

# Pojava ekstremnih temperatura u Hrvatskoj: opaženi trendovi i buduće projekcije

---

**Uroda, Bruno**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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:217:266965>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-06**



*Repository / Repozitorij:*

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



**Bruno Uroda**

**Pojava ekstremnih temperatura u Hrvatskoj: opaženi  
trendovi i buduće projekcije**

**Diplomski rad**

**Zagreb  
2024**



**Bruno Uroda**

**Pojava ekstremnih temperatura u Hrvatskoj: opaženi  
trendovi i buduće projekcije**

**Diplomski rad**

predan na ocjenu Geografskom odsjeku  
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu  
radi stjecanja akademskog zvanja  
magistar struke znanosti o okolišu

**Zagreb  
2024**

Ovaj je diplomski rad izrađen u sklopu diplomskog sveučilišnog studija *Znanosti o okolišu* na Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Ivana Čanjevca i doc. dr. sc. Mladena Maradina.

Sveučilište u Zagrebu  
 Prirodoslovno-matematički fakultet  
 Geografski odsjek

Diplomski rad

## Pojava ekstremnih temperatura u Hrvatskoj: opaženi trendovi i buduće projekcije

Bruno Uroda

**Izvadak:** Ovaj rad bavi se analizom ekstremnih temperaturnih događaja u Hrvatskoj, s posebnim naglaskom na gradove Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek. Cilj istraživanja bio je ispitati intenzitet i učestalost ekstremnih temperatura u posljednja dva standardna razdoblja, te procijeniti buduće promjene do 2070. godine koristeći regionalni klimatski model RegCM4 u scenarijima RCP4.5 i RCP8.5. Korištene su statističke metode, poput Mann-Kendallovog testa, Senov procjenitelj nagiba i analiza ekstremnih vrijednosti (EVA), uz izračun klimatskih indeksa (EHD, SU25, Tmax95, HE). Rezultati upućuju na značajan porast intenziteta i učestalosti ekstremnih temperatura od 1991. nadalje, s izraženijim trendovima u kontinentalnim područjima zbog urbanizacije i izostanka ublažavajućeg utjecaja mora. Projekcije budućih promjena ukazuju na daljnji razvoj ekstremnih temperaturnih događaja, osobito pod scenarijem RCP8.5. Zaključci ističu potrebu za sveobuhvatnim mjerama prilagodbe i smanjenja emisija stakleničkih plinova kako bi se ublažili negativni učinci klimatskih promjena. Ovaj rad doprinosi boljem razumijevanju dugoročnih temperaturnih trendova u Hrvatskoj te predstavlja temelj za razvoj znanstveno utemeljenih politika prilagodbe i ublažavanja klimatskih promjena.

79 stranica, 30 grafičkih priloga, 2 tablica, 78 bibliografskih referenci; izvornik na hrvatskom jeziku

**Ključne riječi:** ekstremne temperature, Mann-Kendallov test, klimatski indeksi, klimatske promjene, RegCM4, Hrvatska, GEV distribucija

**Voditelj:** izv. prof. dr. sc. Ivan Čanjevac  
 doc. dr. sc. Mladen Maradin

**Povjerenstvo:** izv. prof. dr. sc. Kristina Pikelj  
 prof. dr. sc. Perica Mustafić

**Tema prihvaćena:** 4. 7. 2024.

**Rad prihvaćen:** 5. 12. 2024.

Rad je pohranjen u Središnjoj geografskoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska.

## BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Geography

Master Thesis

### **Extreme temperature events in Croatia: observed trends and future projections**

Bruno Uroda

**Abstract:** This study focuses on the analysis of extreme temperature events in Croatia, with a specific emphasis on the cities of Zagreb, Split, Rijeka, Hvar, and Osijek. The primary focus was to examine the intensity and frequency of extreme temperatures during the last two standard climatological periods and to project future changes up to year 2070 using the regional climate model RegCM4 under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. Statistical methods such as the Mann-Kendall test, Sen's slope estimator, and Extreme Value Analysis (EVA) were employed, alongside the calculation of climate indices (EHD, SU25, Tmax95, HE). The results indicate a significant increase in the intensity and frequency of extreme temperature events since 1991, with more pronounced trends observed in continental regions, likely driven by urbanization and the absence of the moderating influence of the sea. Future projections highlight a continued escalation of extreme temperature events, particularly under the RCP8.5 scenario. The findings underscore the urgent need for comprehensive adaptation measures and greenhouse gas emission reductions to mitigate the adverse impacts of climate change. This study contributes to a deeper understanding of long-term temperature trends in Croatia and provides a scientific basis for the development of evidence-based adaptation and mitigation policies.

79 pages, 30 figures, 2 tables, 78 references; original in Croatian

**Keywords:** Extreme temperatures, Mann-Kendall test, climate indices, climate change, RegCM4, Croatia, GEV distribution

**Supervisors:** Ivan Čanjevac, PhD, Associate Professor  
Mladen Maradin, PhD, Assistant Professor

**Reviewers:** Kristina Pikelj, PhD, Associate Professor  
Perica Mustafić, PhD, Full Professor

Thesis title accepted: 04/07/2024

Thesis accepted: 05/12/2024

Thesis deposited in Central Geographic Library, Faculty of Science, University of Zagreb, Marulićev trg 19, Zagreb, Croatia.

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
1.1. Klimatske promjene u Europi: Povijesni kontekst i sadašnje stanje .....	1
1.2. Klima i klimatske promjene u Hrvatskoj .....	2
1.3. Klimatska obilježja odabranih gradova .....	5
1.3.1. Zagreb.....	5
1.3.2. Split .....	6
1.3.3. Rijeka .....	7
1.3.4. Hvar .....	8
1.3.5. Osijek .....	9
2. Cilj istraživanja .....	10
3. Podaci i metode .....	11
3.1. Podaci DHMZ-a: izmjereni temperaturni zapisi (1961.-2020.) .....	11
3.2. Klimatski indeksi za procjenu ekstremnih temperatura .....	12
3.3. Priprema podataka .....	12
3.4. Statistički parametri.....	15
3.4.1. Linearna regresija .....	15
3.4.2. Mann-Kendallov test za analizu trenda .....	15
3.4.3. Senov procjenitelj nagiba .....	17
3.4.4. Analiza ekstremnih vrijednosti (EVA).....	17
3.5. Klimatski modeli i projekcije .....	18
3.5.1. Struktura modela i njegova relevantnost .....	19
3.5.2. Scenariji emisija stakleničkih plinova .....	19
4. Rezultati i rasprava .....	21
4.1. Analiza podataka DHMZ-a o ekstremnim temperaturama .....	21
4.1.1 Statistička analiza za odabrane gradove (1961.-2020.).....	21
4.1.2 Usporedba temperaturnih trendova (1961.-1990. i 1991.-2020.).....	23
4.1.3 Klimatski indeksi ekstremnih toplinskih događaja .....	25



4.1.4. Sezonska analiza klimatskih indeksa .....	28
4.2. Statistički trendovi i modeli .....	31
4.2.1. Analiza trendova Mann-Kendallovim testom i Senovim nagibom .....	31
4.3 Usporedba klimatskih modela i scenarija .....	33
4.3.1 Usporedba srednje maksimalne i apsolutne maksimalne temperature .....	41
4.4 Analiza ekstremnih vrijednosti (EVA) .....	45
4.4.1. Kvantifikacija ekstrema za Zagreb .....	46
4.1.4. Kvantifikacija ekstrema za Split .....	47
4.1.2. Kvantifikacija ekstrema za Rijeku .....	48
4.1.5. Kvantifikacija ekstrema za Hvar .....	49
4.1.3. Kvantifikacija ekstrema za Osijek .....	50
4.5. Generalizirana distribucija ekstremnih vrijednosti .....	51
4.5.1 Generalizirana distribucija ekstremnih temperatura za hrvatske gradove .....	51
5. Utjecaj klimatskih promjena i strategije prilagodbe u Republici Hrvatskoj .....	52
5.1. Utjecaj ekstremnih klimatskih promjena u RH .....	52
5.1.1. Utjecaj na prirodu .....	53
5.1.2. Utjecaj na društvo .....	53
5.1.3. Utjecaj na gospodarstvo .....	54
5.2. Prilagodba RH klimatskim promjenama i postizanje klimatske neutralnosti .....	55
5.3. Vladina “Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u RH za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu” .....	56
6. Zaključak .....	58
7. Literatura .....	60

## 1. Uvod

### 1.1. Klimatske promjene u Europi: Povijesni kontekst i sadašnje stanje

Klimatske promjene su značajan pokretač okolišnih i društvenih promjena u Europi tijekom posljednjih stoljeća. Kontinent je zabilježio značajno povišenje prosječnih temperatura, pri čemu je u prvih dvadeset godina 21. stoljeća globalna temperatura bila viša za 0,99 °C u odnosu na razdoblje 1850.-1900. Od 1970. godine, globalna temperatura raste brže nego u bilo kojem drugom 50-godišnjem razdoblju u posljednjih najmanje 2000 godina (IPCC, 2023). Ove promjene su uglavnom posljedica povećane koncentracije stakleničkih plinova (GHG) u atmosferi, ponajprije zbog ljudskih aktivnosti kao što su izgaranje fosilnih goriva i krčenje šuma (Pal i dr., 2004).

Povijesno gledano, klima Europe prolazila je razne promjene, od Srednjovjekovnog toplog razdoblja do Malog ledenog doba, što odražava prirodnu varijabilnost (Jones i Mann, 2004). Međutim, trenutačni trend globalnog zagrijavanja do sada nije zabilježen u svojoj brzini i intenzitetu (Alimonti i dr., 2022). Porast temperatura prati povećanje učestalosti i intenziteta ekstremnih vremenskih događaja, kao što su toplinski valovi, suše, obilne oborine i oluje (Coumou i Rahmstorf, 2012).

Navedeni događaji ostavljaju negativne utiske na ekosustave, ljudsko zdravlje, sigurnost opskrbe hranom, vodne resurse i infrastrukturu (Coumou i Rahmstorf, 2012). Primjerice, toplinski val u Europi iz 2003. godine rezultirao je s više od 70 000 smrtnih slučajeva (Robine i dr., 2008). Slično tome, sve češće obilne oborine dovode do učestalijih poplava, pri čemu su najviše pogođena gusto naseljena područja ključna za gospodarske aktivnosti, poput industrijskih i trgovačkih središta te regija s intenzivnom infrastrukturom (Fischer i Knutti, 2015).

Izuzev ekstremnih vremenskih događaja s kojima se Europa suočava, do izražaja također dolaze i dugoročne promjene klimatskih obrazaca. Primjerice, Sredozemna regija postaje sve toplija i suša, čime se povećava rizik od požara i smanjuje dostupnost vode (García-Ruiz i dr., 2011). S druge strane, Sjeverna Europa bilježi povećanje oborina i toplije zime, što može poremetiti poljoprivrednu proizvodnju i povećati rizik od poplava (Kundzewicz i dr., 2006).

Kako bi odgovorila na izazove klimatskih promjena, Europska unija implementirala je raznolike politike s ciljem ublažavanja njihovih posljedica i prilagodbe budućim klimatskim uvjetima (Kulovesi i van Asselt, 2020). Međutim, učinkovitost ovih mjera ovisi o stalnoj

predanosti svih država članica i globalne zajednice u smanjenju emisija stakleničkih plinova i promicanju održivih praksi (Cifuentes-Faura, 2022).

## 1.2. Klima i klimatske promjene u Hrvatskoj

Klima Hrvatske određena je njenim smještajem u umjerenim geografskim širinama, što predstavlja ključni čimbenik koji oblikuje klimatske uvjete u zemlji. Ovaj položaj u sjevernom umjerenom pojasu omogućava specifične vremenske uvjete, uključujući umjerenu količinu oborina i temperaturne varijacije tokom godine, što ima ključan utjecaj na vegetacijski pokrov i ljudsku djelatnost (Šegota i Filipčić, 1996). Uz smještaj u umjerenim širinama, na klimu Hrvatske značajno utječu i faktori kao što su topografija, relativna blizina mora, broj sunčanih sati, te specifični biljni pokrov, koji oblikuju lokalne klimatske uvjete u različitim dijelovima zemlje (Šegota i Filipčić, 1996). Klimatska regionalizacija Hrvatske po W. Köppenu u razdoblju 1961.-1990. se može objasniti na sljedeći način: većina teritorija Hrvatske pripada *C* razredu klime, umjereno toploj kišnoj klimi (sl. 1). Manje područje iznad 1200 metara nadmorske visine pripada *D* klasi klime, točnije *Df* tipu, što označava vlažnu borealnu klimu (sl. 1). Većina Hrvatske ima *Cf* tip klime, odnosno umjereno toplu vlažnu klimu, dok sušniji dijelovi zemlje imaju *Cs* klimu, koja je poznata kao sredozemna klima (sl. 1). Važno je napomenuti da je W. Köppen uveo posebne oznake za podtipove *C* klase klime koje su prisutne u Hrvatskoj:

*a* = vruće ljeto, srednja temperatura zraka najtoplijeg mjeseca  $\geq 22$  °C;

*b* = toplo ljeto, srednja temperatura zraka najtoplijeg mjeseca niža je od 22 °C.

Konačno, u Hrvatskoj postoji 5 klimatskih tipova (Šegota i Filipčić, 2003):

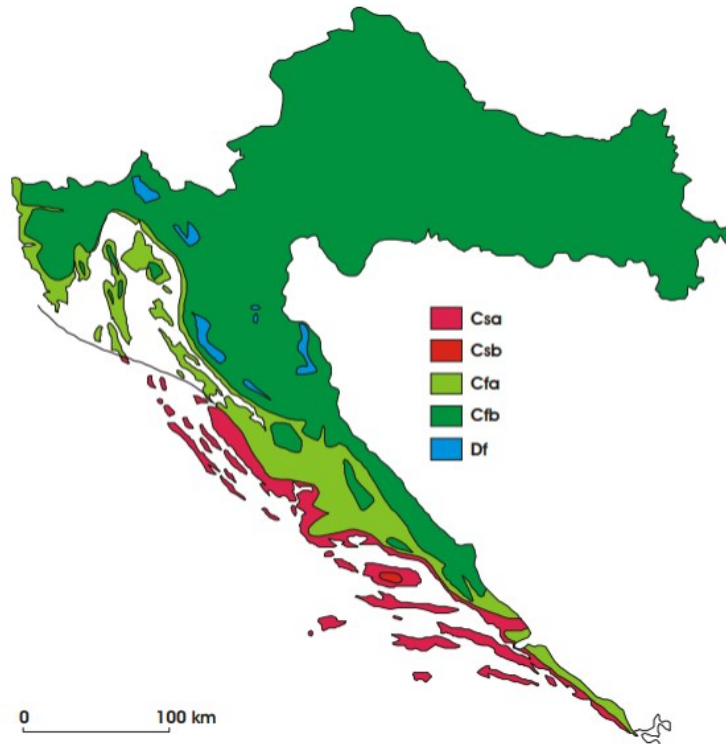
*Csa* = sredozemna klima s vrućim ljetom,

*Csb* = sredozemna klima s toplim ljetom,

*Cfa* = umjereno topla vlažna klima s vrućim ljetom,

*Cfb* = umjereno topla vlažna klima s toplim ljetom,

*Df* = vlažna borealna klima.



Sl. 1. Klimatski tipovi u Hrvatskoj prema W. Köppenu u standardnom razdoblju 1961.-1990. (Šegota i Filipčić, 2003)

Prema Nacionalnom izvješću UNFCCC-a, (Vlada Republike Hrvatske, 2018) Hrvatska, kao i ostatak Europe, suočava se s ozbiljnim posljedicama klimatskih promjena. To uključuje promjene u temperaturnim i oborinskim obrascima, kao i porast učestalosti ekstremnih vremenskih događaja poput toplinskih valova i intenzivnih oborina, koji imaju značajan utjecaj na ekosustave i ljudske zajednice (Zaninović i dr., 2008).

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, prosječne temperature u Hrvatskoj su porasle, s osobito značajnim zagrijavanjem zabilježenim tijekom ljetnih mjeseci (Perčec Tadić i dr., 2022). Ovaj trend zagrijavanja u skladu je sa širim europskim obrascem i povezan je s povećanjem učestalosti toplinskih valova, posebno u kontinentalnim regijama zemlje (Zaninović i dr., 2008).

Uz porast temperatura, Hrvatska također bilježi promjene u oborinskim obrascima. Iako je ukupna godišnja količina oborina ostala relativno stabilna, raspodjela kiše tijekom godine postala je nepredvidivija, s porastom intenziteta kišnih događaja (Gajić-Čapka i dr., 2014). To je dovelo do češćih poplava u nekim područjima, posebice u Panonskoj nizini i duž rijeke Save (Lukić i dr., 2019; Kundzewicz, 2016).

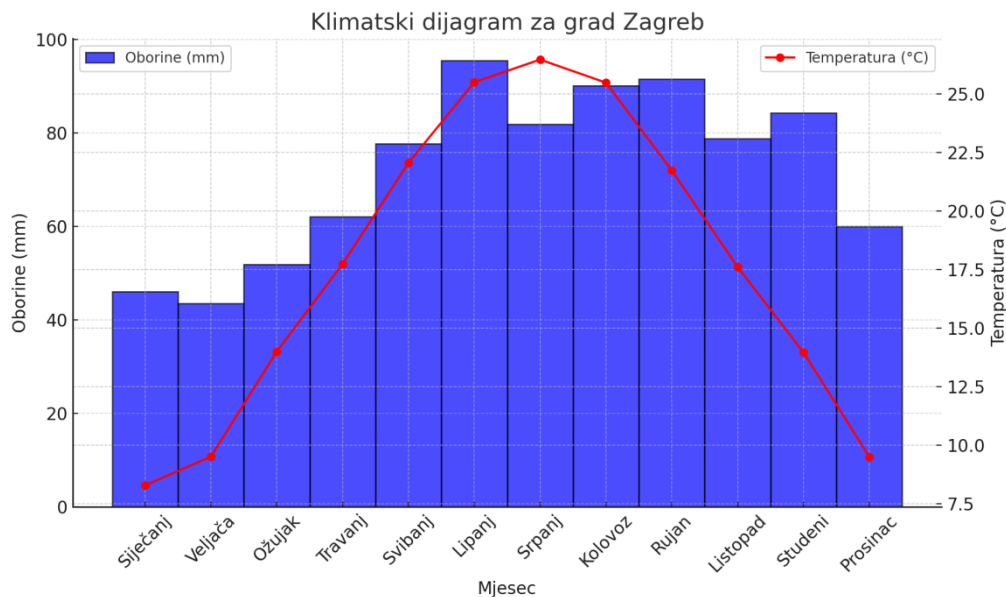
Priobalna područja Hrvatske su osobito osjetljiva na posljedice klimatskih promjena. Jadransko more se zagrijava, što utječe na morske ekosustave, ribarstvo i turizam (Mentaschi i dr., 2024). Kombinacija porasta razine mora i povećanja intenziteta oluja predstavlja prijetnju obalnoj infrastrukturi i zajednicama, osobito na nižim obalama (Cheikh i Momen, 2020; Hanley i dr., 2019). Vjetrovi bura i jugo, karakteristični za jadransku regiju, također su pod utjecajem promjenjivih klimatskih uvjeta, što potencijalno mijenja njihovu učestalost i intenzitet (Belušić Vozila i dr., 2019; Radovanović i Savić, 2010).

Klimatske promjene također predstavljaju značajan izazov za hrvatsku poljoprivredu, koja uvelike ovisi o povoljnim klimatskim uvjetima. Povećanje učestalosti suša, osobito u dalmatinskom zaleđu, prijeti prinosima usjeva i vodnim resursima (Gajić-Čapka i dr., 2014). Uz to, vinogradarska i maslinarska područja u zemlji osjetljiva su na promjene u temperaturi i oborinama, što može utjecati na kvalitetu i količinu njihovih proizvoda (van Leeuwen i Darriet, 2016).

Vlada Republike Hrvatske prepoznala je važnost rješavanja klimatskih promjena te je razvila Nacionalnu strategiju prilagodbe kako bi ublažila njihove učinke (Vlada Republike Hrvatske, 2020). Ova strategija naglašava potrebu za poboljšanim upravljanjem vodom, smanjenjem rizika od katastrofa te zaštitom bioraznolikosti i ekosustava. Uspješna provedba ovih mjera zahtijevat će kontinuirano istraživanje, praćenje i suradnju na nacionalnoj i međunarodnoj razini.

## 1.3. Klimatska obilježja odabranih gradova

### 1.3.1. Zagreb



Sl. 2. Godišnji hod temperature i oborina u Zagrebu za razdoblje 1961.-2020.

Klima grada Zagreba pripada kategoriji umjereno tople vlažne klime (Cfb) prema Köppenovoj klasifikaciji (Peel i dr., 2007). Ova klasifikacija označava klimu s blagim zimama, toplim ljetima i ravnomjerno raspoređenim oborinama tijekom cijele godine. Prosječna godišnja temperatura Zagreba iznosi 10-11 °C, dok se ukupna godišnja količina oborina kreće između 850 i 1.000 mm (Zaninović i dr., 2008).

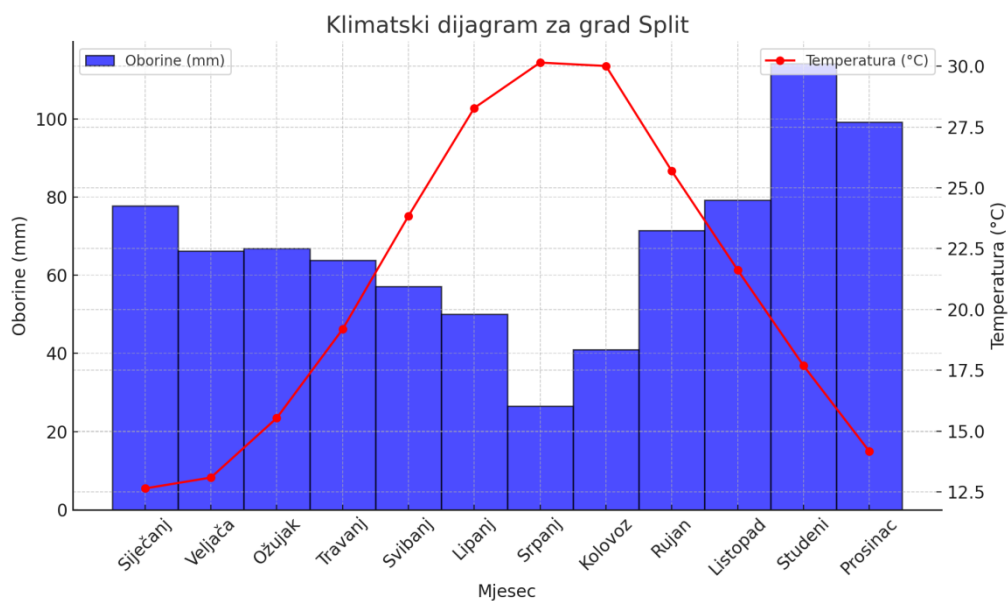
Zime u Zagrebu su hladne, s prosječnim temperaturama u siječnju, najhladnijem mjesecu, koje variraju između -1 °C i 3 °C. Snijeg je česta pojava, osobito u okolnim brdskim predjelima poput Medvednice, koja može akumulirati značajne količine snježnog pokrivača tijekom zime (Gajić-Čapka, 2007). S druge strane, ljeta su topla, s prosječnim temperaturama u srpnju između 18 °C i 27 °C. Tijekom ljetnih mjeseci, osobito za vrijeme toplinskih valova, temperature mogu doseći i preko 35 °C. Najviše oborina pada u proljeće, s maksimumom u svibnju i lipnju, dok su veljača i ožujak najsušniji mjeseci (Zaninović i dr., 2008).

Klimadijagram za Zagreb (sl. 2) prikazuje godišnji režim temperatura i oborina. Jasno su vidljive sezonske promjene, pri čemu najviše temperature bilježimo u srpnju i kolovozu, dok je najmanja količina oborina u zimskim mjesecima. Iako je oborinski režim prilično ravnomjerno raspoređen, razdoblja intenzivnijih oborina, poput proljeća, povezana su s frontalnim sustavima i lokaliziranim konvektivnim procesima.

Topografski uvjeti Zagreba značajno utječu na njegovu klimu. Planina Medvednica na sjeveru djeluje kao barijera protiv hladnih kontinentalnih zračnih masa sa sjevera, dok dolina rijeke Save olakšava cirkulaciju zraka i doprinosi smanjenju temperaturnih razlika unutar gradskog područja. Međutim, zbog urbanizacije, grad bilježi pojavu urbanog toplinskog otoka, koji povećava noćne temperature u centru grada u usporedbi s ruralnim područjima (Maradin i Filipčić, 2018).

Trendovi povećanja prosječnih godišnjih temperatura, smanjenja trajanja snježnog pokrivača i češće pojave toplinskih valova tijekom analiziranog razdoblja mogu biti posljedica prirodnih klimatskih varijacija, lokalnih faktora ili šireg utjecaja globalnih klimatskih promjena. Prema istraživanjima, promjena ukupnog toplinskog opterećenja dominantno je povezana s utjecajem klimatskih promjena (~88%), što uključuje i značajan porast broja ljetnih dana, koji je tijekom posljednja dva standardna razdoblja u prosjeku narastao za 35 dana (Nimac i dr., 2022).

### 1.3.2. Split



Sl. 3. Godišnji hod temperature i oborina u Splitu za razdoblje 1961.-2020.

Grad Split smješten je na srednjoj dalmatinskoj obali i obilježava ga mediteranska klima (Csa) prema Köppenovoj klasifikaciji (Peel i dr., 2007). Ova klima karakterizira se vrućim, suhim ljetima i blagim, vlažnim zimama, uz prosječnu godišnju temperaturu od 16 °C i godišnju količinu oborina između 800 i 1.200 mm (Zaninović i dr., 2008).

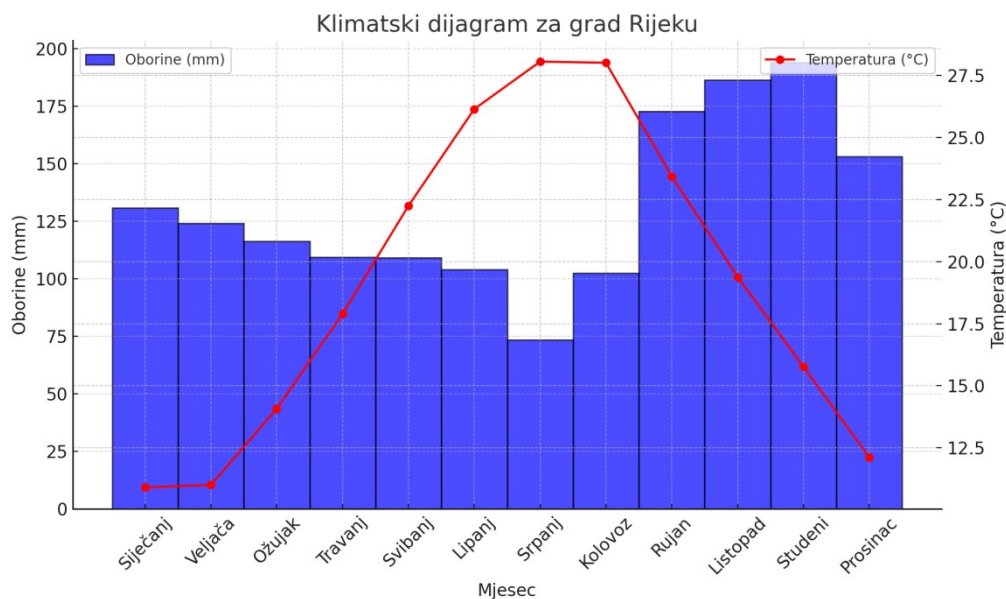
Zime u Splitu su blage s prosječnim temperaturama u siječnju između 5 °C i 10 °C. Oborine su najobilnije tijekom zimskih i jesenskih mjeseci, pri čemu se najveće količine bilježe u

studenom i prosincu, kada mjesečno može pasti i više od 150 mm kiše. Ljeta su suha i topla, s prosječnim temperaturama u srpnju i kolovozu između 24 °C i 30 °C, dok tijekom toplinskih valova temperature mogu premašiti 35 °C.

Klimadijagram za Split (sl. 3) jasno prikazuje sezonske razlike u temperaturama i oborinama. Najmanje oborina bilježi se u ljetnim mjesecima, posebice u srpnju, dok su zimski mjeseci najvlažniji. Blizina mora doprinosi ublažavanju temperaturnih ekstremnih vrijednosti, ali povećava relativnu vlažnost zraka, osobito tijekom ljeta, što može povećati subjektivni osjećaj sparine (Mirić i Rumboldt, 1993).

Klimatske promjene u Splitu vidljive su kroz povećanje učestalosti toplinskih valova i smanjenje ukupne godišnje količine oborina, dok je intenzitet kišnih događaja u porastu, što povećava rizik od poplava (Gajić-Čapka i dr., 2014).

### 1.3.3. Rijeka



Sl. 4. Godišnji hod temperature i oborina u Rijeci za razdoblje 1961.-2020.

Rijeka, smještena na sjevernom Jadranu, ima vlažnu suptropsku klimu (Cfa) prema Köppenovoj klasifikaciji (Peel i dr., 2007). Grad je poznat po blagim zimama i obilnim oborinama, s godišnjom količinom koja često premašuje 1.500 mm, što ga čini jednim od najkišovitijih gradova u Hrvatskoj (Zaninović i dr., 2008).

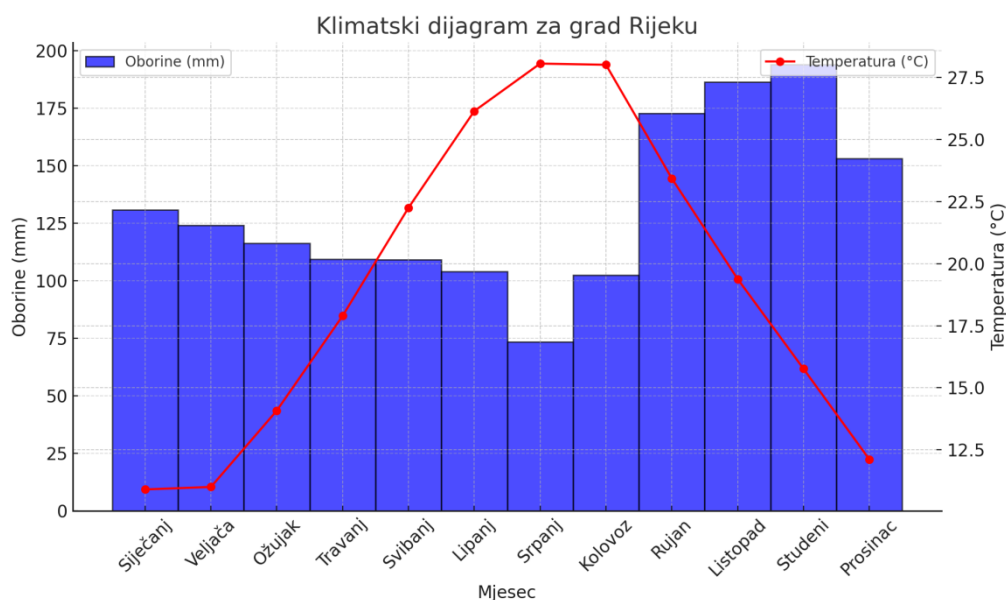
Klimadijagram za Rijeku (sl. 4) pokazuje da su jesenski i zimski mjeseci najvlažniji, osobito listopad i studeni, kada mjesečne količine oborina premašuju 200 mm. Ljeta su relativno suha,



s prosječnim temperaturama između 22 °C i 30 °C, dok su zime blage, siječanj bilježi prosjek od 5 °C.

Blizina mora i planinski reljef stvaraju specifične mikroklimatske uvjete. Planine u zaleđu Rijeke djeluju kao barijera koja sprječava prodor hladnih kontinentalnih zračnih masa, dok more ublažava temperaturne ekstreme. Osim toga, topografija okolnih planina pridonosi povećanim oborinama, jer zračne mase prisiljene na uspon iznad planinskih lanaca kondenziraju vlagu, što dovodi do orografskih oborina koje su posebno izražene na području Gorskog kotara i riječkog zaleđa (Kozarić i Ivančan-Picek, 2006).

### 1.3.4. Hvar



Sl. 5. Godišnji hod temperature i oborina u Hvaru za razdoblje 1961.-2020.

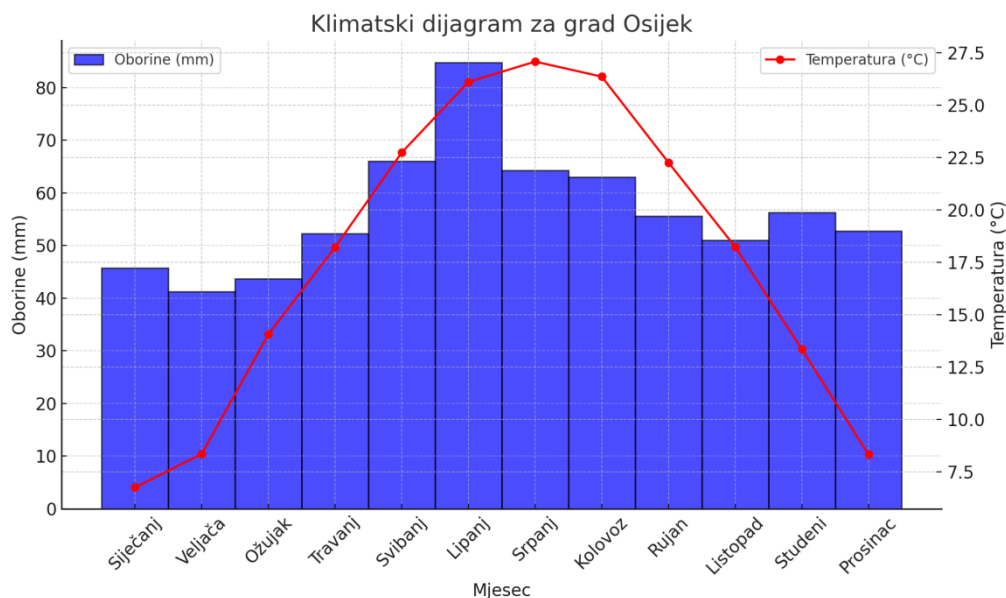
Hvar, otok smješten u srednjoj Dalmaciji, poznat je po blagoj i sunčanoj mediteranskoj klimi (Csa) prema Köppenovoj klasifikaciji (Peel i dr., 2007). Prosječna godišnja temperatura iznosi 16-17 °C, dok je prosječna godišnja količina oborina između 700 i 850 mm (Zaninović i dr., 2008).

Ljeta su vruća i suha, s prosječnim temperaturama u srpnju između 24 °C i 30 °C. Minimalne količine oborina ljeti, često ispod 10 mm mjesečno, pridonose sušnim uvjetima, dok su zime blage i vlažne, s prosječnim temperaturama u siječnju od 8 °C do 12 °C. Zime također donose najveće količine oborina, pri čemu prosinac i siječanj bilježe vrijednosti preko 70 mm mjesečno.

Klimadijagram za Hvar (sl. 5) jasno prikazuje izražen sezonski režim oborina, s minimalnim vrijednostima tijekom ljeta i maksimumima u zimskim mjesecima. Ovakva raspodjela tipična je za mediteransku klimu, a blizina mora dodatno ublažava temperaturne ekstreme, smanjujući amplitudu između dnevnih i noćnih temperatura.

Klimatske promjene vidljive su kroz rast prosječnih temperatura i učestalost toplinskih valova, što dodatno pridonosi problemima poput smanjenja količine ljetnih oborina i rizika od suša (Bonacci i dr., 2021). Ovi uvjeti negativno utječu na poljoprivredu, osobito uzgoj vinove loze i maslina, koji su ključni za gospodarstvo otoka (Ferrise i dr., 2013).

### 1.3.5. Osijek



Sl. 6. Godišnji hod temperature i oborina u Osijeku za razdoblje 1961.-2020.

Osijek, najveći grad istočne Hrvatske, ima kontinentalna obilježja koja se prema Köppenovoj klasifikaciji označava kao *Cfb* (Peel i dr., 2007). Ova klasifikacija ukazuje na umjereno toplu klimu karakterizirana hladnim zimama, toplim ljetima i ravnomjerno raspoređenim oborinama tijekom cijele godine. Prosječna godišnja temperatura iznosi 11 °C, dok je godišnja količina oborina između 650 i 800 mm (Zaninović i dr., 2008).

Zime u Osijeku su hladne, s prosječnim temperaturama u siječnju, najhladnijem mjesecu, između -2 °C i 4 °C. Snježni pokrivač je uobičajen tijekom zimskih mjeseci, ali se zbog klimatskih promjena trajanje snijega skratilo. Ljeta su topla i povremeno vruća, s prosječnim temperaturama u srpnju između 18 °C i 30 °C, dok toplinski valovi mogu podići temperature iznad 35 °C.

Klimadijagram za Osijek (sl. 6) ukazuje na ravnomjernu raspodjelu oborina kroz cijelu godinu, s blagim maksimumom u proljetnim i ljetnim mjesecima, osobito u lipnju i srpnju, kada oborine podržavaju vegetacijski ciklus. Zimski mjeseci bilježe niže količine oborina, ali česte magle i visoka relativna vlažnost zraka povećavaju osjećaj hladnoće.

Osijek je zbog svoje ravničarske topografije podložan ekstremnim vremenskim uvjetima, uključujući oluje koje donose jake kiše, tuču i vjetrove. Klimatske promjene u regiji dovele su do povećanja učestalosti toplinskih valova i sušnih razdoblja, ali i promjenjivijih obrazaca oborina, što povećava rizik od poplava tijekom intenzivnih kišnih događaja (Gajić-Čapka i dr., 2014). Ove promjene predstavljaju izazov za poljoprivredni sektor, koji čini osnovu gospodarstva regije (Turkalj i dr., 2013).

## **2. Cilj istraživanja**

Ekstremni klimatski događaji, poput poplava, suša, oluja i toplinskih valova, postaju sve češći i intenzivniji uslijed djelovanja globalnih klimatskih promjena (Stott, 2016). Ključno je razumjeti kako ti događaji specifično utječu na Hrvatsku, odnosno na odabrane gradove poput Zagreba, Rijeke, Splita, Hvara i Osijeka, kako bi se mogao izraditi plan prilagodbe ekstremnim vremenskim uvjetima s ciljem dugoročnog smanjenja rizika.

Cilj ovoga rada je prepoznati trendove u intenzitetu i učestalosti ekstremnih vremenskih događaja u Hrvatskoj, s posebnim naglaskom na gradove Zagreb, Split, Rijeku, Hvar i Osijek. Prikupljanjem i analizom dostupnih temperaturnih podataka, te korištenjem različitih modela, procijenit će se intenzitet i učestalost ekstremnih temperatura tijekom posljednja dva standardna klimatska razdoblja (1961. – 1990. i 1991. – 2020.) za Hrvatsku i navedene gradove. U radu su predstavljeni i mogući scenariji budućih temperaturnih promjena temeljenih na regionalnom klimatskom modelu (RegCM4) kroz modeliranje i simulacije.

Za razdoblje od 2005. do 2070. godine korišteni su rezultati klimatskih modela RCP4.5 i RCP8.5 te povijesni podaci iz RegCM4 za razdoblje od 1970. do 2005. koji prikazuju prosječnu, maksimalnu i minimalnu dnevnu temperaturu zraka, zajedno s klimatskim indeksima kao pokazateljima ekstremnih temperatura. Za obradu podataka, primijenjene su statističke metode za analizu trendova u protekla dva standardna klimatska razdoblja zajedno s projekcijama modela kao što su Mann-Kendallov test za analizu trenda te Senov procjenitelj nagiba za kvantificiranje promjena tijekom vremena. Uz navedeno, korištena je i analiza ekstremnih vrijednosti (EVA) za procjenu promjena u intenzitetu i učestalosti ekstremnih vremenskih događaja.

### **Konkretni ciljevi ovog rada su:**

- I. Istražiti i evaluirati trendove učestalosti ekstremnih temperaturnih događaja u Hrvatskoj u razdoblju od 1961. do 2020. pomoću povijesnih meteoroloških podataka za gradove Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek. Cilj je utvrditi postoji li statistički značajan porast učestalosti visokih temperatura tijekom tog razdoblja.
- II. Analizirati regionalne razlike u trendovima ekstremnih temperatura između obalnih i kontinentalnih gradova u Hrvatskoj. Proučiti u kojoj mjeri blizina mora, odnosno Mediteranski klimatski sustav, utječe na otpornost obalnih gradova (Split, Rijeka, Hvar) na ekstremne temperature u usporedbi s kontinentalnim gradovima (Zagreb, Osijek).
- III. Usporediti povijesne podatke o ekstremnim temperaturama, zabilježenim od strane Državnog Hidrometeorološkog Zavoda za razdoblje 1961.-2020. i klimatske projekcije prema scenarijima RCP4.5 i RCP8.5 do 2070. godine.

### **3. Podaci i metode**

#### **3.1. Podaci DHMZ-a: izmjereni temperaturni zapisi (1961.-2020.)**

Glavni izvor podataka o temperaturi za Hrvatsku su mjerenja na klimatološkim stanicama Državnoga hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Kvaliteta podataka osigurana je strogo kontroliranim metodologijama mjerenja i obrade podataka koje DHMZ koristi, što ih čini pouzdanim za znanstvena istraživanja. Dostupni skupovi podataka za gradove Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek za razdoblja 1961.-1990. i 1991.-2020. su visoko konzistentni i cjeloviti. DHMZ je osigurao kontinuirano praćenje i evidentiranje temperature tijekom oba klimatska razdoblja, što omogućuje temeljitu analizu i usporedbu promjena u ekstremnim temperaturnim događajima. Podaci su homogenizirani kako bi se osigurala usporedivost kroz vremenske okvire, što dodatno potvrđuje njihovu konzistentnost. U prikupljenim podacima ne postoje značajne praznine ili nedosljednosti koje bi mogle utjecati na analizu. Eventualne male nedostatke ili promjene u metodologiji mjerenja tijekom vremena, DHMZ je već kompenzirao kroz proces homogenizacije podataka, čime je osigurana njihova potpuna pouzdanost i konzistentnost za potrebe ovog istraživanja.

### 3.2. Klimatski indeksi za procjenu ekstremnih temperatura

Klimatski indeksi za ekstremne temperature ključni su za praćenje i projekciju utjecaja klimatskih promjena. Nekoliko je studija analiziralo različite indekse koje je definirao *Stručni tim za otkrivanje klimatskih promjena i indekse* (ETCCDI) (Sillmann i dr., 2013). Često korišteni temperaturni indeksi usredotočuju se na učestalost, intenzitet i trajanje toplinskih valova (Perkins i dr., 2012.).

U radu su izračunata i korištena 4 klimatska indeksa: EHD, SU25, Tmax95, HE.

Indeks **Dani ekstremne vrućine** (EHD) mjeri broj dana u godini kada dnevna maksimalna temperatura prelazi specifičnu temperaturnu granicu koja je obično visoka, poput 35 °C ili 40 °C.

**Godišnji broj dana kada je maksimalna temperatura veća od 25°C** (SU25) mjeri učestalost toplih dana unutar godine, specifično onih dana kada maksimalna temperatura prelazi prag od 25 °C.

Pokazatelj **95. percentil maksimalne temperature** (Tmax95) mjeri temperaturu koja je na 95. percentilu među svim maksimalnim dnevnim temperaturama za određeni period prema formuli:

$$Index_{95} = \frac{95}{100} \times (N + 1)$$

**Topli ekstrem** (HE) odnosi se na pojavu neobično visokih temperaturnih događaja koji premašuju određeni prag. Za izračunavanje toplih ekstremnih događaja, prvo se definiraju pragovi temperature, obično na temelju percentila povijesnih podataka. Zatim se identificiraju dani kada temperature prelaze te pragove i broje se njihova učestalost i trajanje. Na kraju, statističke metode poput Mann-Kendallovog testa koriste se za analizu trendova u učestalosti i intenzitetu tih ekstremnih događaja tijekom vremena.

### 3.3. Priprema podataka

Podaci o temperaturi u meteorologiji i klimatologiji često zahtijevaju agregaciju i normalizaciju kako bi se olakšala analiza i interpretacija (Jones i Hulme, 1996). Agregacija temperaturnih podataka podrazumijeva objedinjavanje pojedinačnih mjerenja temperature u sažetije, kompozitne vrijednosti. Ovaj proces omogućava pretvaranje velikih skupova podataka, kao što su dnevna ili satna mjerenja, u prosječne vrijednosti na mjesečnoj, godišnjoj ili regionalnoj razini. Agregacija olakšava analizu i interpretaciju podataka, omogućujući uočavanje dugoročnih klimatskih obrazaca i trendova, te olakšava usporedbu različitih vremenskih razdoblja ili geografskih područja (Vera-Valdés, 2021). Normalizacija podataka,

poput normalizacije Z-vrijednosti, koristi se za uklanjanje sezonskih i drugih prirodnih varijacija u vremenskim serijama, čime se omogućava jasnija identifikacija ljudskih utjecaja na okoliš (Grimvall i dr., 2001). Ova tehnika standardizira podatke, čineći ih usporedivima i lakšima za interpretaciju u kontekstu dugoročnih klimatskih trendova. Normalizacija Z-vrijednosti u ovom radu predstavlja prikladan odabir, s obzirom na cilj analize temperaturnih odstupanja u odnosu na povijesne prosjeke. Korištenjem metode Z-vrijednosti, temperaturni podaci se uspoređuju s dugoročnim prosjekom, što omogućuje uočavanje značajnih anomalija i promjena u temperaturnim obrascima. Ovaj pristup pomaže u preciznijem tumačenju temperaturnih trendova i bolje razumijevanje odstupanja od normalnih klimatskih uvjeta.

### A. Mjesečna agregacija

Neka  $x_{i,j}$  predstavlja vrijednost podataka na  $j$ -ti dan u  $i$ -tom mjesecu.

#### Zbroj

Za izračunavanje zbroja podataka na  $i$  - ti mjesec:

$$Zbroj_i = \sum_{j=1}^{n_i} x_{i,j}$$

Gdje je  $n_i$  broj dana u  $i$  - tom mjesecu.

#### Prosjek

Za izračunavanje prosjeka podataka za  $i$  - ti mjesec:

$$Prosjek_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{i,j}$$

#### Maksimum

Za pronalazak maksimalne vrijednosti u  $i$  -tom mjesecu:

$$Maksimum_i = \max(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n_i})$$

#### Minimum

Za pronalazak minimalne vrijednosti u  $i$  -tom mjesecu:

$$Minimum_i = \min(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n_i})$$

### B. Godišnja agregacija

Neka  $M_i$  predstavlja agregiranu vrijednost za  $i$ -ti mjesec (što može biti zbroj, prosjek, maksimum itd., kako je gore izračunato).

#### Zbroj

Za izračunavanje zbroja podataka na  $i$  - ti mjesec:

$$Godišnji\ Zbroj = \sum_{i=1}^{12} M_i$$

### Prosjek

Za izračunavanje prosjeka mjesečnih agregiranih vrijednosti tijekom godine:

$$Godišnji\ Prosjek = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} M_i$$

### Maksimum

Za pronalazak maksimalne mjesečne vrijednosti tijekom godine:

$$Godišnji\ Maksimum = \max(M_1, M_2, \dots, M_{12})$$

### Minimum

Za pronalazak minimalne mjesečne vrijednosti tijekom godine:

$$Godišnji\ Minimum = \min(M_1, M_2, \dots, M_{12})$$

### Normalizacija Z-vrijednosti

Transformira podatke tako da imaju srednju vrijednost od 0 i standardnu devijaciju od 1.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Pri čemu su:

- $z$  = Z-normalizirana vrijednost (standardizirani rezultat).
- $x$  = Originalna temperatura.
- $\mu$  = Srednja vrijednost (prosjek) svih temperaturnih podataka.
- $\sigma$  = Standardna devijacija svih temperaturnih podataka.

**Srednja vrijednost** ( $\mu$ ) se računa prema formuli:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Gdje je  $N$  ukupan broj mjerenja, a  $x_i$  pojedinačne temperature.

**Standardna devijacija** ( $\sigma$ ) pokazuje koliko se pojedinačne vrijednosti unutar skupa podataka razlikuju od prosječne (srednje) vrijednosti tog skupa, a računa se prema formuli:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

Gdje je  $N$  ukupan broj mjerenja,  $x_i$  pojedinačne temperature, i  $\mu$  srednja vrijednost.

### 3.4. Statistički parametri

Statistički parametri koji se koriste u ovome radu omogućuju identificiranje i kvantificiranje dugoročnih trendova u temperaturnim podacima i klimatskim indeksima. To je ključno za razumijevanje kako se ekstremni temperaturni događaji mijenjaju s vremenom, što je temelj za projiciranje budućih uvjeta i utjecaja (Seneviratne i dr., 2012). Oni su ključni za kvalitetno istraživanje ekstremnih temperaturnih događaja i za razvoj strategija za prilagodbu klimatskim promjenama.

#### 3.4.1. Linearna regresija

Linearna regresija je statistička metoda koja se koristi za predviđanje zavisne varijable na temelju jedne ili više nezavisnih varijabli (Kumari i Yadav, 2018). Široko se primjenjuje u raznim područjima i može se kategorizirati u jednostavnu i višestruku linearnu regresiju (Drinić, 2023). Za procjenu regresijskih parametara najčešće se koristi metoda najmanjih kvadrata (Geer, 2005).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$$

- $y$  - zavisna varijabla (npr. ekstremne temperature),
- $x$  - nezavisna varijabla (npr. godina),
- $\beta_0$  - presjecište (intercept) ili vrijednost  $y$  kada je  $x = 0$ ,
- $\beta_1$  - koeficijent nagiba (slope), koji pokazuje promjenu u  $y$  za svaku promjenu u  $x$ ,
- $\epsilon$  – greška modela (ostatak).

#### 3.4.2. Mann-Kendallov test za analizu trenda

Mann-Kendallov test je statistička metoda koja se koristi za identifikaciju trendova u klimatskim elementima, posebno temperaturi i oborinama (Ghalhari i dr., 2012). Ove metode mogu otkriti značajne trendove u minimalnim, maksimalnim i srednjim temperaturama, kao i u temperaturnim rasponima (Ghalhari i dr., 2012). Analiza obično uključuje ispitivanje podataka dugih vremenskih razdoblja, često desetljeća (Llanes Cárdenas i dr., 2023; Agbo i



Ekpo, 2021). Rezultati mogu pokazati rastuće ili opadajuće trendove, koji mogu biti statistički značajni ili ne (Agbo i Ekpo, 2021; Llanes Cárdenas i dr., 2023).

Nulta hipoteza za ovaj test je da ne postoji trend u vremenskom nizu, dok alternativna hipoteza u dvostranom testu tvrdi da postoji trend, a u jednostranom testu da postoji uzlazni ili silazni trend. Za vremenski niz računa se **Mann-Kendallova testna statistika (S)**:

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

Pri čemu su:

- $X_i$  i  $X_j$  temperaturne vrijednosti u vremenskim točkama  $i$  i  $j$ .
- $\operatorname{sgn}(X_j - X_i)$  je funkcija predznaka:

$$\operatorname{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & \text{ako } X_j - X_i > 0 \\ 0 & \text{ako } X_j - X_i = 0 \\ -1 & \text{ako } X_j - X_i < 0 \end{cases}$$

Funkcija predznaka daje 1 ako je vrijednost u  $j$  veća od vrijednosti u  $i$ , -1 ako je manja, i 0 ako su jednake.

**Izračun varijance (S)** se koristi kako bi se odredila značajnost trenda. Za niz podataka s  $n$  točaka, varijanca  $\sigma_S^2$  izračunava se kao:

$$\sigma_S^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{g=1}^k [m_g(m_g-1)(2m_g+5)]}{18}$$

gdje je:

- $n$  – ukupan broj podataka.
- $m_g$  – broj podudaranja u  $g$ -toj grupi vezanih vrijednosti.
- $k$  – broj grupa s vezanima vrijednostima.

**Standardizirana Mann-Kendallova statistika (Z)** koristi se za određivanje značajnosti trenda i izračunava se ovako:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\sigma_S^2}} & \text{ako } S > 0 \\ 0 & \text{ako } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\sigma_S^2}} & \text{ako } S < 0 \end{cases}$$

Ovdje  $Z$  slijedi standardnu normalnu distribuciju (srednja vrijednost = 0, varijanca = 1).

U ovom radu analiza trendova provodi se na razini statističke značajnosti od 95 %, što znači da se trend smatra značajnim ako je p-vrijednost manja od 0,05. Budući da se radi o dvostranom testu, negativan trend (pri usvajanju alternativne hipoteze) se identificira kada je  $Z$  statistika negativna, a pripadajuća p-vrijednost veća od  $1 - \alpha/2$ , što odgovara lijevom repu distribucije. S druge strane, pozitivan trend se utvrđuje kada je  $Z$  statistika pozitivna, a p-vrijednost manja od  $\alpha/2$ , što predstavlja desni rep distribucije. Ako je p-vrijednost između  $1 - \alpha/2$  i  $\alpha/2$ , zaključuje se da trend nije prisutan.

Obrada podataka, izračun klimatskih indeksa i vremenskih srednjaka provedeni su pomoću programa MS Excela i njegovog statističkog dodatka XLSTAT, dok su vizualizacije i dodatne analize izvršene korištenjem programskog jezika R i Pythona.

### 3.4.3. Senov procjenitelj nagiba

Ova metoda se koristi za kvantificiranje trenda vremenskih serija, uključujući ekstrema poput temperature. To je neparametarski statistički alat koji se koristi za procjenu promjene u vremenskim serijama, bez potrebe za pretpostavkom o distribuciji podataka (Sen, 1968).

Senov procjenitelj nagiba računa se kao medijan svih mogućih nagiba između točaka u vremenskim serijama. Ako imamo vremenske serije  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$ , gdje su  $y_i$  vrijednosti u različitim vremenskim točkama  $x_i$ , procjenitelj nagiba definiran je kao:

$$\beta = \text{medijan} \left( \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \right)$$

gdje su  $x_j > x_i$ , a medijan svih takvih razlika nagiba daje procjenu promjene trenda u vremenu.

### 3.4.4. Analiza ekstremnih vrijednosti (EVA)

Analiza ekstremnih vrijednosti (EVA) statistički je pristup koji se koristi za procjenu vjerojatnosti rijetkih događaja u raznim područjima (Garrido i Lezaud, 2013). Može se primijeniti za procjenu intenziteta i učestalosti ekstremnih temperatura, koristeći metode poput „*peaks-over-threshold*“ (POT) i metode blokovskih maksimuma (BM) za izračunavanje povratnih vrijednosti (Garrido i Lezaud, 2013). Ovaj tip analize je ključan kada analiziramo rijetke i ekstremne pojave koje mogu imati značajne posljedice, jer pruža uvid u učestalost i veličinu takvih ekstrema.

#### A. Metoda blokovskih maksimuma (BM)

Ova metoda uključuje podjelu podataka u blokove (npr. godišnje ili mjesečne) i uzimanje maksimalne vrijednosti iz svakog bloka. Ove ekstremne vrijednosti modeliraju se koristeći Generaliziranu distribuciju ekstremnih vrijednosti (GEV):

$$G(z; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left( - \left[ 1 + \xi \left( \frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right)$$

Gdje su:

- $\mu$  – parametar položaja,
- $\sigma$  – parametar razmjera,
- $\xi$  – parametar oblika, koji određuje rep distribucije.

### B. „Peaks Over Threshold“ (POT)

Metoda analizira sve vrijednosti iznad definiranog praga  $u$ . Ekstremne vrijednosti iznad praga modeliraju se koristeći Generaliziranu Pareto distribuciju (GPD):

$$G(y; \sigma, \xi) = 1 - \left( 1 + \xi \frac{y}{\sigma} \right)^{-1/\xi}$$

Gdje su:

- $y$  – viškovi iznad praga  $u$ ,
- $\sigma$  - parametar razmjera,
- $\xi$  – parametar oblika.

### C. Procjena povratne razine

Na temelju prilagođenog GEV ili GPD modela, moguće je izračunati povratnu razinu za željeno povratno razdoblje  $T$ , koja predstavlja intenzitet ekstremnog događaja koji će se dogoditi u prosjeku jednom u  $T$  godina:

$$z_T = \mu + \frac{\sigma}{\xi} \left( -\log \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-\xi} - 1$$

## 3.5. Klimatski modeli i projekcije

Regionalni klimatski model (RegCM4) jedan je od najkorištenijih alata za simulaciju klimatskih procesa na regionalnoj razini, s ciljem istraživanja utjecaja klimatskih promjena na lokalne klimatske uvjete (Giorgi i dr., 2012). Jedna od ključnih značajki RegCM4 modela je njegova sposobnost pružanja visoke prostorne i vremenske razlučivosti, što je od iznimne važnosti za regije s kompleksnim geološkim ili klimatskim značajkama (Giorgi i dr., 2012). U

ovom istraživanju, RegCM4 je korišten za analizu ekstremnih temperaturnih događaja u Hrvatskoj, posebno u gradovima Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek. Korištena je prostorna razlučivost od 10 km × 10 km, koja omogućuje detaljnu analizu lokalnih klimatskih varijacija, dok vremenska razlučivost korištenjem srednje dnevne temperature zraka za vremensko razdoblje od 1961. do 2020. godine omogućava praćenje kratkoročnih ekstremnih temperaturnih događaja poput toplinskih valova.

### **3.5.1. Struktura modela i njegova relevantnost**

RegCM4 koristi zadane postavke modela, bez specifičnih prilagodbi fizičkih parametara, jer je naglasak ovog istraživanja na analizi ekstremnih temperaturnih događaja, a ne na detaljnoj analizi atmosferskih procesa. Iako model nudi mogućnost prilagodbe različitim fizičkim parametrima, u ovom istraživanju korištene su zadane postavke zbog njihove pouzdanosti u simulacijama za umjerene i mediteranske klimatske zone, poput Hrvatske. Ovaj model također omogućuje uvođenje vanjskih podataka, odnosno graničnih uvjeta, iz globalnih klimatskih modela, što je ključno za uspješne regionalne simulacije. U ovom radu, za simulaciju atmosferskih uvjeta korišteni su granični uvjeti iz globalnog modela MPI-ESM (*Max Planck Institute Earth System Model*), koji je dio CMIP6 projekta. MPI-ESM pruža potrebne globalne klimatske podatke koji omogućuju precizno modeliranje na regionalnoj razini, posebno u analizi interakcija između regionalne i globalne klime (Giorgetta i dr., 2013; Jungclaus i dr., 2013). Korištenje zadane konfiguracije modela RegCM4 smanjuje potrebu za dodatnim prilagodbama, dok MPI-ESM osigurava kvalitetne granične uvjete za dinamičko „downscaling“ globalnih klimatskih simulacija na regionalnu razinu..

### **3.5.2. Scenariji emisija stakleničkih plinova**

Za razumijevanje budućih klimatskih promjena, ključna komponenta RegCM4 modela je korištenje različitih scenarija emisija stakleničkih plinova. Najčešće korišteni scenariji u klimatskim modelima su „*Representative Concentration Pathways*“ (RCP), koji predstavljaju različite moguće buduće razine koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi. RCP scenariji su razvijeni kao dio Projekta međuvladinog panela o klimatskim promjenama (IPCC, 2023) radi projiciranja različitih mogućih klimatskih ishoda do kraja 21. stoljeća, a među najčešće korištenima su RCP4.5 i RCP8.5 scenariji (van Vuuren i dr., 2011).

U ovom istraživanju korišteni su scenariji emisija stakleničkih plinova RCP4.5 i RCP8.5, kako bi se simulirale različite mogućnosti budućeg klimatskog razvoja. Scenarij RCP4.5 predstavlja srednji scenarij emisija, s vrhuncem emisija oko 2040. godine, nakon čega slijedi smanjenje. Scenarij RCP8.5, s druge strane, predstavlja scenarij visokih emisija, koji predviđa kontinuirani rast emisija kroz 21. stoljeće, bez značajnih mjera ublažavanja klimatskih promjena (van Vuuren i dr., 2011).

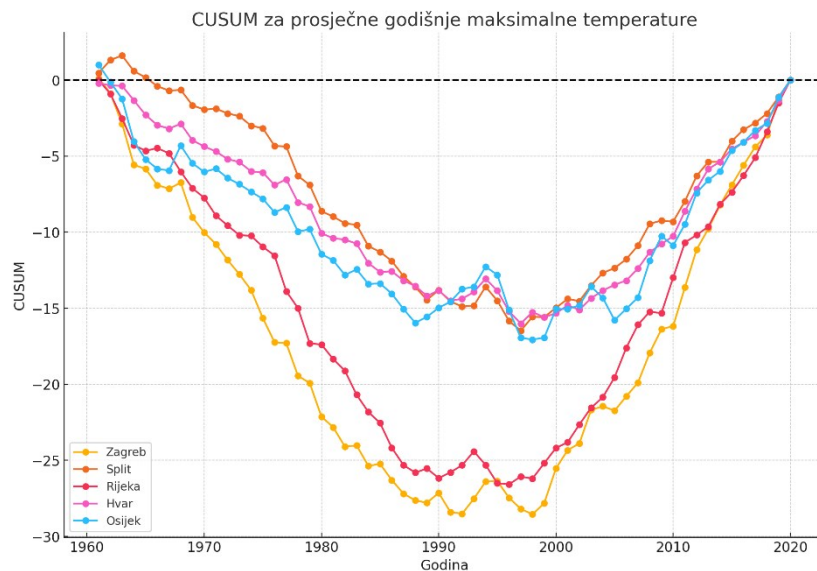
Korištenje ovih scenarija u kombinaciji s RegCM4 omogućuje simulaciju različitih klimatskih uvjeta pod varijabilnim razinama emisija stakleničkih plinova.

## 4. Rezultati i rasprava

Za analizu ekstremnih temperaturnih događaja u Hrvatskoj odabrano je pet gradova: Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek. Ovaj izbor gradova napravljen je kako bi se obuhvatili različiti klimatski i geografski uvjeti unutar zemlje, pružajući sveobuhvatniji uvid u regionalne razlike i obrasce ekstremnih temperatura. Ovi gradovi pružaju reprezentativne uzorke različitih klimatskih tipova, od kontinentalnih do mediteranskih, omogućujući dublje razumijevanje utjecaja regionalnih klimatskih karakteristika na ekstreme temperature.

### 4.1. Analiza podataka DHMZ-a o ekstremnim temperaturama

#### 4.1.1 Statistička analiza za odabrane gradove (1961.-2020.)



Sl. 7. Kumulativni zbroj odstupanja godišnjih maksimalnih temperatura za odabrane gradove u razdoblju 1961.-2020.

Sl. 7 prikazuje kumulativnu sumu odstupanja godišnjih maksimalnih temperatura za odabrane gradove u razdoblju od 1961. do 2020. godine. Na y-osi se nalazi CUSUM vrijednost koja pokazuje kumulativno odstupanje od srednje vrijednosti, dok je na x-osi prikazana godina. Pad CUSUM vrijednosti označava razdoblja u kojima su temperature imale tendenciju smanjenja u odnosu na višegodišnji prosjek, dok porast CUSUM vrijednosti ukazuje na razdoblja u kojima su temperature imale tendenciju porasta u odnosu na prosjek.

Svi analizirani gradovi pokazuju sličan obrazac promjena u CUSUM vrijednostima. U razdoblju od 1960-ih do kraja 1990-ih bilježi se opadajući trend CUSUM vrijednosti, što

ukazuje na dugoročni trend nižih temperatura u tom razdoblju u odnosu na prosjek. Od početka 2000-ih, dolazi do izraženog porasta CUSUM vrijednosti, što jasno ukazuje na značajan dugoročni trend porasta temperatura, odnosno na intenzivno zagrijavanje u posljednja dva desetljeća.

Ovaj obrazac je dosljedan za sve gradove, bilo da se radi o priobalnim (Rijeka, Split, Hvar) ili kontinentalnim (Zagreb, Osijek) područjima, što ukazuje na ujednačene klimatske promjene diljem Hrvatske. Svi gradovi su prešli iz razdoblja smanjivanja maksimalnih godišnjih temperatura u razdoblje ubrzanog zagrijavanja, naglašavajući sve izraženije promjene u klimatskim obrascima od 2000-ih godina.

Osim CUSUM metode, analizirani su i statistički parametri ekstremnih temperatura za tih pet gradova. Prosječna maksimalna temperatura u Zagrebu tijekom ovog perioda iznosila je 24,0 °C, uz standardnu devijaciju od 7,55 °C, što ukazuje na značajnu fluktuaciju ekstremnih temperatura kroz godine. Maksimalna zabilježena temperatura u Zagrebu bila je 38,6 °C, dok je najniža maksimalna temperatura iznosila svega 3,0 °C, što odražava sezonske razlike i varijabilnost kroz godine. Slično tome, Split je imao nešto višu prosječnu maksimalnu temperaturu od 24,35 °C, dok je maksimalna zabilježena temperatura dosegula 38,5 °C. Varijabilnost u Splitu, izražena standardnom devijacijom od 7,37 °C, također je značajna, ali ne toliko kao u Zagrebu.

Rijeka, koja je na sjeveru Jadranske obale, imala je prosječnu maksimalnu temperaturu od 23,84 °C, dok je maksimalna zabilježena temperatura u Rijeci bila 40,0 °C, što ukazuje na značajnu izloženost ekstremnim ljetnim temperaturama. Hvar je zabilježio prosječnu maksimalnu temperaturu od 24,88 °C, uz maksimalnu zabilježenu temperaturu od 38,0 °C, s relativno nižom standardnom devijacijom od 6,41 °C, što ukazuje na stabilniju klimu s manje izraženim ekstremima u odnosu na druge gradove. Osijek, kao grad u kojem su izražena kontinentalna obilježja klime, ima najviši raspon s prosječnom maksimalnom temperaturom od 24,94 °C i maksimalnom zabilježenom temperaturom od 40,3 °C. Standardna devijacija u Osijeku iznosila je 8,22 °C, što ukazuje na veći raspon temperature tijekom sezona u usporedbi s drugim gradovima.

Promjene tijekom godina i sezona jasno pokazuju razlike između priobalnih i kontinentalnih gradova. Gradovi poput Osijeka i Zagreba, smješteni u kontinentalnom dijelu, imaju veću

varijabilnost u temperaturama, dok obalni gradovi poput Splita i Hvara pokazuju manji raspon u temperaturnim vrijednostima. Sezonske usporedbe također ukazuju na to da su ljetne temperature osobito visoke u Rijeci i Osijeku, gdje su zabilježeni ekstremni maksimumi od 40 °C.

#### 4.1.2 Usporedba temperaturnih trendova (1961.-1990. i 1991.-2020.)

Tab. 1. Trendovi promjene srednjih godišnjih maksimalnih temperatura za odabrane gradove Hrvatske u razdobljima 1961.-1990. i 1991.-2020.

Grad	Razdoblje	Trend (°C/godina)	R <sup>2</sup>
Zagreb	1961.-1990.	0,023469	0,000719
Zagreb	1991.-2020.	0,066759	0,006086
Split	1961.-1990.	-0,02354	0,000796
Split	1991.-2020.	0,047649	0,003043
Rijeka	1961.-1990.	-0,00381	2,26×10 <sup>-5</sup>
Rijeka	1991.-2020.	0,055187	0,004236
Hvar	1961.-1990.	-0,00067	8,83×10 <sup>-7</sup>
Hvar	1991.-2020.	0,053142	0,004856
Osijek	1961.-1990.	0,012136	0,000156
Osijek	1991.-2020.	0,051585	0,00307

Analiza temperaturnih trendova za gradove: Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek provedena je za dva standardna razdoblja: 1961.-1990. i 1991.-2020. Linearna regresija i Mann-Kendallov test korišteni su na mjesečnim srednjim maksimalnim temperaturama kako bi se utvrdili dugoročni trendovi i statistička značajnost promjena u klimatskim uvjetima.

Za razdoblje 1961.-1990., linearna regresija pokazala je minimalne promjene u godišnjim temperaturama za većinu gradova, s niskim vrijednostima nagiba (tab. 1). Na primjer, Rijeka je imala negativan trend od -0,0038 °C po godini, dok je Osijek imao blagi pozitivni trend od 0,0121 °C po godini. Vrijednosti R<sup>2</sup> za ovo razdoblje su iznimno niske, što sugerira da varijacije u temperaturama nisu bile značajno povezane s godinama u tom periodu. R<sup>2</sup> vrijednosti, koje mjere postotak odstupanja objašnjen modelom, bile su manje od 0,1 u svim gradovima, što ukazuje na vrlo slab ili nikakav trend. Najveći trend zabilježen je u Splitu, gdje je negativan nagib iznosio -0,0235 °C po godini, uz relativno povišen R<sup>2</sup> od 0,1053. Iako viša od ostalih gradova, ova vrijednost također ukazuje na slab odnos između promatranog



razdoblja i varijacija u temperaturama tijekom tog razdoblja, što sugerira da se promjene u temperaturama ne mogu dovoljno objasniti linearnim trendom.

Mann-Kendallov test također je potvrdio da u razdoblju 1961.-1990. nema značajnih klimatskih promjena. Svi gradovi pokazali su „*no trend*“ prema Mann-Kendallovom testu, s p-vrijednostima znatno iznad 0,05, što ukazuje na to da ne postoji statistički značajna promjena u temperaturama. Najbliži statistički značajnom trendu bio je Split s p-vrijednošću od 0,056, no to još uvijek ne prelazi prag statističke značajnosti.

Nasuprot tome, u razdoblju 1991.-2020. određeni su jači trendovi porasta temperature u svim gradovima. Linearna regresija pokazala je pozitivne nagibe za sve analizirane gradove: Rijeka je zabilježila koeficijent rasta od 0,0552 °C po godini, Osijek 0,0500 °C, a najveći koeficijent rasta zabilježen je u Zagrebu, gdje su temperature rasle po stopi od 0,0668 °C po godini. Ovi trendovi jasno sugeriraju ubrzano zagrijavanje u odnosu na prethodno razdoblje.

Vrijednosti  $R^2$  za razdoblje 1991.-2020. značajno su više nego u prethodnom razdoblju, što ukazuje na jaču povezanost između porasta temperature i promatranog razdoblja. Rijeka je imala  $R^2$  od 0,34, a Hvar najviše  $R^2$  od 0,42, što znači da između 34% i 42% varijabilnosti u temperaturama može biti objašnjeno promjenom u promatranom razdoblju. Ovi rezultati sugeriraju da su promjene u temperaturama bile konzistentnije i sustavnije tijekom ovog razdoblja, s jasnim trendom zagrijavanja.

Rezultati Mann-Kendallovog testa za razdoblje 1991.-2020. dodatno potvrđuju ove rezultate. Svi gradovi pokazuju „*increasing*“ trend s p-vrijednostima znatno ispod 0,05, što ukazuje na statistički značajne promjene. Primjerice, Rijeka ima p-vrijednost od 0,0006, a Hvar od 0,0005, što sugerira vrlo snažnu statističku pouzdanost u zaključku porasta temperature. Osijek, s p-vrijednošću od 0,0497 također potvrđuje značajan porast temperatura, iako je trend nešto slabiji u odnosu na druge gradove.

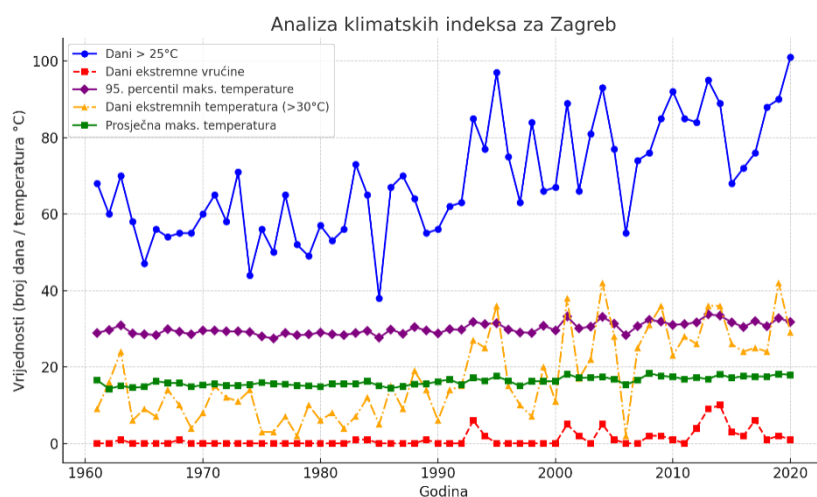
Ove statističke promjene u godišnjim temperaturama jasno pokazuju kako se klimatski uvjeti mijenjaju, s naglaskom na ubrzano zagrijavanje u posljednjim desetljećima. Rast temperatura u urbanim sredinama može biti povezan i s efektom urbanog toplinskog otoka, uz klimatske promjene koje pridonose globalnom porastu temperatura (McCarthy i dr., 2010). Sveukupno, ovi rezultati pružaju uvid u lokalne klimatske promjene u Hrvatskoj, s posebnim naglaskom

na razdoblje nakon 1990. godine, kada su trendovi zagrijavanja postali značajniji i konzistentniji, što je u skladu s prethodnim istraživanjima o klimatskim promjenama u Hrvatskoj i regiji (Alebić-Juretić, 2011).

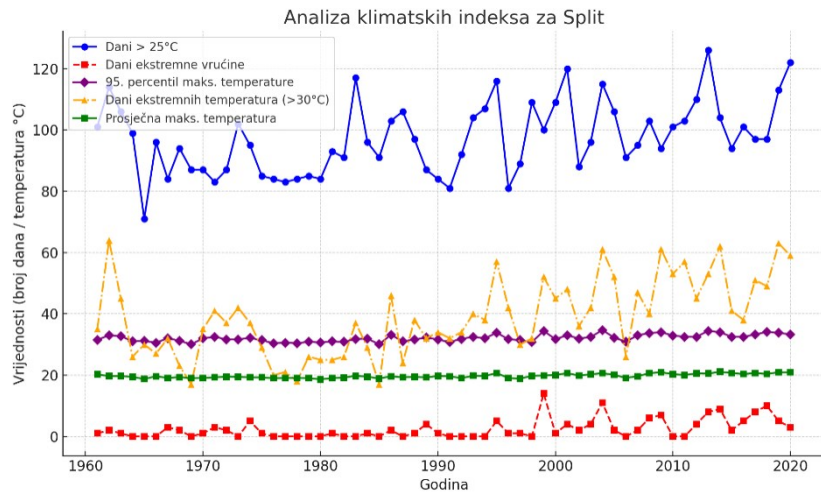
#### 4.1.3 Klimatski indeksi ekstremnih toplinskih događaja

Na početku analize, naglasak je stavljen na izračun i analizu klimatskih indeksa kako bi se detaljno identificirali i razumjeli obrasci promjena ekstremnih temperatura u pet odabranih gradova: Zagrebu, Splitu, Rijeci, Hvaru i Osijeku. Primarni cilj analize klimatskih indeksa je dobiti uvid u promjene u intenzitetu, učestalosti i trajanju ekstremnih toplinskih događaja tijekom perioda 1961.-2020. Za svaki grad izračunati su indeksi poput broja dana s maksimalnom temperaturom iznad 25 °C (SU25), iznad 30 °C (HE) i iznad 35 °C (EHD). Uz to, analizirane su vrijednosti 95. percentila maksimalnih temperatura kako bi se procijenile najekstremnije tople temperature.

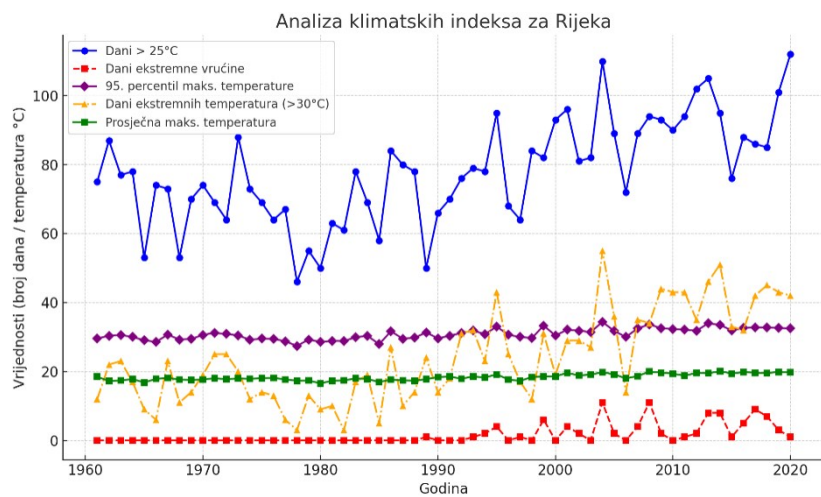
Grafički prikazi za gradove Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek otkrivaju različite obrasce u promjenama ekstremnih temperatura tijekom posljednja dva standardna razdoblja (sl. 8.-12.). Ti obrasci nisu samo posljedica općih klimatskih trendova, već su također pod značajnim utjecajem geografskog i klimatskog položaja ovih gradova. S obzirom na njihove prostorne karakteristike, možemo uočiti značajne razlike između kontinentalnih i mediteranskih gradova, što pruža dodatni uvid u dinamiku klimatskih promjena.



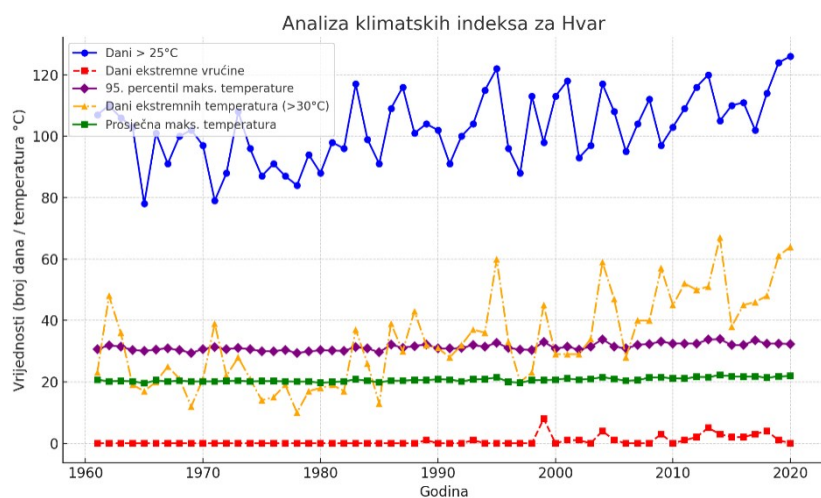
Sl. 8. Odabrani klimatskih indeksi za Zagreb u razdoblju 1961.-2020.



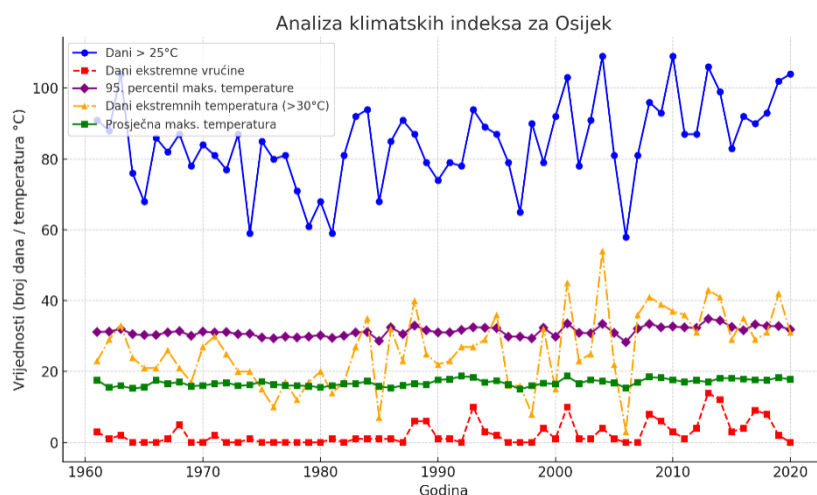
Sl. 9. Odabrani klimatski indeksi za Split u razdoblju 1961.-2020.



Sl. 10. Odabrani klimatski indeksi za Rijeku u razdoblju 1961.-2020.



Sl. 11. Odabrani klimatski indeksi za Hvar u razdoblju 1961.-2020.



Sl. 12. Odabrani klimatski indeksi za Osijek u razdoblju 1961.-2020.

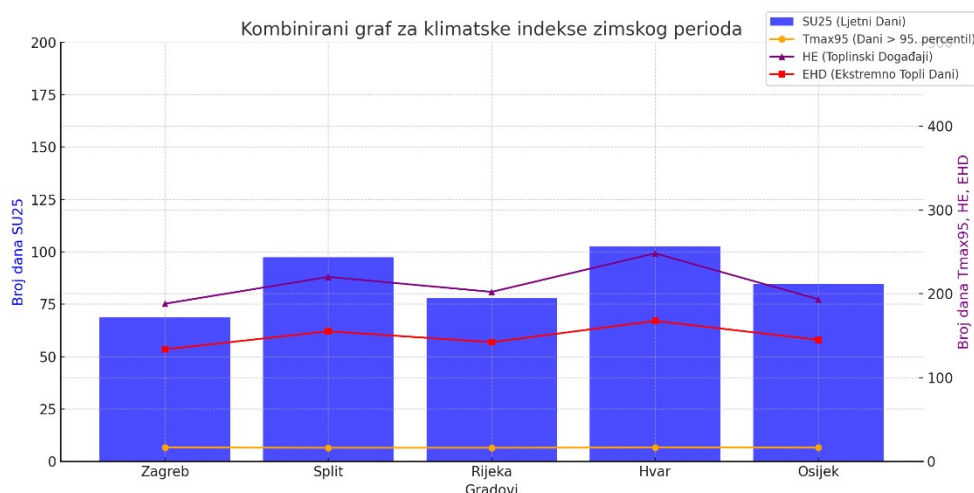
Kontinentalni gradovi, poput Zagreba i Osijeka, karakterizirani su većom raznolikošću ekstremnih toplinskih događaja na godišnjoj razini, što ukazuje na izraženije promjene u njihovom klimatskom režimu (sl. 8 i 12). Ovi gradovi bilježe izraženije promjene u broju dana s ekstremno visokim temperaturama, osobito u razdobljima poput 1980-ih i 1990-ih godina. U Zagrebu i Osijeku, učestalost dana s temperaturama iznad 30 °C i 35 °C naglo raste u tim godinama, što je može ukazivati na utjecaj klimatskih promjena, ali i kontinentalnosti klime koja je podložnija ekstremnim oscilacijama.

Nasuprot tome, na sl. 9 i 11 vidimo kako mediteranski gradovi poput Splita i Hvara pokazuju blaži porast u ekstremnim događajima, iako su toplinski dani s temperaturama iznad 25 °C u ovim gradovima stalno prisutni. Broj dana s ekstremno visokim temperaturama u mediteranskim gradovima pokazuje stabilniji trend, što ukazuje na stabilizirajući utjecaj Jadranskog mora. U Splitu i Hvaru, more djeluje kao termalni regulator koji ublažava ekstremne promjene temperature, zbog čega su mediteranski gradovi manje skloni naglim oscilacijama. Na primjer, broj dana s temperaturama iznad 35 °C u Splitu pokazuje blagi porast (sl. 9), dok je u Hvaru stabilniji (sl. 11), iako su i ovdje prisutni ekstremni toplinski događaji.

Vrijednosti 95. percentila maksimalnih temperatura također pokazuju zanimljive razlike. U kontinentalnim gradovima poput Zagreba i Osijeka (sl. 8 i 12), ovaj indeks pokazuje veću varijabilnost s godinama, što upućuje na češće i intenzivnije toplinske valove. S druge strane,

u mediteranskim gradovima poput Rijeke i Hvara, ovaj porast je umjereniji, što je rezultat kombinacije geografskog položaja i maritimnog utjecaja koja ublažava ekstremne događaje. Ovi rezultati ukazuju na to da klimatske promjene ne pogađaju sve regije jednako, te da kontinentalni gradovi bilježe veće ekstreme u usporedbi s gradovima na obali.

#### 4.1.4. Sezonska analiza klimatskih indeksa



Sl. 13. Klimatski indeksi zimskog perioda za odabrane gradove Hrvatske u razdoblju 1961.-2020.

Na sl. 13 se vidi grafički prikaz klimatskih indeksa za zimski period u gradovima Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek, koji su temeljeni na dnevnim podacima maksimalnih temperatura u razdoblju od 1961. do 2020. godine, otkrivaju različite obrasce u učestalosti toplih dana tijekom zime. Svaki od ovih indeksa pruža uvid u temperaturne ekstreme u zimskim mjesecima, a pragovi su u ovome radu prilagođeni kako bi odgovarali zimskim uvjetima. Indeksi koji su izvorno razvijeni za ljetne uvjete, poput EHD i HE, prilagođeni su tako da odgovaraju temperaturama karakterističnim za zimu. Primjerice, prag za EHD je smanjen na 20 °C, a za HE na 15 °C, kako bi se omogućila analiza neočekivano toplih dana u zimskim mjesecima. Također, indeks SU25, koji bilježi dane s maksimalnom temperaturom iznad 25 °C, zadržan je iako je pojava takvih dana izuzetno rijetka u zimskom periodu.

Prikaz indeksa SU25 pokazuje očekivano niske vrijednosti u svim analiziranim gradovima (sl. 13). U većini slučajeva, poput Zagreba, Splita i Osijeka, ovaj indeks gotovo da i ne bilježi značajne vrijednosti, dok su Rijeka i Hvar pokazali nešto veću učestalost toplijih dana, ali i

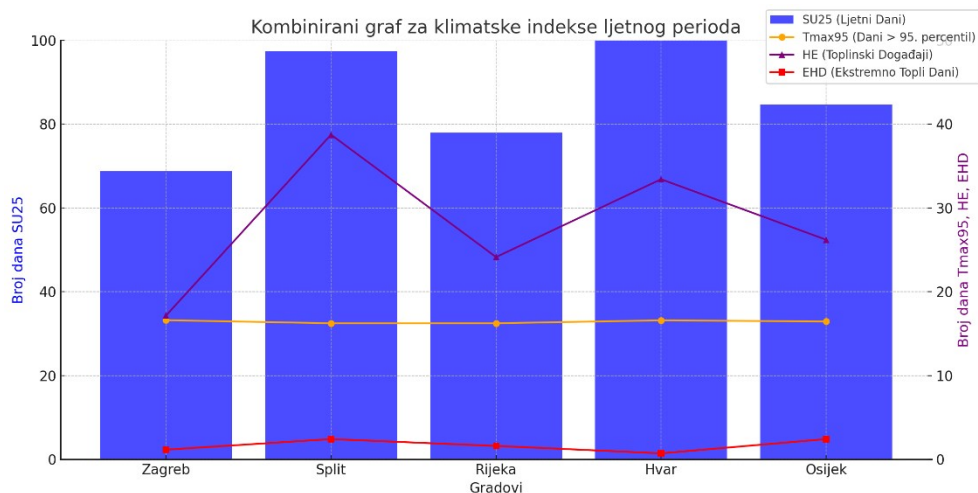
dalje u niskim brojevima. Ova pojava ukazuje na to da, iako obalni gradovi poput Hvara imaju više temperature zimi, dani s temperaturama iznad 25 °C su vrlo rijetki u zimskom periodu.

Tmax95, koji bilježi dane s temperaturama iznad 95. percentila, otkriva veću varijabilnost među gradovima. U Rijeci i Hvaru mogu se očekivati temperature više od 95. percentila, što ukazuje na kraće periode s neočekivano visokim temperaturama tijekom zime. Osijek, kao kontinentalni grad, pokazuje relativno umjerenu prisutnost ovih dana, dok su Zagreb i Split zabilježili zanemarivu učestalost dana s temperaturama iznad 95. percentila, što ukazuje na stabilniju zimsku klimu u tim gradovima.

Toplinski događaji, definirani kao nizovi uzastopnih dana s temperaturama iznad 15 °C, pokazuju veće razlike među gradovima. Hvar i Split bilježe značajnu učestalost ovih toplih perioda, dok Zagreb i Rijeka imaju umjerene vrijednosti. Ovi rezultati mogu se povezati s utjecajem mora na obalnim područjima, gdje ono djeluje kao regulator temperature, smanjujući amplitude temperaturnih oscilacija. Osijek, iako kontinentalni grad, bilježi prisutnost toplinskih događaja, što može ukazivati na povremene prodore toplijeg zraka iz južnih i jugozapadnih regija.

Ekstremno topli dani, definirani kao dani s temperaturama iznad 20 °C, rijetki su tijekom zime, ali njihova prisutnost je primjetna u obalnim gradovima poput Hvara i Rijeke. U Zagrebu i Splitu učestalost ovih dana je nešto manja, dok se u Osijeku javljaju češće, što ukazuje da se zimi javljaju razdoblja visokih temperatura.

Ukupno gledano, analiza zimskih klimatskih indeksa pokazuje da, iako su ekstremno visoke temperature rjeđe tijekom zime, postoje značajne regionalne razlike. U kontinentalnim gradovima, poput Osijeka, češće se bilježe dulja razdoblja s toplim danima zimi, dok obalni gradovi imaju umjerenije zimske temperature zbog utjecaja mora, koje smanjuje oscilacije i ublažava hladne valove. Povremeno se i u obalnim gradovima javljaju ekstremni događaji, poput iznimno toplih zimskih dana. Ovi rezultati naglašavaju složenost klimatskih uvjeta u Hrvatskoj i važnost sezonske analize u razumijevanju varijabilnosti ekstremnih temperatura.



Sl. 14. Klimatski indeksi ljetnog perioda za odabrane gradove Hrvatske u razdoblju 1961.-2020.

Grafički prikaz klimatskih indeksa za ljetni period pruža uvid u dinamiku ekstremnih temperatura tijekom najtoplijeg dijela godine (sl. 14). Indeksi, poput SU25, EHD te Tmax95, odražavaju relevantne temperaturne ekstreme za ljetni period.

Indeks SU25 pokazuje visoku učestalost u svim analiziranim gradovima, što ukazuje na prisutnost većeg broja ljetnih dana s temperaturama iznad 25 °C, posebno u obalnim gradovima poput Splita i Hvara. Ovi rezultati očekivano pokazuju da se u obalnim gradovima češće javljaju dani s višim temperaturama tijekom ljeta, dok Zagreb i Osijek, kao kontinentalni gradovi, bilježe nešto manju učestalost takvih dana, iako su također izrazito prisutni.

Tmax95, koji pokazuje dane s temperaturama iznad 95. percentila, otkriva značajne razlike među gradovima. Hvar se ističe s najvećim brojem dana s ekstremno visokim temperaturama, dok Rijeka i Split također bilježe visoke vrijednosti. Ovi podaci pokazuju da se u obalnim gradovima češće javljaju visoke temperature, dok kontinentalni gradovi poput Zagreba i Osijeka bilježe umjereniju prisutnost ovih dana, iako su i oni podložni povremenim ekstremnim ljetnim temperaturama.

Toplinski događaji, definirani kao nizovi uzastopnih dana s temperaturama iznad 30 °C, pokazali su značajnu varijabilnost među gradovima. Hvar i Split imaju izrazito visok broj ovih događaja, što je u skladu s njihovom mediteranskom klimom, dok Zagreb i Osijek

pokazuju umjereniji broj toplinskih događaja, ali ipak značajnu prisutnost, što može ukazivati na povremene prodore toplih zračnih masa u kontinentalna područja Hrvatske tijekom ljeta.

Ekstremno topli dani (EHD), definirani kao dani s temperaturama iznad 35 °C, očekivano su najčešći u obalnim gradovima poput Hvara i Splita. Ovi gradovi bilježe znatno veći broj ekstremno toplih dana u usporedbi s kontinentalnim gradovima poput Zagreba i Osijeka, gdje su ovi dani rjeđi, ali ipak prisutni. S klimatskog aspekta, ekstremno visoke temperature se očekuju baš u kontinentalnim područjima, a ne u onima gdje postoji utjecaj mora.

Ukupno gledano, analiza klimatskih indeksa za ljetni period pokazuje da su ekstremno visoke temperature izrazito prisutne u obalnim gradovima, dok su kontinentalni gradovi, poput Zagreba i Osijeka, podložni povremenim, ali značajnim toplinskim događajima. Ovi rezultati ukazuju na regionalne razlike u pojavama ekstremnih vrućina tijekom ljeta, naglašavajući važnost praćenja i analize klimatskih ekstrema u kontekstu globalnih klimatskih promjena.

## 4.2. Statistički trendovi i modeli

### 4.2.1. Analiza trendova Mann-Kendallovim testom i Senovim nagibom

Tab. 2. Mann-Kendallov tau i Senov nagib za trendove maksimalnih mjesečnih temperatura u odabranim gradovima Hrvatske u razdoblju 1961.-2020.

Grad	Tau (Mann-Kendall)					Senov nagib				
	Zagreb	Split	Rijeka	Hvar	Osijek	Zagreb	Split	Rijeka	Hvar	Osijek
Mjesec										
1	0,3250	0,2234	0,2334	0,1823	0,3299	0,0938	0,0240	0,0364	0,0186	0,1027
2	0,2576	0,1064	0,2039	0,1721	0,1894	0,0735	0,0125	0,0465	0,0200	0,0750
3	0,2603	0,2232	0,2192	0,2634	0,0993	0,0625	0,0364	0,0588	0,0388	0,0194
4	0,2759	0,2684	0,3438	0,2357	0,0860	0,0634	0,0462	0,0789	0,0375	0,0217
5	0,2722	0,1585	0,1997	0,2326	0,0809	0,0500	0,0261	0,0405	0,0373	0,0143
6	0,4058	0,2428	0,3627	0,3227	0,2338	0,0698	0,0486	0,0750	0,0512	0,0400
7	0,3327	0,2489	0,4256	0,2400	0,2188	0,0588	0,0278	0,0800	0,0270	0,0333
8	0,2515	0,2252	0,3470	0,3449	0,2482	0,0571	0,0429	0,0750	0,0519	0,0500
9	0,1273	0,1331	0,2486	0,2858	-0,0400	0,0286	0,0227	0,0481	0,0444	-0,0091
10	0,1612	-0,0029	-0,0041	-0,0053	0,0110	0,0250	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	0,1616	0,1919	0,2487	0,2730	0,0657	0,0381	0,0250	0,0429	0,0314	0,0139
12	0,3088	0,0980	0,2787	0,0628	0,2215	0,0870	0,0100	0,0333	0,0077	0,0629



U analizi maksimalnih mjesečnih temperatura za gradove Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek provedeni su Mann-Kendallov test i Senova metoda za procjenu trendova i nagiba. Ovi statistički alati omogućuju identifikaciju i kvantifikaciju dugoročnih promjena u temperaturama te procjenu značajnosti tih promjena u vremenskom razdoblju od 1961. do 2020. godine.

Analiza mjesečnih trendova za Zagreb prikazana tab. 2, pokazuje značajne promjene tijekom određenih mjeseci. Najveći uzlazni trend zabilježen je u srpnju, s Mann-Kendallovim tau koeficijentom od 0,325 i Senovim nagibom od 0,094 °C, što kvantificira rast maksimalnih temperatura za oko 0,094 °C mjesečno. Ovi rezultati ukazuju na značajan porast maksimalnih temperatura tijekom ljeta, što može imati implikacije na pojavu toplinskih valova. Također, travanj i kolovoz pokazuju umjereno značajne pozitivne trendove, što sugerira da klimatske promjene ne utječu samo na vrhunce ljeta već i na prijelazna razdoblja. S obzirom na ove trendove, za Zagreb je utvrđeno statistički značajan porast temperature.

Mjesečni trendovi za Split ukazuju na blaži uzlazni trend u većini mjeseci, ali nisu svi statistički značajni. Veljača i prosinac, primjerice, pokazuju tau koeficijente od oko 0,26, dok Senov nagib iznosi između 0,05 i 0,07 °C po mjesecu. Ovi rezultati ukazuju na mogućnost sporog, ali stabilnog porasta maksimalnih temperatura tijekom hladnijih mjeseci. Međutim, trendovi tijekom proljetnih i jesenskih mjeseci, poput ožujka i studenog, gotovo su neutralni i nisu statistički značajni pa možemo pretpostaviti da bi uzlazni trend mogao postati izraženiji u budućnosti, posebno uzimajući u obzir globalne klimatske projekcije koje predviđaju sve češće ekstremne vremenske uvjete.

Rijeka, kao obalni grad, pokazuje značajne pozitivne trendove u gotovo svim mjesecima. Najizraženiji rast maksimalnih temperatura zabilježen je u lipnju, s tau koeficijentom 0,276 i Senovim nagibom od 0,063 °C po mjesecu. Travanj i svibanj također pokazuju umjereno značajne trendove, što potvrđuje kontinuitet rasta temperatura tijekom proljetnih i ljetnih mjeseci. Porast temperature zraka i mora na području Jadranskog mora može doprinijeti dodatnoj osjetljivosti obalnih gradova poput Rijeke na klimatske promjene (Bonacci i dr., 2021). Posebno, utjecaj povišene temperature mora može pojačati lokalne klimatske promjene, što je ključno za razmatranje budućih scenarija klimatske prilagodbe. Ovi rezultati ukazuju na povećanje učestalosti i intenziteta toplinskih ekstrema.

Hvar, poznat po svojoj toploj mediteranskoj klimi, bilježi spore, ali stabilne pozitivne trendove u maksimalnim temperaturama. Siječanj pokazuje najveći uzlazni trend s tau koeficijentom 0,27 i Senovim nagibom od 0,05 °C po mjesecu, što ukazuje na sve toplije zime. Lipanj i rujanj, međutim, pokazuju gotovo neutralne trendove, dok ostatak godine bilježi vrlo male, ali postojane pozitivne promjene. Hvar bi mogao svjedočiti intenzivnijim toplinskim ekstremima u budućnosti.

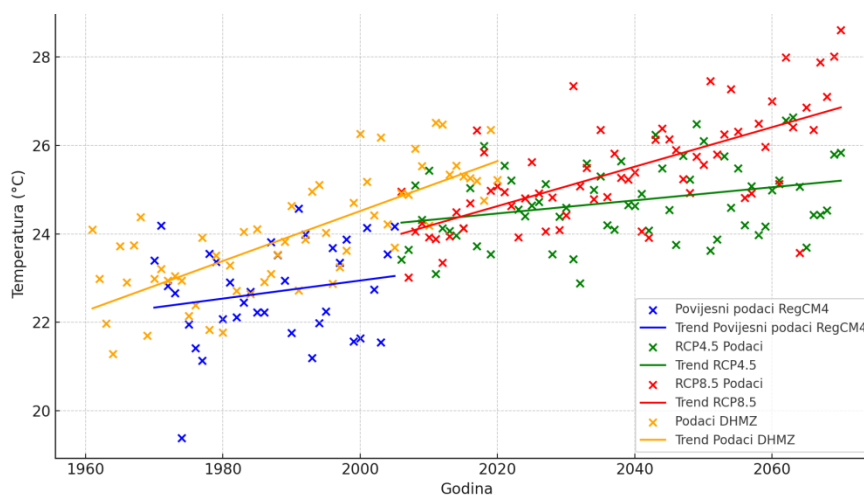
Osijek, kao grad s izraženim kontinentalnim utjecajima, pokazuje manje izražene trendove u usporedbi s obalnim gradovima. Najveći uzlazni trend zabilježen je u svibnju i rujnu, gdje tau koeficijent doseže 0,22, a Senov nagib iznosi 0,06 °C po mjesecu. Većina ostalih mjeseci pokazuje blage pozitivne trendove, ali bez značajne statističke značajnosti. Ovi rezultati ukazuju na prisutnost globalnog zagrijavanja u kontinentalnom dijelu Hrvatske.

U tab. 2 s analizom trendova, nulte vrijednosti za Mann-Kendall tau i Senov nagib ukazuju na odsutnost značajnog trenda u promatranom vremenskom nizu. Ovo može biti rezultat stabilnosti klimatskih uvjeta u određenom razdoblju ili statističke nesigurnosti zbog prirodne varijabilnosti podataka. Usporedbom svih gradova, Osijek i Zagreb pokazuju najsnažnije i statistički značajne rastuće trendove maksimalnih mjesečnih temperatura, osobito u ljetnim mjesecima, što upućuje na izraženiji utjecaj klimatskih promjena u unutrašnjim područjima Hrvatske. Rijeka i Split pokazuju blaže promjene, s Rijekom koja ima stabilnije trendove zbog utjecaja Jadranskog mora. Hvar ima najmanje izražene trendove, a u nekim mjesecima nisu statistički značajni.

Ovi rezultati ukazuju na prisutnost klimatskih promjena u Hrvatskoj, s različitim intenzitetima ovisno o geografskom položaju. Gradovi u unutrašnjosti bilježe izraženije promjene, dok obalni gradovi imaju stabilniju klimu zahvaljujući utjecaju mora, iako se regionalne razlike mogu povezati s lokalnim uvjetima i klimatskim sustavima.

### **4.3 Usporedba klimatskih modela i scenarija**

U ovom su poglavlju prikazane slike s prosječnim maksimalnim temperaturama za odabrane gradove u razdoblju od 1961. do 2070. godine, uključujući povijesne podatke iz RegCM4 modela, podatke DHMZ-a, te klimatske projekcije za scenarije RCP4.5 i RCP8.5. Svaka od slika prikazuje trendove i njihove regresijske linije za povijesne i projicirane podatke.



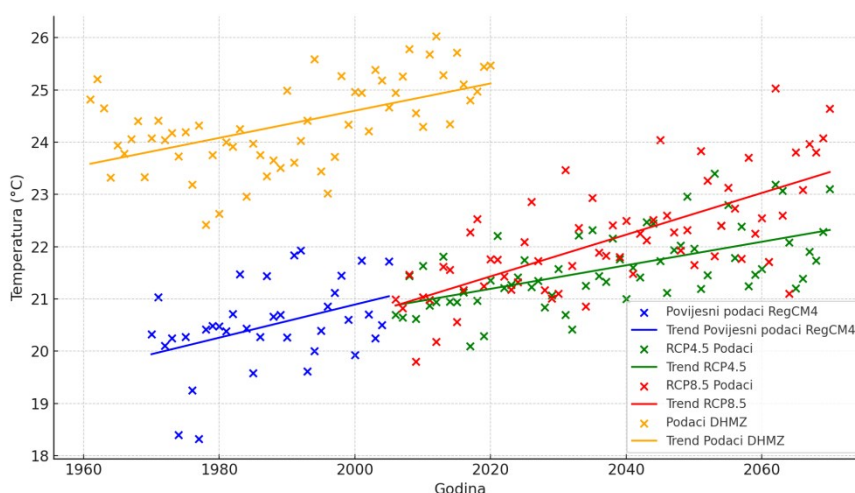
Sl. 15. Usporedba povijesnih i projiciranih podataka srednjih maksimalnih temperatura za Zagreb prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.

Na sl. 15, podaci DHMZ-a za razdoblje 1961.-2020. pokazuju blagi porast maksimalnih temperatura u Zagrebu, što je potvrđeno regresijskom linijom. Regresijska linija prikazuje prosječni trend promjene temperature kroz vrijeme, a njezin nagib od 0,056 sugerira stabilan porast maksimalnih temperatura godišnje. Značenje regresijske linije leži u kvantificiranju trenda; pozitivni nagib ukazuje na porast, dok bi negativni ukazivao na pad.

Rezultati Mann-Kendallovog testa, koji procjenjuje monotonost trenda bez pretpostavke linearnosti, pokazuju Kendallov tau od 0,538. Kendallov tau je statistička mjera koja ukazuje na smjer i jačinu trenda: pozitivna vrijednost ukazuje na rastući trend, dok negativna ukazuje na opadajući. Vrijednost tau od 0,538 sugerira umjereno jak trend porasta maksimalnih temperatura u podacima DHMZ-a. Uz to, p-vrijednost, koja iznosi manje od 0,05, ukazuje na statističku značajnost trenda, što znači da je vrlo mala vjerojatnost da je uočen trend rezultat slučajnosti.

Povijesni podaci iz RegCM4 modela za razdoblje 1970.-2005. pokazuju nešto blaži trend porasta, s nagibom regresijske linije od 0,019. Iako ovaj trend sugerira određeni porast maksimalnih temperatura, Mann-Kendallov test ovdje ne pokazuje statistički značajan rezultat, budući da p-vrijednost prelazi 0,05. To znači da nema dovoljno dokaza za tvrdnju da postoji značajan trend u ovom razdoblju. Kendallov tau iznosi 0,108, što ukazuje na vrlo slab trend porasta.

Projekcije za budućnost, temeljene na scenarijima RCP4.5 i RCP8.5, pokazuju izraženije promjene. U scenariju RCP4.5, nagib regresijske linije iznosi 0,015, što ukazuje na umjereni porast maksimalnih temperatura. Kendallov tau od 0,200 sugerira slab, ali pozitivni trend, dok je p-vrijednost manja od 0,05, što znači da je taj trend statistički značajan i nije rezultat slučajnosti. S druge strane, scenarij RCP8.5 pokazuje znatno jači porast temperatura, s nagibom regresijske linije od 0,048. Kendallov tau u ovom slučaju iznosi 0,504, što ukazuje na umjereni jak trend porasta, a p-vrijednost manja od 0,05 potvrđuje statističku značajnost tog trenda. P-vrijednost, koja se često koristi za procjenu statističke značajnosti, pokazuje koliko je vjerojatno da je uočeni rezultat posljedica slučajnosti. U svim slučajevima gdje je p-vrijednost manja od 0,05, to ukazuje da su rezultati statistički značajni, odnosno da je vrlo mala vjerojatnost da je trend rezultat slučajnosti. Ovi rezultati sugeriraju potencijalno ozbiljne klimatske promjene za Zagreb, posebno u kontekstu scenarija RCP8.5, koji predviđa značajniji porast maksimalnih temperatura u usporedbi s umjerenijim scenarijem RCP4.5, ako ne dođe do značajnog smanjenja emisija stakleničkih plinova.



Sl. 16. Usporedba povijesnih i projiciranih podataka srednjih maksimalnih temperatura za Split prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.

Prema sl 16. koja prikazuje Split, analizirani trendovi jasno ukazuju na porast temperatura kroz cijelo razdoblje, a podaci iz različitih izvora, uključujući povijesne podatke RegCM4 modela, klimatske projekcije RCP4.5, RCP8.5, kao i podatke DHMZ-a pokazuju kako se taj trend razvija u prošlosti i budućnosti pod različitim klimatskim uvjetima.

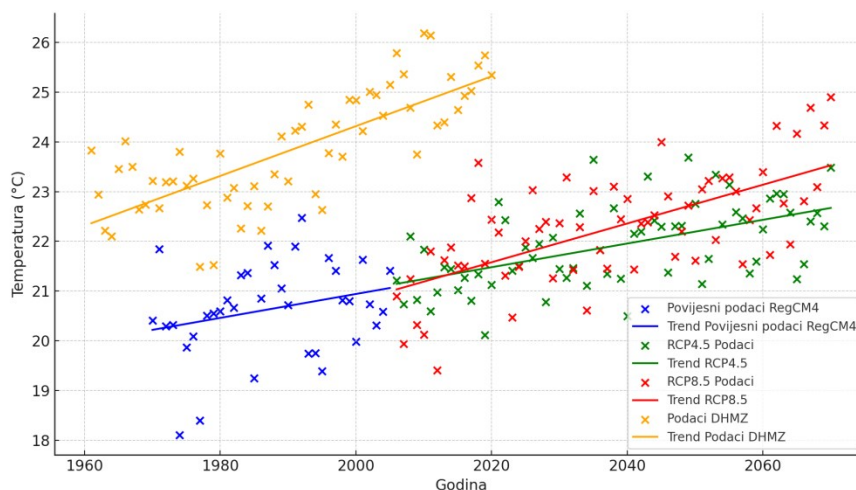
U povijesnim podacima (1970.-2005.) Kendallov tau iznosi 0,263, a nagib regresijske linije od 0,017 °C godišnje, što ukazuje na slab pozitivan trend, dok p-vrijednost od 0,025 sugerira da je ovaj trend statistički značajan. Senov procjenitelj nagiba pokazuje godišnji porast od 0,025 °C, s intervalom pouzdanosti od 0,003 °C do 0,051 °C, što potvrđuje da je rast maksimalnih temperatura kroz povijesno razdoblje stabilan, ali nije intenzivan kao u projekcijama za budućnost.

Podaci iz scenarija RCP4.5 pokazuju nagib regresijske linije od 0,025 °C godišnje, dok Kendallov tau 0,425, što ukazuje na umjereno jak trend porasta temperatura. P-vrijednost od  $5,76 \times 10^{-7}$  ukazuje na izuzetno visoku statističku značajnost trenda. Prema Senovom procjenitelju, godišnji rast temperature iznosi 0,022 °C, s intervalom pouzdanosti od 0,014 °C do 0,030 °C, što sugerira umjereni porast temperatura u budućnosti, čak i pod uvjetima smanjenja emisija stakleničkih plinova.

S druge strane, RCP8.5 scenarij, koji predstavlja scenarij visokih emisija, pokazuje znatno izraženiji porast maksimalnih temperatura. Nagib regresijske linije u ovom scenariju iznosi 0,048 °C, a Kendallov tau iznosi 0,517, što ukazuje na snažan pozitivan trend, a p-vrijednost od  $1,16 \times 10^{-9}$  dodatno potvrđuje statističku značajnost ovog trenda. Prema Senovom procjenitelju, godišnji rast iznosi 0,039 °C, s intervalom pouzdanosti između 0,029 °C i 0,049 °C, što ukazuje na ubrzano zagrijavanje u budućnosti.

Za podatke DHMZ-a (1961.-2020.), Kendallov tau iznosi 0,361, što ukazuje na umjereno jak trend porasta srednjih maksimalnih temperatura s nagibom regresijske linije od 0,035 °C godišnje, dok p-vrijednost od  $4,85 \times 10^{-5}$  potvrđuje statističku značajnost ovog trenda. Senov procjenitelj pokazuje godišnji rast od 0,027 °C, uz interval pouzdanosti između 0,015 °C i 0,037 °C.

Ukupno gledano, sl. 12 jasno ilustrira kako se maksimalne temperature u Splitu mijenjaju tijekom povijesnog razdoblja i kako se očekuje da će se mijenjati u budućnosti. Scenariji RCP4.5 i RCP8.5 pokazuju rast temperatura u budućnosti, pri čemu RCP8.5 projekcije sugeriraju znatno brži porast u usporedbi s umjerenijim scenarijem RCP4.5. Ovi rezultati potvrđuju zabrinjavajući trend porasta temperatura, s potencijalno ozbiljnim implikacijama za klimatske uvjete u regiji (Zittis i dr., 2019).



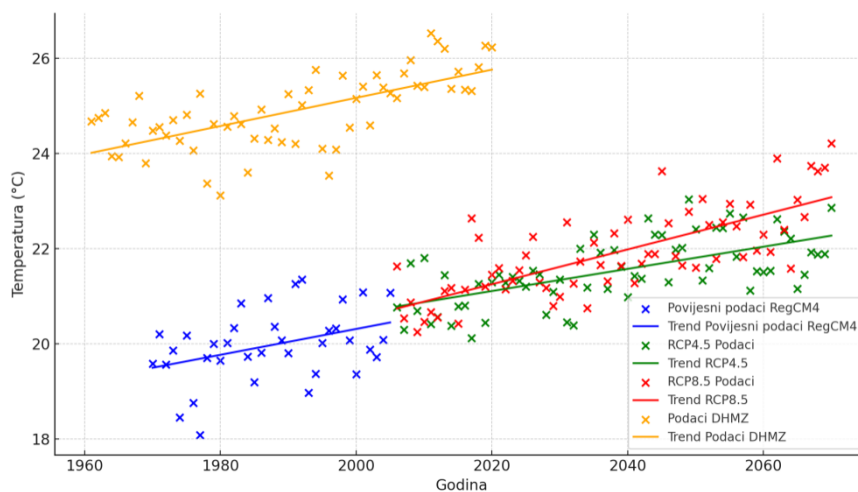
Sl. 17. Usporedba povijesnih i projiciranih podataka srednjih maksimalnih temperatura za Rijeku prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.

Rezultati za scenarij RCP8.5 na području Rijeke pokazuju značajan porast maksimalnih temperatura (sl. 17). Kendallov tau iznosi 0,463, što ukazuje na umjereno jak pozitivan trend, pri čemu pozitivna vrijednost sugerira da su maksimalne temperature u porastu kroz vrijeme. P-vrijednost iznosi  $4,98 \times 10^{-8}$ , što je daleko ispod praga od 0,05, potvrđujući statističku značajnost ovog trenda. Ovaj podatak znači da je vrlo mala vjerojatnost da je uočeni trend rezultat slučajnosti. Senov procjenitelj nagiba procjenjuje godišnji porast temperature na  $0,038 \text{ }^\circ\text{C}$ , s intervalom pouzdanosti između  $0,027 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $0,050 \text{ }^\circ\text{C}$ . To sugerira da se očekuje da maksimalne temperature u Splitu rastu godišnje između tih vrijednosti pod uvjetom visokih emisija stakleničkih plinova. Regresijska linija za ovaj scenarij također ukazuje na godišnji porast od  $0,048 \text{ }^\circ\text{C}$ , što potvrđuje snažan trend zagrijavanja.

Za scenarij RCP4.5, Kendallov tau iznosi 0,389, što ukazuje na slabiji, ali i dalje značajan rast maksimalnih temperatura u usporedbi s RCP8.5. P-vrijednost od  $4,65 \times 10^{-6}$  ukazuje na statistički značajan trend jer je ispod praga od 0,05. Senov procjenitelj nagiba procjenjuje godišnji porast od  $0,026 \text{ }^\circ\text{C}$ , uz interval pouzdanosti između  $0,015 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $0,035 \text{ }^\circ\text{C}$ . To znači da se u umjerenom scenariju emisija očekuje sporiji porast maksimalnih temperatura. Regresijska linija za ovaj scenarij procjenjuje godišnji rast na  $0,025 \text{ }^\circ\text{C}$ , što potvrđuje stabilan, ali manje izražen porast u odnosu na RCP8.5.

Povijesni podaci iz RegCM4 modela pokazuju slabiji trend porasta s Kendallovim tauom od 0,200, što ukazuje na vrlo slab pozitivan trend porasta maksimalnih temperatura, ali p-vrijednost od 0,089 nije statistički značajna jer prelazi prag od 0,05. To znači da nema dovoljno dokaza za tvrdnju da je porast u ovom razdoblju statistički značajan. Senov

procjenitelj nagiba procjenjuje godišnji rast na  $0,026\text{ }^{\circ}\text{C}$ , s intervalom pouzdanosti između  $0,004\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $0,051\text{ }^{\circ}\text{C}$ , što ukazuje na nestabilan rast. Regresijska linija za povijesne podatke iz RegCM4 modela pokazuje godišnji porast od  $0,017\text{ }^{\circ}\text{C}$ , što dodatno potvrđuje slabiji trend. Podaci DHMZ-a za razdoblje od 1961. do 2020. pokazuju Kendallov tau od 0,546, što ukazuje na umjereno jak pozitivan trend porasta maksimalnih temperatura. P-vrijednost od  $7,22 \times 10^{-10}$  potvrđuje statističku značajnost ovog trenda, što znači da je vrlo mala vjerojatnost da je uočeni trend rezultat slučajnosti. Senov procjenitelj procjenjuje godišnji porast od  $0,050\text{ }^{\circ}\text{C}$ , s intervalom pouzdanosti između  $0,039\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $0,063\text{ }^{\circ}\text{C}$ , što ukazuje na stabilan i kontinuiran rast. Regresijska linija za podatke DHMZ-a pokazuje godišnji rast od  $0,035\text{ }^{\circ}\text{C}$ , što dodatno potvrđuje izražen trend porasta maksimalnih temperatura u ovom razdoblju. Ova kombinacija rezultata iz različitih scenarija i povijesnih podataka pokazuje da se maksimalne temperature u Rijeci kontinuirano povećavaju, a očekuje se da će rast biti intenzivniji pod uvjetima visokih emisija stakleničkih plinova, kao što pokazuje scenarij RCP8.5.



Sl. 18. Usporedba povijesnih i projiciranih podataka srednjih maksimalnih temperatura za Hvar prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.

Na sl. 18, podaci DHMZ-a za Hvar u razdoblju od 1961. do 2020. pokazuju Kendallov tau od 0,464, što ukazuje na umjereno jak pozitivan trend u porastu maksimalnih temperatura. P-vrijednost od  $1,64 \times 10^{-7}$ , koja je ispod praga od 0,05, potvrđuje da je ovaj trend statistički značajan. Senov procjenitelj nagiba procjenjuje godišnji porast temperature na  $0,029\text{ }^{\circ}\text{C}$ , s intervalom pouzdanosti između  $0,020\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $0,038\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Regresijska linija za ove podatke

pokazuje godišnji rast od 0,035 °C, što dodatno potvrđuje trend stabilnog porasta maksimalnih temperatura kroz analizirano razdoblje.

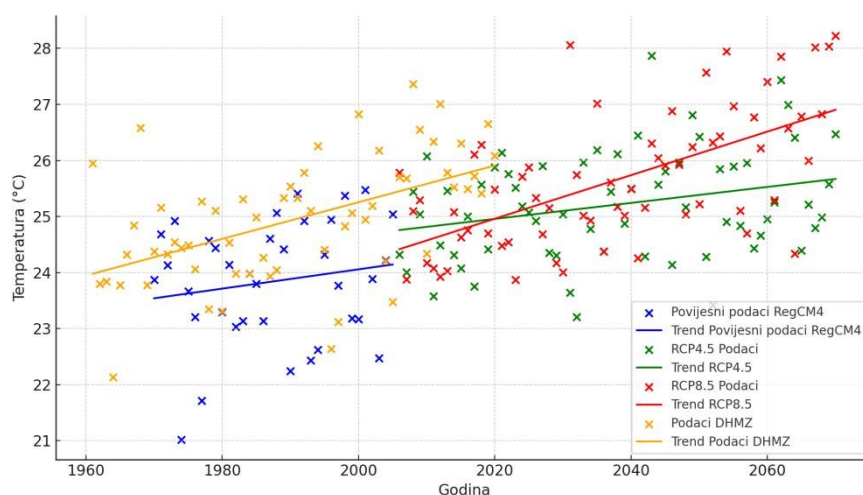
Povijesni podaci iz RegCM4 modela pokazuju slabiji trend porasta, s Kendallovim tauom od 0,260, što ukazuje na slabiji, ali statistički značajan porast. P-vrijednost od 0,026 potvrđuje da je ovaj trend statistički značajan, jer je ispod praga od 0,05. Senov procjenitelj procjenjuje godišnji porast temperature na 0,021 °C, s intervalom pouzdanosti između 0,003 °C i 0,049 °C. Regresijska linija za povijesne podatke iz RegCM4 pokazuje godišnji porast od 0,017 °C, što potvrđuje slabiji trend u prošlosti u usporedbi s budućim projekcijama.

Za scenarij RCP8.5, Kendallov tau iznosi 0,568, što ukazuje na jak pozitivan trend u porastu maksimalnih temperatura. P-vrijednost od  $2,29 \times 10^{-11}$  potvrđuje da je ovaj trend vrlo statistički značajan. Senov procjenitelj procjenjuje godišnji porast temperature na 0,036 °C, s intervalom pouzdanosti između 0,027 °C i 0,046 °C. Regresijska linija za scenarij RCP8.5 pokazuje snažan porast temperatura, s godišnjim rastom od 0,048 °C, što odražava očekivani porast temperatura u skladu s uvjetima visokih emisija stakleničkih plinova predviđenih u scenariju RCP8.5.

Za scenarij RCP4.5, Kendallov tau iznosi 0,431, što ukazuje na umjereno jak pozitivan trend. P-vrijednost od  $3,81 \times 10^{-7}$  također ukazuje na statistički značajan trend. Senov procjenitelj procjenjuje godišnji porast temperature na 0,023 °C, s intervalom pouzdanosti između 0,015 °C i 0,031 °C. Regresijska linija za RCP4.5 scenarij pokazuje godišnji rast od 0,025 °C, što ukazuje na blaži rast u odnosu na RCP8.5, ali i dalje značajan.

Kombinacija ovih rezultata pokazuje da je zagrijavanje maksimalnih temperatura za Hvar kontinuirano, s izraženim porastom u budućnosti, posebno pod uvjetima visokih emisija stakleničkih plinova (RCP8.5). Scenarij RCP4.5 predviđa umjereniji, ali i dalje značajan porast temperatura, dok povijesni podaci iz RegCM4 pokazuju slabiji, ali stabilan rast temperatura u prošlosti.





Sl. 19. Usporedba povijesnih i projiciranih podataka srednjih maksimalnih temperatura za Osijek prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.

Rezultati analize za scenarije RCP8.5, RCP4.5, povijesne podatke iz RegCM4 modela i podatke DHMZ-a za Osijek jasno ukazuju na različite trendove u porastu maksimalnih temperatura (sl. 19). Za scenarij RCP8.5, Kendallov tau iznosi 0,439, što ukazuje na umjereno jak pozitivan trend u porastu maksimalnih temperatura. P-vrijednost od  $2,36 \times 10^{-7}$ , koja je znatno ispod praga od 0,05, potvrđuje da je ovaj trend statistički značajan. Senov procjenitelj nagiba procjenjuje godišnji porast temperature na 0,041 °C, s intervalom pouzdanosti između 0,027 °C i 0,053 °C. Regresijska linija za scenarij RCP8.5 dodatno potvrđuje snažan porast temperatura, s godišnjim rastom od 0,048 °C. Ovi rezultati jasno ukazuju na ubrzano zagrijavanje u budućnosti pod uvjetima visokih emisija stakleničkih plinova.

Za scenarij RCP4.5, Kendallov tau iznosi 0,175, što ukazuje na slabiji, ali statistički značajan porast maksimalnih temperatura. P-vrijednost od 0,039 također ukazuje na statistički značajan trend jer je ispod praga od 0,05. Senov procjenitelj nagiba procjenjuje godišnji porast temperature na 0,013 °C, s intervalom pouzdanosti između 0,001 °C i 0,027 °C. Regresijska linija za ovaj scenarij pokazuje godišnji porast od 0,025 °C, što potvrđuje umjereniji rast u odnosu na RCP8.5. Ovi podaci sugeriraju da će porast maksimalnih temperatura biti blaži u scenariju umjerenog smanjenja emisija stakleničkih plinova.

Povijesni podaci iz RegCM4 modela pokazuju slabiji trend porasta maksimalnih temperatura. Kendallov tau iznosi 0,098, što ukazuje na vrlo slab pozitivan trend, dok p-vrijednost od 0,406 prelazi prag od 0,05, što znači da ovaj trend nije statistički značajan. Senov procjenitelj nagiba pokazuje godišnji porast od 0,013 °C, s intervalom pouzdanosti između -0,023 °C i 0,052 °C, što ukazuje na nestabilan i neizražen porast u ovom razdoblju. Regresijska linija za

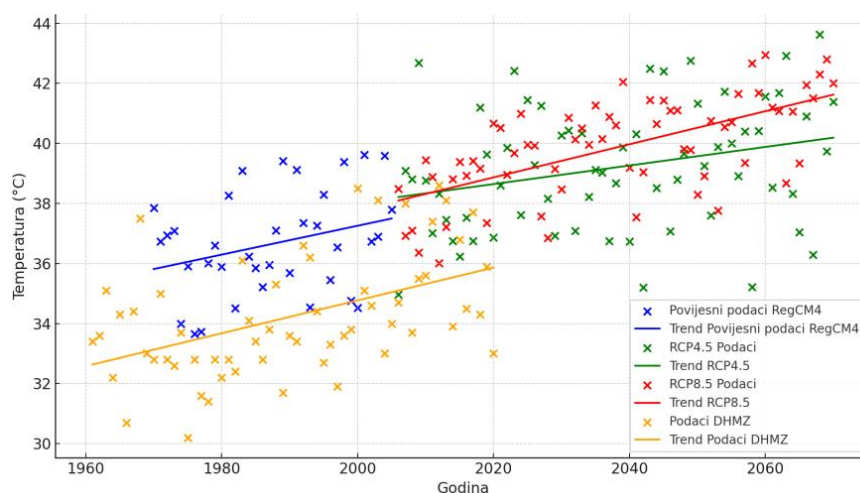
povijesne podatke iz RegCM4 modela pokazuje godišnji porast od 0,017 °C, što dodatno potvrđuje slabiji trend.

Podaci DHMZ-a za razdoblje od 1961. do 2020. pokazuju Kendallov tau od 0,374, što ukazuje na umjereno jak pozitivan trend porasta maksimalnih temperatura. P-vrijednost od  $2,42 \times 10^{-5}$  potvrđuje statističku značajnost ovog trenda. Senov procjenitelj procjenjuje godišnji porast temperature na 0,035 °C, s intervalom pouzdanosti između 0,020 °C i 0,049 °C, što potvrđuje stabilan i kontinuiran porast temperatura kroz promatrano razdoblje. Regresijska linija za podatke DHMZ-a pokazuje godišnji rast od 0,035 °C, što potvrđuje izražen trend porasta maksimalnih temperatura u ovom razdoblju.

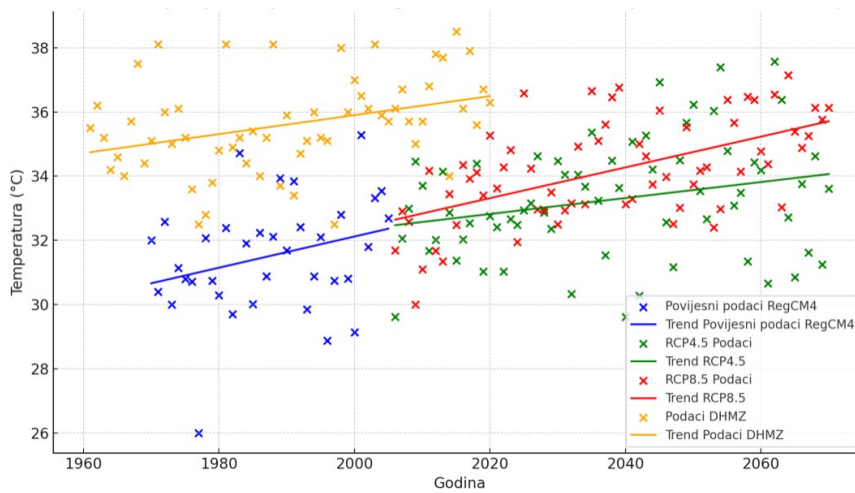
Rezultati jasno pokazuju da scenarij RCP8.5 za Osijek predviđa snažnije zagrijavanje u budućnosti u usporedbi s umjerenijim RCP4.5 scenarijem. Povijesni podaci i scenariji pokazuju stabilan, ali značajno manji porast u prošlosti u usporedbi s predviđanjima za budućnost, s posebno izraženim trendom u scenariju visokih emisija.

#### 4.3.1 Usporedba srednje maksimalne i apsolutne maksimalne temperature

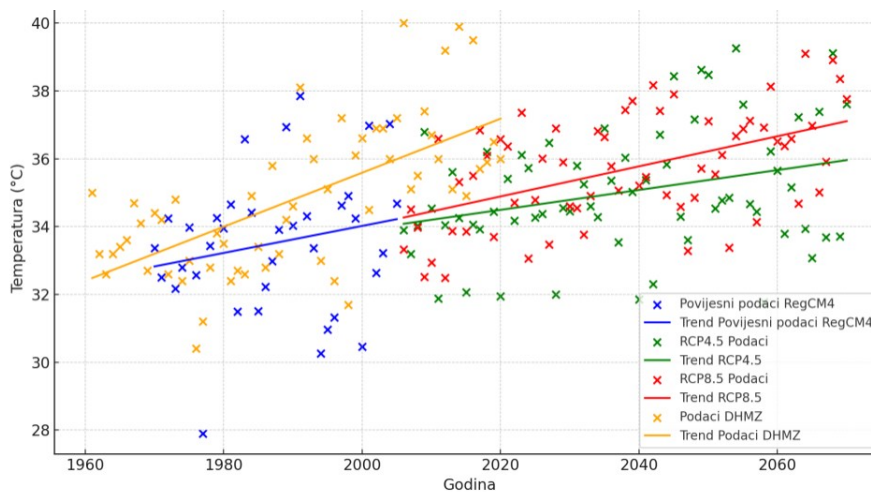
U ovom poglavlju su prikazane slike apsolutnih maksimalnih temperatura za odabrane gradove u razdoblju od 1961. do 2070. godine, uključujući povijesne podatke iz RegCM4 modela, zapisane DHMZ podatke, te klimatske projekcije za scenarije RCP4.5 i RCP8.5. Svaka slika prikazuje trendove i njihove regresijske linije za povijesne i projicirane podatke.



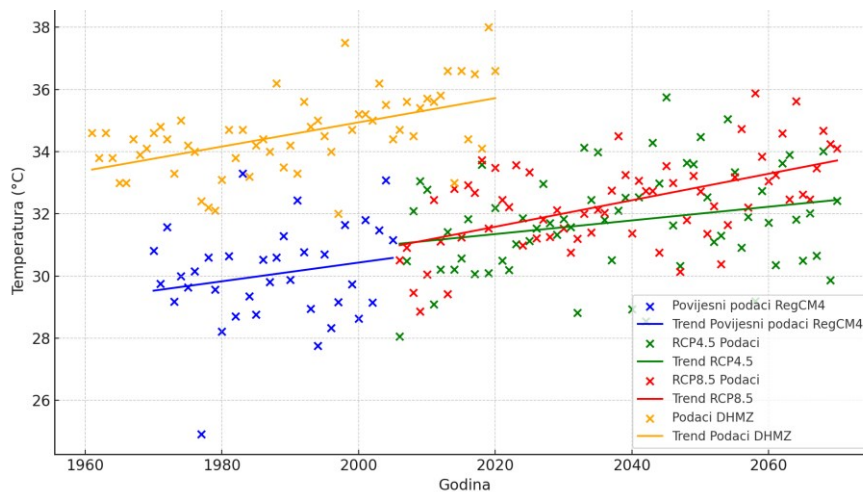
Sl. 20. Usporedba povijesnih i projekcijskih podataka maksimalnih temperatura za Zagreb prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.



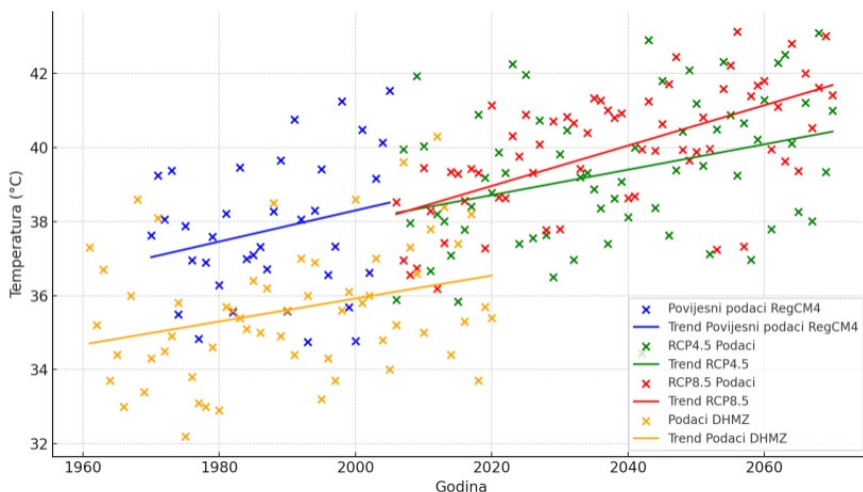
Sl. 21. Usporedba povijesnih i projekcijskih podataka maksimalnih temperatura za Split prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.



Sl. 22. Usporedba povijesnih i projekcijskih podataka maksimalnih temperatura za Rijeku prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.



Sl. 23. Usporedba povijesnih i projekcijskih podataka maksimalnih temperatura za Hvar prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.



Sl. 24. Usporedba povijesnih i projekcijskih podataka maksimalnih temperatura za Osijek prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.

Analizirajući apsolutne maksimalne temperature i uspoređujući ih sa srednjim maksimalnim temperaturama za gradove: Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek, možemo uočiti nekoliko ključnih razlika i sličnosti (sl. 20-24).

Za sve gradove, apsolutne maksimalne temperature pokazuju veće varijacije nego srednje maksimalne temperature, što je očekivano s obzirom na to da apsolutne maksimalne temperature odražavaju ekstremne događaje. Trendovi za oba skupa podataka, međutim, pokazuju porast srednjih maksimalnih i apsolutnih maksimalnih temperatura u budućim

scenarijima, kako prema RCP4.5, tako i prema RCP8.5, pri čemu su trendovi za RCP8.5 izraženiji, što sugerira brže zagrijavanje u tom scenariju.

Kod povijesnih podataka, vidljivo je da su srednje maksimalne temperature bile stabilnije kroz vrijeme, dok apsolutne maksimalne temperature pokazuju nešto više oscilacija. RegCM4 podaci, iako imaju nešto niže vrijednosti, prate isti uzlazni trend u oba slučaja, ali kod apsolutnih maksimalnih temperatura, povijesni podaci iz RegCM4 pokazuju izraženiji rast prema kraju perioda.

Razlika između scenarija RCP4.5 i RCP8.5 je također značajnija kod apsolutnih maksimalnih temperatura, gdje RCP8.5 projekcije predviđaju drastičnije povećanje ekstremnih temperatura nego kod srednjih maksimalnih vrijednosti. U svim gradovima, apsolutne maksimalne temperature prema RCP8.5 scenariju prelaze ranije zabilježene maksimalne vrijednosti, dok su srednje maksimalne temperature konzistentnije i linearno rastu.

Apsolutne maksimalne temperature pružaju bolji uvid u intenzitet budućih ekstremnih događaja jer se odnose na najviše zabilježene temperature unutar određenog vremenskog razdoblja. To omogućuje praćenje promjena u ekstremnim vrijednostima i njihovu distribuciju kroz vrijeme. S druge strane, srednje maksimalne temperature bolje odražavaju opći trend zagrijavanja tijekom godina, jer ukazuju na prosječnu razinu toplinskih uvjeta, što je korisno za razumijevanje dugoročnih klimatskih promjena u kontekstu klimatskih projekcija, apsolutne maksimalne temperature mogu značiti povećanu učestalost i intenzitet toplinskih valova što ima izravne posljedice na ljudsko zdravlje, infrastrukturu i ekosustave. Ove vrijednosti direktno reflektiraju ekstreme klimatskog sustava i ukazuju na to koliko će se sustav zagrijati tijekom ekstremnih događaja poput toplinskih udara.

Kod apsolutnih maksimalnih temperatura, veće oscilacije i nagli porasti unutar RCP8.5 scenarija sugeriraju da će u budućnosti doći do češćih i intenzivnijih ekstrema. Primjerice, prema tim projekcijama, apsolutne maksimalne temperature rastu brže i dostižu vrijednosti koje nisu zabilježene u povijesnim podacima (Sillmann i dr., 2013). Ovi nagli skokovi naglašavaju intenzitet mogućih klimatskih promjena pod scenarijem visokih emisija, što potencijalno može značiti više dana s izuzetno visokim temperaturama, ali i veću mogućnost obaranja prethodnih temperaturnih rekorda.

S druge strane, srednje maksimalne temperature pružaju stabilniji uvid u dugoročne promjene jer reflektiraju prosječne najviše temperature kroz vrijeme, umjesto da se fokusiraju na izolirane ekstremne događaje. Ove prosječne vrijednosti ukazuju na to koliko se klima sustavno mijenja u svakodnevnim uvjetima, bez obzira na ekstreme. U oba scenarija, srednje maksimalne temperature rastu linearnije u odnosu na apsolutne maksimalne temperature. To

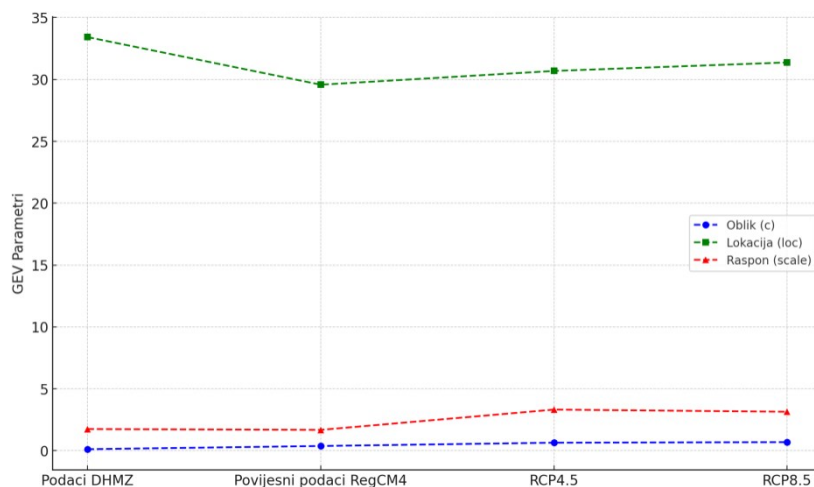
ukazuje na dugoročno zagrijavanje klimatskog sustava, pri čemu su promjene u srednjim temperaturama ujednačenije u usporedbi s ekstremnim vrijednostima. Ovaj rast odražava kontinuirano globalno zagrijavanje, ali bez nužnog prikaza ekstremnih događaja.

#### 4.4 Analiza ekstremnih vrijednosti (EVA)

Za analizu ekstremnih temperaturnih događaja u odabranim gradovima korišteni su apsolutni maksimalni temperaturni podaci. Ovi podaci omogućuju najprecizniju procjenu intenziteta i učestalosti ekstremnih temperatura, jer se fokusiraju isključivo na najviše zabilježene vrijednosti za svaku godinu. Korištenje apsolutnih maksimalnih temperatura u metodi ekstremnih vrijednosti (EVA) važno je jer omogućuje detaljnu analizu rijetkih, ali ekstremnih događaja. U ovoj analizi primijenjena je metoda ekstremnih vrijednosti (EVA) koristeći metodu maksimum blokova i generaliziranu distribuciju ekstremnih vrijednosti (GEV). Ona omogućuje analizu godišnjih maksimalnih temperatura, kvantificiranje ekstrema i usporedbu prošlih podataka s budućim klimatskim scenarijima. Rezultati GEV analize su slijedeća tri ključna parametra: *shape* (*c*), *location* (*loc*) i *scale* (*scale*). Parametar *shape* (*c*) opisuje oblik repova distribucije i pruža informaciju o tome hoće li ekstremni događaji postati učestaliji ili intenzivniji. Vrijednosti blizu nule, što je slučaj u većini analiza, ukazuju na to da ne očekujemo značajne promjene u repovima distribucije, što znači da se ekstremi neće znatno češće ili intenzivnije pojavljivati. Parametar *location* (*loc*) predstavlja prosječnu maksimalnu temperaturu, dok *scale* (*scale*) opisuje varijabilnost tih maksimalnih temperatura, odnosno koliko ekstremi variraju iz godine u godinu. Veća vrijednost parametra *scale* sugerira veću varijabilnost, što znači da ekstremne temperature mogu biti znatno viši ili niži od prosjeka. Ova tri parametra zajednički daju uvid u prirodu ekstremnih temperaturnih događaja i omogućuju kvantifikaciju budućih promjena u njihovom intenzitetu i frekvenciji.

Međutim, pri primjeni EVA-e na buduće klimatske projekcije, potrebno je uzeti u obzir određene nesigurnosti. Klimatske projekcije, posebno one za ekstremne događaje, nose sa sobom određenu razinu nesigurnosti, budući da se rezultati budućih klimatskih scenarija temelje na simulacijama koje mogu varirati u pogledu intenziteta i učestalosti ekstremnih događaja. Buduće projekcije ovise o scenarijima emisija (poput RCP4.5 i RCP8.5) i kvaliteti korištenih klimatskih modela, što može utjecati na pouzdanost procjena ekstrema. Stoga, rezultati EVA-e za buduće scenarije treba tumačiti uz oprez, jer se temelje na simuliranim podacima, a ne na promatranim događajima.

#### 4.4.1. Kvantifikacija ekstrema za Zagreb



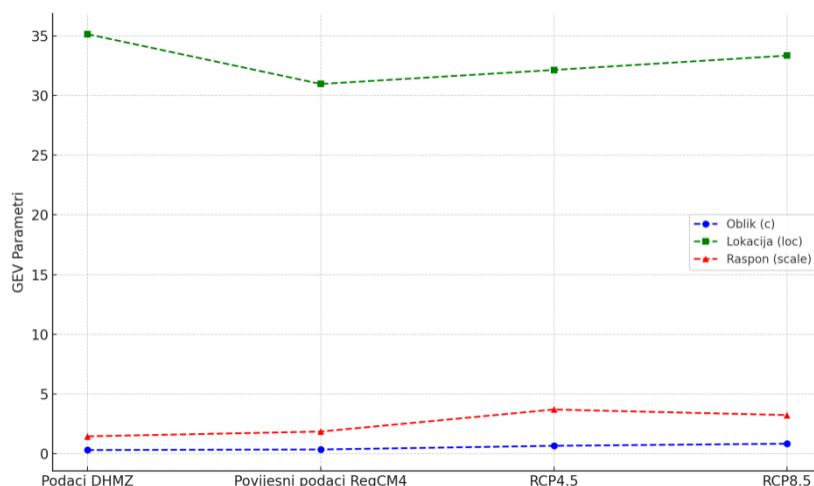
Sl. 25. Parametri generalizirane ekstremne vrijednosti (GEV) za apsolutne maksimalne temperature u Zagrebu (1961.-2020.) i projekcije do 2070. godine

U Zagrebu se pokazalo da je u povijesnim podacima iz RegCM4, vrijednost *shape* (*c*) iznosi 0,12, dok podaci DHMZ-a pokazuju istu vrijednost, što ukazuje na relativno stabilnu učestalost ekstrema (sl. 25). Prema projekcijama klimatskih scenarija, dolazi do blagog porasta u RCP4.5, gdje *shape* doseže 0,32, dok u RCP8.5 ostaje na 0,12, sugerirajući minimalne promjene u učestalosti ekstremnih događaja. Parametar *location* (*loc*) povijesnih podataka pokazuje maksimalnu temperaturu od 33,42 °C, dok DHMZ podaci pokazuju nešto višu vrijednost. Budući scenariji ukazuju na blagi porast, pri čemu RCP4.5 predviđa 34,13 °C, a RCP8.5 nešto veći rast do 34,90 °C, što signalizira umjereno povećanje temperaturnih ekstrema u budućnosti. *Scale* (*scale*), koja predstavlja varijabilnost ekstremnih temperatura, također bilježi lagani rast. Povijesni i DHMZ podaci pokazuju istu vrijednost od 1,75, dok klimatski scenariji projiciraju blago povećanje varijabilnosti na 1,92 u RCP4.5 i 1,94 u RCP8.5, što ukazuje na mogućnost nešto većih oscilacija u intenzitetu ekstremnih temperatura u budućnosti.

Ovi rezultati upućuju na to da, iako se očekuje blago povećanje maksimalnih temperatura i varijabilnosti, neće doći do dramatičnih promjena u učestalosti ekstremnih događaja u Zagrebu kroz iduće dekade.



#### 4.1.4. Kvantifikacija ekstrema za Split



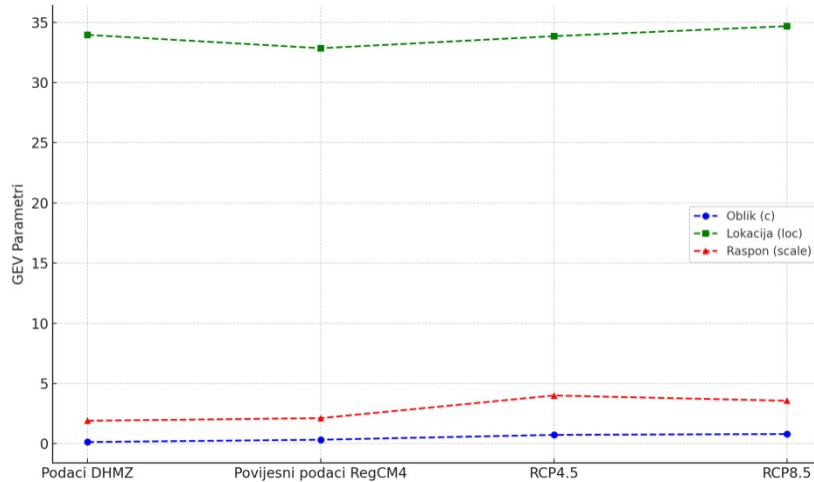
Sl. 26. Parametri generalizirane ekstremne vrijednosti (GEV) za apsolutne maksimalne temperature u Splitu (1961.-2020.) i projekcije do 2070. godine

Prema sl. 26 za Split, *shape* ( $c$ ) u povijesnim podacima iznosi 0,32, a ista vrijednost zadržava se i u budućim klimatskim scenarijima, što ukazuje na stabilnu učestalost toplinskih ekstrema, bez značajnih promjena u intenzitetu ili frekvenciji tih događaja. *Location* ( $loc$ ), koji opisuje prosječnu maksimalnu temperaturu, pokazuje blagi porast s povijesnih vrijednosti od 35,13 °C, koje su zabilježene i u podacima DHMZ-a, na 35,13 °C u oba scenarija RCP4.5 i RCP8.5, što sugerira stabilnost maksimalnih temperatura kroz buduće dekade. Varijabilnost ekstremnih događaja, prikazana pomoću *scale* ( $scale$ ), ostaje stabilna u povijesnim podacima na razini od 1,46, dok klimatski scenariji predviđaju slične vrijednosti od 1,46 u budućnosti. Ova stabilnost ukazuje na to da iako bi toplinski ekstremi mogli postati nešto raznolikiji u budućnosti, ta promjena neće biti značajna.

Sveukupno, rezultati za Split sugeriraju da se usprkos blagom porastu maksimalnih temperatura, učestalost i varijabilnost toplinskih ekstrema neće značajno mijenjati kroz nadolazeće godine, što ukazuje na relativnu stabilnost u ponašanju ekstremnih temperaturnih događaja.



#### 4.1.2. Kvantifikacija ekstrema za Rijeku

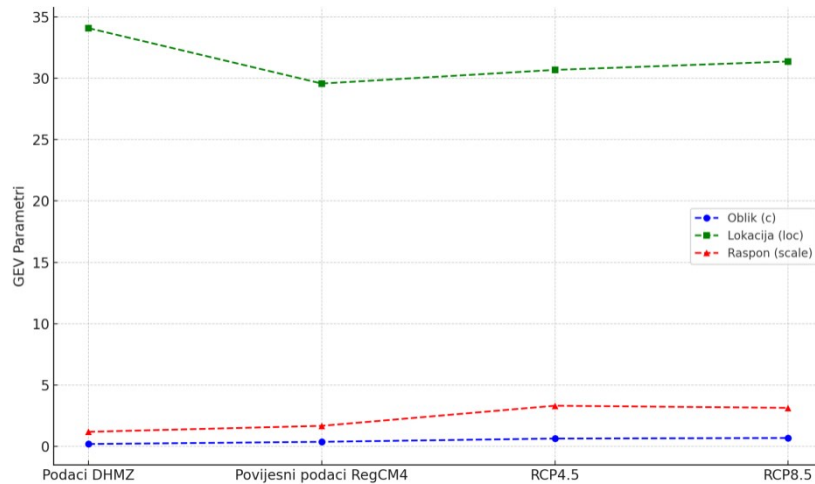


Sl. 27. Parametri generalizirane ekstremne vrijednosti (GEV) za apsolutne maksimalne temperature u Rijeci (1961.-2020.) i projekcije do 2070. godine

Grafički prikaz rezultata za Rijeku, parametar *shape* ( $c$ ), koji u povijesnim podacima iznosi 0,14, ostaje stabilan i u budućim scenarijima, sugerirajući da ne bi trebalo doći do značajnih promjena u učestalosti ekstremnih temperaturnih događaja (sl. 27). Klimatski scenariji predviđaju zadržavanje ove vrijednosti na 0,14 za oba scenarija, čime se potvrđuje stabilnost u učestalosti ekstrema. Što se tiče *location* ( $loc$ ), povijesni podaci ukazuju na maksimalne temperature od 33,95 °C, dok budući scenariji predviđaju blagi porast. Prema projekcijama, maksimalne temperature će narasti na 34,95 °C u scenariju RCP4.5 i na 35,00 °C u scenariju RCP8.5, što nagovještava nešto toplije ekstremne događaje u budućnosti. Varijabilnost ekstremnih temperatura, prikazana putem *scale* ( $scale$ ) parametra, u povijesnim podacima iznosi 1,91. Scenariji RCP4.5 i RCP8.5 predviđaju blagi porast na 2,12, što ukazuje na moguću veću varijabilnost u intenzitetu toplinskih valova u budućim razdobljima, iako promjene neće biti dramatične.

Rezultati dobiveni za Rijeku sugeriraju da, iako se očekuje blago povećanje maksimalnih temperatura i varijabilnosti, učestalost ekstremnih događaja ostat će stabilna, bez većih promjena kroz nadolazeće godine.

#### 4.1.5. Kvantifikacija ekstrema za Hvar

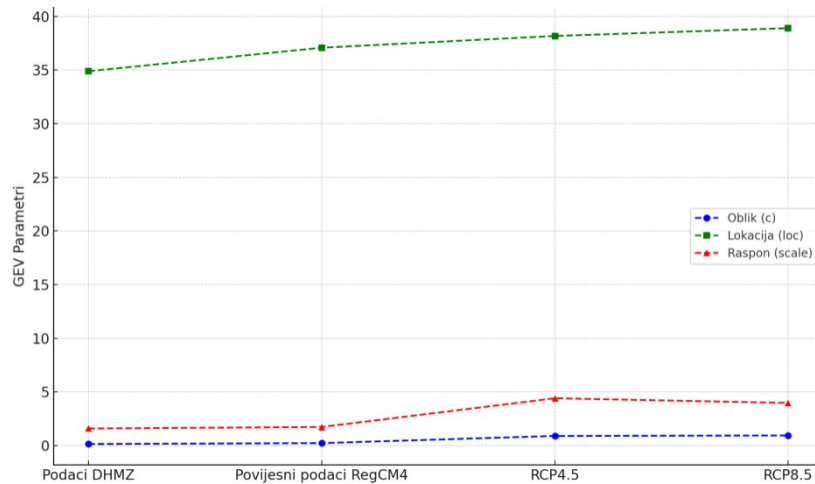


Sl. 28. Parametri generalizirane ekstremne vrijednosti (GEV) za apsolutne maksimalne temperature u Hvaru (1961.-2020.) i projekcije do 2070. godine

Za GEV analizu Hvara, parametar *shape* ( $c$ ), prema povijesnim podacima, iznosi 0,20 i zadržava se na istoj vrijednosti i u klimatskim projekcijama, što ukazuje na stabilnu učestalost ekstremnih temperaturnih događaja u budućnosti, bez značajnih promjena u njihovoj frekvenciji ili intenzitetu. Što se tiče *location* ( $loc$ ), povijesni podaci pokazuju maksimalnu temperaturu od 34,08 °C, dok klimatski scenariji projiciraju stabilne vrijednosti slične povijesnim, oko 34,08 °C. Ova projekcija sugerira da u budućnosti ne očekujemo značajan porast maksimalnih temperatura na Hvaru. Varijabilnost ekstremnih temperatura, prikazana pomoću *scale* ( $scale$ ), pokazuje vrijednost od 1,19 u povijesnim podacima, dok budući scenariji također zadržavaju stabilnu vrijednost od 1,19. Ova stabilnost ukazuje na to da varijabilnost toplinskih ekstrema neće značajno rasti u budućnosti.

Sveukupno, rezultati za Hvar sugeriraju da, iako se ne očekuju značajne promjene u maksimalnim temperaturama i varijabilnosti ekstremnih događaja, klimatski uvjeti u pogledu toplinskih ekstrema ostat će slični povijesnim trendovima.

### 4.1.3. Kvantifikacija ekstrema za Osijek



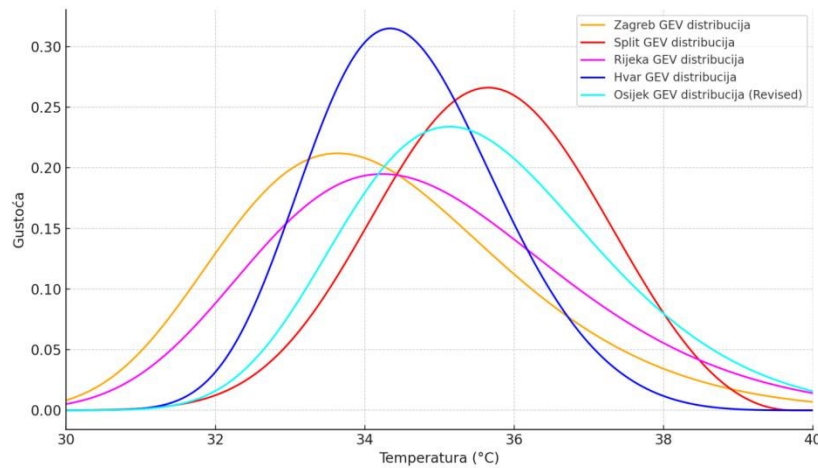
Sl. 29. Parametri generalizirane ekstremne vrijednosti (GEV) za apsolutne maksimalne temperature u Osijeku (1961.-2020.) i projekcije do 2070. godine

Za analizu Osijeka (sl. 29), *shape* (c) parametar, koji u povijesnim podacima iznosi 0,14, pokazuje stabilnost i u budućim projekcijama, sugerirajući da se učestalost ekstremnih temperaturnih događaja neće značajno mijenjati u budućnosti. Isti trend stabilnosti vidljiv je i u klimatskim scenarijima, gdje vrijednosti *shape* ostaju na 0,14. *Location* (loc), koji prikazuje maksimalne temperature, pokazuje stabilne vrijednosti u povijesnim podacima (34,90 °C) i podacima DHMZ-a, dok klimatski scenariji predviđaju slične maksimalne temperature za budućnost. Međutim, u nekim scenarijima, projekcije ukazuju na mogućnost povećanja maksimalnih temperatura do 38°C, osobito u uvjetima visokih emisija, što sugerira da će ekstremne temperature u Osijeku postati toplije nego u prošlosti. *Scale* (scale), koji mjeri varijabilnost ekstremnih događaja, u povijesnim podacima iznosi 1,59, dok budući scenariji predviđaju blagi porast na 1,59 u RCP4.5 i 1,61 u RCP8.5. Ovaj porast ukazuje na mogućnost veće varijabilnosti u intenzitetu toplinskih ekstrema u budućnosti, s potencijalno intenzivnijim i raznolikijim ekstremnim događajima u uvjetima visokih emisija.

Sveukupno, rezultati za Osijek sugeriraju da, iako će učestalost ekstrema ostati stabilna, očekuje se blagi porast maksimalnih temperatura i varijabilnosti toplinskih događaja u budućnosti, osobito u scenarijima s visokim emisijama.

## 4.5. Generalizirana distribucija ekstremnih vrijednosti

### 4.5.1 Generalizirana distribucija ekstremnih temperatura za hrvatske gradove



Sl. 30. Usporedba GEV distribucija za apsolutne maksimalne temperature u odabranim gradovima Hrvatske (1961.-2020.)

Generalizirane distribucije ekstremnih vrijednosti (GEV) pomažu u razumijevanju vjerojatnosti pojavljivanja različitih vrijednosti ekstremnih temperatura na temelju povijesnih podataka, te otkrivaju specifične karakteristike klime svakog grada.

Os  $x$  prikazuje temperaturne vrijednosti, fokusirajući se na raspon između 30 °C i 40 °C, koji pokriva tipične ekstremne temperature u ovim gradovima (sl. 30). Os  $y$  prikazuje gustoću ili vjerojatnost tih temperatura, gdje viši vrhovi označavaju temperature koje su češće prisutne kao ekstremni događaji (sl. 30).

Oblik i položaj krivulje svakog grada otkrivaju različita obilježja ekstremnih temperatura. Split, primjerice, ima distribuciju pomaknutu prema višim temperaturama s vrhom blizu 36 °C. To ukazuje na češće pojavljivanje viših temperatura u Splitu u odnosu na ostale gradove. Strmina krivulje također sugerira da se ekstremne temperature u Splitu uglavnom zadržavaju oko te vrijednosti, s malo varijacija.

S druge strane, Hvar pokazuje još izraženiji vrh, nešto iznad 34 °C, što sugerira da su njegove ekstremne temperature vrlo konzistentne i rijetko odstupaju od te vrijednosti. Uska krivulja Hvara znači da postoji vrlo mala varijabilnost u njegovim ekstremnim toplinskim događajima, što ukazuje na stabilizirajući efekt mora. Međutim, to ne isključuje dugoročni utjecaj klimatskih promjena, koji se i dalje očituje kroz povećanje srednjih temperatura

Osijek, međutim, ima znatno širu krivulju, što ukazuje na širi raspon ekstremnih temperatura, s vrhom oko 35 °C, ali se proteže gotovo do 38 °C. Ova široka distribucija sugerira da Osijek

iskazuje veću varijabilnost u ekstremnim temperaturama u usporedbi s drugim gradovima, što ga čini sklonijim kako umjerenim, tako i vrlo visokim ekstremima. Zagreb i Rijeka imaju slične distribucije, s vrhovima blizu 34 °C, što sugerira tipične ekstreme oko te temperature. Međutim, obje krivulje pokazuju određenu varijabilnost, jer nisu tako izrazito oštre kao u Hvaru. To znači da, iako su njihovi najčešći ekstremi oko 34 °C, još uvijek postoji mogućnost za širi raspon maksimalnih temperatura.

Sveukupno, sl. 30 ilustrira kako se ekstremni temperaturni događaji razlikuju među ovim gradovima. Split i Osijek vjerojatnije će biti izloženi višim ekstremima, pri čemu Split ima konzistentnije visoke temperature, a Osijek pokazuje veću varijabilnost u ekstremima. Hvar, s izrazito oštrom krivuljom, ima vrlo konzistentne ekstremne temperature, dok Zagreb i Rijeka pokazuju umjerenu varijabilnost s ekstremima koji se općenito grupiraju oko 34 °C, ali s mogućnošću viših temperatura. Ove informacije su ključne za razumijevanje obilježja toplinskih valova u svakom od analiziranih gradova i pomažu u naglašavanju razlika u tome kako se ekstremne temperature manifestiraju u različitim regijama Hrvatske.

## **5. Utjecaj klimatskih promjena i strategije prilagodbe u Republici Hrvatskoj**

### **5.1. Utjecaj ekstremnih klimatskih promjena u RH**

Klimatske promjene predstavljaju značajne izazove za Hrvatsku, utjecajući na različite sektore i cjelokupno gospodarstvo. Utjecaj je najviše izražen u sektorima energije, prometa, industrije te korištenja zemljišta i šumarstva, koji omogućuju prirodno hvatanje i skladištenje CO<sub>2</sub> iz atmosfere kroz sekvencijalnu ugljika (Srdelic, 2024). Regionalne klimatske varijacije dodatno kompliciraju procjenu rizika za gospodarstvo i društvo (Srdelic, 2024). Klimatske projekcije ukazuju na klimatske promjene, poput porasta temperature i promjena oborinskih obrazaca, koje mogu indirektno utjecati na proizvodnju hrane, povećati učestalost prirodnih katastrofa te pridonijeti porastu razine mora, što dodatno zahtijeva razvoj strategija prilagodbe i smanjenja rizika (Branković i dr., 2009). Javna percepcija klimatskih promjena u Hrvatskoj i dalje je nedovoljno usklađena s nužnošću djelovanja, a ekonomska nesigurnost često ometa provedbu mjera (Ančić i dr., 2016).

Razvoj strategija prilagodbe i mjera ublažavanja rizika na nacionalnoj razini ključan je za održivi razvoj Hrvatske u kontekstu klimatskih promjena (Srdelic, 2024; Marić i dr., 2023).

### **5.1.1. Utjecaj na prirodu**

Ekstremne klimatske promjene imaju značajan utjecaj na prirodne ekosustave u Hrvatskoj, uključujući bioraznolikost, stabilnost ekosustava i ekološke usluge. Najviše su pogođene šume, vodeni sustavi i poljoprivredna zemljišta, gdje se promjene u temperaturi i obrascima oborina očituju kroz učestalije suše, toplinske valove i poplave (Marić i dr., 2023; Buckley i Huey, 2016). Primjerice, Nacionalni park Plitvička jezera već bilježi promjene u vodnim ekosustavima uslijed povećanog isparavanja i smanjenih oborina (Šarović i Klaić, 2023).

Smanjenje prinosa u poljoprivredi, posebno za kulture osjetljive na sušu poput kukuruza i pšenice, dodatno naglašava važnost prilagodbe klimatskim promjenama (Vučetić, 2010). Isto tako, klimatske promjene ugrožavaju bioraznolikost Jadranskog mora jer migracija toplovođenih vrsta remeti ekološku ravnotežu (Cavraro i dr., 2022). Promjene klime nepovratno mijenjaju prirodne resurse Hrvatske koji su suočeni s nizom izazova koji mogu narušiti njihovu funkcionalnost i stabilnost. Analize temeljene na modeliranju i dugoročnim opažanjima sugeriraju da bez hitnih mjera prilagodbe, ovi ekosustavi možda neće moći izdržati pritisak klimatskih promjena (Uy i Shaw, 2012; Hale i dr., 2009). Stoga prilagodba klimatskim promjenama postaje ključan prioritet u zaštiti i održivom korištenju prirodnih resursa Hrvatske. Potreba za takvim mjerama sve je hitnija kako klimatski ekstremi postaju učestaliji i intenzivniji.

### **5.1.2. Utjecaj na društvo**

Sve češća pojava klimatskih ekstrema ima značajan utjecaj na društvo u Hrvatskoj, osobito na ljudsko zdravlje, radne uvjete i socijalnu strukturu. Povećanje učestalosti toplinskih valova povećava rizik od toplinskog udara, kardiovaskularnih bolesti i respiratornih problema, posebno u urbanim sredinama poput Zagreba (Zanasi i Keivabu, 2024). Također, širenje vektorskih bolesti poput groznice Zapadnog Nila zahtijeva nove epidemiološke pristupe (Fouque i Reeder, 2019).

Promjene u klimatskim uvjetima negativno utječu na radne uvjete, posebno u sektorima poput poljoprivrede i građevine, gdje je rad na otvorenom izložen toplinskom stresu (Kjellstrom i dr., 2019). Prema dostupnim podacima, procjenjuje se da će toplinski stres do 2030. godine uzrokovati gubitak od 2,2 % globalnog radnog vremena, a zemlje Sredozemlja, uključujući Hrvatsku, suočit će se s najvećim gubicima (Kjellstrom i dr., 2019). Ova pojava ima značajan

učinak i na turizam, gdje promjene temperature i sezonskih uvjeta ugrožavaju dugoročnu održivost sektora, dok istovremeno otvaraju mogućnosti za razvoj zimskog turizma (Grdić i dr., 2019).

### **5.1.3. Utjecaj na gospodarstvo**

Sve izraženije klimatske promjene predstavljaju značajan izazov za hrvatsko gospodarstvo, posebno za sektore turizma, poljoprivrede, šumarstva i ribarstva, koji su ključni za održiv razvoj i ekonomski rast. S porastom prosječnih temperatura, promjenama u obrascima oborina i učestalošću ekstremnih vremenskih događaja kao što su suše, poplave i oluje, ti se sektori suočavaju s velikim izazovima koji prijete njihovoj održivosti i produktivnosti.

Turizam, koji čini značajan udio (oko 20%) u bruto domaćem proizvodu Hrvatske, suočava se s potencijalnim izazovima uslijed povećanja temperature i promjena u sezonskim uvjetima (Miljak i dr., 2012). Iako kratkoročne projekcije ukazuju na pozitivan učinak na planinski turizam, dugoročne promjene zahtijevaju prilagodbu, osobito u priobalnim područjima (Grdić i dr., 2019). Poljoprivreda je jedan od sektora najviše pogođenih klimatskim promjenama, a njen značaj u Hrvatskoj je velik, osobito u ruralnim područjima. Povećanje učestalosti suša, posebno u unutrašnjim regijama poput Slavonije, smanjuje prinose ključnih usjeva (Rastija i dr., 2012). Ribarstvo i šumarstvo suočavaju se s ozbiljnim posljedicama klimatskih promjena, uključujući povećan rizik od migracija ribljih vrsta zbog promjene temperature mora te sve učestalijih i razornijih šumskih požara (Posavec i dr., 2023; Caputi i dr., 2016). Zakiseljavanje mora, uzrokovano rastućim koncentracijama ugljičnog dioksida u atmosferi, dodatno negativno utječe na morske organizme, smanjujući ulov i produktivnost ribarstva. Ovo rezultira značajnim gubicima prihoda za ribare i priobalne zajednice koje ovise o ovom sektoru. Slično tome, gubitak šumskih resursa ne samo da ima teške ekološke posljedice, već uzrokuje i znatne ekonomske gubitke, prvenstveno zbog smanjenja drvne mase i rastućih troškova zaštite šuma od požara. Ukupna procijenjena šteta od šumskih požara u Hrvatskoj između 2013. i 2020. godine iznosila je više od 326 milijuna eura (Posavec i dr., 2023). Prilagodba ovim promjenama zahtijeva sustavna ulaganja u infrastrukturu i strategije zaštite kako bi se osigurala održivost gospodarstva.

## 5.2. Prilagodba RH klimatskim promjenama i postizanje klimatske neutralnosti

Klimatske promjene predstavljaju jedan od ključnih izazova s kojima se suočava Republika Hrvatska, kao i mnoge druge zemlje svijeta. Promjene u klimi, uključujući porast prosječnih temperatura, promjene u obrascima oborina te učestalost i intenzitet ekstremnih vremenskih događaja poput toplinskih valova, poplava i suša, već ozbiljno utječu na ekonomske sektore i okoliš Hrvatske.

Hrvatska, kao članica Europske unije, suočena je i s obvezama iz Pariškog sporazuma, što uključuje obveze smanjenja emisija stakleničkih plinova i postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine (Jelavić i Delija-Ružić, 2021).

Prilagodba klimatskim promjenama zahtijeva sveobuhvatan pristup koji uključuje razvoj i primjenu infrastrukturnih mjera, prilagodbu poljoprivrede i vodoprivrede te jačanje kapaciteta zdravstvenog sustava i turizma (Granić, 2011; Chen i dr., 2022). Također, jedan od najvažnijih izazova za Hrvatsku u ovom procesu je tranzicija prema klimatskoj neutralnosti, što obuhvaća mjere ublažavanja klimatskih promjena (eng. *mitigation*), poput smanjenja emisija stakleničkih plinova na razinu koju prirodni ekosustavi mogu apsorbirati ili neutralizirati pomoću novih tehnologija (Jelavić i Delija-Ružić, 2021). Kako bi postigla klimatsku neutralnost do 2050. godine, Hrvatska mora provesti temeljite promjene u načinu korištenja resursa. To podrazumijeva dekarbonizaciju energetskeg sektora, promicanje obnovljivih izvora energije i kružne ekonomije te osiguranje financijskih sredstava za ulaganja u zelene tehnologije (Srdelic, 2024). Primjerice, ulaganje u razvoj obnovljivih izvora energije, poput solarne i vjetroenergije, te modernizacija sustava prijevoza ključni su koraci prema održivom razvoju (Wang i dr., 2021). Klimatska neutralnost zahtijeva i promjenu načina na koji se upravlja otpadom te poticanje kružne ekonomije koja osigurava maksimalnu učinkovitost u iskorištavanju resursa uz minimalan otpad (Hupponen i dr., 2022). Ovaj pristup ne samo da smanjuje emisije stakleničkih plinova već doprinosi i gospodarskoj otpornosti, otvaranju novih radnih mjesta i smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima. Uz mjere ublažavanja, važno je istaknuti i prilagodbu klimatskim promjenama (eng. *adaptation*), koja uključuje prilagodbu infrastrukture, poljoprivrede i urbanog razvoja kako bi se smanjili rizici povezani s ekstremnim vremenskim uvjetima i njihovim posljedicama.



### **5.3. Vladina “Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u RH za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu”**

Vladina “Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u RH do 2040. godine s pogledom na 2070.” pruža sveobuhvatan okvir za prilagodbu hrvatskog društva i gospodarstva klimatskim promjenama, s posebnim naglaskom na ekstremne temperature, što je u uskoj vezi s ovim istraživanjem. Strategija prepoznaje izazove koje donosi sve češće pojavljivanje ekstremnih vremenskih događaja, uključujući toplinske valove, suše i intenzivne oborine. Kako bi se uspješno prilagodilo ovim promjenama, naglašava se potreba za sustavnom prilagodbom ključnih sektora kao što su poljoprivreda, energetika, turizam i javno zdravstvo. Ovi sektori su ključni jer su najosjetljiviji na promjene u temperaturnim ekstremima i učincima klimatskih promjena.

Strategija se temelji na klimatskim modelima koji predviđaju različite scenarije budućnosti, ovisno o razini emisija stakleničkih plinova, koristeći se projekcijama poput RCP4.5 i RCP8.5. Ovi modeli, koji su već uključeni u ovo istraživanje, posebno su važni jer daju uvid u moguće promjene frekvencije i intenziteta ekstremnih temperatura u Hrvatskoj do 2070. godine. U dokumentu se također naglašava da su kontinentalni dijelovi Hrvatske, poput Zagreba i Osijeka, podložniji porastu ekstremnih temperatura u usporedbi s obalnim područjima poput Splita i Hvara, gdje će mediteranska klima djelomično ublažiti te efekte. To odgovara hipotezi o regionalnim razlikama u trendovima ekstremnih temperatura, gdje će obalna područja, pod utjecajem stabilnije klime, biti otpornija na porast ekstremnih toplinskih događaja.

Uspostava infrastrukture otporne na klimatske promjene, uključujući energetske učinkovite zgrade i prilagođavanje urbanističkih planova, ključni su koraci prema smanjenju ranjivosti stanovništva i gospodarstva. Mjere prilagodbe uključuju poboljšanje zdravstvenog sustava kako bi se nosio s rastućim rizicima koje donose toplinski valovi, posebice u urbanim sredinama gdje efekt urbanih toplinskih otoka može dodatno pogoršati učinke visokih temperatura. Prilagodba će također obuhvatiti i poljoprivredne prakse kako bi se osiguralo očuvanje proizvodnje hrane unatoč promjenama u klimatskim uvjetima, posebno s obzirom na sve češće suše.

Strategija dodatno naglašava važnost međunarodne suradnje i usklađivanja s europskim i globalnim politikama, poput Pariškog sporazuma i Europskog zelenog plana. Ova suradnja je ključna za osiguranje učinkovitih mjera prilagodbe te smanjenje emisija stakleničkih plinova, s ciljem postizanja klimatske neutralnosti. Kroz integraciju znanstvenih saznanja, poput onih

iz ove analize ekstremnih temperatura, omogućava se stvaranje preciznijih predviđanja i prilagodbi, što doprinosi dugoročnom planiranju u cilju osiguravanja otpornosti Hrvatske na klimatske promjene.

Ovaj dokument je presudno važan jer pruža institucionalni okvir unutar kojeg se rezultati i projekcije ovog istraživanja mogu smjestiti. Analiza povijesnih trendova i budućih scenarija klimatskih promjena, osobito u kontekstu ekstremnih temperatura, može poslužiti kao temelj za predlaganje dodatnih mjera prilagodbe specifičnih za regije i gradove koji su dio ovog rada.

## 6. Zaključak

Analiza ekstremnih temperaturnih događaja u Hrvatskoj, obuhvaćajući povijesne podatke (1961.-2020.) i buduće klimatske projekcije (do 2070.), pružila je značajne uvide u razvoj klimatskih promjena na lokalnoj i regionalnoj razini. Istraživanje je uključivalo podatke za pet gradova koji predstavljaju različite klimatske i geografske zone: Zagreb, Split, Rijeka, Hvar i Osijek. Rezultati pokazuju statistički značajan porast učestalosti i intenziteta ekstremnih temperatura, s naglašenijim trendovima u razdoblju nakon 1990. godine. Iako su ovi trendovi u skladu s globalnim zatopljenjem, lokalni čimbenici, poput urbanizacije i efekta toplinskih otoka, također imaju važnu ulogu.

Jedan od ključnih rezultata istraživanja je regionalna razlika u ponašanju ekstremnih temperatura. Gradovi u unutrašnjosti, poput Zagreba i Osijeka, pokazuju snažnije poraste, dok obalni gradovi, poput Splita i Hvara, bilježe sporije stope porasta, što je vjerojatno posljedica ublažavajućeg utjecaja mediteranske klime. Međutim, i u obalnim regijama zabilježen je porast učestalosti ekstremno toplih dana, što ukazuje na sve izraženiji potencijalni utjecaj klimatskih promjena čak i u područjima s prirodnim čimbenicima ublažavanja.

Primjena različitih statističkih metoda, uključujući Mann-Kendallov test, Senovu procjenu nagiba i ekstremnu vrijednosnu analizu (EVA), omogućila je sveobuhvatnu procjenu klimatskih trendova i ekstremnih događaja. Osim toga, ekstremne temperature obrađene kroz klimatske indekse (EHD, SU25, Tmax95, HE) dodatno potvrđuju trend porasta učestalosti toplinskih ekstrema. Analiza ekstremnih vrijednosti (EVA) omogućila je kvantifikaciju ključnih parametara (*shape*, *location* i *scale*) za svaku lokaciju, pružajući dublji uvid u dinamiku intenziteta ekstremnih temperatura. Mann-Kendallov test identificirao je statistički značajne trendove zagrijavanja, dok je Senova procjena nagiba kvantificirala brzinu tih promjena pružajući precizan uvid u dinamiku porasta ekstremnih temperatura tijekom vremena. Projekcije klimatskih modela temeljene na scenarijima RCP4.5 i RCP8.5 ukazuju na daljnji porast intenziteta i učestalosti ekstremnih temperaturnih događaja do 2070. godine. Razlike između scenarija postaju najjasnije u drugoj polovici stoljeća, pri čemu RCP8.5 predviđa značajno veće promjene u odnosu na RCP4.5 zbog pretpostavke visokih emisija stakleničkih plinova.

Zaključno, rezultati istraživanja naglašavaju potrebu za smanjenjem emisija i prilagodbom klimatskim promjenama kako bi se smanjili budući rizici za javno zdravlje, infrastrukturu, poljoprivredu i energetiku. Jasno je da klimatske promjene već sada utječu na ekstremne temperature događaje u Hrvatskoj i da će njihov utjecaj u budućnosti biti sve izraženiji. Implementacija strateških mjera prilagodbe i ublažavanja može pomoći u ublažavanju negativnih posljedica klimatskih promjena na društvo i okoliš.

## 7. Literatura

Agbo, E.P., Ekpo, C.M., 2021: Trend Analysis of the Variations of Ambient Temperature Using Mann-Kendall Test and Sen's Estimate in Calabar, Southern Nigeria, *Journal of Physics: Conference Series*, 1734 (1), DOI: doi.org/10.1088/1742-6596/1734/1/012016.

Alebić-Juretić, A., 2011: Climate Variation or Climate Change? Evidence in Favour in the Northern Adriatic Area, Croatia, *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 75-83, DOI: doi.org/10.1007/978-94-007-2430-3\_7.

Alimonti, G., Mariani, L., Prodi, F., Ricci, R., 2022: A critical assessment of extreme events trends in times of global warming, *The European Physical Journal Plus*, 137, DOI: doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02243-9.

Ančić, B., Puđak, J., Domazet, M., 2016: VIDIMO LI KLIMATSKE PROMJENE U HRVATSKOJ? ISTRAŽIVANJE STAVOVA O NEKIM OD ASPEKATA KLIMATSKIH PROMJENA U HRVATSKOM DRUŠTVU, *Hrvatski meteorološki časopis*, 51, 27-45.

Belušić Vozila, A., Güttler, I., Ahrens, B., Obermann-Hellhund, A., Telišman Prtenjak, M., 2019: Wind Over the Adriatic Region in CORDEX Climate Change Scenarios, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124 (1), 110–130, DOI: doi.org/10.1029/2018jd028552.

Bonacci, O., Andrić, I., Vrsalović, A., Bonacci, D., 2021: Precipitation Regime Changes at Four Croatian Meteorological Stations, *Atmosphere*, 12, DOI: doi.org/10.3390/atmos12070885.

Bonacci, O., Roje-Bonacci, T., Bonacci, D., 2021: Povezanost površinske temperature more i površinske temperature zraka, *Geoadria*, 6 (1), DOI: doi.org/10.15291/geoadria.3408.

Buckley, L.B., Huey, R., 2016: How Extreme Temperatures Impact Organisms and the Evolution of their Thermal Tolerance, *Integrative and Comparative Biology*, 56 (1), 98-109, DOI: doi.org/10.1093/icb/icw004.

Caputi, N., Kangas, M., Denham, A., Feng, M., Pearce, A., Hetzel, Y., Chandrapavan, A., 2016: Management adaptation of invertebrate fisheries to an extreme marine heat wave event at a global warming hot spot, *Ecology and Evolution*, 6 (11), 3583-3593, DOI: doi.org/10.1002/ece3.2137.

Cavraro, F., Anelli Monti, M., Matic-Skoko, S., Caccin, A., Pranovi, F., 2022: Vulnerability of the Small-Scale Fishery to Climate Changes in the Northern-Central Adriatic Sea (Mediterranean Sea), *Fishes*, 8 (1), 9, DOI: doi.org/10.3390/fishes8010009.

Cheikh, M.I., Momen, M., 2020: The interacting effects of storm surge intensification and sea-level rise on coastal resiliency: a high-resolution turbulence resolving case study, *Environmental Research Communications*, 2 (11), DOI: doi.org/10.1088/2515-7620/abc39e.

Chen, L., Msigwa, G., Yang, M., Osman, A.I., Fawzy, S., Rooney, D., Yap, P., 2022: Strategies to achieve a carbon neutral society: a review, *Environmental Chemistry Letters*, 20, 2277–2310, DOI: doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8.

Cifuentes-Faura, J., 2022: European Union policies and their role in combating climate change over the years, *Air Quality, Atmosphere, & Health*, 15, 1333–1340, DOI: doi.org/10.1007/s11869-022-01156-5.

Coumou, D., Rahmstorf, S., 2012; A Decade of Weather Extremes, *Nature Climate Change*, 2, 491-496, DOI: doi.org/10.1038/nclimate1452.

Drinić, J., 2023: Linearna i nelinearna regresija, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, 38 (05), DOI: doi.org/10.24867/22JV01Drinic.

Ferrise, R., Moriondo, M., Giacomo Trombi, Miglietta, F., Bindi, M., 2013: Climate Change Impacts on Typical Mediterranean Crops and Evaluation of Adaptation Strategies to Cope With, *Advances in Global Change Research*, 51, 49–70. DOI: doi.org/10.1007/978-94-007-5772-1\_4.

Fischer, E.M., Knutti, R., 2014: Detection of spatially aggregated changes in temperature and precipitation extremes, *Geophysical Research Letters*, 41 (2), DOI: doi.org/10.1002/2013GL058499.

Fouque, F., Reeder, J.C., 2019: Impact of past and on-going changes on climate and weather on vector-borne diseases transmission: a look at the evidence, *Infectious Diseases of Poverty*, 8, DOI: doi.org/10.1186/s40249-019-0565-1.

Gajić-Čapka, M., 2007: Snow baseline conditions and changes for winter tourism, *Theoretical and Applied Climatology*, 105, 181-191, DOI: doi.org/10.1007/s00704-010-0385-5.

Gajić-Čapka, M., Ozanic, N., Krvavica, N., 2014: ESTIMATION OF MAXIMUM SHORT-TERM PRECIPITATION OVER THE RIJEKA REGION, *e-GFOS*, 5 (9), 49-59.

García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta-Martínez, T., Beguería, S., 2011: Mediterranean water resources in a global change scenario, *Earth-Science Reviews*, 105 (3-4), 121–139, DOI: doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006.

Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., 2013: Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5 (3), 572–597. DOI: doi.org/10.1002/jame.20038.

Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T., Tawfik, A., Shalaby, A., Zakey, A., Steiner, A., Stordal, F., Sloan, L., 2012: RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains, *Climate Research*, 52, 7–29, DOI: doi.org/10.3354/cr01018.

Fallah Ghalhari, G., Khoshhal Dastjerdi, J. and Habibi Nokhandan, M., 2012: Using Mann Kendal and t-test methods in identifying trends of climatic elements: A case study of northern

parts of Iran, *Management Science Letters*, 2 (3), 911–920, DOI: doi.org/10.5267/j.msl.2011.10.015.

Garrido, M., Lezaud, P., 2013: Extreme Value Analysis : an Introduction, *Journal de la Societe Française de Statistique*, 154 (2), 66-97.

Geer, S., 2005: Least Squares Estimation, *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*, DOI: doi.org/10.1002/0470013192.bsa199.

Granić, G., 2011: What processes can be expected in the Croatian energy sector by 2050, *Nafta*, 62 (3-4), 87-95.

Grdić, Z.Š., Gregorić, M., Nižić, M.K., 2019: Investigating the Influence of Tourism on Economic Growth and Climate Change – The Case of Croatia, *Contemporary Economics*, DOI: 10.5709/ce.1897-9254.302.

Grimvall, A., Wackernagel, H., Lajaunie, C., 2004: Normalisation of Environmental Quality Data, *Sustainability in the Information Society*, 583—590.

Hanley, M.E., Bouma, T.J., Mossman, H.L., 2019: The gathering storm: optimizing management of coastal ecosystems in the face of a climate-driven threat, *Annals of botany*, 125 (2), 197-212, DOI: doi.org/10.1093/aob/mcz204.

Hale, L.Z., Meliane, I., Davidson, S., Sandwith, T., Hoekstra, J., Spalding, M., Murawski, S., Cyr, N., Osgood, K., Hatziolos, M., van Eijk, P., Davidson, N., Eichbaum, W., Dreus, C., Obura, D., Tamelander, J., Herr, D., McClennen, C., Marshall, P., 2009: Ecosystem-based Adaptation in Marine and Coastal Ecosystems, *Renewable Resources Journal*, 25.

Hupponen, M., Havukainen, J., Horttanainen, M., 2022: Long-term evolution of the climate change impacts of solid household waste management in Lappeenranta, Finland, *Waste management*, 157, 69-81, DOI: doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.038.

IPCC, 2023; Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, str. 35-115.



[https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf)  
(25.9.2024.), DOI: [doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647).

Jelavić, V., Delija-Ružić, V., 2021: Multisektorski pristup u tranziciji prema niskougljičnom razvoju i ciljevima Zelenog akcionog plana EU – iskustva Republike Hrvatske, *Energija, Ekonomija, Ekologija*, 3, 26-35, DOI: [doi.org/10.46793/EEE21-3.26J](https://doi.org/10.46793/EEE21-3.26J).

Jones, P.D., Hulme, M., 1996: Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations, *International Journal of Climatology*, 16 (4), 361-377, DOI: [doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199604\)16:4<361::AID-JOC53>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199604)16:4<361::AID-JOC53>3.0.CO;2-F).

Jones, P.D., Mann, M.E., 2004: Climate over past millennia, *Reviews of Geophysics*, 42(2), DOI: <https://doi.org/10.1029/2003rg000143>.

Jungclauss, J. H., Bard, E., Baroni, M., Braconnot, P., Cao, J., Chini, L. P., Egorova, T., Evans, M., González-Rouco, J. F., Goosse, H., Hurrell, G. C., Joos, F., Kaplan, J. O., Khodri, M., Klein Goldewijk, K., Krivova, N., LeGrande, A. N., Lorenz, S. J., Luterbacher, J., Man, W., Maycock, A. C., Meinshausen, M., Moberg, A., Muscheler, R., Nehrbass-Ahles, C., Otto-Bliesner, B. I., Phipps, S. J., Pongratz, J., Rozanov, E., Schmidt, G. A., Schmidt, H., Schmutz, W., Schurer, A., Shapiro, A. I., Sigl, M., Smerdon, J. E., Solanki, S. K., Timmreck, C., Toohey, M., Usoskin, I. G., Wagner, S., Wu, C.-J., Yeo, K. L., Zanchettin, D., Zhang, Q., Zorita, E., 2017: The PMIP4 contribution to CMIP6 – Part 3: The last millennium, scientific objective, and experimental design for the PMIP4 past1000 simulations, *Geoscientific Model Development*, 10 (11), 4005–4033, DOI: [doi.org/10.5194/gmd-10-4005-2017](https://doi.org/10.5194/gmd-10-4005-2017).

Kjellstrom, T., Maître, N., Saget, C., Otto, M., Karimova, T., 2019: *Working on a warmer planet: The effect of heat stress on productivity and decent work*, International Labour Organization, Geneva, Switzerland.

Kozarić, T., Ivančan-Picek, B., 2006: Meteorological features of extreme precipitation in the northern Adriatic/Meteorološki čimbenici ekstremnih oborina na sjevernom Jadranu, *Hrvatski meteorološki časopis*, 41, 53-67.

Kulovesi, K., van Asselt, H., 2020: Three Decades of Learning-by-Doing: The Evolving Climate Change Mitigation Policy of the European Union, *SSRN Electronic Journal*, DOI: doi.org/10.2139/ssrn.3859498.

Kumari, K., Yadav, S., 2018: Linear Regression Analysis Study, *Journal of the Practice of Cardiovascular Sciences*, 4, 33-36, DOI: doi.org/10.4103/jpcs.jpcs\_8\_18.

Kundzewicz, Z.W., Radziejewski, M., Pínskwar, I., 2006: Precipitation extremes in the changing climate of Europe, *Climate Research*, 31, 51–58, DOI: doi.org/10.3354/cr031051.

Kundzewicz, Z.W., 2016: Extreme Weather Events and their Consequences, *Papers on Global Change IGBP*, 23, 59–69, DOI: doi.org/10.1515/igbp-2016-0005.

Llanes Cárdenas, O., Cervantes Arce, L., González González, G. E., 2023: Calculation of indicators of maximum extreme temperature in Sinaloa state, northwestern Mexico, *Earth Sciences Research Journal*, 27 (1), 77–84, DOI: doi.org/10.15446/esrj.v27n1.99036.

van Leeuwen, C., Darriet, P., 2016: The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality, *Journal of Wine Economics*, 11 (1), 150-167, DOI: doi.org/10.1017/jwe.2015.21.

Lukić, T., Lukić, A., Basarin, B., Ponjiger, T.M., Blagojević, D., Mesaroš, M., Milanović, M., Gavrilov, M., Pavić, D., Zorn, M., Komac, B., Miljković, Đ., Sakulski, D., Babić-Kekez, S., Morar, C., Janičević, S., 2019: Rainfall erosivity and extreme precipitation in the Pannonian basin, *Open Geosciences*, 11 (1), 664–681, DOI: doi.org/10.1515/geo-2019-0053.

Maradin, M., Filipčić, A., 2018: URBAN HEAT ISLAND INTENSITY OF ZAGREB IN SUMMER AND WINTER SEASON, *Proceedings*, 3-13, DOI: doi.org/10.18509/gbp.2018.01.

Marić, A. Č., Čop, T., Oplanić, M., Ban, S. G., Njavro, M., 2023: Adaptation to Climate Change in Adriatic Croatia—The View of Policymakers, *Sustainability*, 15 (9), 7085, DOI: doi.org/10.3390/su15097085.

Mentaschi, L., Lovato, T., Momme Butenschön, Alessandri, J., Aragão, L., Verri, G., Guerra, R., Coppini, G., Pinardi, N., 2024: Projected climate oligotrophication of the Adriatic marine ecosystems, *Frontiers in Climate*, 6, DOI: doi.org/10.3389/fclim.2024.1338374.

McCarthy, M.P., Best, M.J., Betts, R.A., 2010: Climate change in cities due to global warming and urban effects, *Geophysical Research Letters*, 37(9), DOI: doi.org/10.1029/2010gl042845.

Miljak, T., Bačić, L., Kitić, M., 2012: Ekoturizam kao poticaj razvoja poduzetništva u turizmu na primjeru Republike Hrvatske, *Učenje za poduzetništvo*, 2 (2), 323-331.

Mirić, D., Rumboldt, Z., 1993: The impact of meteorological factors on the onset of myocardial infarction in the coastal region of middle Dalmatia, *Giornale italiano di cardiologia*, 23 (7), 655–60.

Nimac, I., Herceg-Bulić, I., Žuvela-Aloise, M., 2022: The contribution of urbanisation and climate conditions to increased urban heat load in Zagreb (Croatia) since the 1960s, *Urban Climate*, 46, DOI: doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101343.

Pal, J.S., Giorgi, F., Bi, X., 2004: Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections, *Geophysical Research Letters*, 31 (13), DOI: doi.org/10.1029/2004GL019836.

Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (5), 1633-1644, DOI: doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007.

Perčec Tadić, M., Pasarić, Z., Guijarro, J.A., 2022: Croatian high-resolution monthly gridded dataset of homogenised surface air temperature, *Theoretical and Applied Climatology*, 151 (1-2), 227–251, DOI: doi.org/10.1007/s00704-022-04241-y.

Perkins, S.E., Alexander, L.V., Nairn, J.R., 2012: Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells, *Geophysical Research Letters*, 39 (20), DOI: doi.org/10.1029/2012gl053361.

Posavec, S., Barčić, D., Vuletić, D., Vučetić, V., Čavlina Tomašević, I., Pezdevšek Malovrh, Š., 2023: Forest Fires, Stakeholders' Activities, and Economic Impact on State-Level Sustainable Forest Management, *Sustainability*, 15 (22), DOI: doi.org/10.3390/su152216080.

Radovanović, M., Savić, S., 2010: The Bura Wind of the Adriatic: A Review of Its Characteristics and Impacts, *Meteorological Applications*, 17 (3), 329-339, DOI: doi.org/10.1002/met.177.

Rastija, M., Iljkić, D., Kovačević, V., Brkic, I., 2012: Weather impacts on maize productivity in Croatia with emphasis on 2011 growing season, *Novenytermeles*, 61, 329-332.

Robine, J.-M., Cheung, S.L.K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., Herrmann, F.R., 2008 : Death Toll Exceeded 70,000 in Europe During the Summer of 2003, *Comptes Rendus Biologies*, 331 (2), 171-178, DOI: doi.org/10.1016/j.crv.2007.12.001.

Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Rusticucci, M., Semenov, V., Alexander, L.V., Allen, S., Benito, G., Cavazos, T., 2012: Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment, *Cambridge University Press*, 109-230, DOI: doi.org/10.1017/CBO9781139177245.006.

Sillmann, J., Kharin, V.V., Zwiers, F.W., Zhang, X., Bronaugh, D., 2013: Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (6), 2473–2493, DOI: doi.org/10.1002/jgrd.50188.

Srdelic L., 2024: Transition Risks of Climate Change: An Analysis of Greenhouse Gas Emissions in Croatia and the Euro Area, *Oeconomica Jadertina*, 14 (1), 74-90, DOI: doi.org/10.15291/oec.4433.

Stott, P., 2016: How Climate Change Affects Extreme Weather Events, *Science*, 352 (6293), 1517–1518, DOI: doi.org/10.1126/science.aaf7271.

Šarović, K., Bencetić Klaić, Z., 2023: Effect of Climate Change on Water Temperature and Stratification of a Small, Temperate, Karstic Lake (Lake Kozjak, Croatia), *Environmental Processes*, 10(4), DOI: doi:https://doi.org/10.1007/s40710-023-00663-6.

Šegota, T., Filipčić, A., 1996: Klimatologija za geografe, Školska knjiga, Zagreb, [https://www.meteorologos.rs/wp-content/uploads/2017/06/KLIMATOLOGIJA-ZA-GEOGRAFE\\_T.-Segota-i-A.-Filipcic.pdf](https://www.meteorologos.rs/wp-content/uploads/2017/06/KLIMATOLOGIJA-ZA-GEOGRAFE_T.-Segota-i-A.-Filipcic.pdf) (15.09.2024.).

Šegota, T., Filipčić, A., 2003: Köppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje, *Geoadria*, 8(1), 17-37, DOI: doi.org/10.15291/geoadria.93.

Turkalj, Ž., Ham, M., Fosić, I., 2013: The Synergy of Sustainable Tourism and Agriculture as a Factor of Regional Development Management in Croatia, *Ekonomski Vjesnik : časopis Ekonomskog fakulteta u Osijeku*, 26 (1), 71-82.

Uy, N., Shaw, R., 2012: Ecosystem-Based Adaptation, *Emerald Group Publishing Limited*, 12, DOI: doi.org/10.1108/S2040-7262(2012)0000012020.

Vera-Valdés, J.E., 2021: Temperature Anomalies, Long Memory, and Aggregation, *Econometrics*, 9 (1), 9, DOI: doi.org/10.3390/econometrics9010009.

Vlada Republike Hrvatske, 2020: Sedmo nacionalno izvješće Republike Hrvatske prema Okvirnoj konvenciji UN-a o promjeni klime (UNFCCC), Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, <https://mingo.gov.hr/UserDocsImages/KLIMA/SZOR/7%20Nacionalno%20izvje%C5%A1%C4%87e%20prema%20UNFCCC.pdf> (5. 10.2024.).

V. Vučetić, 2010: Modelling of maize production in Croatia: present and future climate, *The Journal of Agricultural Science*, 149 (2), 145–157, DOI: doi.org/10.1017/s0021859610000808.

van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.

J., Rose, S. K., 2011: The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*, 109(1–2), 5–31, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.

Zanasi, F., Conte Keivabu, R., 2024: Extreme temperatures and morbidity in old age in Europe, *Vienna Yearbook of Population Research*, 22, 1-28, DOI: [doi.org/10.1553/p-8z36-6mmj](https://doi.org/10.1553/p-8z36-6mmj).

Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, A., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katušin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnec, L., Vučetić, V., 2008: Klimatski atlas Hrvatske / Climate atlas of Croatia 1961–1990., 1971–2000., Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb.

Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Klangidou, M., Proestos, Y., Lelieveld, J., 2019: A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean, *Regional Environmental Change*, 19, 2621–2635, doi: [DOI.org/10.1007/s10113-019-01565-w](https://doi.org/10.1007/s10113-019-01565-w).

Wang, F., Harindintwali, J.D., Yuan, Z., Wang, M., Wang, F., Li, S., Yin, Z., Huang, L., Fu, Y., Li, L., Chang, S.X., Zhang, L., Rinklebe, J., Yuan, Z., Zhu, Q., Xiang, L., Tsang, D.C., Xu, L., Jiang, X., Liu, J., Wei, N., Kästner, M., Zou, Y., Ok, Y.S., Shen, J., Peng, D., Zhang, W., Barceló, D., Zhou, Y., Bai, Z., Li, B., Zhang, B., Wei, K., Cao, H., Tan, Z., Zhao, L., He, X., Zheng, J., Bolan, N., Liu, X., Huang, C., Dietmann, S., Luo, M., Sun, N., Gong, J., Gong, Y., Brahushi, F., Zhang, T., Xiao, C., Li, X., Chen, W., Jiao, N., Lehmann, J., Zhu, Y., Jin, H., Schaeffer, A., Tiedje, J., Chen, J., 2021: Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality, *The Innovation*, 2 (4), DOI: [doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100180](https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100180).

## Prilozi

### Popis slika

Sl. 1. Klimatski tipovi u Hrvatskoj prema W. Köppenu u standardnom razdoblju 1961.-1990. (Šegota i Filipčić, 2003) .....	3
Sl. 2. Godišnji hod temperature i oborina u Zagrebu za razdoblje 1961.-2020. ....	5
Sl. 3. Godišnji hod temperature i oborina u Splitu za razdoblje 1961.-2020. ....	6
Sl. 4. Godišnji hod temperature i oborina u Rijeci za razdoblje 1961.-2020. ....	7
Sl. 5. Godišnji hod temperature i oborina u Hvaru za razdoblje 1961.-2020.....	8
Sl. 6. Godišnji hod temperature i oborina u Osijeku za razdoblje 1961.-2020. ....	9
Sl. 7. Kumulativni zbroj odstupanja godišnjih maksimalnih temperatura za odabrane gradove u razdoblju 1961.-2020. ....	21
Sl. 8. Odabrani klimatskih indeksi za Zagreb u razdoblju 1961.-2020.....	25
Sl. 9. Odabrani klimatski indeksi za Split u razdoblju 1961.-2020.....	26
Sl. 10. Odabrani klimatski indeksi za Rijeku u razdoblju 1961.-2020.....	26
Sl. 11. Odabrani klimatski indeksi za Hvar u razdoblju 1961.-2020. ....	26
Sl. 12. Odabrani klimatski indeksi za Osijek u razdoblju 1961.-2020.....	27
Sl. 13. Klimatski indeksi zimskog perioda za odabrane gradove Hrvatske u razdoblju 1961.-2020.....	28
Sl. 14. Klimatski indeksi ljetnog perioda za odabrane gradove Hrvatske u razdoblju 1961.-2020.....	30
Sl. 15. Usporedba povijesnih i projiciranih podataka srednjih maksimalnih temperatura za Zagreb prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.....	34
Sl. 16. Usporedba povijesnih i projiciranih podataka srednjih maksimalnih temperatura za Split prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.....	35
Sl. 17. Usporedba povijesnih i projiciranih podataka srednjih maksimalnih temperatura za Rijeku prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.....	37
Sl. 18. Usporedba povijesnih i projiciranih podataka srednjih maksimalnih temperatura za Hvar prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.....	38

Sl. 19. Usporedba povijesnih i projiciranih podataka srednjih maksimalnih temperatura za Osijek prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.....	40
Sl. 20. Usporedba povijesnih i projekcijskih podataka maksimalnih temperatura za Zagreb prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.....	41
Sl. 21. Usporedba povijesnih i projekcijskih podataka maksimalnih temperatura za Split prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.....	42
Sl. 22. Usporedba povijesnih i projekcijskih podataka maksimalnih temperatura za Rijeku prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.....	42
Sl. 23. Usporedba povijesnih i projekcijskih podataka maksimalnih temperatura za Hvar prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.....	43
Sl. 24. Usporedba povijesnih i projekcijskih podataka maksimalnih temperatura za Osijek prema povijesnim podacima RegCM4, RCP4.5, RCP8.5 i podacima DHMZ-a za razdoblje 1961.-2070.....	43
Sl. 25. Parametri generalizirane ekstremne vrijednosti (GEV) za apsolutne maksimalne temperature u Zagrebu (1961.-2020.) i projekcije do 2070. godine.....	46
Sl. 26. Parametri generalizirane ekstremne vrijednosti (GEV) za apsolutne maksimalne temperature u Splitu (1961.-2020.) i projekcije do 2070. godine .....	47
Sl. 27. Parametri generalizirane ekstremne vrijednosti (GEV) za apsolutne maksimalne temperature u Rijeci (1961.-2020.) i projekcije do 2070. godine .....	48
Sl. 28. Parametri generalizirane ekstremne vrijednosti (GEV) za apsolutne maksimalne temperature u Hvaru (1961.-2020.) i projekcije do 2070. godine.....	49
Sl. 29. Parametri generalizirane ekstremne vrijednosti (GEV) za apsolutne maksimalne temperature u Osijeku (1961.-2020.) i projekcije do 2070. godine .....	50
Sl. 30. Usporedba GEV distribucija za apsolutne maksimalne temperature u odabranim gradovima Hrvatske (1961.-2020.) .....	51



## Popis tablica

Tab. 1. Trendovi promjene srednjih godišnjih maksimalnih temperatura za odabrane gradove Hrvatske u razdobljima 1961.-1990. i 1991.-2020.....	23
Tab. 2. Mann-Kendallov tau i Senov nagib za trendove maksimalnih mjesečnih temperatura u odabranim gradovima Hrvatske u razdoblju 1961.-2020.....	31