

SPREMEMBE MINIMALNIH TEMPERATUR V EVROPI

Igor Žiberna

Dr., prof. geografije in zgodovine, izr. prof.
Oddelek za geografijo
Filozofska fakulteta
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija
e-mail: igor.ziberna@um.si

Matej Meško

Diplomirani geograf in zgodovinar
Severjeva ulica 1, SI- 9000, Murska Sobota Slovenija
e-mail: matej.mesko@student.um.si

UDK: 911.2:551.583
COBISS: 1.01

Izvleček

Spremembe minimalnih temperatur v Evropi

V članku smo analizirali trende minimalnih temperatur v Evropi v obdobju med leti 1961 in 2020 in spremembe minimalnih temperatur do konca 21. stoletja. Pri analizi smo uporabili podatke za 58 meteoroloških postaj s homogenim nizom podatkov, podatke o minimalnih temperaturah iz baze WorldClim ter napovedi minimalnih temperatur do konca 21. stoletja iz baze WorldClim. Rezultati kažejo velike razlike v sezonskih in prostorskih spremembah minimalnih temperatur.

Ključne besede

Podnebne spremembe, minimalne temperature, Evropa

Abstract

Changes in minimum temperatures in Europe

In article, we analyse trends of minimum temperatures in Europe between 1961 and 2020 and changes in minimum temperatures until the end of the 21st century. The analysis uses data for 58 meteorological stations with a homogeneous dataset, minimum temperature data from the WorldClim database and minimum temperature projections to the end of the 21st century from the WorldClim database. The results show large differences in seasonal and spatial variations of minimum temperatures.

Keywords

Climate change, minimum temperatures, Europe

1. Uvod

Podnebne spremembe so eden od največjih okoljskih izzivov naše generacije. Na našem planetu se je vse do 19. stoletja podnebje spreminjalo iz povsem naravnih razlogov. Podnebje je bilo marsikdaj bistveno toplejše od današnjega. V času holocena pa je podnebje bilo nenavadno stabilno. Z industrijsko revolucijo in z začetkom intenzivnejše uporabe fosilnih goriv in posledično večjih antropogenih emisij toplogrednih plinov pa se je kot posledica spremenjene energijske bilance podnebje na Zemlji začelo ogrevati zelo hitro (Gaffney, Rockstroem 2021; Alcamo, Olesen 2012). Po poročilu Medvladnega panela za podnebne spremembe iz leta 2021 (Climate Change 2021, 2812) so se povprečne temperature v obdobju 1850 – 2019 dvignile za 0,8-1,3 °C, globalne minimalne temperature na kopnem pa so zrasle trikrat intenzivneje v primerjavi z globalnimi povprečnimi temperaturami. To še posebej velja za območja Arktike. Minimalne temperature na kopnem na severni poluti bodo v prihodnje naraščale hitreje od maksimalnih temperatur (Climate Change 2021, 3000).

Dosedanje študije so pokazale, da imajo sedanji temperaturni trendi pomemben vpliv na hidrološki cikel (Alfieri et al. 2017; Sun, Miao 2018; Zheng in sod. 2019; Gou in sod. 2020), proizvodnjo hrane (Asseng in sod. 2015), razporejanje energije (Mcglade, Ekins 2015), širjenje bolezni (Levy in sod. 2016; Colon-Gonzalez in sod. 2018), naravne nesreče (Miao in sod. 2010, 2011; Diffenbaugh 2017; Sun in sod. 2020) in družbeno-ekonomski razvoj (Burke in sod. 2015). Dvig temperature za 2 °C do konca 21. stoletja bi naj po napovedih privedel do povprečnega dviga svetovnega morja za 20 cm (Jevrejeva in sod. 2016), segrevanje za 1,5 °C pa naj bi privedlo do taljenja ledenikov v visokogorju v Aziji, tako da bo do konca 21. stoletja ostalo le 64 % njihove sedanje ledene mase (Yao 2012; Kraaijenbrink in sod. 2017).

V Sloveniji so v obdobju 1961-2011 povprečne temperature naraščale z linearnim trendom 0,36 °C/10 let, pri čemer so trendi maksimalnih temperatur 0,48 °C/10 let, trendi minimalnih temperatur pa 0,32 °C/10 let. Trendi so izrazitejši v vzhodni polovici Slovenije. Trendi ekstremnih temperatur se po letnih časih razlikujejo. Trendi minimalnih temperatur v Sloveniji pozimi znašajo 0,39 °C/10 let, spomladi 0,33 °C/10 let, poleti 0,47 °C/10 let in jeseni 0,20 °C/10 let. Trendi maksimalnih temperatur pozimi so 0,44 °C/10 let, spomladi 0,46 °C/10 let, poleti 0,51 °C/10 let in jeseni 0,08 °C/10 let. Minimalne temperature torej najhitreje naraščajo poleti in pozimi, maksimalne pa poleti in spomladi (Vertačnik, Bertalanič 2017, 28-29).

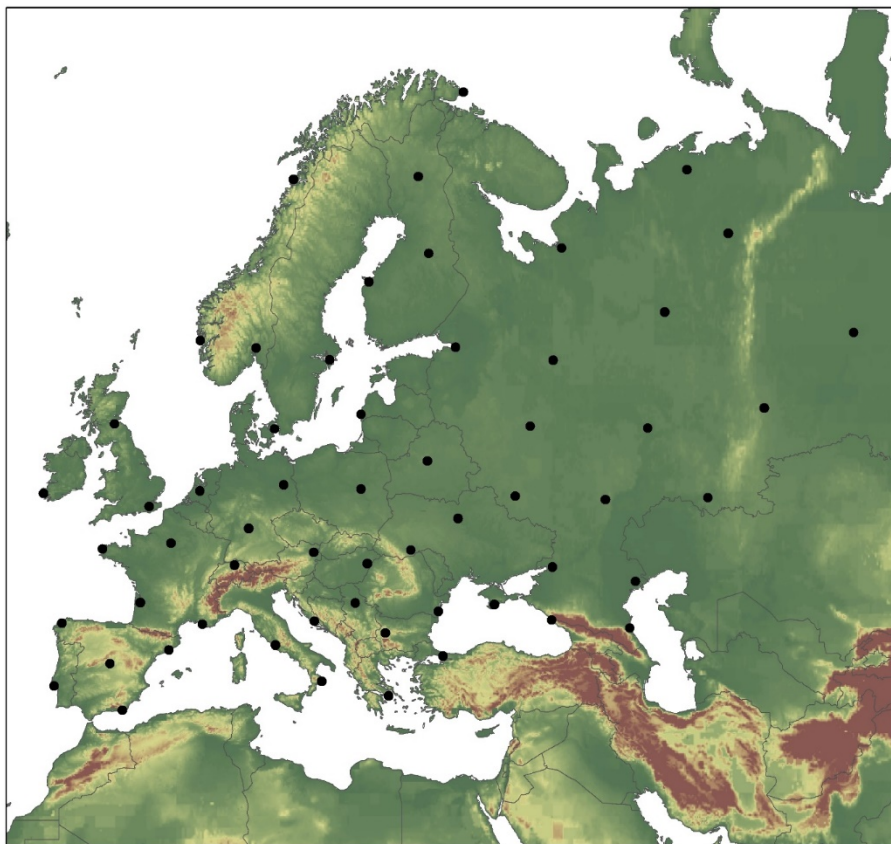
2. Metodologija

Analize sprememb minimalnih temperatur v Evropi smo se lotili na dva načina:

- analiza trendov minimalnih temperatur na osnovi podatkov meteoroloških postaj, razporejenih po celotni Evropi,
- analiza sprememb minimalnih temperatur na osnovi georeferenciranih rastrskih podatkov baze WorldClim.

Podatke o minimalnih temperaturah za meteorološke postaje v različnih delih Evrope smo pridobili iz baze podatkov European Climate Assessment & Dataset (Medmrežje 1) in sicer za obdobje 1961-2020. Iz baze smo filtrirali le meteorološke postaje s

homogenim nizom podatkov. Na ta način smo za območje Evrope pridobili podatke 58 meteoroloških postaj (Slika 1).



Slika 1: Razporeditev meteoroloških postaj po Evropi, za katere smo računali trende minimalnih temperatur v Evropi za obdobje 1961-2020.

Vir: Medmrežje 1.

Trende smo računali na mesečnem nivoju in nivoju letnih časov (zima=december, januar, februar, pomlad=marec, april, maj itd.).

V drugem delu smo v analizo zajeli georeferencirane rastrske podatke baze WorldClim. Velikost piksla je bila 30" x 30" (približno 1 km x 1 km). V analizo smo vključili historične podatke za minimalne temperature za obdobje 1970-2000 in napovedi za dvajsetletna obdobja v 21. stoletju (2021-2040, 241-2060, 2061-2080, 2081-2100). Pri napovedih smo uporabili napovedi po CMIP6 modelu (Coupled Model Intercomparison Project 6), pri čemer smo predpostavili najbolj optimistični scenarij SSPs 126 (Shared Socioeconomic Pathways 126). Ta predvideva dvig antropogenega prispevka k planetarni energijski bilanci za 1 W/m² – 2,6 W/m², oziroma trend globalnega dviga temperatur za 1,18°C / 100 let do konca 21. stoletja. Po tem scenariju, ki vključuje najbolj trajnostni odziv svetovnega prebivalstva, bi se naj v drugi polovici 21. stoletja globalne temperature ustalile, ob koncu stoletja pa začele ponekod celo zniževati. Glede na trenutni odziv naše družbe na podnebno krizo takega scenarija zaenkrat sicer ne gre pričakovati, smo pa s tem želeli opozoriti, da kljub

morebitnemu racionalnemu ukrepanju naše družbe podnebna kriza ne bo tako hitro minila, oziroma bodo minimalne temperature še vedno naraščale. Med izborom različnih globalnih podnebnih modelov (Global Climate Models ali GCM) smo uporabili model MIROC6.

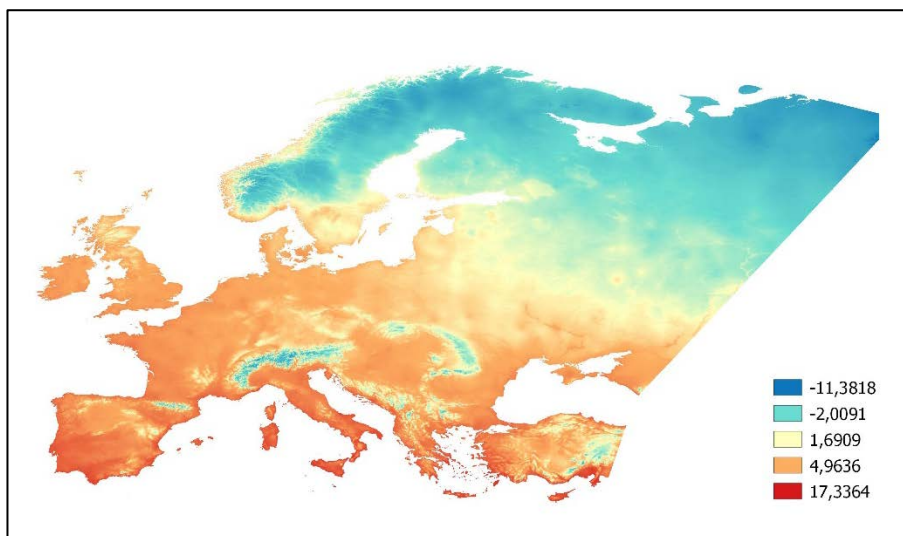
3. Minimalne temperature v Evropi v obdobju 1971-2000

3.1 Minimalne temperature po mesecih

Pri obravnavi minimalnih temperatur v Evropi moramo najprej omeniti ključne dejavnike, ki vplivajo na razporeditev le-teh: vpliv morja, kontinentalnost in geografska širina; ki vplivajo na razporeditev temperatur. Praviloma se temperature znižujejo v smeri zahod-vzhod (kontinentalnost), ter v smeri sever-jug (geografska širina), izjema so le visokogorja. Severna Evropa ima prav tako daljše zime in krajša poletja (Alcarno in sod. 2012).

Najnižje januarske minimalne temperature so se pojavljale na skrajnem severu Evrope, v polarnem pasu (med $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$), medtem ko so se minimalne temperature na območju Skandinavije in večine Vzhodne Evrope gibale med $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Minimalne temperature v srednji Evropi in jugovzhodni Evropi so še naprej ohranjale negativno vrednost (med $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$), medtem ko so minimalne temperature na območju Sredozemlja in ob Atlantiku, zaradi vpliva morskih tokov in geografske širine, krepko presežale pozitivno vrednost (med $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $17\text{ }^{\circ}\text{C}$). Februarska razporeditev minimalnih temperatur je ohranjala enako podobo, toda bolj izstopajoča postanejo evropska gorovja (med $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$), minimalne temperature v Evropi pa so bile že bistveno višje, najbolj opazno je to v subtropskem pasu (med $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $11\text{ }^{\circ}\text{C}$). V marcu so nizke minimalne temperature (med $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$) še naprej izstopale v polarnem pasu ter na celotnem območju Skandinavije, toda negativne minimalne temperature so segale le še do Poljske, izstopajoče so bile le evropska sredogorja kot vmesni »temperaturni otoki« (med $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Aprila so bile negativne minimalne temperature omejene samo še na območje polarnega in zmerno hladnega pasu, medtem ko so se na skrajnem jugu Evrope minimalne temperature gibale že krepko nad $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. V mesecu maju smo zasledili povprečno negativne minimalne temperature le še v polarnem pasu in visokogorju, medtem ko se minimalne temperature v vzhodni Evropi gibale že med $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, večina Evrope pa je bila že v vegetacijski dobi (nad $5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Junija so prag vegetacijske dobe prestopila že vsa območja v Evropi, z izjemo skrajnega severa (med $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $3\text{ }^{\circ}\text{C}$), najnižje minimalne temperature (med $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$) pa so se pojavile samo še na najvišjih legah visokogorja. V mesecih juliju in avgustu pa so, z izjemo najvišjih vrhov, segale minimalne temperature v celotni Evropi nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, na območju Mediterana pa so, zaradi vpliva azorskega maksimuma, segale minimalne temperature že močno nad $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (med $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), kar je imelo vpliv na pojav vročinskih ekstremov. Septembrske minimalne temperature so z razliko od prejšnjih začele ponovno upadati v smeri proti severu, toda najnižje temperature v polarnem pasu so se še vedno gibale med $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, kljub podaljšani poletni sezoni pa so se znižale tudi minimalne temperature v subtropskem pasu (do $20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Oktobrske minimalne temperature so se v polarnem pasu že znižale pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (med $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $1\text{ }^{\circ}\text{C}$), območja v zmerno hladnem pasu pa so se že nahajala na meji vegetacijske dobe, minimalne temperature toplejših območij Sredozemlja in zahodne Evrope pa so se znižale pod vrednostjo $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z začetkom meseca novembra in pozne jeseni so na najbolj severnih območjih Evrope močno upadle minimalne temperature (med $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), temu so sledila

tudi območja v srednji in zahodni Evropi (med 0 °C in 5 °C), minimalne temperature nad 10 °C pa so se pojavljale samo še v Sredozemlju (do 15 °C). Tudi decembrske minimalne temperature so bile pozitivne le na območju zahodne Evrope in Sredozemlja, medtem ko so se v notranjosti celine gibale med -1 °C in 5 °C, v zmerno toplem pasu med -6 °C in -10 °C, v polarnem pasu pa so se minimalne temperature gibale že pod -20 °C.



Slika 2: Letno povprečje minimalnih temperatur v Evropi v obdobju 1970-2000.

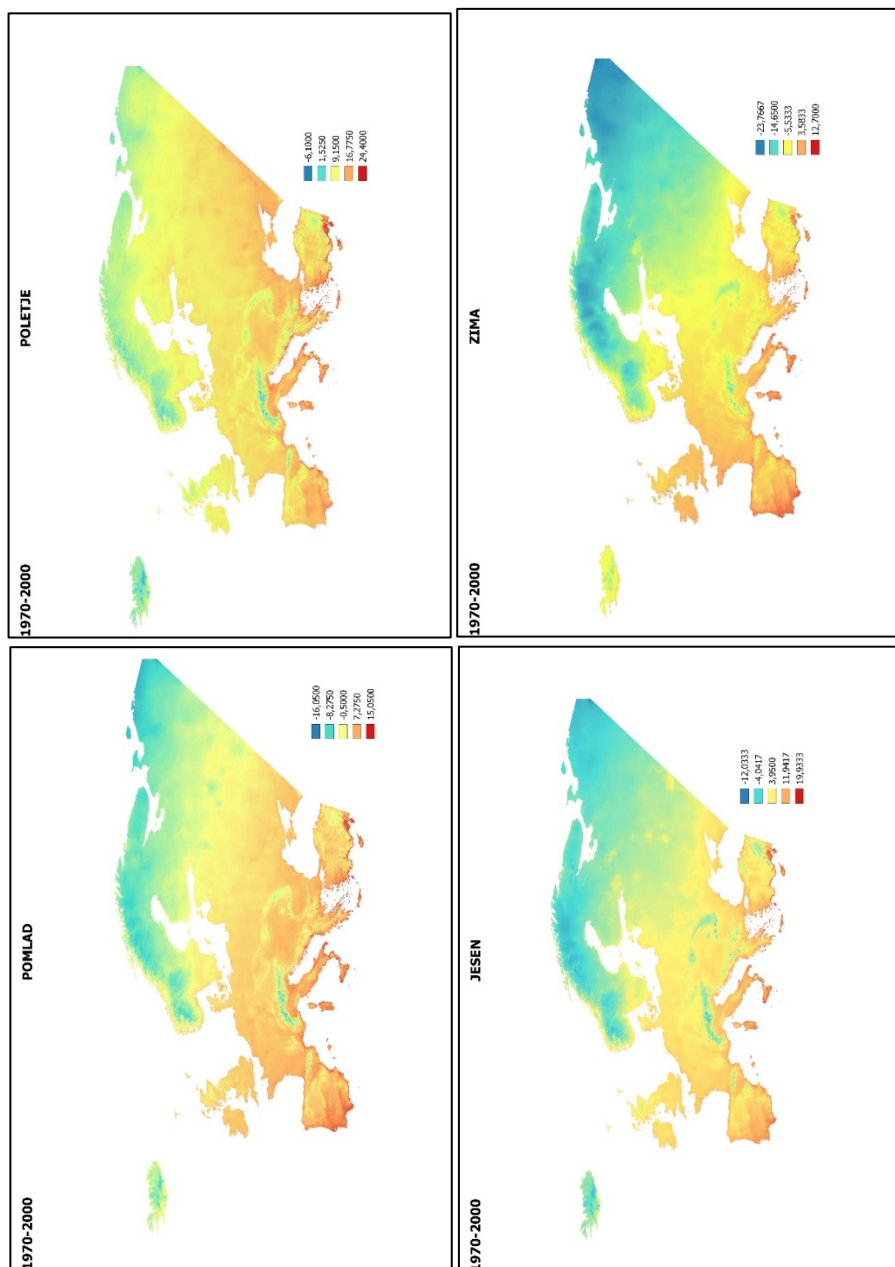
Vir: Medmrežje 1.

3.2 Minimalne temperature po letnih časih

V pomladnih mesecih so negativne minimalne temperature bile omejene le na območje polarnega pasu ter gorskih verig (med -16 °C in -1 °C). Minimalne temperature ostalih delov Evrope so se večale v smeri proti jugu in zahodu: v vzhodni in srednji Evropi so se gibale med 1 °C in 5 °C, na območju pod vplivom oceanskega podnebja ter subtropskem pasu pa so povprečne bile minimalne temperature že bistveno višje (med 5 °C in 15 °C). V poletnem letnem času so pričakovano močno narasle minimalne temperature v polarnem pasu (med 6 °C in 10 °C), negativne temperature pa so vezane le na najvišje lege območij Skandinavskega gorovja in Alp. Za večinski kontinentalni del Evrope so se gibale povprečne minimalne temperature med 10 °C in 15 °C, območja Sredozemlja pa so izstopala z visokimi minimalnimi temperaturami (med 15 °C in 24 °C). Povprečne minimalne temperature so se v jesenskem letnem času še ohranjale višje ob Sredozemlju (med 5 °C in 20 °C) ter zahodni Evropi (med 4 °C in 10 °C), zaradi že prej omenjenih klimatskih vplivov. Območje srednje in vzhodne Evrope je delovalo temperaturno dokaj homogeno (med 3 °C in 5 °C), na območju zmerno toplega pasu so vrednosti padle pod ničlo (med 1 °C in -3 °C); vizualno pa izstopajo območja večjih aglomeracij v Rusiji, zaradi višjih minimalnih temperatur, ter območja vodnih teles, kot je npr. Ladoško jezero.

V zimskem letnem času so minimalne temperature segale v polarnem pasu med -23 °C in -15 °C, v zmerno hladnem med -15 °C in -7 °C ter v srednji in jugovzhodni Evropi med -5 °C in 0 °C. Prostor srednje Evrope je bil še posebej analiziran z vidika

spreminjanj temperatur, kjer so nekatere raziskave posebej izpostavile vedno krajše trajanje »hladne« sezone, saj naj bi se le te začejala kasneje ter prej končale. Po nekaterih ugotovitvah naj bi se sezona v drugi polovici 20. stoletja krčila s povprečnim trendom 3 dni/desetletje, zmanjšalo pa se je tudi število zimskih ekstremov (Piotrowitz in sod. 1998; Alcamo 2012). Prostor Mediterana pa je ponovno izstopal po višjih minimalnih temperaturah (med 5 °C in 12 °C), enako zahodna Evropa, kjer pa so se povprečne minimalne temperature gibale dokaj homogeno (med 1 °C in 2 °C).



Slika 3: Povprečne sezonske minimalne temperature v Evropi v obdobju 1970-2000.
Vir: Medmrežje 1.

4. Trendi minimalnih temperatur v Evropi v obdobju 1961-2020 na osnovi točkovnih podatkov baze European Climate Assessment

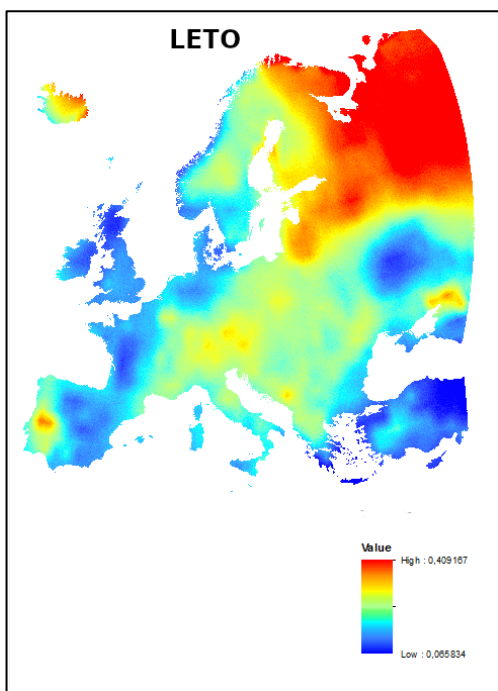
4.1 Trendi minimalnih temperatur po mesecih

Nekatere raziskave, ki so obravnavale širša časovna obdobja do kar 500 let nazaj so, kljub zastavljenim predpostavkam pozitivnega trenda sprememb temperatur, prinesle presenetljive rezultate. Dvajseto stoletje je bilo najtoplejše stoletje v Evropi, z največjim povprečnim trendom $+0,17-0,22$ °C/desetletje (odvisno od vira podatkov), samo v obdobju 1974-2003 se je povprečna temperatura dvignila za kar $0,43$ °C, medtem ko se od leta 1989 redno postavljajo novi temperaturni rekordi, obdobje 1983-2012 pa je bilo leta 2014 razglašeno, za najtoplejših 30 let v zadnjih 1400 letih. Po novih raziskavah iz leta 2021 pa so še trendi naraščanj temperatur bistveno bolj problematični (Lutterbacher in sod. 2004; Krauskopf in sod. 2020; IPCC 2014; IPCC 2021; Archer in sod. 2010).

Vremenske postaje, katerih podatke smo uporabili pri analizi, so razporejene po celotni Evropi, tako da smo lahko izračunali trende sprememb za celotno celino. Največje trende minimalnih temperatur smo zaznali na območju severne Evrope (Rusija, Finska, Islandija, Norveška in Baltske države), ki se nahajajo pretežno v zmerno hladnem in polarnem pasu ($0,28-0,41$ °C/desetletje). Zahodna Evropa in območje Sredozemlja sta imela nižje trende minimalnih temperatur ($0,05-0,20$ °C/desetletje), zaradi stalnega vpliva morij ter geografske širine. Zanimivi pa so trendi sprememb v notranjosti Evrope, kjer je jasno opazen vpliv kontinentalnosti, ki se večja v smeri zahod-vzhod, prav tako so tukaj prisotna evropska sredogorja ($0,21-0,26$ °C/desetletje).

Januarski trendi minimalnih temperatur močno izstopajo v severnih območjih, kjer se v najbolj ekstremnih okoljih pojavljajo tudi trendi do 1 °C/desetletje, podobne trende pa lahko zasledimo tudi na območjih Panonske nižine in Ukrajine, medtem ko v ostalih delih Evrope ni izrazitih trendov. Podobne rezultate smo dobili pri analizi februarjskih temperaturnih trendov, medtem ko mesec marec in april ne predstavljata posebnih trendov, le ti so še nekoliko višji spet v polarnih območjih, zaradi daljše zimske sezone. V mesecih maj-avgust pa pride do sprememb pri rezultatih trendov, saj se največji trendi pojavljajo na območjih Južne in Srednje Evrope ($0,28-0,42$ °C/desetletje), posebno izstopa mesec avgust, kjer se pojavljajo trendi $0,4-0,55$ °C/desetletje ($2-2,75$ °C/50 let). Višji trendi spreminjanja minimalnih temperatur v Južni Evropi se še nadaljujejo v mesecu septembru in oktobru ($0,3-0,4$ °C/desetletje), zaradi vpliva mediteranske klime in posledično daljše poletne sezone, ponovno pa začnejo izstopati severnejša območja, zaradi zgodnejše zimske sezone ($0,3$ °C/desetletje). V zadnjih mesecih pa prevladuje v Evropi trend $0,3$ °C/desetletje, medtem ko so nadpovprečni trendi ponovno v polarnih delih Evrope ($0,7-0,9$ °C/desetletje).

V dosedanji razlagi rezultatov je bilo malo govora o območju Zahodne Evrope, kjer zaradi močnega vpliva oceanskega podnebja pri analizo po mesecih ni prišlo do večjih razlik v trendih, saj beležimo konstanten trend naraščanja med $0,20-0,28$ °C/desetletje.



Slika 4: Letni trendi minimalnih temperatur v Evropi v obdobju 1961-2020.

Vir: Medmrežje 2, lastni izračuni.

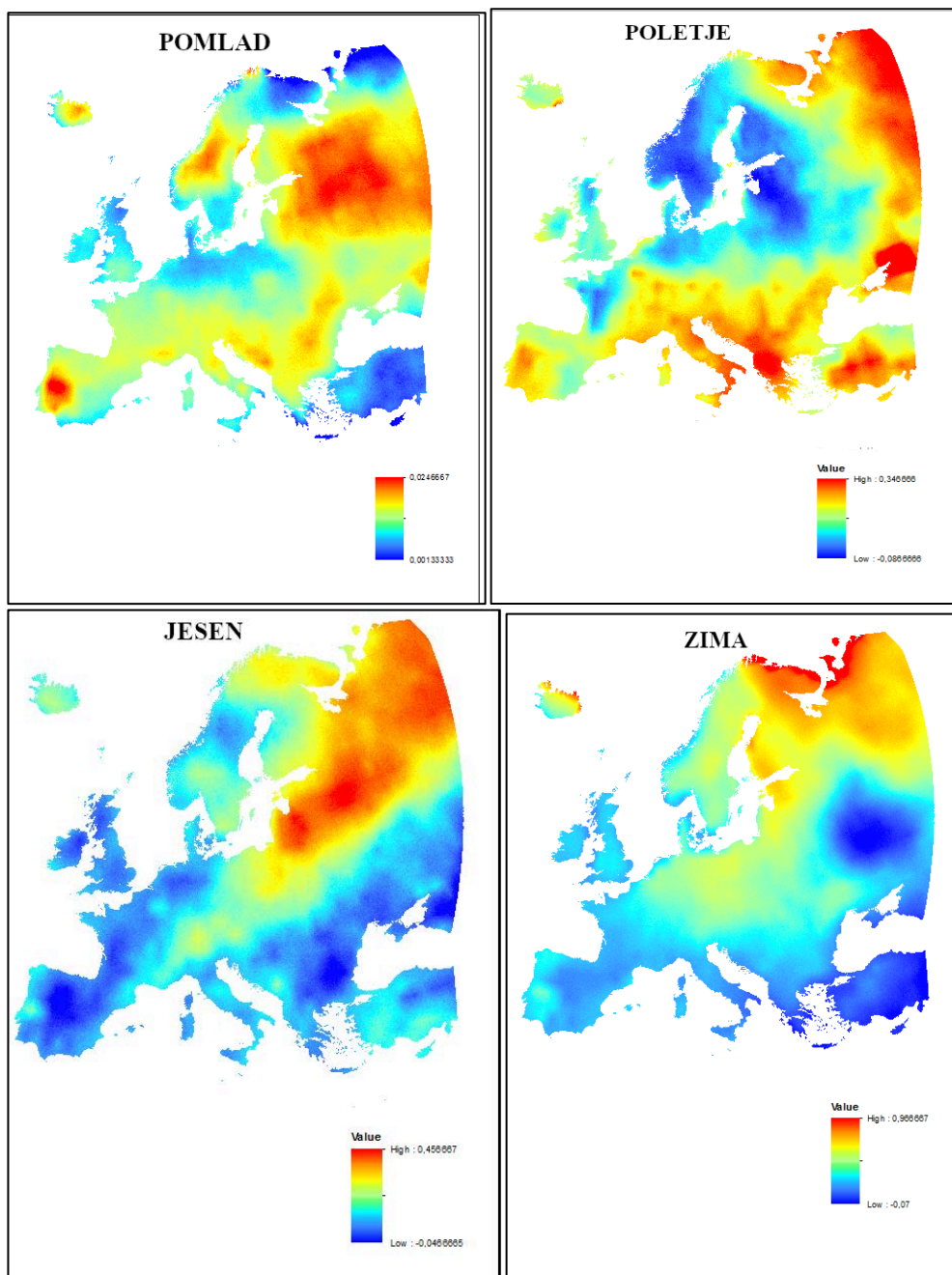
4.2 Trendi minimalnih temperatur po letnih časih

Analizirali smo še trende minimalnih temperatur po letnih časih. Pomlad po trendih posebej ne izstopa, saj največji trendi, zabeleženi na območju Portugalske in severne Rusije, ne presegajo več kot 0,25 °C/desetletje. Višji trendi so vezani le na območju zmerno hladnega klimatskega pasu ter pasu, ki se vije preko Ukrajine in Balkana do Francije, kjer se gibljejo trendi med 0,24 in 0,15 °C/desetletje, medtem ko so nižji trendi na območju Baltika in Zahodne Evrope. Najnižji trendi se pojavljajo na skrajnem jugu in severu Evrope, najbolj presenetljivi so predvsem nizki trendi na območjih v polarnem pasu, pri čemer raziskovalci opozarjajo na pojave vremenskih in tehničnih anomalij (npr. premestitev lokacije vremenske postaje), ki vplivajo na analize daljših serij meritev (Brazdil in sod. 1996; Brinkmann 1979).

Pri analizah trendov minimalnih temperatur po mesecih smo že izpostavili poletni letni čas kot obdobje velikih sprememb. Največji trendi se pojavljajo na območju južne Evrope, kjer se pojavljajo trendi do 0,3 °C/desetletje, pri tem posebej izstopata južna Italija in Grčija zaradi vpliva Sredozemskega morja. Visoki deleži se pojavljajo tudi v Rusiji, kjer izstopa predvsem območje Rostova ob Črnem morju s trendom 0,34 °C/desetletje. Nekoliko nižje trende imajo območja, ki ležijo severno od mediteranskih območij globoko v notranjosti celine, medtem ko severneje od teh nahajajo najnižji trendi na območju ob Baltiku in Skandinaviji. Rezultati nakazujejo povečano nevarnost pojavljanja suš na rodovitnih pridelovalnih območjih v poletnih mesecih, ko je vodna potreba in poraba (pre)velika (kmetijstvo, poletni turizem); povečalo pa naj bi se tudi število neurij (IPCC 2014; Pokorna in sod. 2018).

Jesenske spremembe minimalnih temperatur so najbolj opazne v zmerno toplem pasu, še posebej v baltskih državah ter severni Rusiji, kjer se pojavljajo visoki trendi do 0,45 °C/desetletje. Tem trendom sledijo tudi nekoliko nižji v Skandinaviji, izstopata pa tudi območje Poljske ter Alp s trendi med 0,25 in 0,35 °C/desetletje, v območjih pod vplivom morij pa ni bistvenih sprememb, z razliko posameznih območij ob Sredozemskem morju, kjer pa trendi ne presegajo 0,15 °C/desetletje. Po ugotovitvah dosedanjih raziskavah trendov, kjer so bili uporabljeni različni viri podatkov, tudi tisti ki smo jih sami uporabili, naj bi trendi sprememb v jesenskem letnem času najmanj izstopali ali bili najmanjši v Evropi (Krauskopf in sod. 2020).

Najvišje trende smo zaznali v zimskem letnem času, predvsem v severnih delih Evrope, kjer se na najbolj severnih legah pojavljajo največji izračunani trendi (0,8-0,9 °C/desetletje), vrednost trendov pa pada ter ohranja visok delež med 0,6 in 0,7 °C/desetletje v pasu, ki se vije iz Rusije čez Baltske države v Srednjo Evropo (Poljska, Nemčija, Češka in Slovaška), kjer se pojavljajo trendi med 0,4 in 0,5 °C/desetletje. Z večanjem vpliva morij trendi začnejo upadati ter se v južni, zahodni ter tudi jugovzhodni Evropi gibljejo med 0,2-0,35 °C/desetletje, poseben primer pa je območje Turčije, kjer prihaja do trendov znižanja minimalnih temperatur. Toda skupno gledano lahko povzamemo, da bodo zime postale bistveno toplejše, zaradi izrazito višjih trendov spreminjanja minimalnih temperatur, ki so imeli po nekaterih ugotovitvah trend do 1 °C/desetletje (Krauskopf in sod. 2020; Pokorna in sod. 2018).



Slika 5: Trendi minimalnih temperatur po letnih časih v obdobju 1961-2020.
Vir: Medmrežje 2, lastni izračuni.

5. Spremembe minimalnih temperatur v Evropi v obdobju 1971-2100 na osnovi podatkov WorldClim

Na splošno razporeditev temperatur v Evropi poleg nadmorske višine in advekcije vplivata še dva geografska dejavnika: geografska širina in kontinentalnost (t.j. oddaljenost od morja). Pomen vseh naštetih dejavnikov se spreminja z letnimi časi: vpliv kontinentalnosti je izrazitejši v hladni polovici leta, zaradi česar potekajo januarske izoterme bolj v poldnevniški kot vzporedniški smeri (Šegota 1988, 101-103).

V obdobju 1970-2000 so se najvišje spomladanske minimalne temperature pojavljale ob obalah Sredozemskega in na Iberskem polotoku tudi ob obalah Atlantskega oceana. Visoke so bile še ob jugozahodnih obalah Črnega morja. Razpon spomladanskih temperatur je znašal 28,7 °C (Preglednica 1). Po uporabljenem modelu, ki je najbolj optimističen, se bo rast spomladanskih minimalnih temperatur ob koncu 21. stoletja ustalila, razpon razlik minimalnih temperatur pa se bo znižal z 29,7 °C na 29,1 °C. Razlika spomladanskih minimalnih temperatur med začetnim obdobjem (1970-2000) in končnim obdobjem (2081-2100) bo največja na območju severne Skandinavije, severne Islandije in v pasu, ki se vleče čez Rusijo od polotoka Kola proti Kaspijskem jezeru (Slika 5, levo).

V poletnih mesecih so bile v obdobju 1970-2000 najvišje minimalne temperature na enakih območjih kot v spomladanskih mesecih, le interval med najtoplejšimi in najhladnejšimi obdobju se je znižal na 29,2 °C. V poletnih mesecih geografska širina zaradi daljšega dne, kljub nižjemu višinskemu kotu Sonca ne igra tako pomembne vloge kot v hladni polovici leta, zato pa na pomenu pridobiva kontinentalnost, saj se kopno segreva hitreje kot morje, kar je vidno tudi na Sliki 5 desno. Stopnja dviga poletnih minimalnih temperatur se bo višala v smeri povečane kontinentalnosti, torej proti Centralni Aziji. Minimalne temperature bodo v Skandinaviji sicer porasle, vendar bolj v njenem kontinentalnem delu, torej na Finskem. Tudi v Sredozemlju bo porast poletnih minimalnih temperatur najvišji v osrčju Iberskega polotoka, Apeninskega polotoka, Balkanskega polotoka in Turčije. Dvig poletnih minimalnih temperatur ob obalah Sredozemlja bo bistveno nižji. Tudi pri poletnih minimalnih temperaturah se bo ob koncu obravnavanega obdobja znižal na 28,7 °C.

Preglednica 1: Razpon povprečnih minimalnih temperatur po letnih časih v različnih obdobjih v Evropi po letnih časih.

Obdobje	Pomlad max	Pomlad min	Pomlad amplit.	Poletje max	Poletje min	Poletje amplit.	Jesen max	Jesen min	Jesen amplit.	Zima max	Zima min	Zima amplit.
1971-2000	14.5	-15.2	29.7	24.4	-4.8	29.2	19.7	-11.5	31.2	12.1	-23.7	35.8
2021-2040	15.5	-14.2	29.7	25.6	-3.4	29.0	21.1	-14.0	35.1	13.3	-21.5	34.8
2041-2060	15.4	-14.0	29.4	25.5	-2.9	28.4	21.2	-7.6	28.8	13.4	-20.5	33.9
2061-2080	15.8	-13.6	29.4	26.0	-2.6	28.6	21.5	-6.7	28.2	13.7	-18.5	32.2
2081-2100	15.8	-13.3	29.1	25.9	-2.8	28.7	21.3	-6.9	28.2	13.6	-20.5	34.1

Vir: Medmrežje 2; lastni izračuni, 2021.

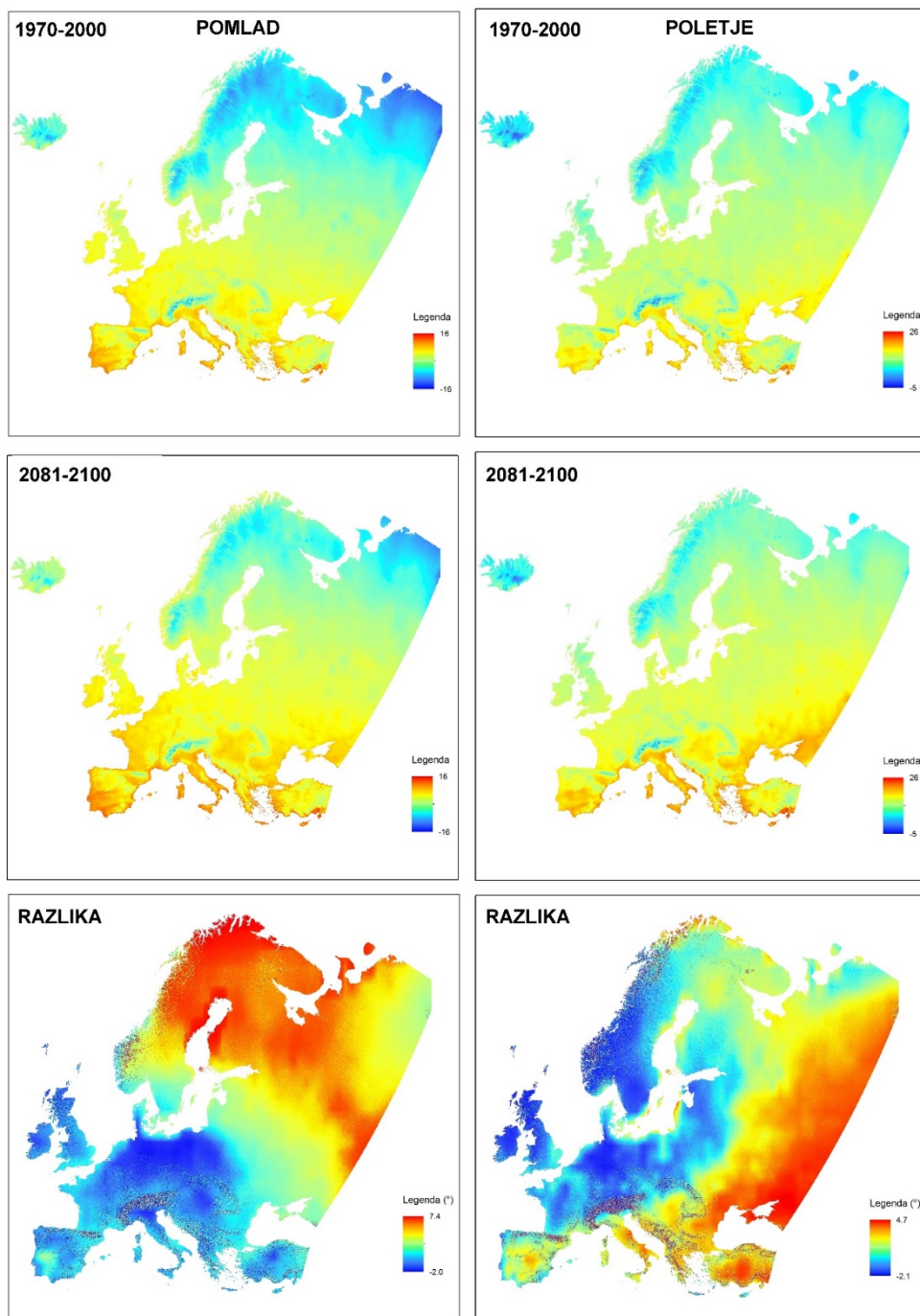
V jesenskih mesecih se bodo amplitude minimalnih temperatur znižale z 31,2 °C na 28,2 °C. Največjo rast jesenskih minimalnih temperatur bo mogoče zaznati v kontinentalnem delu Evrope, predvsem v pasu med severno Skandinavijo, kontinentalnim delom Rusije, prav tako pa tudi na območju med Volgo in Srednjeruskim višavjem. Dvig jesenskih minimalnih temperatur na območju Zahodne Evrope bo nižji: v večjem delu se bodo minimalne temperature dvignile za od 0 do 2 °C (Slika 6, levo).

V večini evropskih držav se bodo zimske temperature dvignile za 0-2 °C. V pasu vzhodno od vzhodne Poljske in vzhodne Romunije bo dvig zimskih minimalnih temperatur med 3 in 5 °C, na obalah Finskega zaliva, na severnem Laponskem in severovzhodni obali polotoka Kola pa bo porast med 5 in 10 °C, kar je sicer v skladu z ugotovitvijo, da se arktična območja segrevajo hitreje (Climate Change 2021). Tudi razlike v zimskih temperaturah med posameznimi evropskimi območji se bodo med začetnim in končnim obdobjem znižale s 35,8 °C na 34,1 °C.

Odvisnost sezonskih razlik povprečnih minimalnih temperatur od letnih časov po posameznih območjih v Evropi smo skušali ponazoriti tudi s temperaturnim profilom po diagonali Evrope od severovzhoda (severni Ural) proti jugozahodu (jugozahodna Portugalska), pri čemer smo zajeli vpliv geografske širine, kontinentalnosti in nadmorske višine (Slika 7). Rezultati nakazujejo na več zaključkov. V vzhodnem delu obravnavanega območja, ki sega vse od Urala do Sudetov in zajema pretežno ravninsko-gričevnat svet, je variabilnost razlik majhna. V večjem delu se bodo minimalne temperature najbolj dvignile pozimi in jeseni, le na območju Urala bo dvig minimalnih temperatur do konca stoletja najvišji jeseni. Povprečne zimske minimalne temperature se bodo na območju Rusije in Ukrajine dvignile celo za 4 °C, jesenske pa med 2 in 4 °C. Dvig povprečnih pomladanskih minimalnih temperatur bo v večjem delu vzhodne Evrope višji od dviga povprečnih zimskih temperatur, vendar bodo ti v obeh sezonah znašali med 2 in 3 °C, le na območju Poljske se bo dvig znižal na vrednosti med 1 in 2 °C, pri čemer bo dvig poleti nekaj višji od pomladanskega. V drugem delu profila, ki zajema pretežno hribovito-gorati del Evrope in poteka od Sudetov preko češkega sredogorja, Šumave, Bavarske, Alp, Provanse, Pirenejev, Iberskega in Kastilskega gorovja do jugozahodne Portugalske, je variabilnost razlik povprečnih minimalnih temperatur po letnih časih bistveno večja. To nakazuje večji vpliv orografije na spremembo temperatur. Naslednja značilnost se kaže v bistveno nižjih razlikah sprememb povprečnih minimalnih temperatur po letnih časih. V tem delu profila bodo najvišje spremembe v poletnem času (okoli 2 °C) in spomladi (med 1,5 in 2 °C). Primerljive s spomladanskimi razlikami bodo tudi razlike jeseni, medtem ko se bodo minimalne temperature v zimskem času do konca stoletja dvignile najmanj, za okoli 1 °C (Slika 8).

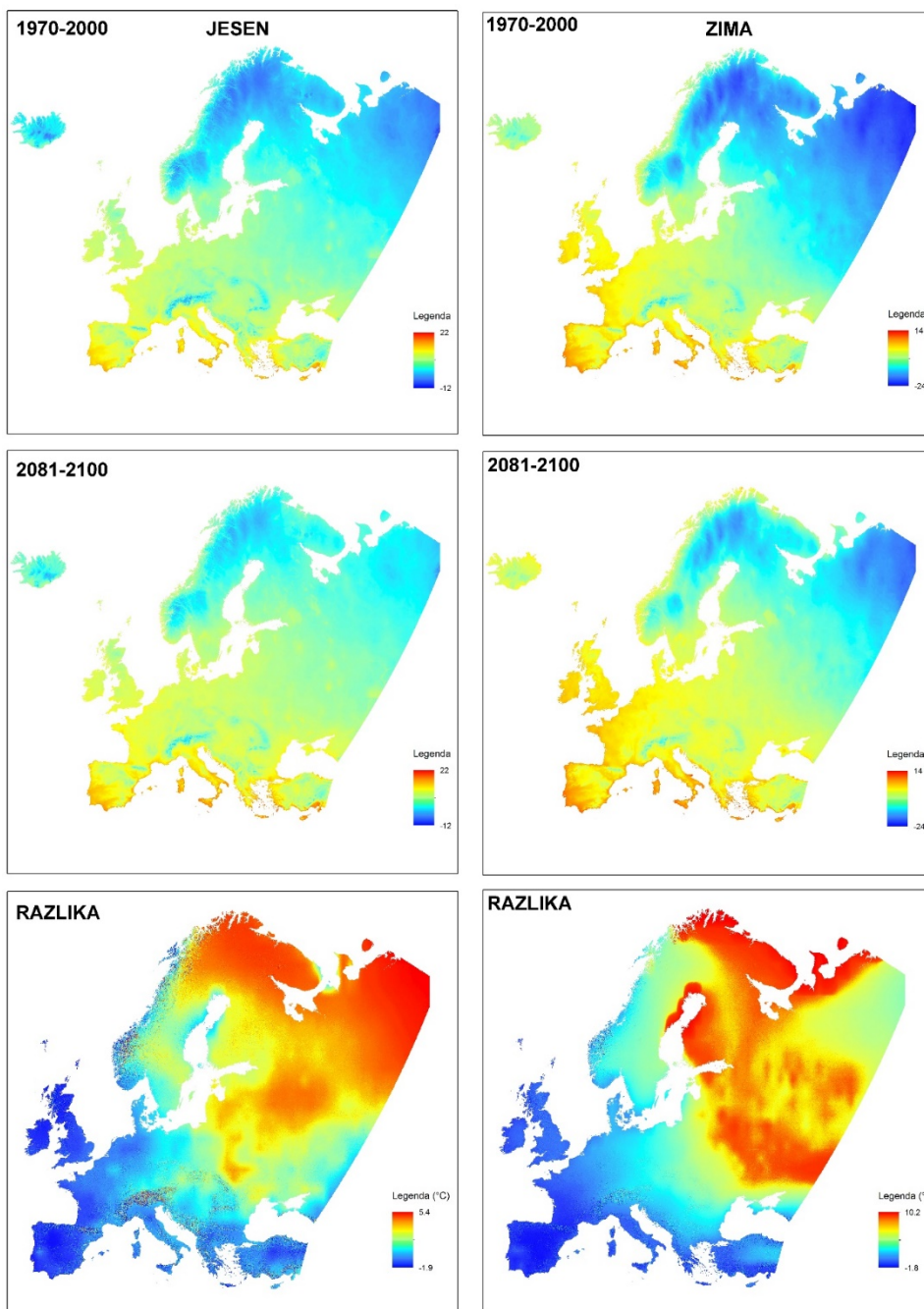
Strategija prilagajanja podnebnim spremembam je na lokalni ravni v veliki meri odvisna od političnih odločitev posameznih držav in splošnih vrednot ter nenazadnje političnih strank, ki vodijo posamezne države. Prav zato smo spremembe minimalnih temperatur v obdobju 1970-2000 in 2081-2100 prikazali še na nivoju evropskih držav. V našo analizo smo zajeli razpon sprememb minimalnih temperatur in spremembe povprečnih letnih minimalnih temperatur. Ugotovimo lahko, da bodo spremembe minimalnih temperatur v vseh državah v večini pozitivne. Od 45 obravnavanih držav bodo spremembe minimalnih temperatur v navedenem obdobju negativne le v desetih državah, pa še to le v posameznih redkih območjih. Spremembe

povprečnih letnih minimalnih temperatur bodo v vseh državah pozitivne in sicer med 1,3 °C (Irska) in 2,9 °C (Rusija). Med državami z dvigom povprečnih letnih minimalnih temperatur med 2 in 3 °C se nahajajo Rusija, Finska, Estonija, Ukrajina, Belorusija, Islandija, Latvija, Moldavija, Litva, Norveška, Švedska, Romunija in Slovaška, torej pretežno države vzhodne in severne Evrope (Slika 9). Najnižji dvig povprečnih letnih minimalnih temperatur (med 1,3 in 1,5 °C) bo zaznati v Andori, na Nizozemskem, Belgiji, Franciji, Španiji, Portugalski, Veliki Britaniji in Irski, torej pretežno v državah zahodne in jugozahodne Evrope. Velika variabilnost sprememb je pri posameznih državah seveda posledica velike površine posameznih držav ali dejstva, da se te države nahajajo v različnih podnebnih regijah. Najvišjo variabilnost sprememb povprečnih minimalnih temperatur kaže Norveška (8,8 °C), kjer se bodo minimalne temperature-z izjemo poletja-najbolj dvignile v njenem severnem delu, medtem ko bodo dvigi minimalnih temperatur v južnem delu bistveno nižji. V severnem delu Norveške se bodo povprečne letne minimalne temperature do konca 21. stoletja dvignile za do 7 °C. Variabilnost sprememb povprečnih letnih minimalnih temperatur bo višja od 4 °C še v Italiji, Turčiji, Franciji, Rusiji, Švici, Avstriji, Črni gori, Islandiji in Nemčiji. Pri tem naj ponovno poudarimo, da smo pri naših modelih upoštevali najbolj optimistični scenarij, ki predvideva splošni prehod družbe v trajnostni razvoj z radikalnim opuščanjem rabe fosilnih goriv in prehodom na obnovljive vire energije, vzporedno s tem pa spremenjen življenjski slog z nižanjem potrošnje materije in energije.



Slika 6: Povprečne minimalne temperature v Evropi v obdobjih 1970-2000, 2081-2100 in razlika v povprečnih minimalnih temperaturah med obema obdobjema za pomlad (levo) in poletje (desno).

Vir: Medmrežje2; lastni izračuni, 2021.



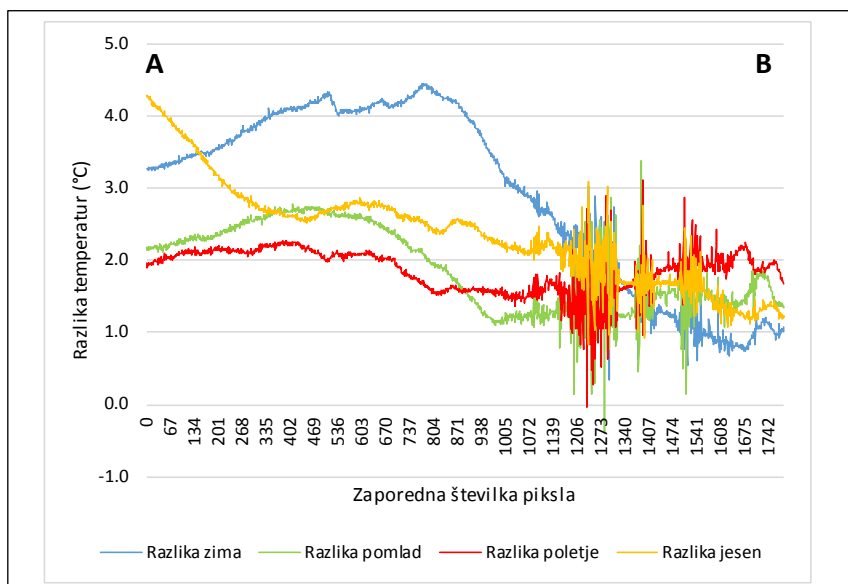
Slika 7: Povprečne minimalne temperature v Evropi v obdobjih 1970-2000, 2081-2100 in razlika v povprečnih minimalnih temperaturah med obema obdobjema za jesen (levo) in zimo (desno).

Vir: Medmrežje2; lastni izračuni, 2021.



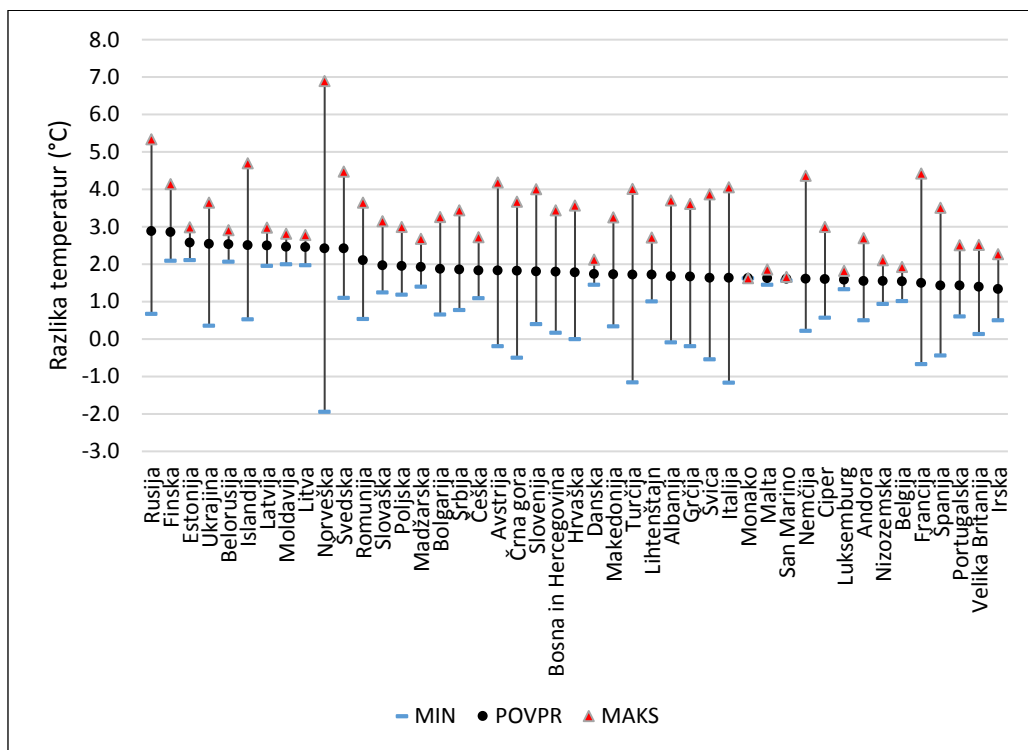
Slika 8: Profil minimalnih temperatur čez Evropo.

Vir: World digital elevation model (ETOPO5).



Slika 9: Profili razlik povprečnih minimalnih temperatur med obdobji 1970-2000 in 2081-2100 preko Evrope po letnih časih.

Vir: Lastni izračuni, 2021.



Slika 10: Razlike povprečnih letnih minimalnih temperatur med obdobji 1970-2000 in 2081-2100 po državah v Evropi.

Vir: Lastni izračuni, 2021.

6. Zaključek

V članku smo analizirali stanje minimalnih temperatur v sedanosti in spremembe minimalnih temperatur do konca 21. stoletja. Kljub dejstvu, da smo pri napovedih minimalnih temperatur upoštevali optimistične scenarije, rezultati kažejo visoke trende minimalnih temperatur. Spremembe pa kažejo veliko raznolikost v odvisnosti od lokacije in letnega časa.

Pomlad po trendih posebej ne izstopa, saj največji trendi, zabeleženi na območju Portugalske in severne Rusije, ne presegajo več kot 0,25 °C/desetletje. Razlika spomladanskih minimalnih temperatur med začetnim obdobjem (1970-2000) in končnim obdobjem (2081-2100) bo največja na območju severne Skandinavije, severne Islandije in v pasu, ki se vleče čez Rusijo od polotoka Kola proti Kaspijskem jezeru. Največji poletni trendi se pojavljajo na območju južne Evrope, kjer ti znašajo do 0,3 °C/desetletje, pri tem posebej izstopata južna Italija in Grčija zaradi vpliva Sredozemskega morja. Stopnja dviga poletnih minimalnih temperatur se bo višala v smeri povečane kontinentalnosti, torej proti Centralni Aziji. Minimalne temperature bodo v Skandinaviji sicer porasle, vendar bolj v njenem kontinentalnem delu, torej na Finskem. Tudi v Sredozemlju bo porast poletnih minimalnih temperatur najvišji v osrčju Iberskega polotoka, Apeninskega polotoka, Balkanskega polotoka in Turčije. Jesenske spremembe minimalnih temperatur so najbolj opazne v zmerno toplem

pasu, še posebej v baltskih državah ter severni Rusiji, kjer se pojavljajo visoki trendi do 0,45 °C/desetletje. Tem trendom sledijo tudi nekoliko nižji v Skandinaviji, izstopata pa tudi območje Poljske ter Alp s trendi med 0,25 in 0,35 °C/desetletje, v območjih pod vplivom morij pa ni bistvenih sprememb. V večini evropskih držav se bodo zimske temperature dvignile za 0-2 °C. V pasu vzhodno od vzhodne Poljske in vzhodne Romunije bo dvig zimskih minimalnih temperatur med 3 in 5 °C, na obalah Finskega zaliva, na severnem Laponskem in severovzhodni obali polotoka Kola pa bo porast med 5 in 10 °C.

Literatura

- Alcamo, J., Olesen, J.E., 2012: Life in Europe under climate change. Wiley. Oxford.
- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., Feyen, L., 2017: Global projections of river flood risk in a warmer world Earths Future 5 171–82.
- Archer, D., Rahmstorf, S., 2010: The Climate Crisis, An Introductory Guide to Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge.
- Asseng, S., et al., 2015: Rising temperatures reduce global wheat production Nat. Clim. Change 5 143–7.
- Brazdil, R., Budikova, M. in drugi, 1996: Trends of maximum and minimum daily temperatures in Central and Southeastern Europe. International journal of climatology 16 765-82.
- Brinkmann, W., 1979: Association between Temperature Trends. Annals of the Association of American Geographers 69 250-61.
- Burke, M., Hsiang, S. M., Miguel, E., 2015: Global non-linear effect of temperature on economic production Nature. 527 235–9.
- Climate Change 2021. The Physical Science Basis. IPCC. (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report_smaller.pdf) (1.12.2021)
- Colon-Gonzalez, F. J., Harris, I., Osborn, T. J., Steiner Sao Bernardo, C., Peres, C. A., Hunter, P. R., Warren, R., van Vuurene, D., Lake, I. R., 2018: Limiting global-mean temperature increase to 1.5–2°C could reduce the incidence and spatial spread of dengue fever in Latin America Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 115 6243.
- Demonkos, P., Piotrowicz, K., 1998: Winter temperature characteristics in Central Europe. International Journal of Climatology 18 1405-17.
- Diffenbaugh, N. S., 2017: Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events Proc. Natl Acad. Sci. USA 114 4881–6.
- Gaffney, O., Rockstroem, J., 2021: Breaking Boundaries. The Science of Our Planet. DK, London.
- Gou, J. J., Miao, C. Y., Duan, Q. Y., Tang, Q. H., Di, Z. H., Liao, W. H., Wu, J. W., Zhou, R., 2020: Sensitivity analysis-based automatic parameter calibration of the variable infiltration capacity (VIC) model for streamflow simulations over China Water Resour. Res. 56.
- Jevrejeva, S., Jackson, L. P., Riva, R. E. M., Grinsted, A., Moore, J. C., 2016: Coastal sea level rise with warming above 2 °C Proc. Natl Acad. Sci. USA 113 13342
- Kraaijenbrink, P. D. A., Bierkens, M. F. P., Lutz, A. F., Immerzeel, W. W., 2017: Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers Nature 549 257–60.

- Krauskopf, T., Huth, R., 2020: Temperature trends in Europe: comparison of different data sources. *Theoretical and Applied Climatology* 139 1305-1316.
- Levy, K., Woster, A. P., Goldstein, R. S. Carlton, E. J., 2016: Untangling the impacts of climate change on waterborne diseases: a systematic review of relationships between diarrheal diseases and temperature, rainfall, flooding, and drought *Environ. Sci. Technol.* 50 4905–22.
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., Wanner, H., 2004: European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends and Extremes Since 1500. *Science* 303 1499-1503.
- Mcglade, C., Ekins, P., 2015: The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C. *Nature* 517 187–90.
- Miao, C. Y., Ni, J. R., Borthwick, A. G. L., 2010: Recent changes of water discharge and sediment load in the Yellow River basin, China *Prog. Phys. Geogr.* 34 541–61.
- Miao, C. Y., Ni, J. R., Borthwick, A. G. L. Yang, L., 2011: A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River *Glob. Planet. Change* 76 196–205.
- Pokorna, L., Kučerova, M., Huth, R., 2018: Annual cycle of temperature trends in Europe, 1961-2000. *Global and Planetary Change* 170 146-162.
- Sun, Q., Miao, C., 2018: Extreme rainfall (R20mm, RX5day) in Yangtze–Huai, China, in June–July 2016: the role of ENSO and anthropogenic climate change *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 99 S102–6.
- Sun, Q., Miao, C., Aghakouchak, A., Mallakpour, I., Ji, D. Duan, Q., 2020: Possible increased frequency of ENSO-related dry and wet conditions over some major watersheds in a warming climate *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 101 E409–26.
- Šegota, T., 1988: *Klimatologija za geografe. Školska knjiga. Zagreb.*
- Vertačnik, G., Bertalanič, R., 2017: *Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961-2011. 3, Značilnosti podnebja v Sloveniji. ARSO. Ljubljana*
- Yao, T., 2012: Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings *Nat. Clim. Change* 2 663–7.
- Zheng, H. Y., Miao, C. Y., Wu, J. W., Lei, X. H., Liao, W. H., Li, H., 2019: Temporal and spatial variations in water discharge and sediment load on the Loess Plateau, China: a high-density study. *Sci. Total Environ.* 666 875–86.
- World digital elevation model (ETOPO5).
- Climate Change 2014, Working Group I Contribution to the 5th Assessment Report (IPCC).
- Climate Change 2021, Working Group I Contribution to the 6th Assessment Report (IPCC).
- Medmrežje 1: <https://www.ecad.eu/> (10.4.2021)
- Medmrežje 2: <https://www.worldclim.org/data/index.html> (18.4.2021)

CHANGES IN MINIMUM TEMPERATURES IN EUROPE

Summary

The article analyzed the state of minimum temperatures in the present and changes in minimum temperatures by the end of the 21st century. Despite the fact that we took optimistic scenarios into account when forecasting minimum temperatures, the results show high trends in minimum temperatures. The changes, however, show a great deal of diversity depending on location and time of year.

Spring does not stand out in particular after trends, as the largest trends recorded in Portugal and northern Russia do not exceed 0.25°C/decade. The difference in spring minimum temperatures between the initial period (1970-2000) and the final period (2081-2100) will be the largest in the area of northern Scandinavia, northern Iceland and in the belt across Russia from the Kola Peninsula towards the Caspian Sea. The biggest summer trends occur in the area of southern Europe, where they are up to 0.3°C/decade, with southern Italy and Greece particularly prominent because of the impact of the Mediterranean Sea. The rate of rise in summer minimum temperatures will rise towards increased continentality, i.e. towards Central Asia. The minimum temperatures will increase in Scandinavia, but more in its continual part, namely Finland. In the Mediterranean, too, the rise in summer minimum temperatures will be highest in the heart of the Iberian Peninsula, the Apenton Peninsula, the Balkan Peninsula and Turkey. Autumn changes in minimum temperatures are most noticeable in the moderately warm zone, especially in the Baltic states and northern Russia, where high trends are up to 0.45°C/decade. These trends are also followed slightly lower in Scandinavia, but the Polish and Alps regions with trends between 0.25 and 0.35°C/decade also stand out. In most European countries, winter temperatures will rise by 0-2°C. In the belt east of eastern Poland and eastern Romania, the rise of winter minimum temperatures will be between 3 and 5°C, and there will be an increase between 5 and 10°C on the shores of the Gulf of Finland, on the northern Lapland and the north-east coast of the Kola peninsula.