-a nije mogla biti potvrđena.

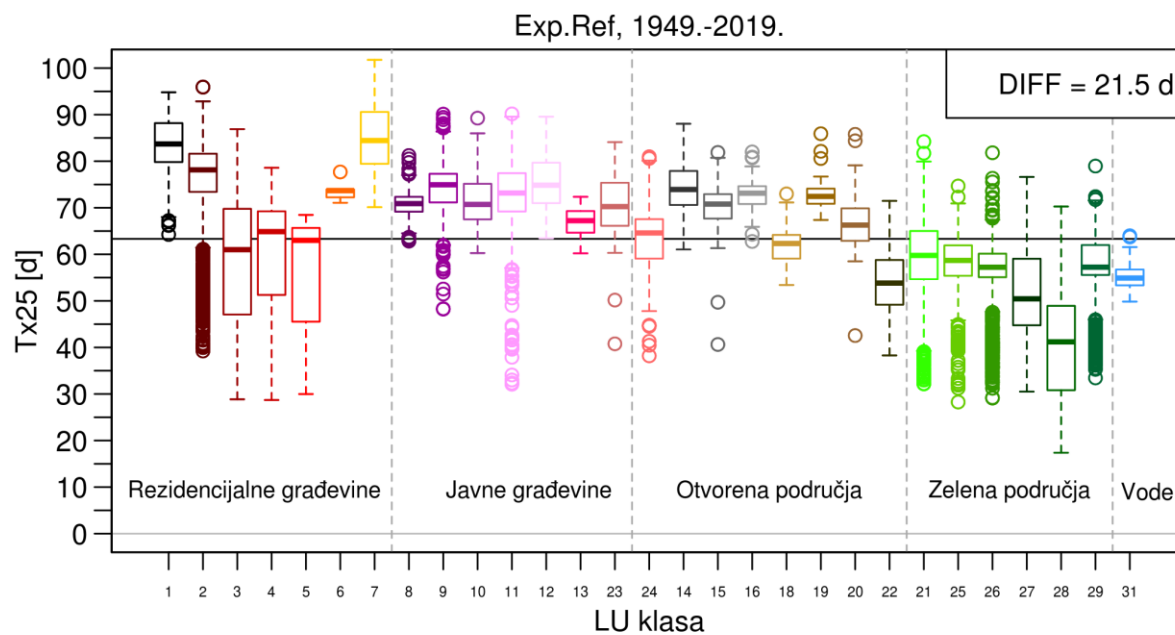
Budući da je na temelju podataka s postaje ZGM detektirana moguća povezanost NAO događaja i Tx25, u nastavku je korišten urbani klimatski model MUKLIMO_3 kako bi se detaljnije ispitala ta povezanost. Prvi korak bio je validacija rezultata modela prema podacima mjerenja s postaja ZGM i ZGG u razdoblju 1981. – 2010. To razdoblje je odabrano budući da je situacija grada s obzirom na klasifikaciju korištenja zemljišta reprezentativna za to razdoblje.

Za obje postaje, uočeno je malo podcjenjivanje modela s odstupanjima od 2.3 dana (2.9 %) na postaji ZGG i 1.6 dana (2.0 %) na postaji ZGM. Prema iznosu koeficijenta korelacije, model dobro opisuje međugodišnju varijabilnost parametra Tx25 za obje postaje ZGG (0.961) i ZGM (0.958).

Tablica 5.3.3 Dekadni linearni trend srednje maksimalne (mTmax) i minimalne (mTmin) temperature zraka, količine oborine (Prec) i standardiziranog oborinskog evapotranspiracijskog indeksa (SPEI) u zimu (DJF), proljeće (MAM), kasnu zimu – proljeće (JFMAM) i ljeto (JJA) u razdoblju 1949. – 2019. na postaji Zagreb-Maksimir. Statistički značajne vrijednosti trenda na nivou značajnosti 1 % (5 %) su podebljane (ukošene).

	DJF	MAM	JFMAM	JJA
mTmax (°C / 10 god)	0.29	0.36	0.34	0.37
mTmin (°C / 10 god)	0.38	0.47	0.50	0.54
Prec (mm / 10 god)	-1.17	-0.93	-1.36	-4.59
SPEI (1 / 10 god)	-0.07	-0.07	-0.07	-0.12

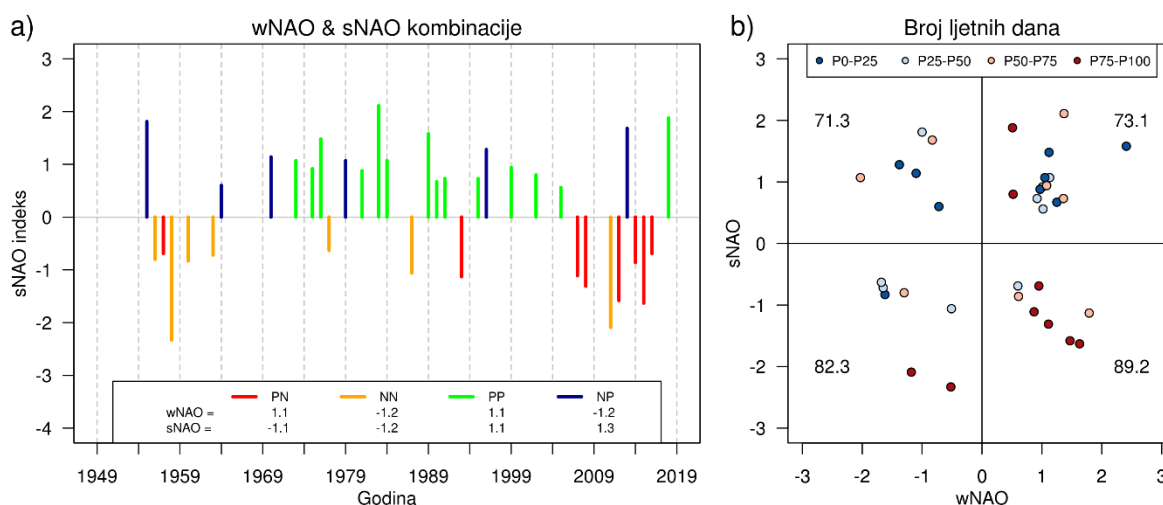
Referentna situacija ovdje je predstavljena prosječnom vrijednošću u cijelom 71-godišnjem razdoblju. Ove simulacije odgovaraju hipotetskoj situaciji grada s konstantnim LU stanjem, tj. bez procesa urbanizacije. Prema Slici 5.3.2, prosječna vrijednost Tx25 u promatranom razdoblju iznosi 63 dana, pri čemu su najviše vrijednosti upravo u izgrađenom području, a najniže u području s vegetacijom i vodenim područjima. Razlike su zamjetne i unutar pojedinih LU grupa npr. toplinsko opterećenje je mnogo veće u staroj gradskoj jezgri (LU7) i jako gusto izgrađenim rezidencijalnim dijelovima (LU1) u usporedbi sa srednje (LU3) ili manje gusto (LU4 i LU5) izgrađenim područjima. Slično, mnogo niže vrijednosti su u područjima šuma (LU28) u usporedbi s drugim zelenim klasama. U prosjeku je Tx25 u vodenim područjima niži nego u zelenim, osim za područje šuma. Razlika između gusto izgrađenih i područja s vegetacijom (bez šuma) iznosi 21.5 dana (Slika 5.3.2).



Slika 5.3.2 Modelirani referentni broj ljetnih dana (Tx25) u razdoblju 1949. – 2019. za svaku LU klasu. DIFF predstavlja razliku Tx25 između najgušće izgrađenih klasa (LU1, LU2 i LU7) i zelenih površina bez šuma (LU21, LU25, LU26, LU27 i LU29). Horizontalna crna linija odgovara prosječnoj vrijednosti Tx25.

5.3.2 Utjecaj zimskih i ljetnih NAO uvjeta

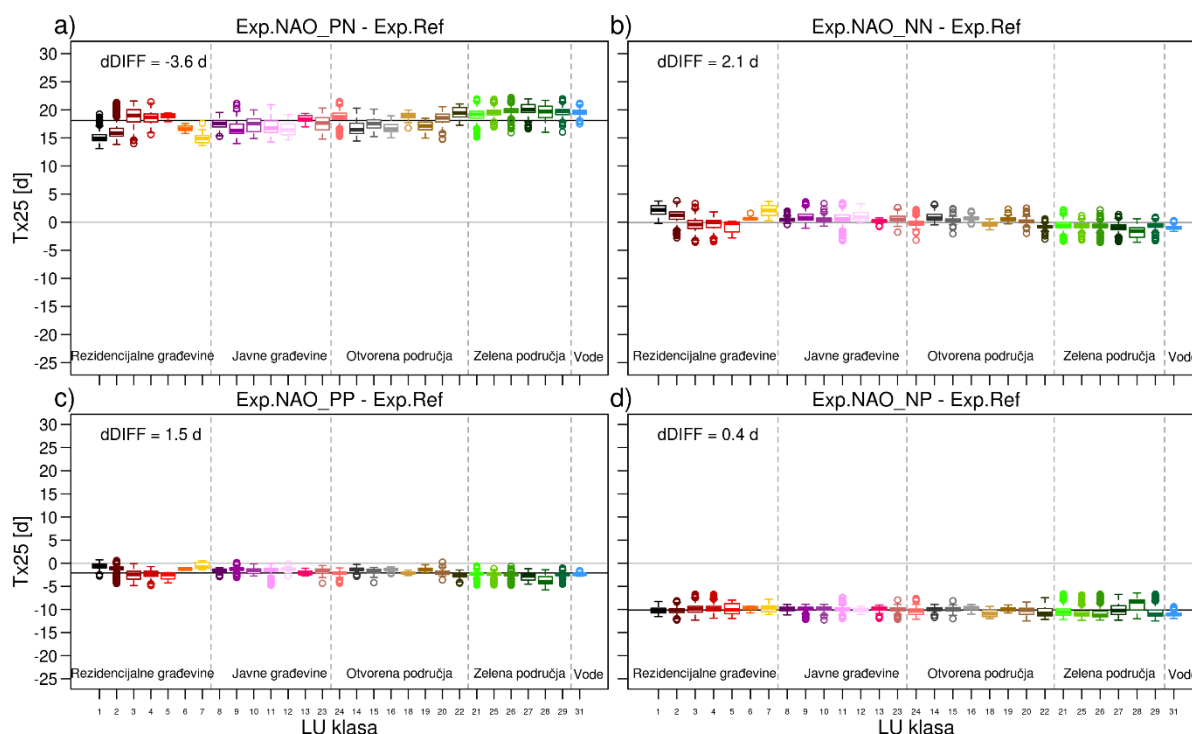
Budući da se pokazalo kako i zimski i ljetni NAO značajno utječu na temperaturne i oborinske parametre, kao i korelacija sa SPEI indeksom (Tablica 5.3.2), utjecaj NAO-a na Tx25 je detaljnije analiziran. Odvojeni su NAO događaji s apsolutnim vrijednostima zimskih i ljetnih indeksa većih od 0.5 te su podijeljeni u četiri grupe s obzirom na različite kombinacije tih indeksa: pozitivni zimski NAO popraćen negativnim ljetnim NAO-om (PN), negativni zimski NAO praćen negativnim ljetnim NAO-om (NN), pozitivni zimski NAO praćen pozitivnim ljetnim NAO-om (PP) i negativni zimski NAO praćen pozitivnim ljetnim NAO-om (NP) (Slika 5.3.3a). Prema podacima s postaje ZGM, u prosjeku se najveći broj Tx25 dana javlja za kombinaciju PN (89.2 dana), dok ih je nešto manje (82.3 dana) za situaciju NN (Slika 5.3.3b). Najmanje Tx25 dana je uočeno za kombinaciju NP (71.3 dana), dok ih je tek nešto više za situaciju PP (73.1 dan). Za godine s odgovarajućom kombinacijom zimskog i ljetnog NAO-a polja godišnjih Tx25 dobivena urbanim klimatskim modelom su razvrstana u četiri grupe (tzv. kompozite). Za svaki kompozit izračunato je prosječno Tx25 polje te je označeno kao Exp.NAO_PN, Exp.NAO_PP, Exp.NAO_NN i Exp.NAO_NP.



Slika 5.3.3 a) Godine korištene u analizi i odgovarajuće NAO kombinacije gdje prvo slovo odgovara zimskom NAO-u (wNAO), a drugo slovo ljetnom NAO-u (sNAO) koji je pozitivan (P) ili negativan (N) i b) veza s brojem ljetnih dana na postaji Zagreb-Maksimir gdje boja točaka odgovara kvartilnoj klasi, P0 – P25 itd.

Rezultati numeričkih simulacija pokazuju da je za eksperiment Exp.NAO_PN preko cijele domene dobiven prosječan porast broja dana Tx25 za oko 29 % veći od onog za Exp.Ref (Slika 5.3.4a i Slika 5.3.2). Ipak, taj porast nije svugdje jednak nego je jači u područjima s vegetacijom u usporedbi s najgušće izrađenim dijelovima grada (LU1 i LU2) i starom gradskom

jezgrom (LU7), što dovodi do smanjenja njihove razlike. Drugim riječima, nejednoliki porast temperature zelenih i izgrađenih dijelova grada smanjuje temperaturne gradijente između tih područja. Za eksperiment Exp.NAO_NN, dobiven je sličan rezultat za Tx25 onom u Exp.Ref pa su i razlike vrlo male (Slika 5.3.4b). Suprotno od Exp.NAO_PN, ovdje je simulirano zatopljenje u izgrađenom području i slabo zahlađenje u području s vegetacijom što dovodi do jačanja temperaturnog gradijenta među tim područjima. Slično, Exp.NAO_PP rezultira slabim smanjenjem Tx25 (~ 3 %) u usporedbi s Exp.Ref uz tek nešto slabiji odziv izgrađenih područja u odnosu na zelene površine što prati slabi porast temperaturnog gradijenta (Slika 5.3.4c). Za Exp.NAO_NP je dobiveno uglavnom jednoliko smanjenje Tx25 za oko 16 % u usporedbi s Exp.Ref (Slika 5.3.4d). Iako su vrijednosti ljetnog i zimskog NAO-a za Exp.NAO_NP nešto veće u usporedbi s onima za Exp.NAO_PN, sama amplituda promjene je ovdje znatno manja (Slika 5.3.3a).



Slika 5.3.4 Promjena broja ljetnih dana (Tx25) u odnosu na referentnu situaciju (Exp.Ref) za:

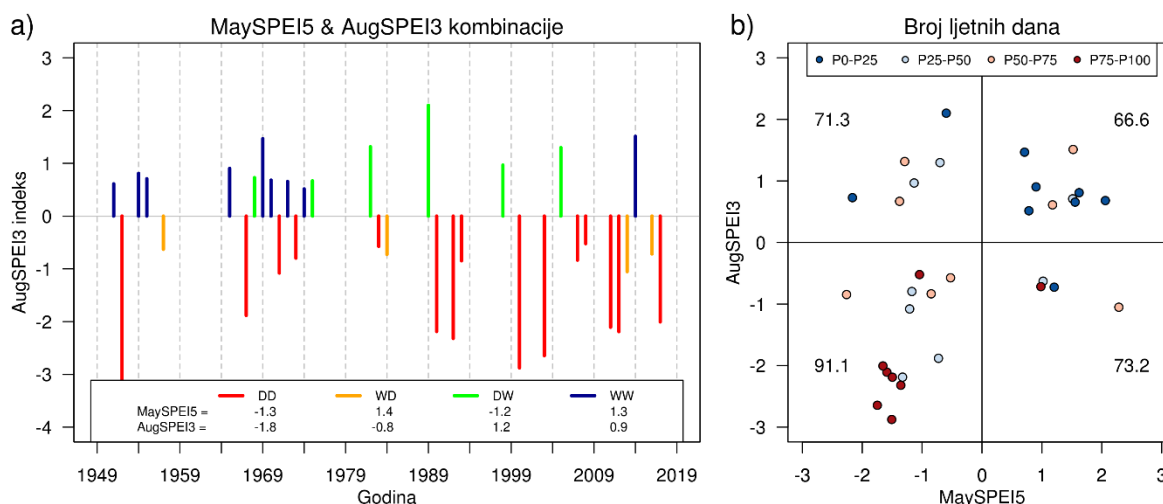
- a) pozitivni zimski i negativni ljetni NAO (Exp.NAO_PN), b) oba negativna (Exp.NAO_NN), c) oba pozitivna (Exp.NAO_PP) i d) negativni zimski i pozitivni ljetni NAO (Exp.NAO_NP) događaj. Ovdje, dDIFF predstavlja promjenu razlike Tx25 između najgušće izgrađenih klasa (LU1, LU2 i LU7) i zelenih klasa bez šuma (LU21, LU25, LU26, LU27 i LU29).

Rezultati eksperimenata, osim za Exp.NAO_PN, pokazuju drugačiji odziv područja sa šumama (LU28) u usporedbi s drugim klasama. Jedino je za Exp.NAO_PN dobiven porast Tx25 u šumskim područjima veći i od onog u izgrađenom dijelu (Slika 5.3.4a).

Rezultati eksperimenata s različitim kombinacijama zimskog i ljetnog NAO-a su pokazali kako Tx25 u gradu ne ovisi samo (izravno) o trenutnim uvjetima, već i (indirektno) o uvjetima povezanim s NAO-om tijekom kasne zime-proljeća. Neizravna klimatska povezanost zime i nadolazećeg ljeta može biti ostvarena procesima koji uključuju sporije komponente klimatskog sustava. S obzirom da NAO utječe na temperaturu i oborinu te na temelju značajnih korelacija prikazanih u Tablici 5.3.1 i Tablici 5.3.2, vlažnost tla može imati barem djelomičnu ulogu u tome. Konkretno, vlažniji zimsko-proljetni uvjeti omogućuju skladištenju vlage tlu i tako mogu utjecati na temperature u nadolazećem ljetu putem različitih procesa (npr. evapotranspiracija).

5.3.3 Utjecaj kasno zimskih-proljetnih i ljetnih sušnih uvjeta

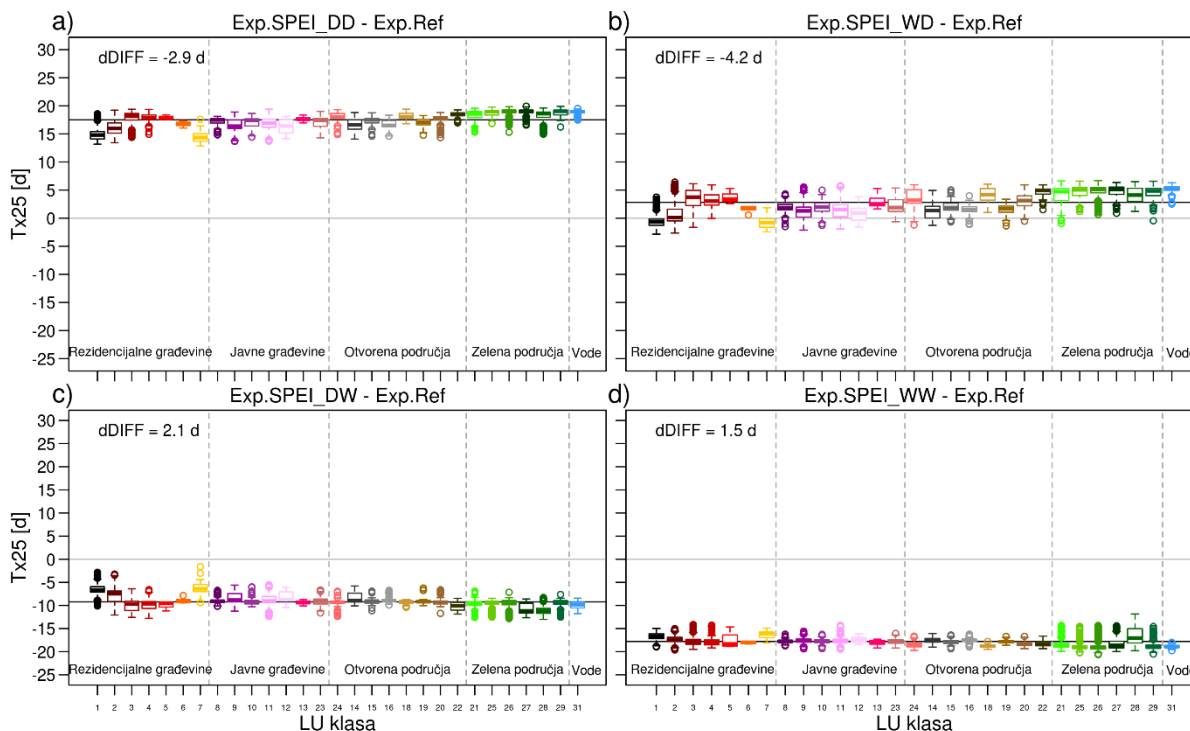
U ovom dijelu analize prikazani su rezultati analize utjecaja sušnih uvjeta definiranih indeksom SPEI koji je izračunat pomoću podataka s postaje ZGM. Analogno analizi za utjecaj NAO-a, različite kombinacije sušnih uvjeta (s apsolutnim vrijednostima indeksa SPEI većim od 0.5) grupirane su u četiri grupe (kompozita): sušna zima-proljeće i sušno ljeto (DD), vlažna zima – proljeće i sušno ljeto (WD), sušna zima – proljeće i vlažno ljeto (DW) i vlažna zima – proljeće i vlažno ljeto (WW). Manji broj WD i DW slučajeva utjecati će na pouzdanosti rezultata za ove dvije kombinacije (Slika 5.3.5a). Prema podacima s postaje ZGM prikazanim na Slici 5.3.5b, najveći broj dana Tx25 dobiven je za kombinaciju DD (91.1 dan), dok ih je u prosjeku najmanje u slučaju WW (66.6 dana). Podjednak broj dana Tx25 dobiven je za situacije WD (73.2 dana) i DW (71.3 dan). Za godine s odgovarajućom kombinacijom SPEI-a su zatim izdvojena polja Tx25 dobivena urbanim klimatskim modelom te je izračunata prosječna vrijednost za svaki od kompozita i označena kao Exp.NAO_DD, Exp.NAO_DW, Exp.NAO_WD i Exp.NAO_WW.



Slika 5.3.5 a) Godine korištene u analizi i odgovarajuće kombinacije SPEI-a gdje se prvo slovo odnosi na sušnost (D) ili vlažnost (W) kasnog zimsko – proljetnog SPEI-a (MaySPEI5), a drugo slovo ljetnog SPEI-a (AugSPEI3) i b) veza s brojem ljetnih dana na postaji Zagreb-Maksimir gdje boja točaka odgovara kvartilnoj klasi, P0 – P25 itd.

Rezultati numeričkih simulacija za Exp.SPEI_DD ukazuju na porast Tx25 za oko 28 % u odnosu na Exp.Ref (usporedi Sliku 5.3.6a i Sliku 5.3.2). Ova je promjena izraženija u područjima s vegetacijom u usporedbi s gusto izgrađenim sredinama što rezultira smanjenjem temperaturnog gradijenta među njima. Najslabiji porast Tx25 uočen je u gusto izgrađenim klasama (LU1 i LU2) i staroj gradskoj jezgri (LU7) gdje se inače javlja najveće toplinsko opterećenje (vidi Sliku 5.3.2). Rezultati ovog eksperimenta usporedivi su s Exp.NAO_PN budući da su oba eksperimenta vezana uz kombinaciju sušna zima – proljeće i sušno ljeto. Također, oba eksperimenta ukazuju na smanjenje polja temperaturnog gradijenta. Za Exp.SPEI_WD uočen je slab porast Tx25 za oko 4 % u usporedbi s Exp.Ref je (usporedi Sliku 5.3.6b i Sliku 5.3.2), koji je mnogo slabiji nego u Exp.SPEI_DD (usporedi Sliku 5.3.6a i Sliku 5.3.6b). Očito je ohlađujući utjecaj vlažne zime-proljeća ublažio zatopljenje zbog sušnog ljeta. Ovdje su razlike promjene Tx25 među LU klasama usporedive s onima u Exp.SPEI_DD. Rezultati za Exp.SPEI_DW pokazuju slabo smanjenje Tx25 za oko 15 % u odnosu na Exp.Ref (Slika 5.3.6c). Smanjenje je u prosjeku najslabije u gusto izgrađenom području (LU1 i LU2) i staroj gradskoj jezgri (LU7), dok je najjače u području šuma (LU28) i poljoprivrednih površina sa značajnim udjelom vegetacije (LU27) što rezultira porastom temperaturnog gradijenta. Za Exp.SPEI_WW je dobiveno smanjenje Tx25 za oko 28 % u usporedbi s Exp.Ref (Slika 5.3.6d). Ipak, smanjenje u gusto izgrađenom području (LU1) i staroj gradskoj jezgri (LU7) je tek nešto slabije nego u zelenim područjima što rezultira slabim porastom temperaturnog gradijenta.

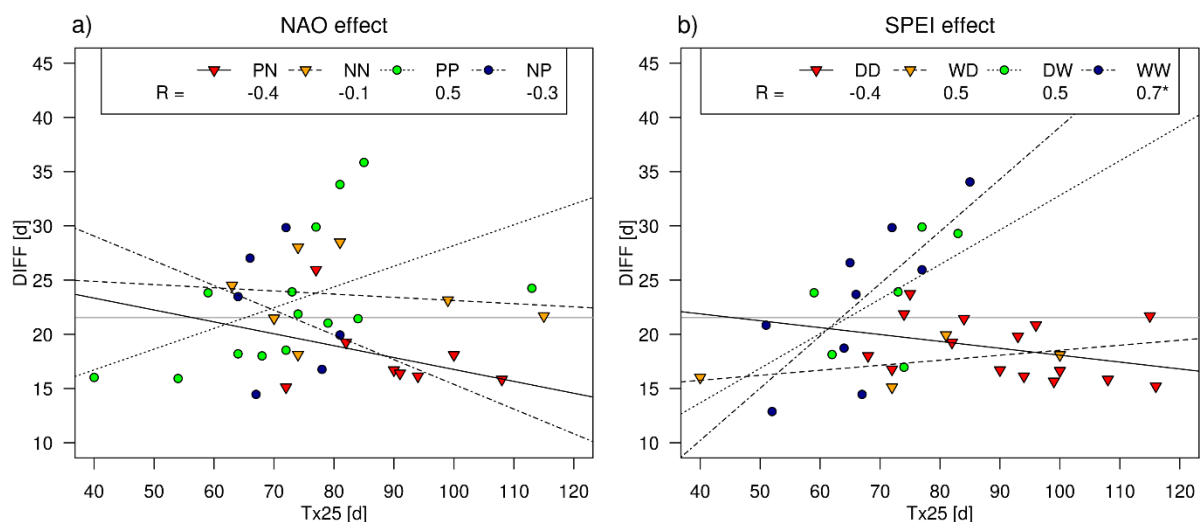
Ponovno, odziv šumskih klasa (LU28) pokazao se drugačijim u usporedbi s drugim zelenim klasama.



Slika 5.3.6 Promjena broja ljetnih dana (Tx25) u odnosu na referentnu situaciju (Exp.Ref) za: a) suhu kasnu zimu-proljeće i suho ljeto (Exp.SPEI_DD), b) vlažnu kasnu zimu-proljeće i suho ljeto (Exp.SPEI_WD), c) suhu kasnu zimu-proljeće i vlažno ljeto (Exp.SPEI_DW) i d) oba vlažna (Exp.SPEI_WW). Ovdje, dDIFF predstavlja promjenu razlike Tx25 između najgušće izgrađenih klasa (LU1, LU2 i LU7) i zelenih klasa bez šuma (LU21, LU25, LU26, LU27 i LU29).

5.3.4 Odnos amplitude i varijabilnosti toplinskog opterećenja

Kako bi se detaljnije ispitala veza uvjeta povezanih s NAO-om i SPEI-em i toplinskog opterećenja definiranog kao Tx25 te prostornog temperaturnog gradijenta definiranog kao razlika Tx25 između gusto izgrađenih područja i područja s vegetacijom (bez šuma), za svaku je godinu odnos spomenutih varijabli prikazan na Slikama 5.3.7a i 5.3.7b. Rezultati pokazuju kako kombinacije PN (za NAO), odnosno DD (za SPEI) rezultiraju temperaturnim gradijentom manjim od prosječne vrijednosti. Mali negativni koeficijent korelacije za oba slučaja (-0.4) sugerira da porast Tx25 tijekom takvih uvjeta može rezultirati još slabijim prostornim gradijentom. Kombinacije NP (za NAO), tj. WW (za SPEI) pokazuju međusobno suprotne rezultate pri čemu je korelacija negativna za NAO (-0.3), a pozitivna za SPEI (0.7). Značajna pozitivna korelacija za SPEI ukazuje kako se porastom Tx25 može očekivati i porast temperaturnog gradijenta. Odnosno, kada je slabo toplinsko opterećenje tada je i prostorni gradijent manji od prosječnog. Međutim, u uvjetima kada se grad zagrijava i Tx25 raste, tada se izgrađena područja zagrijavaju jače od vlažnih zelenih sredina što dovodi do porasta prostornog gradijenta toplinskog opterećenja. Značajnost negativne korelacije za situaciju NAO NP nije mogla biti potvrđena, djelomično i zbog manjeg broja događaja. Kombinacije PP (za NAO) i DW (za SPEI) dale su slične rezultate s koeficijentom korelacije 0.5, tj. porastom Tx25 može se očekivati i porast prostornog gradijenta opterećenja. Nadalje, za kombinacije NN (za NAO) i WD (za SPEI) dobiveni su međusobno suprotni rezultati s negativnom korelacijom za NAO i pozitivnom za SPEI. Ipak, teško je dati pouzdane općenite zaključke zbog manjeg broja određenih događaja, kao i suprotnog smjera djelovanja ovakvih kombinacija u kasnu zimu-proljeće i ljeto.



Slika 5.3.7 Veza između broja ljetnih dana (Tx25) i razlike u Tx25 (DIFF) između najgušće izgrađenih klasa (LU1, LU2 i LU7) i područja s vegetacijom bez šuma (LU21, LU25, LU26, LU27 i LU29) s obzirom na a) NAO i b) SPEI uvjete i odgovarajući koeficijent korelacije (R). Siva horizontalna linija odgovara prosječnoj DIFF vrijednosti u cijelom 71-godišnjem razdoblju. Statistički značajan koeficijent korelacije na nivou značajnosti 5 % označen je simbolom *.

5.3.5 Prostorna varijabilnost na temelju satelitskih podataka

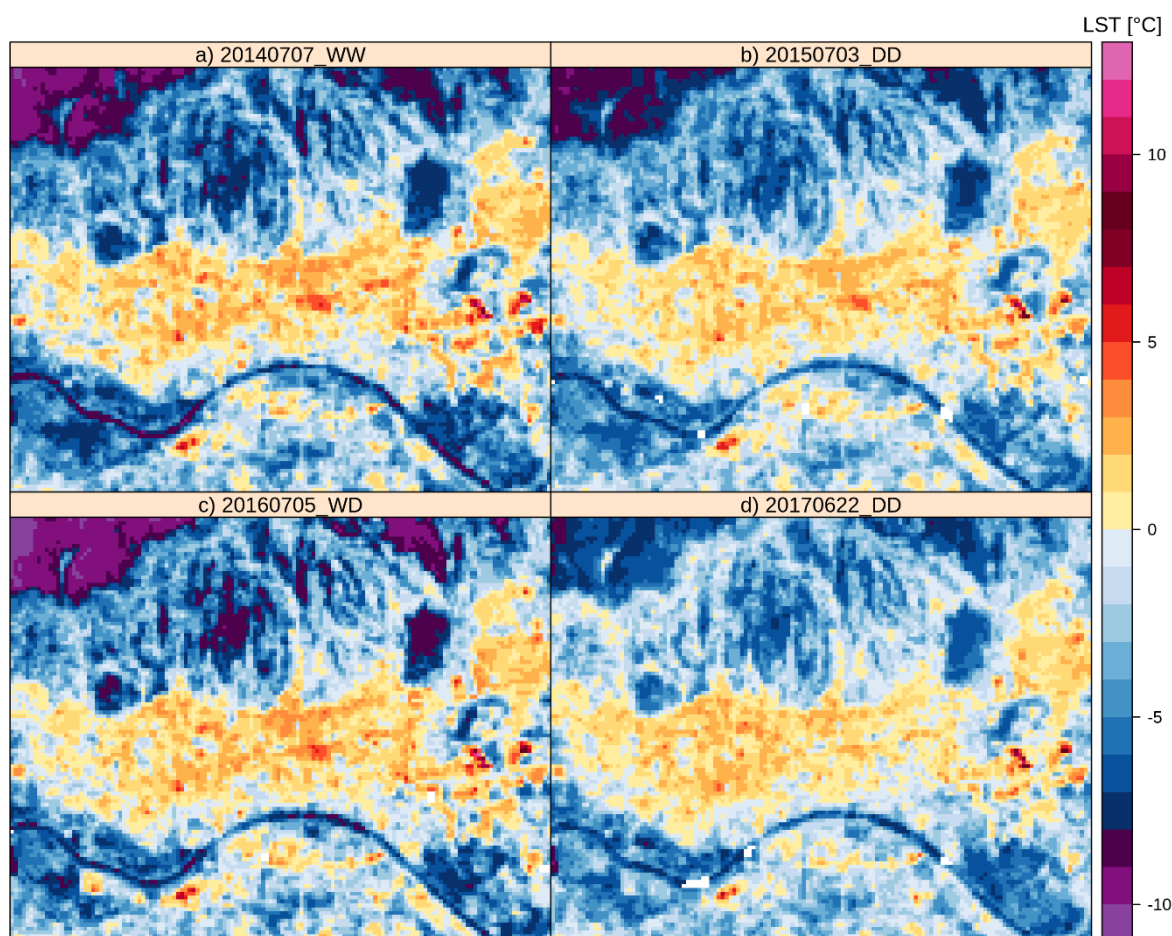
Prethodni rezultati utjecaja vlažno-sušnih zimskih i ljetnih uvjeta na broj dana Tx25 u Zagrebu temelje se na podacima numeričkih simulacija. Kao provjera tih rezultata, slična je analiza provedena na temelju satelitskih podataka LST-a, tj. procijenjen je intenzitet površinskog UHI-a u određenim situacijama. Pojedini datumi (Slika 5.3.8) u recentnim godinama povezani sa situacijama DD (DD2015 i DD2017), WD (WD2016) i WW (WW2014) su odabrani za analizu. Recentne godine su odabrane iz razloga da se izbjegne utjecaj urbanizacije i strukturalnih promjena u gradu nastalih tijekom posljednjih par desetljeća. Budući da je vremensko razdoblje za odabir situacija ograničeno zbog ograničene dostupnosti satelitskih podataka, nema reprezentativne godine za situaciju DW, a iz istog je razloga situacija DD2015 uzeta u obzir unatoč tome što je apsolutna vrijednost SPEI-a manja od 0.5. Ipak, ovdje su od glavnog su interesa događaji DD i WD jer su oni povezani sa sušnim ljetnim uvjetima. Također, nije bilo moguće analizirati situacije za potpuno isti kalendarski dan u svakoj od analiziranih godina pa su odabrani raspoloživi događaji koji su bili najbliže kraju lipnja i početku srpnja. Prosječna vrijednost LST-a je slična za sve četiri situacije i u rasponu je od 29.1 °C (za DD2015) do 31.4 °C (za DD2017) (Tablica 5.3.4). Budući da ove vrijednosti LST-a ovise o atmosferskim uvjetima za odabrane dane, međusobna usporedba takvih apsolutnih

vrijednosti nije od velike koristi. Standardna devijacija LST-a je manja za situacije DD2017 (2.7 °C) i DD2015 (2.9 °C) u usporedbi s WW2014 (3.3 °C) i WD2016 (3.4 °C).

Tablica 5.3.4 Srednja vrijednost (Sred) i standardna devijacija (StDev) površinske temperature tla za odabrane situacije.

	WW2014	DD2015	WD2016	DD2017
Sred (°C)	30.6	29.1	29.5	31.4
StDev (°C)	3.3	2.9	3.4	2.7

U skladu s rezultatima urbanog modela, prema satelitskim podacima LST je veći u izgrađenom dijelu grada (sredina domene), a niži u području voda i vegetacije. Usporedba intenziteta površinskog UHI-a za promatrane četiri situacije (Slika 5.3.8) ne pokazuje zamjetne razlike u izgrađenom području (središte domene), osim ponekih lokalnih razlika na području manjih parkova i zelenih područja unutar izgrađenih sredina. Ipak, neke veće razlike uočene su u područjima s vegetacijom. Tako je jači intenzitet površinskog UHI-a u WW2014 i WD2016 (Slika 5.3.8a i 5.3.8c) situaciji u usporedbi s DD2015 i DD2017 (Slika 5.3.8b i 5.3.8d). Općenito šumska područja na sjevernom dijelu domene i područja s vegetacijom oko Save imaju znatno niže vrijednosti LST-a nego izgrađena područja u sredini domene što je rezultiralo jačim intenzitetom površinskog UHI-a.



Slika 5.3.8 Razlika u površinskoj temperaturi tla (LST) i prosječnoj vrijednosti LST-a za najgušće izgrađene klase (LU1, LU2 i LU7) za odabrani ljetni dan koji odgovara situaciji: a) vlažno-vlažno (20140707_WW), b) sušno-sušno (20150703_DD), c) vlažno-sušno (20160705_WD) i d) sušno-sušno (20170622_DD).

5.3.6 Diskusija

U ovom dijelu analize, istražen je utjecaj zimskih (DJF) i ljetnih (JJA) NAO uvjeta, kao i kasno zimskih-proljetnih i ljetnih sušnih/vlažnih uvjeta na ljetno urbano toplinsko opterećenje Zagreba na temelju izmjerenih, modeliranih i satelitskih podataka. Rezultati ukazuju na najjaču i statistički značajnu korelaciju maksimalne temperature zraka i zimskog NAO-a dok je ljeti ljetni NAO najviše povezan s maksimalnom temperaturom zraka. Slično, Unkašević i Tošić (2013) su dobili značajnu negativnu (pozitivnu) korelaciju između ljetnog NAO-a i toplih (hladnih) ljetnih ekstrema na području Srbije. Naši rezultati pokazuju da zimski NAO ima i odgođeni utjecaj na temperaturu uz statistički značajnu i pozitivnu korelaciju za sezone MAM i JJA. Kada se promatra sezona JFMAM, čak jača značajna pozitivna (negativna) korelacija

temperaturnih (oborinskih) parametara i zimskog NAO-a je dobivena nego kada se uzme u obzir samo sezona MAM.

Sušni uvjeti su u ovoj analizi opisani indeksom SPEI, standardiziranom mjerom koja uzima u obzir količinu oborine, ali i potencijalnu evapotranspiraciju. Značajna negativna korelacija između zimskog NAO-a i SPEI-a je dobivena za sve promatrane sezone. To je stoga što pozitivni zimski NAO potiče sušne uvjete u sezoni zima-proljeće. Statistički značajna negativna korelacija između zimskog NAO-a i ljetnog SPEI-a ukazuje na odgođeni utjecaj zimskog NAO-a na sušne ljetne uvjete. Ovaj efekt je nadodan na izravni utjecaj ljetnog NAO-a na ljetne klimatske uvjete. Međutim, utjecaj ljetnog NAO-a na SPEI je suprotan pa je pozitivni ljetni NAO povezan s pozitivnim SPEI-om, odnosno vlažnijim uvjetima. Dakle, ljetni klimatski uvjeti su pod utjecajem ljetnog, ali i zimskog NAO-a. Odgođeni utjecaj zimskog NAO-a na ljetnu sezonu je neizravan, tj. odvija se putem procesa vezanih uz vlažnost tla, dok je efekt ljetnog NAO-a izravan i vezan uz izravne utjecaje atmosferske cirkulacije i oborine tijekom ljeta. Stegehuis i sur. (2021) komentiraju kako trend smanjenja rano-ljetne vlažnosti tla većinski opisuje ljetno zatopljenje u zapadnoj Europi, dok u istočnoj Europi efekti velike skale opisuju veći udio porasta ljetne temperature. S gledišta povećanog urbanog toplinskog opterećenja, maksimalni utjecaj (u smislu porasta toplinskog opterećenja zbog utjecaja NAO-a) očekuje se u situacijama kada je pozitivni zimski NAO popraćen negativnim ljetnim NAO-om.

Prema rezultatima validacije modela s podacima s meteoroloških postaja, model MUKLIMO_3 se pokazao uspješnim u simulaciji apsolutnog broja ljetnih dana, kao i njihovoj međugodišnjoj varijabilnosti. Uočene su prostorne razlike polja toplinskog opterećenja ovisno o klasi namjene zemljišta, što je dobiveno i za druge, uglavnom srednje europske gradove: Beč (Bokwa i sur. 2019, Žuvela-Aloise i sur. 2016, Žuvela-Aloise i sur. 2018), Klagenfurt (Oswald i sur. 2020), Berlin (Straka i Sodoudi 2019), Frankfurt (Früh i sur. 2011), Wiesbaden i Manz (Schau-Noppel i sur. 2020), Prag (Geletić i sur. 2020), Brno (Bokwa i sur. 2019, Geletić i sur. 2018, 2019b, 2020), Krakow i Szeget (Bokwa i sur. 2019), Bratislava (Bokwa i sur. 2019, Holec i sur. 2020) i Trnava (Holec i sur. 2020). Za razliku od prethodnih radova koji su se uglavnom bavili procjenom učinkovitosti određenih mjera adaptacije ili procjenom toplinskog opterećenja u uvjetima buduće klime, ovaj rad uzima u obzir i sezonske varijacije, a ne samo prosječne klimatske uvjete ili pojedini dan.

Prema rezultatima ovog rada, toplinsko opterećenje je najjače u gusto izgrađenim klasama, dok je znatno slabije u područjima s vegetacijom i vodenim područjima što je potvrđeno urbanim klimatskim modelom i satelitskim podacima. Na toplinsko opterećenje u područjima

s vodenim površinama značajno utječu parametri koji opisuju stanje vode u modelu (tj. temperatura vode), dok su najniže vrijednosti u području šuma djelomično posljedica veće nadmorske visine, kao i koherentne strukture šuma u odnosu na druge raspršene klase jer koherentne strukture imaju jači efekt hlađenja (Žuvela-Aloise i sur. 2018, Schau-Noppel i sur. 2020).

U ovoj analizi je pokazano da utjecaj NAO-a na toplinsko opterećenje nije jednolik na cijeloj gradskoj domeni. Konkretno, u situacijama kada je pozitivni zimski NAO popraćen negativnim ljetnim NAO-om, porast toplinskog opterećenja je uočen na cijeloj domeni, ali je najjači porast dobiven u zelenim područjima. U takvim uvjetima, apsolutni iznos broja ljetnih dana je i dalje najveći u gusto izgrađenom području, no njihov porast uslijed dodatnog utjecaja NAO-a je jače izražen u zelenim područjima što rezultira smanjenim prostornim gradijentom. Stoga se može očekivati i smanjenje intenziteta UHI-a. Razlog nejednolikog utjecaja NAO-a je, barem djelomično, vlaga u tlu, tj. procesi koji su s njom povezani. U situacijama kada je pozitivni zimski NAO popraćen negativnim ljetnim NAO-om, tada oni potiču porast temperature i smanjenje oborine, tj. smanjenje SPEI-a. U tom slučaju sušni uvjeti u tlu rezultiraju smanjenim isparavanjem s površine i posljedično manjim efektom hlađenja zelenih površina. Budući da izgrađena područja uglavnom karakteriziraju nepropusne površine i slabo isparavanje, sušni uvjeti u takvim područjima nemaju značajan utjecaj na iznos toplinskog opterećenja pa je stoga i sama njegova promjena u odnosu na uobičajene uvjete relativno slaba. Ovi rezultati podupiru ranije dobivene najjače tople ekstreme na postajama Zagreb-Pleso i Zagreb-Maksimir koje su okružene livadama pa je moguće da i sušni uvjeti dodatno pojačavaju tople ekstreme na tim lokacijama.

U situacijama kada nakon negativnog zimskog NAO-a slijedi pozitivan ljetni NAO, podjednako smanjenje toplinskog opterećenja je dobiveno na cijeloj domeni, ali s manjom amplitudom promjene u odnosu na suprotnu kombinaciju zimskog i ljetnog NAO-a. Situacije s istim polaritetom zimskog i ljetnog NAO-a pokazale su slab utjecaj na toplinsko opterećenje grada, djelomično zbog njihovog suprotnog utjecaja na temperaturu i oborinu.

S obzirom da su rezultati pokazali da je utjecaj pojedinih faza ljetnog i zimskog NAO-a na toplinsko opterećenje povezan sa sušnim, odnosno vlažnim uvjetima, analiza je proširena s još detaljnijim istraživanjem zimsko-proljetnih i ljetnih uvjeta pomoću SPEI-a. Rezultati potvrđuju da toplinsko opterećenje ovisi o sušnim uvjetima čiji utjecaj za pojedine situacije nije jednak na cijeloj domeni. Ponovno je utjecaj sušnih uvjeta na toplinsko opterećenje jači u područjima s vegetacijom nego u gusto izgrađenim područjima što opet ukazuje na ulogu vlage u tlu pri

ublažavanju toplinskog opterećenja. Uloga raspoložive vlage na smanjenje toplinskog opterećenja tijekom toplinskih valova već je prikazana u nekoliko radova (npr. Pyrgou i sur. 2020, Richard i sur. 2021). Taj efekt ovisi i o vrsti vegetacije, a najjači ohlađujući utjecaj je uočen u područjima s visokom vegetacijom (tj. šumama). Različit odziv u području klasa sa šumama u odnosu na druge zelene klase može se objasniti većom dubinom korijenja kao i utjecajem krošnje na stvaranje sjene koja snižava temperaturu zraka, ali pomaže i duljem zadržavanju vlage u tlu. Ipak, u situacijama kada sušna zima-proljeće prethodi sušnom ljetu, porast toplinskog opterećenja u području šuma je usporediv s porastom u drugim zelenim klasama, a čak može biti i veće nego u izgrađenom području. Ovo je barem djelomično posljedica dugotrajnog sušnog razdoblja kada se iscrpi vlaga i iz dubljih slojeva tla što značajno umanjuje efikasnost ohlađivanja. S obzirom da je različit utjecaj visoke i niske vegetacije već opisan i u drugim radovima (npr. Teuling i sur. 2010), možemo zaključiti da model MUKLIMO_3 dobro reproducira taj interesantan efekt.

Za razliku od eksperimenata povezanih s različitim situacijama NAO-a, za eksperimente pomoću kojih je ispitan utjecaj različitih kombinacija SPEI-a, porast toplinskog opterećenja za sušno-sušne kombinacije u odnosu na smanjenje za vlažno-vlažne situacije je usporediv. Taj rezultat mogao bi upućivati na asimetrični odziv sušnih uvjeta na NAO koji se navodi u radu Lopez-Moreno i Vicente-Serrano (2008).

Na promjene toplinskog opterećenja uslijed određene kombinacije NAO-a ili SPEI-a ukazuju izmjereni podaci na postajama (točkasti podaci), ali i rezultati modela (prostorni podaci). Iako su uočene neke razlike u amplitudi promjene, smjer promjene se slaže. Dakle kombinacija dinamičkog modeliranja (MUKLIMO_3 simulacije) i statističkog pristupa (kuboidna metoda) uspješno reproducira takve promjene na temelju ulaznih meteoroloških podataka (tj. dnevne temperatura zraka, relativne vlažnosti i brzine vjetera). Nadalje, utjecaj zimskih i ljetnih uvjeta definiranih SPEI-om na prostorni gradijent toplinskog opterećenja dodatno je potvrđen analizom satelitskih podataka površinske temperature. Tako je jači intenzitet površinskog UHI-a uočen za situacije kojima su prethodili vlažniji uvjeti.

5.4. Utjecaj promjena namjene zemljišta i klimatskih uvjeta na toplinsko opterećenje

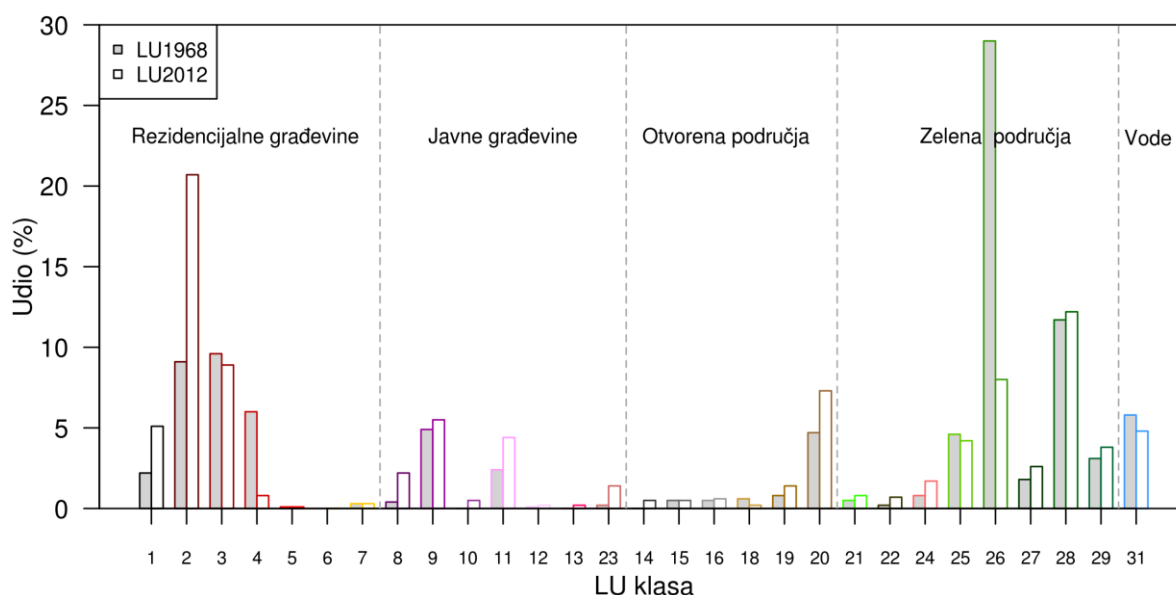
5.4.1 Promjene namjene zemljišta i klimatskih uvjeta

U ovom dijelu rada istražen je utjecaj promjena namjene zemljišta i klimatskih uvjeta na toplinsko opterećenje grada. Ranije stanje grada opisano je situacijom iz 1968. godine, dok aktualno stanje odgovara situaciji iz 2012. Kako bi jasnije razumjeli rezultate sa stanovišta promatranih promjena, prvo su analizirane razlike u korištenim podlogama namjene zemljišta te karakteristike pozadinskih klimatskih prilika.

Promjene namjene zemljišta najviše se uočavaju u zapadnom i južnom dijelu domene gdje su zelene površine zamijenila izgrađena područja (Slika 3.1). Vidljive su i promjene toka rijeke Save kao i modifikacija Jaruna. Ukupno je promijenjeno 52 % domene pri čemu udio pokrivenosti pojedine klase u prošloj i trenutnoj situaciji grada ukazuje da su u prošlom stanju grada najbrojnija bila poljoprivredna područja - LU26 (~ 29 %), dok su to sada gusto izgrađena rezidencijalna naselja - LU2 (~ 20 %) (Slika 5.4.1). To su ujedno i klase s najvećim razlikama između dvije situacije izgrađenosti grada. U novijem se razdoblju uočava smanjenje rezidencijalnih izgrađenih područja umjerene i male gustoće, livada i vodenih površina, dok je prisutan porast rezidencijalnih područja velike gustoće i parkova. Slične promjene zemljišnog pokrova uočene su i za druge europske gradove (npr. Grigorasi i Uritescu 2019, Holec i sur. 2020, Pauleit i sur. 2005).

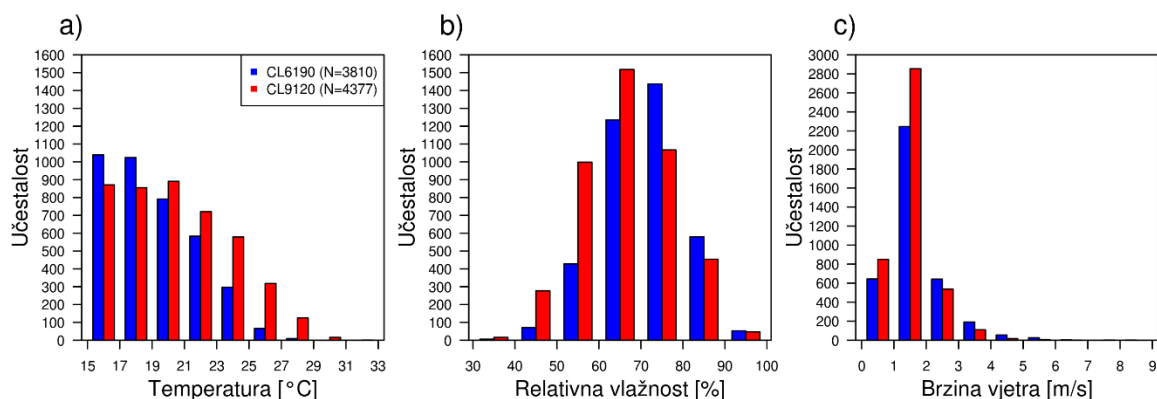
Osim promjena u zemljišnoj podlozi, tijekom promatranog 60-godišnjeg razdoblja došlo je i do promjena u klimatskim prilikama. Valja naglasiti kako je u ovom razdoblju uz globalno zatopljenje prisutna i prirodna klimatska varijabilnost. Prema izmjeranim dnevnim podacima na postaji ZGM, uočava se kako je veća učestalost dana sa srednjom dnevnom temperaturom između 15 °C i 19 °C bila u ranijem razdoblju u usporedbi s recentnim razdobljem (Slika 5.4.2a). S druge strane, učestalost dana s temperaturom zraka višom od 19 °C je sustavno viša u novijem razdoblju. Razlike među razdobljima su posebno istaknute za više temperature zraka. Također, razdiobe relativne vlažnosti također ukazuju na razlike između promatranih razdoblja pri čemu je razdioba za novije razdoblje pomaknuta ulijevo (ka nižim vrijednostima) u odnosu na onu za ranije razdoblje (Slika 5.4.2b). Drugim riječima, veća je učestalost dana s relativnom vlažnosti manjom od 70 % u novijem razdoblju, dok je udio dana s relativnom vlažnosti iznad 70 % veći u ranijem razdoblju. S obzirom na brzinu vjetra, dana s vjetrom slabijim od 2 m/s više je u novijem razdoblju, dok je jačeg vjetra bilo više u ranijem razdoblju (Slika 5.4.2c).

Dakle, prema podacima mjerenja s postaje ranije razdoblje je bilo hladnije, vlažnije i vjetrovitije u usporedbi s recentnim razdobljem.



Slika 5.4.1 Udio prekrivenosti pojedine klase namjene zemljišta za stanje grada iz 1968. i 2012. godine. Opis svake klase namjene zemljišta dan je u Tablici S1 u prilogu.

Uz dvije situacije namjene zemljišta i dva seta klimatskih uvjeta, kreirana su četiri eksperimenta (Tablica 5.4.1). Dva eksperimenta mogu se (barem donekle) smatrati realnim simulacijama – ranije stanje grada u kombinaciji s ranijim klimatskim uvjetima (Exp.C0L0) te sadašnje stanje grada uz sadašnje klimatske uvjete (Exp.C1L1). Preostale dvije simulacije predstavljaju hipotetske slučajeve – kao da se grad nije razvijao, a klimatske varijacije/promjene su bile prisutne te scenarij s urbanizacijom uz nepromijenjene klimatske uvjete. Ova dva dodatna eksperimenta omogućuju dodatnu analizu utjecaja promjene namjene zemljišta i klimatskih uvjeta. Ukupna promjena u toplinskom opterećenju promatrana je kao razlika između eksperimenata Exp.C1L1 i Exp.C0L0. Utjecaj klimatskih uvjeta može se promatrati na dva načina: kao razlika u eksperimentima s različitim klimatskim uvjetima uz podlogu namjene zemljišta iz a) 1968. (Exp.C1L0 minus Exp.C0L0) te b) 2012. godine (Exp.C1L1 minus Exp.C0L1). Analogno se utjecaj promjena u namjeni zemljišta može istražiti na odgovarajuća dva načina kao razlika u eksperimentima s različitim situacijama namjene zemljišta uz klimatske uvjete u razdoblju: a) 1961. – 1990. (Exp.C0L1 minus Exp.C0L0) i b) 1991. – 2020. (Exp.C1L1 minus Exp.C1L0).



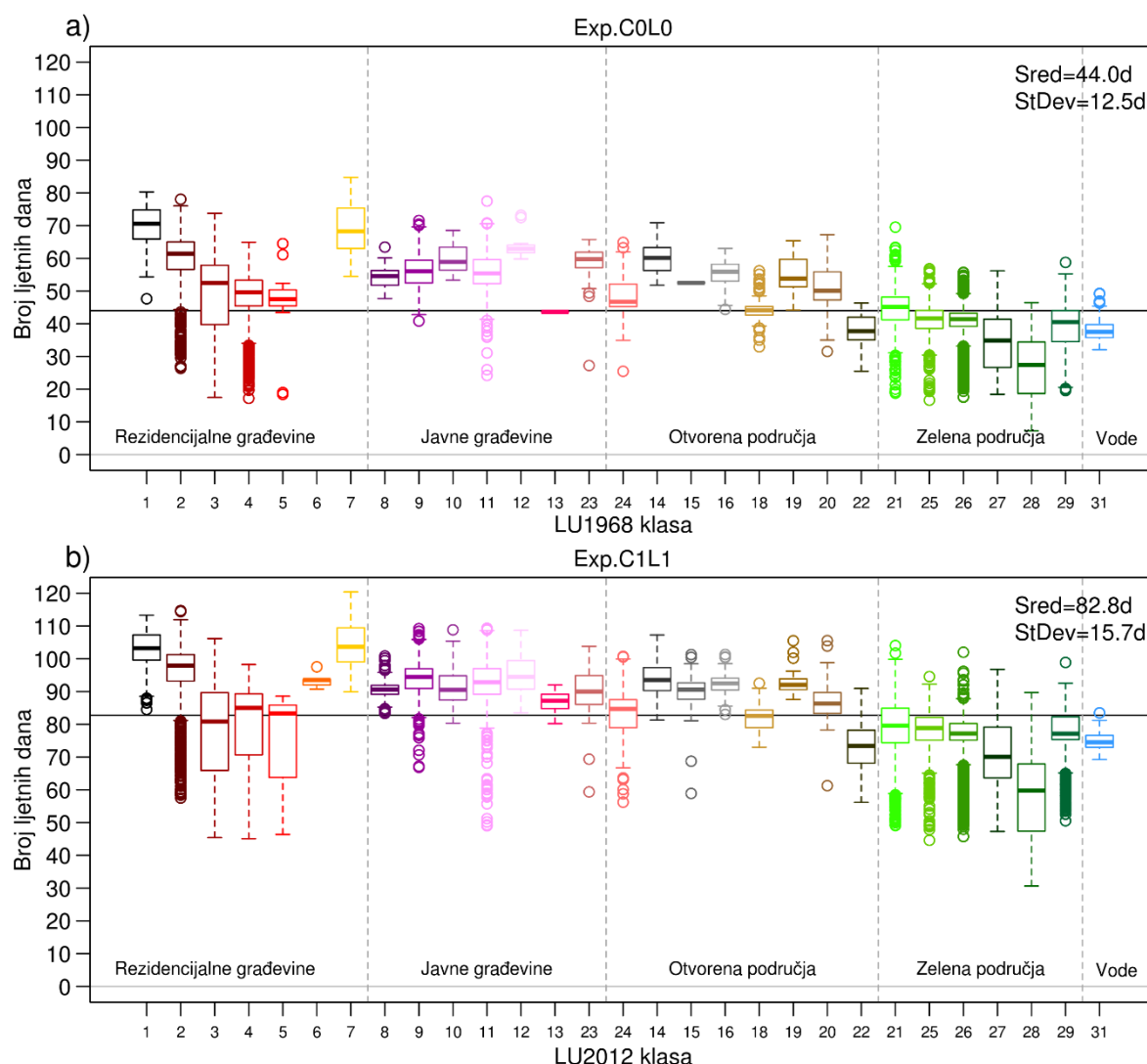
Slika 5.4.2 Apsolutne učestalosti srednje dnevne a) temperature zraka (°C), b) relativne vlažnosti (%) i c) brzine vjetra (m/s) za dane kada je srednja dnevna temperatura zraka ≥ 15 °C u razdoblju 1961. – 1990. (plavo) i 1991. – 2020. (crveno) na postaji Zagreb-Maksimir.

Tablica 5.4.1 Kombinacije klimatskih uvjeta i situacije namjene zemljišta grada te odgovarajući naziv eksperimenta.

Klimatski uvjeti	Namjena zemljišta	Naziv eksperimenta
1961. – 1990.	1968.	Exp.C0L0
1961. – 1990.	2012.	Exp.C0L1
1991. – 2020.	1968.	Exp.C1L0
1991. – 2020.	2012.	Exp.C1L1

5.4.2 Procjena iznosa i promjena toplinskog opterećenja za dvije situacije u gradu

Razdioba toplinskog opterećenja iskazanog kao broj ljetnih dana za Exp.C0L0 i Exp.C1L1 po pojedinim klasama namjene zemljišta u skladu je s razdiobom dobivenom za 71-godišnje razdoblje (Slike 5.4.3 i 5.3.2). Prosječno su dobivene najveće vrijednosti opterećenja u gusto izgrađenom rezidencijalnom području (LU1 i LU2) i staroj gradskoj jezgri (LU7). Ipak, postoje razlike u amplitudama pri čemu je prosječno opterećenje za Exp.C0L0 oko 44 dana, a za Exp.C1L1 oko 83 dana. Postoje i razlike u prostornoj varijabilnosti polja koja za Exp.C0L0 iznosi oko 13 dana, a za Exp.C1L1 oko 16 dana. Porast varijabilnosti u eksperimentu Exp.C1L1 posljedica je, barem djelomično, povećane varijabilnosti unutar rezidencijalnih izgrađenih klasa male gustoće (LU4 i LU5). U oba eksperimenta su prosječne vrijednosti izgrađenih klasa i otvorenih područja veće od srednje vrijednosti cijelog polja, dok su za područja s vegetacijom i vodene površine manje.



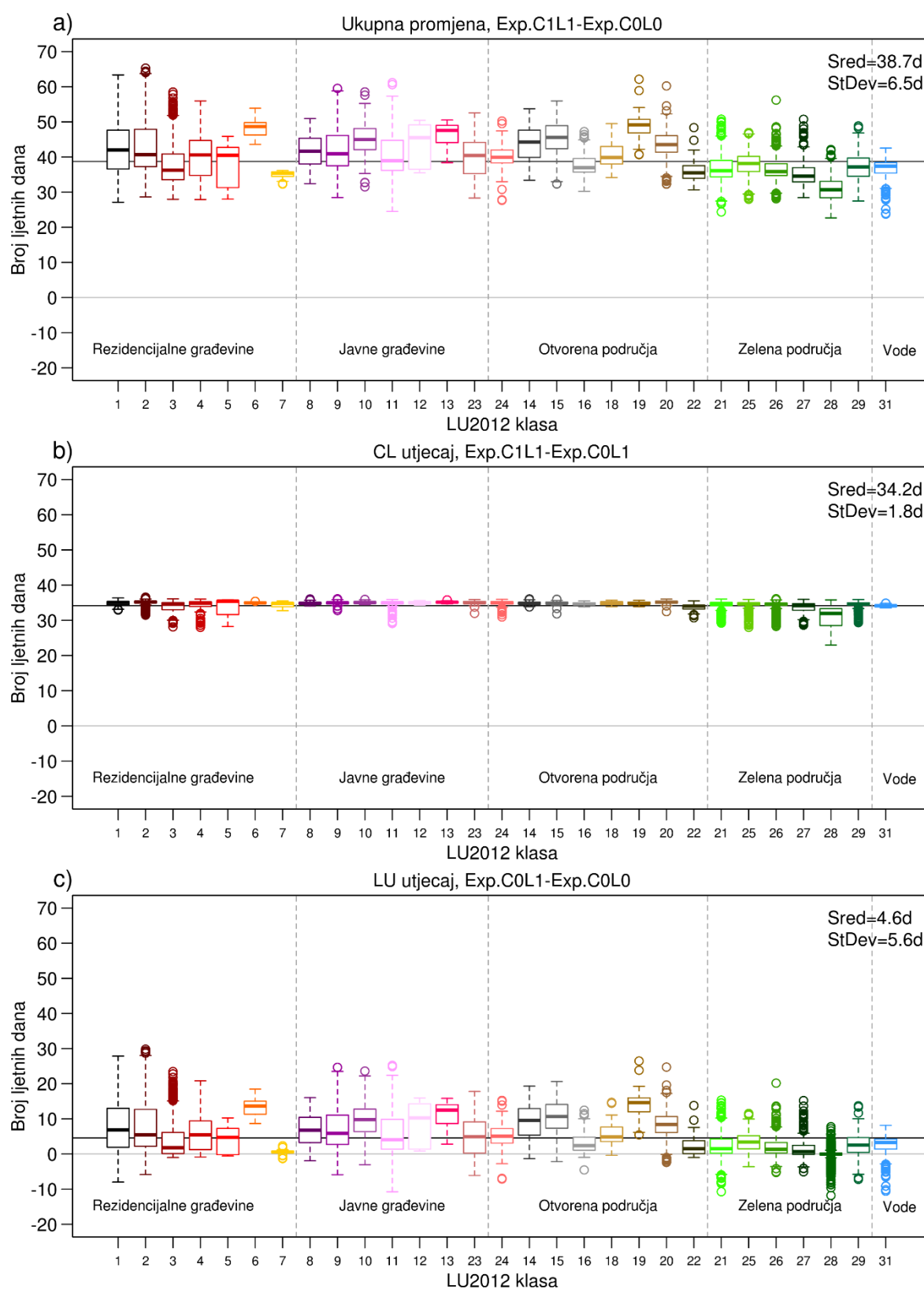
Slika 5.4.3 Prosječan broj ljetnih dana (Tx25) u uvjetima a) ranije situacije namjene zemljišta grada i ranijih klimatskih uvjeta (Exp.C0L0) i b) novije situacije namjene zemljišta i recentnih klimatskih uvjeta (Exp.C1L1). Crna horizontalna linija odgovara prosječnoj vrijednosti broja dana Tx25 za svaki od eksperimenata.

Ukupna promjena broja dana Tx25 između dva eksperimenta je značajna na cijelom području i iznosi oko 39 dana (Slika 5.4.4a), što je 88 % prosječne vrijednosti u eksperimentu C0L0. Ovaj porast nije jednak na cijeloj domeni te postoje razlike u prosječnoj vrijednosti i varijabilnosti unutar pojedine LU klase. U prosjeku je najveći porast (49 dana) za gradilišta i građevinska područja (LU19), dok je najmanji (31 dan) za područje šuma (LU28). Lokalno su najveće promjene (do 64 dana) simulirane u rezidencijalnom izgrađenom području, a najniže (23 dana) u području šuma (LU28). Prostorna varijabilnost ukupne promjene toplinskog opterećenja iznosi oko 7 dana s najvećom varijabilnošću (8 dana) za najgušće izgrađena

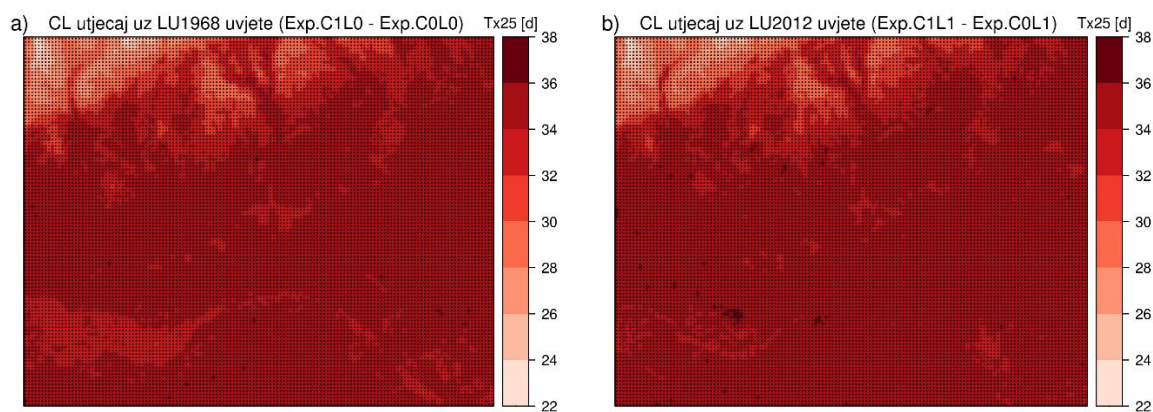
rezidencijalna područja (LU1) i s najmanjom varijabilnošću (1 dan) u staroj gradskoj jezgri (LU7).

5.4.3 Promjene toplinskog opterećenja zbog promjene klimatskih uvjeta

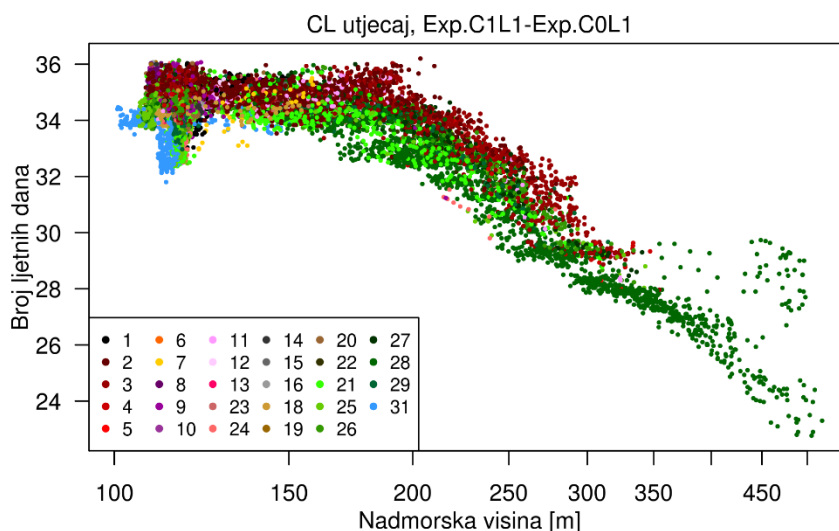
Vrlo slične vrijednosti promjene toplinskog opterećenja zbog promjena u klimatskim uvjetima dobivene su za različite situacije namjene zemljišta: značajan porast Tx25 od oko 34 dana uz prostornu varijabilnost od oko 2 dana za cijelu domenu (Slika 5.4.4b i Slika 5.4.5). Toliki porast čini oko 88 % ukupne promjene (Slika 5.4.4a i Slika 5.4.4b). Porast je relativno jednak iznad grada, tek su vrijednosti nešto niže na padinama Medvednice (Slika 5.4.5). Lokalno je porast najveći (37 dana) u vrlo gusto izgrađenom rezidencijalnom dijelu (LU2), dok je najmanji (23 dana) u području šuma (LU28). Osim za područje šuma (LU28), veća varijabilnost unutar LU klasa (oko 3 dana) uočava se i za srednje i manje gusto izgrađena rezidencijalna područja (LU3 i LU5). Karakteristike navedenih klasa su poprilično različite, no zajedničko im je da ih se može naći na padinama Medvednice. Stoga je dalje istražena eventualna povezanost nadmorske visine i promjena toplinskog opterećenja uzrokovanih promjenom klimatskih uvjeta (Slika 5.4.6). Radi bolje preglednosti rezultata za niže nadmorske visine, na osi apscisa na Slici 5.4.6 dana je logaritamska vrijednost nadmorske visine. Odziv polja Tx25 na promjenu klimatskih uvjeta uglavnom je pod utjecajem orografije tek nakon visine od oko 160 m. Promjena u toplinskom opterećenju za područja niža od oko 160 m neovisna je o nadmorskoj visini, dok je za viša područja uočena negativna linearna ovisnost promjene broja ljetnih dana za oko 3 dana svakih 100 m. Ipak, i ovisnost o vrsti LU klase donekle se može uočiti na Slici 5.4.5 pri čemu su na istim nadmorskim visinama vrijednosti promjene Tx25 za plave (plave točke) i zelene (zelene točke) klase niže od vrijednosti u gusto izgrađenom (crne i tamno-crvene točke) području. Slični rezultati dobiveni su za analizu klimatskih utjecaja uz uvjete namjene zemljišta iz 1968. godine.



Slika 5.4.4 a) Ukupna promjena broja ljetnih dana (Tx25) te doprinos od b) klimatskog utjecaja i c) promjena u namjeni zemljišta za svaku od klasa namjene zemljišta. Horizontalna crna linija odgovara prosječnoj vrijednosti promjene Tx25 za svaki od utjecaja.



Slika 5.4.5 Promjena broja ljetnih dana (Tx25) zbog promjene klimatskih uvjeta i statistička značajnost na nivou 5 % (crni simbol) uz podlogu namjene zemljišta za: a) prošlo razdoblje (LU1968) i b) recentno razdoblje (LU2012).

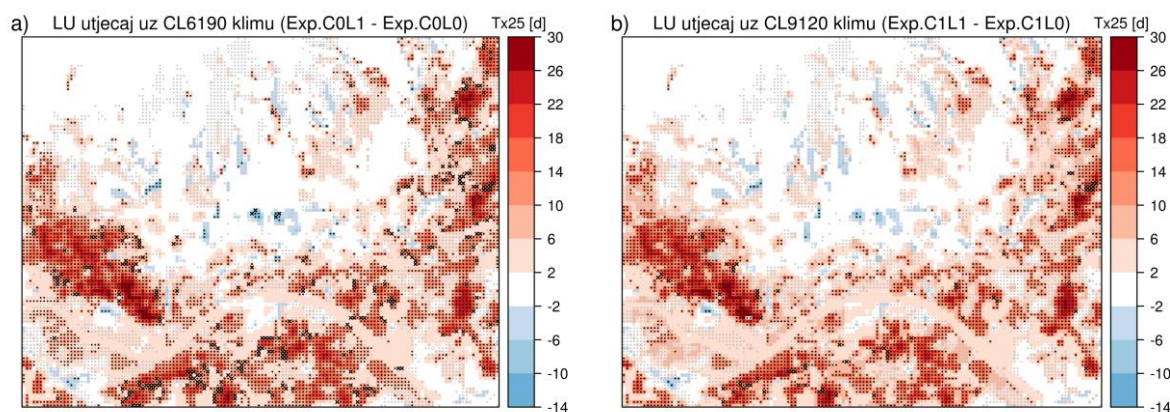


Slika 5.4.6 Veza promjene broja ljetnih dana zbog promjene klimatskih uvjeta i nadmorske visine. Boja simbola odgovara klasi namjene zemljišta iz 2012. godine.

5.4.4 Promjene toplinskog opterećenja zbog promjene namjene zemljišta

I rezultati analize utjecaja promjena u klasama namjene zemljišta uz različite klimatske uvjete su relativno slični: prosječan porast Tx25 za oko 5 dana uz prostornu varijabilnost od oko 6 dana (Slika 5.4.4c i Slika 5.4.7). Ova promjena čini tek 12 % ukupne promjene Tx25 (Slika 5.4.4a i Slika 5.4.4c). U prosjeku je porast najveći (14 dana) za područja gradilišta (LU19), dok je najniži (0 dana) u staroj gradskoj jezgri (LU7) i na području šuma (LU28). Najmanje prosječne vrijednosti kao i varijabilnost promjena u staroj gradskoj jezgri posljedica su zabrane gradnje i većih promjena u tom području, kao i relativno jednoliko usko područje (u smislu nadmorske visine i okruženja) u kojem je ta klasa smještena. Iako su prosječne

vrijednosti razlika zbog promjena namjene zemljišta relativno male, apsolutne vrijednosti su u rasponu od -12 dana u području gdje su šume (LU28) zamijenile rezidencijalna područja srednje gustoće (LU3), do 29 dana gdje su poljoprivredne površine zamijenjene gusto izgrađenim rezidencijalnim područjima (LU2). Za razliku od promjena broja ljetnih dana uslijed klimatskog utjecaja, promjena zbog modifikacija namjene zemljišta ne zahvaća cijelu domenu. Uz ranije klimatske uvjete, značajne promjene toplinskog opterećenja uočene su za 28 % ukupne domene, dok je uz recentne klimatske uvjete taj udio 21 % (Tablica 5.4.2). Značajne promjene uočene su uglavnom u područjima gdje su modifikacije klasa namjene zemljišta grupirane te se u tim područjima javljaju i najveće amplitude promjene (Slika 5.4.7). Udio domene gdje je došlo do promjene u namjeni zemljišta te su zabilježene i značajne promjene Tx25, uz raniju klimu iznosi 26 %, dok je uz recentne klimatske uvjete taj postotak 20 %. Ipak, značajne promjene uočene su i u okolini spomenutih koherentnih struktura gdje su se dogodile određene promjene zemljišnog pokrova. Ovaj rezultat upućuje na mogući utjecaj modifikacija namjene zemljišta na toplinsko opterećenje i izvan područja zahvaćenog promjenama, a koji je vjerojatno povezan s fizikalnim procesima koji uključuju advekciju i evapotranspiraciju. Ovaj je efekt tek nešto izraženiji uz ranije klimatske uvjete (2 %) nego za simulaciju uz recentnu klimu (1 %).



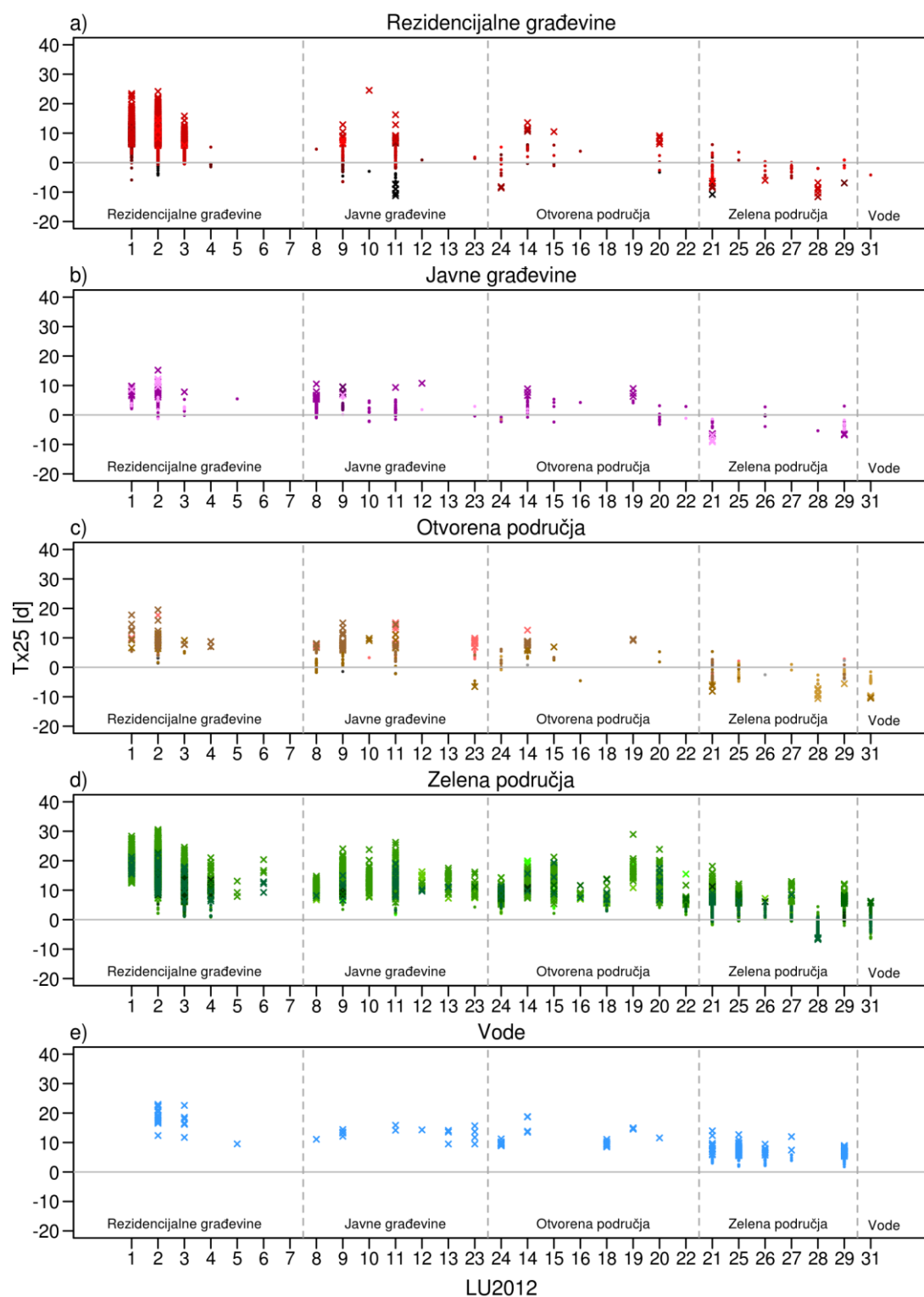
Slika 5.4.7 Promjena broja ljetnih dana (Tx25) zbog modifikacija u namjeni zemljišta i statistička značajnost na nivou 5 % (crni simbol) uz klimatske uvjete za: a) prošlo razdoblje (CL6190) i b) recentno razdoblje (CL9120). Mjesta na kojima je došlo do promjena u namjeni zemljišta označena su točkama, dok su mjesta s uočenom značajnom promjenom Tx25, ali bez prisutnih promjena u namjeni zemljišta označena simbolom x.

U nastavku su analizirana samo područja gdje je došlo do promjena u nekoj od klasa namjene zemljišta (Slika 5.4.8). Zbog jednostavnosti, ranija situacija namjene zemljišta grupirana je u šest odgovarajućih grupa: rezidencijalna izgrađena područja, javna izgrađena

područja, otvorena područja, zelena područja i vodena područja. Boja simbola odgovara situaciji grada iz 1968., dok je situacija iz 2012. označena na osi apscisa. Za područja koja su u ranijoj situaciji grada bila u rezidencijalnoj izgrađenoj grupi (Slika 5.4.8a), porast je uočen tamo gdje su to sada izgrađena područja ili otvorena područja. Ipak, određene kombinacije promjena u klasi namjene zemljišta su rezultirale i smanjenjem Tx25. U područjima gdje su područja s vegetacijom ili vodene površine zamijenile rezidencijalna izgrađena područja, detektirano je smanjenje toplinskog opterećenja. Za područja koja su u ranijoj situaciji grada bila javna izgrađena (Slika 5.4.8b) ili otvorena područja (Slika 5.4.8c), dobiveni su slični rezultati kao i za rezidencijalna izgrađena područja (Slika 5.4.8a). U područjima koja su prije bila zelene površine (Slika 5.4.8d), uočen je porast toplinskog opterećenja za većinu klasa namjene zemljišta. Smanjenje je uočeno tek za neka područja šuma (LU28) i voda (LU31) koja su prije bila neka od drugih zelenih klasa. Također, promjena iz vodene površine (Slika 5.4.8e) u neku drugu klasu namjene zemljišta rezultirala je porastom toplinskog opterećenja pri čemu je ta promjena općenito jača za rezidencijalna izgrađena područja, a slabija za područja s vegetacijom.

Tablica 5.4.2 Ukupan udio ćelija domene koje bilježe značajnu promjenu Tx25 (Ukupno) te doprinos ćelija za koje je i klasa namjene zemljišta (LU) promijenjena (LU različit) te onih bez LU promjena (LU isti) između situacije grada iz 1968. i 2012. uz pozadinske klimatske uvjete u razdoblju 1961. – 1990. (CL6190) i 1991. – 2020. (CL9120).

Klimatski uvjeti	Ukupno	LU različit	LU isti
CL6190	28 %	26 %	2 %
CL9120	21 %	20 %	1 %



Slika 5.4.8 Promjena broja ljetnih dana (Tx25) zbog promjena u klasama namjene zemljišta za lokacije gdje su uočene promjene u namjeni zemljišta. Svaki panel i boja simbola odgovara ranijoj situaciji grada iz 1968., dok recentna situacija grada iz 2012. godine odgovara oznakama na osi apscisa.

5.4.5 Diskusija

Cilj ovog dijela analize bila je procjena doprinosa promjena namjene zemljišta i klimatskih uvjeta promjeni toplinskog opterećenja definiranog kao broj ljetnih dana. Ranije stanje namjene zemljišta grada opisano je situacijom iz 1968. godine, dok recentno stanje odgovara 2012. godini. Klimatski uvjeti koji opisuju raniju i recentnu klimu definirani su s dva uzastopna klimatološka razdoblja: 1961. – 1990. i 1991. – 2020. Valjda napomenuti kako doprinos promjena u klimatskim uvjetima, uz klimatske promjene sadrži i prirodnu varijabilnost klime.

Detektirane razlike u namjeni zemljišta između dvije promatrane situacije grada odgovaraju promjenama karakterističnim za proces urbanizacije: porast gusto izgrađenih područja i smanjenje područja s vegetacijom. Slične promjene namjene zemljišta uočene su i u drugim gradovima (npr., Grigorasi i Uritescu 2019; Harmay i sur. 2021; Holec i sur. 2020; Pauleit i sur. 2005). Na temelju meteoroloških podataka izmjerenih na postaji Zagreb-Maksimir, klimatski uvjeti u recentnom razdoblju bili su topliji, sušniji i sa slabijim vjetrom u usporedbi s onima u ranijem razdoblju. Topliji klimatski uvjeti u recentnom razdoblju u skladu su s detektiranim značajnim porastom temperature zraka na globalnoj razini (npr. Alexander i sur. 2006), kao i nad područjem Zagreba (Nimac i sur. 2021, 2022b). U usporedbi s široko analiziranim promjenama temperature zraka, vremenske promjene relativne vlažnosti i brzine vjetra nisu toliko istražene. Ipak, smanjenje relativne vlažnosti u recentnom razdoblju u skladu je se s rezultatima prikazanim u Vicente-Serrano i sur. (2018) gdje je uočen negativan trend relativne vlažnosti tijekom tople sezone nad širim područjem Europe. Smanjenje relativne vlažnosti je djelomično i posljedica porasta temperature zraka u skladu s Clausius-Clapeyron-ovom jednadžbom. Stoga bi u budućnosti bilo korisno dodatno analizirati trendove i drugih varijabli poput specifične vlažnosti. Uočeno smanjenje brzine vjetra odgovara tzv. *wind stiling*-u koji je detektiran i komentiran u više studija (npr. Dumitrescu i sur. 2015, Zhang i sur. 2019). Uočene promjene klimatskih uvjeta također odgovaraju i promjenama temperature zraka, relativne vlažnosti i brzine vjetra koje se mogu očekivati kao posljedica procesa urbanizacije (npr. Oleson i sur. 2015, Klaić i sur. 2002, Žuvela-Aloise 2017).

Dobiveno je kako porast toplinskog opterećenja uslijed promjena u namjeni zemljišta i klimatskim uvjetima između dva promatrana razdoblja iznosi oko 88 % ukupne vrijednosti iz ranijeg razdoblja. Ovaj porast nije jednak na cijeloj domeni i zamjetne su razlike ovisno o klasi namjene zemljišta. Najveći porast bilježe gusto izgrađena rezidencijalna područja, dok je najmanji u područjima s vegetacijom, naročito šumama i staroj gradskoj jezgri. Na Slici 5.3.1 vidi se kako dugoperiodična oscilacija utječe na rezultate za ovdje obuhvaćena razdoblja.

Naime, broj ljetnih dana u razdoblju 1961. – 1990. je ispod, a u razdoblju 1991. – 2020. iznad linije trenda. Dakle, dobiveni relativno veliki porast toplinskog opterećenja za 88 % je djelomično i rezultat odabira 30-godišnjih razdoblja koja odgovaraju dolu i brijegu krivulje dugoperiodične oscilacije.

Utjecaj klimatskih uvjeta pokazao je dominantan doprinos porastu toplinskog opterećenja (88 % ukupnog porasta). Promjena zbog klimatskih uvjeta je na nižem području grada relativno jednolika i ovisna o nadmorskoj visini. Procijenjeno je da iznad visine od oko 160 m promjena toplinskog opterećenja počinje opadati stopom od 3 dana svakih 100 m. Ovaj rezultat je djelomično i posljedica definicije toplinskog opterećenja kao broja toplih dana. Slično je dobiveno u drugom poglavlju rada gdje je porast ljetnih dana na postaji PUN slabiji nego na drugim gradskim postajama (Slika 5.2.3b). Kako je već spomenuto maksimalna temperatura od 25 °C na postaji PUN odgovara 98. percentilu, dok je na drugim postajama oko 80-tog. Stoga će za isti porast maksimalne temperatura zraka, pomak odgovarajuće razdiobe udesno ka višim vrijednostima, rezultirati manjim porastom broja ljetnih dana za postaji PUN.

Budući da su promjene u namjeni zemljišta prisutne na određenim izoliranim dijelovima domene, promjene u toplinskom opterećenju su također lokalnog karaktera. Slične rezultate navode i drugi autori koji su ispitivali utjecaj implementacije zelene i plave infrastrukture (npr. Gal i sur. 2021, Geletić i sur. 2020, Oswald i sur. 2020, Žuvela-Aloise i sur. 2016) ili učinak urbanizacije na promjene toplinskog opterećenja (npr. Holec i sur. 2020, Schau-Noppel i sur. 2020). U skladu s time, prosječna promjena toplinskog opterećenja je mnogo slabija (oko 12 %) u usporedbi s promjenom zbog klimatskih uvjeta budući da veći dio domene pokazuje slabu ili nikakvu promjenu, kao i zbog prisutnih negativnih vrijednosti koje dodatno smanjuju prosječnu vrijednost. Iako je doprinos utjecaja promjene namjene zemljišta ukupnoj promjeni toplinskog opterećenja relativno slab, raspon tih vrijednosti je mnogo veći u usporedbi od onog za klimatski utjecaj pa je tako najveći porast simuliran u izgrađenim sredinama, a najveće smanjenje u područjima s vegetacijom. Na cijeloj je domeni porast zbog klimatskih uvjeta veći od promjena povezanih s promjenama zemljišnog pokrova, no ipak te razlike ponegdje dosežu do 3 dana. Dakle, iako promjene klimatskih uvjeta značajnije doprinose ukupnom porastu toplinskog opterećenja nego promjene namjene zemljišta, promjene prostorne varijabilnosti toplinskog opterećenja je uglavnom posljedica promjena u zemljišnom pokrovu.

Detaljna analiza utjecaja promjena namjene zemljišta na promjene toplinskog opterećenja pokazala je kako je njegov porast uglavnom zabilježen u područjima koja su prije bila zelena ili vodena, kao i onima pretvorenim u izgrađene površine. Promjena gusto izgrađenog

rezidencijalnog dijela javnim građevinama rezultirala je ponegdje i smanjenjem toplinskog opterećenja. Uočeni su slučajevi gdje je ista promjena namjene zemljišta na jednom mjestu rezultirala pozitivnom, a na drugom negativnom promjenom toplinskog opterećenja. Ovaj rezultat navodi na zaključak kako ista mjera u različitom okruženju može imati različit odgovor. Dakle, osim kombinacija promjena klasa namjene zemljišta, raspored i način njihove implementacije može pojačati ili oslabiti toplinsko opterećenje. Tako je najveći porast i smanjenje toplinskog opterećenja uočeno u područjima gdje su promjene namjene zemljišta bile veće koherentne strukture. Na taj način je promjena dodatno pojačana za razliku od područja gdje u promjene u namjeni zemljišta bile prostorno odvojene. Ovaj je rezultat u skladu s zaključcima koje navode Žuvela-Aloise i sur. (2016) te Geletič i sur. (2020). Na nekim mjestima oko područja s većim promjenama namjene zemljišta nije bilo promjena u namjeni zemljišta no ipak su detektirane statistički značajne promjene toplinskog opterećenja. Ovaj "prošireni" signal zbog interakcije s okolnim područjem izraženiji je u simulaciji s klimatskim uvjetima iz ranijeg razdoblja u odnosu na situaciju s uvjetima recentnije klime. Utjecaj interakcije okolnog područja i prevladavajućih meteoroloških uvjeta naveden je i u radovima Žuvela-Aloise i sur. (2016) i Žuvela-Aloise (2017).

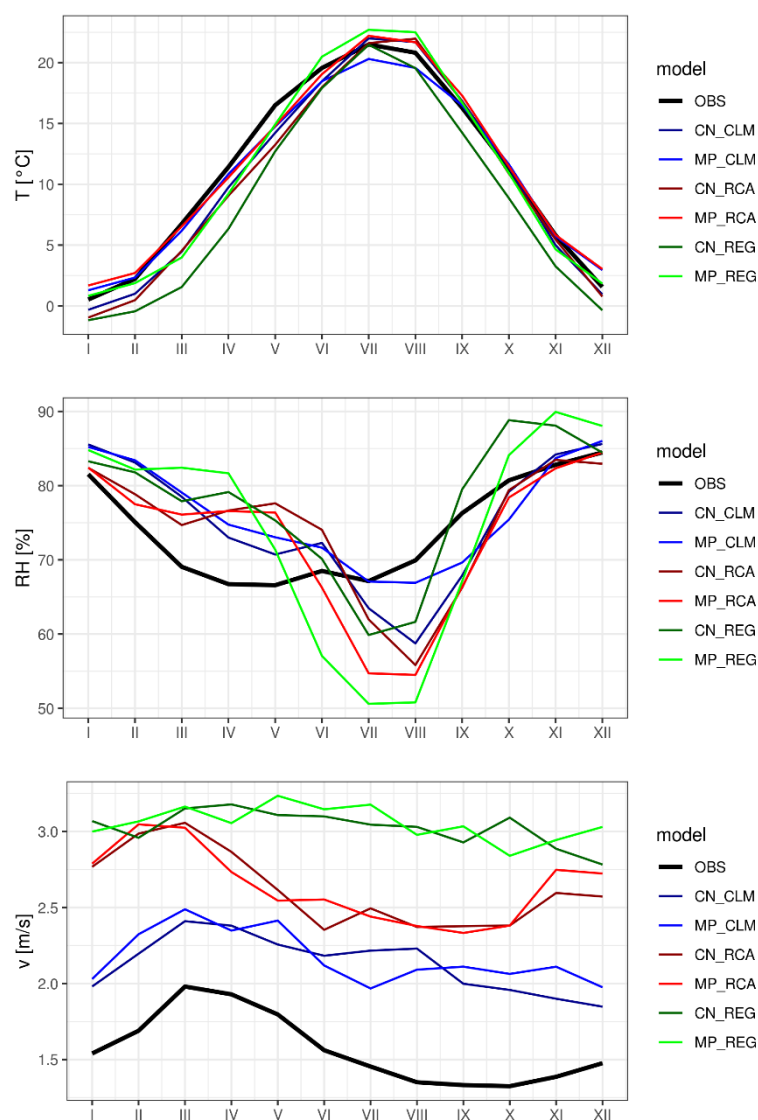
Svi navedeni zaključci ukazuju na to da na efikasnost određene mjere adaptacije utječe mnogo faktora poput lokalnih klimatskih uvjeta (Yu i sur. 2018), načina implementacije, okoline, itd. Nadalje, ovi rezultati ističu važnost ocjene efikasnosti pojedine mjere u budućim klimatskim uvjetima korištenjem regionalnih klimatskih projekcija, kao i prethodnu validaciju (i eventualnu korekciju) brzine vjetra, a ne samo temperature zraka i relativne vlažnosti. Stoga je u idućem koraku analizirano očekivano toplinsko opterećenje grada u uvjetima buduće (toplije) klime.

5.5. Procjena toplinskog opterećenja u uvjetima buduće klime

5.5.1 Korekcija pristranosti u modelima

Zbog ranije spomenutih nepouzdanosti u klimatskim modelima, preporuča se koristiti ansambl više različitih RCM-a i GCM-a. Za potrebe simulacija klime grada u uvjetima buduće (toplije) klime korištene su simulacije RCM-a iz inicijative EURO-CORDEX. S obzirom da uvijek postoji odstupanje modeliranih vrijednosti od izmjerenih, potrebno je modelirane podatke korigirati s obzirom na izmjerene podatke u referentnom razdoblju. Ovdje su u tu svrhu korišteni podaci s postaje ZGM u razdoblju 1981. – 2010. Na Slici 5.1.1 prikazan je godišnji hod temperature zraka, relativne vlažnosti i brzine vjetra prema podacima s postaje ZGM i podacima odabranih modela. Općenito se može reći da modeli podcjenjuju temperaturu zraka, no za pojedine realizacije u određenim mjesecima uočava se i precjenjivanje. Prosječno je odstupanje najveće za regionalni model REG forsiran globalnim modelom CN ($-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), dok je najmanje za regionalni model RCA forsiran globalnim modelom MP ($0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Generalno su za sva tri regionalna modela odstupanja od mjerenja veća uz rubne uvjete iz globalnog modela CN. Ipak, godišnji hod temperature zraka u Zagrebu relativno je dobro opisan modeliranim podacima. S druge strane, odstupanja su veća za relativnu vlažnost i brzinu vjetra. Odstupanja relativne vlažnosti najveća su za regionalni model REG forsiran globalnim modelom CN (3.4 %), a najmanja za isti regionalni model forsiran globalnim modelom MP ($<0.1\text{ }\%$). Iako su prosječne vrijednosti odstupanja relativne vlažnosti prilično malene, iz godišnjeg hoda se primjećuje kako je to posljedica većeg precjenjivanja u hladnom i podcjenjivanja u toplom dijelu godine. Svi modeli sustavno precjenjuju brzinu vjetra tijekom cijele godine pri čemu je odstupanje najmanje za regionalni model CLM, a najveće za regionalni model REG. U skladu s navedenim uočenim odstupanjima, korekcija pristranosti napravljena je za svaki mjesec i svaki model zasebno.

U ovom istraživanju, korigirana je pristranost dnevnih podataka temperature zraka, relativne vlažnosti i brzine vjetra iz RCM-a. Podaci su grupirani za svaki mjesec zasebno te su određeni koeficijenti regresije između RCM podataka i mjerenja s postaje ZGM. Ranije dobiveni rezultati pokazali su da osim temperature zraka i vlažnost kao i vjetar utječu na toplinsko opterećenje. Korekcija je napravljena za svaku realizaciju zasebno te je zatim svaka od njih korištena kao ulaz za model MUKLIMO_3, odnosno u kuboidnu metodu.



Slika 5.5.1 Godišnji hod prosječne a) temperature zraka, b) relativne vlažnosti i c) brzine vjetra prema izmjeranim podacima na postaji Zagreb-Maksimir (crna linija) i odabranih regionalnih modela (linije u boji) za razdoblje 1981. – 2010.

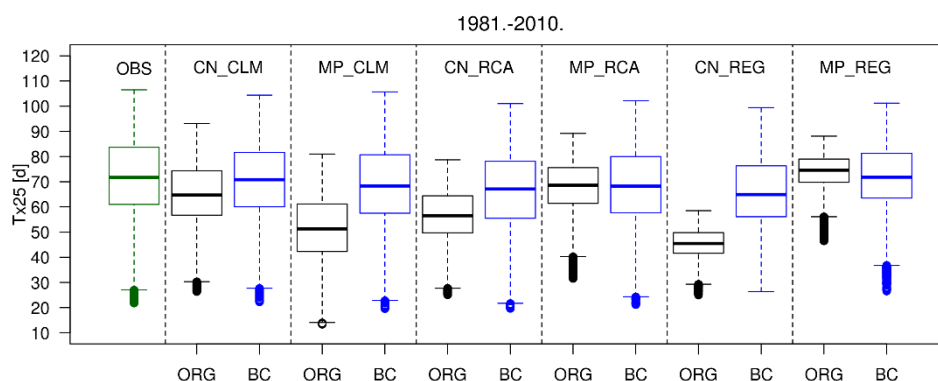
Odnos sortiranih vrijednosti sva tri parametra u odnosu na mjerenja s postaje prikazan je na Slikama S9-S11 u prilogu za svaki regionalni model. Na osi apscisa dane su sortirane vrijednosti varijabli iz modela, dok su na ordinati sortirane vrijednosti mjerenja s postaje. Uočena su odstupanja različitih dijelova kumulativnih razdioba unutar pojedinog mjeseca. U prosjeku se uočava podcjenjivanje modela za hladne ekstreme i umjerene vrijednosti temperature, dok za tople ekstreme modeli u prosjeku precjenjuju. Odstupanja simulirane relativne vlažnosti iz RCM-a znatno su izraženija nego za temperaturu zraka. Općenito se u svim modelima uočava podcjenjivanje za niske vrijednosti vlažnosti, te precjenjivanje za visoke

vrijednosti. Nakon što su određeni koeficijenti linearne regresije, isti se koriste za korekciju pristranost temperature zraka, relativne vlažnosti i brzine vjetra u projekcijskim razdobljima za svaki od modela.

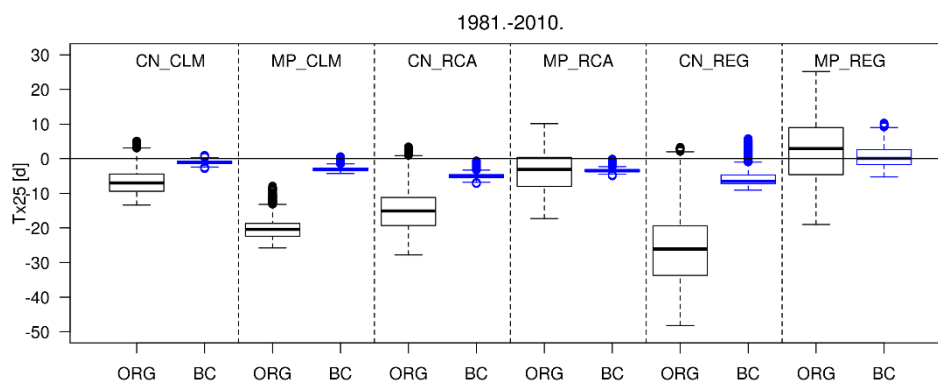
5.5.2 Procjena toplinskog opterećenja u referentnom razdoblju

U prvom su koraku izvorne vrijednosti regionalnih modela korištene kao ulazni podaci u kuboidnu metodu na temelju čega je za svaku od RCM realizacija dobiveno polje Tx25 u razdoblju 1981. – 2010. Kontrolno polje predstavlja toplinsko opterećenje dobiveno kada se u kuboidnoj metodi kao ulaz koriste mjerenja s postaje ZGM. Na Slici 5.5.2 se vidi kako je za pojedine regionalne modele relativno dobru reproducirana srednju vrijednost broja ljetnih dana na promatranoj domeni u odnosu na kontrolno polje, dok je prostorna varijabilnost u svim modelima smanjena što je djelomično posljedica izraženijeg miješanja zraka zbog većih brzina vjetra simuliranih regionalnim modelima. Najveće odstupanje u odnosu na kontrolno polje daje regionalni model REG forsiran globalnim modelom CN koji značajno podcjenjuje amplitudu i varijabilnost polja toplinskog opterećenja. Rezultat je to najvećeg podcjenjivanja temperature zraka, te precjenjivanja relativne vlažnosti i brzine vjetra u ovom modelu u odnosu na njihove izmjerene vrijednosti s postaje ZGM (Slika 5.5.1). Kada se usporede polja Tx25 za svaku realizaciju u odnosu na izmjerene vrijednosti (Slika 5.5.3) razlike su u prosjeku negativne, osim za regionalni model REG forsiran globalnim modelom MP za koji je i prosječna vrijednost odstupanja pozitivna. Precjenjivanje polja Tx25 za ovu realizaciju očito je posljedica precijenjene temperature zraka i podcijenjene relativne vlažnosti u toplom dijelu godine (Slika 5.5.1).

Nakon korekcije pristranosti sva tri parametra uočava se bolje podudaranje polja Tx25 u odnosu na kontrolno polje. Osim amplitude, znatno je poboljšana i njegova prostorna varijabilnost. Budući da je pokazano da forsiranje modela MUKLIMO_3 korigiranim podacima RCM-ova rezultira simulacijama koje vjerno reproduciraju simulirano polje koje je dobiveno uz forsiranje modela izmjerenim podacima, ista je korekcija primijenjena i na podatke u projekcijskom razdoblju.



Slika 5.5.2 Modelirani prosječan broj ljetnih dana (Tx25) na području Zagreba u razdoblju 1981. – 2010. kada se kao ulazni podaci u kuboidnu metodu koriste mjerenja s postaje Zagreb-Maksimir (OBS), izvorni podaci regionalnih modela (ORG) te korigirani podaci regionalnih modela (BC).



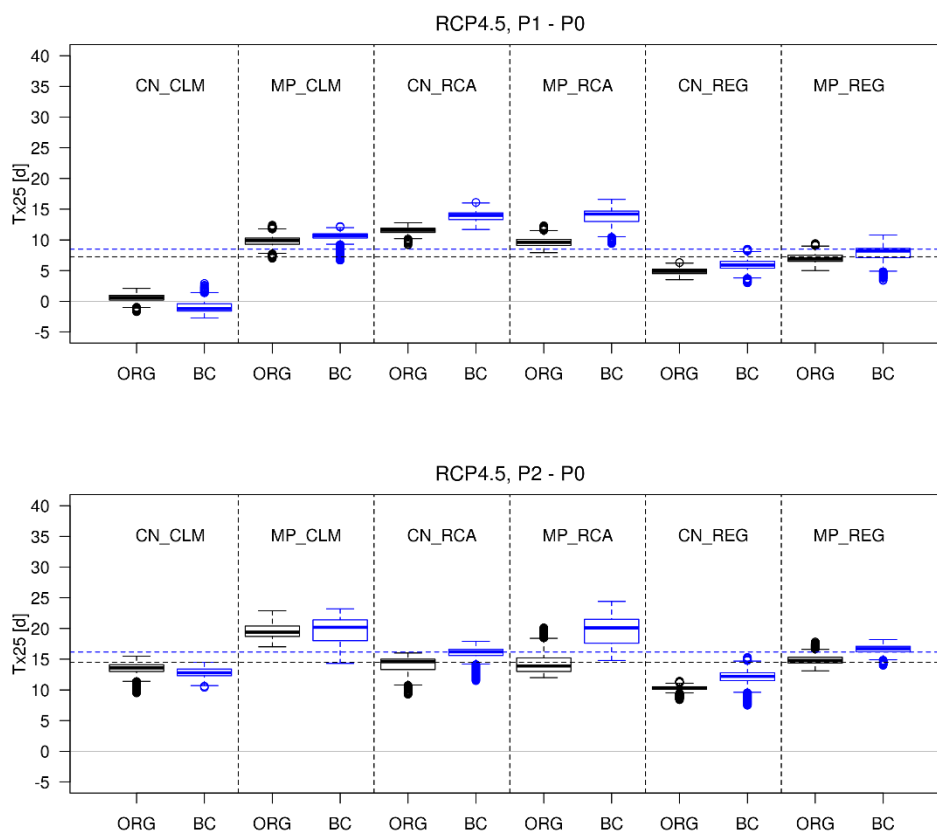
Slika 5.5.3 Razlika modeliranog prosječnog broja ljetnih dana (Tx25) na temelju izvornih podataka regionalnih modela (ORG) te nakon korekcije pristranosti (BC) u odnosu na kontrolno polje dobiveno na temelju podataka mjerenja s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010.

5.5.3 Procjena toplinskog opterećenja u uvjetima buduće klime

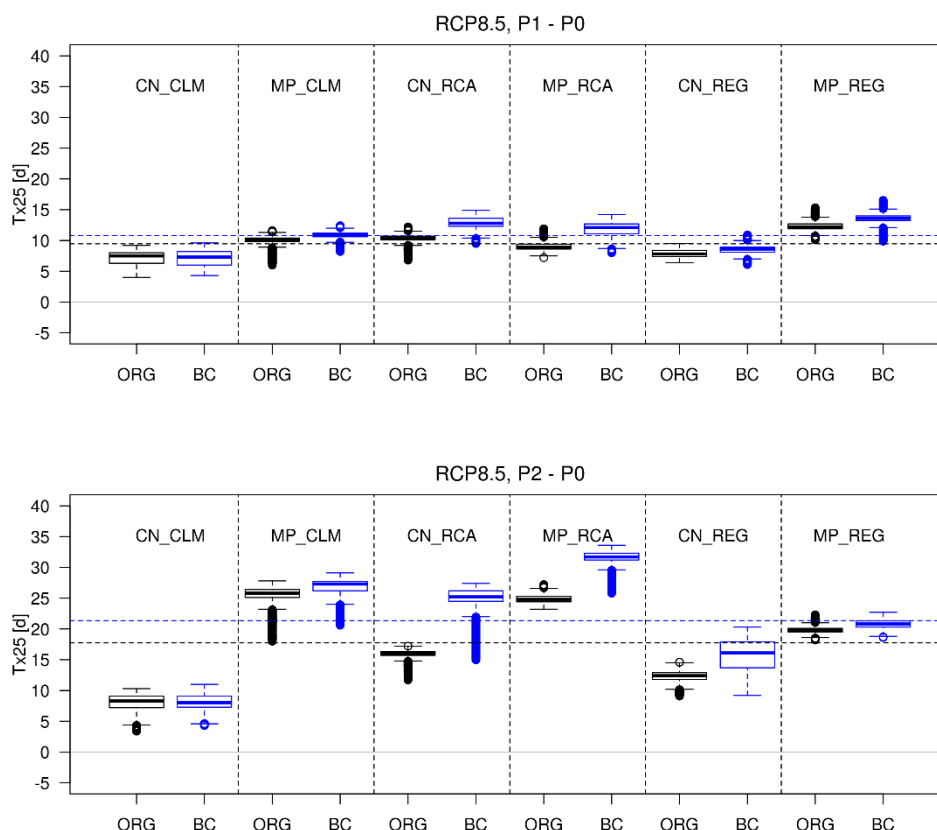
U prethodnom poglavlju pokazano je kako pristranost u regionalnim modelima utječe na apsolutne vrijednosti modeliranog polja. U nastavku je istražen odziv promjena polja toplinskog opterećenja za odabrane RCP-ove i projekcijska razdoblja s obzirom na pristranost u modelima. Odnosno, ako se procjenjuje samo očekivana promjena toplinskog opterećenja u budućnosti ima li potrebe raditi korekciju pristranosti. Stoga su na Slici 5.5.4 prikazane promjene toplinskog opterećenja za scenarij RCP4.5 u projekcijskim razdobljima 2011. – 2040. i 2041. – 2070. u odnosu na referentno razdoblje 1981. – 2010., dok je na Slici 5.5.5 prikazano isto, ali za scenarij RCP8.5. U prvom projekcijskom razdoblju promjene toplinskog opterećenja procijenjene na temelju izvornih podataka regionalnih modela su općenito usporedive promjenama dobivenim uz korigirane podatke za oba promatrana scenarija. Izuzetak je regionalni model RCA gdje je promjena u opterećenju bez korekcije podcijenjena. U kasnijem projekcijskom razdoblju razlike su ipak nešto izraženije. Uz scenarij RCP4.5 podcjenjivanje promjene najveće je za regionalni model RCA forsiran globalnim modelom MP, dok je za scenarij RCP8.5 najveće podcjenjivanje za regionalni model RCA forsiran globalnim modelom MP. Veće podcjenjivanje očekivanog opterećenja uz scenarij RCP8.5 zabilježeno je i za regionalni model RCA forsiran globalnim modelom MP te regionalni model REG forsiran globalnim modelom CN.

Prema scenariju RCP4.5, u razdoblju 2011. – 2040. mogu se očekivati promjene u broja ljetnih dana od oko -3 dana do 18 dana (Slika 5.5.4 gore). Rasap projekcija modela je za ovu situaciju prilično izražen pri čemu je porast najizraženiji za kombinacije regionalnog modela RCA, dok je za regionalni model CLM forsiran globalnim modelom CN promjena Tx25 na dijelovima domene čak negativna. U daljem projekcijskom razdoblju 2041. – 2070. može se očekivati još jači porast oko 5 dana pa sve do 25 dana pri čemu je porast najjače izražen za regionalni model RCA forsiran globalnim modelom MP, a najslabiji za regionalni model REG forsiran globalnim modelom CN. Za sva tri regionalna modela porast je jače izražen uz rubne uvjete iz globalnog modela MP.

Uz scenarij RCP8.5, promjene u prvom projekcijskom razdoblju usporedive su s odgovarajućim promjenama za scenarij RCP4.5, dok je u drugom razdoblju porast znatno izraženiji (Slika 5.5.5 dolje). Prema RCP8.5 u razdoblju 2041. – 2070. može se očekivati porast Tx25 od oko 3 dana do preko 35 dana. I ovdje je najveći porast za regionalni model RCA forsiran globalnim modelom MP, a najslabiji za regionalni model CLM forsiran globalnim modelom CN.



Slika 5.5.4 Očekivana promjena modeliranog broja toplih dana (Tx25) na temelju izvornih (ORG) i korigiranih (BC) podataka regionalnih modela za scenarij RCP4.5 u razdoblju 2011. – 2040. (P1) i 2041. – 2070. (P2) u odnosu na referentno razdoblje 1981. – 2010. (P0). Isprekidane linije odgovaraju prosječnim vrijednostima promjene za izvorne podatke i korigirane podatke.



Slika 5.5.5 Očekivana promjena modeliranog broja toplih dana (Tx25) na temelju izvornih (ORG) i korigiranih (BC) podataka regionalnih modela za scenarij RCP8.5 u razdoblju 2011. – 2040. (P1) i 2041. – 2070. (P2) u odnosu na referentno razdoblje 1981. – 2010. (P0). Isprekidane linije odgovaraju prosječnim vrijednostima promjene za izvorne podatke i korigirane podatke.

5.5.4 Diskusija

Usporedba podataka odabranih regionalnih modela s izmjerenim podacima na postaji ZGM u referentnom razdoblju (1981. – 2010.) pokazala je općenito podcjenjivanje temperature zraka i precjenjivanje brzine vjetra, dok je za relativnu vlažnost uočeno precjenjivanje u hladnijem dijelu godine i podcjenjivanje u toplijem. Korekcija pristranosti dnevnih podataka napravljena je za svaki mjesec i svaki model zasebno.

Važnost korekcije pristranosti pokazana je na primjeru rezultata MUKLIMO_3 modela u kombinaciji s kuboidnom metodom uz korištenje izvornih podataka regionalnih modela u usporedbi s kontrolnim poljem toplinskog opterećenja dobivenim na temelju podataka s postaje ZGM. Zbog jačeg vjetra u regionalnim modelima, za sve realizacije regionalnih modela prostorna varijabilnost polja je znatno manja u odnosu na kontrolno polje. Također, za regionalne modele kod kojih je uočeno izraženije podcjenjivanje temperature zraka i amplituda

polja toplinskog opterećenja je bila niža od očekivane. Nakon korekcije pristranosti, obilježja dobivenih polja toplinskog opterećenja su postala slična onima za kontrolno polje.

Analiza utjecaja pristranosti u regionalnim klimatskim modelima na procjenu promjene toplinskog opterećenja u uvjetima buduće klime pokazala je relativno sličan odziv polja dobivenih na temelju izvornih i korigiranih podataka regionalnih modela. Tek je za određene realizacije regionalnih modela uočeno veće podcjenjivanje očekivanog porasta toplinskog opterećenja dobivenog na temelju izvornih podataka. Ipak, prosječne vrijednosti cijelog ansambla relativno su slične u ranijem projekcijskom razdoblju, dok u kasnijem projekcijskom razdoblju za scenarij RCP8.5 te razlike su zamjetne.

Za odabrane realizacije regionalnih modela dobiven je rasap očekivanog opterećenja. Ipak, u prosjeku svi modeli ukazuju na porast opterećenja u budućoj klimi koji je izraženiji u kasnijem projekcijskom razdoblju, kao i jači za scenarij RCP8.5. Porast toplinskog opterećenja u uvjetima buduće klime dobiven je i za druge europske gradove (Früh i sur. 2011, Geletić i sur. 2019b, Oswald i sur. 2020, Schau-Noppel i sur. 2020, Skarbit i Gal 2016), no ipak valja spomenuti kako postoje razlike u odabiru regionalnih modela, kao i referentnog te projekcijskih razdoblja. Osim razlika u odabranim modelima i razdobljima analize, valja istaknuti i razlike u metodama korekcije pristranosti. Tako npr. Schau-Noppel i sur. (2020) koriste izvorne podatke regionalnih projekcija, računaju razlike u odnosu na odgovarajuće referentno razdoblje te ih pridodaju reprezentativnom polju dobivenom na temelju podataka mjerenja. Oswald i sur. (2020) koriste metodu mapiranja kvantila za korekciju temperature zraka, dok relativnu vlažnost procjenjuju pomoću korigirane temperature zraka i apsolutne vlažnosti iz modela.

Dobiveni rezultati ukazuju na važnost korekcije pristranosti u regionalnim klimatskim modelima, posebno u analizama u kojima je fokus na apsolutnim vrijednostima polja kao npr. pri procjeni učinkovitosti implementacije pojedinih mjera ublažavanja klimatskih promjena. Očekivana promjena toplinskog opterećenja na temelju nekorrigiranih podataka znatnije je podcijenjena tek za situaciju u kojoj je očekivan najjači porast (kasnije projekcijsko razdoblje uz scenarij RCP8.5), dok su u preostalim situacijama te razlike male. Kako je pokazano da su pouzdane vrijednosti sva tri parametra - temperature zraka, relativne vlažnosti i brzine vjetera važne za što pouzdaniju procjenu budućih uvjeta, združena korekcija navedenih parametara u budućnosti bila bi od velikog je značaja i za druge klimatske analize. Kombinacija ta tri parametara neophodna je pri procjeni sušnih uvjeta (za procjenu evapotranspiracije), ali i za procjenu osjeta ugodnosti. Potonje je posebno interesantno s obzirom da upravo vlažni toplinski valovi predstavljaju situacije opasne po ljudsko zdravlje.

6. ZAKLJUČAK

U ovom su radu analizirana obilježja urbane klime Grada Zagreba na temelju izmjerenih podataka na meteorološkim postajama, simuliranih podataka dobivenih urbanim klimatskim modelom MUKLIMO_3 te satelitskih podataka.

Analiza promjena klimatskih obilježja na četiri meteorološke postaje u Zagrebu u razdoblju 1961. – 2019. pokazala je kako je na svim postajama došlo do promjene u klimatskim klasama definiranim prema Köppen-Geigerovoj klasifikaciji. Tako je prva promjena uočena na planinskoj postaji Puntijarka gdje je do promjene došlo zbog porasta u temperaturi najhladnijeg mjeseca pa je klima iz snježno-šumske prešla u umjerenu klimu. Iduća promjena uočena je na urbanoj postaji Zagreb-Grič uslijed porasta temperature najtoplijeg mjeseca pa je klima iz umjereno tople s toplim ljetima postala umjereno topla s vrućim ljetima. Otprilike 10-ak godina kasnije, ista je promjena uočena je i na preostale dvije postaje (prijelaz iz umjereno tople klime s toplim ljetima u umjereno toplu s vrućim ljetima). U skladu s time, u nastavku istraživanja fokus je bio na analizi toplih i hladnih ekstrema temperature zraka.

Na temelju izmjerenih podataka u istom 60-godišnjem razdoblju, uočene su razlike u obilježjima ekstremnih temperatura zraka na pojedinim postajama. Tako su najjači i topli i hladni ekstremi zabilježeni na postaji Zagreb-Pleso te vrlo slične vrijednosti na postaji Zagreb-Maksimir. Posljedica je to određenih vremenskih situacija, kao i karakteristika samih postaja. Tako se npr. najniže minimalne temperature zraka mogu objasniti čestim zimskim temperaturnim inverzijama na području Zagreba. S druge strane, najviše maksimalne temperature zraka posljedica su nekoliko faktora od kojih su neki otvorenost postaja, kao i okruženost postaja livadama. Najviše minimalne temperature zraka bilježi postaja Zagreb-Grič što je djelomično posljedica same lokacije postaje koja odudara od WMO standarda mjerenja. Najniže maksimalne temperature zraka zabilježene su na planinskoj postaji Puntijarka. Na tri su različita načina analizirane vremenske promjene ekstremnih temperatura zraka te su svi rezultati ukazali na porast minimalne i maksimalne temperature zraka na svim postajama. Prvi indikator promjena je manja (veća) učestalost premašaja određenog praga (definiranog kao odgovarajuća 5-godišnja povratna vrijednost) za minimalnu (maksimalnu) temperaturu zraka u recentnom razdoblju u usporedbi s ranijim. Drugi pokazatelj vremenskih promjena je porast povratnih vrijednosti procijenjenih za nepreklopajuća dva 30-godišnje razdoblja. Kao dodatna provjera, korišten je nestacionarni model opće razdiobe ekstrema koji je pokazao nužnost uključivanja dodatnog vremenski ovisnog parametra lokacije pri procjeni povratnih vrijednosti ekstremnih temperatura zraka. Prema statističkim pokazateljima korištenim za ocjenu

opravdanosti primjene nestacionarnog modela opće razdiobe ekstrema, uključivanje utjecaja vremenskih promjena ima jači utjecaj na maksimalnu temperaturu zraka. Dodatna analiza indeksa temperaturnih ekstrema pokazala je kako je značajan porast toplih te smanjenje hladnih indeksa. Osim toga, pokazano je kako odabir referentnog razdoblja za procjenu indeksa definiranih percentilnim pragovima utječe na rezultate analize trenda. Budući da je razdoblje 1961. – 1990. hladnije od razdoblja 1981. – 2010., stoga su i odgovarajući 10. i 90. percentili za maksimalnu i minimalnu temperaturu zraka niži u prvom razdoblju. Iz tog je razloga porast toplih (smanjenje hladnih) indeksa izraženiji kada je razdoblje 1981. – 2010. (1961. – 1990.) odabrano kao referentno razdoblje. Osim toga, i sam izračun iznosa trenda hladnih indeksa je ograničen. Naime, uz prag koji je definiran u starijem (a time i hladnijem razdoblju), u novijem (toplijem) razdoblju često u potpunosti izostaju hladni indeksi. Ipak, neovisno o odabiru referentnog razdoblja, trend ljetnih toplih indeksa znatno je jače izražen u usporedbi s odgovarajućim trendom zimskih hladnih indeksa.

U nastavku analize fokus je bio na toplim situacijama definiranim maksimalnom temperaturom zraka, odnosno parametar koji je korišten kao mjera toplinskog opterećenja je broj ljetnih dana. Za procjenu toplinskog opterećenja na području Grada Zagreba, korišten je urbani klimatski model MUKLIMO_3 u kombinaciji s kuboidnom metodom. Analizirani su utjecaji procesa različitih prostornih i vremenskih skala na klimu u gradu.

Analiziran je utjecaj Sjeverno-atlantske oscilacije (NAO) na obilježja urbane klime grada. Istražen je utjecaj kombinacije zimskog i ljetnog NAO-a u smislu neizravnog (odgođenog) i izravnog utjecaja. Brojna su dosadašnja istraživanja pokazala kako se tijekom pozitivne faze zimskog NAO-a na području južne Europe i Sredozemlja mogu očekivati sušniji i topliji od prosjeka zimski uvjeti, i suprotno za negativnu fazu. Tijekom pozitivne faze ljetnog NAO-a, na istom se području mogu očekivati hladniji i kišniji ljetni uvjeti, a suprotno za negativnu fazu. Na temelju podataka izmjerenih na postaji Zagreb-Maksimir pokazano je kako je toplinsko opterećenje najveće za one godine kada je pozitivan zimski NAO popraćen negativnim ljetnim NAO-om, a najmanji je za suprotnu kombinaciju. S druge strane, promjene toplinskog opterećenja tijekom istovjetnih faza zimskog i ljetnog NAO-a, su blaže što je rezultat suprotnog učinka tih faza. Rezultati dobiveni modelom MUKLIMO_3 pokazali su zadovoljavajuće podudaranje s podacima izmjerenim na postajama Zagreb-Grič i Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010. Najveće toplinsko opterećenje je dobiveno u izgrađenim područjima, dok je manje takvih događaja u području s vegetacijom i vodom. Analiza utjecaja NAO-a na temelju rezultata modeliranja dala je relativno slične rezultate onima dobivenim na temelju mjerenja s

postaje. Najjači porast toplinskog opterećenja u odnosu na prosječno stanje dobiven je za kombinaciju pozitivnog zimskog i negativnog ljetnog NAO-a dok je najjače smanjenje dobiveno za suprotnu situaciju. Osim promjena amplitude toplinskog opterećenja, uočene su i neke promjene prostorne varijabilnosti polja ovisno o NAO uvjetima. Tako je za kombinaciju koja odgovara dužim sušnim uvjetima uočen jači porast broja ljetnih dana u područjima s vegetacijom, vjerojatno kao posljedica smanjenog efekta ohlađivanja procesom evapotranspiracije. Ova teza istražena je na sličan način kao i u analizi utjecaja NAO-a, no sada su na temelju podataka s postaje Zagreb-Maksimir procijenjeni sušni uvjeti opisani standardiziranim oborinskim evapotranspiracijskim indeksom (SPEI) za sezonu siječanj-svibanj te lipanj-kolovoz. Na sličan način kao i za utjecaj NAO-a je analiziran utjecaj sušnih uvjeta koji su prethodili ljetu te sušnih uvjeta tijekom ljeta. Rezultati analize na temelju indeksa SPEI, potvrdili su ranije dobivene rezultate analize utjecaja NAO-a. Uočen utjecaj sušnijih uvjeta od prosjeka koji su prethodili ljetu na prostornu varijabilnost polja toplinskog opterećenja provjeren je i uz pomoć satelitskih podataka koji su ukazali na isti zaključak - veći temperaturni gradijent za situacije s vlažnim uvjetima u kasnu zimu-proljeće u usporedbi sa situacijama kada je ljetu prethodilo sušno razdoblje.

U drugom dijelu analize rezultata numeričkih simulacija modelom MUKLIMO_3 obuhvaćeno je ispitivanje utjecaja promjena u klimatskim uvjetima i namjeni zemljišta na promjene toplinskog opterećenja. Ranije stanje grada opisano je situacijom namjene zemljišta iz 1968. godine, dok recentnijoj situaciji grada odgovara stanje iz 2012. godine. Klimatski uvjeti definirani su za dva standardna klimatološka razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. Bitno je ovdje naglasiti kako tako definirani klimatski uvjeti sadrže doprinos klimatskih promjena, ali i klimatske varijabilnosti te su i rezultati pod oba utjecaja. Dobiveno je kako promjene klimatskih uvjeta dominantno doprinose amplitudi porasta, dok promjene namjene zemljišta većinski doprinose prostornoj varijabilnosti ukupne promjene toplinskog opterećenja. Dok su promjene toplinskog opterećenja zbog klimatskih utjecaja značajne na cijeloj domeni, promjene zbog modifikacija namjene zemljišta značajne su samo na određenim ograničenim područjima, uglavnom gdje je došlo do promjena u namjeni. Promjene toplinskog opterećenja uzrokovane promjenom klimatskih uvjeta uglavnom su ovisne o nadmorskoj visini, dok su promjene zbog modifikacija namjene zemljišta očekivano ovisne o klasama namjene. Ipak, i u analizi klimatskih utjecaja pokazalo se kako je na istim nadmorskim visinama promjena toplinskog opterećenja ovisna o namjeni zemljišta, odnosno klasama. Tako je promjena toplinskog opterećenja nešto veća u izgrađenim područjima nego u područjima s vegetacijom i vodom.

Iako je utjecaj promjena namjene zemljišta u prosjeku znatno slabiji od klimatskog utjecaja, raspon vrijednosti je mnogo veći te poprima i pozitivne i negativne vrijednosti, za razliku od klimatskog utjecaja koji se manifestira samo kao samo porast toplinskog opterećenja. Najveći lokalni porast toplinskog opterećenja zbog promjena u namjeni zemljišta je uočen u područjima gdje su poljoprivredna područja zamijenjena izgrađenim rezidencijalnim područjima, dok je najveće smanjenje na lokaciji gdje je rezidencijalno izgrađeno područje zamijenjeno šumom. Općenito se može zaključiti da je zamjena zelenih površina izgrađenim klasama rezultirala porastom toplinskog opterećenja, dok je u obrnutim slučajevima došlo do njegovog smanjenja. Pokazalo se kako je bitan i način izvršenih promjena u zemljišnom pokrovu. Tako je u slučaju grupiranih promjena učinak jači nego kada su one lokalne i raspršene. Uočeno je kako postoje manje razlike u rezultatima analize utjecaja modifikacija namjene zemljišta uz različite klimatske uvjete. Tako je udio značajnih promjena toplinskog opterećenja na cijeloj domeni veći uz klimatske uvjete iz ranijeg razdoblja. Osim toga, značajne promjene toplinskog opterećenja uočene su i na mjestima na kojima nije bilo promjena u namjeni zemljišta, ali su izmijenjena područja u neposrednoj blizini. Ovi rezultati, kao i ranije spomenuta ovisnost utjecaja klimatskih uvjeta o klasama namjene zemljišta, sugeriraju da nije moguće potpuno odvojiti ta dva utjecaja zbog međusobnih interakcija i povratnih sprega. Dakle, pri procjeni učinkovitosti implementacije određene mjere prilagodbe na klimatske promjene, potrebno je koristiti odgovarajuće klimatske uvjete (tj. procjena učinkovitosti na temelju trenutne klime može dati nešto drugačije rezultate nego kada se koriste budući klimatski uvjeti).

Za potrebe procjene očekivanog toplinskog opterećenja u budućim klimatskim uvjetima, korištene su simulacije dostupne unutar inicijative EURO-CORDEX za scenarije emisije stakleničkih plinova RCP4.5 i RCP8.5. Kao referentno razdoblje odabrano je 1981. – 2010., dok je bliža budućnost predstavljena razdobljem 2011. – 2040., a dalja budućnost 2041. – 2070. Na temelju usporedbe podataka o temperaturi zraka, relativnoj vlažnosti i brzini vjetra odabranih regionalnih modela s izmjerenim podacima na postaji Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010., pokazano je kako je simulirana temperatura zraka uglavnom podcijenjena u usporedbi s mjerenjima, no ipak su za većinu odabranih modela ta odstupanja relativno mala. Relativna vlažnost u prosjeku je precijenjena u hladnom dijelu godine, a podcijenjena u toplijem. Brzina vjetra je u svim modelima tijekom cijele godine precijenjena. Zbog navedenih odstupanja, izvršena je korekcija pristranosti za svaki model i svaki mjesec zasebno. Rezultati modela MUKLIMO_3 u kombinaciji s kuboidnom metodom gdje su kao informacija o klimatskim uvjetima korišteni nekorrigirani podaci RCM-ova ukazuju na važnost korekcije

pristranosti rezultata modela. Kontrolno polje opterećenja dobiveno je na isti način samo su kao klimatski uvjeti korišteni izmjereni podaci s postaje Zagreb-Maksimir. Prosječno je amplituda toplinskog opterećenja znatno podcijenjena kao posljedica nižih temperatura u modelima, dok je manja prostorna varijabilnost polja u usporedbi s kontrolnim poljem rezultat prejakog vjetera. Nakon korekcije pristranosti, za sve regionalne modele simulirano polje toplinskog opterećenja relativno je slično kontrolnom polju. Dodatno je istražen utjecaj pristranosti regionalnih modela na procjenu promjena toplinskog opterećenja. Općenito su dobivene relativno male razlike u očekivanom opterećenju procijenjenom korištenjem izvornih i korigiranih podataka regionalnih modela, osim za scenarij RCP8.5 u kasnijem projekcijskom razdoblju kada su te razlike ipak izraženije. U prosjeku svi modeli ukazuju na porast opterećenja u oba projekcijska razdoblja pri čemu je porast izraženiji za kasnije razdoblje 2041. – 2070. te uz scenarij RCP8.5.

Dakle, detektirane promjene u klimi Zagreba kao i očekivan porast opterećenja u budućoj toplijoj klimi ukazuju na potrebu donošenja mjera prilagodbe i ublažavanja klimatskih promjena budući da klima, a samim time i njene promjene utječu na razne segmente života poput zdravlja (Tomasović i sur. 2022, Zaninović i Matzarakis 2014), opskrbu i potrošnju energije (npr. Cvitan i Sokol Jurković 2016, Kolokotroni i sur. 2012), poljoprivredu (Omazić i sur. 2020), turizam (Matzarakis i sur. 2012), infrastrukturu (Croce i sur. 2019), itd. Jedna od mogućnosti je globalnog karaktera i tiče se same emisije stakleničkih plinova pri čemu je cilj pokušati slijediti RCP4.5 scenarij. Drugi način je pak lokalnog karaktera i samim time je na to lakše utjecati. Na temelju realnih situacija namjene zemljišta grada u prošlom i recentnom razdoblju pokazano je kako je najveći porast opterećenja upravo u područjima gdje su područja s vegetacijom zamijenjena izgrađenim klasama, dok je najveće smanjenje dobiveno za suprotnu promjenu namjene zemljišta. Ti rezultati indirektno ukazuju na učinkovitost zelene infrastrukture na smanjenje toplinskog opterećenja u gradu. Pokazano je i kako način promjena namjene zemljišta kao i sama lokacija utječu na amplitudu promjene. Dobiveni rezultati mogu se povezati s rezultatima prikazanim u Žuvela-Aloise i sur. (2016) gdje je dobivena veća učinkovitost zelene infrastrukture u situacijama kada je ona primijenjena grupno u usporedbi s istom promjenom, ali koja je dislocirana na više udaljenih mjesta. Značajan rezultat dobiven u ovom istraživanju je taj da sušni uvjeti mogu umanjiti učinkovitost zelene infrastrukture. Stoga je pri planiranju takvih mjera važno osigurati sustav navodnjavanja, a osim toga i gospodarenja vodom budući da se na području Zagreba u budućnosti mogu očekivati ljetni uvjeti sušniji od prosjeka (Marinović i sur. 2021). Osim toga, veći udio zelenih površina, a samim time i propusnog tla, doprinosi smanjenju rizika od urbanih poplava. To je posebno bitno i za Zagreb

gdje je detektirana značajna intenzifikacija kratkotrajne jake oborine koja se uglavnom i javlja u toplijem dijelu godine (Nimac i sur. 2022a).

Provedeno istraživanje i ovdje prikazani rezultati ukazuju na značajne promjene klime grada Zagreba koja je općenito postala toplija. Do tih je promjena jednim dijelom došlo zbog globalnog zatopljenja, a drugim dijelom uslijed urbanizacije i lokalnih promjena u gradu. Nadalje, toplinsko opterećenje pod utjecajem je i drugih faktora od kojih se posebno izdvaja utjecaj NAO-a i sušnih razdoblja, a također možemo očekivati daljnji porast toplinskog opterećenja u budućnosti. Stoga je nužno voditi računa o mjerama ublažavanja s njime povezanih neželjenih posljedica. Ovaj je rad ukazao na važnost gradskih površina s vegetacijom koje ublažavaju neugodne klimatske uvjete, ali i na važnost osiguravanja dovoljnih količina vode za njihovo navodnjavanje tijekom sušnih razdoblja kako bi ublažavanje bilo učinkovito.

Ovim je radom dotaknut niz važnih problema vezanih uz urbanu klimu Zagreba, njene promjene i faktore koji na nju utječu. S druge strane je ovo istraživanje otvorilo neka nova pitanja. Osim dugoročnih i sezonskih utjecaja analiziranih u ovom radu, od velikog interesa bila bi analiza utjecaja različitih vremenskih tipova na toplinsko opterećenje grada čiji bi rezultati pomogli u trenutnoj reakciji sustava (u smislu upozorenja) s obzirom na kratkoročnu vremensku prognozu. Također, u ovom je radu analiziran utjecaj promjena u strukturi grada i klimatskim uvjetima u odnosu na situaciju u prošlosti. Od interesa bi bilo istu takvu analizu primijeniti na budućnost uzimajući u obzir očekivane promjene strukture grada (ili implementaciju nekih mjera prilagodbe) i klimatske promjene.

7. LITERATURA

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). *Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome*, 300.
- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC i sur. (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 111:. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- Arnfield AJ (2003) Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* 23:1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Bartholy J i Pongrácz R (2007) Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change* 57:83–95. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.002>
- Beck H, Zimmermann N, McVicar T, i sur. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* 5, 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Beguéría S i Vicente-Serrano SM (2017) Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index [R package SPEI version 1.7]. <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>. Accessed 16 May 2021
- Bronaugh B for the Pacific Climate Impacts Consortium (2020). climdex.pcic: PCIC Implementation of Climdex Routines. R package version 1.1-11. <https://CRAN.R-project.org/package=climdex.pcic>
- Bokwa A, Hajto MJ, Walawender JP i Szymanowski M (2015) Influence of diversified relief on the urban heat island in the city of Kraków, Poland. *Theoretical and Applied Climatology* 122(1), 365-382. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1577-9>
- Bokwa A, Geletič J, Lehnert M i sur. (2019) Heat load assessment in Central European cities using an urban climate model and observational monitoring data. *Energy and Buildings* 201:53–69. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.023>
- Bounoua, L., Zhang, P., Mostovoy, G., Thome, K., Masek, J., Imhoff, M., ... & Toure, A. M. (2015) Impact of urbanization on US surface climate. *Environmental Research Letters*, 10(8), 084010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084010>

- Bronaugh B for the Pacific Climate Impacts Consortium (2020). climdex.pcic: PCIC Implementation of Climdex Routines. R package version 1.1-11. <https://CRAN.R-project.org/package=climdex.pcic>
- Brugger K i Rubel F (2013) Characterizing the species composition of European Culicoides vectors by means of the Köppen-Geiger climate classification. *Parasites Vectors* 6, 333. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-6-333>
- Brugnara Y, Auchmann R, Brönnimann S, Bozzo A, Berro DC i Mercalli L (2016) Trends of mean and extreme temperature indices since 1874 at low-elevation sites in the southern Alps. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 121:3304–3325. <https://doi.org/10.1002/2015JD024582>
- Buchholz S i Kossmann M (2015) Research note. Visualisation of summer heat intensity for different settlement types and varying surface fraction partitioning. *Landscape and Urban Planning* 144, 59-64. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.002>.
- Cassou C, Terray L i Phillips AS (2005) Tropical Atlantic Influence on European Heat Waves. *Journal of Climate* 18:2805–2811. <https://doi.org/10.1175/JCLI3506.1>
- Ceglar A, Zampieri M, Toreti A i Dentener F (2019) Observed northward migration of agro-climate zones in Europe will further accelerate under climate change. *Earth's Future* 7: 1088– 1101. <https://doi.org/10.1029/2019EF001178>
- Cindrić K i Pasarić Z (2018) Modelling Dry Spells by Extreme Value Distribution with Bayesian Inference. *Pure and Applied Geophysics* 175:3891–3908. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2007-6>
- Coles S (2001) An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag, London
- Croce P, Formichi P i Landi F (2019) Climate Change: Impacts on Climatic Actions and Structural Reliability. *Applied Sciences* 9:5416. <https://doi.org/10.3390/app9245416>
- Cvitan L i Sokol Jurković R (2016) Secular trends in monthly heating and cooling demands in Croatia. *Theoretical and Applied Climatology* 125:565–581. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1534-7>
- Della-Marta PM, Luterbacher J, von Weissenfluh H Xoplaki E, Brunet M i Wanner H (2007) Summer heat waves over western Europe 1880–2003, their relationship to large-scale forcings and predictability. *Climate Dynamics* 29:251–275. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0233-1>

- Dumitrescu, A., Bojariu, R., Birsan, M. V., Marin, L., & Manea, A. (2015) Recent climatic changes in Romania from observational data (1961–2013). *Theoretical and Applied Climatology* 122, 111–119. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1290-0>
- Fischer EM, Seneviratne SI, Lüthi D i Schär C (2007) Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophysical Research Letters* 34:. <https://doi.org/10.1029/2006GL029068>
- Folland CK, Knight J, Linderholm HW, Fereday D, Ineson S i Hurrell W (2009) The Summer North Atlantic Oscillation: Past, Present, and Future. *Journal of Climate* 22:1082–1103. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2459.1>
- Founda D i Santamouris M (2017) Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports* 7:10973. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11407-6>
- Früh B, Becker P, Deutschländer T i sur. (2011) Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50:167–184. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2377.1>
- Gál T, Mahó SI, Skarbit N i Unger J (2021) Numerical modelling for analysis of the effect of different urban green spaces on urban heat load patterns in the present and in the future. *Computers, Environment and Urban Systems* 87, 101600. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101600>
- Geletič J, Lehnert M, Savić S i Milošević D (2018) Modelled spatiotemporal variability of outdoor thermal comfort in local climate zones of the city of Brno, Czech Republic. *Science of The Total Environment* 624:385–395. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.076>
- Geletič J, Lehnert M, Savić S i Milošević D (2019a) Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities. *Building and Environment* 156:21–32. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.011>
- Geletič J, Lehnert M, Dobrovolný P i Žuvela-Aloise M (2019b) Spatial modelling of summer climate indices based on local climate zones: expected changes in the future climate of Brno, Czech Republic. *Climatic Change* 152:487–502. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2353-5>

- Geletić J, Lehnert M i Jurek M (2020) Spatiotemporal variability of air temperature during a heat wave in real and modified landcover conditions: Prague and Brno (Czech Republic). *Urban Climate* 31:100588. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100588>
- Gilleland E i Katz RW (2016) extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R. *J Stat Softw* 72:1–39. <https://doi.org/10.18637/jss.v072.i08>
- Giorgi F (2006) Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33:. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, Mariotti L, Sylla MB, Bi X, ... i Branković Č (2012). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52, 7-29. <https://doi.org/10.3354/cr01018>
- Grigoraș G i Urișescu B (2019) Land use/land cover changes dynamics and their effects on surface urban heat island in Bucharest, Romania. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 80, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.009>.
- Gross G (1989) Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Beitr. Phys. Atmosph.* 62, p. 57-72.
- Guijarro JA (2019) climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products). R package version 3.1.2. <https://CRAN.R-project.org/package=climatol>
- Hammond M. J., Chen A. S., Djordjević S., Butler D. i Mark O. (2015) Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 12(1), 14-29. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.857421>
- Harmay, N.S. M., Kim, D., & Choi, M. (2021) Urban heat island associated with land use/land cover and climate variations in Melbourne, Australia. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102861. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102861>
- Hawkins E i Sutton R (2009) The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90(8), 1095-1108. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>
- He JF, Liu JY, Zhuang DF, Zhang W i Liu ML (2007) Assessing the effect of land use/land cover change on the change of urban heat island intensity. *Theoretical and Applied Climatology* 90(3), 217-226. <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0273-1>
- Herbel I, Croitoru A-E, Rus A, i sur. (2018) The impact of heat waves on surface urban heat island and local economy in Cluj-Napoca city, Romania. *Theoretical and Applied Climatology* 133:681–695. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2196-4>

- Herceg-Bulić I i Kucharski F (2014) North Atlantic SSTs as a Link between the Wintertime NAO and the Following Spring Climate. *Journal of Climate* 27:186–201. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00273.1>
- Hipel KW i McLeod AI (2005) Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. Electronic reprint of our book originally published in 1994. <http://www.stats.uwo.ca/faculty/aim/1994Book/>
- Holec J, Feranec J, Šťastný P, Szatmári D, Kopecká M i Garaj M (2020) Evolution and assessment of urban heat island between the years 1998 and 2016: case study of the cities Bratislava and Trnava in western Slovakia. *Theoretical and Applied Climatology* 141, 979-997. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03197-1>
- Hollósi B, Žuvela-Aloise M, Oswald S, Kainz A i Schöner W (2021) Applying urban climate model in prediction mode—evaluation of MUKLIMO_3 model performance for Austrian cities based on the summer period of 2019. *Theoretical and Applied Climatology* 144, 1181–1204 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03580-6>
- Hurrell JW, Kushnir Y, Ottersen G i Visbeck M (2003) An overview of the North Atlantic oscillation. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union* 134, 1-36.
- Jia G, Shevliakova E, Artaxo P, De Noblet-Ducoudré N, Houghton R, House J, Kitajima K, Lennard C, Popp A, Sirin A, Sukumar R, Verchot L (2019) Land–climate interactions. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, 133-206. <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-2/>
- Jungo P i Beniston M (2001) Changes in the anomalies of extreme temperature anomalies in the 20th century at Swiss climatological stations located at different latitudes and altitudes. *Theoretical and Applied Climatology* 69:1–12. <https://doi.org/10.1007/s007040170031>
- Juras J (1985) Neke karakteristike promjene klime Zagreba u posljednjem tridesetljeću. *Geofizika* 2:93–102
- Jurčec V (1985) Lokalni režim vjetra na području Zagreba i planinska cirkulacija. *Geofizika* 2:121–140
- Jylhä K, Tuomenvirta H, Ruosteenoja K, Niemi-Hugaerts H, Keisu K i Karhu JA (2010) Observed and Projected Future Shifts of Climatic Zones in Europe and Their Use to Visualize Climate Change Information, *Weather, Climate, and Society* 2(2), 148-167. <https://doi.org/10.1175/2010WCAS1010.1>

- Kalnay E i Cai M (2003) Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature* 423, 528–531. <https://doi.org/10.1038/nature01675>
- Katz RW i Brown BG (1992) Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change* 21:289–302. <https://doi.org/10.1007/BF00139728>
- Kioutsoukios I, Melas D i Zerefos C (2010) Statistical assessment of changes in climate extremes over Greece (1955–2002). *International Journal of Climatology* 30:1723–1737. <https://doi.org/10.1002/joc.2030>
- Klaić Z. B., Nitis T, Kos I i Moussiopoulos N (2002) Modification of the local winds due to hypothetical urbanization of the Zagreb surroundings. *Meteorology and Atmospheric Physics* 79:1–12. <https://doi.org/10.1007/s703-002-8225-z>
- Klaić Z. B. i Kvakić M. (2014). Modeling the Impacts of a Man-Made Lake on the Meteorological Conditions of the Surrounding Areas, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(5), 1121-1142. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0163.1>
- Klein Tank AMG i Können GP (2003) Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99. *Journal of Climate* 16:3665–3680. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3665:TIHODT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIHODT>2.0.CO;2)
- Klein Tank AMG, Wijngaard JB, Können GP i sur. (2002) Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology* 22:1441–1453. <https://doi.org/10.1002/joc.773>
- Klein Tank AMG, Zwiers FW i Zhang X (2009) WCDMP, 72. Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. WMO, Geneva
- Kolokotroni M, Ren X, Davies M i Mavrogianni A (2012) London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy and buildings* 47, 302-311. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.019>
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B i Rubel F (2006) World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3), 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Li D i Bou-Zeid E (2013) Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52:2051–2064. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>

- Lisac I (1984) Vjetar u Zagrebu (Prilog poznavanju klime grada Zagreba, II). *Geofizika* 1:47–134
- Lončar E (1991) Statistička analiza inverzija i visine sloja miješanja na području Zagreba. *Hrvatski Meteorološki Časopis* 26:87–98
- López-Moreno JJ i Vicente-Serrano SM (2008) Positive and Negative Phases of the Wintertime North Atlantic Oscillation and Drought Occurrence over Europe: A Multitemporal-Scale Approach. *Journal of Climate* 21:1220–1243. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1739.1>
- Lukšić I (1984) Vlažnost zraka u Zagrebu (Prilog poznavanju klime grada Zagreba, II). *Geofizika*, 1(1), 3-45.
- Makjanić B, Penzar B i Penzar I (1977) Prilog poznavanju klime grada Zagreba, I. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- Marinović I, Cindrić Kalin K, Güttler I i Pasarić Z (2021) Dry Spells in Croatia: Observed Climate Change and Climate Projections. *Atmosphere* 12(5), 652.
- Markušić S, Stanko D, Penava D, Ivančić I, Bjelotomić Oršulić O, Korbar T i Sarhosis V (2021) Destructive M6. 2 petrinja earthquake (Croatia) in 2020—Preliminary multidisciplinary research. *Remote Sensing* 13(6), 1095. <https://doi.org/10.3390/rs13061095>
- Matzarakis A, Hämmerle M, Koch E i Rudel E (2012) The climate tourism potential of Alpine destinations using the example of Sonnblick, Rauris and Salzburg. *Theoretical and Applied Climatology* 110:645–658. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0686-y>
- Meehl GA i Tebaldi C (2004) More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science* 305. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- Moberg A, Jones PD, Lister D i sur. (2006) Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901–2000. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 111, D22106:. <https://doi.org/10.1029/2006JD007103>
- Möller F (1954) Ein Kurzverfahren zur Bestimmung der langwelligen Ausstrahlung dicker Atmosphärenschichten. *Arch. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, A. 7:158-169 (na njemačkom).
- Nemec J, Gruber C, Chimani B, Auer I (2013) Trends in extreme temperature indices in Austria based on a new homogenised dataset. *International Journal of Climatology* 33:1538–1550. <https://doi.org/10.1002/joc.3532>

- Nimac I i Perčec Tadić M (2017) Complete and homogeneous monthly air temperature series for the construction of 1981–2010 climatological normals in Croatia. *Geofizika* 34:225–249. <https://doi.org/10.15233/gfz.2017.34.13>
- Nimac I, Herceg-Bulić I, Cindrić Kalin K i Perčec Tadić M (2021) Changes in extreme air temperatures in the mid-sized European city situated on southern base of a mountain (Zagreb, Croatia). *Theoretical and Applied Climatology* 146:429–441. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03689-8>
- Nimac I, Cindrić Kalin K, Renko T, Vujnović T i Horvath K (2022a) The analysis of summer 2020 urban flood in Zagreb (Croatia) from hydro-meteorological point of view. *Natural Hazards*, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05210-4>
- Nimac I, Herceg-Bulić I, Žuvela-Aloise M i Žgela M (2022b) Impact of NAO and SPEI conditions on summer urban heat load—a case study for Zagreb. *International Journal of Climatology*, 1-18. <https://doi.org/10.1002/joc.7507>
- Nitis, T., Klaic, Z. B., Kitsiou, D., & Moussiopoulos, N. (2010). Meteorological simulations with use of satellite data for assessing urban heat island under summertime anticyclonic conditions. *International Journal of Environment and Pollution*, 40(1-3), 123-135.
- Ogi M, Tachibana Y i Yamazaki K (2003) Impact of the wintertime North Atlantic Oscillation (NAO) on the summertime atmospheric circulation. *Geophysical Research Letters* 30:. <https://doi.org/10.1029/2003GL017280>
- Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA (2017) *Urban Climates*. Cambridge University Press, Cambridge
- Oleson, K.W., Monaghan, A., Wilhelmi, O., Barlage, M., Brunsell, N., Feddema, J., Hu, L., & Steinhoff, D.F. (2015) Interactions between urbanization, heat stress, and climate change. *Climatic Change* 129, 525–541. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0936-8>
- Omazić B, Prtenjak MT, Prša I i sur (2020) Climate change impacts on viticulture in Croatia: Viticultural zoning and future potential. *International Journal of Climatology* 40:5634–5655. <https://doi.org/10.1002/joc.6541>
- Oswald SM, Hollosi B, Žuvela-Aloise M, See L, Guggenberger S i sur. (2020) Using urban climate modelling and improved land use classifications to support climate change adaptation in urban environments: A case study for the city of Klagenfurt, Austria. *Urban Climate* 31, 100582. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100582>.
- Pandžić K i Likso T (2010) Homogeneity of average annual air temperature time series for Croatia. *International Journal of Climatology* 30:1215–1225.

<https://doi.org/10.1002/joc.1922>

- Pauleit S, Ennos R i Golding Y (2005) Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change—a study in Merseyside, UK. *Landscape and urban planning* 71(2-4), 295-310. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.03.009>
- Penzar B, Penzar I, Juras J i Marki A (1992) Brief review of the climatic fluctuations recorded in Zagreb between 1862 and 1990. *Geofizika* 9:57–67
- Peternel R, Srnc L, Čulig J, Zaninović K, Mitić B i Vukušić I (2004) Atmospheric pollen season in Zagreb (Croatia) and its relationship with temperature and precipitation. *International journal of biometeorology* 48(4), 186-191.
<https://doi.org/10.1007/s00484-004-0202-x>
- Podolszki L, Kosović I, Novosel T i Kurečić T (2022) Multi-Level Sensing Technologies in Landslide Research—Hrvatska Kostajnica Case Study, Croatia. *Sensors* 22(1), 177.
<https://doi.org/10.3390/s22010177>
- Pongrácz R, Bartholy J i Dezső Z (2010) Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 35:95–99. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.004>
- Pyrgou A, Hadjinicolaou P i Santamouris M (2020) Urban-rural moisture contrast: Regulator of the urban heat island and heatwaves’ synergy over a mediterranean city. *Environmental Research* 182:109102. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109102>
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rangwala I i Miller JR (2012) Climate change in mountains: a review of elevation-dependent warming and its possible causes. *Climatic Change* 114:527–547.
<https://doi.org/10.1007/s10584-012-0419-3>
- Ramamurthy P i Bou-Zeid E (2017) Heatwaves and urban heat islands: A comparative analysis of multiple cities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122:168–178.
<https://doi.org/10.1002/2016JD025357>
- Richard Y, Pohl B, Rega M, i sur. (2021) Is Urban Heat Island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)? *Urban Climate* 35:100747.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100747>
- Rigor IG, Wallace JM i Colony RL (2002) Response of Sea Ice to the Arctic Oscillation. *Journal of Climate* 15:2648–2663. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2648:ROSITT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2648:ROSITT>2.0.CO;2)

- Rockel B, Will A i Hense A (2008). The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 347-348. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0309>
- Rubel F, Brugger K, Haslinger K i Auer I (2017) The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800–2100. *Meteorologische Zeitschrift* 26(2), 115-125. <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0816>
- Rubel F, Brugger K, Walter M, Vogelgesang JR, Didyk YM, Fu S i Kahl O (2018) Geographical distribution, climate adaptation and vector competence of the Eurasian hard tick *Haemaphysalis concinna*. *Ticks and tick-borne diseases* 9(5), 1080-1089. <https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2018.04.002>
- Samuelsson P, Jones CG, Will' En U, Ullerstig A, Gollvik S, Hansson ULF., ... i Wyser K (2011). The Rossby Centre Regional Climate model RCA3: model description and performance. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63(1), 4-23. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00478.x>
- Santo FE, Lima MIP de, Ramos AM i Trigo RM (2014) Trends in seasonal surface air temperature in mainland Portugal, since 1941. *International Journal of Climatology* 34:1814–1837. <https://doi.org/10.1002/joc.3803>
- Schau-Noppel H, Kossmann M i Buchholz S (2020) Meteorological information for climate-proof urban planning - The example of KLIMPRAX. *Urban Climate* 32:100614. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100614>
- Schär C, Vidale PL, Lüthi D i sur. (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427:332–6. <https://doi.org/10.1038/nature02300>
- Scorzini AR i Leopardi M (2019) Precipitation and temperature trends over central Italy (Abruzzo Region): 1951–2012. *Theoretical and Applied Climatology* 135:959–977. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2427-3>
- Sen PK (1968) Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* 63:1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Siebert J, Sievers U i Zdunkowski W (1992) A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology* 59, p. 1-34.
- Sievers U, Forkel R i Zdunkowski W (1983) Transport equations for heat and moisture in the soil and their application to boundary layer problems. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* 56:58-83.

- Sievers U i Zdunkowski W (1986) A microscale urban climate model. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* 59:13-40.
- Sievers U (1995) Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. *Meteorologische Zeitschrift* N. F. 4, S. 3-15 (na njemačkom).
- Sievers U (2012) Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 240, Offenbach am Main, Germany (na njemačkom).
- Sievers U i Früh B (2012). A practical approach to compute short-wave irradiance interacting with subgrid-scale buildings. *Meteorologische Zeitschrift* 21(4), 349. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0331>
- Sillmann J, Thorarinsdottir T, Keenlyside N i sur. (2017) Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities. *Weather and Climate Extremes* 18:65–74. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.10.003>
- Skarbit N i Gál T (2016) Projection of intra-urban modification of night-time climate indices during the 21st century. *Hungarian Geographical Bulletin* 65(2), 181-193. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.65.2.8>
- Spinoni J, Lakatos M, Szentimrey T i sur. (2015) Heat and cold waves trends in the Carpathian Region from 1961 to 2010. *International Journal of Climatology* 35:. <https://doi.org/10.1002/joc.4279>
- Stegehuis AI, Vogel MM, Vautard R, Ciais P, Teuling AJ i Seneviratne SI (2021) Early summer soil moisture contribution to Western European summer warming. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2021JD034646. <https://doi.org/10.1029/2021JD034646>
- Straka M i Sodoudi S (2019) Evaluating climate change adaptation strategies and scenarios of enhanced vertical and horizontal compactness at urban scale (a case study for Berlin). *Landscape and Urban Planning* 183:68–78. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.11.006>
- Sulikowska A i Wypych A (2020) Summer temperature extremes in Europe: how does the definition affect the results? *Theoretical and Applied Climatology* 141:19–30. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03166-8>
- Telišman Prtenjak M, Srnc L, Peternel R, Madžarević V, Hrga I i Stjepanović B (2012) Atmospheric conditions during high ragweed pollen concentrations in Zagreb, Croatia. *International Journal of Biometeorology* 56, 1145–1158. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0520-3>

- Telišman Prtenjak M, Klaić M, Jeričević A i Cuxart J (2018) The interaction of the downslope winds and fog formation over the Zagreb area. *Atmospheric Research* 214, 213-227. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.001>.
- Teuling AJ, Seneviratne SI, Stöckli R i sur. (2010) Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. *Nature Geoscience* 3:722–727. <https://doi.org/10.1038/ngeo950>
- Teutschbein C i Seibert J (2012) Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology* 456, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Tewari M, Yang J, Kusaka H, Salamanca F, Watson C i Treinish L (2019) Interaction of urban heat islands and heat waves under current and future climate conditions and their mitigation using green and cool roofs in New York City and Phoenix, Arizona. *Environmental Research Letters* 14:034002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf431>
- Tomasović S, Sremec J, Koščak Lukač J i sur. (2022) Weather patterns and occurrence of epileptic seizures. *BMC Neurology* 22, 33. <https://doi.org/10.1186/s12883-021-02535-8>
- Tramblay Y, Koutroulis A, Samaniego L i sur. (2020) Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Science Reviews* 210:103348. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348>
- UN (2019) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations
- Unkašević M, Vujović D i Tošić I (2005) Trends in extreme summer temperatures at Belgrade. *Theoretical and Applied Climatology* 82:199–205. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0131-6>
- Unkašević M i Tošić I (2009) Changes in extreme daily winter and summer temperatures in Belgrade. *Theoretical and Applied Climatology* 95:27–38. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0364-7>
- Unkašević M i Tošić I (2013) Trends in temperature indices over Serbia: relationships to large-scale circulation patterns. *International Journal of Climatology* 33:3152–3161. <https://doi.org/10.1002/joc.3652>

- Vautard R, Honoré C, Beekmann M i Rouil L (2005) Simulation of ozone during the August 2003 heat wave and emission control scenarios. *Atmospheric Environment* 39:2957–2967. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.01.039>
- Vautard R, Yiou P, D’Andrea F i sur. (2007) Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit. *Geophysical Research Letters* 34:. <https://doi.org/10.1029/2006GL028001>
- Vicente-Serrano SM, Beguería S i López-Moreno JI (2010) A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23:1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano SM, López-Moreno JI, Lorenzo-Lacruz J, et al (2011) The NAO Impact on Droughts in the Mediterranean Region. In: Vicente-Serrano SM, Trigo RM (eds) Hydrological, Socioeconomic and Ecological Impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 23–40
- Vicente-Serrano, S.M., Nieto, R., Gimeno, L., Azorin-Molina, C., Drumond, A., El Kenawy, A., Dominguez-Castro, F., Tomas-Burguera, M., and Peña-Gallardo, M. (2018) Recent changes of relative humidity: regional connections with land and ocean processes, *Earth System Dynamics*, 9, 915–937, <https://doi.org/10.5194/esd-9-915-2018>
- Volarić B (1999) Klasična teorija fena i njegova zemljopisna raspodjela. *Hrvatski Meteorološki Časopis* 33/34:53–62
- Wilks DS (2006) Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second edition, Academic Press
- Winguth, A.M.E., & Kelp, B. (2013) The Urban Heat Island of the North-Central Texas Region and Its Relation to the 2011 Severe Texas Drought, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(11), 2418–2433. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0195.1>
- WMO (2004) WCDMP, 54. Report of the CCI/CLIVAR Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI). WMO, Geneva
- WMO i WHO (2015) Heatwaves and health: guidance on warning-system development. In: WHO. <https://www.who.int/globalchange/publications/heatwaves-health-guidance/en/>. Accessed 13 May 2021
- WMO (2017) WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals, 2017 edition. WMO, Geneva

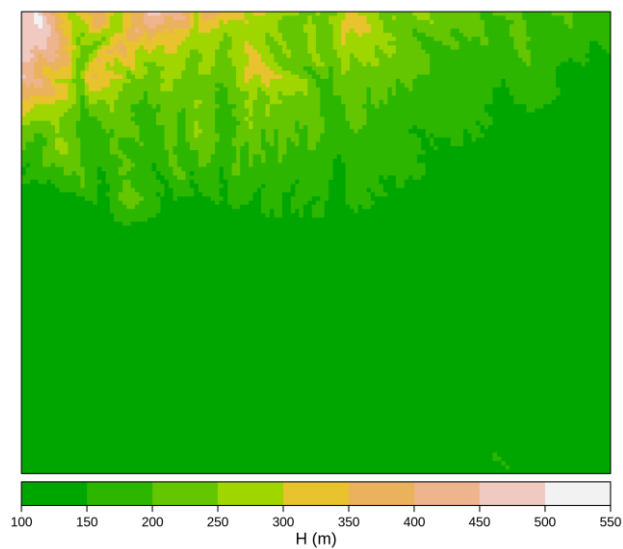
- Woollings T, Franzke C, Hodson DLR, Dong B, Barnes EA, Raible CC i Pinto JG (2015) Contrasting interannual and multidecadal NAO variability. *Climate Dynamics* 45:539–556. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2237-y>
- Yosef Y, Aguilar E i Alpert P (2020) Is it possible to fit extreme climate change indices together seamlessly in the era of accelerated warming? *International Journal of Climatology* 1–12. <https://doi.org/10.1002/joc.6740>
- Yu Z, Xu S, Zhang Y, Jørgensen G i Vejre H (2018) Strong contributions of local background climate to the cooling effect of urban green vegetation. *Scientific reports*, 8(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25296-w>
- Zaninović K, Gajić-Čapka M, Perčec Tadić M i sur. (2008) Klimatski atlas Hrvatske, Climate atlas of Croatia: 1961. - 1990. : 1971. - 2000.
- Zaninović K i Matzarakis A (2014) Impact of heat waves on mortality in Croatia. *International Journal of Biometeorology* 58:1135-1145. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0706-3>
- Zdunkowski WG, Paegle J i Reilly J (1975) The effects of soil moisture upon the atmospheric and soil temperature near the air-soil interface. *Archiv fur Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, A. 24:245-268. <https://doi.org/10.1007/BF02245367>
- Zhang X, Hegerl G, Zwiers FW i Kenyon J (2005) Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes. *Journal of Climate* 18:1641–1651. <https://doi.org/10.1175/JCLI3366.1>
- Zhang, Z., Wang, K., Chen, D., Li, J., & Dickinson, R. (2019) Increase in Surface Friction Dominates the Observed Surface Wind Speed Decline during 1973–2014 in the Northern Hemisphere Lands, *Journal of Climate*, 32(21), 7421-7435. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0691.1>
- Zhao L, Oppenheimer M, Zhu Q i sur. (2018) Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters* 13:034003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>
- Zhou B, Rybski D i Kropp JP (2017) The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific Reports* 7:4791. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04242-2>
- Žuvela-Aloise M, Koch R, Neureiter A, Böhm R i Buchholz S (2014) Reconstructing urban climate of Vienna based on historical maps dating to the early instrumental period. *Urban Climate* 10, 490-508. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.04.002>.

- Žuvela-Aloise M, Koch R, Buchholz S i Früh B (2016) Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change* 135(3), 425-438. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1596-2>
- Žuvela-Aloise M (2017) Enhancement of urban heat load through social inequalities on an example of a fictional city King's Landing. *International Journal of Biometeorology* 61:527–539. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1230-z>
- Žuvela-Aloise M, Andre K, Schwaiger H i sur. (2018) Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs. *Theoretical and Applied Climatology* 131:1005–1018. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2024-2>

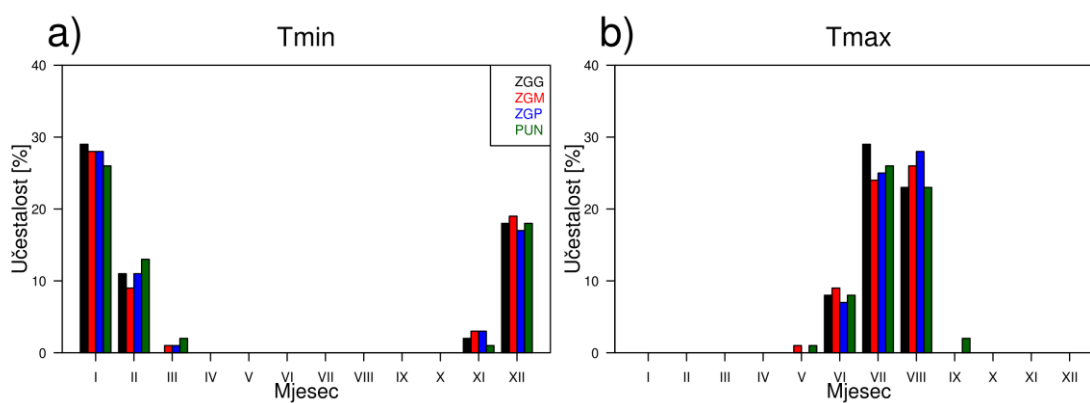
8. PRILOZI

Tablica S1 Klase namjene zemljišta na području Zagreba i njihov opis.

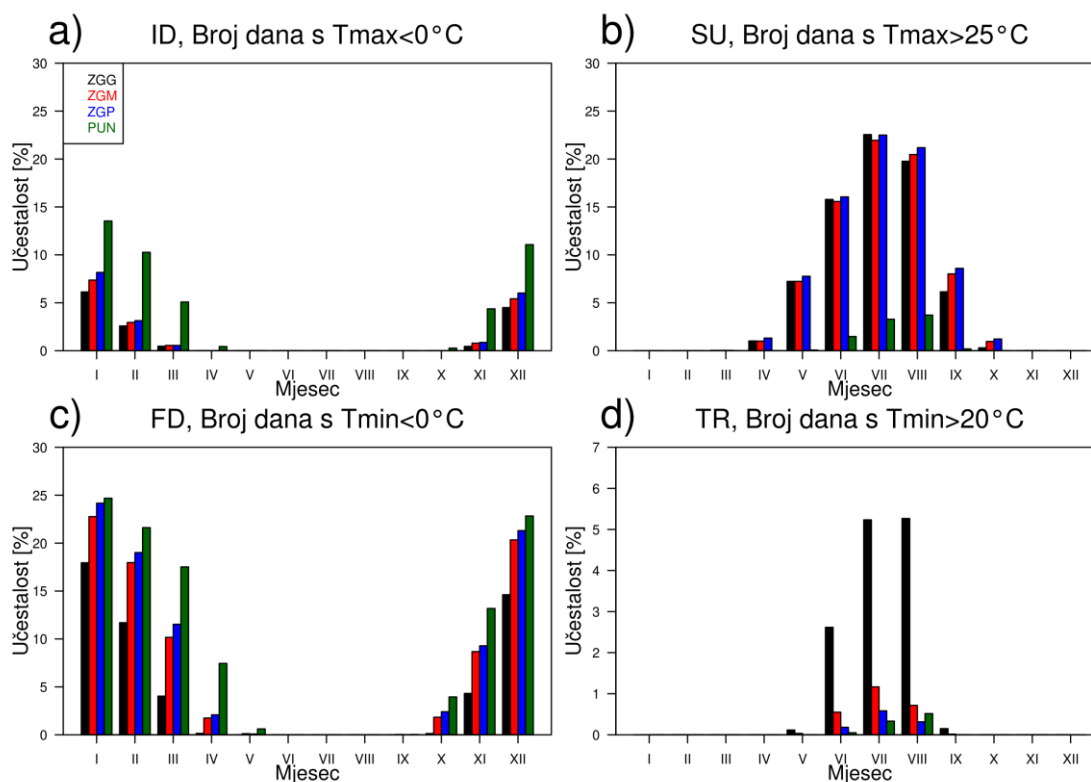
LU klasa	Opis	LU klasa	Opis
1	Rezidencijalna područja vrlo visoke gustoće izgrađenosti	16	Željeznice
2	Rezidencijalna područja visoke gustoće izgrađenosti	18	Odlagališta
3	Rezidencijalna područja srednje gustoće izgrađenosti	19	Gradilišta
4	Rezidencijalna područja niske gustoće izgrađenosti	20	Zemlja bez namjene
5	Rezidencijalna područja vrlo niske gustoće izgrađenosti	21	Parkovi
6	Mješovita rezidencijalna područja	22	Groblja
7	Stara gradska jezgra	23	Sportski objekti s građom
8	Industrija	24	Sportski objekti bez građe
9	Poslovna zona	25	Pašnjaci
10	“Shopping” centri	26	Poljoprivredna područja
11	Javne institucije	27	Poljoprivredna područja s vegetacijom
12	Vojni objekti	28	Šume
13	Energetski objekti	29	Grmolika vegetacija
14	Ceste	31	Vode
15	Parkirališta		



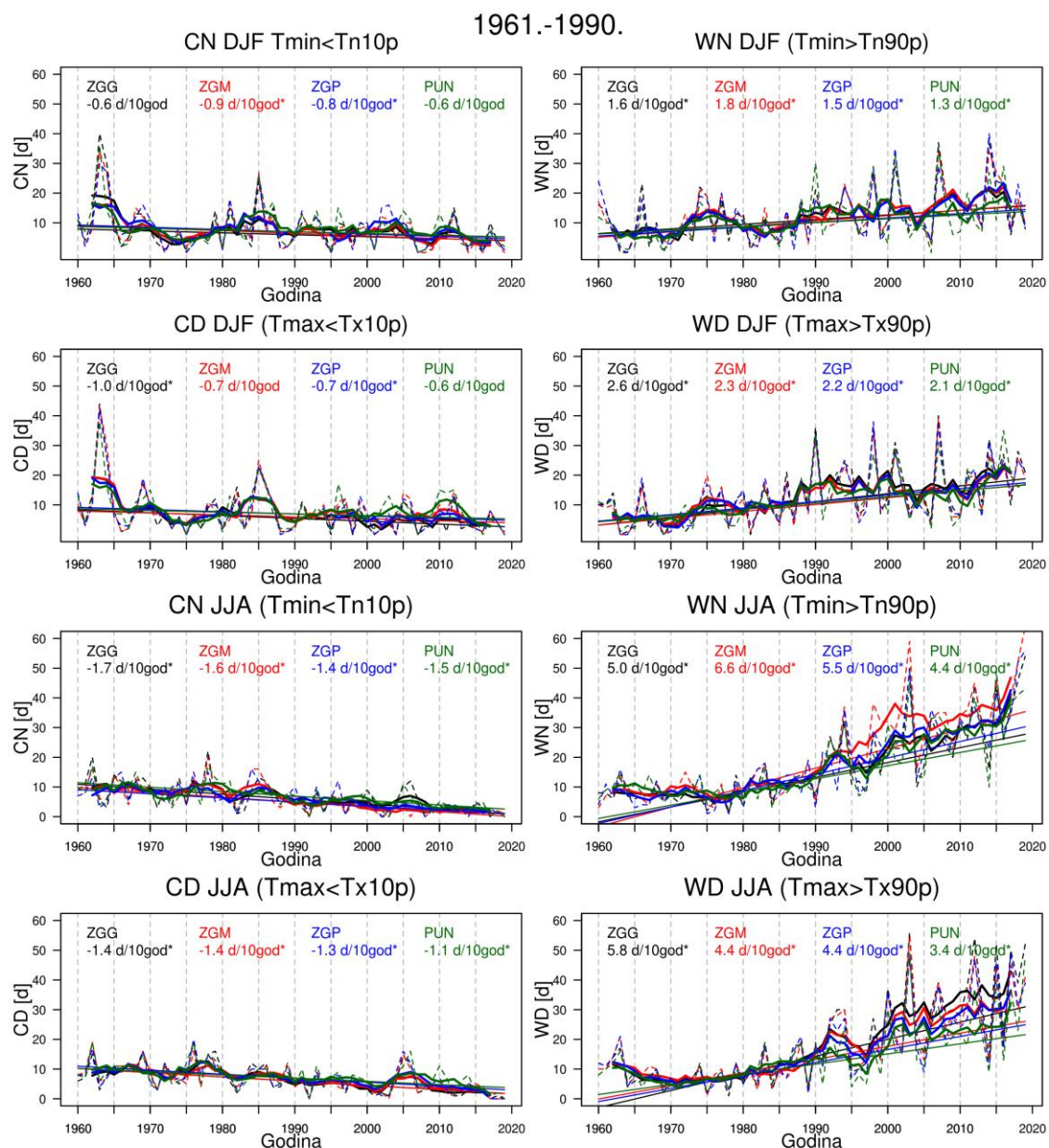
Slika S1 Digitalni model reljefa horizontalne rezolucije 100 m korišten za potrebe urbanog klimatskog modeliranja.



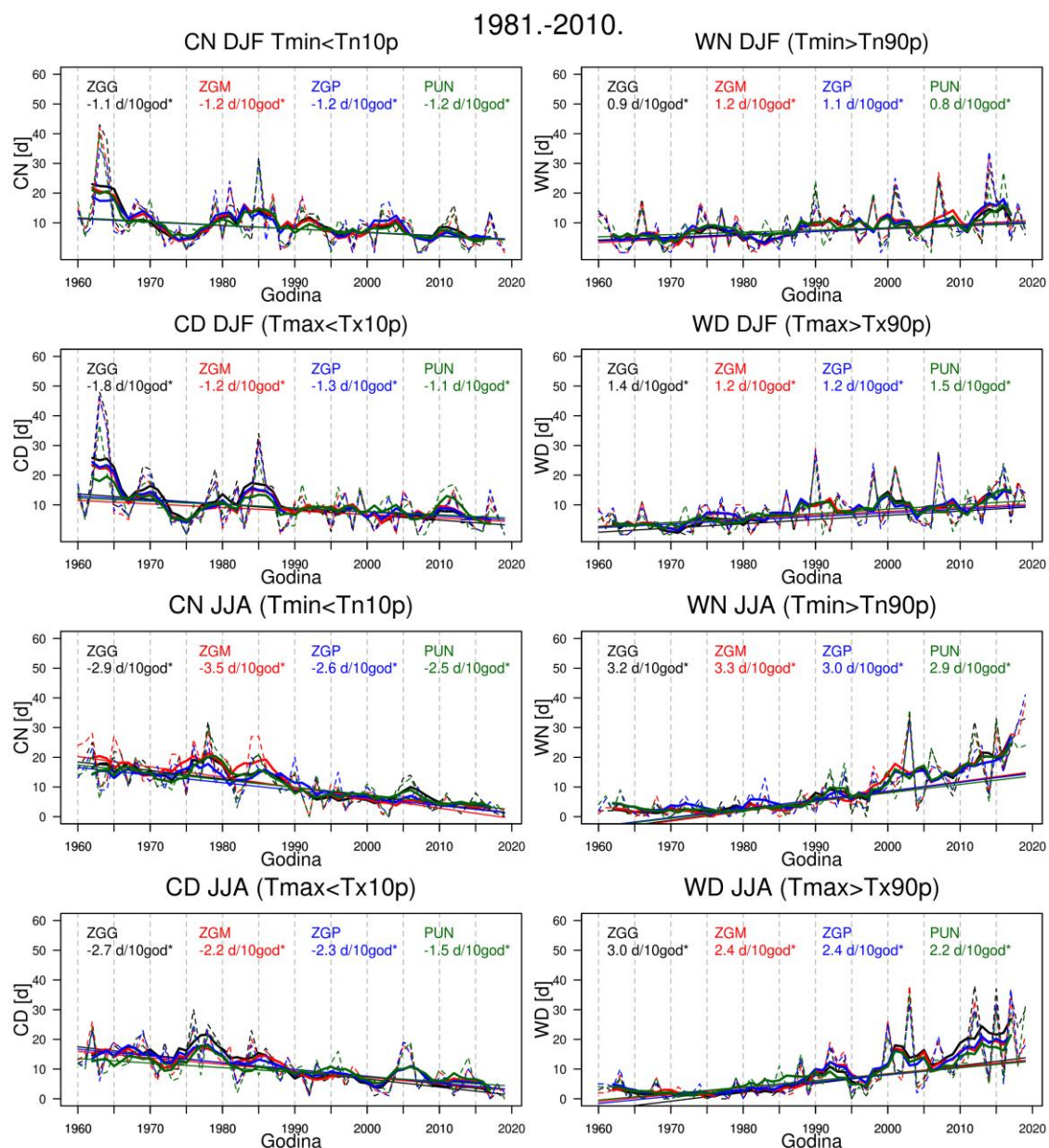
Slika S2 Učestalost pojavljivanja apsolutnih a) minimalnih i b) maksimalnih temperatura zraka na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN) u razdoblju 1960.–2019.



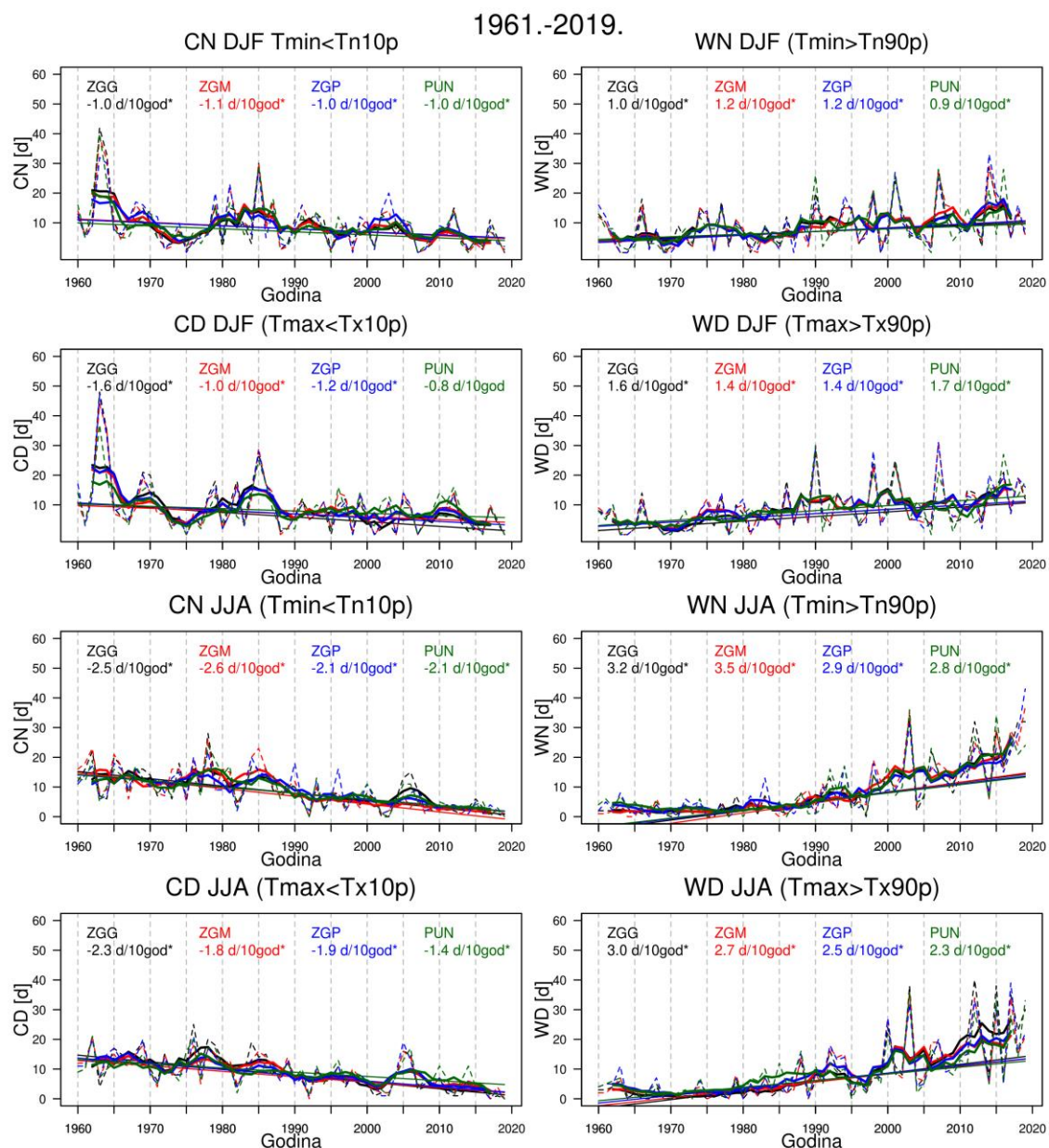
Slika S3 Učestalost pojavljivanja a) ledenih dana (ID), b) ljetnih dana (SU), c) mrzlih dana (FD) i d) tropskih noći (TR) na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN) u razdoblju 1960. – 2019.



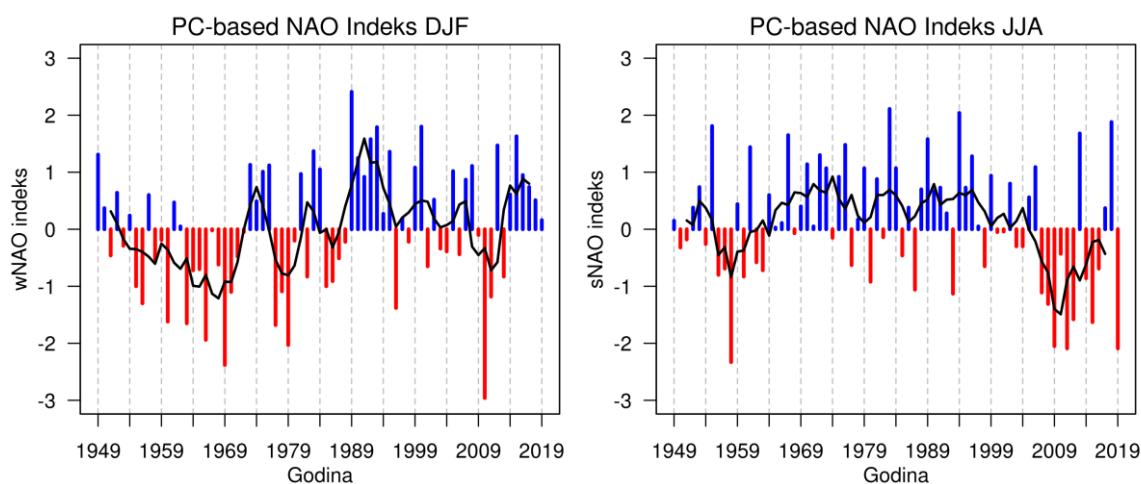
Slika S4 Vremenski niz broja a) zimskih hladnih noći, b) zimskih toplih noći, c) zimskih hladnih dana, d) zimskih toplih dana, e) ljetnih hladnih noći, f) ljetnih toplih noći, g) ljetnih hladnih dana i h) ljetnih toplih dana definiranih premašanjem odgovarajućih percentila iz referentnog razdoblja 1961. – 1990. na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN) u razdoblju 1960. – 2019.



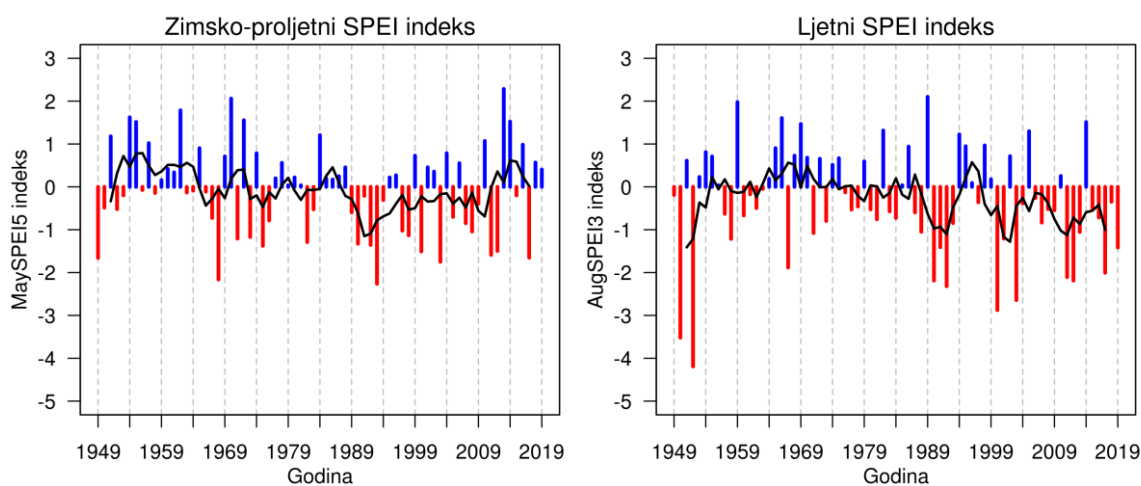
Slika S5 Vremenski niz broja a) zimskih hladnih noći, b) zimskih toplih noći, c) zimskih hladnih dana, d) zimskih toplih dana, e) ljetnih hladnih noći, f) ljetnih toplih noći, g) ljetnih hladnih dana i h) ljetnih toplih dana definiranih premašajem odgovarajućih percentila iz referentnog razdoblja 1981. – 2010. na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN) u razdoblju 1960. – 2019.



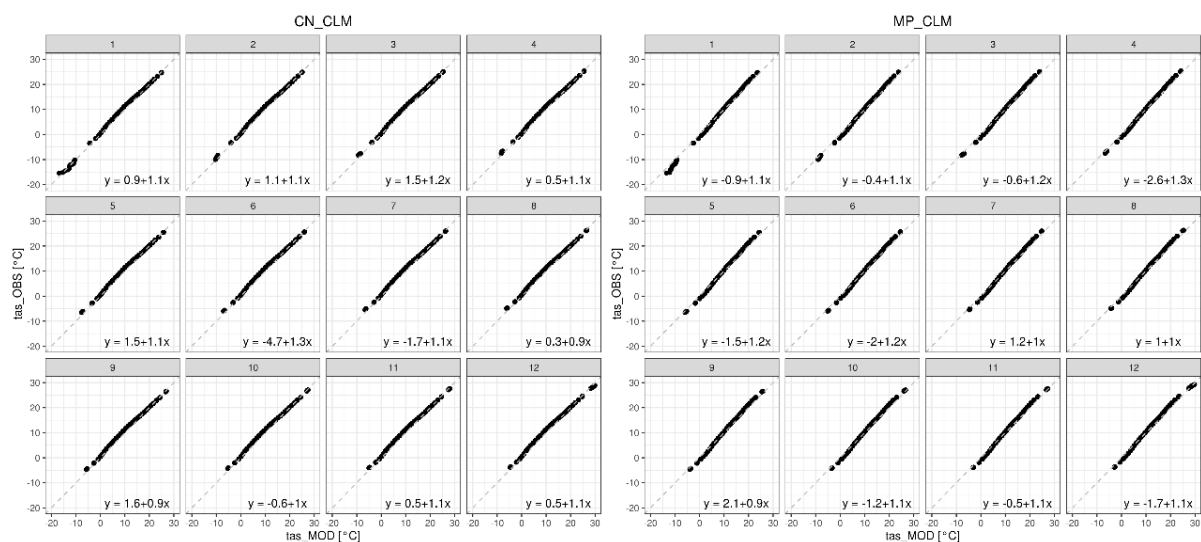
Slika S6 Vremenski niz broja a) zimskih hladnih noći, b) zimskih toplih noći, c) zimskih hladnih dana, d) zimskih toplih dana, e) ljetnih hladnih noći, f) ljetnih toplih noći, g) ljetnih hladnih dana i h) ljetnih toplih dana definiranih premašajem odgovarajućih percentila iz referentnog razdoblja 1961. – 2019. na postajama Zagreb-Grič (ZGG), Zagreb-Maksimir (ZGM), Zagreb-Pleso (ZGP) i Puntijarka (PUN) u razdoblju 1960. – 2019.



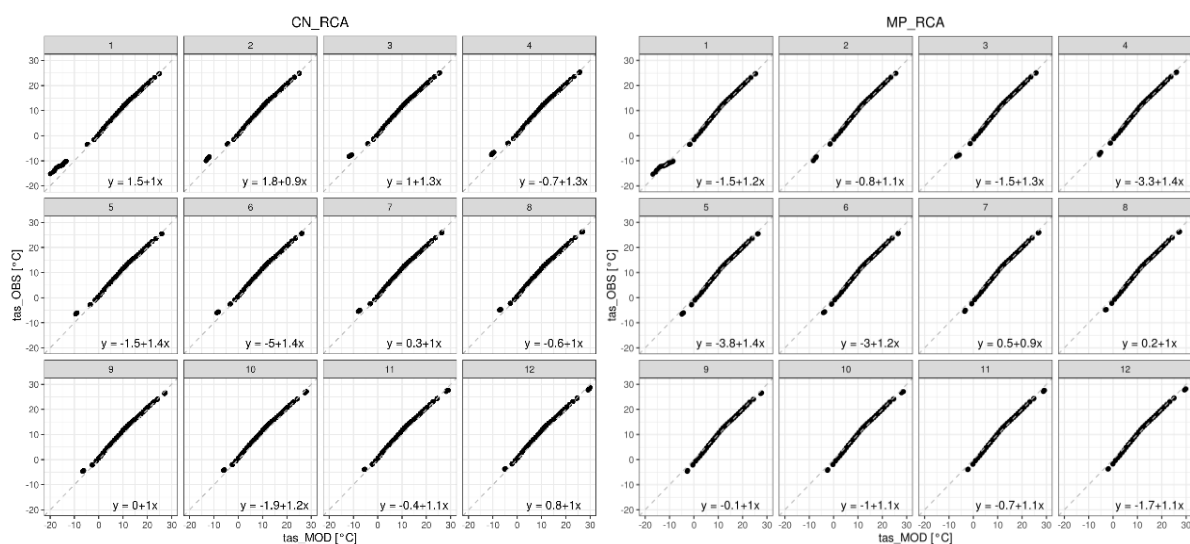
Slika S7 Zimski (lijevo) i ljetni (desno) indeks Sjeverno-atlantske oscilacije (NAO) u razdoblju 1949.–2019. Crna linija predstavlja 5-godišnji klizni binomni srednjak.



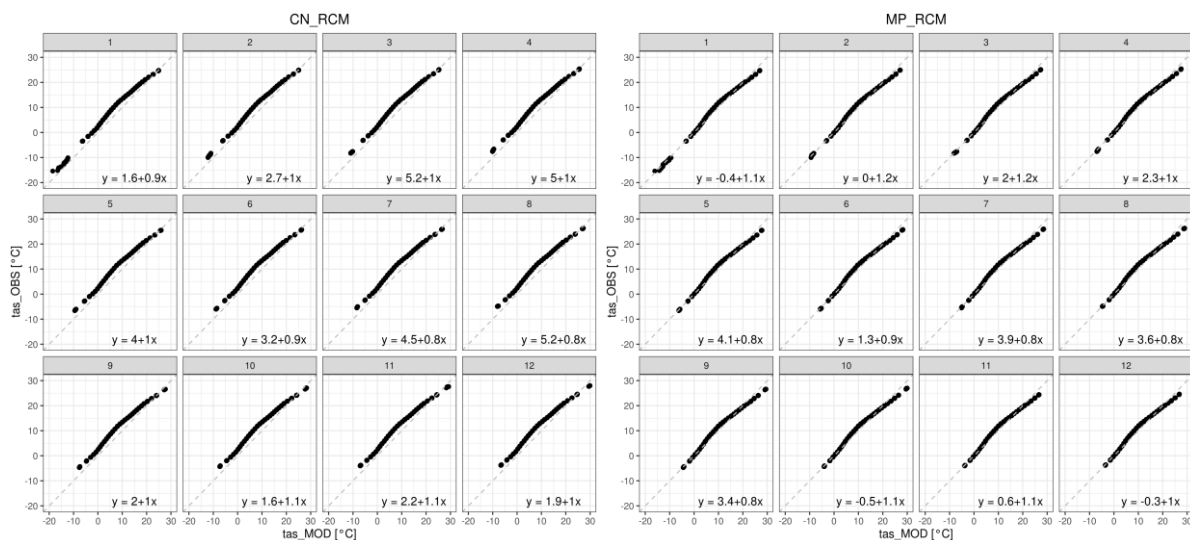
Slika S8 Zimsko-proljetni (lijevo) i ljetni (desno) standardizirani oborinski evapotranspiracijski indeks (SPEI) procijenjen na temelju podataka s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1949.–2019. Crna linija predstavlja 5-godišnji klizni binomni srednjak.



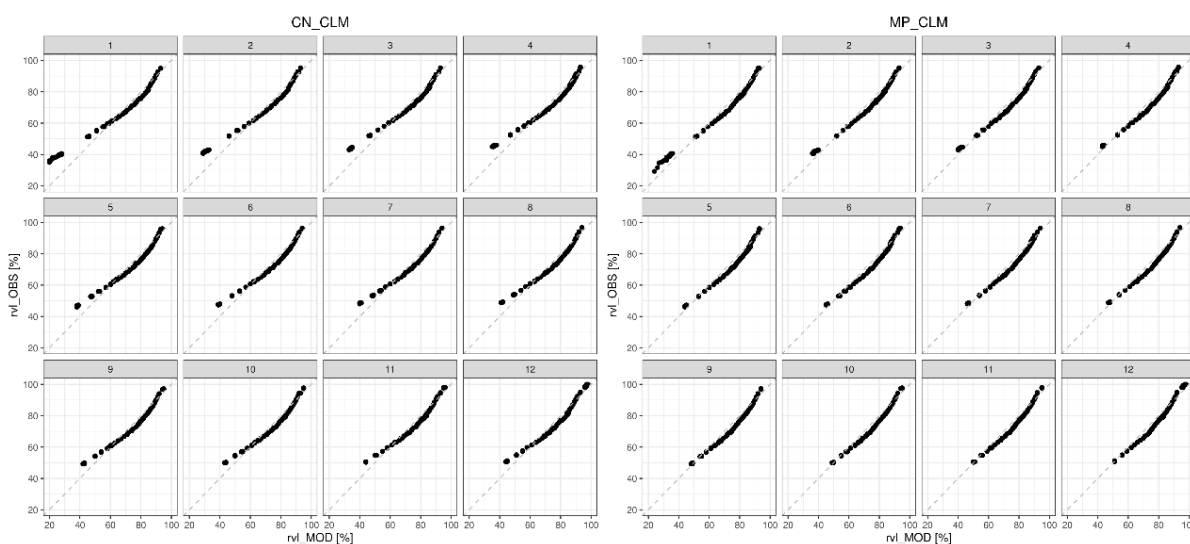
Slika S9a Odnos sortiranih vrijednosti temperature zraka iz regionalnog modela CLM forsiranog globalnim modelom CN (lijevo) i MP (desno) u odnosu na izmjerene vrijednosti s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010.



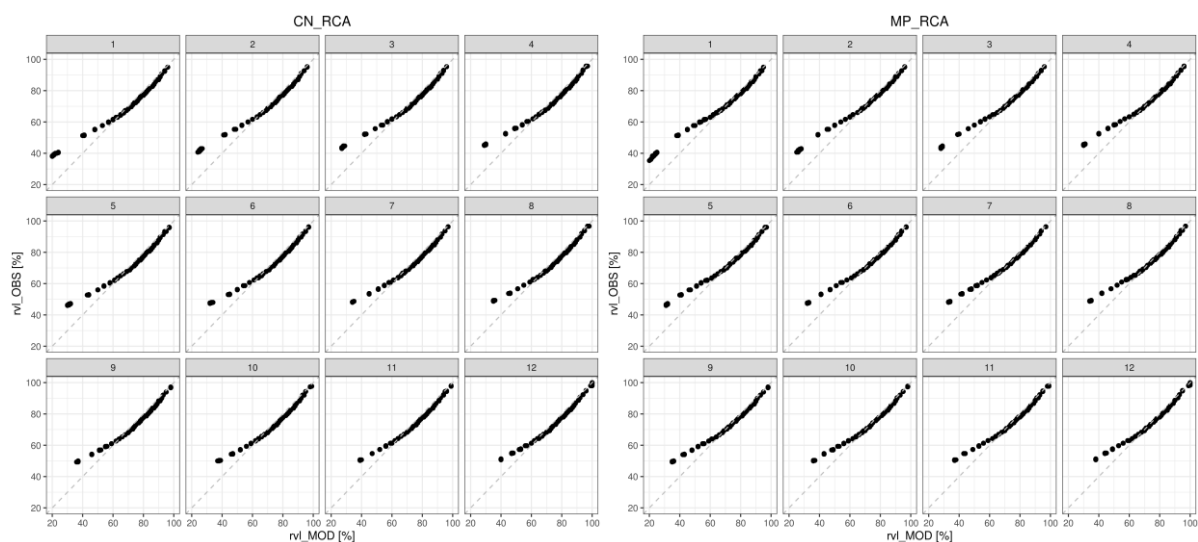
Slika S9b Odnos sortiranih vrijednosti temperature zraka iz regionalnog modela RCA forsiranog globalnim modelom CN (lijevo) i MP (desno) u odnosu na izmjerene vrijednosti s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010.



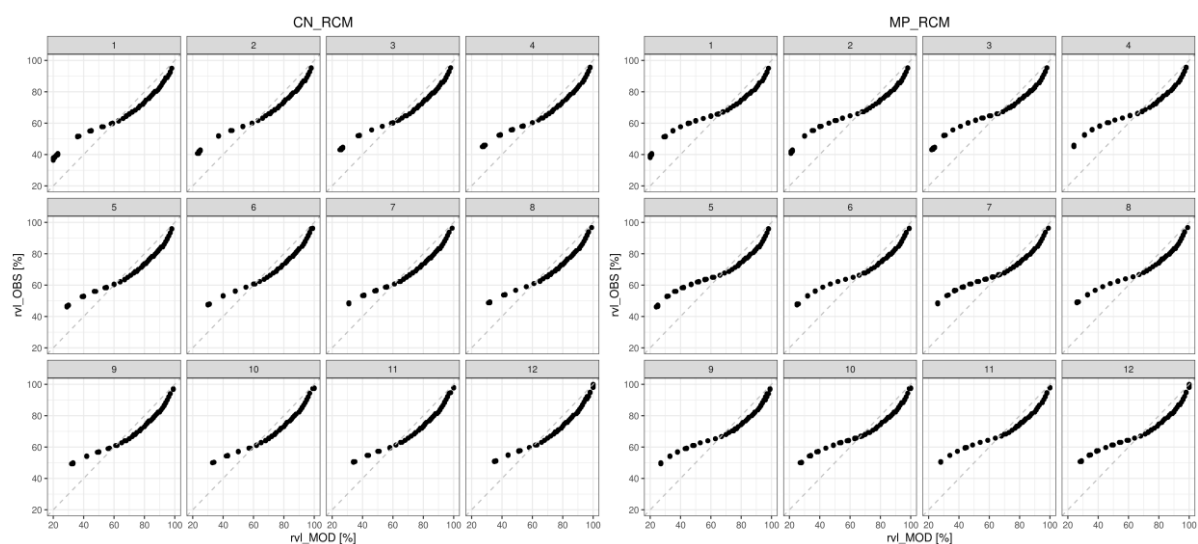
Slika S9c Odnos sortiranih vrijednosti temperature zraka iz regionalnog modela RCA forsiranog globalnim modelom CN (lijevo) i MP (desno) u odnosu na izmjerene vrijednosti s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010.



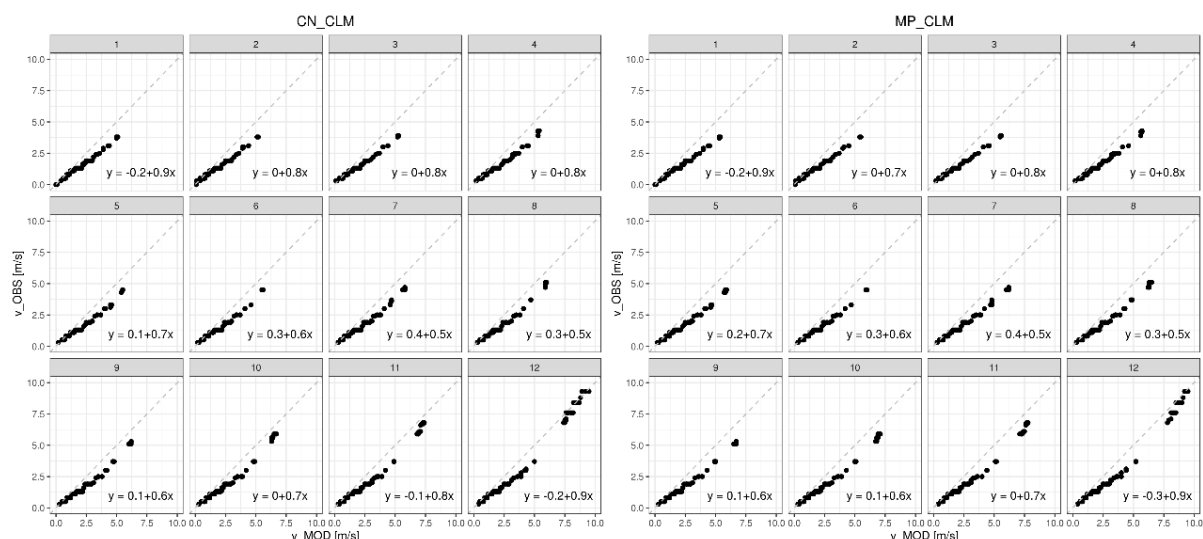
Slika S10a Odnos sortiranih vrijednosti relativne vlažnosti iz regionalnog modela CLM forsiranog globalnim modelom CN (lijevo) i MP (desno) u odnosu na izmjerene vrijednosti s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010.



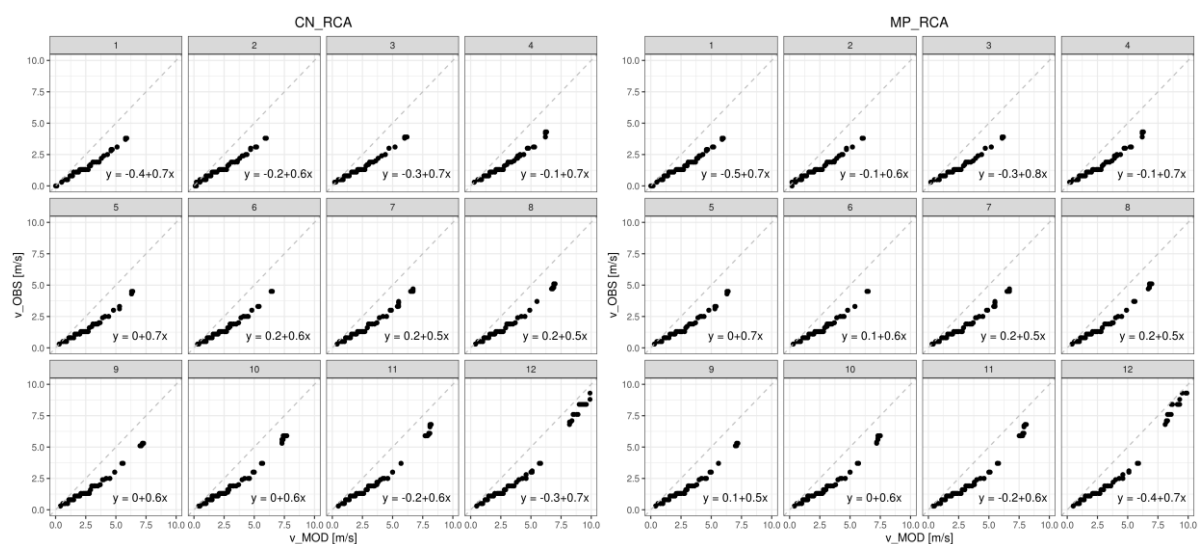
Slika S10b Odnos sortiranih vrijednosti relativne vlažnosti iz regionalnog modela RCA forsiranog globalnim modelom CN (lijevo) i MP (desno) u odnosu na izmjerene vrijednosti s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010.



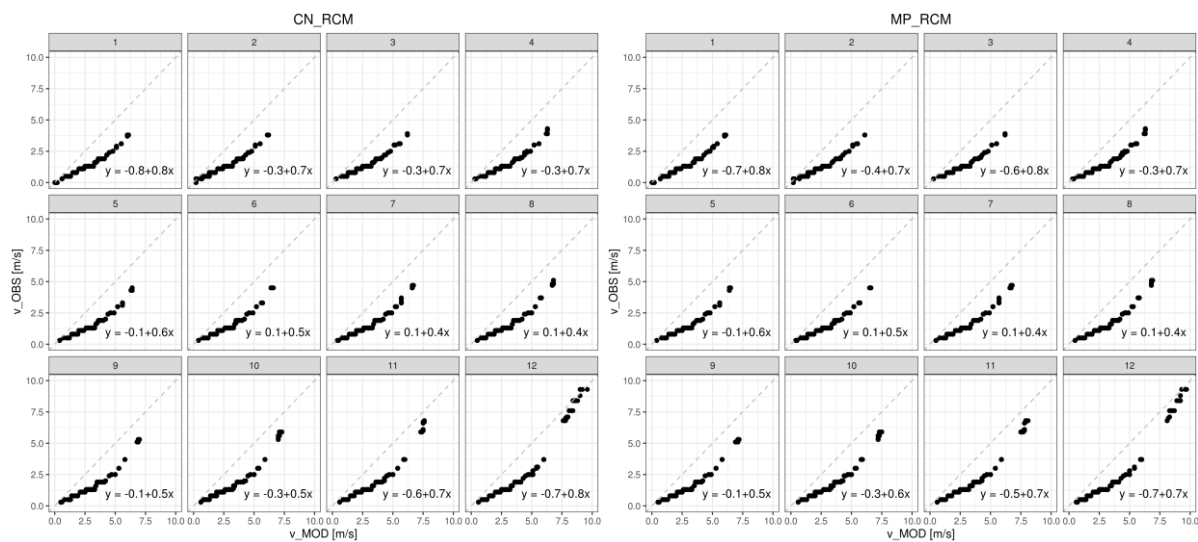
Slika S10c Odnos sortiranih vrijednosti relativne vlažnosti iz regionalnog modela REG forsiranog globalnim modelom CN (lijevo) i MP (desno) u odnosu na izmjerene vrijednosti s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010.



Slika S11a Odnos sortiranih vrijednosti brzine vjetra iz regionalnog modela CLM forsiranog globalnim modelom CN (lijevo) i MP (desno) u odnosu na izmjerene vrijednosti s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010.



Slika S11b Odnos sortiranih vrijednosti brzine vjetra iz regionalnog RCA forsiranog globalnim modelom CN (lijevo) i MP (desno) u odnosu na izmjerene vrijednosti s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010.



Slika S11c Odnos sortiranih vrijednosti brzine vjetra iz regionalnog modela REG forsiranog globalnim modelom CN (lijevo) i MP (desno) u odnosu na izmjerene vrijednosti s postaje Zagreb-Maksimir u razdoblju 1981. – 2010.