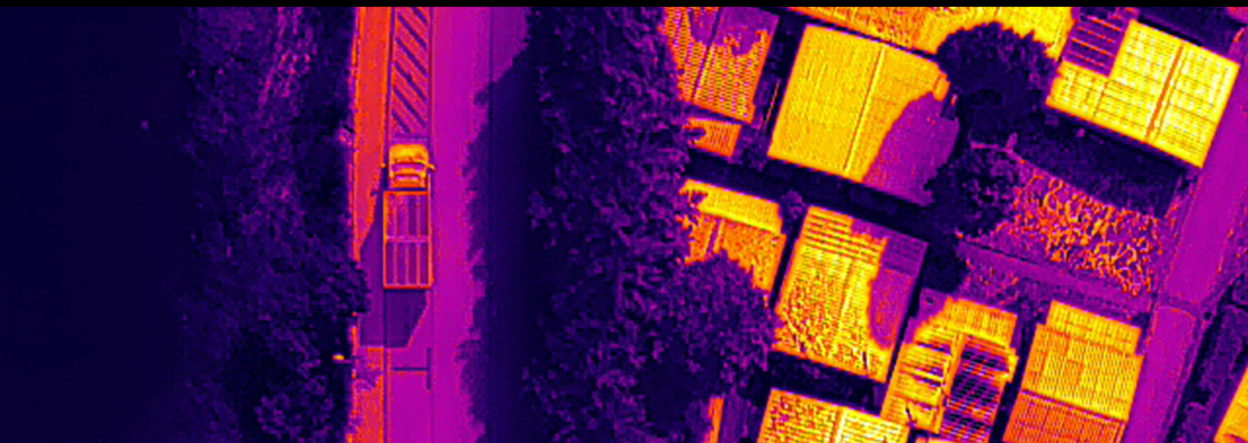
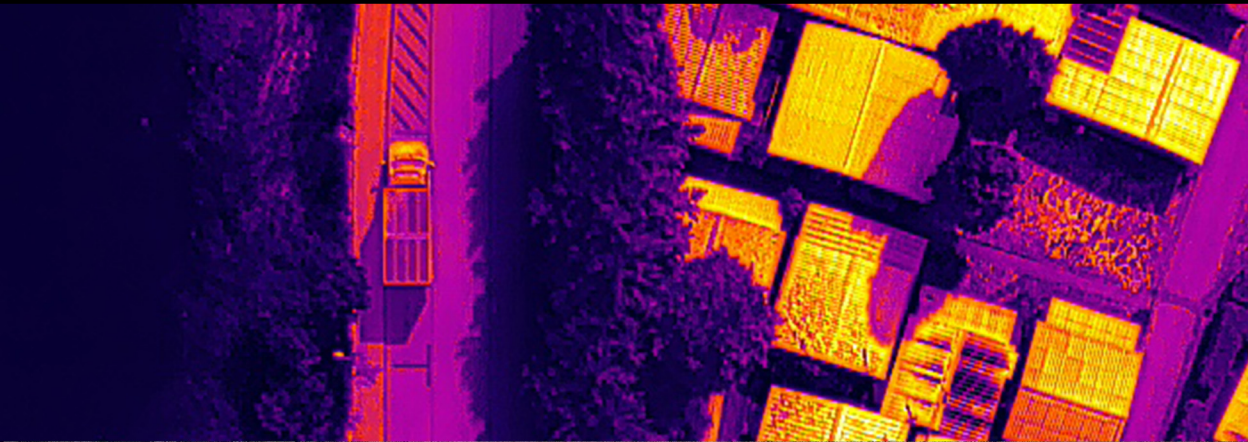


# Primeri prostorskih analiz vplivov podnebnih sprememb

Monografija v okviru projekta Preprečevanje toplotnega stresa v  
urbanih sistemih v luči podnebnih sprememb (ARRS J7-1822)



Univerzitetna založba  
Univerze v Mariboru





Univerza v Mariboru

---

Fakulteta za naravoslovje  
in matematiko

# **Primeri prostorskih analiz vplivov podnebnih sprememb**

Monografija v okviru projekta Preprečevanje toplotnega stresa v urbanih sistemih v  
luči podnebnih sprememb (ARRS J7-1822)

Uredniki

**Danijel Ivajnsič**

**Daša Donša**

**Veno Jaša Grujić**

**Nataša Pipenbaher**

Avgust 2022

<b>Naslov</b> <i>Title</i>	<b>Primeri prostorskih analiz vplivov podnebnih sprememb</b> <i>Case Studies of Climate Change Effects Spatial Analysis</i>
<b>Podnaslov</b> <i>Subtitle</i>	<b>Monografija v okviru projekta Preprečevanje toplotnega stresa v urbanih sistemih v luči podnebnih sprememb (ARRS J7-1822)</b> <i>A monograph Based on Findings from the Project Preventing Heat Stress in Urban Systems Under Climate Change (ARRS J7-1822)</i>
<b>Urediki</b> <i>Editors</i>	Danijel Ivajnsič (Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta)  Daša Donša (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)  Veno Jaša Grujić (Univerza v Mariboru, Pedagoška fakulteta)  Nataša Pipenbaher (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)
<b>Recenzija</b> <i>Review</i>	Darko Ogrin (Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta)  Andreja Borec (Univerza v Mariboru, Fakulteta za kmetijstvo in biosistemske vede)
<b>Jezikovni pregled</b> <i>Language editing</i>	Mojca Garantini
<b>Tehnični urednik</b> <i>Technical editor</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
<b>Oblikovanje ovitka</b> <i>Cover designer</i>	Daša Donša (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)  Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
<b>Grafika na ovitku</b> <i>Cover graphics</i>	Daša Donša, 2022
<b>Grafične priloge</b> <i>Graphics material</i>	Avtorice in avtorji prispevkov, Ivajnsič, Donša, Grujić, Pipenbaher, 2022
<b>Založnik</b> <i>Published by</i>	<b>Univerza v Mariboru</b> <b>Univerzitetna založba</b> Slomškov trg 15, 2000 Maribor, Slovenija <a href="https://press.um.si">https://press.um.si</a> , <a href="mailto:zalozba@um.si">zalozba@um.si</a>
<b>Izdajatelj</b> <i>Issued by</i>	<b>Univerza v Mariboru</b> <b>Fakulteta za naravoslovje in matematiko</b> Koroška cesta 160, 2000 Maribor, Slovenija <a href="https://www.fnm.um.si">https://www.fnm.um.si</a> , <a href="mailto:fnm@um.si">fnm@um.si</a>

<b>Izdaja</b> <i>Edition</i>	Prva izdaja
<b>Vrsta publikacija</b> <i>Publication type</i>	E-knjiga
<b>Dostopno na</b> <i>Available at</i>	<a href="https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/681">https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/681</a>
<b>Izdano</b> <i>Published</i>	Maribor, Slovenija, avgust 2022



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba  
*University of Maribor, University Press*

**Besedilo** / *Text* © avtorji in Ivajnsič, Donša, Grujić, Pipenbaher, 2022

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva 4.0 Mednarodna. / *This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.*

Uporabnikom je dovoljeno tako nekomercialno kot tudi komercialno reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, javna priobčitev in predelava avtorskega dela, pod pogojem, da navedejo avtorja izvirnega dela. / *This license allows reusers to distribute, remix, adapt, and build upon the material in any medium or format, so long as attribution is given to the creator. The license allows for commercial use.*

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic. / *Any third-party material in this book is published under the book's Creative Commons licence unless indicated otherwise in the credit line to the material. If you would like to reuse any third-party material not covered by the book's Creative Commons licence, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.*

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Sofinancirano s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.**

**Projekt:** Preprečevanje toplotnega stresa v urbanih sistemi v luči podnebnih sprememb

**Šifra projekta:** J7-1822



**ARRS**

JAVNA AGENCIJA ZA RAZISKOVALNO DEJAVNOST  
REPUBLIKE SLOVENIJE

## Projektni partnerji



Univerza v Mariboru

Fakulteta za naravoslovje  
in matematiko



Univerza v Mariboru

Filozofska fakulteta

Univerza v Ljubljani  
*Biotekniška* fakulteta



CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Univerzitetna knjižnica Maribor

551.583(0.034.2)

PRIMERI prostorskih analiz vplivov podnebnih sprememb [Elektronski vir] : monografija v okviru projekta Preprečevanje toplotnega stresa v urbanih sistemih v luči podnebnih sprememb (ARRS J7-1822) / uredniki Danijel Ivajnsič ... [et al.]. - E-knjiga. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2022

Način dostopa (URL): <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/681>

ISBN 978-961-286-645-7

doi: 10.18690/um.fnm.8.2022

COBISS.SI-ID 119229187

**ISBN** 978-961-286-645-7 (pdf)

**DOI** <https://doi.org/10.18690/um.fnm.8.2022>

**Cena**  
*Price* Brezplačni izvod

**Odgovorna oseba založnika**  
*For publisher* prof. dr. Zdravko Kačič,  
rektor Univerze v Mariboru

**Citiranje**  
*Attribution* Ivajnsič, D., Donša, D., Jaša Grujić, V., Pipenbaher, N. (ur.). (2022). *Primeri prostorskih analiz vplivov podnebnih sprememb: Monografija v okviru projekta Preprečevanje toplotnega stresa v urbanih sistemih v luči podnebnih sprememb (ARRS J7-1822)*. Maribor: Univerzitetna založba. doi: 10.18690/um.fnm.8.2022

Študijo je omogočila Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v sklopu projekta »Preprečevanje toplotnega stresa v urbanih sistemih v luči podnebnih sprememb« (J7-1822).

## Kazalo

<b>Predgovor</b> Danijel Ivajnsič	1
<b>URBANA OKOLJA</b>	5
<b>Sezonski režim površinskega mestnega toplotnega otoka v Mariboru</b> <i>Maribor's Seasonal Surface Urban Heat Island Regime</i> Igor Žiberna, Danijel Ivajnsič	7
<b>Vpliv urbanih zelenih površin na pojav mestnega toplotnega otoka</b> <i>The Cooling Effect of Urban Green Spaces from the Urban Heat Island Perspective</i> Nataša Pipenbaher, Danijel Ivajnsič, Daša Donša, Veno Jaša Grujić, Sonja Škornik	29
<b>Spremenljivost dolžine rastne sezone in termalnega časa v Mariboru v obdobju 1971-2020</b> <i>Growing Season Length and Thermal Time Variability in Maribor between 1971-2020</i> Zalika Črepinšek, Tjaša Pogačar, Bela Kobulniczky, Lučka Kajfež-Bogataj, Nataša Pipenbaher, Igor Žiberna, Danijel Ivajnsič	49
<b>KOPENSKA OKOLJA</b>	73
<b>Modeliranje podnebne ustreznosti za gojenje oljk (<i>Olea europaea</i>) na vzhodnem Jadranu (Slovenija, Hrvaška)</b> <i>Climate Suitability Modelling for Olive Grove Cultivation (<i>Olea europaea</i>) in the Eastern Adriatic (Slovenia, Croatia)</i> Iztok Lorenčič, Mitja Kaligarič, Daša Donša, Veno Jaša Grujić, Danijel Ivajnsič	75
<b>Interakcija naravnih in družbenih razmer kot pospeševalec zaraščanja Krasa</b> <i>Interaction between Natural and Social Accelerators of Karst Secondary Succession</i> Danijel Davidovič, Danijel Ivajnsič, Jure Čuš	101

<b>OBMORSKA IN MORSKA OKOLJA</b>	<b>121</b>
<b>Vpliv podnebnih sprememb na gnezdenje obrežnih ptic</b> <i>Climate Change Impact on Seashore-breeding Birds</i>	<b>123</b>
Danijel Ivajnsič, Iztok Škornik, Mitja Kaligarič, Lovrenc Lipej	
<b>Krčenje morskih travnikov v slovenskem morju zaradi vpliva podnebnih sprememb in drugih posrednih dejavnikov</b> <i>Shrinkage of Seagrass Meadow Coverage in the Slovenian Sea as an Effect of Climate Change and Other Indirect Factors</i>	<b>161</b>
Lovrenc Lipej, Borut Mavrič, Domen Trkov, Martina Orlando-Bonaca, Danijel Ivajnsič	



# Predgovor

DANIJEL IVAJNSIČ

V obdobju digitalne preobrazbe družbe na pomenu pridobivajo tudi informacijske tehnologije. Sem sodijo geografski informacijski sistemi, ki povezujejo lokacijske podatke z vsemi vrstami opisnih informacij, in s tem zagotavljajo osnovo za kartiranje in prostorsko analizo. Slednja se dandanes uporablja tako v znanosti kot v industriji. S pomočjo tovrstne analize lažje razumemo pretekle in sedanje prostorske vzorce, ki so posledica interakcije naravnih in družbenih razmer. Na podlagi zaznanih trendov lahko nato celo ocenjujemo, kakšen bo nadaljnji prostorski razvoj. Prav zmožnost objektivnega napovedovanja je ena izmed ključnih lastnosti, ki dodatno poveča uporabnost prostorskih analiz z vidika vrednotenja posledic podnebne ali bolje okoljske krize. Prav to dejstvo je povod za nastanek monografije z naslovom Primeri prostorskih analiz vplivov podnebnih sprememb.

Monografija je razdeljena na tri poglavja. Prvo obravnava urbana okolja in se dotakne problematike vse pogostejšega toplotnega stresa kot posledice pojava mestnega toplotnega otoka (MTO) in toplejše atmosfere zaradi (antropogeno pospešenih) podnebnih sprememb. Najprej s pomočjo več-spektralnih satelitskih podob proučujemo sezonski prostorski vzorec in variabilnost jakosti pojava MTO v povezavi z rabo tal. V nadaljevanju se osredotočamo na tiste površine v urbani strukturi, ki razčlenjujejo praviloma homogeno temperaturno polje nad pozidanimi

površinami. Gre za urbane zelene površine, ki jih obravnavamo bodisi kot blažilce toplotnega stresa bodisi kot kazalec moči vzajemnega delovanja pojava MTO in podnebnih sprememb, ki se kaže s spremembo fenološkega razvoja rastlin v urbanih okoljih. Predstavljeni rezultati prvega poglavja monografije lahko na splošno prispevajo k učinkovitejšemu urbanemu načrtovanju in posledičnemu zagotavljanju večje kakovosti bivalnega okolja v skladu s smernicami trajnostnega razvoja v urbanih sistemih zmernih klimatov.

Drugo poglavje monografije obravnava vplive podnebnih sprememb na izbrane habitate kulturne krajine, bodisi v intenzivni ali ekstenzivni kmetijski rabi. V prvem prispevku ocenjujemo trenutno in prihodnjo podnebno ustreznost za gojenje oljk na vzhodnem Jadranu. Pridelava oljk je ranljiv kmetijski sistem, primeren za študije vpliva podnebnih sprememb zaradi dolge življenjske dobe oljčnega drevesa, njegove občutljivosti na sušo in visoke temperature tal ali zraka ter vse večje vloge oljčnih nasadov v gospodarstvu sredozemskih območij. Drugi primer odpira problematiko zaraščanja sekundarnih, vrstno bogatih in z omrežjem Natura 2000 zaščitениh travišč na matičnem Krasu. Interakcija naravnih (predvsem povišane povprečne temperature zraka) in družbenih razmer (neugodna starostna sestava nosilcev kmetijskih gospodarstev, razdrobljenost kmetijskih zemljišč in opuščanje živinoreje) praktično deluje kot pospeševalec zaraščanja vseh odprtih površin na Krasu, kar lahko do konca stoletja ob neukrepanju povzroči izgubo do treh četrtin trenutnih površin. Predstavljeni metodološki pristopi v drugem poglavju monografije omogočajo spremljanje in načrtovanje kmetijskih in naravovarstvenih dejavnosti (ob upoštevanju trendov podnebnih sprememb) bodisi na lokalni ali regionalni ravni.

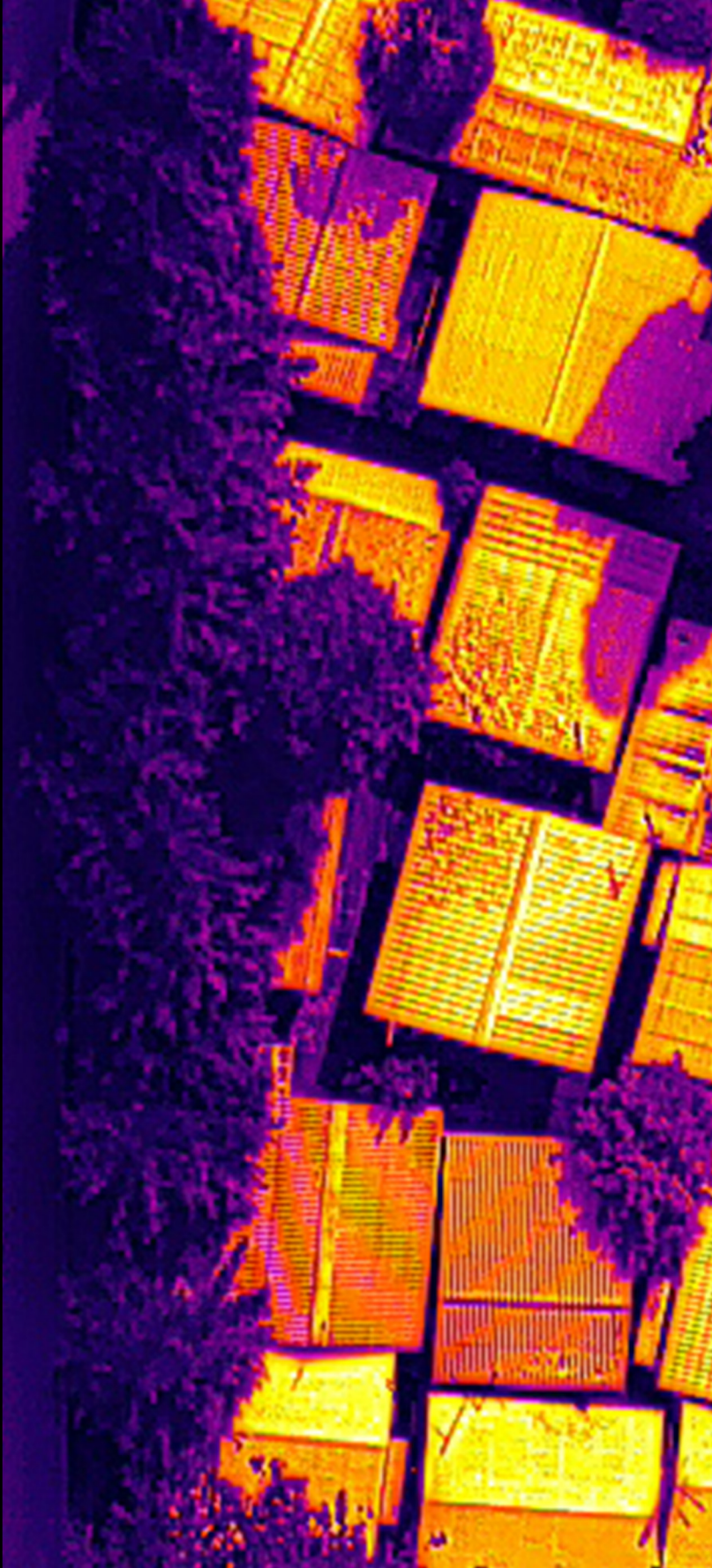
V tretjem poglavju se vsebinsko premaknemo iz kopenskih na obmorska in morska okolja. Prispevek z naslovom Vpliv podnebnih sprememb na gnezdenje obrežnih ptic obravnava eno izmed očitnejših posledic podnebnih sprememb, tj. dvig morske gladine. Temu procesu so v prvi vrsti izpostavljena obmorska mokrišča, ki so prehodna cona med kopnim in morjem. Dejansko so obalna mokrišča v zmernem podnebnem pasu pod dvosmernim pritiskom. Z morske strani se dviga gladina morja, s kopenske smeri pa se širijo antropogene dejavnosti. Stabilnost teh ekosistemov lahko ocenimo s spremljanjem dinamike vezanih vrst, ki imajo visok položaj v prehranjevalnem spletu, saj je njihov odziv na spremembe v okolju hiter. Naslednji primer prostorske analize obravnava problematiko krčenja morskih travnikov v slovenskem morju. Regresija morskih trav je sicer zaznavna v globalnem merilu. Glavne vzroke za to pa pripisujemo dejavnikom, kot so: plovne poti in

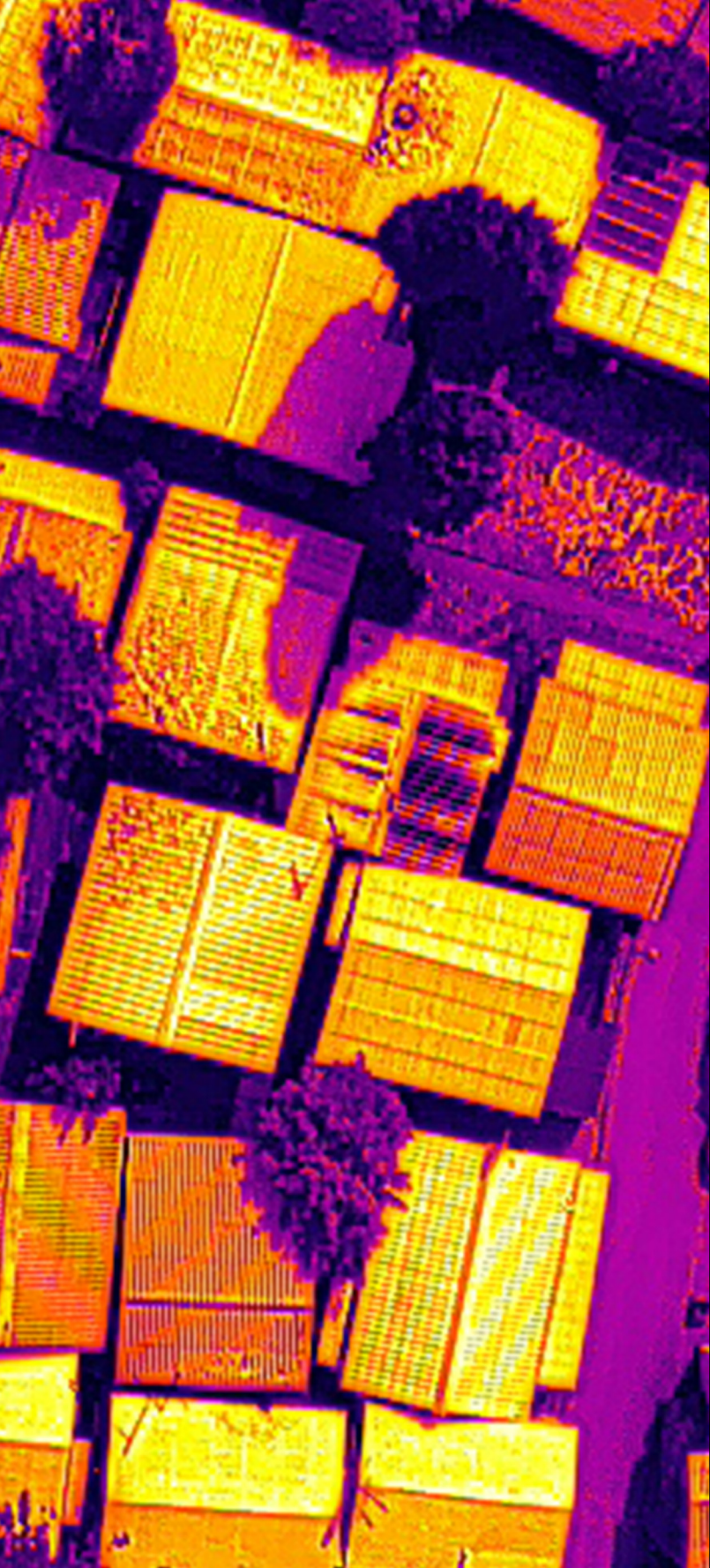
pristaniške dejavnosti, poglobljanje morskega dna, komercialne in rekreacijske dejavnosti, kot sta ribolov in privezovanje, odtekanje vode z urbanih in kmetijskih območij in v zadnjem času tudi vse intenzivnejše podnebne spremembe in kisanje oceanov. Rezultati obeh predstavljenih študij imajo visoko uporabno vrednost za upravjalce obeh obravnavanih zavarovanih območij (Krajinski park Sečoveljske soline in Krajinski park Strunjan), metodologija pa je prenosljiva na druga sorodna območja.

Pričujoča publikacija dokazuje, da proizvodi prostorskih analiz nedvomno lahko pripomorejo k urejanju prostora, ki je v skladu s smernicami in cilji tako digitalne strategije EU kot evropskega zelenega dogovora. Sicer pa je poglobljanje podnebno-okoljske krize razlog več za spodbujanje tovrstnih študij, ki objektivno ocenjujejo in hkrati opozarjajo na sledeče posledice bodisi na lokalnem, regionalnem ali globalnem nivoju ob morebitni (ne)uresničitvi zadanih ciljev doseganja podnebne nevtralnosti.



# URBANA OKOLJA





# SEZONSKI REŽIM POVRŠINSKEGA MESTNEGA TOPLOTNEGA OTOKA V MARIBORU

IGOR ŽIBERNA,<sup>1</sup> DANIJEL IVAJNSIČ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Maribor, Slovenija  
igor.zibera@um.si, dani.ivajnsic@um.si

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija  
dani.ivajnsic@um.si

**Sinopsis** Površinski mestni toplotni otok ni odvisen le od globalnega sončnega obsevanja ampak tudi od fizikalnih lastnosti podlage in človekove dejavnosti v mestu. Zaradi gradnje je delež pozidanih površin v mestu višji in delež zelenih površin manjši. Več umetnih gradbenih materialov (asfalt, beton, opeka) nekoliko povečuje specifično toploto, zaradi česar je modificirana energijska bilanca v mestih. V članku smo na osnovi posnetkov v obeh termičnih kanalih satelita Landsat 8 analizirali sezonske spremembe površinskega mestnega toplotnega otoka v Mariboru. Analizirali smo spreminjanje oblike in intenzivnosti površinskega mestnega toplotnega otoka pozimi, spomladi, poleti in jeseni ter ugotavljali povezavo z rabo tal v Mariboru.

## Ključne besede

mestni toplotni  
otok,  
mestna klima,  
raba tal,  
Maribor,  
Landsat

# MARIBOR'S SEASONAL SURFACE URBAN HEAT ISLAND REGIME

IGOR ŽIBERNA,<sup>1</sup> DANIJEL IVAJNSIČ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> University of Maribor, Faculty of Arts, Maribor, Slovenia  
igor.ziberna@um.si, dani.ivajnsic@um.si

<sup>2</sup> University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia  
dani.ivajnsic@um.si

**Abstract** Surface urban heat islands depend not only on global solar radiation but also on the physical properties of the surface and human activity in the city. As a result of construction, the share of built-up areas in Maribor has increased, while the share of green areas has decreased. Several artificial building materials (asphalt, concrete, brick) slightly increase specific heat, resulting in a modified energy balance in cities. In this study, we used remote sensing imagery in both thermal channels of the Landsat 8 satellite to analyse seasonal changes in Maribor's surface urban heat island. We analysed changes to the shape and intensity of the surface urban heat island in winter, spring, summer, and autumn and studied the connection to land use categories in Maribor.

**Keywords:**

urban heat island,  
urban climate,  
land use,  
Maribor,  
Landsat



## 1 Uvod

Z nastankom mest in koncentracijo prebivalstva se je naravno površje spremenilo. Zaradi gradnje se je povečal delež umetnih materialov, kot so opeka, naravni kamen, kasneje tudi beton in asfalt. Spremenjene lastnosti površja v naseljih so povzročile spremembo energijske bilance. Beton ima v primerjavi z vlažnimi tlemi tudi do šestkrat večjo toplotno prevodnost (konduktivnost) in skoraj dvakrat večjo toplotno kapaciteto [1], zato se podnevi počasi segreva in ponoči počasi ohlaja. Prav ta lastnost zelo vpliva na dnevni režim razlik v temperaturi zraka med mestom in okolico. Pri določanju termičnih lastnosti materialov v urbanem okolju pogosto uporabljamo tudi termično difuzivnost. Umetni materiali, ki jih pogosteje najdemo v urbanih okoljih, imajo na splošno višjo termično difuzivnost. Mesto s svojimi pozidanimi površinami deluje kot termoakumulacijska peč, ki čez dan absorbira kratkovalovno sevanje Sonca, in nato v nočnem in jutranjem času sama oddaja dolgovalovno sevanje v ohlajeno okolico. Temperaturne razlike med mestom in okolico so zato najvišje v času nastopa minimalnih temperatur. Fezer (1995) [2] govori tudi o letnem režimu intenzivnosti nastajanja mestnega toplotnega otoka. Medtem ko mesta v subpolarnih območjih beležijo najintenzivnejši razvoj mestnega toplotnega otoka v zimskih mesecih, je v submediteranskih mestih ta najbolj razvit v poletnih mesecih. Kontinentalni del Evrope, še zlasti Panonska nižina z obrobjem kaže, da je mestni toplotni otok običajno najbolj razvit pozimi. Na intenzivnost mestnega toplotnega otoka vpliva tudi morfologija zgradb.

Manj z vegetacijo poraslih površin pomeni tudi manjšo evapotranspiracijo, s tem pa tudi manj porabljene latentne energije, kar dviga temperaturo zraka podnevi in blaži pretirano ohlajanje ponoči. Končni rezultat omenjenega dogajanja je večji prebitek v energijski bilanci mesta v primerjavi s tisto v okolici. Ena najbolj vidnih posledic tega je nastanek "mestnega toplotnega otoka". Energijsko bilanco spreminja tudi človek, ki s svojo aktivnostjo v mestu (ogrevanje, industrija, promet) vnaša energijo v ozračje. V ozračje vnaša tudi materijo, predvsem v obliki onesnaževal in vodne pare. Tudi prašni delci modificirajo energijsko bilanco, saj manjšajo delež direktnega in večajo delež difuznega sončnega obsevanja. Regionalna klima z vremenskimi tipi, relief in antropogeni dejavniki so torej vzrok za lokalne spremembe v: energijski bilanci, vodni bilanci, sestavi zraka, kroženju zraka in končno vrednostih klimatskih elementov, kar vodi v oblikovanje specifičnih klimatskih razmer v mestu, t.j. do "mestne klime".

Zaradi večanja števila mest in koncentracije prebivalstva v urbanih območjih slednja predstavljajo prevladujoče okolje za večino svetovnega prebivalstva. V pogojih globalnega segrevanja planeta so lokalni učinki mestne klime še bolj potencirani. Leta 2000 je v urbanih območjih živelo okoli 47 odstotkov svetovnega prebivalstva. Ta delež se je do leta 2018 povečal na 55 odstotkov. Do leta 2030 naj bi se globalni delež mestnega prebivalstva še povečal na 60 odstotkov. Do takrat naj bi 44 odstotkov svetovnega prebivalstva živelo v mestih z najmanj pol milijona prebivalcev [3].

V prihodnosti lahko zlasti v poletnih mesecih ob anticiklonalnih vremenskih okoliščinah pričakujemo vedno pogostejša obdobja z velikimi toplotnimi obremenitvami. Zato bo prilagajanje nanje nujno tudi v manjših naseljih z zgoščeno pozidavo. Evropska okoljska agencija predlaga tri vrste ukrepov prilagajanju vedno pogostejšim toplotnim obremenitvam v naseljih: sive (kakovostna izolacija stavb, uporaba zunanjih žaluzij ali polken na oknih, pasivno hlajenje stavb, urbanistično zasnovano, ki omogoča prevetrenost); zelene (ohranjanje in širjenje zelenih površin v mestih, uvajanje zelenih zidov in zelenih streh) in mehke (ozaveščanje prebivalstva, kartiranje toplotnih otokov in monitoring) [4]. Pomen preučevanja toplotnih otokov tudi v manjših naseljih je zato ključnega pomena za ozaveščanje ljudi, opozarjanje na morebitne prihajajoče toplotne obremenitve in ohranjanje kakovostnega bivalnega okolja. Po podatkih Evropske okoljske agencije je v obdobju 1991–2015 v Evropi zaradi vročinskih valov v povprečju umrlo 192 prebivalcev na milijon prebivalcev. Če odštejemo območje vzhodne Evrope, kjer največ ljudi umre zaradi zelo nizkih temperatur, so vročinski valovi daleč najpogostejši vzrok za pojav smrti med vsemi naravnimi nesrečami in za velikostni razred ali dva presegajo smrtnost zaradi ostalih naravnih nesreč. Ob vročinskem valu leta 2003 je v Evropi zaradi neposrednih posledic stresa ob visokih temperaturah umrlo 70.000 ljudi [5]. Vročinski val, ki je poleti leta 2010 zajel Rusijo, je tam zaradi visokih temperatur terjal 20.000 življenj [6], [7]. Visoke temperature povzročajo tudi psihološki stres in povečujejo medosebne konflikte in druge oblike patološkega ravnanja ljudi [8]. Študije so pokazale, da v ZDA vsako povečanje temperature zraka za 1 °C nad 15 °C znižuje produktivnost za 1,7 % [9].

Empirično je potrjeno dejstvo, da vsako gručasto naselje z več kot 1.000 prebivalci že oblikuje prepoznaven toplotni otok [10]. Leta 2018 je v Sloveniji v 220 naseljih z več kot 1.000 prebivalci živelo kar 55,9 % prebivalstva. Večina prebivalcev Slovenije je torej tako ali drugače pod vplivom višjih temperatur zaradi segrevanja v naseljih.

Dodatno k toplotnemu obremenjevanju prispevajo pozitivni trendi zaradi globalnega segrevanja. Na območju Slovenije so trendi dviga povprečne temperature zraka v 20. stoletju višji od evropskega povprečja in so znašali 0,34 °C na desetletje, medtem ko so se na območju severovzhodne Slovenije v obdobju 1961–2016 temperature zraka dvigale z dinamiko od 0,33 °C do 0,44 °C na desetletje, v poletnih mesecih celo z dinamiko od 0,44 °C do 0,59 °C na desetletje [11]. Prav poletni meseci z vse pogostejšimi vročinskimi valovi, ki nastopajo pretežno ob anticiklonalnih vremenskih tipih, postajajo tudi v manjših naseljih vzrok za veliko toplotno obremenitev, in tako vplivajo na zdravje in produktivnost prebivalstva. Bolj ogroženi so starejši in otroci, bolniki s srčno-žilnimi obolenji in obolenji dihal, diabetiki, bolniki z obolenjem ledvic, bolniki z duševnimi motnjami in nepokretni. Na njihovo ogroženost lahko dodatno vplivajo nizek socialno-ekonomski status, socialna izoliranost, slabša dostopnost do zdravstvenih storitev in nasploh slabši bivalni pogoji [6].

Dnevni letni režim intenzivnosti mestnega toplotnega otoka (UHI) in površinskega mestnega toplotnega otoka (SUHI) sta bila do sedaj že večkrat predmet raziskav. Bechtel idr. (2019) [12] ugotavljajo, da je v nekaterih priobalnih mestih v ZDA (San Francisco, Los Angeles, San Diego) intenzivnost SUHI največja v spomladanskih mesecih, najmanjša pa pozno poleti, medtem ko je v mestih kot Fresno in Sacramento največja v septembru in oktobru. Zaradi namakanja mest v semiaridnih območjih (npr. Phoenix) le-ta poleti in jeseni beležijo celo pojav nižjih temperatur v primerjavi z okolico (*ang. Urban Cold Island*). Zhou idr. (2016) [13] so za London ugotovili, da intenzivnost UHI doseže maksimum okoli poletnega solsticija, medtem ko so najvišje temperature v mestu dosežene praviloma konec julija in v začetku avgusta. Pongracz idr. (2010) [14] so za evropska mesta (München, Milano, Varšava, Budimpešta) ugotovili, da se največja intenzivnost UHI podnevi pojavlja v poletnih mesecih (junija in julija), najmanjša pa jeseni oziroma v zimskem času (od novembra do februarja). Ponoči je intenzivnost UHI enakomerna od marca do oktobra, medtem ko v hladni polovici leta praviloma oslabi. Unger idr. (2001) [15] poroča, da je v madžarskem Szegedu UHI najintenzivnejši aprila in maja ter avgusta in septembra, medtem ko v zimskih mesecih oslabi. Tudi Nakamura idr. (2018) [16] ugotavlja, da je v japonskem mestu Kumagaya podnevi intenzivnost UHI najvišja v poletnih mesecih, medtem ko je ponoči UHI najbolj razvit spomladi, pri čemer je ponoči intenzivnost UHI vse mesece višja kot podnevi.

## 2 Materiali in metode

Da bi pokazali lokalne razlike v intenzivnosti mestnega toplotnega otoka v času vročinskega vala, smo uporabili tudi metodo daljinskega zaznavanja, in sicer podobe satelita Landsat 8 v 10. in 11. kanalu, ki prikazujejo temperaturo površja (*ang. Land Surface Temperature – LST*) s prostorsko ločljivostjo 30 m x 30 m [17] na območju Maribora. Temperature v obeh kanalih smo povprečili in upoštevali tudi atmosfersko korekcijo. Za potrebe naše analize smo uporabili 22 satelitskih podob za dneve, v katerih je bilo nad Mariborom popolnoma jasno vreme. Uporabljene podoboe zajemajo časovno okno od 12. aprila 2013 do 8. avgusta 2020. Ker se v omenjenem obdobju raba tal, predvsem v kontekstu spremembe pozidanih površin, ni zelo spremenila, menimo, da je časovno obdobje ustrezno. Podobe so enakomerno razporejene po podnebnih letnih časih (po pet podob pozimi spomladi in poleti ter sedem podob jeseni). Na osnovi podatkov SUHI smo izračunali povprečne sezonske temperature površja, pri čemer smo upoštevali podnebne letne čase. V čas zime so uvrščeni december, januar in februar, v čas pomladi marec april in maj, v čas poletja junij, julij in avgust, ter v čas jeseni september, oktober in november.

Podatke o temperaturah površja smo primerjali z rabo tal, predvsem s stopnjo pozidanosti. V ta namen smo uporabili podatke Urbanega atlasa [18], ki zajema naslednje kategorije:

### Preglednica 1: Kategorije Urbanega atlasa na območju Maribora

1110	Sklenjene gosto pozidane površine (S.L. > 80 %)
1121	Nesklenjene pozidane površine z veliko gostoto (S.L. : 50 % - 80 %)
1122	Nesklenjene pozidane površine z zmerno gostoto (S.L. : 30 % - 50 %)
1123	Nesklenjene pozidane površine z nizko gostoto (S.L. : 10 % - 30 %)
1124	Nesklenjene pozidane površine z zelo nizko gostoto (S.L. < 10 %)
1130	Posamične stavbe
1210	Industrijske, komercialne, javne in vojaške površine
1221	Hitre tranzitne ceste in sorodna zemljišča
1222	Druge ceste in sorodna zemljišča
1223	Železnice in sorodna zemljišča
1310	Gramoznice
1340	Nefunkcionalna zemljišča
1410	Zelena urbana območja
1420	Območja za šport in rekreacijo
2100	Obdelovalne površine
2200	Trajni nasadi (vinogradi, sadovnjaki)
2300	Pašniki

3100	Gozdne površine
5000	Vodne površine

Vir: Urban Atlas [18].

V nadaljevanju smo izračunali povprečne sezonske temperature površja po posameznih kategorijah Urbanega atlasa. Intenzivnost SUHI smo na koncu izračunali tako, da smo kot referenčno temperaturo površja v vsaki sezoni privzeli tisto na pašnikih, nato pa le-te odšteli od povprečnih temperatur v ostalih kategorijah rabe tal v dani sezoni. Rezultate smo prikazali tudi prostorsko.

## 2.1 Glavne geografske značilnosti obravnavanega območja

Mesto Maribor se nahaja na stiku predalpske in obpanonske severovzhodne Slovenije in na izteku Dravske doline. Mesto s 95.767 prebivalci [19] je svoj razcvet doživelo v sredini 19. stoletja, ko so v mestu nastali prvi industrijski obrati v povezavi z izgradnjo železniške proge med Dunajem in Trstom. Kmalu so se poleg kovinske industrije začele razvijati tudi druge industrijske panoge, ki pa so po razpadu Jugoslavije leta 1991 doživele zaton. Danes skuša mesto ustvariti svojo identiteto na storitvenih dejavnostih in kot univerzitetno središče severovzhodne Slovenije. Mesto je doživelo pospešen prebivalstveni in prostorski razvoj od 60. let 19. stoletja naprej, predvsem zaradi intenzivnega priseljevanja iz podeželja. Pozidani del se je širil predvsem proti jugu, zahodu in vzhodu, in sicer na nekdanje obdelovalne površine. V mestu je danes še vedno ohranjenih nekaj parkovnih površin (Mestni park, Trg Borisa Kidriča, Slomškov trg, Magdalenski park), med večjimi gozdnimi površinami pa velja omeniti predvsem gozd Stražun, ki se kot zelen rt širi v pozidani del mesta med Pobrežjem in Teznom. Druga, precej manjša gozdna površina se nahaja na južnem robu pozidanega dela, na Taboru (Betnavski gozd). Pomemben lokalno klimatski modifikator je tudi reka Drava, ki z do 160 m širokim koritom deli mesto na dvoje [20].



Slika 1: Obravnavano območje mesta Maribor [21]

### 3 Rezultati z diskusijo

#### 3.1 SUHI in raba tal v Mariboru po letnih časih

Povprečne temperature površja so na obravnavanem območju najvišje poleti (26,3 °C), sledijo jesen (20,4 °C), pomlad (19,1 °C) in zima (3,3 °C). Vendar se znotraj letnih časov pojavljajo razlike v temperaturah po kategorijah rabe tal. Najvišje povprečne temperature površja se pojavljajo v poletnih mesecih, in sicer na sklenjenih gosto pozidanih površinah s stopnjo nepropustnosti površja nad 80 % (29,1 °C), sledijo industrijske, komercialne, javne in vojaške površine (28,8 °C), železnice in pripadajoča zemljišča (28,4 °C) in nesklenjene pozidane površine z veliko gostoto in stopnjo nepropustnosti površja 50 % - 80 % (28,2 °C). Kot najhladnejše oblike rabe tal se pojavljajo vodne površine (22,5 °C) in gozdne površine (23,3 °C). Razlika med najhladnejšimi in najtoplejšimi oblikami rabe tal je poleti znašala 6,6 °C. Spomladi in jeseni so se najvišje temperature površja pojavljale na industrijskih, komercialnih, javnih in vojaških površinah (22,2 °C oziroma 22,1 °C). Temperaturne razlike med kategorijami rabe tal so spomladi znašale 6,2 °C,

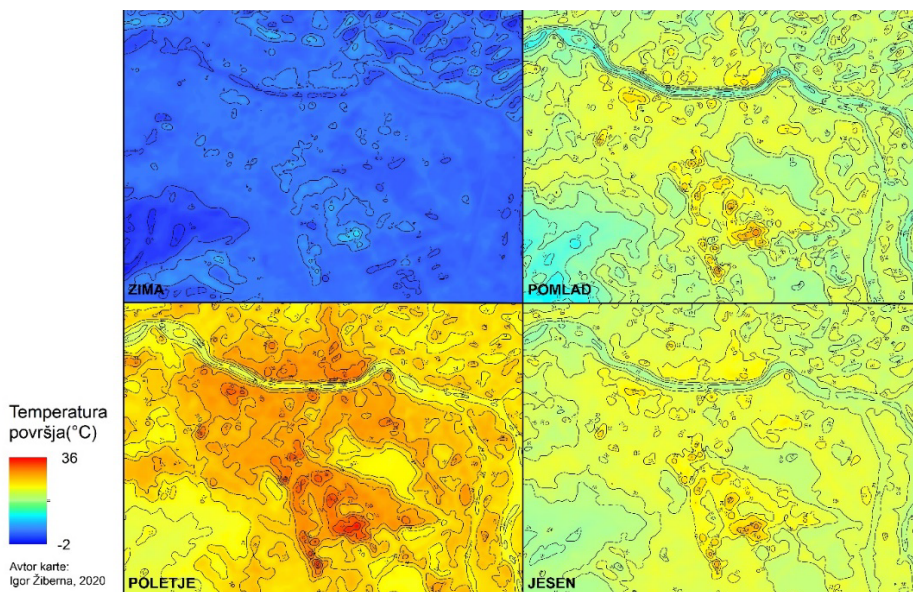
jeseni pa 4,3 °C. V zimskem času so temperature površja najvišje na območjih s trajnimi nasadi, pretežno vinogradi (4,0 °C), ter na industrijskih, komercialnih, javnih in vojaških površinah oziroma na sklenjenih gosto pozidanih površinah s stopnjo nepropustnosti površja nad 80 % (3,7 °C) (Preglednica 1). Temperaturne razlike med najtoplejšimi in najhladnejšimi oblikami rabe tal so bile pozimi najmanjše med vsemi letnimi časi (3,3 °C). Visoke temperature pozimi na območjih s trajnimi nasadi odstopajo od ustaljene predstave. Trajni nasadi, predvsem vinogradi, se na obravnavanem območju nahajajo v Mariborskih gorica, in sicer na strmih južnih pobočjih, ki pozimi zaradi velike prejete količine kratkovalovnega sevanja odstopajo od ravninskih območij. Pozimi topoklimatski dejavniki prevladajo nad običajnimi, ki sicer oblikujejo površinski mestni toplotni otok. Nizke razlike v temperaturah površja med posameznimi oblikami rabe tal v zimskem obdobju so tudi rezultat pogostejšega snežnega pokrova, zaradi česar se razlike v fizikalnih lastnostih podlage (predvsem v toplotni kapaciteti) znižajo. Omenjeno ne velja za kategoriji avtoceste, hitre ceste in pripadajoča zemljišča ter druge ceste in pripadajoča zemljišča, ki v povprečnih zimskih temperaturah ne zaostajata pretirano za najtoplejšimi kategorijami. Obe kategoriji pozimi redno plužijo, zato se tudi v obdobjih s snežno odejo ohranjajo prvotne lastnosti površja.

Morda nekoliko preseneča dejstvo, da je kategorija železnice in pripadajoča zemljišča v vseh letnih časih uvrščena med tiste z višjimi temperaturami površja. Gre za območja železniških tirov, katerih podlaga je sestavljena iz večjih kamnitih kosov, ki imajo podobne fizikalne lastnosti (toplotna kapaciteta in toplotna prevodnost) kot gradbeni materiali, zaradi katerih se sicer oblikuje površinski mestni toplotni otok. V tem pogledu izstopata predvsem glavni železniški kolodvor v Melju in ranžirna železniška postaja na Teznem. Večja sklenjena območja višjih temperatur se pojavljajo na območju industrijskega kompleksa na Teznem v jugovzhodnem delu mesta, v Melju v severovzhodnem delu mesta, nekoliko manj pa na območju industrijske cone na Studencih (Slika 2). Na teh območjih so se poleti pojavljale tudi najvišje maksimalne izmerjene temperature (36,0 °C).

Preglednica 2: Temperature površja po kategorijah rabe tal in po letnih časih (v °C)

Kategorije rabe tal po Urbanem atlasu	Pomlad	Poletje	Jesen	Zima
Sklenjene gosto pozidane površine (S.L. > 80 %)	21,1	29,1	22,0	3,7
Nesklenjene pozidane površine z veliko gostoto (S.L.: 50 % - 80 %)	20,8	28,2	21,5	3,5
Nesklenjene pozidane površine z zmerno gostoto (S.L.: 30 % - 50%)	19,9	27,1	21,0	3,4
Nesklenjene pozidane površine z nizko gostoto (S.L. : 10 % - 30 %)	18,9	25,7	20,1	3,4
Nesklenjene pozidane površine z zelo nizko gostoto (S.L. < 10 %)	18,7	25,5	20,0	3,4
Posamične stavbe	18,2	24,9	19,6	3,5
Industrijske, komercialne, javne in vojaške površine	21,2	28,8	22,1	3,7
Hitre tranzitne ceste in sorodna zemljišča	19,3	26,3	20,4	3,2
Druge ceste in sorodna zemljišča	20,0	27,3	21,0	3,4
Železnice in sorodna zemljišča	20,9	28,4	21,9	3,6
Gramoznice	18,8	26,3	20,3	2,8
Nefunkcionalna zemljišča	19,9	27,0	20,9	3,4
Zelena urbana območja	18,9	26,2	20,1	2,9
Območja za šport in rekreacijo	19,2	26,3	20,3	3,0
Obdelovalne površine	18,9	25,6	20,3	3,0
Trajni nasadi (vinogradi, sadovnjaki)	19,2	25,6	20,2	4,0
Pašniki	18,5	25,1	19,8	3,6
Gozdne površine	16,0	23,3	18,2	2,3
Vodne površine	15,0	22,5	17,8	2,4

Vir: Landsat 8 TIRS [22], vir: lastni izračuni, 2021.



Slika 2: Povprečne temperature površja po letnih časih [22]



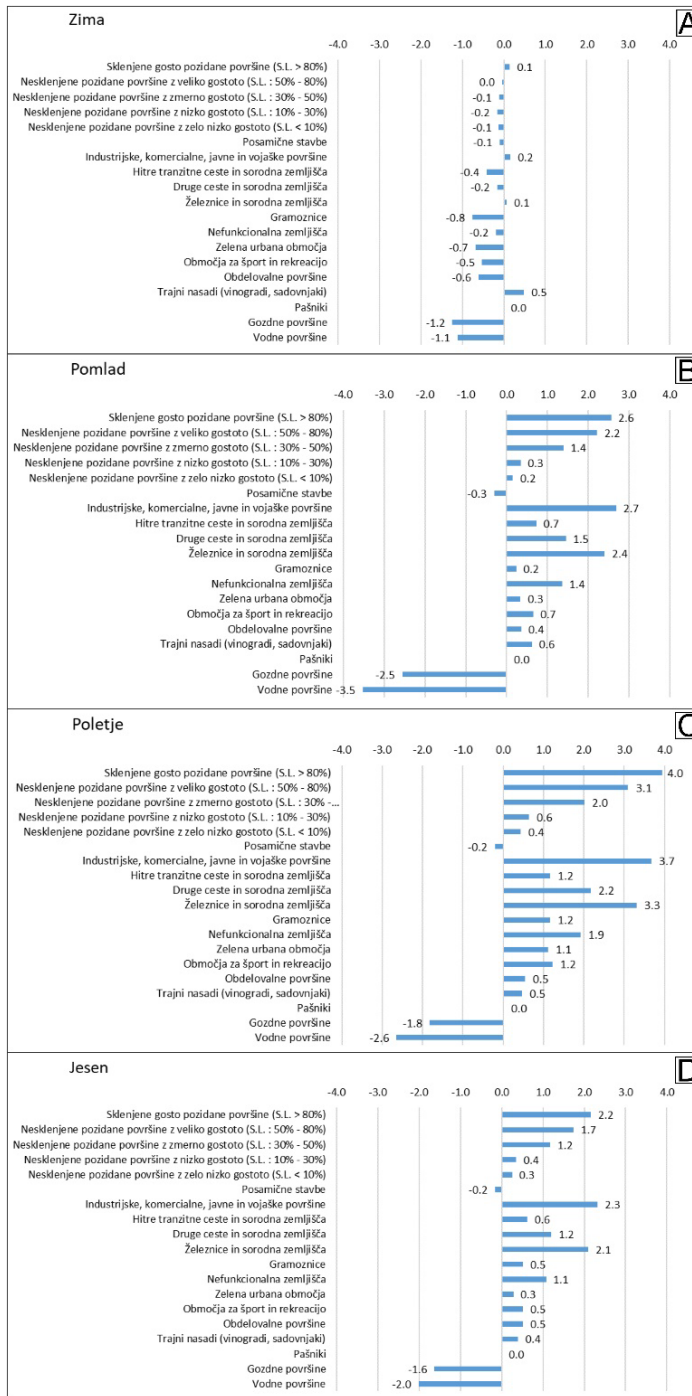
### 3.2 Intenzivnost SUHI in raba tal v Mariboru po letnih časih

Zaradi lažje analize intenzivnosti SUHI smo podatke normirali, pri čemer smo kot referenčno vrednost za vsak letni čas uporabili povprečno temperaturo na pašnikih, za vse ostale kategorije rabe tal pa izračunali razlike med temperaturo površja dane kategorije in temperaturo na pašnikih.

Podatki kažejo, da so najvišje temperature razlike zabeležene poleti (6,6 °C) in spomladi (6,2 °C). Jeseni so se temperaturne razlike znižale na 4,3 °C, pozimi pa na 1,7 °C. Poleti so se najvišje temperaturne razlike glede na referenčno vrednost pojavljale na sklenjenih gosto pozidanih površinah s stopnjo nepropustnosti nad 80 % (4,0 °C), industrijskih, komercialnih, javnih in vojaških površinah (3,7 °C) in na železnicah in sorodnih zemljiščih (3,3 °C). Glede na referenčno površino so bile nižje temperature na vodnih površinah (za 2,6 °C), gozdnih površinah (1,8 °C) in posamičnih stavbah (0,2 °C). Slednje morda malce preseneča, vendar moramo upoštevati, da so v to kategorijo vštete zasebne hiše s pripadajočimi vrtovi, ki so v poletnih mesecih na višku vegetacijske dobe, kar površje nekoliko ohladi. Tudi spomladi so najvišja odstopanja od referenčne površine zaznana na industrijskih, komercialnih, javnih in vojaških površinah (2,7 °C), na sklenjenih gosto pozidanih površinah s stopnjo nepropustnosti nad 80 % (2,6 °C), na železnicah in sorodnih zemljiščih (2,4 °C) in na nesklenjenih gosto pozidanih površinah s stopnjo nepropustnosti od 50 % do 80 % (2,2 °C). Nižje temperature od referenčnih so zaznane na vodnih površinah (za 3,5 °C), gozdnih površinah (za 2,5 °C) in na območjih s posamičnimi stavbami (za 0,3 °C). Pozimi so se najvišja pozitivna odstopanja od referenčne površine pojavila na vinogradniških površinah (0,5 °C). Te se nahajajo na strmih južnih pobočjih v Mariborskih gorica, gričevju, ki obdaja pozidane površine na severnem robu mesta. Zaradi ugodne lege in kljub zimskemu času še vedno visokega vpadnega kota Sončevih žarkov, so te lege dobro obsevane, zato sneg tukaj hitro skopni in površje se hitro segreje. V ostalih delih mesta snežni pokrov – kljub pluženju v mestu – zabriše siceršnje razlike. Hladnejše od referenčne površine so gozdne površine (1,2 °C) in vodne površine (1,1 °C) (Slika 3).

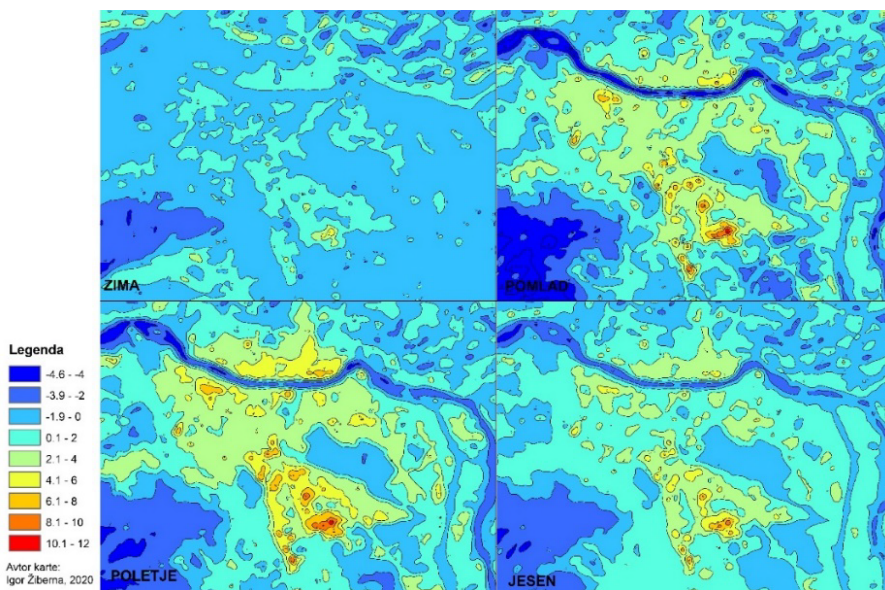
Geografska razporeditev intenzivnosti SUHI v Mariboru po letnih časih (Slika 4) potrjuje zgoraj opisano. Polje intenzivnosti SUHI v Mariboru je najbolj homogeno pozimi, najbolj raznoliko pa poleti in spomladi. Pozimi od referenčnih površin najbolj izstopa industrijska cona Tezno v jugovzhodnem delu mesta in prisojna pobočja z vinogradi v Mariborskih gorica na severnem robu pozidanega dela mesta.

Temperaturne razlike med ostalimi kategorijami rabe tal so zelo zabrisane. Spomladi se razlike v intenzivnosti SUHI povečajo, pri čemer kot toplejša območja izstopajo industrijska cona Tezno, območje trgovskih centrov in storitvenih dejavnosti s pripadajočimi parkirišči vzhodno od Tržaške ceste (glavne cestne vpadnice v mesto z južne strani), industrijska cona Melje v severovzhodnem delu mesta in industrijska cona Studenci v zahodnem delu mesta. V negativno smer vidno odstopajo reka Drava s hidroenergetskim kanalom HE Zlatoličje, gozd Stražun v vzhodnem delu mesta, Betnavski gozd v južnem delu mesta in Limbuška Dobrava, gozd na skrajnem zahodnem delu mesta. V poletnih mesecih se območjem s pozitivnimi odstopanji pridružijo tudi manjši otočki SUHI: območje mariborske bolnišnice, nakupovalnega središča Europark (oboje na desnem bregu reke Drave) ter nakupovalni središči ob Puhovi cesti na Pobrežju ter Qlandia ob zahodni obvoznici. Poleti se območjem z nižjimi temperaturami od referenčnih pridružijo tudi območja Mestnega parka na robu starega dela mesta na levem bregu reke Drave in nekatere druge manjše zelene površine, ki še povečujejo kontrast med različno segretim deli mesta.



Slika 3: Intenzivnost SUHI po letnih časih in po kategorijah rabe tal v Mariboru [22]

Glede na dejstvo, da se vročinski valovi v Mariboru najpogosteje pojavljajo julija in avgusta, v zadnjem desetletju pa tudi junija in septembra [23], je pomen zelenih in vodnih površin zaradi blaženja temperaturnega stresa toliko večji. V jesenskem času polje intenzivnosti SUHI ponovno postaja bolj homogeno, pri čemer še vedno izstopajo zgoraj omenjena območja. Na bivalnih območjih z višjo gostoto prebivalstva v Mariboru prevladuje individualna gradnja, kjer se ob hišah praviloma pojavljajo vrtno površine, ki učinek SUHI na srečo blažijo. Od 70. let naprej se je v mestu začela pojavljati tudi blokovna gradnja [23], ob katerih je zelenih površin manj, zaradi tega je na takih območjih učinek toplotnega stresa večji.



Slika 4: Intenzivnost SUHI po letnih časih [22]. Povzeto po Žiberna idr. (2021) [24]

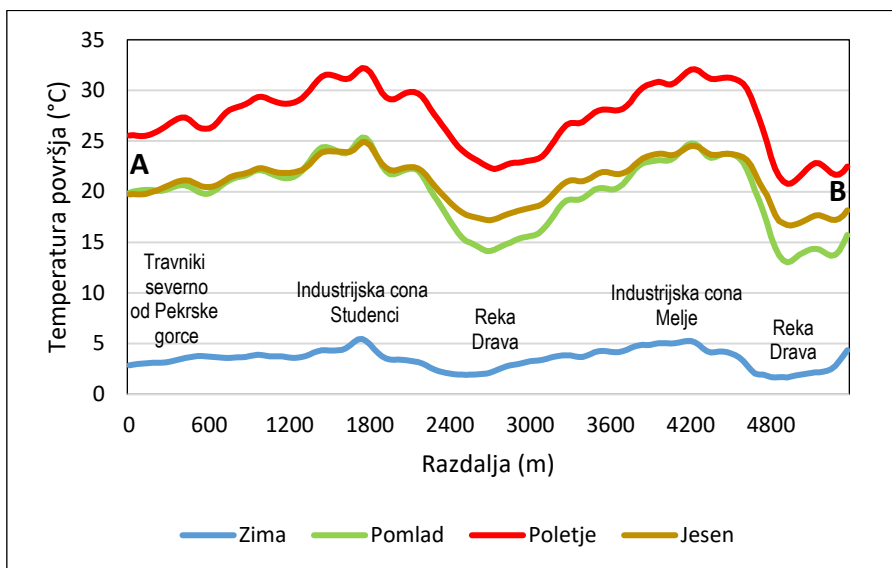
Vpliv zelenih površin na SUHI in kakovost bivalnega okolja v mestih je predmet številnih analiz [25]–[32]. Zelene površine v mestih imajo širok spekter ekosistemskih storitev. Ob tem da blažijo stres zaradi visokih temperatur, predstavljajo območja za oddih, druženje, rekreacijo in pridobivanje hrane [33]. Za dodaten prikaz vpliva različnih oblik rabe tal na SUHI smo v ta namen čez mesto izrisali nekaj tipičnih presekov po letnih časih. Presek A-B (Slika 5) poteka pretežno v vzporedniški smeri, in sicer med industrijskima conama Studenci in Melje, pri čemer dvakrat prečka reko Dravo. Pričakovano najvišje temperature se v vseh letnih časih pojavljajo na območju obeh industrijskih con, najnižje pa na reki Dravi.

Najvišje razlike med najtoplejšo in najhladnejšo točko na profilu se pojavljajo spomladi (12,3 °C), sledijo poletje (11,4 °C), jesen (8,2 °C) in zima (3,8 °C) (Slika 5). Najvišje poletne temperature (32,2 °C) se pojavljajo na območju industrijske cone Studenci, v bližini katere se nahaja tudi ranžirna železniška postaja. Le nekoliko nižje temperature (32,1 °C) se pojavljajo na območju industrijske cone Melje. Najnižje poletne temperature se pojavljajo na območju reke Drave v Melju (20,8 °C). Da nastopajo najvišje razlike v spomladanskih mesecih je posledica nižjih temperatur reke Drave, saj se vodne površine spomladi zaradi višje toplotne kapacitete segrevajo počasneje kot gradbeni materiali [34].

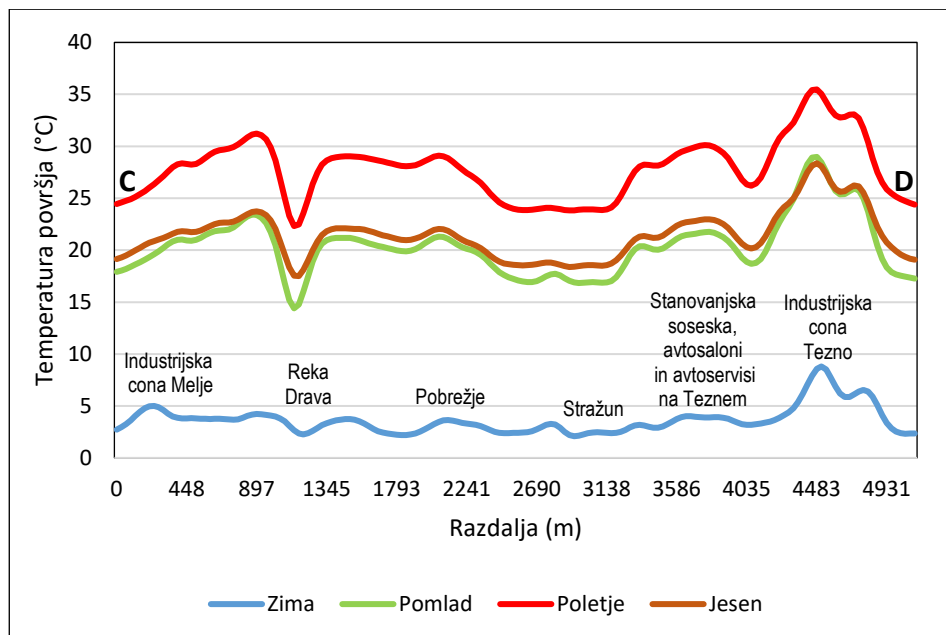
Presek C-D poteka v poldnevniški smeri med vznožjem gričevja v Melju in južnim robom mesta, na katerem se že pojavljajo njivske površine. Profil prečka reko Dravo in gozd Stražun, ki predstavlja največjo sklenjeno gozdno površino v mestu (Slika 4). Tudi na tem profilu so bile najvišje temperaturne razlike spomladi (14,6 °C), sledile so amplitude poleti (13,2 °C), jeseni (10,9 °C) in pozimi (3,6 °C). Najvišje temperature se v vseh letnih časih pojavljajo na območju industrijske cone Tezno, nekoliko nižje so na območju industrijske cone Melje. Najnižje temperature se ponovno pojavljajo na reki Dravi, vendar pa se pozimi te razlike znižajo na minimum. Površje na reki Dravi redko zamrzne, kar pa ne drži za kopno. Voda ima višjo toplotno kapaciteto, zato voda v reki ni bistveno hladnejša od kopnega. Temperatura površja na območju Stražuna je v poletnih mesecih kar za 11 °C nižja od temperature površja na območju industrijskih con in za okoli 5 °C nižja od temperature površja na območju individualnih stanovanjskih hiš, ki imajo v svoji okolici tudi veliko zelenih površin v obliki vrtov.



Slika 5: Profili čez površinski mestni toplotni otok v Mariboru [21]



Slika 6: Temperaturni profil povprečnih sezonskih temperatur A-B čez SUHI

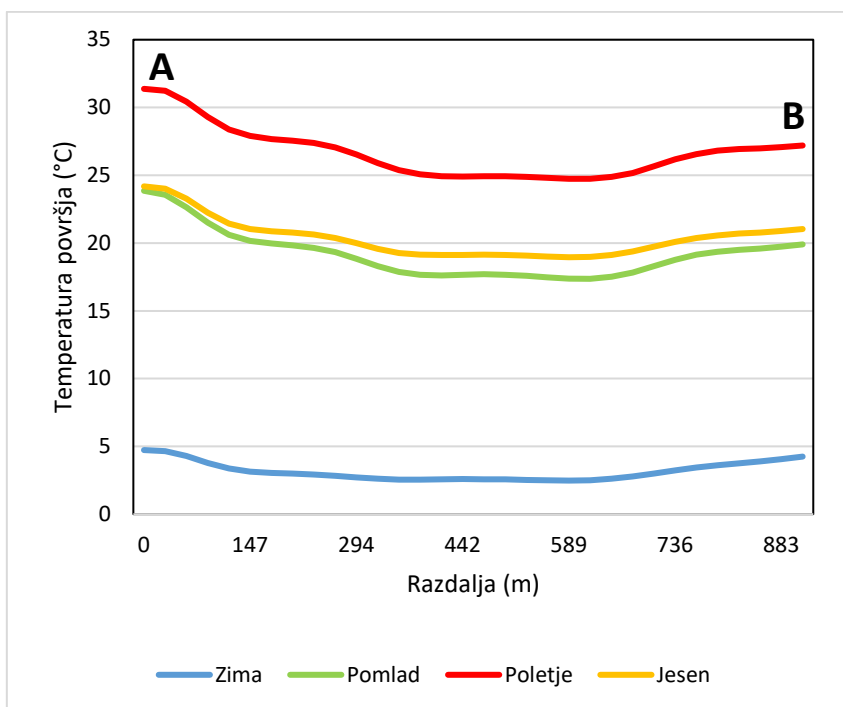


Slika 7: Temperaturni profil povprečnih sezonskih temperatur C-D čez SUHI

Mesto Maribor, predvsem starejši del mesta, sestavljajo pogoste parkovne površine. Med največje s 54 ha površine sodi Mestni park, ki je nastal leta 1872 in bil razširjen leta 1882 [35]. Mestni park na vzhodu in zahodu obdajajo območja individualnih stanovanjskih hiš, na jugu staro mestno jedro, na severu pa južna pobočja gričev Piramida in Stolni vrh (Slika 8). Profil čez polje SUHI kaže, da najvišje razlike v temperaturah površja nastopajo poleti (6,6 °C) in spomladi (6,5 °C), medtem ko se jeseni znižajo na 5,2 °C, pozimi pa na 2,3 °C (Slika 9), kar dokazuje, da imajo parkovne površine v času največje frekvence in intenzivnosti pojavljanja vročinskih valov pomemben blažilni učinek. Ob gozdu Stražun se na južnem robu mesta pojavlja manjša gozdna zaplata Betnavski gozd (30,9 ha) (Slika 10). Profili čez polje SUHI na tem območju kažejo na najvišje razlike spomladi (6,8 °C) in poleti (6,6 °C), nižje pa so jeseni (4,8 °C) in pozimi (1,7 °C) (Slika 11). Analize so pokazale, da že precej manjše parkovne površine modificirajo intenzivnost SUHI. Magdalenski park na Taboru, ki pokriva 2,18 ha površja, ima poleti za 3,4 °C nižje temperature od okolice (spomladi za 3,1 °C). Trg Borisa Kidriča ob železniškem kolodvoru s površino 1,17 ha ima poleti za 3,0 °C nižje temperature od okolice (spomladi za 2,6 °C).



Slika 8: Profil čez SUHI na območju Mestnega parka v Mariboru [21]

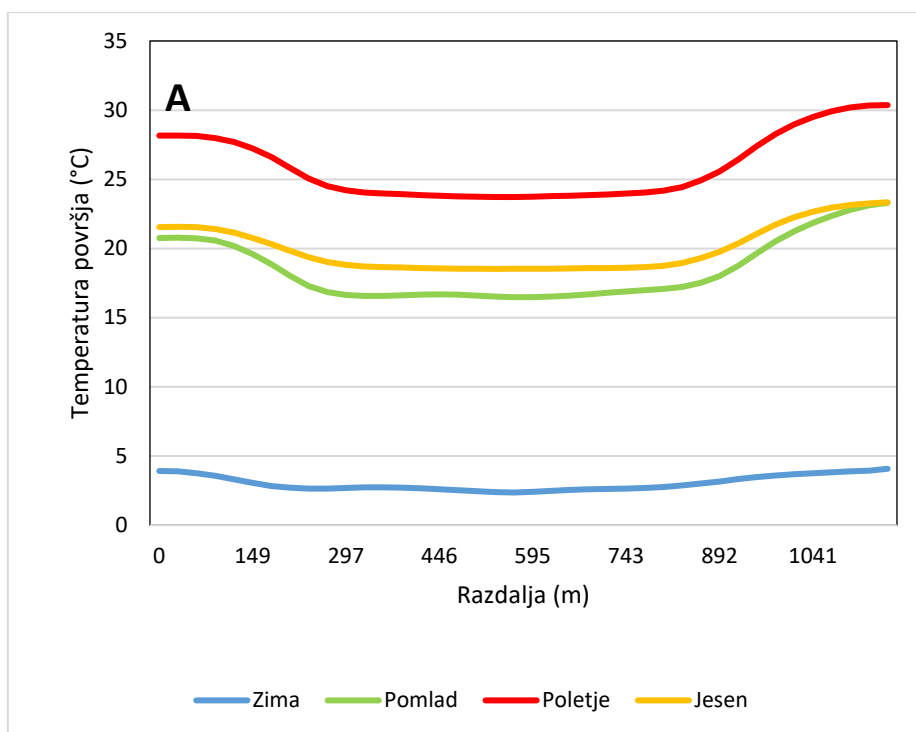


Slika 9: Profil čez SUHI na območju mestnega parka v Mariboru po letnih časih





Slika 10: Profil čez SUHI na območju Betnavskega gozda v Mariboru [21]



Slika 11: Profil čez SUHI na območju Betnavskega gozda v Mariboru po letnih časih

## 4 Zaključek

Temperature površja v Mariboru kažejo tesno odvisnost od rabe tal, vendar se ta zveza spreminja z letnimi časi. Pozimi so zaradi snežnega pokrova razlike v površinskih temperaturah nižje, večjo vlogo pa igra relief (strma prisojna pobočja). Temperaturne razlike med vodnimi površinami in kopnim so najnižje med vsemi letnimi časi. Površinski toplotni otok kaže najvišje razlike med posameznimi deli mesta v času pomladi in poletja. Analiza kaže, da so najvišje temperature razlike zabeležene poleti (6,6 °C) in spomladi (6,2 °C). Jeseni so se temperaturne razlike znižale na 4,3 °C, pozimi pa na 1,7 °C. Poleti so se najvišje temperaturne razlike glede na referenčno vrednost (temperature na pašnikih) pojavljale na sklenjenih gosto pozidanih površinah s stopnjo nepropustnosti nad 80 % (4,0 °C), industrijskih, komercialnih, javnih in vojaških površinah (3,7 °C) in na železnicah in sorodnih zemljiščih (3,3 °C). Glede na referenčno površino so bile nižje temperature na vodnih površinah (za 2,6 °C), gozdnih površinah (1,8 °C) in posamičnih stavbah (0,2 °C), kjer temperature znižujejo okoliški vrtovi in trate. Rezultati potrjujejo, da zelene in vodne površine v obdobjih, v katerih lahko pričakujemo vedno pogostejše vročinske valove, igrajo pomembno blažilno vlogo. Temperature površja v Mestnem parku so bile poleti za 6,6 °C, spomladi pa za 6,5 °C nižje od pozidane okolice. V Betnavskem gozdu so bile temperature površja spomladi za 6,8 °C, poleti pa za 6,6 °C nižje od pozidane okolice. Tudi manjše parkovne površine kažejo za nekaj stopinj C nižje temperature površja od okolice. V času, ko lahko pričakujemo pogostejše, vedno daljše in intenzivnejše vročinske valove, bi v strategiji razvoja mesta morali najmanj ohranяти, še boljše pa širiti zelene in vodne površine. Te nimajo samo funkcije blažilca temperaturnih obremenitev, ampak nudijo tudi pomembno socialno in psihološko funkcijo (druženje, sprostitve).

### Zahvale

Študijo so omogočili: Projekt »RAZVOJ RAZISKOVALNE INFRASTRUKTURE ZA MEDNARODNO KONKURENČNOST SLOVENSKEGA RRI PROSTORA – RI-SI-LifeWatch« (projekt sofinancirata Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport Republike Slovenije in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj) in programska skupina P6-0372 »Slovenska identiteta in kulturna zavest v jezikovno in etnično stičnih prostorih v preteklosti in sedanjosti«.

### Literatura

- [1] T. R. Oke, *Boundary layer climates*. Routledge, 2002.
- [2] F. Fezer, *Das Klima der Städte*. Perthes [ua], 1995.

- [3] „United Nations“, *Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics*. <https://population.un.org/wup/Download/> (pridobljeno 15. februar 2021).
- [4] EEA (European Environment Agency), „Urban adaptation to climate change in Europe. Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies“, *EEA Report, No. 2/2012*, 2012.
- [5] J.-M. Robine *idr.*, „Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003“, *Comptes rendus biologiques*, let. 331, št. 2, str. 171–178, 2008.
- [6] K. Parsons, *Human heat stress*. CRC Press, 2019.
- [7] „The Russian heatwave of summer 2010“. <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/case-studies/russian-heatwave> (pridobljeno 29. oktober 2018).
- [8] B. Marshall, S. Hsiang, in M. Edward, „Climate and conflict“, *Annual Review of Economics*, let. 7, št. 1, str. 577–617, 2015.
- [9] T. Deryugina in S. M. Hsiang, „Does the environment still matter? Daily temperature and income in the United States“, National Bureau of Economic Research, 2014.
- [10] G. Bonan, *Ecological climatology: concepts and applications*. Cambridge University Press, 2015.
- [11] I. Žiberna, „Trendi vodne bilance v severovzhodni Sloveniji v obdobju 1961–2016“, *V: Geografije Podravskega prostora. Univerzitetna založba. Univerza v Mariboru. Maribor*, 2017.
- [12] B. Bechtel, P. Sismanidis, J. Voogt, in W. Zhan, „Seasonal Surface Urban Heat Island Analysis“, v *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, Vannes, France, maj 2019, str. 1–4. doi: 10.1109/JURSE.2019.8808982.
- [13] B. Zhou, D. Lauwaet, H. Hooyberghs, K. De Ridder, J. P. Kropp, in D. Rybski, „Assessing seasonality in the surface urban heat island of London“, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, let. 55, št. 3, str. 493–505, 2016.
- [14] R. Pongrácz, J. Bartholy, in Z. Dezső, „Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities“, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, let. 35, št. 1–2, str. 95–99, 2010.
- [15] J. Unger, Z. Sümegehy, in J. Zoboki, „Temperature cross-section features in an urban area“, *Atmospheric research*, let. 58, št. 2, str. 117–127, 2001.
- [16] Y. Nakamura, Y. Shigeta, in Y. Watarai, „Seasonal variations of the urban heat island in Kumagaya, Japan“, *Geographical review of Japan series B*, let. 91, št. 2, Art. št. 2, 2018.
- [17] „USGS. Curve Fit: A Pixel Level Raster Regression Tool. U.S. Army Corps of Engineers.“ <https://earthexplorer.usgs.gov/> (pridobljeno 20. september 2018).
- [18] „Copernicus“, *Urban Atlas 2018*. <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2018?tab=metadata> (pridobljeno 15. februar 2021).
- [19] „Statistični urad Republike Slovenije. (2020). SiStat. <https://pxweb.stat.si/SiStat/sl>“. [Na spletu]. Dostopno na: SiStat. <https://pxweb.stat.si/SiStat/sl>
- [20] I. Žiberna, „Izbrane naravnogeografske značilnosti občine Radlje ob Dravi“, *Revija za geografijo*, let. 6, št. 1, str. 47–60, 2011.
- [21] „Ministrstvo za okolje in prostor, Geodetska uprava Republike Slovenije. (2020).“ Pridobljeno: 1. februar 2020. [Na spletu]. Dostopno na: E-geodetski podatki. <https://egp.gu.gov.si/egp/?lang=en>
- [22] „Landsat 8 TIRS, 2020. EarthData Open Acces for Open Science. EarthData.“ <https://earthdata.nasa.gov/>
- [23] V. Drozg, „Regijsko mesto Maribor“, *Revija za geografijo*, let. 1, št. 1, str. 9–39, 2006.
- [24] I. Žiberna *idr.*, „The Impact of Climate Change on Urban Thermal Environment Dynamics“, *Atmosphere*, let. 12, št. 9, str. 1159, sep. 2021, doi: 10.3390/atmos12091159.
- [25] S. Hamada in T. Ohta, „Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas“, *Urban forestry & urban greening*, let. 9, št. 1, str. 15–24, 2010.
- [26] S. E. Gill, J. F. Handley, A. R. Ennos, in S. Pauleit, „Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure“, *Built environment*, let. 33, št. 1, str. 115–133, 2007.
- [27] D. Maheng, I. Ducton, D. Lauwaet, C. Zevenbergen, in A. Pathirana, „The sensitivity of urban heat island to urban green space—a model-based study of city of Colombo, Sri Lanka“, *Atmosphere*, let. 10, št. 3, str. 151, 2019.

- [28] G. Kaplan, „Evaluating the roles of green and built-up areas in reducing a surface urban heat island using remote sensing data“, *Urbani izživ*, let. 30, št. 2, str. 105–112, 2019.
- [29] C. Yang *idr.*, „The effect of urban green spaces on the urban thermal environment and its seasonal variations“, *Forests*, let. 8, št. 5, str. 153, 2017.
- [30] M. F. Altunkasa, S. Berberoğlu, C. Uslu, in H. Duymuş, „The Effectiveness of Urban Green Spaces and Socio-Cultural Facilities“, *Tema. Journal of Land Use, let. Mobility and Environment*, str. 41-56 Paginazione, apr. 2017, doi: 10.6092/1970-9870/4087.
- [31] P. Jonsson, „Vegetation as an urban climate control in the subtropical city of Gaborone, Botswana“, *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, let. 24, št. 10, str. 1307–1322, 2004.
- [32] R. Emmanuel, „Assessment of impact of land cover changes on urban bioclimate: the case of Colombo, Sri Lanka“, *Architectural Science Review*, let. 46, št. 2, str. 151–158, 2003.
- [33] J. Breuste, M. Artmann, J. Li, in M. Xie, „Special issue on green infrastructure for urban sustainability“, *Journal of Urban Planning and Development*, let. 141, št. 3, str. A2015001, 2015.
- [34] E. Erell, D. Pearlmutter, in T. Williamson, *Urban microclimate: designing the spaces between buildings*. Routledge, 2012.
- [35] S. Radovanovič, I. Žiberna, in D. Cvetnič, *Maribor: mestni vodnik*. Obzorja, 1996.

# VPLIV URBANIH ZELENIH POVRŠIN NA POJAV MESTNEGA TOPLOTNEGA OTOKA

NATAŠA PIPENBAHER,<sup>1</sup> DANIJEL IVAJNSIČ,<sup>1,2</sup>

DAŠA DONŠA,<sup>1</sup> VENO JAŠA GRUJIĆ,<sup>1,3</sup> SONJA ŠKORNIK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija  
natas.pipenbahr@um.si, dani.ivajnsic@um.si, dasa.donsa1@um.si,  
veno.grujic@um.si, sonja.skornik@um.si

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Maribor, Slovenija  
dani.ivajnsic@um.si

<sup>3</sup> Univerza v Mariboru, Pedagoška fakulteta, Maribor, Slovenija  
veno.grujic@um.si

**Sinopsis** Urbane zelene površine so izpostavljene vzajemnemu vplivu pojava mestnega toplotnega otoka (MTO) in višjim temperaturam zraka zaradi podnebnih sprememb, kar spreminja rastne parametre rastlin, po drugi strani pa lahko delujejo kot blažilec toplotnega stresa zaradi povečanega toka latentne toplote (posledica evapotranspiracije). Da bi ocenili jakost hladilnega učinka zelenih površin v urbanih sistemih (Maribor, Murska Sobota, Ljutomer) smo v devetih zelenih površinah (trije mestni gozdovi in šest mestnih parkov) popisali lesne vrste na 94 popisnih ploskvah. Zbrali smo podatke o številu/gostoti osebkov lesnih vrst, povprečni vrednosti morfološko funkcionalnih potez za vsebnost suhe snovi v listih (CWM\_LDMC) in specifično listno površino (CWM\_SLA). Izračunali smo intenzivnost hlajenja, obseg hlajenja in stopnjo hlajenja v in izven popisnih ploskev. Mestni gozdovi imajo večji hladilni učinek od mestnih parkov. Sicer pa pravilo večja zelena površina – večji hladilni učinek ne velja povsod. Analiza dejavnikov vpliva hladilnega učinka urbanih zelenih površin je razkrila značilen vpliv: (1) velikosti zelene površine, (2) števila/gostote lesnih vrst in vezanih povprečnih vrednosti morfološko funkcionalnih potez (predvsem CWM\_SLA), (3) tipa zelene površine in pokritosti tal neposredne okolice. Dobro umeščene zelene površine lahko razčlenijo sicer homogeno temperaturno polje nad pozidanimi površinami mest, še zlasti ob nastopu vročinskih valov.

**Ključne besede**  
podnebne  
spremembe,  
hladilni učinek,  
lesne vrste,  
urbani sistemi,  
lokalne podnebne  
cone

# THE COOLING EFFECT OF URBAN GREEN SPACES FROM THE URBAN HEAT ISLAND PERSPECTIVE

NATAŠA PIPENBAHER,<sup>1</sup> DANIJEL IVAJNSIČ,<sup>1,2</sup>

DAŠA DONŠA,<sup>1</sup> VENO JAŠA GRUJIĆ,<sup>1,3</sup> SONJA ŠKORNIK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia  
natas.pipenbaher@um.si, dani.ivajnsic@um.si, dasa.donsa1@um.si,  
veno.grujic@um.si, sonja.skornik@um.si

<sup>2</sup> University of Maribor, Faculty of Arts, Maribor, Slovenia  
dani.ivajnsic@um.si

<sup>3</sup> University of Maribor, Faculty of Education, Maribor, Slovenia  
veno.grujic@um.si

**Abstract** Urban green areas are exposed to the urban heat island-climate change interaction, a combination which affects plant growth parameters, but which, can act as a heat stress buffer, owing to increased latent heat flux (evapotranspiration). To estimate the cooling intensity of green areas in urban systems (Maribor, Murska Sobota, and Ljutomer), we sampled wood species in 94 census plots in nine green areas (three urban forests and six urban parks). The number/density of wood species, the average value of morphologically functional traits for leaf dry matter content (CWM\_LDMC) and specific leaf area (CWM\_SLA) were collected. The cooling intensity, cooling extent and cooling lapse estimates within, and outside the census plots were calculated. Urban forests have a greater cooling effect than urban parks. However, the rule that larger green areas have a greater cooling effect does not always apply. The urban green space cooling effect analysis revealed a significant impact from: (1) green area size, (2) number/density of wood species and associated average value of morphological functional traits (CWM\_SLA), (3) type of green area and ground cover of the surroundings. Well located green areas can break down otherwise homogeneous air temperature fields above built-up areas in cities, especially during heat waves.

**Keywords:**

climate change,  
cooling effect,  
wood species,  
urban systems,  
local climate zones

## 1 Uvod

Šesto poročilo Medvladnega panela za podnebne spremembe (IPCC AR6) [1] opozarja, da so posledice podnebnih sprememb že zaznavne v vsaki regiji sveta. Vse številčnejši in intenzivnejši vremenski ekstremi, kot posledica podnebnih sprememb v urbanih sistemih, povzročajo nastanek še izrazitejših mestnih toplotnih otokov (MTO) [2]. V zadnjih letih v mestih posledično beležimo vse več negativnih učinkov na zdravje ljudi, hkrati pa se znižuje kakovost človekovega bivalnega okolja. Ekstremne vremenske razmere na območjih z večjo pozidanostjo in pokritostjo tal z umetnimi materiali bolj vplivajo na zdravje ranljivih skupin ljudi, kot so starejši, otroci, bolniki s srčno-žilnimi obolenji, diabetiki, bolniki z duševnimi motnjami itd. Na njihovo ogroženost lahko dodatno vplivajo nizek socialno-ekonomski status, socialna izoliranost, slabša dostopnost do zdravstvenih storitev in nasploh slabši bivalni pogoji [3], [4].

Pričakujemo, da bo do leta 2050 60 % svetovnega prebivalstva živelo v urbanih naseljih [5]. Naselja tvorijo specifična okolja, ki so edinstvena po svojih značilnostih. Vsako naselje je sestavljeno iz mozaika številnih habitatov različnih velikosti. Heterogenost znotraj naselij odraža različne dejavnosti ljudi, človekovo zgodovino in različne lokalne razmere [6]. Znano je, da učinke MTO poslabšajo vročinski valovi [7]. Zaradi večje intenzitete pojava MTO v času vročinskih valov v letih od 2006 do 2010 se je povečala umrljivost v ZDA za 1,1 milijona ljudi [8]. Heaviside idr. (2017) [9] pripisujejo toplotnemu stresu zaradi pojava MTO v okolici mesta Birmingham (Velika Britanija) tekom vročinskega vala leta 2003 kar 50 % umrljivost.

MTO nastane predvsem kot posledica odstranitve zelenih površin, uvajanja umetnih materialov (npr. betona, asfalta, tlakovcev itd.) in onesnaženosti s smogom [10], [11]. S tem se drastično spremenijo tamkajšnje sevalne, termične in vlažnostne razmere in hkrati sama fiziognomija površja [2], [12], [13]. Do sedaj uveljavljeni ukrepi za omilitev podnebnih učinkov v urbanih sistemih se osredotočajo predvsem na infrastrukturne in tehnične rešitve, in ne posvečajo dovoljšne skrbi naravnim virom, kot so zemlja in voda [14]. V ekstremnih vremenskih razmerah voda ne more pronicati v tla, ampak večini odteče bodisi skozi kanalizacijske sisteme ali kot površinska meteorna voda [15]. Nedavna študija EEA [14] priporoča kombinacijo različnih ukrepov – »sivi« ukrepi, kot so tehnološki in inženirski projekti, »mehki«

ukrepi, kot je ozaveščenost prebivalstva, in »zeleni« ukrepi, kot so zelene strehe, parkovne površine.

Rešitve, ki temeljijo na »zelenih« ukrepih, obravnavajo več urbano-okoljskih izzivov. Urbane zelene površine zagotavljajo vrsto ekosistemskih koristi, med drugim zadrževanje vode, obnovo tal, habitate za živali, območja za rekreacijo in sprostitvev [16]. Druge pomembne koristi zelenih površin so tudi hlajenje neposredne grajene okolice. Natančneje, rastline prispevajo k hladnejšemu okolju s pretvorbo sevalne toplote v latentno na osnovi evapotranspiracije. Rastline imajo višji albedo in nižjo toplotno kapaciteto kot mnogi umetni materiali, ki se uporabljajo za zaščito pred soncem [17]. Zelene površine igrajo ključno vlogo pri uravnavanju površinske temperature zlasti v prisotnost visoke ravni vlage, celo bolj kot katerekoli druge odbojne površine [13], [18].

Hladilni učinki zelenih površin so v zadnjem obdobju pogosta tarča raziskav [19], [20]. Številne prostorske analize proučujejo učinke hlajenja rastlin na okolico kot razlike v temperaturi zraka ali tal med pozidanimi in zelenimi površinami [21]. V Singapurju so nedavne raziskave pokazale hladilni učinek zelenih površin za 1,7 °C [22]. Ponekod beležijo zniževanje temperature zraka zaradi senčenja z drevesi tudi do 9 °C [23], [24]. Tan idr. (2021) [18] poročajo, da so lahko zelene površine hladnejše za ~ 11 °C glede na umetne materiale v sodobnih mestih.

Rastline različnih habitatov imajo različne strategije, ki jim omogočajo uravnavanje temperaturnega in vodnega režima [25]. Te se izražajo v različnih fizičnih in fizioloških prilagoditvah posameznih rastlinskih vrst oziroma v t. i. morfološko funkcionalnih potezah (MFP). Tako imajo na primer nekatere rastline toplejših in sušnejših habitatov liste pogosto z dobro razvitimi opornimi tkivi, poraslimi z dlavicami, debelo kutikulo in manjšo površino [26]. Ker lahko prilagoditve na nivoju MFP rastlinskih vrst izražajo značilne razlike v hladilnem učinku zelenih površin, so takšne raziskave zelo pomembne.

Slovenska mesta niso izjema, nasprotno zaradi historične strnjene zazidave je pojav MTO tudi v majhnih mestih zelo intenziven [27], [28]. Sicer je proučevanje vpliva zelenih površin na pojav MTO v Sloveniji bolj izjema kot pravilo. Da bi premostili to vrzel, smo v raziskavi proučevali zvezo med intenzivnostjo (intenzitetjo) hlajenja in velikostjo zelenih površin (1), tipom zelenih površin (2), številom vrst v zelenih



površinah (3) izbranimi morfološko-funkcionalnimi potezami vrst zelenih površin (4) in pokritostjo tal (5).

## 2 Materiali in metode

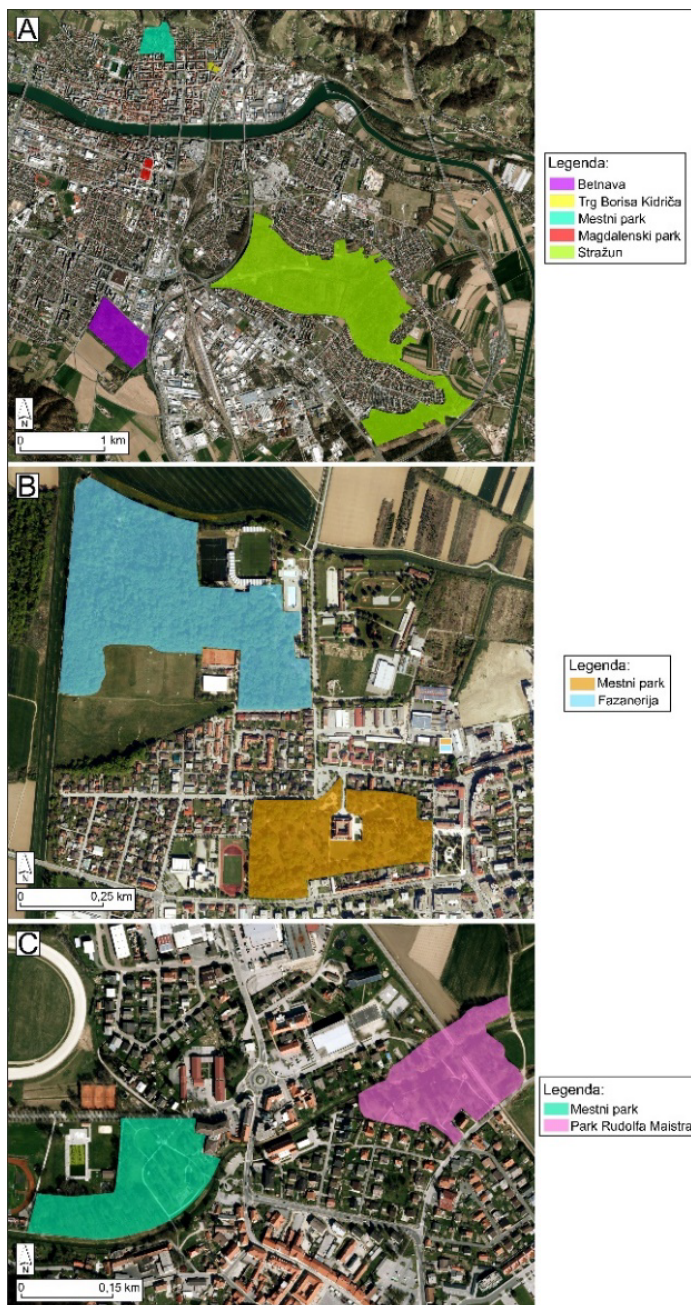
### 2.1 Opis območja raziskave

Vpliv zelenih površin na pojav MTO smo proučevali v mestih Maribor, Murska Sobota in Ljutomer. V urbani strukturi Maribora smo obravnavali pet zelenih površin (Betnava, Trg Borisa Kidriča, Mestni park, Magdalenski park in gozd Stražun). Po dve zeleni površini smo obravnavali v Murski Soboti (Mestni park in Fazanerija) in Ljutomeru (Mestni park in Park Rudolfa Maistra) (Slika 1). Velikost raziskovalnih površin so prikazane v Preglednici 2.

Raziskovalno območje Maribor zajema dva mestna gozdova. Gozd Stražun je v urbanem prostoru Maribora in ima od leta 1996 status naravnega spomenika. Tvori ga mešani gozd navadne bukve (*Fagus sylvatica*), belega gabra (*Carpinus betulus*) in hrasta doba (*Quercus robur*). Predstavlja enega od ostankov nekdanjih nižinskih gozdov, značilnih za Dravsko polje. Park služi kot prostor za sprostitev in rekreacijo [29]. Po večini meji na mestne ulice, ponekod pa tudi na travniške in njivske površine. Druga obravnavana zelena površina je mestni gozd Betnava, ki leži na skrajnem severnem delu Dravskega polja, na ravnini med Pohorjem in južnim delom Maribora. Znotraj mesta Maribor smo proučevali tudi tri mestne parkovne površine, umeščene v mestno jedro. Vse tri omejujejo predvsem ulice.

Raziskovalno območje Murska Sobota zajema mestni gozd Fazanerija, ki leži na SZ strani mesta. Mestni gozd Fazanerija po večini meji na travnike in njive. Fazanerija služi kot prostor za rekreacijo. Na severni strani ga omejuje reka Ledava. Sestava mestnega gozda je mešani gozd s prevladujočimi drevesnimi vrstami beli gaber (*Carpinus betulus*), hrast dob (*Quercus robur*) in veliki jesen (*Fraxinus excelsior*). Park v središču mesta (nekdanji Szapáryjev) meji na mestne ulice. Park sestavljajo mogočni dvestoletni hrasti (*Quercus robur*), gabri (*Carpinus betulus*), jeseni (*Fraxinus excelsior*), lipe (*Tilia* sp.) in velike zelenice [30].

V mestu Ljutomer sta obe obravnavani zeleni površini mestna parka, ki po večini mejita na ulični sistem, ponekod pa na travniške in njivske površine.



Slika 1: Območja raziskave – Maribor (A), Murska sobota (B) in Ljutomer (C). Podlaga: ArcMap World Imagery Basemap [31]

## 2.2 Terensko delo in zbiranje podatkov

V letih 2021 in 2022 smo v devetih zelenih površinah popisali 94 popisnih ploskev: v Mariboru v petih zelenih površinah (Betnava, Trg Borisa Kidriča, Mestni park, Magdalenski park in Stražunski gozd) 69 popisnih ploskev; v Murski Soboti v dveh zelenih površinah (Mestni park in Fazanerija) 21 popisnih ploskev ter v Ljutomeru na dveh zelenih površinah (Mestni park in Park Rudolfa Maistra) 4 popisne ploskve. Število popisnih ploskev je sorazmerno z velikostjo območja. Popisne ploskve so bile načrtovane od zunanjega roba zelene površine v notranjost in obsegajo v dolžino 100 m ter v širino 10 m. Razdalja med popisnimi ploskvami znotraj posamezne zelene površine je bila 100 m. Na popisnih ploskvah smo vzorčili lesne vrste in pri tem zbrali podatke o številu/gostoti osebkov lesnih vrst (GOLV). Za nadalje analize smo obravnavali le lesne vrste s številom (frekvenco) več kot pet ( $n = 27$  lesnih vrst). Za vse popisane lesne vrste smo v bazi LEDA [32] pridobili podatke o dveh morfološko-funkcionalnih potezah (MFP): specifična listna površina - SLA ( $\text{mm}^2/\text{mg}$ ) in vsebnost suhe snovi v listih - LDMC ( $\text{mg}/\text{g}$ ). Vsaki popisni ploskvi smo pripisali: tip zelene površine (TZP); povprečno vrednost MFP za vsebnost suhe snovi v listih (CWM\_LDMC) in specifično listno površino (CWM\_SLA); povprečno temperaturo tal popisne ploskve ( $^{\circ}\text{C}$ ) (T) in velikost zelene površine ( $\text{m}^2$ ) (površina). Zelene površine smo kategorizirali bodisi v tip mestni gozd (1) ali mestni parki (2). Velikost zelenih površin smo izračunali s pomočjo satelitskih podob v programskem okolju ArcGIS [33]. Za izračun povprečne temperature tal za 94 popisnih ploskev smo iz spletne baze EarthExplorer [34] pridobili brezoblačno podobo satelita Landsat 8 za dan 24. 6. 2021. Na podlagi termičnih spektralnih kanalov satelitske podobe (10 in 11) smo v programu TerrSet [35] pripravili termogram, iz katerega smo nato v programu ArcGIS [33], z uporabo orodja Zonal Statistics, izračunali povprečno vrednost temperature tal za vsako popisno ploskev.

Da bi ocenili intenziteto hladilnega učinka zelenih površin v obravnavanih urbanih sistemih, smo v nadaljevanju izračunali tudi povprečno vrednost temperature tal izven 94 popisnih ploskev, in sicer v osmih 30-metrskih pasovih v smeri urbane strukture. V omenjenih pasovih smo določili tudi lokalne podnebne cone (*ang. Local Climate Zones* [LCZ], povzeto po Stewart in Oke (2012) [36]). Lokalna podnebna območja obsegajo po Stewartu in Okeju (2012) [36] 17 kategorij, ki so razdeljene na tipe zazidave in pokritost tal. Od desetih (10) kategorij tipa zazidave so se v našem

primeru pojavile naslednje kategorije: odprte površine s srednje visokimi stavbami (3–9 nadstropij) (TZ1); odprte površine s srednje nizkimi stavbami (do 3 nadstropja) (TZ2); strnjene srednje visoke stavbe (3–9 nadstropij) (TZ3); strnjena naselja s stanovanjskimi hišami (TZ4) in kategorija, kjer ni prisotnih stavb (TZ5). Pokritost tal smo kategorizirali v: gozd (GZ1); zelenice/travniki (GZ2); gole ali asfaltne površine (GZ3); mozaik zelenic in golih ali asfaltnih površin (GZ4).

### 2.3 Analiza podatkov

S pomočjo izračunanih povprečnih vrednosti temperature tal v in izven popisnih ploskev smo (po vzoru Du idr. (2016) [37] ter Yan idr. (2021) [38]) izračunali naslednje indekse: intenzivnost hlajenja (*ang. Cooling Intensity*, IntH), obseg hlajenja (*ang. Cooling Extent*, ObsegH) in stopnjo hlajenja (*ang. Cooling Lapse*, StopnjaH). Intenzivnost hlajenja smo izračunali tako, da smo zabeleženi maksimalni vrednosti temperature tal v osmih pasovih izven zelene površine odšteli od povprečne temperature tal pripadajoče popisne ploskve znotraj zelene površine. Obseg hlajenja predstavlja razdaljo od zelene površine, kjer je bila zabeležena najvišja temperatura tal. Stopnjo hlajenja smo izračunali kot smerni koeficient linearnega trenda spremenljivke temperature tal vseh osmih odsekov skupaj s povprečno temperaturo tal obravnavane zelene površine, in tako dobili spremembo temperature tal na vsakih 100 m.

Za MFP SLA in LDMC smo izračunali srednje vrednosti MFP za posamezno popisno ploskev. Najprej smo izračunali delež pojavljanja posamezne lesne vrste na popisno ploskev. Nato smo zmnožili dve matriki (matrika 1: popisna ploskev in deleži lesnih vrst; matrika 2: SLA in LDMC posamezne lesne vrste) in oblikovali rezultat (matriko) s 94 popisnimi ploskvami in pripadajočimi srednjimi vrednostmi posamezne MFP (CWM\_SLA in CWM\_LDMC).

Parametre opisne statistike vrstne sestave za posamezno zeleno površino smo izračunali s programsko opremo Microsoft Office Excel [39]. Preostale, kompleksnejše statistične analize smo opravili v programskem okolju R [40]. Tako smo povezanost prediktorskih (neodvisnih) spremenljivk (GOLV; GZ, TZ, CWM\_LDMC, CWM\_SLA, TZP, površina) preverili s Spermanovim koeficientom korelacije. S t-preizkusom smo ugotavljali ali so razlike med tipom zelenih površin glede na kazalec intenzivnost hlajenja. Potencialne razlike med kategorijami

pokritosti tal in intenzivnostjo hlajenja smo preverjali z analizo variance (ANOVA) ter pripadajočim post-hoc preizkusom (Tukey). V nadaljevanju smo vpliv prediktorskih spremenljivk (tip zelene površine (mestni gozd, mestni park)), površina zelene površine (povrsina\_log); število/gostota osebkov lesnih vrst (GOLV); CWM\_SLA in CWM\_LDMC in pokritost tal (GZ)) na intenzivnost hlajenja analizirali s pomočjo posplošenih linearnih modelov. Ustreznost in kakovost modela smo preverili tudi z gradnjo posplošenega aditivnega modela z enakimi karakteristikami in preizkusom napredka ob upoštevanju nelinearnih zvez med odvisno (IntH) in neodvisnimi spremenljivkami (povrsina\_log, GOLV, CWM\_SLA, CWM\_LDMC, tip zelene površine in GZ).

### 3 Rezultati

#### 3.1 Vrstna sestava

Na 94 popisnih ploskvah smo določili skupaj 44 različnih lesnih vrst, od teh smo za analize uporabili le vrste s frekvenco več kot pet osebkov ( $n = 27$  lesnih vrst). Te pripadajo 11 družinam. Največ lesnih vrst ( $n = 5$ ) pripada družini javorovk (*Aceraceae*), sledita družini bukovke (*Fagaceae*) in borovke (*Pinaceae*) ( $n = 4$ ). Družina oljkovke (*Oleaceae*) je bila prisotna v dveh popisnih ploskvah. Pojavljajo se tudi družine s po eno lesno vrsto (divje kostanjevke, platanovke, vrbovke, bezgovke, cipresovke, lipovke in brestovke). Med 27 lesnimi vrstami smo popisali 20 listopadnih dreves in 7 iglavcev.

Najpogostejše drevesne vrste, zabeležene na popisnih ploskvah ( $n = 94$  popisnih ploskvah), so bile: navadni gaber (*Carpinus betulus*) (37 %), navadna bukev (*Fagus sylvatica*) (16 %), hrast dob (*Quercus robur*) (13 %), rdeči bor (*Pinus sylvestris*) (11 %). V nadaljevanju smo se osredotočili na primerjavo vrstne sestave obeh tipov zelenih površin (mestni gozd in mestni park). V popisnih ploskvah zelenih površin – mestni gozd smo zabeležili 25 vrst, med njimi prevladujejo: navadni gaber (*Carpinus betulus*) (37 %), navadna bukev (*Fagus sylvatica*) (18 %), hrast dob (*Quercus robur*) (14 %), rdeči bor (*Pinus sylvestris*) (13 %). Medtem ko v popisnih ploskvah zelenih površin – mestni park ( $n = 24$  lesnih vrst) prevladujejo naslednje vrste: navadni gaber (*Carpinus betulus*) (23 %), hrast dob (*Quercus robur*) (11 %), poljski javor (*Acer campestre*) (9 %), divji kostanj (*Aesculus hippocastanum*) (8 %). Rezultati najpogostejših drevesnih vrst (GOLV) sovpadajo tudi s pogostostjo pojavljanja posamezne rastlinske vrste znotraj

popisnih ploskev, kar pomeni, da so vrste enakomerno razporejene v popisnih ploskvah (Preglednica 1). Izjema so zelene površine v mestnem parku, kjer se poljski javor (40 %) pojavi v več popisih kot hrast dob (25 %).

**Preglednica 1: Najpogostejše vrste v vseh popisnih ploskvah (n = 94) in ločeno glede na tip zelene površine ter pogostost pojavljanja posamezne rastlinske vrste glede na število popisnih ploskev**

Vse popisne ploskve (n = 94) (število popisov/ % popisov)	Mestni gozd (n = 73) (število popisov/ % popisov)	Mestni park (n = 20) (število popisov/ % popisov)
<i>Carpinus betulus</i> (71/76)	<i>Carpinus betulus</i> (58/79)	<i>Carpinus betulus</i> (12/60)
<i>Fagus sylvatica</i> (47/50)	<i>Fagus sylvatica</i> (45/62)	<i>Quercus robur</i> (5/25)
<i>Quercus robur</i> (47/50)	<i>Quercus robur</i> (42/57)	<i>Acer campestre</i> (8/40)
<i>Pinus sylvestris</i> (44/47)	<i>Pinus sylvestris</i> (41/56)	<i>Aesculus hippocastanum</i> (4/20)

### 3.2 Lastnosti zelenih površin

Raziskovana območja zajemajo skupno 302 ha urbane zelene površine. Od tega mestnim gozdovom pripada 272 ha in mestnim parkom 30 ha. Intenzivnost hlajenja je največja v mestnem gozdu Stražun (4,1 °C), sledita mestna gozdova Betnava (3,9 °C) in Fazanerija (2,0 °C). Zaporedje je (z nekaj izjemami – predvsem v mestu Ljutomer) praviloma premosorazmerno z velikostjo zelene površine. To trditev potrjujeta tudi kazalca obseg hlajenja (ObsegH) in stopnja hlajenja (StopnjaH) (Preglednica 2). Največji povprečni obseg hlajenja beležimo v Mestnem parku Maribor, ki je primerljiv z obema mestnima gozdovoma (Stražun in Betnava). Pri nobeni od obravnavanih urbanih zelenih površin nismo zabeležili večjega obsega hlajenja od skupne dolžine osmih 30-merskih pasov. V mestu Ljutomer dokaj majhne zelene površine kljub temu dosegajo visoko intenziteto hlajenja, ki v povprečju sega 180 m v urbano okolico. Največjo stopnjo hlajenja na 100 metrov beležimo v največjih dveh zelenih površinah (Stražun in Betnava) v Mariboru. Sledijo Mestni park Maribor, Mestni park Ljutomer in mestni gozd Fazanerija v Murski Soboti.

**Preglednica 2: Tip zelenih površin ter intenzivnost, obseg in stopnja hlajenja**

Tip zelene površine	Poligon	Površina (ha)	IntH ( $\Delta LST$ v $^{\circ}C$ )	ObsegH (m)	StopnjaH ( $^{\circ}C/100$ m)
Mestni gozd	Maribor – Stražun	221,26	4,08	213,82	0,71
	Maribor – Betnava	30,54	3,91	221,67	0,70
	Murska Sobota – Fazanarija	20,18	2,01	145,71	0,36
Mestni park	Maribor – Mestni park	11,36	2,83	225,00	0,58
	Murska Sobota – Park	9,07	2,98	199,29	0,17
	Ljutomer – Park	3,13	2,90	180,00	0,41
	Ljutomer – Park Rudolf Maister	2,99	2,51	180,00	0,33
	Maribor – Magdalenski park	2,24	1,44	165,00	0,27
	Maribor – Trg Boris Kidrič	0,96	0,78	45,00	-0,31

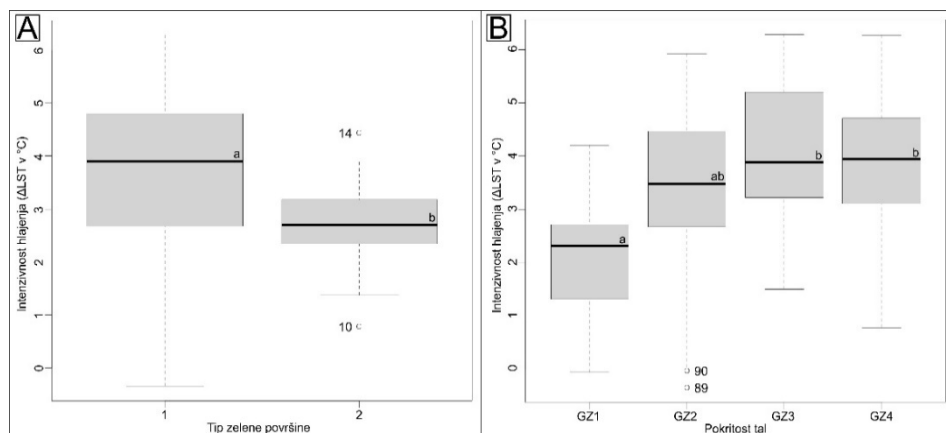
Na podlagi srednje vrednosti morfološko-funkcionalne poteze SLA se zelene površine ločijo po bodisi nižji CWM\_SLA (Stražun – 14,95; Park Rudolfa Maistra – 14,95 in Magdalenski park – 12,98) ali višji CWM\_SLA (Betnava – 21,52; Fazanarija – 21,26)). Nižje vrednosti so posledica prisotnosti vrst: jelke (*Abies alba*), malega jesena (*Fraxinus ornus*), rdečega bora (*Pinus sylvestris*), smreke (*Picea abies*) in kleka (*Thuja sp.*).

Glede na lokalne podnebne cone (tip zazidave) se v okolici mestnih gozdov največkrat pojavljajo odprte površine s srednje nizkimi stavbami (do 3 nadstropja) (TZ2) (43 %) in strnjene srednje visoke stavbe (3–9 nadstropij) (TZ3) (42 %). Ostale kategorije so zastopane v manj kot 10 %. Medtem ko mestni parki po večini mejijo na strnjene srednje visoke stavbe (35 %) (TZ3), jim sledijo odprte površine s srednje nizkimi stavbami (30 %) (TZ2) ter odprte površine s srednje visokimi stavbami (25 %) (TZ1).

### 3.3 Dejavniki intenzivnosti hlajenja

Intenzivnost hlajenja je značilno različna glede na tip zelenih površin (mestni gozd, mestni park) ( $p > \alpha$ ;  $\alpha = 0,05$ ). Večji hladilni učinek imajo mestni gozdovi. Hkrati je pomembno, kašna je okolica v neposredni bližini zelenih površin. V kolikor gre za zelene površine (gozd [GZ1], travnik [GZ2]), je učinek hlajenja manjši, v primeru golih ali asfaltnih površin (GZ3) ter mozaiku zelenic in golih ali asfaltnih površin

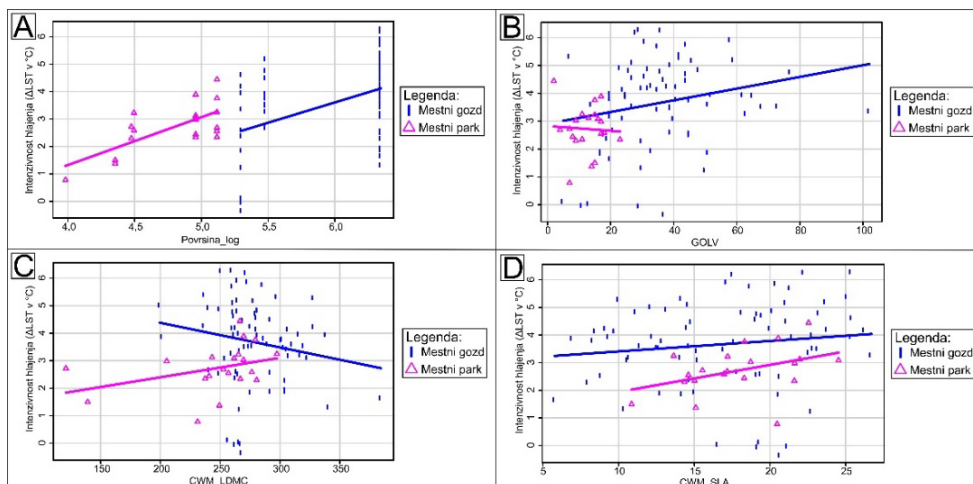
(GZ4) pa beležimo večji učinek hlajenja obravnavanih urbanih zelenih površin. Med kategorijam GZ1 in GZ2 ni značilnih razlik. Enako velja za kategoriji GZ3 in GZ4. So pa zaznavne značilne razlike med GZ1 in ostalimi kategorijami pokritosti tal po Stewartu in Okeju (2012) [36] (Slika 2).



**Slika 2: Vpliv intenzivnosti hlajenja (IntH) glede na tip zelene površine (mestni gozd (1) in mestni park (2)) (A) ali pokritost tal (B). Pokritost tal: gozd (GZ1); zelenice/travniki (GZ2); gole ali asfaltne površine (GZ3); mozaik zelenic in golih ali asfaltnih površin (GZ4)**

Faktor tip zelenih površin smo v nadaljevanju povezali tudi s preostalimi številskimi spremenljivkami (logaritem površine zelene površine, število/gostota vrst (GOLV), CWM\_LDMC in CWM\_SLA) s pomočjo razsevnih diagramov (Sliki 3A, B, C in D). Velikost zelene površine pozitivno vpliva na intenzivnost hlajenja ne glede na tip. Tudi večje število/gostota vrst v mestnih gozdovih pozitivno vpliva na intenzivnost hlajenja. Slednje ne velja v primeru mestnih parkov, kjer beležimo celo nekoliko večjo intenzivnost hlajenja pri nižjem številu/gostoti lesnih vrst. Razlike med obema tipoma zelenih površin so zaznavne tudi v zvezi CWM\_LDMC-intenzivnost hlajenja. Pri parkovnih površinah je zveza pozitivna, pri mestnih gozdovih pa negativna. Tudi srednja vrednost specifične listne površine (CWM\_SLA) vpliva na intenzivnost hlajenja pozitivno ne glede na tip zelene površine.





**Slika 3: Razsevni diagrami intenzivnosti hlajenja (IntH) glede na prediktorske spremenljivke (površino, število/gostota vrst (GOLV), CWM\_LDMC in CWM\_SLA)**

Ali predstavljene zveze (v kombinaciji z obema faktorjema (tip zelenih površin in pokritost tal)) značilno doprinesejo oziroma razlagajo intenzivnost hlajenja zelenih površin na raziskovanem območju smo preverili s posplošenim linearnim modelom. Številski povzetek slednjega v Preglednici 3 nakazuje, da na intenzivnost hlajenja značilno vpliva večina prediktorskih spremenljivk (površina (povrsina\_log); število/gostota vrst (GOLV); CWM\_SLA in CWM\_LDMC; sestoj; pokritost tal (GZ)). Najbolj vpliva velikost zelene površine, CWM\_SLA in tip zelene površine. Na intenzivnost hlajenja ne vplivata srednja vrednost vsebnosti suhe snovi v listih (CWM\_LDMC) (sicer blizu mejno značilnemu vplivu,  $p = 0,11$ ,  $\alpha = 0,05$ ) in kategorija pokritosti tal – zelenice/travniki (GZ2) (Preglednica 3). Model tudi ob upoštevanju nelinearnih zvez med odvisno spremenljivko (IntH) in zveznimi prediktorji (GOLV, CWM\_SLA in CWM\_LDMC) ne daje boljših rezultatov (napredek v vrednosti AIC ob uporabi posplošenih aditivnih modelov je neznačilen).

**Preglednica 3: Povzetek posplošenega linearnega modela z odvisno spremenljivko intenzivnost hlajena (IntH) ter neodvisnimi spremenljivkami (površina (površina\_log); število/gostota vrst (GOLV); CWM\_SLA in CWM\_LDMC; tip zelene površina (TPZ); pokritost tal (GZf))**

**Model: glm(formula = IntH ~ površina\_log +GOLV + CWM\_SLA + CWM\_LDMC + Sestoj\_f + GZf, family = gaussian(identity), data = uhi)**

Opisna statistika ostankov:

Minimum	1Q	Povprečje	3Q	Maksimum
-2,74	- 0,67	0,05	0,74	2,03

Koeficienti:

	Obeti	Std. napaka	t vrednost	Pr (>  z )	
Ostanki	-10,08	2,12	-4,75	0,00	***
Površina_log	2,02	0,30	6,60	0,00	***
Število/gostota vrst	0,02	0,01	2,43	0,02	*
CWM_SLA	0,10	0,03	3,94	0,00	***
CWM_LDMC	-0,01	0,00	-1,61	0,11	
TPZ	1,69	0,49	3,42	0,00	***
GZ_2	0,39	0,39	1,02	0,32	
GZ_3	1,07	0,43	2,52	0,01	*
GZ_4	1,01	0,34	2,96	0,00	**

Signif. kode: 0 '\*\*\*' 0,001 '\*\*' 0,01 '\*' 0,05 '.' 0,1 '.''

## 4 Diskusija

Kljub dejstvu, da so v Sloveniji mesta sicer manjša, lahko razvijejo intenziven MTO [27], [28], [41]. Pri tem so raziskave spremljanja sezonskega režima pojava MTO v izbranih mestih (Maribor, Murska Sobota in Ljutomer) razkrile premik največje intenzivnosti tega atmosferskega pojava iz zimskega v poletno obdobje, kar je sicer značilnost (sub)mediteranskih mest [41]. Ker stroka izpostavlja predvsem vlogo modro-zelene infrastrukture (zelenih in vodnih površin), ki lahko delujejo kot blažilec lokalno povišanih temperaturnih razmer [42], [43], postaja tako tudi v Sloveniji načrtovanje razmerja med pozidanimi in modro-zelenimi površinami vedno bolj pomemben vidik pri urbanem prostorskem načrtovanju [44], [45].

Rezultati naše raziskave potrjujejo večstranski pozitiven učinek urbanih zelenih površin pri blaženju toplotnega stresa, ki je posledica vzajemnega delovanja MTO in posledic podnebnih sprememb. Na prvem mestu ugotovljamo, da imajo mestni gozdovi večji hladilni učinek od mestnih parkov, kar lahko v naši raziskavi povežemo z dejstvom, da obsegajo obravnavani mestni gozdovi v primerjavi s parki večje površine (Preglednica 2). Sicer pa pravilo večja zelena površina – večji hladilni učinek

ne velja povsod. Tako npr. avtorji Jaganmahon idr. (2016) [19] v Leipzigu (Nemčija) ugotavljajo, da to pravilo drži za mestne gozdove, ne pa za mestne parke. Interakcije na nivoju zelene površine-toplotni stres so namreč zelo kompleksne in vključujejo tudi dejavnike, kot je struktura zelene površine, tako zastopanost posameznih rastlinskih vrst in/ali posameznih funkcionalnih tipov rastlinskih vrst in njihove lastnosti, kot so morfološke, anatomske, ekofiziološke, fenološke inp. [25]. Analiza števila/gostote lesnih vrst v obeh tipih urbanih zelenih površin, ki smo jih zajeli v raziskavo, je pokazala značilne razlike. Sicer oba tipa zelenih površin, tako mestni gozdovi kot mestni parki predstavljajo habitate z gozdno vegetacijo, ki ima ohranjeno vrstno sestavo, tipično za nižinska hrastovo belogabrovja, gozdove z dominantnimi vrstami hrastom dob (*Quercus robur*) in belim gabrom (*Carpinus betulus*). Pri tem imajo pričakovano bolj naravne sestoje površine mestnih gozdov, kjer se lesne vrste pojavljajo z večjo frekvenco, medtem ko se v mestnih parkih pojavlja večje število neavtohtonih parkovnih vrst, kot so divji kostanj (*Aesculus hippocastanum*), platana (*Platanus sp.*), klek (*Thuja sp.*) ... Pokazalo se je, da se z večanjem števila/gostote vrst v mestnih gozdovih povečuje pozitiven vpliv na intenzivnost hlajenja. Število/gostota vrst povezujemo s stopnjo ohranjenosti ugodnega stanja teh pol naravnih gozdnih habitatov, ki so v osnovi bogati s številom vrst. Slednje ne velja v primeru mestnih parkov, kjer beležimo celo nekoliko večjo intenzivnost hlajenja pri nižjem številu/gostoti drevesnih vrst. Prav to dejstvo nas je motiviralo, da smo v raziskavo vključili tudi vidik primerjave vrste na funkcionalnem nivoju in pri tem skušali ugotoviti, ali bi se lahko izkazalo, da je pri načrtovanju zasaditev zelenih površin v vlogi blažitve toplotnega stresa pomembno upoštevati tudi morfološko-funkcionalni potezi, povezani z lastnostmi listov rastlin, to sta specifična listna površina (SLA) in vsebnost suhe snovi v listih (LDMC). Upoštevati moramo dva vidika, ki sta si lahko tudi nasprotna. Prvi je povezan s prilagoditvijo same rastlinske vrste na razmere povečanega toplotnega stresa. Specifična listna površina je indikator debeline listov (SLA, mm<sup>2</sup>/mg, je v negativni korelaciji z debelino lista), ki je pogosto zmanjšana ob sušnih razmerah [46]. Zmanjšanje SLA v sušnih pogojih je lahko posledica odziva fotosinteze in površine listov na sušo. Predvidevamo, da suša bolj vpliva na velikost listov kot na fotosintetsko učinkovitost. Prav tako ugotavljajo, da so nižje vrednosti CWM\_SLA prilagoditev (v našem primeru Stražun – 14,95; Park Rudolfa Maistra – 14,95 in Magdalenski park – 12,98) rastlin na bolj racionalno izrabo vode, to pa zato, ker imajo debelejši listi običajno večjo gostoto klorofila in beljakovin na enoto listne površine. Posledično imajo večjo fotosintetično učinkovitost, kot tanjši listi [47]. V naši raziskavi je višje

vrednosti za SLA (vrednosti nad 20 mm<sup>2</sup>/mg) zavzel navadni gaber (*Carpinus betulus*), ki je hkrati tudi med najbolj pogostimi vrstami na naših raziskovanih zelenih površinah. Takšne značilnosti v zgradbi listov, tipične za vrste, ki se ne spopadajo s sušnim stresom so pričakovane, če upoštevamo, da so njegov naravni habitat gozdovi na svežih in zmerno vlažnih tleh, najdemo ga tudi na poplavnih tleh. Nasprotno so nižje vrednosti za SLA (pod 10 mm<sup>2</sup>/mg) pripadale jelki (*Abies alba*), malemu jesenu (*Fraxinus ornus*), rdečemu boru (*Pinus sylvestris*), smreki (*Picea abies*) in kleku (*Thuja* sp.), ki so vse vrste, tipične za habitate, v katerih rastline doživljajo sušni stres bodisi v zimskem bodisi v poletnem obdobju. Drugi vidik naše primerjave na nivoju MFP je v povezavi z intenzivnostjo hlajenja zelenih površin, kjer se je pokazala pozitivna korelacija med naraščanjem CWM\_SLA in intenzivnostjo hlajenja ne glede na tip zelene površine. Rezultati so primerljivi z ugotovitvami avtorjev Rahman idr. (2020) o učinkovitejši evapotranspiraciji pri rastlinah z višjimi vrednostmi SLA, ki imajo tanjše liste enostavnejše oblike. Naša raziskava sugerira, da v kolikor in dokler na obravnavanih površinah in v mestih abiotiski dejavniki okolja še omogočajo uspevanje dreves, ki so prisotna tudi v naravnem okolju (beli gaber, navadna bukev), naj se v čim večjem deležu ohranjajo in dodatno sadijo v zelene površine, saj zvišujejo njihov hladilni učinek. Na drugi strani bo v prihodnje in v primeru, da bodo te drevesne vrste pričele propadati zaradi izpostavljenosti povečanemu temperaturnemu in sušnemu stresu, potrebno razmišljati o večjem deležu lesnih vrst, ki so bolj prilagojene. Zhu idr. (2020) [48] že poročajo o strategijah rastlin v urbanih okoljih, ki se na segrevanja prilagajajo z zmanjšanjem SLA, velikosti listnih rež, porusa v listni reži ter povečajo vsebnost klorofila, gostoto listnih rež in LDMC. Slednjo, vsebnost suhe snovi v listih, smo analizirali tudi v naši raziskavi. Rastline z višjimi vrednostmi LDMC so po zgradbi močnejše, kar pomeni, da so listi debelejši in z več sklerenhima, posledično so bolj prilagojene abiotiskim (npr. veter, suša) in biotskim dejavnikom [49]. LDMC vrednosti pogosto povezuje s SLA, s katero je običajno v negativni korelaciji. To se je pokazalo tudi v našem primeru, ko smo ugotovili visoke vrednosti za LDMC (nad 200 mg/g) pri iglavcih, kot so jelka, rdeči bor in smreka. Medtem ko se vrste z nižjimi vrednostmi LDMC nahajajo v produktivnem in zelo motenem okolju [50]. Nižje vrednosti (pod 200 mg/g) imata bezeg in lipovec.

Intenzivnost hlajenja, ki smo jo ugotavljali, je značilno različna tudi glede na okolico v neposredni bližini zelenih površin oziroma od tipa pokritosti okolice zelene površine. Večja stopnja zazidave v neposredni bližini pomeni tudi večjo intenzivnost hlajenja, in tako smo največji učinek izmerili v primeru golih ali asfaltnih površin. Sicer so lastnosti samih zelenih površin pomembnejše od lastnosti neposredne okolice, kar sovпада z ugotovitvami Jaganmahon idr. (2016) [19].

Povzamemo lahko, da je podrobnejša analiza dejavnikov vpliva hladilnega učinka urbanih zelenih površin v naši raziskavi razkrila značilen vpliv: (1) velikosti zelene površine, (2) števila/gostote lesnih vrst in vezanih morfološko-funkcionalnih potez (predvsem SLA) (3), tipa zelene površine in pokritosti tal neposredne okolice. Pogostejši, intenzivnejši in dlje trajajoči vročinski valovi so nova realnost v vse toplejši atmosferi [51], [52]. Še več, po napovedih klimatologov se bomo v prihodnje soočali z bistveno večjo variabilnostjo ekstremnih vremenskih pojavov [1]. Ker sočasno narašča tudi število prebivalcev [53], ki so po večini vezani na urbane sisteme [53], ni presenetljivo, da so v naraščanju tudi raziskave na tematiko toplotne obremenitve urbanih okolij, kot jo obravnavamo v pričujoči študiji. Dobro umeščene zelene površine lahko razčlenijo sicer homogeno temperaturno polje nad pozidanimi površinami mest, še slasti ob nastopu vročinskih valov. Pri tem pa načrtovanje novih zelenih površin v strnjeni strukturi evropskih mest vsekakor ni enostavna naloga. Pri implementaciji slednjega je potrebno sodelovanje številnih strok in deležnikov s skupnim interesom, usmerjenim k zagotavljanju čim večje kakovosti bivalnega okolja in trajnostnega razvoja v urbanih sistemih.

## Zahvale

Študijo so omogočili: Projekt »RAZVOJ RAZISKOVALNE INFRASTRUKTURE ZA MEDNARODNO KONKURENČNOST SLOVENSKEGA RRI PROSTORA – RI-SI-LifeWatch« (projekt sofinancirata Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport Republike Slovenije in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj), programska skupina P1-0403 (»Računsko intenzivni kompleksni sistemi«) in programska skupina P6-0372 (»Slovenska identiteta in kulturna zavest v jezikovno in etnično stičnih prostorih v preteklosti in sedanjosti«).

## Literatura

- [1] IPCC, „AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis“, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Synthesis Report, 2021. Pridobljeno: 27. februar 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [2] J. Li, X. Wang, X. Wang, W. Ma, in H. Zhang, „Remote sensing evaluation of urban heat island and its spatial pattern of the Shanghai metropolitan area, China“, *Ecological Complexity*, let. 6, št. 4, Art. št. 4, 2009.
- [3] G. P. Kenny in A. D. Flouris, „The human thermoregulatory system and its response to thermal stress“, v *Protective clothing: managing thermal stress*, F. Wang in C. Gao, Ur. Elsevier, 2014, str. 319–365.
- [4] P. J. Landrigan *idr.*, „The Lancet Commission on pollution and health“, *The Lancet*, let. 391, št. 10119, Art. št. 10119, feb. 2018, doi: 10.1016/S0140-6736(17)32345-0.
- [5] Y. Zhou, A. C. G. Varquez, in M. Kanda, „High-resolution global urban growth projection based on multiple applications of the SLEUTH urban growth model“, *Sci Data*, let. 6, št. 1, Art. št. 1, dec. 2019, doi: 10.1038/s41597-019-0048-z.
- [6] N. Čeplová, V. Kalusová, in Z. Lososová, „Effects of settlement size, urban heat island and habitat type on urban plant biodiversity“, *Landscape and Urban Planning*, let. 159, str. 15–22, 2017.
- [7] C. Heaviside, H. Macintyre, in S. Vardoulakis, „The urban heat island: implications for health in a changing environment“, *Curr. Environ. Health Rep.*, let. 4, št. 3, Art. št. 3, 2017.
- [8] S. A. Lowe, „An energy and mortality impact assessment of the urban heat island in the US“, *US Environ. Impact Assess. Rev.*, let. 56, str. 139–144, jan. 2016, doi: 10.1016/j.ciar.2015.10.004.
- [9] C. Heaviside, S. Vardoulakis, in X.-M. Cai, „Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK“, *Environmental health*, let. 15, št. 1, Art. št. 1, 2016, doi: <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0100-9>.
- [10] T. R. Oke, „The energetic basis of the urban heat island“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, let. 108, str. 1–24, 1982.
- [11] N. B. Grimm *idr.*, „Global Change and the Ecology of Cities“, *Science*, let. 319, št. 5864, Art. št. 5864, feb. 2008, doi: 10.1126/science.1150195.
- [12] M. Roth, „Effects of cities on local climates“, Kitakyushu, Japan, 2002, let. 33, str. 23–25.
- [13] N. Shishegar, „The impact of green areas on mitigating urban heat island effect: A review“, *International journal of environmental sustainability*, let. 9, št. 1, Art. št. 1, 2014.
- [14] EEA (European Environment Agency), „Urban adaptation to climate change in Europe. Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies“, *EEA Report, No. 2/2012*, 2012.
- [15] G. Prokop, H. Jobstmann, in A. Schonbauer, „Overview of best practices for limiting soil sealing or mitigating its effects in EU-27“, Environment Agency Austria, 2011.
- [16] N. Frantzeskaki, „Seven lessons for planning nature-based solutions in cities“, *Environ. Sci. Policy*, let. 93, str. 101–111, mar. 2019, doi: 10.1016/j.envsci.2018.12.033.
- [17] M. Taleghani, „Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies-A review“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, let. 81, str. 2011–2018, 2018.
- [18] J. K. N. Tan, R. N. Belcher, H. T. W. Tan, S. Menz, in T. Schroeffer, „The urban heat island mitigation potential of vegetation depends on local surface type and shade“, *Urban Forestry & Urban Greening*, let. 62, str. 127128, 2021.
- [19] M. Jaganmohan, S. Knapp, C. M. Buchmann, in N. Schwarz, „The Bigger, the Better? The Influence of Urban Green Space Design on Cooling Effects for Residential Areas“, *J. Environ. Qual.*, let. 45, št. 1, Art. št. 1, jan. 2016, doi: 10.2134/jeq2015.01.0062.
- [20] X. D. Xiao, L. Dong, H. Yan, N. Yang, in Y. Xiong, „The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park“, *Sustainable Cities and Society*, let. 40, str. 428–439, jul. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.04.002.

- [21] N. Schwarz, U. Schlink, U. Franck, in K. Großmann, „Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators—An application for the city of Leipzig (Germany)“, *Ecol. Indic.*, let. 18, str. 693–704, 2012.
- [22] D. Richards, T. Fung, R. Belcher, in P. Edwards, „Differential air temperature cooling performance of urban vegetation types in the tropics“, *Urban For. Urban Green.*, let. 50, str. 126651, apr. 2020, doi: 10.1016/j.ufug.2020.126651.
- [23] R. Berry, S. J. Livesley, in L. Aye, „Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature“, *Build. Environ.*, let. 69, str. 91–100, nov. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.07.009.
- [24] L. Shashua-Bar, D. Pearlmutter, in E. Erell, „The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment: influence of trees and grass on outdoor thermal comfort“, *Int. J. Climatol.*, let. 31, št. 10, Art. št. 10, avg. 2011, doi: 10.1002/joc.2177.
- [25] Y.-H. Lin in K.-T. Tsai, „Screening of tree species for improving outdoor human thermal comfort in a Taiwanese city“, *Sustainability*, let. 9, št. 3, Art. št. 3, 2017.
- [26] M. J. Yates, G. Anthony Verboom, A. G. Rebelo, in M. D. Cramer, „Ecophysiological significance of leaf size variation in Proteaceae from the Cape Floristic Region: *Leaf size variation in Proteaceae*“, *Functional Ecology*, let. 24, št. 3, Art. št. 3, jun. 2010, doi: 10.1111/j.1365-2435.2009.01678.x.
- [27] D. Ivajnsič, M. Kaligarič, in I. Žiberna, „Geographically weighted regression of the urban heat island of a small city“, *Applied Geography*, let. 53, str. 341–353, sep. 2014, doi: 10.1016/j.apgeog.2014.07.001.
- [28] D. Ivajnsič in I. Žiberna, „The effect of weather patterns on winter small city urban heat islands“, *Meteorol Appl.*, let. 26, št. 2, Art. št. 2, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/met.1752>.
- [29] Medobčinski uradni vestnik, „Odlok o razglasitvi naravnih znamenitosti občine Maribor“. Medobčinski uradni vestnik, 1992.
- [30] B. Sever, *Pomurje A-Ž: priručnik za popotnika in poslovnega človeka*. Pomurska založba, 1993.
- [31] ESRI, „World Imagery“, 2022. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9> (pridobljeno 3. februar 2022).
- [32] M. Kleyer *idr.*, „The LEDA Traitbase: a database of life-history traits of the Northwest European flora“, *Journal of Ecology*, let. 96, št. 6, Art. št. 6, nov. 2008, doi: 10.1111/j.1365-2745.2008.01430.x.
- [33] ESRI, *ArcGIS Desktop: Release 10.8*. Redlands, Californija: Environmental Systems Research Institute, 2020.
- [34] USGS, „EarthExplorer“, 2022. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [35] J. R. Eastman, *TerrSet*. Worcester: Clark University, 2020.
- [36] I. D. Stewart in T. R. Oke, „Local climate zones for urban temperature studies“, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, let. 93, št. 12, Art. št. 12, 2012.
- [37] H. Du, X. Song, H. Jiang, Z. Kan, Z. Wang, in Y. Cai, „Research on the cooling island effects of water body: A case study of Shanghai, China“, *Ecol. Indic.*, let. 67, str. 31–38, 2016.
- [38] L. Yan, W. Jia, in S. Zhao, „The Cooling Effect of Urban Green Spaces in Metacities: A Case Study of Beijing, China’s Capital“, *Remote Sensing*, let. 13, št. 22, Art. št. 22, nov. 2021, doi: 10.3390/rs13224601.
- [39] Microsoft, *Microsoft Office Excel*. Washington: Microsoft, 2016.
- [40] R Core Team, *R: A language and environment for statistical computing*. Dunaj, Avstrija: R Foundation for Statistical Computing, 2021. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.R-project.org>
- [41] I. Žiberna *idr.*, „The Impact of Climate Change on Urban Thermal Environment Dynamics“, *Atmosphere*, let. 12, št. 9, Art. št. 9, 2021.
- [42] R. Spronken-Smith in T. Oke, „The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates“, *Int. J. Remote Sens.*, let. 19, št. 11, str. 2085–2104, 1998.
- [43] H.-A. Choi, W.-K. Lee, in W.-H. Byun, „Determining the effect of green spaces on urban heat distribution using satellite imagery“, *Asian J. Atmos. Environ.*, let. 6, št. 2, str. 127–135, 2012.

- [44] H. Upmanis, I. Eliasson, in S. Lindqvist, „The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden)“, *Int. J. Climatol.*, let. 18, št. 6, str. 681–700, 1998.
- [45] G. L. Feyisa, K. Dons, in H. Meilby, „Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa“, *Landsch. Urban Plan.*, let. 123, str. 87–95, 2014.
- [46] L. F. M. Marcelis, E. Heuvelink, in J. Goudriaan, „Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review“, *Sci. Hort.*, let. 74, št. 1–2, Art. št. 1–2, 1998.
- [47] P. Q. Craufurd, T. R. Wheeler, R. H. Ellis, R. J. Summerfield, in J. H. Williams, „Effect of temperature and water deficit on water-use efficiency, carbon isotope discrimination, and specific leaf area in peanut“, *Crop Sci.*, let. 39, št. 1, Art. št. 1, 1999.
- [48] J. Zhu *idr.*, „Effect of simulated warming on leaf functional traits of urban greening plants“, *BMC Plant Biology*, let. 20, št. 1, Art. št. 1, dec. 2020, doi: 10.1186/s12870-020-02359-7.
- [49] S. Škornik in N. Pipenbaher, „Primerjava funkcionalnih potez dominantnih in podrejenih rastlinskih vrst v suhih travniških asociacije Scabioso hladnikianae-Caricetum humilis v Sloveniji“, *Hladnikia*, let. 41, str. 26–41, 2018.
- [50] J. Cornelissen *idr.*, „A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide“, *Australian journal of Botany*, let. 51, št. 4, str. 335–380, 2003.
- [51] I. Žiberna, „Trendi vodne bilance v severovzhodni Sloveniji v obdobju 1961–2016“, *V: Geografije Podravja. Prostori. Univerzitetna založba. Univerza v Mariboru. Maribor*, 2017.
- [52] T. Pogačar, M. Zalar, in L. Kajfež Bogataj, „Vročinski valovi v povezavi z zdravjem in produktivnostjo“, *Univ. J. Math*, let. 30, str. 151–160, 2016.
- [53] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, „Population Division (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Online Edition“, 2018. <https://population.un.org/wup/Download/> (pridobljeno 15. februar 2021).



# SPREMENLJIVOST DOLŽINE RASTNE SEZONE IN TERMALNEGA ČASA V MARIBORU V OBDOBJU 1971-2020

ZALIKA ČREPINŠEK,<sup>1</sup> TJAŠA POGAČAR,<sup>1</sup>  
BELA KOBULNICZKY,<sup>2</sup> LUČKA KAJFEŽ-BOGATAJ,<sup>1</sup>  
NATAŠA PIPENBAHER,<sup>3</sup> IGOR ŽIBERNA,<sup>4</sup>  
DANIJEL IVAJNSIČ<sup>4,3</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Ljubljana, Slovenija  
zaliza.crepinsek@bf.uni-lj.si, tjasa.pogacar@bf.uni-lj.si

<sup>2</sup> Univerza Babeş-Bolyai, Fakulteta za geografijo, Cluj-Napoca, Romunija  
bela.kobulniczky@ubbcluj.ro

<sup>3</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija  
natas.pipenbaher@um.si, dani.ivajnsic@um.si

<sup>4</sup> Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Maribor, Slovenija  
igor.ziberna@um.si, dani.ivajnsic@um.si

**Sinopsis** Slovenija kljub manjšim mestom ni izjema pri pojavu mestnih toplotnih otokov. Ob višjih temperaturah zraka je v mestih spremenjena tudi vodna bilanca, oboje skupaj pa vpliva na rastne razmere rastlin. Za Maribor smo od leta 1971 do leta 2020 po treh obdobjih in kot celoto analizirali povprečne dnevne temperature zraka, začetek, konec in dolžino rastne sezone ter termalni čas pri različnih temperaturnih pragovih (0, 5 in 10 °C). V celotnem obdobju je bila povprečna letna temperatura zraka 10,9 °C, trend naraščanja je statistično značilen (0,46 °C/10 let). Pri temperaturnem pragu 5 °C se je rastna sezona v povprečju začela 8. marca in končala 20. novembra, trajala je 257 dni. Variabilnost med leti je zelo velika (SD = 21 dni), značilen trend dolžine rastne sezone (1,4 dni/10 let) lahko pripišemo tako zgodnejšemu začetku (4 dni) kot poznejšemu koncu (3 dni). Termalni čas je za vse tri temperaturne pragove največji v zadnjem obdobju (1991–2020), za prag 10 °C pa je bilo relativno povečanje največje. Vplive spremenjenih toplotnih razmer na fenološki razvoj moramo upoštevati pri strategijah prilagajanja na podnebne spremembe.

## Ključne besede

rastna sezona,  
termalni čas,  
temperatura praga,  
časovna analiza,  
trend,  
Maribor

# GROWING SEASON LENGTH AND THERMAL TIME VARIABILITY IN MARIBOR BETWEEN 1971-2020

ZALIKA ČREPINŠEK,<sup>1</sup> TJAŠA POGAČAR,<sup>1</sup>  
BELA KOBULNICZKY,<sup>2</sup> LUČKA KAJFEŽ-BOGATAJ,<sup>1</sup>  
NATAŠA PIPENBAHER,<sup>3</sup> IGOR ŽIBERNA,<sup>4</sup>  
DANIJEL IVAJNŠIČ<sup>4,3</sup>

<sup>1</sup> University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Ljubljana, Slovenia  
zalika.crepinsek@bf.uni-lj.si, tjasa.pogacar@bf.uni-lj.si

<sup>2</sup> Babes-Bolyai University, Faculty of Geography, Cluj-Napoca, Romania  
bela.kobulniczky@ubbcluj.ro

<sup>3</sup> University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia  
natasa.pipenbahr@um.si, dani.ivajnsic@um.si

<sup>4</sup> University of Maribor, Faculty of Arts, Maribor, Slovenia  
igor.ziberna@um.si, dani.ivajnsic@um.si

**Abstract** Despite the small size of Slovenian cities, urban heat islands are still common. In addition to higher temperatures, the water balance in cities has also changed, and both together affect the growing conditions of plants. We have analyzed the average daily air temperatures, the beginning, end and length of the growing season and the thermal time at different temperature thresholds (0, 5 and 10°C) in Maribor, from 1971 to 2020, using three and the whole period. Throughout the period, the average annual air temperature was 10.9 °C, and the upward trend is statistically significant (0.46°C/10 years). At a temperature threshold of 5°C, the growing season began, on average, on March 8 and ended on November 20, lasting 257 days. Variability between years is very high (SD = 21 days); the significant growing season length trend (1.4 days/10 years) can be attributed to both the early beginning (4 days) and the later end (3 days). The thermal time for all three temperature thresholds was the highest in the most recent period (1991–2020); for the 10°C threshold, the relative increase was the largest. The effects of changed thermal conditions on phenological development must be considered in climate change adaptation strategies.

**Keywords:**

growing season,  
growing degree  
days,  
base temperature,  
temporal analysis,  
trend,  
Maribor

## 1 Uvod

Urbanizacija je eden največjih okoljskih izzivov, s katerimi se soočamo v zadnjih desetletjih. Zaradi zgoščene pozidave in odpadne toplote zaradi človekovih dejavnosti prihaja v urbanih območjih do sprememb površinskega albeda (odbojnosti), in s tem sevanja [1]. Posledično je spremenjena energijska bilanca, kar povzroča, da temperature na teh območjih presegajo temperature okoliškega podeželja [2]. Pojav imenujemo mestni toplotni otok (MTO). Spremembe lokalnega in regionalnega podnebja zaradi urbanega toplotnega otoka so v zadnjih letih zaradi vse večjega števila mestnih prebivalcev in pomembnega vpliva na zdravje postale vse pogostejša tema raziskav [3].

V Sloveniji je bilo v zadnjih letih narejenih nekaj raziskav o vplivu mestnega toplotnega otoka, največ v dveh največjih slovenskih mestih – Ljubljani in Mariboru [4]–[7]. Poleti je temperatura zraka v glavnem mestu v primerjavi z okolico v povprečju višja za 1,8 °C, najvišje temperaturne razlike pa so od 4 °C [5] do celo 9 °C [8]. Še posebej poletne noči ostajajo vroče [5]. Območja z višjo povprečno temperaturo so koncentrirana v industrijskih conah in nakupovalnih središčih [8], v središču Ljubljane ter ob njenih glavnih prometnih vpadnicah [6], [9]. V Ljubljani so v okviru projekta UHI (Urban Heat Island), v katerem je sodelovalo 18 partnerjev iz srednje Evrope, oblikovali tudi spletni atlas (UHI atlas). Orodje za predstavitev različnih dejavnikov za pojav mestnega toplotnega otoka [10]. V Mariboru po pregretosti izstopajo območja z večjimi stavbami (industrijska cona, večja trgovska središča), kjer so lahko temperature tudi do 4 °C višje od bližnje nepozidane okolice [7], [11]. Tudi projekcije na osnovi uporabe podnebnih scenarijev za Maribor kažejo, da se bo intenziteta MTO še stopnjevala, možno tudi za do 60 % (> 0,5 °C), predvsem v južnem industrijskem predelu mesta [7]. Značilnosti mestne klime, in s tem MTO, se pojavljajo tudi v manjših slovenskih mestih. Ivajnšič (2010) [12] je proučeval toplotni otok Ljutomera, ki je bil največji in najintenzivnejši v anticiklonalnem vremenskem tipu, ko je povprečna temperaturna razlika med mestnim jedrom in okolico znašala 2,0 °C; najmanjši in najmanj izrazit pa je bil ob ciklonalnem vremenskem tipu, ko so bile temperaturne razlike med mestom in njegovo okolico le okrog 0,3 °C. Pojav MTO v Novem mestu je prisoten predvsem v jutranjih in večernih urah ob anticiklonalnem vremenu, v obdobju od decembra do marca je povprečna razlika med centrom mesta in obrobjem znašala okrog 1 °C [13], večje so razlike pomladi in poleti, okrog 2 °C [4]. Za obdobje 1986 do 2018 so

ugotovili, da je bil MTO značilen v vseh osmih, po površini največjih slovenskih mestih: Ljubljani, Mariboru, Celju, Kranju, Kopru, Velenju, Novem mestu in Ptujju – najizrazitejši je v pomladnem in poletnem času in znaša povprečno od 2 do 3 °C [4].

Ob spremenjenih temperaturah v mestih je spremenjena tudi vodna bilanca, kar je posledica spremenjenih lastnosti površja. Meteorna voda zaradi več asfaltnih in betonskih površin odteka hitreje, zaradi manj vegetacije je zmanjšana evapotranspiracija, in s tem sta manjši tudi absolutna in relativna zračna vlaga [14]. Spremenjene toplotne in vodne razmere zaradi MTO že vplivajo na mestno zeleno infrastrukturo, ki je zelo pomembna pri zagotavljanju številnih ekosistemskih storitev, kot so zniževanje temperature, zmanjšanje onesnaženosti, ponor ogljika, zagotavljanje ustreznih bivalnih razmer in ohranjanje biotske raznovrstnosti [15], [16]. Številne raziskave so potrdile, da so razvojne stopnje rastlin, fenološke stopnje, v mestnem okolju značilno spremenjene glede na bližnje, neurbano okolje [17]. Na osnovi močne korelacije med temperaturo in časom fenoloških stopenj rastlin fenološka opazovanja zagotavljajo razmeroma poceni in enostavno sredstvo za časovno in prostorsko analizo MTO. Ob tem raziskave urbane fenologije kot bioindikatorja podnebnih sprememb [18] omogočajo oceno fenoloških trendov iz trenutnih informacij, saj lahko mesta s svojimi povišanimi temperaturami služijo kot približek za prihodnje razmere, urbana okolja pa kot terenski laboratoriji za preučevanje učinkov segrevanja na bioto [2]. Razmeroma redke so raziskave vpliva MTO na fenološke stopnje živali, še najpogosteje gre za raziskave spremenjenih vzorcev razvoja pri žuželkah [19]. Vplivi urbanizacije in podnebnih sprememb na ekosisteme so razmeroma dobro raziskani, vendar je gonilne sile teh sprememb pogosto težko ločiti drugo od druge, interakcije pa so zelo zapletene [20]. Ob neposrednih meritvah in-situ uporabljajo za raziskave vpliva urbanizacije na vegetacijo vse bolj tudi satelitske posnetke [7], [21], [22], a so pri premajhni ločljivosti satelitskih slik lahko so učinki urbanizacije na fenologijo lahko precenjeni [23].

Urbanizacija pospešuje začetek [24], [25] in zamika konec rastne sezone [2], in tako podaljšuje dolžino rastne sezone [22], [26]). Številne raziskave so potrdile, da MTO vpliva na do 10 dni zgodnejši začetek rastne dobe v urbanih predelih glede na bližnjo neurbano območje, npr. za Peking [27], mesta v delti reke Yangtze [28] in številna druga velemesta [29], [30]. Razlike v pričetku rastne sezone so zelo vezane na stopnjo vegetacije v mestih, gostoto naseljenosti urbanih predelov ter nočne temperature v

mestih [31]. Zamik rastne sezone glede na MTO jeseni kaže manjše razlike. Ding idr. (2020) [28] so v raziskavi ugotovili 7 dni kasnejši konec rastne sezone v mestnih območjih v primerjavi z bližnjimi podeželskimi, Meng idr. (2021) [27] ter Zhou idr. (2016) [30] 4 do 5 dni zakasnen zaključek rastne dobe, ponekod so te razlike minimalne in neznčilne [29]. Nasprotno nekatere raziskave kažejo na zelo velike razlike tudi v jesenskih fenofazah. Jesensko rumenenje listja v Seulu je v centru mesta, za katerega je značilen močan MTO, nastopilo kar 15 dni kasneje kot v nepozidani okolici in je zelo povezano z nočnimi temperaturami zraka [31]. Zgodnejši pričetek in zakasnitev konca rastne sezone v urbanih predelih pomenita daljše trajanje rastne sezone, razlike pa so lahko precejšnje. Tako so za večje število mest v Združenem kraljestvu ugotovili 9 dni daljšo rastno sezono [32], enako povprečno podaljšanje rastne dobe je bilo značilno tudi za več kot 4.000 proučevanih mest v ZDA [33]. Ding idr. (2020) [28] ter Meng idr. (2021) [27] so ugotovili še večje razlike (od 14 do 16 dni), rastna doba v centru Bostona glede na bližnje podeželje pa je bila celo 18 do 22 dni daljša [34]. Vpliva urbanizacije na fenološke faze mestne vegetacije pa ne moremo posplošiti, saj se vpliv razlikuje tako glede na vrsto vegetacije [22] kot tudi glede na regionalno temperaturo. Rezultati raziskave Li idr. (2019) [35] kažejo, da so urbanizacija in temperaturne spremembe najbolj prizadele nižje rastline z velikimi specifičnimi listnimi površinami in zgodnjimi datumi cvetenja ali olistanja. Vpliv povišanih temperatur v urbanih predelih je večji v krajih z nižjimi temperaturami [29], [36], kar nakazuje, da se bodo spomladanske fenofaze z nadaljnjo urbanizacijo sicer pojavljale prej, vendar se bo trend v mestnih okoljih ob nadaljnjem segrevanju upočasnil [21]. Za 1 °C višje temperature spomladi lahko pospešijo začetek rastne sezone za 11 dni [29], [30], medtem ko za 1 °C toplejša jesen pomeni od 3 dni [29] do 10 dni kasnejši konec rastne dobe [30]. Velike razlike v stopnji pospešitve/zakasnitve razvoja glede na stopnjo segrevanja kažejo na to, da moramo pri urbani fenologiji ob temperaturi upoštevati tudi številne druge dejavnike, kot so obdobje nizkih temperatur, trajanje sončnega obsevanja [37], založenost tal s hranili [38], onesnaženost zraka in tal [39], bolezni in škodljivce rastlin, spremembe vodnega cikla. Večji odtok meteorne vode z urbanih površin in nižji nivo podtalnice v mestih lahko pomembno vplivata na razvojni krog rastlin [20]. Pločniki v mestih lahko tekom dneva akumulirajo veliko toplote, s tem se temperatura tal na teh območjih poveča, hkrati se zmanjša vlažnost tal, posledica je zgodnejše olistanje drevesnih vrst v mestnih drevoredih [40], [41]. Dodatno lahko vpliva na spremenjen razvoj rastlin v mestnih drevoredih tudi onesnaženost tal in zraka, kar lahko prevlada nad vplivom temperature [42]. Jochner idr. (2015) [43] so

analizirali povezanost med cvetenjem breze, leske in divjega kostanja v Münchnu ter kratkotrajnim/dolgotrajnim onesnaženjem zraka in ugotovili, da povišane koncentracije ozona, dušikovih oksidov in trdih delcev značilno zakasnijo začetek fenofaz cvetenja, korelacije so bile še posebej visoke v mestih glede na podeželje. Dokazali so, da se čas sproščanja cvetnega prahu v metropolitanskem območju zelo razlikuje in izpodbija domnevo, da so meritve cvetnega prahu na eni sami lokaciji reprezentativne za celotno mesto. Podobni so tudi rezultati raziskav Katza idr. (2019) [44], ki so ugotovili, da je znašala razlika februarских nočnih temperatur zraka med centrom in obrobjem Detroita kar 6 °C. Le okrog polovico analiziranih predelov mesta je imelo temperaturo znotraj razlike manjše od 1 °C, kar je pomenilo 4 dni razlike v cvetenju alergenih rastlin. Prisotnost vodnih teles v mestih lahko pomembno ublaži MTO s spremembo mikroklimatskih razmer okoliških kopenskih habitatov [19], [44], prav tako v mestnih parkih opažajo manjše podaljševanje rastne sezone, kar je posledica interakcije med MTO in učinkom hladnega otoka v parkih [45].

Predvsem pri preučevanju jesenskih fenofaz obarvanja in odpadanja listja moramo upoštevati tudi uporabo umetne svetlobe oziroma javne razsvetljave. Študija svetlobnega onesnaženja v mestih na Slovaškem je pokazala, da so pri vrstah Acer in Rhus jesenske fenofaze na delih krošenj pod lučmi nastopile v povprečju 13 do 22 dni kasneje, zaradi osvetlitve se je trajanje obarvanja listov podaljšalo za 6 do 9 dni, trajanje odpadanja listov pa za 6 do 7 dni [3], uporaba umetne svetlobe je značilno zakasnila tudi jesesko fenofazo obarvanja listja pri vrsti Platanus, kar nakazuje, da moramo pri načrtovanju in upravljanju javnih zelenih površin upoštevati tudi ta dejavnik [46].

Rastline v mestnih območjih so pogosto ob višjih temperaturah izpostavljene tudi povečanim koncentracijam CO<sub>2</sub>, kar povzroča pričakovane prihodnje okoljske razmere. Zaradi povečane koncentracije CO<sub>2</sub> in višje temperature na številnih urbanih območjih severne hemisfere se je fotosintetska aktivnost začela okrog 6 dni prej in končala 5 dni kasneje kot na sosednjih podeželskih območjih. Zgodnejši začetek in vrh fotosintetske aktivnosti je koreliran tako s povišanimi temperaturami kot tudi večjimi koncentracijami CO<sub>2</sub>, medtem ko je zakasnen konec aktivnosti pripisan predvsem obogatitvi ozračja s CO<sub>2</sub> [47]. Tudi projekcije na osnovi podnebnih scenarijev kažejo, da bodo rastline v urbanih predelih imele v naslednjih desetletjih podaljšano fotosintetsko sezono.

Vpliv urbanizacije, in s tem MTO, na okoliško vegetacijo sega iz mestnih jeder nekaj kilometrov daleč, razlike pa so precejšnje glede na gostoto poselitve in razmerje med pozidanimi, zelenimi in vodnimi površinami v mestu. Za večje število kitajskih urbanih regij sega vpliv MTO na fenologijo 6 km iz centra mest [26], za različno velika severno ameriška mesta v povprečju 11 km [1]; Melaas idr. (2016) [34] so ugotovili vpliv MTO na fenologijo celo 15 km daleč iz mestnega jedra.

Za ovrednotenje vpliva temperature na razvoj rastlin obstajajo številne metode, med katerimi zelo pogosto uporabljajo metodo termalnega časa (*ang. Growing Degree Days-GDD*). Le-ta temelji na kumulativnem učinku dnevni temperatur zraka v daljšem časovnem obdobju in razloži večji del variabilnosti v času razvojnih faz rastlin. Rastline za prehod iz ene razvojne faze do druge potrebujejo določeno količino toplote, ki se ne spreminja, zmožek temperature in časa za celoten razvoj v rastni dobi je vedno enak. Seštevek toplotnih enot v fenologiji izražamo s termalnim časom (GDD), to je akumuliran zmožek temperature in časa nad temperaturo praga, pri kateri se prične razvoj rastlin [48].

Zaradi višjih temperatur zraka se spreminja tudi količina toplote, ki je na voljo rastlinam za njihov razvoj [49]. Trend GDD je v Evropi pozitiven [50], še posebej izrazit je v Sredozemlju [51]. Urbana območja z MTO se v zadnjem času soočajo s spremembami GDD, kar so potrdili Krehbiel idr. (2017) [1] za večje število mest v ZDA, kjer je MTO v povprečju vplival na okrog 600 °D večji GDD nad pragom 0 °C. Ob povprečni dnevni toplotni akumulaciji 20 enot, je to pomenilo 30 dni razlike v trajanju rastne sezone. Grigorieva idr. (2010) [52] so ugotovili močno povezanost med mesečnimi temperaturami zraka od maja do septembra ter GDD, kar pomeni, da lahko uporabimo mesečne temperature kot nadomestne (proxy) podatke za izračun GDD. V tej raziskavi je trend GDD za rastno sezono nad pragom 0 °C, 5 °C 10 °C in 15 °C značilno pozitiven in največji za prag 0 °C. Večje spremembe termalnega časa nad nižjim pragom so potrdili za zadnja desetletja tudi nekateri drugi raziskovalci [49], [53]. Termalni čas so uporabili pri študijah vpliva podnebnih sprememb na spremenjene toplotne razmere [54]. Raziskave kažejo [55], da bo segrevanje pospešilo rast rastlin, na ta način se bo trajanje nekaterih fenostopenj skrajšalo, kar moramo upoštevati pri strategijah prilagajanja na podnebne spremembe. Glede na hiter tempo urbanizacije in segrevanje ozračja je razumevanje sprememb fenološkega razvoja v prihodnosti zelo pomembno, če želimo učinkovito upravljati mestne zelene površine.

Namen našega dela je proučiti spremenljivost:

- mesečnih in letne temperature zraka,
- začetka, konca in dolžine rastne sezone,
- termalnega časa nad temperaturami praga 0 °C, 5 °C in 10 °C

ter povezanost povprečne temperature zraka za rastno sezono in termalnega časa v Mariboru za obdobje 1971–2020.

## 2 Metode dela

Za izračun dolžine rastne sezone (RS) in termalnega časa (GDD) smo uporabili dnevne maksimalne in minimalne temperature zraka za postajo Maribor Tabor (275 m, 46,5394; 15,6450) za obdobje 1971–2019; za obdobje jan.–dec. 2020 pa postajo Maribor Vrbanski plato (279 m, 46,5678; 15,6260), saj se je lokacija opazovalne postaje v okviru ARSO meteorološke mreže spremenila [56]. Povprečno dnevno temperaturo smo izračunali kot  $T_{pov} = (T_{max} + T_{min}) / 2$ .

V obdobju od 1. 1. 1971 do 31. 12. 2020 za nekatera krajša obdobja podatkov o temperaturi zraka v arhivu ARSO ni na voljo (12.–16. 9. 2012, 26. 9. 2012, 20. 1.–31. 1. 2016). Manjkajoče podatke smo pridobili iz slovenske baze rekonstruiranih dnevni meteoroloških podatkov SLOCLIM [57] na mreži 1 x 1 km, uporabili smo točko s koordinatami 278m, 46,5389; 15,6466. Mreža vsebuje dnevne maksimalne in minimalne temperature zraka, iz katerih smo izračunali povprečne dnevne vrednosti. Podatki so prosto dostopni v repozitoriju Zenodo (<https://doi.org/10.5281/zenodo.410854>) in preko [www.sloclim.eu](http://www.sloclim.eu).

Za izračun dolžine letnega ravnega obdobja smo uporabili metodologijo, ki jo uporablja Agencija Republike Slovenije za okolje [58] in temelji na metodologiji ekspertne skupine za zaznavanje podnebnih sprememb in indekse ETCCDI (*ang. Expert Team on Climate Change Detection and Indices*) [59]. Dolžina rastne sezone je eden izmed standardnih podnebnih indeksov, ki ga pogosto uporabljajo za prikazovanje temperaturnih trendov.



**Dolžina letne rastne sezone** je število dni od nastopa spomladanskega in jesenskega temperaturnega praga 5 °C (TP5) in je definirana z meteorološkega vidika kot obdobje znotraj temperaturnih pragov.

**Spomladanski temperaturni prag** je prvi dan, ko je spomladi vsaj 6 dni zaporedoma povprečna temperatura zraka višja od TP5, po tem datumu pa povprečna dnevna temperatura zraka najmanj 6 zaporednih ni več nižja od TP5, s čimer izključimo vsaj 6 dni dolge zgodnje otoplitve v zimskem času.

**Jesenski temperaturni prag** je prvi dan, ko je jeseni povprečna dnevna temperatura zraka vsaj 6 dni zaporedoma nižja od TP5.

**Termalni čas** smo izračunali kot razliko med povprečno dnevno temperaturo ( $T_d$ ) in temperaturo praga (TP) za obdobje letne rastne sezone od  $i = 1$  do  $i = n$ . Akumuliran termalni čas izrazimo kot stopinjske dneve (GDD – growing degree days), pri čemer je en stopinjski dan (°D) dosežen, ko je en dan (24 ur) s temperaturo višjo za eno stopinjo od temperature praga [56].

$$GDD = \sum_{i=1}^n T_d - TP$$

Termalni čas smo izračunali za tri temperaturne prage: 0 °C (TP0), 5 °C (TP5) in 10 °C (TP10), ki se najpogosteje uporabljajo pri analizah toplotnih razmer [52], [56], [60]: 0 °C, ki označuje obdobje brez zmrzali, 5 °C, ki označuje začetek aktivne rasti večine gojenih in negojenih rastlin zmernih geografskih širin, ter 10 °C, ki označuje začetek najaktivnejšega dela rastne dobe.

Spremenljivost temperaturnih razmer v obravnavanem obdobju smo analizirali za tri desetletna obdobja: 1971–2000 (P71-00), 1981–2010 (P81-10) in 1992–2020 (P91-20). Trende smo izračunali z linearno regresijo in za statistično značilnost uporabili Mann-Kendallov statistični test, stopnja značilnosti 0,05.

Ob izračunih za lokacijo meteorološke postaje Maribor Tabor smo za rastno sezono uporabili bazo podatkov SLOCLIM [57] za izračun GDD za TP5 in TP10 v programu ClimPACT [61] za širše območje Maribora, upravno-teritorialno enoto Maribor [62]. Pri tem smo uporabili za dolžino rastne sezone poenostavljeno metodo, ki jo pogosto uporabljajo v klimatoloških analizah [52], [63], to je konstantno obdobje tople polovice leta (april–september). Za izračun in izris kart GDD smo uporabili naslednje korake:

- Povezava koordinat točk znotraj upravno-teritorialne enote Maribor s koordinatami iz baze podatkov SLOCLIM.
- Določitev točk na študijskem območju in izračun za vsako točko posebej s programom ClimPACT za TP5 in TP10.
- Interpolacija točk z vrednostmi GDD v ArcMap z orodjem IDW (Inverse Distance Weight) [64] in prikaz po ustreznih razredih za obdobja P71-00, P81-10 in P91-20.

Ker baza SLOCLIM vsebuje temperaturne podatke samo do vključno leta 2018, je zadnje prikazano obdobje na kartah GDD krajše (1991–2018).

### **3 Rezultati z diskusijo**

#### **3.1 Temperatura zraka**

Na dolžino RS in GDD v posameznem letu najbolj vplivajo temperature zraka. V proučevanem obdobju 1971–2020 je bila povprečna letna temperatura zraka v Mariboru 10,9 °C. Od prvega obdobja P71-00 do zadnjega obdobja P91-20 je z 10,5 °C narasla na 11,4 °C, trend pa je statistično značilen in znaša 0,46 °C/10 let (Preglednica 1, Slika 1). V obravnavanem obdobju so bila tri najtoplejša leta 2019 (12,6 °C), 2014 (12,4 °C) in 2018 (12,3 °C). Najhladnejša so bila leta 1978 in 1980 (9,3 °C) in 1985 (9,6 °C). Po letu 1999 (v obdobju 2000–2020) so bila le štiri leta z letnim povprečjem, nižjim od 10,9 °C, to so bila leta 2004, 2005, 2006 in 2010. V zadnjem desetletju so bila vsa leta nadpovprečno topla. Ugotovljene spremembe temperature zraka so v skladu s številnimi raziskavami drugod po svetu [65], pri čemer so trendi za Evropo in Slovenijo enaki [66], [67].

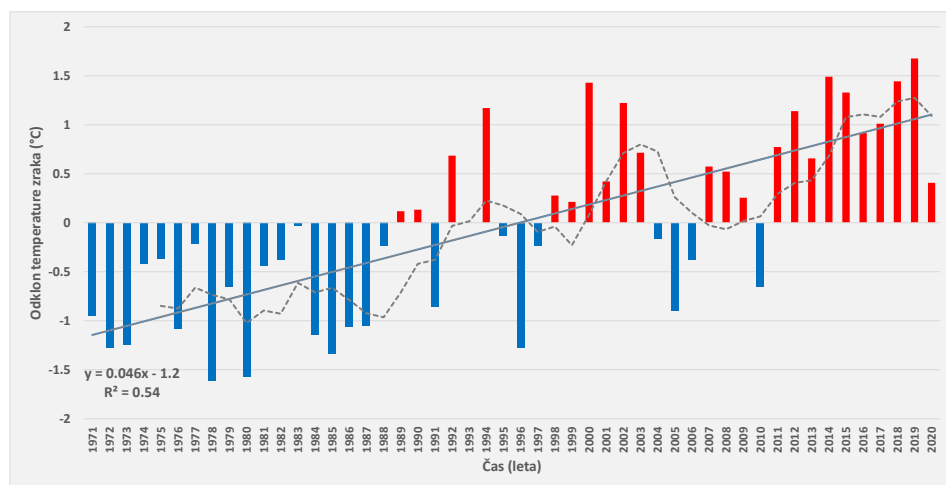
Pri obravnavi rastne sezone (RS) in potrebnega termalnega časa za nastop fenofaz je pomembno poznati tudi temperaturne razmere posameznih letnih časov. Zima (december–februar) ima za celotno obravnavano obdobje v Mariboru povprečno temperaturo zraka 1,3 °C; pomlad (marec–maj) 11,0 °C; poletje (junij–avgust) 20,2 °C in jesen 10,9 °C (september–november). Povprečna temperatura zraka vseh letnih časov je v zadnjem obdobju P91-20 višja kot v začetnem obdobju P71-00 in v celotnem obdobju P71-2020 (Slika 2). Najtoplejše pomladi v obravnavanem obdobju so bile v letih 2000 (13,1 °C), 2014 in 2017 (12,7 °C) in najhladnejši dve v letih 1987 in 1980, ko je bila povprečna pomladna temperatura le 8,6 °C. Zelo vroča so bila poletja 2003 (23,8 °C), 2019 (22,4 °C) ter 2012 in 2017 (22,3 °C). Najhladnejše je bilo poletje 1978, ko je bila temperatura kar za 6 °C nižja kot v letu 2003. Povprečna temperatura najtoplejših jeseni znaša 13,1 °C (2000, 2014 in 2019), najhladnejših dveh v letih 1972 in 1978 pa 9,0 °C in 9,1 °C. Zelo velike so razlike pri zimskih temperaturah. Tri najtoplejše zime so bile 1998, 2007 (4,2 °C) in 2020 (3,6 °C) in najhladnejša zima 1985, ko je bila povprečna temperatura kar -2,3 °C. Primerjava s podobnimi analizami za Maribor [68] kaže, da se predvsem pri ekstremno visokih temperaturah spremembe dogajajo pogosteje v zadnjih letih. Kar se tiče razlike med najvišjo in najnižjo povprečno sezonsko temperaturo, je ta največja pozimi in znaša 6,5 °C, nekoliko manjša je poleti (6 °C), razlika med najtoplejšo in najhladnejšo pomladjo je 4,5 °C in za jesen 4,1 °C.

**Preglednica 1: Povprečne mesečne in letne temperature za proučevana obdobja ter linearni trend za obdobje 1971–2020 (°C/10 let) za postajo Maribor, \*\*značilen trend pri  $p < 0,05$**

	P71-2020	P71-00	P81-10	P91-20	trend P71-2020 (°C/10 let)
jan	0,3	0,0	0,1	0,7	0,32
feb	2,3	2,1	2,0	2,7	0,30
mar	6,5	6,2	6,4	6,9	0,35**
apr	10,9	10,3	10,9	11,6	0,69**
maj	15,5	15,2	15,8	16,0	0,32**
jun	19,0	18,3	18,9	19,8	0,65**
jul	20,9	20,3	21,0	21,5	0,56**
avg	20,5	20,0	20,6	21,3	0,61**
sep	16,2	16,0	16,2	16,5	0,34**
okt	11,2	10,8	11,4	11,6	0,47**
nov	5,6	4,9	5,4	6,3	0,65**
dec	1,4	1,1	1,0	1,4	0,25
leto	10,9	10,5	10,8	11,4	0,46**

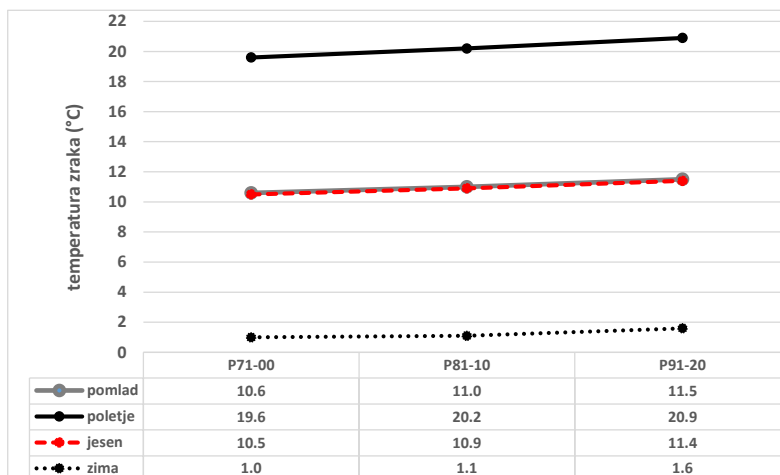
Vir podatkov: [56], [57].

Trend povprečne temperature zraka je v vseh mesecih pozitiven, vendar v zimskih mesecih statistično neznačilen. Povprečna temperatura zraka je v Mariboru v obdobju 1971–2020 naraščala najbolj poleti s trendom  $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{desetletje}$ . Največji trend temperature so za poletje za območje celotne Slovenije ugotovili že v predhodnih raziskavah za obdobje 1961–2011 [67], da poletne temperature zraka v Mariboru naraščajo, pa kažeta tudi raziskavi Žiberna in Ivajnsič (2018) [11] ter Nadbath (2019) [68]. Za zimske mesece je trend sicer pozitiven ( $0,29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ let}$ ), vendar statistično neznačilen. Značilno so se segrele tudi pomladi, izrazito mesec april, za katerega trend temperature zraka znaša  $0,69\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{desetletje}$ . Zelo podoben trend kot za pomlad smo ugotovili tudi za jesenske mesece ( $0,48\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ let}$ ). Vertačnik idr. (2013) [67], ki so proučevali podnebno spremenljivost Slovenije za obdobje 1961–2011, so sicer ugotovili tudi za jesen pozitivne trende povprečne temperature zraka, ki pa niso bili statistično značilni, znašali pa so okoli  $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ let}$  za območje vzhodne Slovenije (Starše, Veliki Dolenci, Murska Sobota Rakičan), za postajo Maribor Tabor trend ni podan.



Slika 1: Odklon letne povprečne temperature zraka od dolgoletnega povprečja 1971–2020, pripadajoč linearni trend\*\* ( $p < 0,05$ ) ter 5-letno drseče povprečje za postajo Maribor

Vir podatkov: [56], [57].



Slika 2: Povprečna temperatura zraka po letnih časih in po obdobjih, Maribor  
Vir podatkov: [56], [57].

### 3.2 Začetek, konec in dolžina rastne sezone

Spremembe temperaturnih razmer neposredno vplivajo tudi na začetek, konec in dolžino rastne sezone (RS), pri čemer je začetek in konec RS definiran s temperaturnim pragom  $TP = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Za celotno obravnavano obdobje se je RS začela v povprečju 8. marca in se končala 20. novembra, dolžina je znašala 257 dni (Preglednica 2). Spremenljivost med leti je zelo velika, standardni odklon (SD) za začetek RS znaša kar 17 dni in za konec okrog 13 dni. Glede na to je razumljiva tudi velika spremenljivost trajanja RS, SD znaša 21 dni, dolžina RS kaže veliko nehomogenost in razpršenost (Slika 3), na kar so že opozorile predhodne raziskave za Slovenijo [60].

Preglednica 2: Začetek, konec in dolžina rastne sezone s pripadajočimi standardnimi odkloni, podano kot zaporedni dan v letu in kot datum

Obdobje	Začetek RS	Konec RS	Dolžina RS (število dni)
1971–2020	67 (8. 3.) $\pm$ 17,0	324 (20. 11.) $\pm$ 13,3	257 $\pm$ 21,3
P71-00	69 (10. 3.) $\pm$ 16,6	322 (18. 11.) $\pm$ 14,4	253 $\pm$ 20,9
P81-10	68 (9. 3.) $\pm$ 17,5	324 (20. 11.) $\pm$ 14,9	256 $\pm$ 21,7
P91-20	65 (6. 3.) $\pm$ 17,5	325 (21. 11.) $\pm$ 13,1	260 $\pm$ 22,4

Vir podatkov: [56], [57].

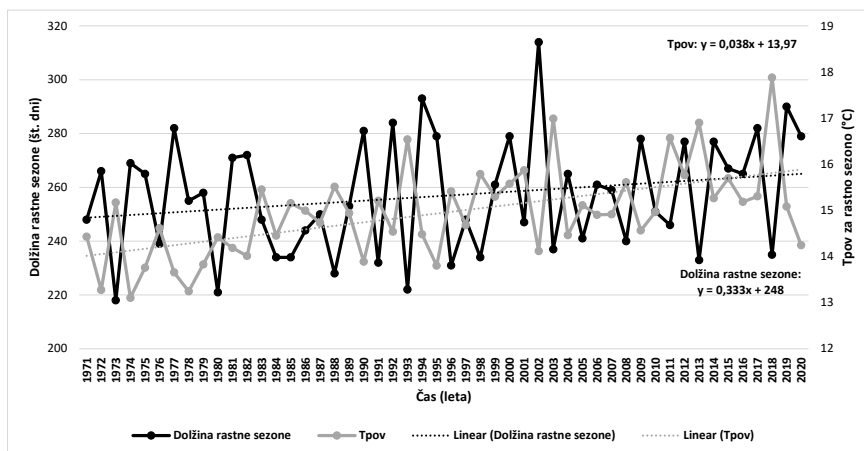
	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	avg	sep	okt	nov	dec	DRS
1971													248
1972													266
1973													218
1974													269
1975													265
1976													239
1977													282
1978													255
1979													258
1980													221
1981													271
1982													272
1983													248
1984													234
1985													234
1986													244
1987													250
1988													228
1989													253
1990													281
1991													232
1992													284
1993													222
1994													293
1995													279
1996													231
1997													248
1998													234
1999													261
2000													279
2001													247
2002													314
2003													237
2004													265
2005													241
2006													261
2007													259
2008													240
2009													278
2010													251
2011													246
2012													277
2013													233
2014													277
2015													267
2016													265
2017													282
2018													235
2019													290
2020													279

Slika 3: Dolžina rastne sezone v Mariboru v posameznih letih, prikazana s pričetkom in koncem po dekadah, v zadnjem stolpcu (DRS) je zapisana dolžina rastne sezone v številu dni

Vir podatkov: [56], [57].

V vseh treh obdobjih je bil najzgodnejši začetek RS že v mesecu januarju, v P71-00 28. januarja, v P81-10 in P91-20 pa 27. januarja. Najkasnejši začetek RS sovpada za vsa tri obdobja na 6. april, razpon med najzgodnejšim in najkasnejšim začetkom RS znaša več kot dva meseca (60 dni). Podoben razpon je značilen za konec RS, ki se je v letih 1973, 1991 in 2003 končala že 23. oktobra, v letu 1982 pa šele tik pred iztekom koledarskega leta, 22. decembra (60 dni kasneje).

Dolžina RS se je v proučevanem obdobju podaljšala za sedem dni, trend znaša 1,4 dni/10 let ( $p < 0,05$ ), sprememba pa je posledica tako zgodnejšega začetka (4 dni) kot poznejšega zaključka RS (3 dni). Podaljšanje RS so ugotovili tudi za ostale lokacije po Sloveniji, pri čemer obstajajo precejšnje razlike med posameznimi kraji. Za primerjalni obdobji 1961–1990 in 1991–2020 [60] je za Bilje pri Novi Gorici 6 dni daljša RS, za Mursko Soboto 10 dni, za Ljubljano pa kar 17 dni. Prav tako so različne mednarodne raziskave za Evropo potrdile podaljševanje letne rastne sezone [50]. Število dni s pozitivno minimalno temperaturo zraka, to so dnevi brez zmrzali, eden izmed načinov definiranja rastne sezone, je pokazala, da se je dolžina tega obdobja po letu 1992 podaljšala za okrog 10 dni. Največja sprememba (nad 0,8 dni/leto) je v severni in vzhodni Evropi, nekoliko manjša (0,6-0,8 dni/leto) pa v zahodnih in južnih predelih Evrope, pri čemer so spremembe najmanjše v Sredozemlju [69]. Za Kitajsko so Yin idr. (2019) [53] ugotovili, da so pomladi v obdobju 1960–2011 zgodnejše za 5–7 dni in jeseni kasnejše za 4–6 dni. Na Sliki 4 je prikazana povezanost med povprečno temperaturo RS ( $T_{pov}$ ) in dolžino RS v Mariboru, gre za obratno sorazmernost, korelacijski koeficient znaša -0,46. V letih z nižjimi temperaturami zraka je ponavadi RS daljša in obratno. Povezanost povprečnih temperatur in dolžine RS nakazuje možnost uporabe  $T_{pov}$  kot proxy podatka za dolžino RS ali GDD v rastni sezoni [52], hkrati je to tudi možen način projekcij sprememb dolžine RS ob projekcijah sprememb temperature.



Slika 4: Obratna sorazmernost hodov povprečne temperature rastne sezone (Tpov) in dolžine rastne sezone v obdobju 1971–2020 v Mariboru,  $r = -0,46^{**}$  ( $p < 0,05$ )

Vir podatkov: [56], [57].

### 3.3 Termalni čas za lokacijo Maribor Tabor

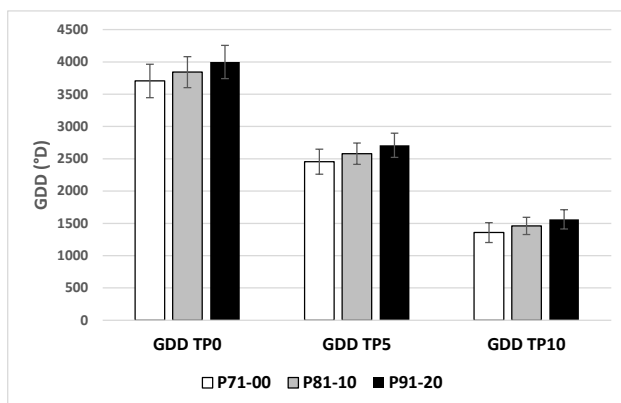
Analizo sprememb termalnega časa (GDD) smo naredili za tri temperaturne prage. V Preglednici 3 in na Sliki 5 so za proučevana obdobja podane povprečne vrednosti GDD in njihova variabilnost. GDD je za vse tri TP v zadnjem obdobju večji, relativno povečanje je največje pri TP10, znaša 15 % (206 °D), za TP5 se je vsota povečala za 10 % (254 °D) in za TP0 za 8 % (294 °D). Bolj informativen kot SD je CV, koeficient variabilnosti, ki pokaže relativno variabilnost (v %) in je izračunan kot razmerje med SD in aritmetično sredino. CV se povečuje od nižje TP (za 0 °C 6–7 %) do višje TP (za 10 °C 9–11 %), kar kaže na nezanesljivost toplotnih virov v poletnem času. Naši rezultati potrjujejo ugotovitve glede povečanja termalnega časa v zadnjem obdobju ter razlik glede spremenljivosti nad različnimi TP v številnih drugih raziskavah za Evropo [50], [51], [54] in ostala območja severne poloble [1], [52], [53].



**Preglednica 3: Termalni čas (GDD v °D) s pripadajočimi standardnimi odkloni (SD v °D) in koeficienti variabilnosti (CV v %) za tri proučevana obdobja**

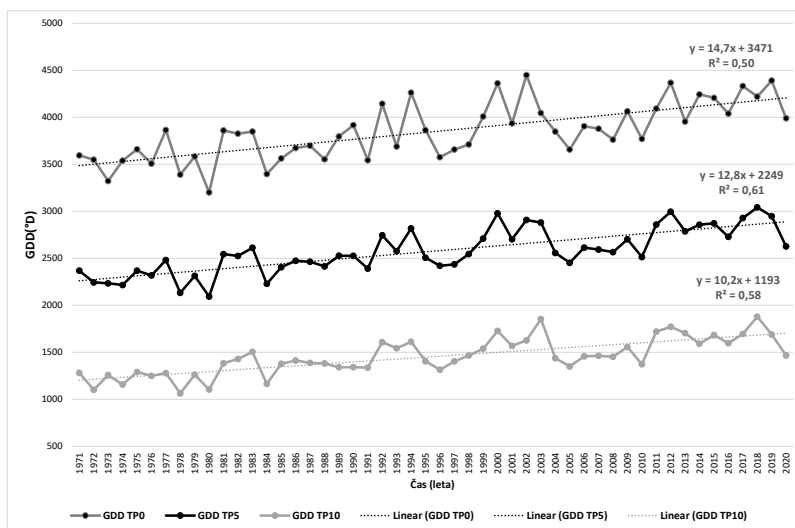
Obdobje	TP = 0 °C		TP = 5 °C		TP = 10 °C	
	GDD±SD	CV	GDD±SD	CV	GDD±SD	CV
P71-00	3705±258	7,0	2454±194	7,9	1357±155	11,4
P81-10	3842±241	6,3	2578±165	6,4	1460±134	9,2
P91-20	3999±256	6,4	2708±187	6,9	1563±150	9,6

Vir podatkov: [56], [57].



**Slika 5: Termalni čas (GDD) s pripadajočimi SD za TP0, TP5 in TP10 za tri proučevana obdobja v Mariboru**

Vir podatkov: [56], [57].



**Slika 6: Časovna porazdelitev termalnega časa (GDD) pri različnih TP in pripadajoči linearni trendi v Mariboru za obdobje 1971–2020, trendi so statistično značilni\*\* ( $p < 0,05$ )**

Vir podatkov: [56], [57].

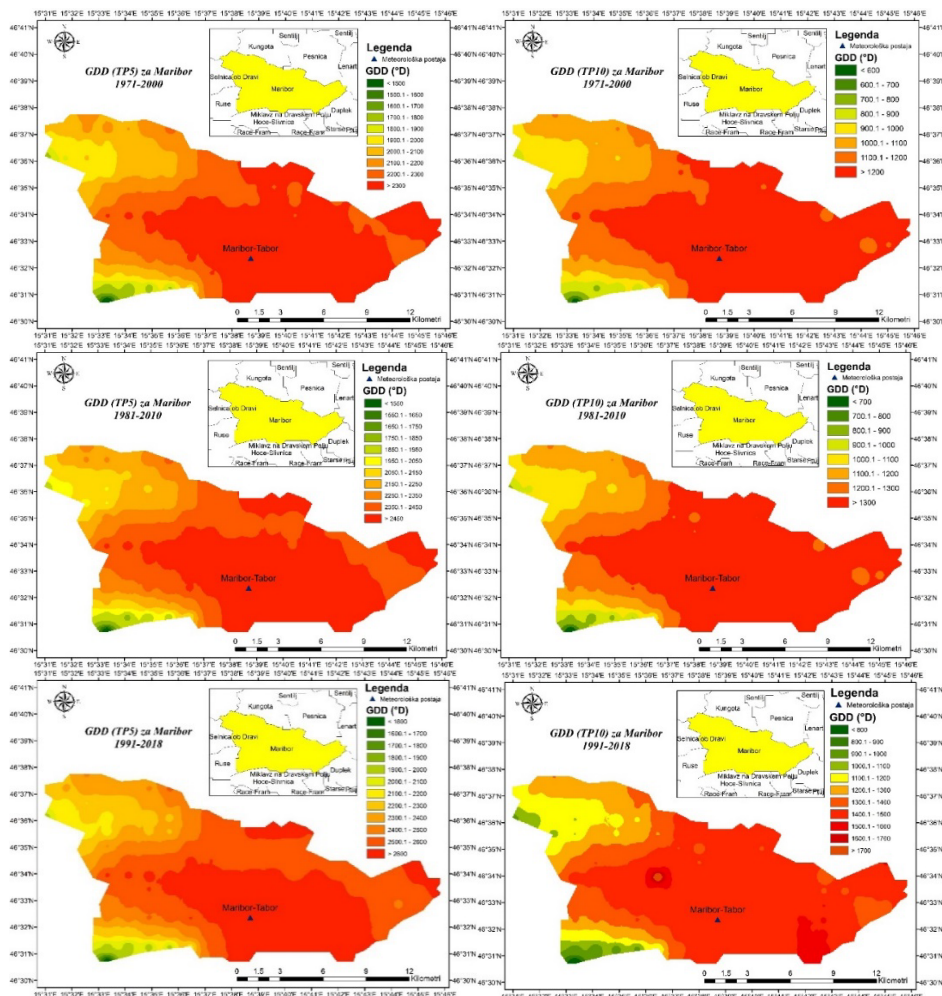
Trend povečanja GDD znaša za obdobje 1971-2020 okrog  $147\text{ }^{\circ}\text{D}/10$  let za TP0,  $128\text{ }^{\circ}\text{D}/10$  let za TP5 in  $102\text{ }^{\circ}\text{D}/10$  let za TP10, trendi za vse prage so statistično značilni pri  $p < 0,05$  (Slika 6). Pri nižjih TP so trendi višji, kar pomeni, da so spremembe toplotnih razmer večje v obdobju nižjih temperatur (obdobje brez zmrzali) kot v poletnih mesecih, kar so ugotovili tudi nekateri drugi raziskovalci [53]. Wypychova idr. (2017) [50] so tako npr. za Poljsko ugotovili za obdobje 1951–2020 trend  $60\text{ }^{\circ}\text{D}/10$  let za TP0, za TP10 pa le  $28\text{ }^{\circ}\text{D}/10$  let, zelo podobne rezultate je pokazala tudi raziskava Grigorieve idr. (2010) [52] za območje Rusije in Daljnega vzhoda. Povečanje GDD je seveda lahko tudi neposredna posledica segrevanja mest in toplotnega otoka, kar so prav tako ovrednotili v nekaterih raziskavah. Za nekatera severnoameriška mesta so Krehbiel idr. (2017) [1] ugotovili, da je v centrih mest s toplotnim otokom okrog  $670\text{ }^{\circ}\text{D}$  višji GDD nad TP0 in vpliv je opazen do 11 km izven urbanih središč.

### 3.4 Termalni čas za širše območje Maribora

Za širše območje Maribora je na Sliki 7 prikazan GDD za TP5 in TP10 za obdobje 1. april–30. september za vsa tri obdobja, vsi temperaturni podatki so iz SLOCLIM baze [57].

Ker so v bazi SLOCLIM rekonstruirani meteorološki podatki le do l. 2018, je zadnje prikazano obdobje na Sliki 7 1991-2018 (P91-18). Vidne so razlike v GDD med širšim območjem mesta Maribor in redkeje poseljenimi območji občine. Pri TP5 je razlika med najbolj poseljenimi predeli Maribora in nepozidanimi območji opazna v velikosti  $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{D}$  približno do oddaljenosti 5 km iz centra mesta. Akumulacija toplote v mestnih središčih je seveda vezana na velikost mesta. Tako so Krehbiel idr. (2017) [1] ugotovili, da je bil GDD nad TP0 skoraj  $700\text{ }^{\circ}\text{D}$  višji v centru mesta glede na nepozidano okolico. Primerjava med posameznimi obdobji za širše območje Maribora prav tako kaže, da vrednosti GDD pri TP5 naraščajo, v obdobju P71-00 je zgornji razred določen z vrednostmi  $>2300\text{ }^{\circ}\text{D}$ , v naslednjem obdobju z vrednostmi  $>2450\text{ }^{\circ}\text{D}$  in v obdobju P91-18 z vrednostmi  $>2600\text{ }^{\circ}\text{D}$ . Tudi pri TP10 so v zadnjem obdobju vrednosti GDD višje, meje zgornjih razredov pa so v P71-00  $>1200\text{ }^{\circ}\text{D}$ , v P81-10  $>1300\text{ }^{\circ}\text{D}$  in v P91-18 celo nad  $1.700\text{ }^{\circ}\text{D}$ . Izračunane vrednosti GDD na osnovi rekonstruiranih temperatur v mreži  $1\text{ x }1\text{ km}$  iz SLOCLIM baze [57] se zelo dobro ujemajo z izračuni GDD za postajo Maribor Tabor (Preglednica 3, Slika 5), za katero smo uporabili arhiv ARSO [56]. Kljub temu da v okviru ARSO

deluje veliko meteoroloških postaj, pa le-te ne zajamejo vseh območij, saj so nekatera slabše pokrita z meritvami, drugje pa bi zaradi raznolikoga površja ali specifične mikroklimne potrebovali dodatne meteorološke podatke. Baza SLOCLIM omogoča, da pridobimo lokalne meteorološke podatke v neposredni bližini naše raziskave in kot taka tudi odpira možnosti pri raziskavah toplotnih razmer v urbanih in neurbanih predelih, kjer potrebujemo podatke visoke časovne in prostorske ločljivosti.



Slika 6: GDD za TP5 (levo) in TP10 (desno) za obdobje 1.april-30.september za širše območje Maribora za obdobja P71-00, P81-10 in P91-18

Vir podatkov: [57].

## 4 Zaključek

Analiza temperaturnih podatkov za Maribor za obdobje 1971–2020 kaže, da so se temperaturne razmere v rastni sezoni značilno spremenile. Trend povprečne letne temperature zraka znaša  $0,46\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ let}$  in največji je v poletnem času ( $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ let}$ ). Od vključno leta 2011 so bila vsa leta nadpovprečno topla. Dolžina RS se je v proučevanem obdobju podaljšala za sedem dni, značilna je zelo velika razpršenost ( $\text{SD} = 21\text{ dni}$ ). Trend znaša  $1,4\text{ dni}/10\text{ let}$  ( $p < 0,05$ ), sprememba je posledica tako zgodnejšega začetka (4 dni) kot poznejšega zaključka RS (3 dni). Spremenila se je tudi količina akumulirane toplote, ki je na voljo rastlinam v času njihove rasti. Trend povečanja GDD znaša za obdobje 1971–2020 okrog  $147\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$  za TP0,  $128\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$  za TP5 in  $102\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$  za TP10. Pri nižjih TP so trendi višji, kar pomeni, da so spremembe toplotnih razmer večje v obdobju nižjih temperatur kot v poletnih mesecih. Primerjava izračunanega GDD za lokacijo Maribor Tabor s podatki arhiva ARSO in GDD za širšo lokacijo Maribora z rekonstruiranimi temperaturnimi podatki iz baze SLOCLIM je pokazala dobro ujemanje. SLOCLIM baza tako omogoča, da pridobimo lokalne meteorološke podatke v neposredni bližini naše raziskave in kot taka tudi odpira možnosti pri raziskavah toplotnih razmer v urbanih in neurbanih predelih, kjer potrebujemo podatke visoke časovne in prostorske ločljivosti.

Projekcije podnebnih sprememb zelo enotno kažejo, da se bodo temperature površja planeta v prihodnje še zviševale [65], kar bo vplivalo na nadaljnje spremembe rasti razmer, dolžine rastne sezone in termalnega časa [54], [55]. V okviru evropskega projekta EURO-CORDEX ([www.euro-cordex.net](http://www.euro-cordex.net)) so bili pripravljene scenariji prihodnjih podnebnih sprememb, značilni poteki vsebnosti (*ang. Representative Concentration Pathways -RCP*) glede na skupni sevalni prispevek leta 2100. Zmerno optimističen scenarij RCP4.5 kaže, da bo povprečna temperatura obdobja 2041–2070 v Sloveniji na letni ravni za  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  višja v primerjavi s povprečjem 1981–2010, dvig bo dokaj enakomeren poleti, jeseni in pozimi, nekoliko manj izražen pa pomladi [58]. Spremenjene toplotne razmere bodo omogočale zgodnejši fenološki razvoj pomladi in zamik rastne sezone v pozno jesensko ali celo zimsko obdobje, kar bo dolgoročno vplivalo na biološko raznovrstnost. Vse te spremembe moramo upoštevati pri strategiji prilagajanja na podnebne spremembe, kjer bo pri povečevanju odpornosti in prilagoditvenih sposobnosti Slovenije pomembno področje tudi mestna klima in zmanjšanje vpliva mestnih toplotnih otokov.

## Literatura

- [1] C. Krehbiel, X. Zhang, in G. Henebry, „Impacts of Thermal Time on Land Surface Phenology in Urban Areas“, *Remote Sensing*, let. 9, št. 5, str. 499, maj 2017, doi: 10.3390/rs9050499.
- [2] G. Wohlfahrt, E. Tomelleri, in A. Hammerle, „The urban imprint on plant phenology“, *Nat Ecol Evol*, let. 3, št. 12, str. 1668–1674, dec. 2019, doi: 10.1038/s41559-019-1017-9.
- [3] J. Škvareninová idr., „Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment“, *Moravian Geographical Reports*, let. 25, št. 4, str. 282–290, dec. 2017, doi: 10.1515/mgr-2017-0024.
- [4] K. Cerar, „Opazovanje mestnega toplotnega otoka“, Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2020. [Na spletu]. Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=120606>
- [5] B. Komac idr., „Urban Heat Island in the Ljubljana City“, v *Musco F., Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*, F. Musco, Ur. Cham: Springer International Publishing, 2016, str. 323–344. doi: 10.1007/978-3-319-10425-6\_12.
- [6] Ž. Vrečko, „Značilnosti mestnega toplotnega otoka v severozahodnem delu Ljubljane pozimi 2020/2021“, Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, 2021. [Na spletu]. Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=131890>
- [7] I. Žiberna idr., „The Impact of Climate Change on Urban Thermal Environment Dynamics“, *Atmosphere*, let. 12, št. 9, str. 1159, sep. 2021, doi: 10.3390/atmos12091159.
- [8] M. Klemenčič, „Uporaba daljinsko zaznanih posnetkov pri proučevanju spreminjanja mestnega toplotnega otoka v Ljubljani“, Magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, 2016.
- [9] MOL, „Pojav mestnega toplotnega otoka“, *Mestna občina Ljubljana*, 7. februar 2014. <https://www.ljubljana.si/sl/aktualno/pojav-mestnega-toplotnega-otoka/> (pridobljeno 11. maj 2017).
- [10] B. Komac in R. Ciglič, „Urban heat island atlas: A web tool for the determination and mitigation of urban heat island effects“, *Geographia Polonica*, let. 87, št. 4, str. 587–591, 2014.
- [11] I. Žiberna in D. Ivajnsič, „Vročinski valovi v Mariboru v obdobju 1961-2018“, *Revija za geografijo-Journal for Geography*, let. 13, št. 2, str. 73–90, 2018.
- [12] D. Ivajnsič, „Toplotni otok Ljutomera“, *Geografski obzornik*, let. 2, št. 57, str. 14–21, 2010.
- [13] T. Malenšek, „Mestni toplotni otok Novega mesta pozimi 2019/2020“, Zaključna seminarska naloga, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, 2020. [Na spletu]. Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=118630>
- [14] I. Žiberna, „Trendi temperatur zraka v Mariboru kot posledica razvoja mestnega toplotnega otoka“, *Revija za geografijo*, let. 1, št. 1, str. 81–98, 2006.
- [15] M. Nastran, M. Kobal, in K. Eler, „Urban heat islands in relation to green land use in European cities“, *Urban Forestry & Urban Greening*, let. 37, str. 33–41, jan. 2019, doi: 10.1016/j.ufug.2018.01.008.
- [16] H. Takebayashi in M. Moriyama, „Chapter 1 - Background and purpose“, v *Adaptation Measures for Urban Heat Islands*, Academic Press, Elsevier, 2020, str. 1–8. doi: 10.1016/B978-0-12-817624-5.00001-4.
- [17] T. Qiu, C. Song, Y. Zhang, H. Liu, in J. M. Vose, „Urbanization and climate change jointly shift land surface phenology in the northern mid-latitude large cities“, *Remote Sensing of Environment*, let. 236, str. 111477, jan. 2020, doi: 10.1016/j.rse.2019.111477.
- [18] C. Farrell, C. Szota, in S. K. Arndt, „Urban Plantings: ‘Living Laboratories’ for Climate Change Response“, *Trends in Plant Science*, let. 20, št. 10, str. 597–599, okt. 2015, doi: 10.1016/j.tplants.2015.08.006.
- [19] G. Villalobos-Jiménez in C. Hassall, „Effects of the urban heat island on the phenology of Odonata in London, UK“, *Int J Biometeorol*, let. 61, št. 7, str. 1337–1346, jul. 2017, doi: 10.1007/s00484-017-1311-7.
- [20] S. Jochner in A. Menzel, „Urban phenological studies – Past, present, future“, *Environ. Pollut.*, let. 203, str. 250–261, avg. 2015, doi: 10.1016/j.envpol.2015.01.003.

- [21] L. Meng *idr.*, „Urban warming advances spring phenology but reduces the response of phenology to temperature in the conterminous United States“, *PNAS*, let. 117, št. 8, str. 4228–4233, feb. 2020, doi: 10.1073/pnas.1911117117.
- [22] Q. Ren, C. He, Q. Huang, in Y. Zhou, „Urbanization impacts on vegetation phenology in China“, *Remote Sensing*, let. 10, št. 12, str. 1905, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/rs10121905>.
- [23] J. Tian, X. Zhu, J. Wu, M. Shen, in J. Chen, „Coarse-Resolution Satellite Images Overestimate Urbanization Effects on Vegetation Spring Phenology“, *Remote Sens.*, let. 12, št. 1, str. 117, jan. 2020, doi: 10.3390/rs12010117.
- [24] Y. Ji, J. Jin, W. Zhan, F. Guo, in T. Yan, „Quantification of Urban Heat Island-Induced Contribution to Advance in Spring Phenology: A Case Study in Hangzhou, China“, *Remote Sens.*, let. 13, št. 18, str. 3684, sep. 2021, doi: 10.3390/rs13183684.
- [25] A. Mimet, V. Pellissier, H. Quéno, R. Aguejedad, V. Dubreuil, in F. Roze, „Urbanisation induces early flowering: evidence from *Platanus acerifolia* and *Prunus cerasus*“, *Int. J. Biometeorol.*, let. 53, št. 3, str. 287–298, 2009.
- [26] G. Han in J. Xu, „Land Surface Phenology and Land Surface Temperature Changes Along an Urban–Rural Gradient in Yangtze River Delta, China“, *Environmental Management*, let. 52, št. 1, str. 234–249, jul. 2013, doi: 10.1007/s00267-013-0097-6.
- [27] D. Meng, X. Liu, in C. Zhang, „Responses of plant phenology to urban heat island effects in Beijing“, *Chinese Journal of Ecology*, let. 40, št. 3, str. 844–854, 2021, doi: 10.13292/j.1000-4890.202103.029.
- [28] H. Ding, L. Xu, A. J. Elmore, in Y. Shi, „Vegetation phenology influenced by rapid urbanization of The Yangtze Delta region“, *Remote Sens.*, let. 12, št. 11, str. 1783, 2020.
- [29] W. Jia, S. Zhao, X. Zhang, S. Liu, G. M. Henebry, in L. Liu, „Urbanization imprint on land surface phenology: The urban–rural gradient analysis for Chinese cities“, *Global Change Biology*, let. 27, št. 12, str. 2895–2904, 2021.
- [30] D. Zhou, S. Zhao, L. Zhang, in S. Liu, „Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China’s 32 major cities“, *Remote Sens. Environ.*, let. 176, str. 272–281, apr. 2016, doi: 10.1016/j.rse.2016.02.010.
- [31] S.-J. Jeong, H. Park, C.-H. Ho, in J. Kim, „Impact of urbanization on spring and autumn phenology of deciduous trees in the Seoul Capital Area, South Korea“, *Int. J. Biometeorol.*, let. 63, št. 5, str. 627–637, 2019.
- [32] M. Dallimer, Z. Tang, K. J. Gaston, in Z. G. Davies, „The extent of shifts in vegetation phenology between rural and urban areas within a human-dominated region“, *Ecology and Evolution*, let. 6, št. 7, str. 1942–1953, 2016.
- [33] X. Li, Y. Zhou, G. R. Asrar, J. Mao, X. Li, in W. Li, „Response of vegetation phenology to urbanization in the conterminous United States“, *Glob. Change Biol.*, let. 23, št. 7, str. 2818–2830, 2017.
- [34] E. K. Melaas, J. A. Wang, D. L. Miller, in M. A. Friedl, „Interactions between urban vegetation and surface urban heat islands: a case study in the Boston metropolitan region“, *Environ. Res. Lett.*, let. 11, št. 5, str. 054020, maj 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/5/054020.
- [35] D. Li, B. J. Stucky, J. Deck, B. Baiser, in R. P. Guralnick, „The effect of urbanization on plant phenology depends on regional temperature“, *Nat Ecol Evol*, let. 3, št. 12, str. 1661–1667, dec. 2019, doi: 10.1038/s41559-019-1004-1.
- [36] D. Li, B. J. Stucky, B. Baiser, in R. Guralnick, „Urbanization delays plant leaf senescence and extends growing season length in cold but not in warm areas of the Northern Hemisphere“, *Global Ecol Biogeogr.*, let. 31, str. 308–320, 2021.
- [37] S. Liang, P. Shi, in H. Li, „Urban spring phenology in the middle temperate zone of China: dynamics and influence factors“, *Int J Biometeorol.*, let. 60, št. 4, str. 531–544, apr. 2016, doi: 10.1007/s00484-015-1049-z.
- [38] S. M. Decina, P. H. Templer, in L. R. Hutyrá, „Atmospheric Inputs of Nitrogen, Carbon, and Phosphorus across an Urban Area: Unaccounted Fluxes and Canopy Influences“, *Earth’s Future*, let. 6, št. 2, str. 134–148, feb. 2018, doi: 10.1002/2017EF000653.

- [39] C. M. Zohner, „Phenology and the city“, *Nat Ecol Evol*, let. 3, št. 12, str. 1618–1619, dec. 2019, doi: 10.1038/s41559-019-1043-7.
- [40] Y. Chen, X. Wang, B. Jiang, N. Yang, in L. Li, „Pavement induced soil warming accelerates leaf budburst of ash trees“, *Urban Forestry & Urban Greening*, let. 16, str. 36–42, 2016.
- [41] Y. Chen, X. Wang, B. Jiang, in L. Li, „The leaf phenophase of deciduous species altered by land pavements“, *Int J Biometeorol.*, let. 62, št. 6, str. 949–959, 2018, doi: 10.1007/s00484-018-1497-3.
- [42] I. D. Orzechowska-Szajda, R. K. Sobolewski, J. Lewandowska, P. Kowalska, in R. Kalbarczyk, „The Influence of Urban Conditions on the Phenology of *Aesculus hippocastanum* L. Using the Example of Wrocław (Poland)“, *Forests*, let. 11, št. 12, str. 1261, nov. 2020, doi: 10.3390/f11121261.
- [43] S. Jochner, I. Markevych, I. Beck, C. Traidl-Hoffmann, J. Heinrich, in A. Menzel, „The effects of short-and long-term air pollutants on plant phenology and leaf characteristics“, *Environ. Pollut.*, let. 206, str. 382–389, 2015.
- [44] D. S. Katz, A. Dzul, A. Kendel, in S. A. Batterman, „Effect of intra-urban temperature variation on tree flowering phenology, airborne pollen, and measurement error in epidemiological studies of allergenic pollen“, *Sci Total Environ.*, let. 653, str. 1213–1222, 2019.
- [45] S. C. Zipper, J. Schatz, A. Singh, C. J. Kucharik, P. A. Townsend, in S. P. Loheide, „Urban heat island impacts on plant phenology: intra-urban variability and response to land cover“, *Environ. Res. Lett.*, let. 11, št. 5, str. 054023, 2016.
- [46] L. Massetti, „Assessing the impact of street lighting on *Platanus x acerifolia* phenology“, *Urban For. Urban Green.*, let. 34, str. 71–77, 2018.
- [47] S. Wang *idr.*, „Urban–rural gradients reveal joint control of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on extended photosynthetic seasons“, *Nat Ecol Evol*, let. 3, št. 7, str. 1076–1085, jul. 2019, doi: 10.1038/s41559-019-0931-1.
- [48] Z. Črepinšek, L. Kajfež-Bogataj, in K. Bergant, „Modelling of weather variability effect on fitophenology“, *Ecological Modelling*, let. 194, str. 256–265, 2006.
- [49] L. Shang, J. Liao, S. Xie, Z. Tu, H. Liao, in K. Zhong, „Dynamic changes in the thermal growing season and their association with atmospheric circulation in China“, *Int J Biometeorol*, let. 66, št. 3, str. 545–558, mar. 2022, doi: 10.1007/s00484-021-02215-9.
- [50] A. Wypych, A. Sulikowska, Z. Ustrnul, in D. Czekierda, „Variability of growing degree days in Poland in response to ongoing climate changes in Europe“, *Int J Biometeorol*, let. 61, št. 1, str. 49–59, jan. 2017, doi: 10.1007/s00484-016-1190-3.
- [51] J. Spinoni, J. Vogt, in P. Barbosa, „European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011“, *Int J Climatol*, let. 35, št. 1, str. 25–36, 2015.
- [52] E. A. Grigorieva, A. Matzarakis, in C. R. De Freitas, „Analysis of growing degree-days as a climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude“, *Clim Res.*, let. 42, št. 2, str. 143–154, 2010.
- [53] Y. Yin, H. Deng, in S. Wu, „Spatial-temporal variations in the thermal growing degree-days and season under climate warming in China during 1960–2011“, *Int J Biometeorol*, let. 63, št. 5, str. 649–658, maj 2019, doi: 10.1007/s00484-017-1417-y.
- [54] J. Spinoni *idr.*, „Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100“, *Int. J. Climatol*, let. 38, str. e191–e208, 2017, doi: 10.1002/joc.5362.
- [55] A. Sharma *idr.*, „Use of growing degree indicator for developing adaptive responses: A case study of cotton in Florida“, *Ecological Indicators*, let. 124, str. 107383, maj 2021, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107383.
- [56] ARSO, „Agencija RS za okolje“, *Arhiv meteoroloških podatkov*, 2022. <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (pridobljeno 22. februar 2022).
- [57] N. Škrk, M. de Luis, K. Čufar, Z. Črepinšek, L. Kajfež Bogataj, in R. Serrano-Notivol, „SLOCLIM: a high-resolution daily gridded precipitation and temperature dataset for Slovenia“, *Earth Syst. Sci. Data*, let. 13, št. 7, str. 3577–3592, jul. 2021, doi: 10.5194/essd-13-3577-2021.

- [58] ARSO, „Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja: Povzetek dejavnikov okolja z vplivom na kmetijstvo in gozdarstvo“, Agencija RS za okolje, Ljubljana, 2018. [Na spletu]. Dostopno na: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/change/>
- [59] A. M. G. Klein Tank, F. Zwiers, in X. Zhang, „Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, WMO/TD-1500, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72“, 2009.
- [60] A. Žust in Ž. Vlahovič, „Dolžina letne rastne dobe (PP06)“, Agencija RS za okolje, 2021. [Na spletu]. Dostopno na: <http://kazalci.arso.gov.si/sl/>
- [61] L. Alexander in N. Herold, *ClimPACT2 Indices and Software*. Sydney, Australia: The University of South Wales, 2016. Pridobljeno: 7. marec 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://github.com/ARCCSS-extremes/climimpact2>
- [62] R. Hijmans in University of California, „The University of Texas at Austin, GeoData, University of Texas Libraries“, *Second-level Administrative Divisions, Slovenia, 2015 [map]*, 2015. <https://geodata.lib.utexas.edu/catalog/stanford-bp543mm1858> (pridobljeno 23. februar 2022).
- [63] ARSO, „Agencija RS za okolje“, *Agrometeorološka napoved*, 2022. <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/forecast2> (pridobljeno 16. marec 2022).
- [64] ESRI, *ArcGIS Pro*. Redlands, ZDA: Environmental Systems Resource Institute, 2022. Pridobljeno: 16. marec 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/geostatistical-analyst/idw.htm>
- [65] IPCC, „Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner H.O, Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (ured.)]“, Cambridge University Press, v tisku, 2022.
- [66] R. Bertalanč *idr.*, „Spremenljivost podnebja v Sloveniji“, ARSO, 2010.
- [67] G. Vertačnik, M. Dolinar, R. Bertalanč, M. Klančar, D. Dvoršek, in M. Nadbath, „Podnebna spreminljivost Slovenije. Glavne značilnosti gibanja temperature zraka v obdobju 1961–2011“, ARSO, 2013.
- [68] M. Nadbath, „Meteorološka postaja Maribor-Tabor“, *ARSO, Naše okolje*, str. 56–69, 2019.
- [69] EEA, „European Environmental Agency“, *Growing season for agricultural crops (CLIM 030)*, 2022. <https://www.eea.europa.eu/ims>



KOPENSKA  
OKOLJA





# MODELIRANJE PODNEBNE USTREZNOSTI ZA GOJENJE OLJK (*OLEA EUROPAEA*) NA VZHODNEM JADRANU (SLOVENIJA, HRVAŠKA)

IZTOK LORENČIČ,<sup>1</sup> MITJA KALIGARIČ,<sup>2</sup> DAŠA DONŠA,<sup>2</sup>  
VENO JAŠA GRUJIČ,<sup>2,3</sup> DANIJEL IVAJNSIČ<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Maribor, Slovenija

iztok.lorencic@gmail.com

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija  
mitja.kaligari@um.si, dasa.donsa1@um.si, veno.grujic@um.si, dani.ivajnsic@um.si

<sup>3</sup> Univerza v Mariboru, Pedagoška fakulteta, Maribor, Slovenija  
veno.grujic@um.si

<sup>4</sup> Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Maribor, Slovenija  
dani.ivajnsic@um.si

**Sinopsis** Pridelava oljk je ranljiv kmetijski sistem, primeren za študije vpliva podnebnih sprememb zaradi dolge življenjske dobe oljčnega drevesa, njegove občutljivosti na sušo in visoke temperature ter vse večje vloge oljčnih nasadov v gospodarstvu sredozemskih območij. S pomočjo prostorske analize smo ugotavljali, kakšna je podnebna ustreznost za gojenje oljk v Sloveniji in na Hrvaškem. Ocenjujemo vpliv bioklimatskih spremenljivk na razširjenost oljčnikov na tem območju, vrednotimo prihodnje podnebne pogoje za gojenje oljk, zaznavamo variabilnost modelnih podnebnih napovedi na primeru oljčnikov in identificiramo prihodnja ustrezna in neustrezna območja za gojenje oljk v Sloveniji in na Hrvaškem. Obravnavana podnebna scenarija RCP4.5 in RCP8.5, v primeru oljke, kažeta različen razvoj ustreznih površin za gojenje na raziskovanem območju. Model Mahalanobisove tipičnosti (MT) napoveduje krčenje ustreznih pogojev v severnem predelu območja. Model Podnebne ustreznosti pridelka (CCS) pa kaže največje razlike v podnebni ustreznosti za gojenje oljk na območju Dalmacije, kjer bo lahko v prihodnosti več ustreznih površin tudi v notranjosti celine. Dolgoročne podnebne napovedi so lahko na lokalnem nivoju dokaj nezanesljive. Za natančnejše napovedi ustreznih pogojev za gojenje oljke bi bile potrebne bolj poglobljene analize na regionalni ravni. Prav gotovo bo oljkam v prihodnosti ustrezalo toplejše ozračje, vendar je problematika večplastna.

## Opomba:

Prispevek temelji na: Lorenčič I. (2019). *Vpliv bodočega podnebja na uspevanje oljke (Olea europaea) na vzhodni jadranski obali (Slovenija, Hrvaška)*: magistrsko delo, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor: I. Lorenčič

## Ključne besede

emisijski scenariji, modeli razširjenosti vrst, podnebna ustreznost, prostorska analiza, bioklimatske spremenljivke



DOI <https://doi.org/10.18690/um.fnm.8.2022.4>

ISBN 978-961-286-645-7

# CLIMATE SUITABILITY MODELLING FOR OLIVE GROVE CULTIVATION (*OLEA EUROPAEA*) IN THE EASTERN ADRIATIC (SLOVENIA, CROATIA)

IZTOK LORENČIČ,<sup>1</sup> MITJA KALIGARIČ,<sup>2</sup> DAŠA DONŠA,<sup>2</sup>  
VENO JAŠA GRUJIC,<sup>2,3</sup> DANIJEL IVAJNSIČ<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Maribor, Slovenia

iztok.lorencic@gmail.com

<sup>2</sup> University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia  
mitja.kaligaric@um.si, dasa.donsa1@um.si, veno.grujic@um.si, dani.ivajnsic@um.si

<sup>3</sup> University of Maribor, Faculty of Education, Maribor, Slovenia  
veno.grujic@um.si

<sup>4</sup> University of Maribor, Faculty of Arts, Maribor, Slovenia  
dani.ivajnsic@um.si

**Note:** Chapter is based on: Lorenčič I. (2019). *Vpliv bodočega podnebja na uspevanje oljke (Olea europea) na vzhodni jadranski obali (Slovenija, Hrvaška)*: master's thesis, University of Maribor, Faculty of Science and Mathematics, Maribor: I. Lorenčič

**Keywords:** emission scenarios, species distribution models, climate suitability, spatial analysis, bioclimatic variables

**Abstract** Olive production is a vulnerable agricultural system suitable for studying climate change impacts because of the longevity of the olive tree, its susceptibility to drought and high air/surface temperatures, and the growing role of olive products in the Mediterranean economy. With spatial analysis, we investigated climate suitability for olive cultivation in Slovenia and Croatia. We measured the impact of bioclimatic variables on the distribution of olive groves in this area, evaluated future climatic conditions for olive cultivation, detected variability in climate forecasts and identified future suitable and unsuitable olive growing areas in Slovenia and Croatia. We used the RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios, which indicated, different development patterns of suitable areas for olive tree cultivation. The Mahalanobis typicality (MT) model predicted a decrease in suitable climate conditions in the northern part of the area. The Crop Climate Suitability model (CCS), however, showed the largest differences in climate suitability for olive cultivation in Dalmatia, where more suitable areas, even more inland, can be expected in the future. More in-depth analyses at the regional level would be needed to develop more accurate predictions of suitable conditions for olive cultivation. A warmer atmosphere will certainly suit olives, but the problem is multifaceted.

## 1 Uvod

### 1.1 Splošna razširjenost in gojenje

Na vzhodno jadranski obali uspeva navadna oljka *Olea europaea*, ki vključuje dve podvrsti, divjo oljko *Olea europaea oleaster* in gojeno oljko *Olea europaea sativa*. Gojena oljka se razlikuje od divje oljke, po majhnih listih in trnastih vejah [1]. Domestikacija v današnjo kultivirano sredozemsko oljko je potekala s selekcijo na večji plod in višjo vsebnost olja, spremenila je tudi reproduktivno biologijo drevesa. Kultivirane oljke se razmnožujejo nespolno (vegetativno) s kloni, tako da imajo fiksirane zelene lastnosti. Gojena oljka ima lahko eno ali več debel, višina drevesa je odvisna od okolja, sorte, obrezovanja. V višino zraste od 3 pa tudi do 15 metrov [2], [42].

Palinološki zapisi razkrivajo, da se je v holocenu številčnost oljk, zaradi človekovih aktivnosti na vzhodu in zahodu sredozemskega bazena, močno povečala [3]. Po letu 1600 pr. n. št. je nastala »oljčna eksplozija«. Feničani so med trgovanjem z drugimi morskimi središči oljko raznesli do Cipra, Maroka, Alžirije in Tunizije. Grški pomorščaki so jo kasneje razširili po svojih kolonijah. V 7. in 8. stoletju pr. n. št. se je pridelovanje oljk še razširilo. Rimljani so nadaljevali intenzivno širjenje oljke [1], [42]. Površine oljčnih nasadov so se stalno povečevale in širile po celotnem Mediteranu, prav zaradi ugodnih podnebnih pogojev [4].

Rekonstrukcija temperaturnih razmer je pokazala, da so Rimsko obdobje zaznamovale naraščajoče temperature zraka, v primerjavi z leti predtem (1300 BC – 300 BC), zato so se oljčna drevesa razširila tudi onstran svoje predhodne severne meje. Po rimskem obdobju je nastopilo srednjeveško toplo obdobje (900-1200 AD), z milimi zimami, zato so oljke v tem obdobju gojili tudi v dolini reke Pad (severna Italija), kjer danes ni več prisotna. Sledilo je obdobje ohladitve oziroma mala ledena doba, ki je trajala približno od 14. do 19. stoletja. Oljčni nasadi so bili podvrženi hudim zimam, ki so bile značilne za to obdobje, zato se je razširjenost oljk v Evropi in tudi v južnih predelih Sredozemlja močno zmanjšala [4], [42].

Oljkarstvo se je pri nas – na ozemlju Istre, Kvarneje in Dalmacije močno razmahnilo v 16. in 17. stoletju, v času Beneške republike. V zadnjih desetletjih 19. stoletja je bila ta panoga pri nas tako razvita, da je bila v vsaki večji vasi oljarna, vendar se je zaradi kasnejšega opuščanja oljkarstva njihovo število pred prvo svetovno vojno skrčilo [2].

## 1.2 Uspevanje oljke v Sloveniji in na Hrvaškem

Oljka najbolje uspeva v zmerno toplih vremenskih razmerah z milimi zimami in ne pretoplimi poletji. Srednja letna temperatura na območjih, kjer gojimo oljko, naj bi bila 15 do 20 stopinj C, najvišje temperature pa so lahko tudi od 40 do 50 stopinj C, če je v tleh na voljo dovolj vode. Zelo pomembno je tudi, da je les zaščiten pred sončno pripeko s krošnjo, zato imajo oljke v krajih z višjimi letnimi temperaturami zaprte okrogle krošnje. Najbolje rodi, ko pozimi dnevna temperatura 70 do 80 dni niha od 2 do 15 stopinj, ali pa, ko se izmenjujejo topli dnevi s hladnejšimi [1]. Oljka je kserofit, kar ji omogoča zgradba listov, ki je mesnata, trda in ozka [2], [42]. Oljka raste v območjih, ki imajo od 300 do 1.000 mm ali več padavin na leto. Za rodnost oljka potrebuje od februarja do maja vsaj 130 mm dežja, od 50 do 70 mm pa od julija do septembra [1].

V Sloveniji oljčniki zavzemajo 1.200 ha, od tega jih je okoli 10 ha v Goriških Brdih in spodnji Vipavski dolini, kamor se vrača po pozebi leta 1929, vsi ostali so v Slovenski Istri. Kot tipična sredozemska kultura ne uspeva v celotni Slovenski Istri, ampak je njen areal omejen na priobalni pas in gričevje, do nadmorske višine 250 m, redkeje 300 m. V notranjost sega po prisojnih pobočjih Rižane, Osapske reke, Badaševice, Drnice, Dragonje in Rokave [5].

Na Hrvaškem oljka uspeva na ozkem obalnem in otočnem prostoru ter na posamičnih mikrolokacijah znotraj Dalmacije. Skupna površina teh nasadov je 19.100 ha [6], na katerih je zasajenih približno 6.1 milijonov dreves. Celotno vzgojno področje je zaradi velikih razlik v pedoklimatskih karakteristikah prostora razdeljeno v šest podregij vzgoje: zahodna obala Istre, Hrvaško primorje in Kvarnerski otoki, severna, srednja in južna Dalmacija in notranja Dalmacija [7], [42].

### **1.3 Podnebni dejavniki**

Podnebje na Zemlji ni stalnica, temveč se stalno spreminja in vse več znanstvenikov je prepričanih, da je 21. stoletje čas globalnih sprememb podnebja, katerih glavni krivec naj bi bil človek, ki s spreminjanjem rabe tal in zlasti z emisijami toplogrednih plinov (TGP) ter aerosolov, ki spreminjajo sestavo ozračja, in s tem vplivajo na energijsko bilanco Zemlje kot celote [8], [42].

Sredozemska regija je potencialno zelo ranljivo območje, podvrženo vplivom podnebnih sprememb [9]. V preteklem stoletju je Sredozemlje že bilo izpostavljeno trendu naraščanja temperature zraka in upadu količine padavin. Od začetka pa do konca 20. stoletja se je temperatura površja celinskega Mediterana povečala za 0,75 °C [10]. V drugi polovici 20. stoletja je dobro dokumentiran trend zmanjšanja količine zimskih padavin, kar je povezano z zmanjšanjem intenzivnih ciklonov [10]. Letna količina padavin se je na tem območju v zadnjem stoletju zmanjšala za kar 30 %. Pričakujemo lahko, da bo v Mediteranskem bazenu v primerjavi z drugimi regijami prišlo do nesorazmernega povišanja temperature zraka, kar bo povečalo sušnost. Medtem ko naj bi se po svetu temperature zraka povišale v povprečju za 1,4 °C do 5,8 °C, bi razlika v sredozemskem bazenu lahko znašala vsaj 3 °C [11], [42].

Rezultati podnebnih modelov [12], [13] kažejo, da je sredozemski bazen eno od območij, ki bo najbolj podvrženo zmanjšanju količine padavin v prihodnosti. Medtem ko naj bi večina Evrope imela pozitivno vodno bilanco, lahko pričakujemo, da bo v državah, ki obkrožajo Sredozemsko morje, prišlo do največjega zmanjšanja, in sicer za več kot 20 % [11], [42]. Avtorji so predvideno povečanje sušnih razmer razložili z variabilnostjo Severnoatlantske oscilacije [14]. Pričakujemo lahko tudi povečanje relativne pogostosti močnih nalivov, vendar samo za nekatera območja zahodnega Sredozemlja [10].

Tudi v Sloveniji je opazen trend naraščanja temperature zraka. Najbolj opazne spremembe beležimo po letu 1990. Temperatura zraka se je v zadnjih 50 letih dvignila za  $1,1 \pm 0,6$  °C, v zadnjih 30 letih (1974–2003) je segrevanje ozračja že preseglo mejo 1,5 °C/30 let [8], [42]. Na letni ravni se je višina padavin, marsikje v zahodni polovici države, statistično značilno zmanjšala. Hitrost sprememb je bila v obdobju 1961–2011 od 2 do 4 % na desetletje [15], [16]. Glede na podnebne

scenarije se bo v prihodnosti vsa Slovenija še naprej ogrevala. Do sredine stoletja se bo letna povprečna temperatura zraka povišala za 1,0–2,5 °C po vsej državi. Najmanj se bodo predeli ogreli spomladi, in sicer od 0,5 do 1,5 °C. Ostali letni časi se bodo ogreli nekoliko več, od 1 pa do 2,5 °C [15], [42]. Količina padavin poleti se bo lahko zmanjšala za do 20 %, kar bo ob hkratnem povečanju temperatur zraka povečalo sušno ogroženost v Sloveniji na več kot 1/3 ozemlja [17].

Na Hrvaškem je tekom 50-letnega obdobja (1961–2010) zaznaven trend naraščanja srednje letne, srednje minimalne in srednje maksimalne temperature zraka. Srednja letna temperatura zraka je v tem obdobju naraščala za 0,2–0,3 °C/10 let [18]. Glede rezultatov analiz podnebnih sprememb Hrvaškega državnega hidrometeorološkega zavoda bo dvig temperature na področju Hrvaške do konca 21. stoletja vse bolj izrazit. Do sredine 21. stoletja (2041–2070) bo srednja letna temperatura zraka pozimi višja za 2,5 °C do 3 °C v kontinentalni Hrvaški in nekaj manj ob obali. Poleti naj bi temperatura zraka narasla v srednji za 2,5 °C in južni Dalmaciji za 3,5 °C ter nekaj manj (od 2,5 do 3 °C) v ostalih delih Hrvaške [18], [42]. Tekom obdobja 1971–2000 je na obali in otokih prišlo do zmanjšanja količine padavin, ki je še bolj izrazito v notranjosti Istre (Pazin 7 %) in v primorju južne Dalmacije (Dubrovnik 11 %) [19]. Občutno zmanjšanje letne količine padavin za od 15 % do 25 % lahko pričakujemo skoraj na celotnem območju Hrvaške, z izjemo skrajnega severa in zahoda, kjer se bo višina padavin zmanjšala od 5 do 15 %. Zmanjšanje količine padavin se pričakuje tudi v poletnih mesecih na celotnem območju Hrvaške obale (15 %) ter v zaledju (5 %). Nasprotno velja za jesenske mesece v srednjih in vzhodno nižinskih predelih Hrvaške, ki bi lahko beležili povečanje količine padavin (od 5 do 15 %). Na splošno lahko pričakujemo tudi večjo pogostost suhih obdobji oziroma večje število zaporednih dni brez padavin [18], [42].

#### 1.4 Odziv oljke na podnebne spremembe

Prilagodljivost kmetijskih sistemov na podnebne spremembe v regijah z nepredvidljivim in suhim podnebjem, kot je Sredozemsko, je ključnega pomena za prihodnje gospodarske razmere in socialno zdravja številnih podeželskih območij [20]. Sredozemski bazen je vroča točka biotske raznovrstnosti in podnebne spremembe ogrožajo agroekosisteme, kot so oljke [21]. Oljčna pridelava je ranljiv kmetijski sistem, ki je primeren za študij prilagodljivosti na podnebne spremembe zaradi dolge življenjske dobe oljčnih dreves, njihove občutljivosti na sušo in visoke



temperature zraka ter vse večje vloge oljčnih nasadov v gospodarstvu Sredozemskih območjih [20], [42]. Pri oljki nastopi cvetenje med aprilom in junijem, bistveno pozneje v primerjavi z bolj zmernimi drevesnimi vrstami. Sicer oljka v teh mesecih prejme zadostno količino toplote, ki omogoča razvoj socvetja in njeno zrelost. Posledično sezonska variabilnost temperature zraka pogojuje fenologijo te vrste. Oljko lahko identificiramo kot rastlino, ki je dober indikator (pokazatelj) podnebnih sprememb, zlasti v spomladanskih mesecih. Fenologija oljk v Sredozemlju je tako občutljiva na naraščajoče spomladanske temperature zraka kot fenologija rastlin v zmerno hladnih biomih, kjer ima segrevanje podnebja morda že zaznavne učinke na fenologijo kopenske vegetacije.

Modelne simulacije so pokazale, da lahko čas cvetenja oljke v zahodnem Sredozemlju do konca stoletja nastopi bolj zgodaj. V južni Španiji so tako že zaznali trend zgodnejše foliacije, cvetenja in zorenja plodov [20]. Predvidevajo tudi, da bi lahko do konca stoletja, do sproščanja cvetnega prahu pri oljki prišlo celo 1 do 3 tedne bolj zgodaj v letu. Opazen je trend zgodnejšega cvetenja na območju severnega Jadrana (2 dni/10 let) ter v Dalmaciji (3 dni/10 let). Sicer so fenološke analize pokazale zgodnejši začetek vegetacije spomladi, ne pa tudi podaljšanje vegetacijske dobe v jesen. Takšen rezultat sovпада z opaženim izrazitejšim dvigom spomladanske srednje letne temperature zraka v primerjavi z jesenjo [22], [42]. Seveda fenološke spremembe niso odvisne le od temperature zraka temveč tudi od razpoložljivosti vode, nadmorske višine in same lege (ekspozicije) oljčnih nasadov [14].

Tudi pri nas bodo višje temperature zraka (med drugim) podaljšale vegetacijsko dobo in izboljšale razmere za gojenje toplotno zahtevnejših rastlin. Oljka bi se lahko razširila v višje predele Slovenske Istre, v prihodnosti bi oljko lahko gojili tudi v Goriških Brdih in Vipavski dolini in morda tudi v nižjih predelih Krasa [5]. Sicer utegnejo te pozitivne učinke izničiti negativni učinki spreminjanja podnebja, ki bi utegnili usodno zmanjšati pridelek [21], [42]. Čeprav je oljka prilagojena na visoke temperature, pa podnebne spremembe prinašajo tudi vse bolj ekstremne vremenske pojave. V prihodnosti lahko pričakujemo več vročinskih valov, ki lahko oljkam povzročajo temperaturni stres tudi v njihovem tradicionalen okolju. Cvetenje, tvorba in rast plodov so občutljivi na visoke temperature zraka, ki lahko povzročijo venenje cvetov. Rast plodov je občutljiva na temperature, višje od 35 °C. Lahko se pojavi sušenje plodov in nekroze [23], [42]. Zaradi globalnega segrevanja lahko pričakujemo tudi spremembe, povezane s pogostostjo in intenziteto napadov škodljivcev in

bolezni [5]. Tovrstne spremembe so zelo nepredvidljive in jih je v modelih težko upoštevati, zato jih v prispevku ne obravnavamo.

## 1.5 Uspevanje oljk v prihodnjih podnebnih razmerah

Težišče prispevka je prihodnje uspevanje oljk kot posledica podnebnih sprememb. Raziskave kažejo, da je oljka v preteklosti neprestano spreminjala območje razširjenosti v skladu s podnebnimi razmerami. Zaradi tega je oljka dober pokazatelj posledic podnebnih sprememb v Mediteranskem bazenu. Identifikacija klimatoloških parametrov, ki vplivajo na pridelavo oljk, je nujna za ugotavljanje vpliva podnebnih sprememb na pridelavo in razširjenost te vrste [4], [42].

Ob upoštevanju, da so sedanje obdelovalne površine v ravnovesju s sedanjimi podnebnimi pogoji, in ob predpostavki, da je podnebje glavni dejavnik, ki vpliva na razširjenost oljčnikov, lahko učinkovito uporabimo statistične modele, ki napovedujejo primernost habitatov v prihodnosti [4], [42].

S pomočjo modelov razširjenosti vrst smo ugotavljali, kakšna je primernost habitata za gojenje oljk v Sloveniji in na Hrvaškem in kako se bo primernost habitata spreminjala v prihodnje v luči podnebnih sprememb. S to raziskavo smo želeli:

- ugotoviti vpliv bioklimatskih spremenljivk na današnjo razširjenost oljčnikov v Sloveniji in na Hrvaškem,
- oceniti in ovrednotiti prihodnje podnebne razmere za gojenje oljk v Sloveniji in na Hrvaškem,
- zaznati variabilnost modelnih podnebnih napovedi na primeru oljčnikov in
- identificirati prihodnja ustrezna in neustrezna območja za gojenje oljk v Sloveniji in na Hrvaškem.

Ob predpostavki, da ima podnebje ključno vlogo na razširjenost oljk, smo postavili sledeče hipoteze:

1. S pomočjo Worldclim bioklimatskih spremenljivk je mogoče ugotavljati vpliv podnebnih sprememb na razširjenost oljčnikov.

2. Uporabljeni metodi Mahalanobisove tipičnosti (*ang. Mahalanobis typicalities*; v nadaljevanju MT) in model Podnebne ustreznosti pridelka (*ang. Crop Climate Suitability*; v nadaljevanju CCS) ponujata podobne rezultate.
3. Zaznavna bo značilna variabilnost rezultatov obeh scenarijev (RCP4.5 in RCP8.5) ob uporabi dostopnih globalnih podnebnih modelov iz baze Worldclim.
4. Zaradi podnebnih sprememb bo v prihodnje na raziskovanem območju več ustreznih površin za gojenje oljk.

## 2 Materiali in metode

### 2.1 Območje raziskave

Območje raziskave zajema celotno Hrvaško primorje in primorsko fitogeografsko regijo v Sloveniji. Gre za nižji jugozahodni del Slovenije, ki leži na obrobju sredozemskega bazena in je reliefno odprt proti Tržaškemu zalivu oziroma Jadranskemu morju. Predeli Slovenske Istre še ustrezajo Köppenovim merilom za sredozemsko podnebje. Ker tukaj raste tudi oljka, ta podnebni tip imenujemo tudi podnebje oljke [24]. Podnebje se od priobalnega pasu Slovenske Istre po lastnostih oddaljuje od pravega mediteranskega podnebja, ohranja pa nekatere njegove poteze, zato ga opredeljujemo kot submediteransko podnebje [25], [42]. Submediteransko podnebje (po Köppenu kategorija Cfa) se od pravega sredozemskega podnebja (po Köppenu kategorija Csa) razlikuje po padavinskem režimu, saj so padavine relativno enakomerno razporejene čez vse leto, za sredozemsko podnebje pa je značilna izrazita koncentracija padavin pozimi in sušno obdobje poleti [24], [42].

Za Hrvaško primorje označujemo celoten obalni prostor hrvaškega Jadrana, ki ga lahko glede na razlike v morfostrukturah, klimato-ekoloških in krajinskih lastnostih razdelimo na tri osnovne regije: Severno hrvaško primorje z Istrskim in Kvarnerskim polotokom in pripadajočimi otoki; srednje Hrvaško primorje, ki obsega severno dalmatinski priobalni pas in otoke ter severno dalmatinsko zaledno in zagorsko območje; in Južno hrvaško primorje, ki obsega srednje dalmatinski in južno dalmatinski del hrvaške [26], [42]. Srednja letna temperatura zraka na Hrvaškem se ob morju giblje do 17 °C [27]. Obala polotoka Istre ima srednjo letno temperaturo zraka okoli 13 °C, njene vrednosti se zmanjšujejo proti notranjosti. Na otokih in na obali srednje in severne Dalmacije ter na zahodni obali Istre lahko pričakujemo okoli

800 do 900 mm padavin na leto [28]. S približevanjem obali se količina padavin povečuje, posebej ob planinskih področjih, zaradi prisilnega dvigovanja zračnih mas.

## 2.2 Razširjenost oljke in podnebni podatki

Za modeliranje prihodnjih potencialno ustreznih in neustreznih območij za gojenje oljk v Sloveniji in na Hrvaškem smo morali najprej pridobiti podatke o prostorski razširjenosti oljke.

Za podatke o pojavljanju vrste smo uporabili karto zemljišč negozdnih habitatov Hrvaške, ki je prostorski prikaz razširjenosti posameznih habitatnih tipov na območju Republike Hrvaške. Karta je bila izdelana leta 2016 v sklopu projekta „Kartiranje naravnih in pol naravnih negozdnih habitatov Republike Hrvaške“ in je javno dostopna na bioportalu [29]. Merilo karte je 1 : 25 000 z najmanjšo enoto kartiranja 1,56 ha. Končna karta obravnava 155 habitatnih tipov in 322.758 poligonov.

Podatke o razširjenosti oljčnikov v Sloveniji smo pridobili s pomočjo podatkov o rabi tal za leto 2016, ki so dostopni na spletnem portalu Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano [30]. Iz vektorske podatkovne baze smo filtrirali rabo 1.230 (oljčniki).

Za izdelavo napovedi o potencialni razširjenosti oljke smo uporabili okoljske sloje za prihodnost, ki so bili pridobljeni iz podatkovne baze WorldClim 1.4 [31]. Baza WorldClim ponuja tako pretekle, trenutne kot prihodnje bioklimatske napovedi. Trenutno stanje predstavlja petdesetletno povprečje časovnega obdobja 1960–1990 [31]. Optimistični scenarij do leta 2100 (RCP2.6) predvideva porast povprečne globalne temperature zraka za 1 °C, vsebnost CO<sub>2</sub> lahko doseže 421 ppm; zmerno optimistični scenarij (RCP4.5) predvideva dvig temperature za 1,8 °C in vsebnost CO<sub>2</sub> 538 ppm; ter pesimistični scenarij (RCP8.5), kjer naj bi se temperatura zraka dvignila za 3,7 °C, vsebnost CO<sub>2</sub> pa narasla na 936 ppm [32], [42].

Iz baze WorldClim smo pridobili 19 bioklimatskih spremenljivk za trenutno stanje ter dva prihodnja scenarija (RCP4.5 in RCP8.5) za leto 2070 s prostorsko ločljivostjo slikovne enote enake 30 sekund (cca. 1 km).

**Preglednica 1: Seznam uporabljenih bioklimatskih spremenljivk**

Oznaka klimatske spremenljivke	Pomen klimatske spremenljivke
BIO1	Povprečna letna temperatura [°C]
BIO2	Povprečna dnevna temperaturna amplituda [°C]
BIO3	Izotermalnost
BIO4	Temperaturna sezonskost
BIO5	Maksimalna temperatura najtoplejšega meseca [°C]
BIO6	Minimalna temperatura najhladnejšega meseca [°C]
BIO7	Letna temperaturna amplituda [°C]
BIO8	Povprečna temperatura najbolj namočenega tromesečja [°C]
BIO9	Povprečna temperatura najbolj suhega tromesečja [°C]
BIO10	Povprečna temperatura najtoplejšega tromesečja [°C]
BIO11	Povprečna temperatura najhladnejšega tromesečja [°C]
BIO12	Letna količina padavin [mm]
BIO13	Količina padavin najbolj namočenega meseca [mm]
BIO14	Količina padavin najbolj suhega meseca [mm]
BIO15	Padavinska sezonskost
BIO16	Količina padavin najbolj namočenega tromesečja [mm]
BIO17	Količina padavin najbolj suhega tromesečja [mm]
BIO18	Količina padavin najtoplejšega tromesečja [mm]
BIO19	Količina padavin najhladnejšega tromesečja [mm]

### 2.3 Obdelava podatkov in modeli razširjenosti

Vhodne podatke smo v prvi fazi prilagodili območju raziskave. Globalne bioklimatske podatke smo porezali po prostorskem oknu podatkov o dejanski razširjenosti oljčnikov v Sloveniji in na Hrvaškem. Da bi se izognili prostorski avtokorelaciji, smo poligone oljčnikov transformirali v točkovni podatkovni sloj in ga prostorsko filtrirali (*ang. Spatially Rarifying*) glede na heterogenost podnebnih (bioklimatskih) značilnosti na raziskovanem območju (razdalja = 30 km). Za ta namen smo vseh 19 bioklimatskih spremenljivk PCA transformirali in uporabili enačbo Climate Heterogeneity v sklopu orodja SDM Toolbox [33]. Posledično smo oblikovali točkovni vhodni podatek (N = 143) o razširjenosti oljčnikov na raziskovanem območju (Slika 1B).

V drugi stopnji smo uporabili bazo bioklimatskih spremenljivk za trenutno obdobje (1960–1990) in prihodnje podnebne razmere (2070). Obravnavali smo vse razpoložljive CMIP5 podnebne modele (n = 19; ACCESS1-0, BCC-CSM1-1, CCSM4 ...) in scenarija RCP4.5 in RCP8.5 (Preglednica 2). Za vsak globalni podnebni model in scenarij smo bioklimatske spremenljivke PCA transformirali in

v nadaljnji analizi uporabili prve tri komponente, ki so (po večini) prikazovale > 85 % variabilnosti bioklimatskih lastnosti na raziskovanem območju. V zaključni stopnji smo za potrebe enostavnejše primerjave rezultate obeh modelov (MT in CCS) za vsak emisijski scenarij (RCP4.5 in RCP8.5) in časovno okno 2070 povprečili.

**Preglednica 2: Seznam uporabljenih globalnih podnebnih modelov iz baze Worldclim 1.4 [31]**

Globalni podnebni modeli 2070	Oznaka	RCP45	RCP85
ACCESS1-0	AC	DA	DA
BCC-CSM1-1	BC	DA	DA
CCSM4	CC	DA	DA
CESM1-CAM5-1-FV2	CE	DA	NE
CNRM-CM5	CN	DA	DA
GFDL-CM3	GF	DA	DA
GFDL-ESM2G	GD	DA	NE
GISS-E2-R	GS	DA	DA
HadGEM2-AO	HD	DA	DA
HadGEM2-CC	HG	DA	DA
HadGEM2-ES	HE	DA	DA
INMCM4	IN	DA	DA
IPSL-CM5A-LR	IP	DA	DA
MIROC-ESM-CHEM	MI	DA	DA
MIROC-ESM	MR	DA	DA
MIROC5	MC	DA	DA
MPI-ESM-LR	MP	DA	DA
MRI-CGCM3	MG	DA	DA
NorESM1-M	NO	DA	DA

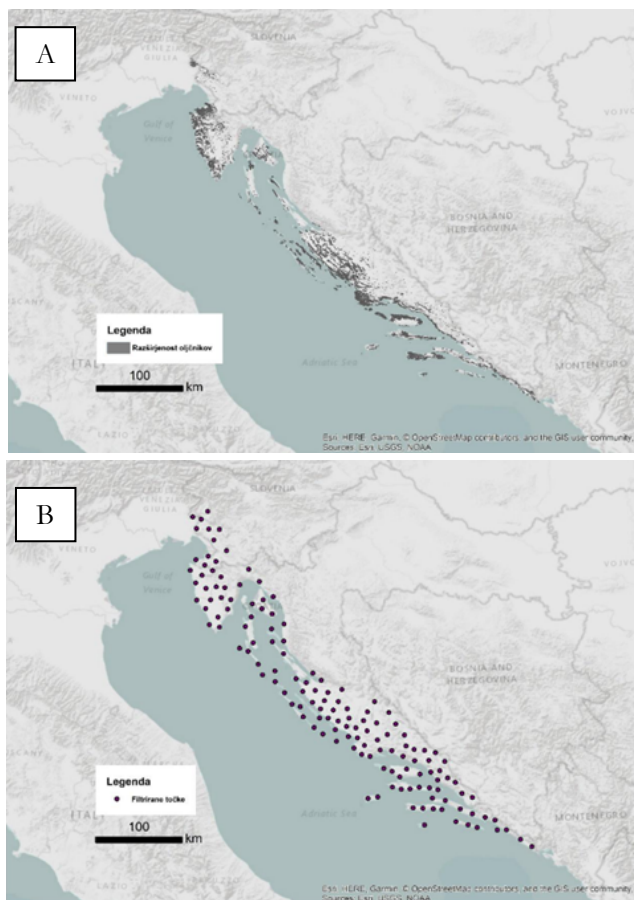
Z omenjenimi vhodnimi podatki (prostorsko filtrirane lokalitete oljčnikov) in PCA komponentami, ki predstavljajo lastnosti sedanjega in prihodnjega podnebja, smo s pomočjo GIS orodja TerrSet [34] oblikovali model distribucije vrst MT za vse obravnavane CMIP5 podnebne modele in oba scenarija (RCP4.5 in RCP8.5). Za primerjavo in validacijo modela smo za izbrane globalne podnebne modele in scenarije sestavili tudi drugi model distribucije vrst, pri čemer smo se naslonili na metodologijo modeliranja CCS. Vhodne podatke za odziv ciljne vrste na temperaturne in padavinske razmere smo črpali iz podatkovne baze Ecocrop (<http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/home>). Kakovost napovedi obeh modelov smo preverili z analizo ROC (*ang. Receiver Operating Characteristic*) in vrednostjo AUC (*ang. Area Under the Curve*).

Razširjenost vrst je pogojena s primernostjo habitata, le-ta pa je najpogosteje pogojena z okoljskimi dejavniki. Zato večina modelov razširjenosti vrst temelji na konceptu določanja njene ekološke niše, ki je nabor vseh dejavnikov (biotskih in abiotskih) in njihovih lastnosti, ki vrsti omogočajo dolgoročno preživetje v danem okolju.

Ti modeli temeljijo na zvezi med prisotnostjo vrste in različnimi okoljskimi dejavniki in preslikajo ta odnos na druge lokacije. Rezultat je verjetnostna porazdelitev, ki prikazuje ustreznost območja za ciljno vrsto oziroma potencialni areal vrste. Takšno modeliranje se uporablja na različnih področjih prostorskih znanosti in je uporabno za napovedovanje širjenja invazivnih vrst in njihovega vpliva na okolje [35], načrtovanje zavarovanih območij [36], kartiranje vektorjev bolezni [37] itd. Vse bolj se uporabljajo tudi za napovedovanje vpliva podnebnih in okoljskih sprememb na porazdelitev organizmov.

### **3 Rezultati**

V prvem koraku je bila izdelana karta prostorske razporeditve (podatkovni tip poligon) oljčnikov v Sloveniji in na Hrvaškem (Slika 1A). V izogib prostorski avtokorelaciji odvisne spremenljivke smo omenjeno vektorsko bazo podatkov o oljčnikih filtrirali z uporabo podnebnih slojev (neodvisnih spremenljivk) in izračunom indeksa podnebne heterogenosti. Rezultat je točkovni podatek (Slika 1B), ki prikazuje lokalitete oljčnikov na raziskovanem območju, ki so bile v postopkih modeliranja obstoječe in prihodnje prostorske distribucije, v nadaljevanju, obravnavane kot odvisna spremenljivka.

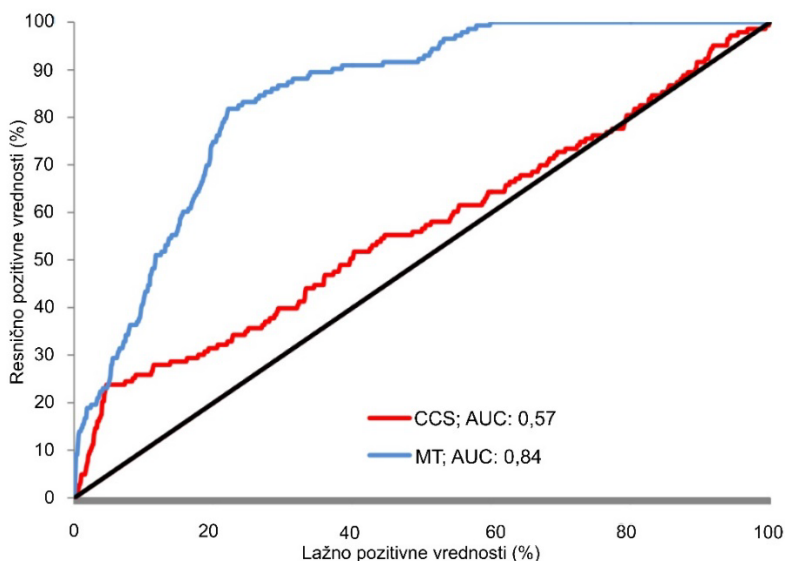


**Slika 1: Karta prostorske razširjenosti oljčnikov na raziskovanem območju (A) in odvisna spremenljivka v obliki filtrirani točkovnih podatkov v modelih obravnavanih lokalitet oljčnikov (B)**

Vir: lasten.

Kakovost modelov MT in CCS, ovrednotena z analizo ROC in vrednostjo AUC, je prikazana na Sliki 2. Model MT ima praktično pri vseh mejnih vrednostih verjetnostne porazdelitve podnebne ustreznosti za gojenje oljk na raziskovanem območju več zadetkov kot model CCS. Posledično je njegova vrednost AUC višja (0,84) v primerjavi z modelom CCS (0,57).





Slika 2: Rezultati analize ROC s pripadajočo AUC vrednostjo za oba modela MT in CCS

Vir: lasten.

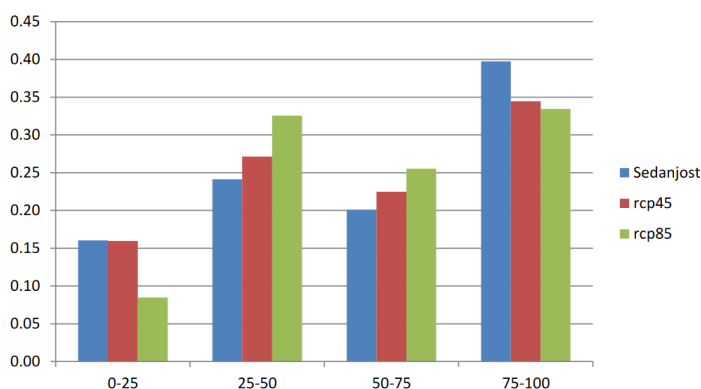
Za preprostejšo interpretacijo razvoja podnebne ustreznosti za gojenje oljk na območju Slovenije in Hrvaške smo izračunane verjetnostne porazdelitve za obstoječe in prihodnje stanje (2070) reklasificirali z uporabo kvartilov. Delež dobljenih razredov (0–25 %, 25–50 %, 50–75 % in 75–100 %) po emisijskih scenarijih (RCP4.5 in RCP8.5) za model MT prikazuje Slika 3.

Tako je največji del raziskovanega območja (skoraj 40 %) pripadal razredu z najvišjo stopnjo podnebne ustreznosti (75–100 %), temu sledita razreda 25–50 % in 50–75 %. Podnebno najustreznejša območja se raztezajo po večjem delu priobalnega pasu Hrvaške, z nekaj izjemami (Kvarnersko primorje, zaledni višji predeli severnega Hrvaškega primorja ter velebitsko Podgorje ter skrajni jugu Dalmacije), in Slovenske Istre.

Ob predpostavki realizacije emisijskega scenarija RCP4.5, model MT na raziskovanem območju za leto 2070 ocenjuje dokaj podoben vzorec ustreznih površin za gojenje oljk glede na trenutno stanje. Delež manj ustreznih površin (0–25 %) bi lahko ostal enak. Lahko bi se povečala površina oziroma delež druge (25–50 %) in tretje (50–75 %) stopnje podnebne ustreznosti, zmanjšal pa bi se delež

najvišje stopnje podnebne ustreznosti (75–100 %) za gojenje oljk. Slednje bi lahko prizadelo zaledje Tržaškega zaliva oziroma celotno Primorsko fitogeografsko regijo Slovenije. Podnebno manj ustrežna bi lahko bila tudi območja na zahodni strani velebitskega Podgorja, kjer bi se stopnja ustreznosti znižala iz tretje na drugo. V južnejših predelih hrvaškega primorja model MT ne predvideva opaznejših sprememb v podnebni ustreznosti z izjemo skrajne Južne Dalmacije, kjer bi se lahko pojavilo nekaj več območij z drugo stopnjo primernosti (25–50 %).

Emisijski scenarij RCP8.5 predvideva potencialno zmanjšanje območij z najnižjo stopnjo podnebne ustreznosti (0–25 %), v primerjavi s scenarijem RCP4.5 pa se še za dodaten odstotek zmanjšajo območja z najvišjo stopnjo podnebne ustreznosti. V do 3,7 °C toplejši atmosferi bi lahko po površini napredovala območja z drugo (25–50 %) in tretjo (50–75 %) stopnjo podnebne ustreznosti za gojenje oljk na raziskovanem območju. Tudi v tem primeru bi bile razlike najbolj opazne v severno primorski regiji Slovenije, kjer se v primerjavi z trenutnimi pogoji in prihodnostjo po scenariju RCP4.5 še dodatno skrči območje z najvišjo stopnjo podnebne ustreznosti, se pa povečajo območja z drugo (25–50 %) stopnjo primernosti. Najbolj primeren habitat za oljke bi tako ostal ozek pas vzdolž slovenske obale, v zaledju pa bi večina območja lahko dosegla največ tretjo stopnjo podnebne ustreznosti. V primerjavi z emisijskim scenarijem RCP4.5 se na območjih v zaledju Kvarnerja, od Snežnika in Gorskega kotarja proti morju lahko poveča stopnja podnebne ustreznosti na drugo stopnjo.



**Slika 3: Primernost habitata leta 2070 pri koncentraciji toplogrednih plinov RCP4.5 po modelu MT**

Vir: lasten.

Na podlagi rezultatov modela CCS za trenutno stanje bi lahko sklepali, da je večina območja izven priobalnega pasu podnebno manj ali celo neprimerna za gojenje oljk. Najbolj primerni habitati za oljke so južno orientirani predeli severnega Dalmatinskega otočja ter obalni predeli otokov srednje Dalmacije.

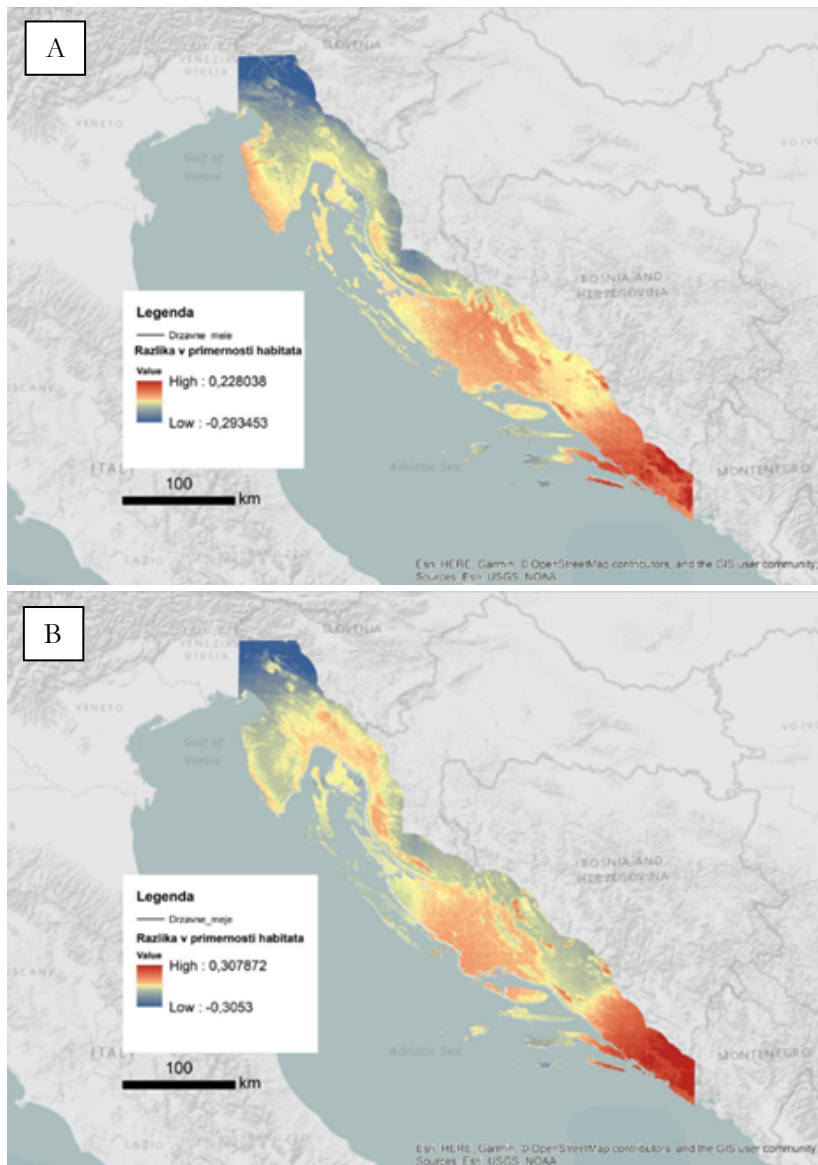
### **3.1 Razlike med modeloma na nivoju slikovnih enot**

Potencialno izboljšanje ali nazadovanje podnebne ustreznosti za gojenje oljk do leta 2070 po emisijskih scenarijih RCP4.5 in RCP8.5 za vsak kvadratni kilometer na raziskovanem območju prikazujeta Slika 4 (model MT) in Slika 5 (model CCS). Tople barve predstavljajo območja, kjer bi se lahko podnebna ustreznost za gojenje oljk izboljšala, hladne barve pa prikazujejo območja nazadovanja podnebne ustreznosti.

Ocene sprememb po modelu MT nakazujejo, da se lahko podnebna ustreznost za gojenje oljk bolj spreminja z oddaljenostjo od morja. Poslabšanje podnebne ustreznosti je povezano tudi z geografsko širino in nadmorsko višino. Izboljšanje podnebne ustreznosti za oljko z večjo gotovostjo lahko pričakujemo le v skrajnem južnem predelu raziskovanega območja (za do 22 % po scenariju RCP4.5 ali do 31 % po scenariju RCP8.5). Značilne razlike smeri sprememb podnebne ustreznosti za oljko so opazne tudi na manjših otokih Hrvaške.

Emisijski scenarij RCP4.5 nakazuje stabilne podnebne pogoje v priobalnem pasu tako Slovenije kot Hrvaške. Kontinentalno zaledje nakazuje kontrast potencialnih sprememb v smeri SZ-JV. Če na višji geografski širini lahko pričakujemo hitro poslabšanje podnebne ustreznosti z oddaljevanjem od morja, velja nasprotno za južnejše predele Hrvaške, kjer se podnebna ustreznost za gojenje oljk v notranjosti celo nekoliko poveča.

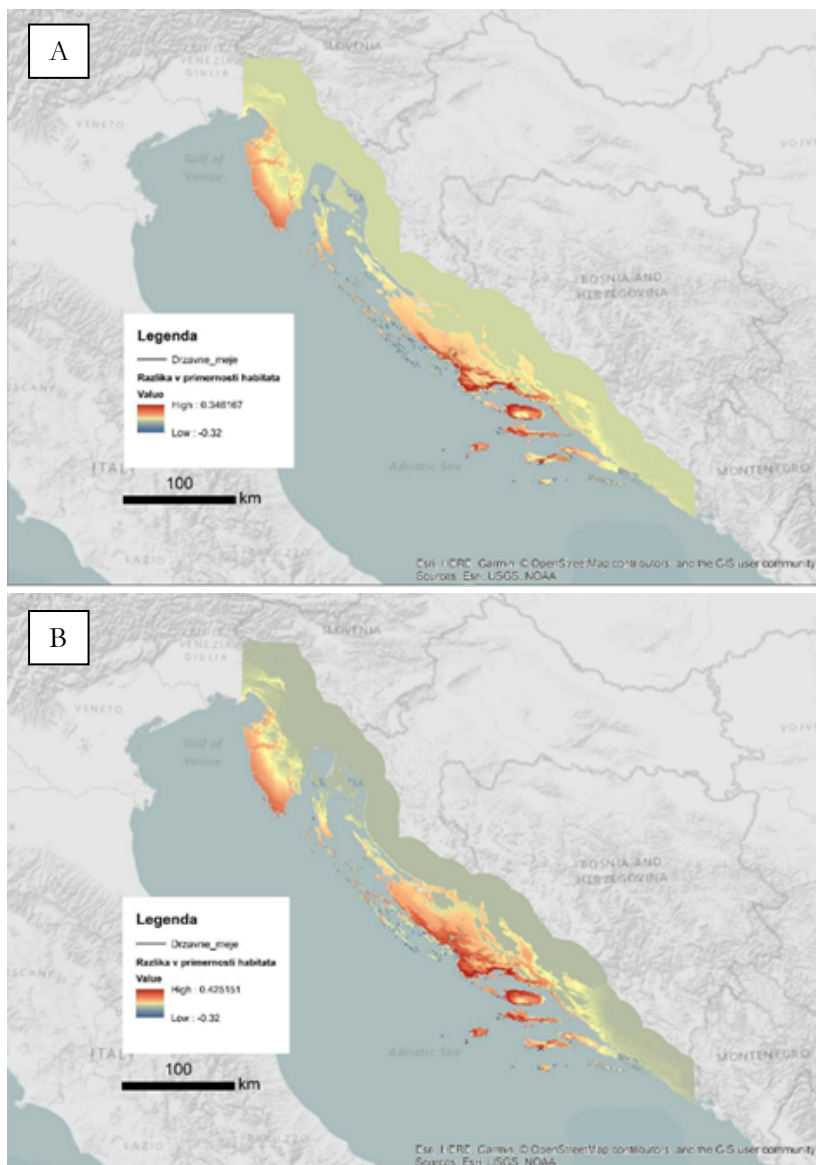
Ob morebitni realizaciji emisijskega scenarija RCP8.5 lahko raziskovano območje doleti še kompleksnejši prostorski vzorec sprememb podnebne ustreznosti za gojenje oljk. V tem primeru bi se lahko pogoji vzdolž slovenske obale poslabšali. Tudi na Hrvaškem bi oljka lahko bila soočena z manj ugodnim podnebjem, z izjemo območja med Zadarom in Splitom in skrajnim jugom.



Slika 4: Potencialne spremembe podnebne ustreznosti za gojenje oljk (*Olea europaea*) med predvidenim (2070) in trenutnim stanjem (v deležu) po modelu MT za emisijski scenarij RCP4.5 (A) in RCP8.5 (B)

Vir: lasten.

S Slike 5 lahko razberemo prostorski odtis razlik v podnebni ustreznosti za oljko po modelu CCS.



Slika 5: Potencialne spremembe podnebne ustreznosti za gojenje oljk (*Olea europaea*) med predvidenim (2070) in trenutnim stanjem (v deležu) po modelu CCS za emisijski scenarij RCP4.5 (A) in RCP8.5 (B)

Vir: lasten.

Model CCS predvideva izboljšanje podnebnih pogojev za oljko po skoraj celotnem priobalnem pasu Slovenije in Hrvaške. Izjema je območje med mestoma Reka in Zadar in okolica Zadra. Predviden ju tudi večji kontrast sprememb podnebnih pogojev na manjših otokih Hrvaške. Sicer je opazno vidno izboljšanje podnebne ustreznosti v primeru realizacije emisijskega scenarija RCP8.5.

## 4. Razprava in zaključki

### 4.1 Raziskave v tujini

Okoljski dejavniki, ki pogojujejo uspešno rast dreves, se neprestano spreminjajo. Glede na fosilne zapise in paliniološke raziskave lahko zaključimo, da je oljka skozi svojo zgodovino neprestano širila in krčila svoj areal in se v nekaterih obdobjih pojavljala tudi širše od trenutne geografske razširjenosti. Glavno vlogo pri teh premikih so (po večini) igrale podnebne spremenljivke [4], [42]. Odziv oljke na podnebne spremembe so raziskovali že številni avtorji. Moriondo idr. (2013) [38] so s pomočjo modeliranja želeli napovedati razširjenost oljk v Sredozemskem bazenu. Ugotavljajo, da bo oljka v prihodnosti širila svoj areal proti severu. Glede na toplejše in bolj suho podnebje modeli napovedujejo močan vpliv na potencialno prostorsko razporeditev oljk v prihodnjih desetletjih. Istočasno bodo zaradi toplejših podnebnih razmer območja na severnih delih Portugalske, Španije in Atlantskega območja Francije, kjer oljk niso nikoli gojili, postala primerna za njeno gojenje. Z uporabo regionalnega fenološkega modela, možne premike proti severu izpostavljajo tudi Orlandi idr. (2013) [39], [42]. Tanasijević idr. (2014) [14] so potencialno primerne habitate za oljke ugotavljali s pristopom temperaturnih zahtev za oljke. Ugotavljajo, da bi se lahko območje, primerno za pridelavo oljk, do leta 2050 povečalo za približno 39 % v primerjavi z letom 2000. Kot številni drugi avtorji napovedujejo nova primerna območja in premike areala oljke proti severu in v višje nadmorske višine.

Kljub številnim raziskavam, ki napovedujejo, da bo oljka v prihodnosti razširila svoj areal, pa utegnejo imeti podnebne spremembe tudi številne negativne posledice na oljčnike (npr. vse več ekstremnih vremenskih dogodkov in z njimi tudi suš in pozeb). Čeprav se bo areal oljke v Evropi najverjetneje širili proti severu, zaradi pomanjkanja vode utegne oljka v Severni Afriki, v južnih predelih Iberskega polotoka in na Bližnjem vzhodu skrčiti svoj areal. To je posledica posebej suhih razmer v jeseni, kar

vpliva na pomanjkanje vode v naslednjem poletju. V manjši meri je enak trend opazen tudi v severnem delu Sredozemskega bazena, kjer se površine, ki so primerne za gojenje oljk, postopoma krčijo proti obali [38]. Tudi v Italiji naj bi se proizvodnja oljk postopoma, s segrevanjem podnebja, gibala proti severu, v trenutno neugodna območja, kot je Padska nižina. V bolj vročih južnih predelih Italije pa lahko pričakujemo krčenje njenega areala [40], [42].

V sodobnih proizvodnih sistemih bo v oljkarstvu potrebno uvajanje namakanja zaradi boljše rodnosti intenzivnih oljčnih nasadov in doseganja visoke kakovosti pridelkov. Namakanje bo potrebno uvesti na tistih območjih, kjer količina padavin ne more nadomestiti izgube vode zaradi evapotranspiracije. Namakanje se uvaja tudi v izrazito aridnih krajih z manj padavinami, z namenom, da dosežejo čim boljši gospodarski rezultat. V teh območjih oljke uspevajo in rodijo tudi brez namakanja, vendar so taka drevesa bolj podvržena izmenični rodnosti in dajejo manj pridelka [2], [42]. Od vseh registriranih oljčnikov v Sloveniji je trenutno namakanih le 2 %.

Tudi pozebe so v preteklosti že zadale hude udarce pridelovalcem oljk. Kljub napovedani višji povprečni temperatur zraka, ki je ugodna za oljke, utegne posledično podaljšanje vegetacijske dobe na oljke vplivati negativno. V spomladanskem ali jesenskem času lahko pričakujemo več nenadnih vdorov hladnega zraka, kar oljkam ne ustreza. Sicer so vdori hladnega zraka še vedno ena od stalnic našega podnebja, saj je zmerno topli pas pod vplivom tako vročih tropskih zračnih mas kakor tudi mrzlih polarnih, poredkoma celo arktičnih mas. Podatki za 20 stoletje kažejo, da je do pozeb prihajalo na vsakih 20 let. Prepogoste pozebe bomo zato tudi v prihodnje morali upoštevati pri širjenju areala oljke, saj je lahko zaradi visokih stroškov obnove nasadov in izpada dohodka oljkarstvo nerentabilno [5].

## **4.2 Naše raziskave**

Naši rezultati potrjujejo kompleksen odziv vrst na spreminjajoče se okolje. Model MT napoveduje zmanjšanje površine območij z najvišjo stopnjo primernosti do konca stoletja po obeh scenarijih (RCP4.5 in RCP8.5). Hkrati bi se po scenariju RCP8.5 lahko zmanjšala površina območij z najnižjo stopnjo primernosti za gojenje oljke. Na podlagi ocene potencialnega povečanja ustreznih površin za gojenje oljk, bodisi v preostalih dveh razredih ustreznosti, po modelu MT, ali na podlagi

rezultatov modela CCS, lahko delno potrdimo hipotezo, da se bo površina primernih habitatov povečala.

Ugotovimo lahko, da emisijska scenarija RCP4.5 in RCP8.5 dajeta različno oceno. Posledično lahko potrdimo hipotezo, ki je nakazovala variabilnost tako v uporabljenih podnebnih modelih kot v emisijskih scenarijih. Predvsem po modelu MT je razlika v podnebni ustreznosti za gojenje oljke bolj opazna v severnejših predelih in v nekaterih predelih v zaledju Jadranske obale.

Pričakovali smo, da bi se oljka potencialno lahko razširila v notranjost in v višje predele. Rezultati kažejo nasprotno, model MT ob upoštevanju emisijskega scenarija RCP4.5 predvideva upad podnebne ustreznosti za oljko v zaledju Slovenskega Primorja. Ob morebitni realizaciji scenarija RCP8.5 bi imel najvišjo stopnjo primernosti za gojenje oljk le ozek obalni pas v Tržaškem zalivu in le nekateri predeli v notranjosti obravnavanega območja. Tudi model CCS na tem območju ne kaže večjih sprememb podnebne ustreznosti za gojenje oljk.

Model MT podobno sliko kaže tudi v notranjosti Istrskega polotoka, kjer pride do krčenja habitatov s četrto (najvišjo) stopnjo primernosti, po obeh scenarijih. Presenetljivo se na območju Kvarnerskega polotoka po scenariju RCP4.5 razširi območje s prvo stopnjo primernosti (0–25 %) in po pesimističnem scenariju (RCP8.5) se le-to skrči in večina Kvarnerskega polotoka doseže drugo stopnjo primernosti (25–50 %). Tudi južneje, v zaledju Velebitskega pogorja bi podnebni pogoji po scenariju RCP4.5 lahko bili v drugi polovici stoletja manj primerni za oljko, medtem ko po scenariju RCP8.5 lahko pričakujemo več območji s 3 stopnjo primernosti (50–75 %). Tudi po modelu CCS Kvarner ostaja manj ustrezno področje za oljko. Do največjih razlik v podnebni ustreznosti bi lahko po scenariju RCP4.5 prišlo ob zahodni obali Istre, vendar le-te bledijo proti notranjosti in proti višjim predelom. Po pesimističnem emisijskem scenariju (RCP8.5) bi lahko bile razlike izrazitejše. Model CCS nasprotno kot model MT največje razlike v podnebni ustreznosti za gojenje oljke kaže na južnih obalnih predelih severne Dalmacije, na meji s srednjo Dalmacijo. Po pesimističnem emisijskem scenariju so tukaj razlike še bolj opazne. Tovrstna variabilnost rezultatov dokazuje, da bo odziv oljke na prihodnje podnebne razmere kompleksen in posledično narašča negotovost modelnih napovedi.



### **4.3 Zaključek**

Naši rezultati so le ocena potencialne razširjenosti areala oljke v prihodnosti in imajo tudi nekatere pomanjkljivosti. Dolgoročne podnebne napovedi so lahko dokaj nezanesljive, še zlasti v regionalnem ali lokalnem merilu.

Za boljšo oceno ustreznih pogojev za gojenje oljke bi bile potrebne poglobljene analize na regionalni ravni, kjer bi lahko upoštevali tudi druge okoljske determinante (naklon, ekspoziacija, vlaga v tleh, lastnosti prsti, vpliv škodljivcev itd.), ki sooblikujejo prostorski vzorec oljčnikov na raziskovanem območju. Oljčni nasadi so večinoma urejeni na prisojnih, južnih in jugozahodnih pobočjih, v zavetnih legah pred burjo in izven dna dolin, kjer se pojavlja temperaturna inverzija [25]. Posledično ni pričakovati večjega širjenja oljk v notranjost obravnavanega območja. Ob upoštevanju omenjenih parametrov ugotovitve kažejo, da je denimo od celotne površine Slovenske Istre, ki obsega 419 km<sup>2</sup>, za oljčnike primernih le 20 % površin oziroma 83 km<sup>2</sup> [25].

Lahko zaključimo, da modela MT in CCS ponujata različne rezultate. Na splošno model MT po obeh scenarijih napoveduje večje razlike v zaledju v primerjavi z modelom CCS. Slednji se je izkazal za manj zanesljivega, čeprav je slika na nekaterih predelih zelo podobna temu, kar bi pričakovali, saj se predvsem na Istrskem polotoku, v severni in južni Dalmaciji areal širi proti notranjosti.

Prav gotovo bo oljkam v prihodnosti ustrezalo toplejše ozračje, vendar je problematika večplastna. Kljub nekoliko več primernejših površin v zaledju zaradi napovedanih otoplitev, bodo ekstremni vremenski dogodki še vedno omejevali razširjenost oljčnikov. Ne bi se smeli prenaglit pri širjenju oljčnih nasadov v višje predele, saj oljke ostajajo zelo odvisne od mikropodnebnih razmer, predvsem občasnih pozeb. Prav tako je v višji notranjosti večja verjetnost, da bodo nastopile temperature pod -8 °C, ki povzročijo prve poškodbe zaradi mraza [41]. Morda bi prav nestabilnim razmeram lahko pripisali stanje, ki ga kaže model MT v notranjosti, predvsem v Goriških brdih in na Istrskem polotoku, kjer se območja z najvišjo stopnjo podnebne ustreznosti lahko predvidoma zelo skrčijo. V južnejših predelih raziskovanega območja so rezultati bolj v skladu s pričakovanji, saj se po modelu MT zmanjša površina z drugo stopnjo podnebne ustreznosti, prav tako pa model CCS na tem predelu nakazuje širjenje ustreznih površin proti notranjosti.

## Zahvale

Študijo so omogočili: programska skupina P6-0372 (»Slovenska identiteta in kulturna zavest v jezikovno in etnično stičnih prostorih v preteklosti in sedanjosti«) in P1-0164 (»Raziskave za zagotavljanje varne hrane in zdravja«).

## Literatura

- [1] M. Bučar-Miklavčič, B. Butinar, M. Jančar, M. Sotlar, in V. Vesel, „Oljka in njeno olje“, *Kmečki glas*, Ljubljana, str. 143, 1997.
- [2] V. Sancin, *Velika knjiga o oljki*. Trst: Založništvo tržaškega tiska, 1990.
- [3] G. Besnard, „Origin and Domestication“, v *The Olive Tree Genome. Compendium of Plant Genomes*, E. Rugini, L. Baldoni, R. Muleo, in L. Sebastiani, Ur. Cham: Springer International Publishing, 2016, str. 1–12. doi: 10.1007/978-3-319-48887-5\_1.
- [4] M. Moriondo, F. M. Stefanini, in M. Bindi, „Reproduction of olive tree habitat suitability for global change impact assessment“, *Ecological Modelling*, let. 218, št. 1–2, str. 95–109, okt. 2008, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.06.024.
- [5] D. Ogrin, „Oljka v Slovenskem Primorju“, *Geografski obzornik*, str. 4–10, 2004.
- [6] IOC, „The International Olive Council“, *The International Olive Council, Madrid*, 2016. <https://www.internationaloliveoil.org/> (pridobljeno 10. december 2018).
- [7] D. Dujmović, M. Šuste, M. Duvančić, in F. Strikić, „Ocena proizvodnog prostora Knina za uzgoj masline“, *Pomologia Croatica: Glasilo Hrvatskog agronomskog društva*, let. 21, št. 1–2, str. 35–50, 2017.
- [8] L. Kajfež Bogataj, „Aerosoli : Grejemo, hladimo, mračimo, svetlimo : Neprijetna resnica“, *Delo, Polet : magazin Dela in Slovenskih novic*, let. 9, št. 11, str. 30, 2010.
- [9] F. Giorgi in P. Lionello, „Climate change projections for the Mediterranean region“, *Global and planetary change*, let. 63, št. 2–3, str. 90–104, 2008.
- [10] P. Lionello *idr.*, „The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues“, v *Developments in Earth and Environmental Sciences*, let. 4, P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli, in R. Boscolo, Ur. Amsterdam: Elsevier, 2006, str. 1–26. doi: 10.1016/S1571-9197(06)80003-0.
- [11] U. Ulbrich *idr.*, „Past and Current Climate Changes in the Mediterranean Region“, v *Regional Assessment of Climate Change in the Mediterranean*, let. 50, A. Navarra in L. Tubiana, Ur. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, str. 9–51. doi: 10.1007/978-94-007-5781-3\_2.
- [12] IPCC, „AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014“, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Synthesis Report, 2014. Pridobljeno: 27. februar 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- [13] IPCC, „AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis“, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Synthesis Report, 2021. Pridobljeno: 27. februar 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [14] L. Tanasijević, M. Todorovic, L. S. Pereira, C. Pizzigalli, in P. Lionello, „Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region“, *Agricultural Water Management*, let. 144, str. 54–68, 2014.
- [15] ARSO, „Podnebne spremembe v Sloveniji. Podnebne podlage za pripravo ocene tveganj in priložnosti, ki jih podnebne spremembe prinašajo za Slovenijo“, Agencija republike Slovenije za okolje, Ljubljana, Prvo poročilo (različica 2), 2014.
- [16] L. Kajfež Bogataj, „Bolje ne bo nikoli: Specifična geografska lega Slovenije in intenzivni vremenski procesi : Neprijetna resnica“, *Delo, Polet : magazin Dela in Slovenskih novic*, let. 8, št. 29, str. 32, 2009.
- [17] D. Ogrin in D. Plut, *Aplikativna fizična geografija Slovenije*. Ljubljana: Znanstvena založba filozofske fakultete, 2009.

- [18] DHMZ, „Šesto nacionalno izvješće Republike Hrvatske prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC)“, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 2013.
- [19] K. Zaninović *idr.*, *Klimatski atlas Hrvatske / Climate atlas of Croatia: 1961-1990, 1971-2000*. Zagreb: Državni hidrometeorološki zavod, 2008.
- [20] J. Ronchail, M. Cohen, M. Alonso-Roldán, H. Garcin, B. Sultan, in S. Angles, „Adaptability of Mediterranean Agricultural Systems to Climate Change: The Example of the Sierra Mágina Olive-Growing Region (Andalusia, Spain). Part II: The Future“, *Weather, Climate and Society*, let. 6, št. 4, str. 451–467, okt. 2014, doi: 10.1175/WCAS-D-12-00045.1.
- [21] L. Ponti, A. P. Gutierrez, P. M. Ruti, in A. Dell’Aquila, „Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers“, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, let. 111, št. 15, str. 5598–5603, apr. 2014, doi: 10.1073/pnas.1314437111.
- [22] V. Vučetić, *Ujecaj klimatskih promjena na poljoprivrednu proizvodnju*. Zagreb: Državni hidrometeorološki zavod, 2013.
- [23] I. N. Therios, *Olives (Crop Production Science in Horticulture Book 18)*. Solun: School of Agriculture Aristotle University, 2009.
- [24] D. Ogrin, „Podnebni tipi Slovenije“, *Geografski vestnik*, str. 39–56, 1996.
- [25] D. Ogrin, „Podnebje Slovenske Istre“, *Annales*, Koper, 1995.
- [26] D. Magaš, *Geografija Hrvatske*. Zadar: Sveučilište u Zadru, Odjel za geografiju i izdavačka kuća Meridijani, 2013.
- [27] O. Bonacci, „Analiza nizova srednjih godišnjih temperatura zraka u Hrvatskoj“, *Gradevinar*, let. 62, št. 9, str. 781–791, 2010.
- [28] M. Gajić-Čapka, M. Perčec Tadić, in M. Patarčić, „Digitalna godišnja oborinska karta Hrvatske“, *Hrvatski meteorološki časopis*, let. 38, str. 21–33, 2003.
- [29] Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, „Biportal – Web portal Informacijskog sustava zaštite prirode. Karta kopnenih nešumskih staništa Republike Hrvatske 2016“, 2016. <http://www.iszp.hr/gis/> (pridobljeno 17. april 2018).
- [30] Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, „Grafični podatki RABA za celotno Slovenijo“, 2019. <http://rkg.gov.si/GERK/> (pridobljeno 20. marec 2019).
- [31] R. J. Hijmans, S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones, in A. Jarvis, „WorldClim – Global Climate data“, Museum of Vertebrate Zoology, University of California, Berkeley, ZDA, 2005. [Na spletu]. Dostopno na: <http://www.worldclim.org/>
- [32] IPCC, „Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- [33] J. L. Brown, „SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses“, *Methods Ecol Evol*, let. 5, št. 7, str. 694–700, jul. 2014, doi: 10.1111/2041-210X.12200.
- [34] J. R. Eastman, *TerrSet*. Worcester: Clark University, 2020.
- [35] L.-M. Herborg, J. M. Drake, J. D. Rothlisberger, in J. M. Bossenbroek, „Identifying suitable habitat for invasive species using ecological niche models and the policy implications of range forecasts“, v *Bioeconomics of invasive species: integrating ecology, economics, policy, and management*, R. P. Keller, D. M. Lodge, M. A. Lewis, in J. F. Shogren, Ur. New York, NY: Oxford University Press, 2009, str. 63–82.
- [36] A. Guisan *idr.*, „Predicting species distributions for conservation decisions“, *Ecol Lett*, let. 16, št. 12, str. 1424–1435, dec. 2013, doi: 10.1111/ele.12189.
- [37] A. T. Peterson, V. Sánchez-Cordero, C. B. Beard, in J. M. Ramsey, „Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease, Mexico“, *Emerging infectious diseases*, let. 8, št. 7, str. 662–667, 2002.
- [38] M. Moriondo *idr.*, „Olive trees as bio-indicators of climate evolution in the Mediterranean Basin“, *Global Ecol Biogeogr*, let. 22, št. 7, str. 818–833, 2013.

- [39] F. Orlandi *idr.*, „Climatic indices in the interpretation of the phenological phases of the olive in mediterranean areas during its biological cycle“, *Climatic Change*, let. 116, št. 2, str. 263–284, 2013.
- [40] A. P. Gutierrez, L. Ponti, in Q. A. Cossu, „Effects of climate warming on Olive and olive fly (*Bactrocera oleae* (Gmelin)) in California and Italy“, *Climatic Change*, let. 95, št. 1–2, str. 195–217, jul. 2009, doi: 10.1007/s10584-008-9528-4.
- [41] D. Ogrin, „Pozebe v Primorju z vidika uspevanja mediteranskih kultur“, *Dela*, št. 18, str. 157–170, dec. 2002, doi: 10.4312/dela.18.157-170.
- [42] Iztok, Lorenčič. 2019. „*Vpliv bodočega podnebja na uspevanje oljke (Olea europaea) na vzhodni jadranski obali (Slovenija, Hrvaška)*“. Magistrsko delo, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija.

# INTERAKCIJA NARAVNIH IN DRUŽBENIH RAZMER KOT POSPEŠEVALEC ZARAŠČANJA KRASA

DANIJEL DAVIDOVIČ,<sup>1</sup> DANIJEL IVAJNSIČ,<sup>1,2</sup> JURE ČUŠ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Maribor, Slovenija

daniyel.davidovic@um.si, dani.ivajnsic@um.si

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija

dani.ivajnsic@um.si

<sup>3</sup> Starše, Slovenija

jure.cus@gmail.com

**Sinopsis** Na Krasu se sekundarna travišča, zaščiteni pod okriljem omrežja Natura 2000, zaraščajo z gozdom. Do konca stoletja jim grozi skoraj popolno izginotje. Časovna vrsta več spektralnih podob satelitov Landsat v kombinaciji s prostorskimi podnebnimi podatki razkriva dinamiko zaraščanja odprtih habitatov na Krasu. Rezultati kažejo, da lahko do konca stoletja zaradi interakcije naravnih in družbenih razmer izgine tudi več kot tri četrtine trenutno obstoječih odprtih habitatov. Neugodna starostna sestava nosilcev kmetijskih gospodarstev, razdrobljenost kmetijskih zemljišč in opuščanje živinoreje le pospešuje krčenje vrstno bogatih in zaščitenih travišč. Predstavljen metodološki pristop omogoča monitoring in načrtovanja kmetijskih in naravovarstvenih dejavnosti na regionalni ravni in napoved razvoja sukcesije pod vplivom prihodnjih podnebnih sprememb.

## Ključne besede

sukcesija,  
sekundarna  
travišča,  
Landsat,  
daljinsko  
zaznavanje,  
Geografski  
informacijski  
sistemi

# INTERACTION BETWEEN NATURAL AND SOCIAL ACCELERATORS OF KARST SECONDARY SUCCESSION

DANIJEL DAVIDOVIČ,<sup>1</sup> DANIJEL IVAJNSIČ,<sup>1,2</sup> JURE ČUŠ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> University of Maribor, Faculty of Arts, Maribor, Slovenia  
danijel.davidovic@um.si, dani.ivajnsic@um.si

<sup>2</sup> University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia  
dani.ivajnsic@um.si

<sup>3</sup> Starše, Slovenia  
jure.cus@gmail.com

**Abstract** In the Karst area, secondary grasslands protected under the Natura 2000 network are overgrown with forest. By the end of the century, they will be threatened with almost complete retraction. The time series of Landsat multi-spectral images in combination with spatial climate data revealed the succession dynamics of open habitats. The results show that by the end of the century, more than three-quarters of the existing open habitats may disappear, owing to adverse natural and social conditions. The unfavourable age structure of farm holders, the fragmentation of agricultural land and the abandonment of livestock farming serve only to accelerate the shrinking of species-rich and protected grasslands. The methodological approach presented here enables monitoring and planning of agricultural and environmental protection activity at the regional level and includes succession process forecasting under future climate change conditions.

**Keywords:**

succession,  
secondary  
grasslands,  
Landsat,  
remote sensing,  
Geographic  
information  
systems

## 1 Uvod

Kras je izrazita apnenčasta planota s površino 429 km<sup>2</sup>, ki se razteza v dinarski smeri SZ-JV. V geološkem pogledu je antiklinala iz apnenca in dolomita med flišnima sinklinalama Vipavske doline in Tržaškega zaliva [1]. Leži v prehodni coni med kontinentalnim in submediteranskim podnebjem z značilnimi vlažnimi in hladnimi zimami ter dolgimi in vročimi poletji [2]. Povprečna letna temperatura znaša 12,8 °C, letna količina padavin znaša 1571 mm [3]. Kljub tolikšni količini padavin je večina Krasa brez površinskih tekočih voda in trajnih izvirov, saj vode na prehodu s fliša na apnenec poniknejo.

Tako kot danes je na Krasu gozd prevladoval že v preteklosti [4]. V zgodnjem holocenu sta najpogostejši naravni združbi tvorila bukovo-jelov (*Abieti-Fagetum*) in hrastovo-gabrov (*Quercu-Carpinetum*) gozd [4]. S prihodom človeka, pojavom poljedelstva in živinoreje se je gozdnata podoba krajine pričela hitro spreminjati. Intenzivno izsekavanje primarnega gozda zaradi pridobivanja pridelovalnih površin se začne že pred Rimljani. Kljub temu do 14. stoletja na tem območju prevladujejo gozdovi. V 15. stoletju se nato gozdne površine Krasa krčijo kot posledica povečevanja poljedelstva, pašništva in prodaje lesa ladjedelnicam [5]. Do 19. stoletja tako Kras postane neporaščena kamnita pokrajina [6]. Zmanjševanje obsega gozda je povzročilo močno erozijo tal, močnejši veter in spremembo vodnega režima [5], [7], [8]. V 19. stoletju se prične načrtno pogozdovanje Krasa (sprva s poskusi sejanja hrastovega želoda in pozneje z uspešnejšim črnim borom (*Pinus nigra*)) [9], ki traja do prve polovice 20. stoletja. Kasneje pogozdovanje, zaradi negativnih demografskih trendov in posledičnega opuščanja kmetijskih dejavnosti, zamenja proces naravnega zaraščanja [8], [10], [11]. Na zaraščajočih površinah rastejo hrast puhavec, črni hrast, črni gaber, črni trn, pravi kostanj, mali jesen, trdoleska, graden, krhlika in rašeljika [5], [12].



Slika 1: Lokacija raziskovanega območja [13]

Danes je zaradi velike habitatne vrednosti 93 % Krasa zaščitenega kot območje Nature 2000. Predvsem sekundarna travišča predstavljajo habitate z največjo raznovrstnostjo organizmov v zmernih klimatih [14]. Omogočajo raznovrstne ekosistemske storitve, med katerimi so tudi: sekvestracija ogljika, preprečevanje vodne in vetrne erozije, nadzorovanje vlažnosti, oprashaevanje, nadzor divjih požarov, hrana za rejo živine, pridelava medu, habitat za prostoživeče vrste ter prostor za izobraževanje, rekreacijo in turizem [15].

Sekundarna travišča se na Krasu začnejo pojavljati v rimskem obdobju pred 2500 do 2000 leti [16]. Nastala so s sečnjo in požigom gozda. Praviloma na globljih tleh najdemo travnike, na plitvejših tleh pa pašnike [17]. Sicer je za Kras značilen ciklični proces opuščanja in kulture kmetijskih zemljišč oziroma širjenje in krčenje travišč. Največji obseg travišč beležimo pred 250 leti, ko so le-ta obsegala trikrat več površin kot danes [14], [16]. Skozi stoletja so kraška sekundarna travišča po vrstni pestrosti postala primerljiva z estonskimi [18], češkimi [19] in romunskimi travišči [19], [20], ki so bila priznana kot najbogatejše rastlinske združbe v popisnem merilu od 10 do 50 m<sup>2</sup>. Posledično je izginjanje sekundarnih travišč v mnogih delih sveta prepoznano kot ena izmed glavnih groženj rastlinski biodiverziteti [21], [22].



Zaraščanje travnikov je naraven proces. Ob odsotnosti človekovega upravljanja in ob primernih naravnih pogojih, ki med ostalim vključujejo zadostno količino padavin in primerne temperature zraka, se travnišča zaraščajo v gozd, s čimer se njihove posamezne ekosistemske storitve lahko izgubijo. Obsežna ekstenzifikacija lahko vpliva na mikroklimo in pogoje za vzgojo tradicionalnih kultur, ki so prilagojene toplejšim in bolj sušnim razmeram [8], [10]. Hkrati se poveča možnost za krepitev neugodnih razmer v gozdu, ki nastanejo zaradi škodljivcev, vetra, snega, žledu in zemeljskih plazov, kar povečuje sanitarno sečnjo in finančne stroške [5]. Gozdovi vplivajo tudi na tipične kraške pojave, ki nastajajo s korozijo, saj se z večjo poraščenostjo niža parcialni tlak CO<sub>2</sub> [1]. Zaradi monokulturnega pogozdovanja s črnim borom so gozdovi na Krasu postali tudi ranljivi za požare in škodljivce. Obsežno spreminjanje zemljiških kategorij pomeni tudi spreminjanje kulturne krajine [5], [7], [10]. Posledično je ogozdovanje povezano z nekaterimi negativnimi družbenogospodarskimi procesi, kot so deagrarizacija in depopulacija [5]. Kljub temu da imajo tudi gozdovi veliko naravovarstveno in kulturno vrednost, je zaradi povezljivosti in biodiverzitet smiselno ohranjanje travnišč v obsegu 15 % površin [14].

Na območjih Nature 2000, predvsem na JZ Slovenije, kamor spada tudi Kras, so ugotovljene izrazitejšje spremembe bioklimatskih spremenljivk [23]. Stanje se bo predvidoma stopnjevalo, saj je v dokumentih šestega poročila Medvladnega panela o podnebnih spremembah [24] izpostavljeno, da so emisije toplogrednih plinov v zadnjem desetletju (2010–2019) dosegle najvišji nivo v zgodovini. V sinteznem poročilu Climate Change 2021: The Physical Science Basis je izpostavljeno, da se negativni učinki v Mediteranu kažejo predvsem v obliki segrevanja ozračja, s številnejšimi temperaturnimi ekstremi, s povečano sušnostjo, z manjšo količino padavin, večjo požarno ogroženostjo in nižjo hitrostjo vetra [25]. Višje temperature zraka na Krasu je pričakovati tudi zaradi same lege, saj spada v Obalno-kraško regijo, ki je najbolj osončena regija v Sloveniji [26].

V prispevku se osredotočamo na zaraščanje odprtih ne-gozdnih, predvsem travniških površin na Krasu, ki jim številne študije [5], [14], [16], [27], [28] zaradi interakcije neugodnih socio-ekonomskih razmer in podnebnih sprememb napovedujejo negotovo prihodnost. Naslanjamo se na časovno serijo (1990–2019) podob satelitov Landsat. Še posebej nas je zanimalo: (1) kakšna je hitrost zaraščanja odprtih habitatov na Krasu, (2) ali na hitrost zaraščanja res vplivajo podnebne

spremenbe, (3) kakšna bo potem (v luči podnebnih sprememb) prihodnost travnišč in drugih odprtih habitatov na Krasu in (4) kako na zaraščanje Krasa vplivajo socio-ekonomske značilnosti lastnikov kmetijskih zemljišč?

## 2 Metode

### 2.1 Podatkovne baze in priprava podatkov

Zaraščanje oziroma napredovanje gozda na odprte habitate na Krasu smo ugotavljali s pomočjo vegetacijskega indeksa NDVI (*ang. Normalized Difference Vegetation Index*). Indeks NDVI smo izračunali za vsako leto v obdobju od 1990 do 2019 iz podatkov, pridobljenih s sateliti Landsat 1–8. Vse uporabljene Landsat podobe oziroma optični kanali so imeli enako prostorsko ločljivostjo (velikost slikovne enote enako 30 m). Podatki so prosto dostopni na spletnem portalu EarthExplorer [29], ki ga upravlja Geološki zavod ZDA (*ang. USGS*). Zaradi primerljivosti med leti smo uporabili satelitske podobe, zajete v mesecih junij, julij in avgust, ko je vegetacija v podobni (zreli) stopnji razvoja. Pred obdelavo podatkov oziroma izbranih spektralnih pasov je obsegala atmosfersko in radiometrično korekcijo s TerrSet modulom Landsat [30].

V nadaljevanju smo preverili vpliv podnebja na zaraščanje. Uporabili smo podnebne kazalce: povprečna dnevna temperatura zraka (TAS), povprečna dnevna maksimalna temperatura zraka (TASmax), povprečna dnevna minimalna temperatura zraka (TASmin), povprečna potencialna evapotranspiracija (PET) in letna količina padavin (PR). Ti podatki (z velikostjo slikovne enote približno 1 km<sup>2</sup> [30 arc sekund]) so prosto dostopni na spletnem portalu CHELSA [31], ki jo upravlja Švicarski zvezni inštitut za raziskave gozdov, snega in pokrajine (*ang. WSL*). V programskem okolju ArcGIS Pro 2.9.0 [32] smo nato izračunali letna povprečja vseh obravnavanih podnebnih kazalcev za obdobje od let 1990 do 2019.

V nadaljevanju smo z uporabo orodja *Zonal Statistics* v ArcGIS Pro izračunali povprečne letne vrednosti NDVI, TAS, TASmax, TASmin, PET in PR za raziskovano območje. Po preverjanju statistične značilnosti zvez med odvisno spremenljivko NDVI in prediktorji TAS, TASmax, TASmin, PET in PR, v programskem okolju R [33] smo tiste z značilno ( $\alpha < 0,05$ ) ali mejno-značilno ( $\alpha < 0,10$ ) zvezo (t-preizkus linearne povezanosti) pripravili tudi za prihodnja časovna

obdobja 2025 (2011–2040), 2055 (2041–2070) in 2085 (2071–2100) ob upoštevanju globalnega podnebnega modela MPI-ESM1-2-HR za emisijski scenarij SSP5-8.5[34].

Za ugotavljanje vpliva družbenih razmer na zaraščanje Krasa smo uporabili podatke na ravni grafične enote rabe kmetijskega gospodarstva (GERK), ki jih vodijo v Registru kmetijskih gospodarstev in so podlaga za uveljavljanje ukrepov Skupne kmetijske politike (Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano). Podatki v vektorski obliki obsegajo površino zemljišč (m<sup>2</sup>), povprečno starost nosilca kmetijskega gospodarstva, ki upravlja zemljišče, in povprečno število glav velike živine (GVŽ). Podatki so zbrani po posameznem GERK-u in so v nadaljevanju združeni glede na unikatno identifikacijsko številko kmetijskega gospodarstva KMG-MID. Tudi podatke o rabi tal za leto 2021 smo pridobili na Ministrstvu za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano [35]. Sicer smo v nadaljevanju analize te podatke filtrirali in uporabili le kategorije gozd (2000), travnik (1300) in pozidano (3000). Pozidane površine so pri raziskovanju časovnih sprememb zaraščanja upoštevane kot konstanta in na ta način predstavljajo masko za filtriranje rezultata.

## **2.2 Regresijska analiza slikovnih enot**

Vegetacijski indeks NDVI smo izračunali s TerrSet modulom VegIndex [30]. Temelji na razmerju med rdečim in bližje infrardečim kanalom satelitske podobe. Indeks lahko zaseda vrednosti od -1, za vodo in neporaščene površine, do +1 za zdrav gozd [36]. Za potrebe analize smo NDVI izračunali 30-letno časovno serijo (od 1990 do 2019).

Hitrost zaraščanja odprtih habitatov na Krasu na nivoju slikovne enote (30 m<sup>2</sup>) smo ocenili s pomočjo zvez NDVI-čas in NDVI-TAS (edini podnebni kazalec s statistično značilnim vplivom na NDVI). Za vsako slikovno enoto smo s funkcijo `linest` [37] izračunali smerna koeficienta linearnega trenda in pripadajoči konstanti. Dobljene enačbe so omogočile napoved nadaljnjega poteka procesa sukcesije na nivoju slikovne enote ob upoštevanju vpliva podnebnih sprememb.

### 2.3 Modeliranje procesa zaraščanja

V prvem koraku smo za vsako časovno okno (2025, 2055 in 2085) napovedali prihodnji NDVI s pomočjo zveze čas-NDVI; v drugem pa z zvezo TAS-NDVI. Oba kazalca NDVI ( $NDVI_{cas}$  in  $NDVI_{TAS}$ ) smo nato (zaradi hkratnega vpliva) utežili (*ang. Weighted Overlay*) na podlagi velikosti standardne napake ostankov iz pripadajoče linearne zveze. Pri tem je  $NDVI_{cas}$  zavzel vrednost uteži 0,62 in  $NDVI_{TAS}$  vrednost 0,38.

Obseg zaraščanja smo v nadaljevanju na podlagi obstoječih satelitskih podob ugotavljali za petletna obdobja v preteklosti (1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2019), in nato na podlagi omenjenih funkcijskih zvez predvideli nadaljnji potek sukcesije za tridesetletna obdobja v prihodnosti (2025, 2055, 2085). Da bi ugotovili obseg širjenja gozda na odprte habitate je bilo potrebno določiti mejo med obema. Le-to smo določili na podlagi lastnosti frekvenčne porazdelitve vrednosti NDVI v posamezni kategoriji (gozd, travišče) za leto 2019. Vrednosti NDVI smo pridobili z naključnim vzorčenjem znotraj poligonov, ki so bili v vektorskem sloju rabe tal opredeljeni kot gozd in travniki. Z orodji *Create Random Points* in *Extract Multi Values to Points* v okolju ArcGIS Pro smo ustvarili 100 naključnih točk v vsaki kategoriji rabe tal (skupaj 200). Mejne vrednosti NDVI za kategorijo gozd za pretekla leta (2015, 2010, 2005, 2000, 1995 in 1990) smo določili z odštevanjem zmnožka vrednosti smernega koeficienta in vsote preteklih let od mejne vrednosti NDVI za 2019. V nadaljevanju smo rastrske sloje z NDVI vrednostmi za obravnavana leta reklasificirali na kategoriji gozd in odprti habitati na podlagi ugotovljenih mej. V zaključni stopnji analize smo nato izračunali površino gozda in odprtih habitatov na Krasu za posamezna časovna okna.

### 2.4 Vpliv družbenih dejavnikov na proces zaraščanja

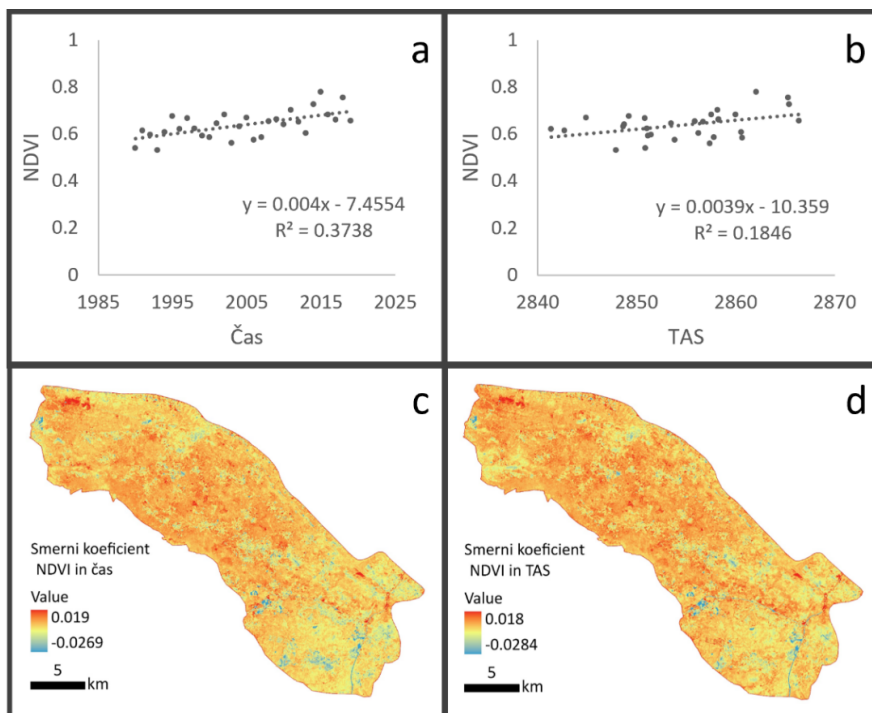
Kulturna krajina je proizvod interakcije človekove dejavnosti in okoljskih razmer na danem mestu. Nedvomno je v zadnjem obdobju močnejši preoblikovalec površja človek. Posledično smo želeli ugotoviti vpliv izbranih socio-ekonomskih kazalcev na proces zaraščanja na Krasu. Podatki GERK so bili združeni v zemljišča z unikatno identifikacijsko številko KMG-MID. Gre za zemljišča enega kmetijskega gospodarstva, ki imajo podoben način upravljanja, tako da so nam omogočili

primerjavo izračunane hitrosti zaraščanja (smernega koeficienta NDVI) z (i) površino kmetijskega zemljišča, (ii) starostjo nosilca in (iii) števila GVŽ.

### 3 Rezultati

#### 3.1 Zaraščanje v odvisnosti od naravnih dejavnikov

Ugotovili smo, da se je v obdobju od leta 1990 do leta 2019 površina gozda postopno povečevala, površina odprtih habitatov (predvsem travišč) pa krčila. Regresijska analiza slikovnih enot je razkrila, da sta čas in povprečna temperatura zraka ena izmed sooblikovalcev prostorskega vzorca zaraščanja na raziskovanem območju. Z obema lahko razložimo 55,8 % vzrokov za spremembe obravnavane krajine (Slika 2a, b). Preostali delež je odvisen od drugih bodisi naravnih bodisi družbenih dejavnikov, vezanih na Kras.



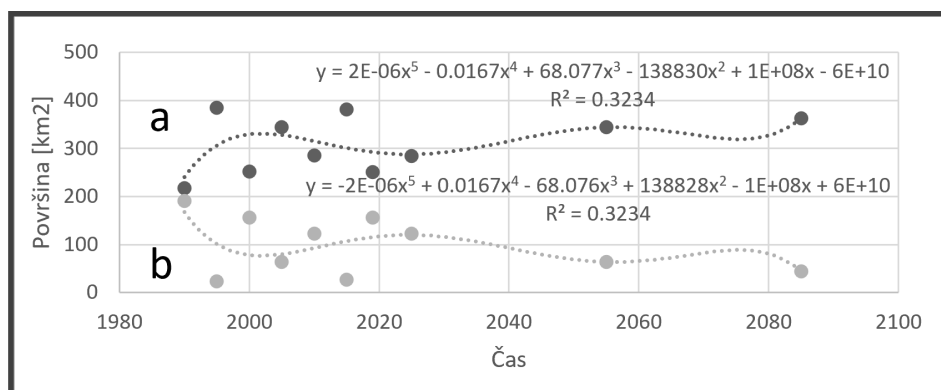
Slika 2: Zveza med a) NDVI in časom ter b) NDVI in povprečno letno temperaturo zraka ter njun prostorski trend (c, d)

Vir: lasten

Zaznali smo pozitiven trend zaraščanja na skoraj celotnem raziskovanem območju z izjemo naselij in njihove bližnje okolice (Slika 2c). Največja območja ekstenzifikacije na Krasu so SZ deli v okolici Medvejšč, Kostanjevice na Krasu, Vojšćice in Brestovice pri Komnu, ki so hkrati območja visokega pridelovalnega potenciala. Tudi zveza TAS-NDVI v prostoru zavzema pretežno pozitivne vrednosti smernega koeficienta, kar nakazuje na pospeševanje sukcesije ob višanju povprečne temperature zraka (Slika 2d).

### 3.2 Hitrost in obseg zaraščanja

Leta 1990 je gozd obsegal 217,62 km<sup>2</sup> (49,5 %) in odprti habitati 190,42 km<sup>2</sup> (43,3 %) (Slika 3, Preglednica 1). Ob upoštevanju pesimističnega emisijskega scenarija SSP5-8.5 se lahko površina gozda na Krasu do leta 2085 poveča za 146 km<sup>2</sup>, kar predstavlja 67 % povečanje gozdnih površin in 76,6 % zmanjšanje površin odprtih habitatov v primerjavi z letom 1990. V tem obdobju se je gozd širil s povprečno hitrostjo 1,5 km<sup>2</sup>/leto. Tako bi se lahko do leta 2055 površina gozda povečala za 37 % in površina odprtih habitatov skrčila za 71,5 % v primerjavi z obstoječim stanjem (2019). Modelne napovedi nakazujejo, da lahko do leta 2085 več kot tri četrtine trenutno obstoječih odprtih habitatov na Krasu izgine, v kolikor upoštevamo aktualne trende upravljanja tega območja.



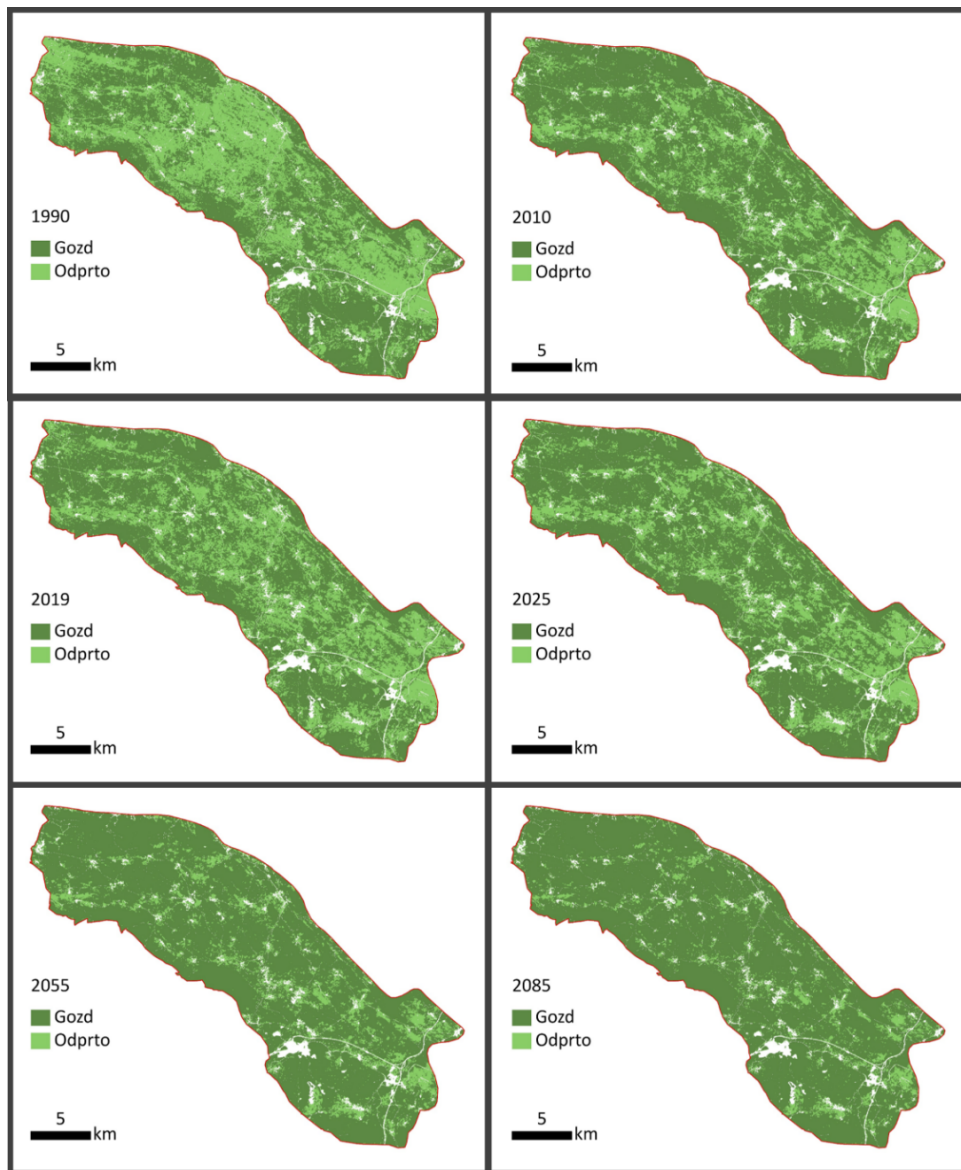
Slika 3: Potek širjenja gozdnih površin (a) in krčenja odprtih habitatov (b) na raziskovanem območju

Vir: lasten

Leta 1990 so gozdovi pokrivali predvsem površine z večjimi nakloni, ki so značilne za obrobne dele planot (pobočja Vipavske doline, doline Raše in Brestoviškega dola ter pobočja kopastih vrhov, kot so Trstelj, Veliki Ognjivec, Na Gavgah in Veliko Gradišče). Sodeč po podatkih satelitov Landsat so se gozdovi v nadaljevanju širili tudi na uravnani osrednji del Krasa. Zaraščajo se zemljišča, za katere je značilen visok in zelo visok pridelovalni potencial oziroma površine, ki so opredeljene kot zelo pomembna strateška območja za kmetijstvo (Slika 4).

**Preglednica 1: Obseg gozda in odprtih habitatov**

Leto	Gozd (km <sup>2</sup> )	Gozd (%)	Stopnja širjenja (1990)	Odprti habitat (km <sup>2</sup> )	Odprti habitat (%)	Stopnja krčenja (1990)
1990	217,62	49,5	0	190,42	43,3	0
1995	384,32	87,3	76,6	23,72	5,4	-87,5
2000	251,54	57,2	15,6	156,50	35,6	-17,8
2005	344,01	78,2	58,1	64,03	14,6	-66,4
2010	285,54	64,9	31,2	122,50	27,8	-35,7
2015	381,45	86,7	75,3	26,59	6,0	-86,0
2019	251,35	57,1	15,5	156,69	35,6	-17,7
2025	284,81	64,7	30,9	123,23	28,0	-35,3
2055	344,69	78,3	58,4	63,35	14,4	-66,7
2085	363,46	82,6	67,0	44,58	10,1	-76,6



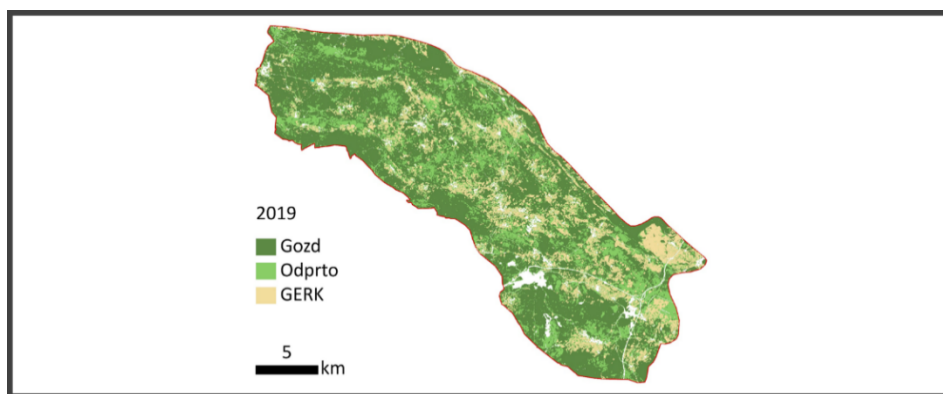
Slika 4: Spreminjanje površin gozda in odprtih habitatov v leti od 1990 do 2085

Vir: lasten.



### 3.3 Zaraščanje v odvisnosti od družbenih dejavnikov

Skupna površina GERK-ov na proučevanem območju je v letu 2019 znašala 63 km<sup>2</sup> (14,3 %). Največje sklenjene površine kmetijskih zemljišč so se nahajale predvsem v okolici Dolenje vasi oziroma na JV delu proučevanega območja. Najmanj kmetijskih zemljišč je na SZ delu, ki je poraščeno z gozdom že od prvega leta v obravnavani časovni vrsti. Analiza zveze trenda zaraščanja z izbranimi socio-ekonomskimi kazalci (površina GERK, starost nosilca kmetijskega gospodarstva, ki upravlja kmetijsko zemljišče, in število GVŽ) na nivoju kmetijskih gospodarstev je pokazala, da zaraščanje na Krasu nikakor ni odvisno le od naravnih dejavnikov, ampak pri tem igrajo ključno vlogo tudi družbene razmere.



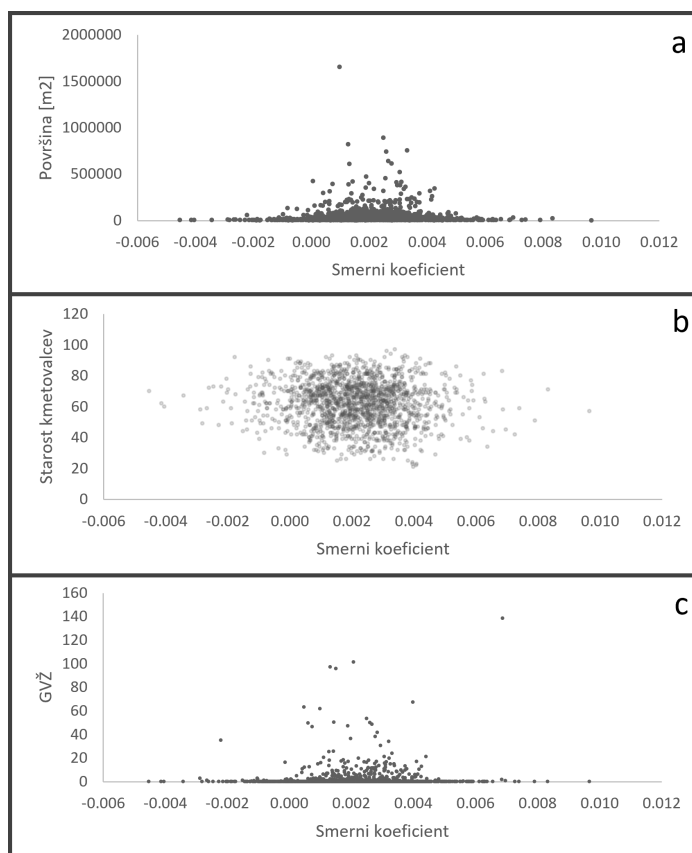
Slika 5: Površine gozda, odprtih habitatov in GERK leta 2019

Vir: lasten.

Velikost najmanjšega kmetijskega zemljišča je bila 0,007 ha, največjega 165 ha, povprečnega pa 3,7 ha. Prevladujejo manjša kmetijska zemljišča pod 2 ha. Najintenzivnejše zaraščanje je značilno za manjša kmetijska zemljišča, večja kmetijska zemljišča nad 2 ha se zaraščajo počasneje, oziroma se ne zaraščajo. Hkrati je za nekatera manjša zemljišča značilen negativen trend zaraščanja oziroma krčenje gozda (Slika 6a).

Starost najstarejšega nosilca kmetijskega gospodarstva je znašala 99 let, najmlajšega 21 let, povprečnega pa 62 let. Prevladujejo nosilci, stari 70 let. Glede na starost je največje zaraščanje značilno za kmetijska zemljišča z nosilci, starimi od 40 do 80 let. Za mlajše nosilce je značilna nižja stopnja zaraščanja (Slika 6b).

Največje število GVŽ na kmetijskem gospodarstvu je bilo 138,65, povprečno pa 1,6. Prevladujejo kmetijska gospodarstva brez živali. Najintenzivnejše zaraščanje je značilno za kmetijska zemljišča, ki jih upravljajo kmetijska gospodarstva brez ali z majhnim številom GVŽ, medtem ko se kmetijska zemljišča, ki jih upravljajo kmetijska gospodarstva z več kot 10 GVŽ, zaraščajo počasneje, oziroma ne zaraščajo (Slika 6c).



Slika 6: Zveza med smernim koeficientom kazalca NDVI ter a) površinami GERK, b) starostjo nosilca kmetijskega gospodarstva in c) povprečnim številom glav velike živine

Vir: lasten.

## 4 Diskusija

O trendu zaraščanja odprtih površin na predelu proučevanega območja poročajo tudi drugi avtorji [27]. Kaligarič in Ivajnsič sta v študiji iz leta 2014 napovedala, da bi lahko 88 % matičnega Krasa do leta 2075 poraščal gozd. Tudi naši rezultati (na sicer večjem območju) potrjujejo tovrstno usodo odprtih površin na Krasu (razlika približno 10 odstotnih točk).

Z raziskavo smo dokazali, da sta pri zaraščanju Krasa pomembna naravna dejavnika čas in temperatura zraka. Glede na podnebne modele se bo povprečna temperatura zraka v Mediteranu povišala. Tovrstne spremembe podnebnih kazalcev lahko vplivajo na interakcijo rastlin s tlemi [38], na vrstno sestavo in smrtnost mlajših rastlin, kar v prednostni položaj postavlja vrste s širokim strpnostim območjem (generaliste) [39]. Posledično lahko pričakujemo, da se bo z nadaljnjim segrevanjem ozračja zaraščanje postopoma upočasnilo. Kras bo postopoma bolj podoben Mediteranu, kjer je sekundarna sukcesija že počasnejša [14]. Zveza čas-NDVI zaenkrat (v obdobju 1990–2019) kaže popolno nasprotje. Višje povprečne temperature zraka delujejo kot pospeševalec, in ne kot zaviralec procesa sukcesije.

S spremembo rabe prostora se lahko spremenijo tudi mikropodnebni pogoji. Tako se na Krasu zaradi procesa ogozdovanja povečuje evapotranspiracija [10]. Negativen vpliv povečane evapotranspiracije (predvsem poleti) se lahko kaže v večji požarni ogroženosti, saj se z izsuševanjem tal in dehidracijo vegetacije veča gorljivost [40]. Predvsem vmesna stopnja sukcesije med traviščem in gozdom, pri kateri se površine zaraščajo z grmovnimi vrstami (brin, dren, ruj), je najbolj dovzetna za požare [41]. Prav tako se lahko povečana evapotranspiracija v kombinaciji s prepustno litološko podlago manifestira v intenzivnejših sušah na tem območju [2].

Kljub velikem vplivu naravnih dejavnikov ti niso edini pospeševalec zaraščanja. Vsekakor je hitrost zaraščanja odprtih habitatov na Krasu povezana tudi z negativnimi družbenogospodarskimi procesi, kot so deagrarizacija in depopulacija [5], [14], z velikostjo kmetijskega gospodarstva, starostno strukturo nosilcev in številom glav velike živine (GVŽ) na kmetijsko gospodarstvo. Stopnja zaraščanja je največja na zemljiščih pod 2 ha z nosilci, starejšimi kot 40 let, ki skrbijo za manj kot 10 GVŽ. Gledano s perspektive kmetijstva je z ogozdovanjem ogrožena ena najpomembnejših funkcij tal, tj. proizvodnja hrane [42]. Ob tem je obveza države

vzdrževanje obstoječih habitatov Vzhodna submediteranska suha travišča (*Scorzoneralia villosae*), saj je skoraj celotno območje zaščiteno kot Natura 2000 [14].

Ogozdovanje ni nujno negativno, saj ima gozd tudi ekosistemsko in gospodarsko vrednost. Gospodarsko najpomembnejši gozdovi na Krasu so v združbi hrasta gradna in jesenske vilovine (*Seslerio-Quercetum petraeae*), varovalno pomembna je tudi združba puhastega hrasta in gabra (*Ostryo-Quercetum pubescentis*), saj blažita vpliv vremenskih ujm in erozije [5]. Ob vlogah omenjenih vrst imajo te skupaj z drugimi drevesnimi vrstami danes pokrajnotvorno vlogo. Kljub velikemu potencialu je gospodarska vloga kraških gozdov neizkoriščena zaradi prevladujočega zasebnega lastništva gozdov, v katerih posekajo manj lesa [5].

Zaradi negativnih učinkov večanja obsega gozda, ki se na Krasu širi predvsem na naravovarstveno in kulturno pomembne travnike, so smiselni nekateri ukrepi za njihovo vzdrževanje [5], [17]:

- košnja travnikov vsako drugo leto jeseni ali zgodaj spomladi,
- občasna zmerna pašnja drobnice in goveda na pašnikih,
- odstranjevanje grmov in dreves na zaraslih površinah,
- nova pozidava znotraj obstoječih naselij,
- urejanje odlagališč in smetišč izven naravnih območij,
- obnova poti in cest do travnikov in pašnikov,
- razvoj pohodniškega turizma in gradnja športnih igrišč,
- preprečevanje erozije zaradi obremenitve z živalmi na pobočjih pašnikov,
- ponovna kmetijska raba, predvsem razvoj vinogradništva.

Ob omenjenih ukrepih je smiselno vključevanje v kmetijsko-okoljsko-podnebna plačila (KOPOP). Njihov glavni namen je uveljavljanje nadstandardnih sonaravnih kmetijskih praks, ki prispevajo k ohranjanju biodiverzitete, vode in tal ter blaženju in prilagajanju na podnebne spremembe. Od 19 operacij jih 7 vključuje različne tipe travnikov [43]. Kljub velikemu pomenu se kmetijska gospodarstva v Sloveniji ne vključujejo v dovoljšni meri v ukrepe, ki so namenjeni ohranjanju travišč [44], saj je vključenih samo 3 % travišč z visoko naravovarstveno vrednostjo [14]. S poenostavljanjem birokratskih postopkov, informiranjem upraviteljev, višjimi

denarnimi nadomestili in možnostjo vključevanja manjših zemljišč bi se delež lahko zvišal [44], kar bi lahko omejilo zaraščanje. Vpliv subvencij je bil opazen leta 2004, ko se je Slovenija pridružila EU in se je rahlo povečala reja ovac, kar je vplivalo tudi na znižanje stopnje zaraščanja [14]. Ob KOPOP velja omeniti tudi program projektov LIFE, v sklopu katerega financirajo naravovarstvene in podnebne akcije [45]. Na Krasu je bil leta 2005 izveden LIFE projekt, v sklopu katerega je bilo med ostalim obnovljenih 300 ha suhih travišč [46]. Prav tako so pomembni kohezijski projekti, s katerimi financirajo akcije na terenu in izplačujejo nadomestila kmetovalcem, kot so Kras.re.vita [46], ZA KRAS [47], PIVKA.KRAS.PRESIHA [48].

Prihodnji razvoj Krasa bi bil lahko usmerjen v ekstenzivno rejo drobnice na ekstenzivnih traviščih, kar lahko prepreči njihovo zaraščanje in napredovanje gozda. Potrebno je spodbujanje mlajših nosilcev dejavnosti, ki so na Krasu trenutno v manjšini, saj prevladujejo nosilci, starejši od 60 let. Ob tem je zaželeno povezovanje kmetijskih zemljišč s podobno strategijo upravljanja, saj je na teh opazna manjša stopnja zaraščanja.

## Zahvale

Študijo je omogočila programska skupina P6-0372 (»Slovenska identiteta in kulturna zavest v jezikovno in etnično stičnih prostorih v preteklosti in sedanjosti«).

## Literatura

- [1] U. Stepišnik, „Sediments in collapse dolines on the Kras plateau, Slovenia“, *Acta geographica Slovenica*, let. 51, št. 2, str. 233–252, 2011.
- [2] D. Ogrin in D. Plut, *Aplikativna fizična geografija Slovenije*. Ljubljana: Filozofska fakulteta UL, 2009.
- [3] ARSO, „Osnovna statistika za leto: 2016“, 2016. <http://www.meteo.si/met/sl/climate/tables/yearbook/2016/>
- [4] M. Culiberg, „Vegetacija Krasa v preteklosti“, v *Kras: trajnostni razvoj kraške pokrajine*, O. Luthar, H. Dobrovoljc, J. Fridl, J. Mulec, in M. Pavšek, Ur. Znanstvenoraziskovalni center SAZU, 2009, str. 100–101. [Na spletu]. Dostopno na: <https://omp.zrc-sazu.si/zalozba/catalog/book/1069>
- [5] D. Kladnik, „Širjenje gozda na Krasu kot dejavnik prostorskega razvoja“, *Geografski vestnik*, let. 83, št. 2, str. 67–80, 2011.
- [6] B. Košiček, „Spontano vračanje gozda na Kras“, *Gozdarski vestnik*, let. 52, str. 250–260, 1993.
- [7] P. Habič, „Problematika geografskega vrednotenja krasa“, *Geografski vestnik*, str. 147–157, 1979.
- [8] I. Mrak in B. Repe, „Physical geographic conditions for vine growth in the Karst region, Slovenia“, *Acta Geographica Croatica*, let. 35, str. 67–96, 2000.

- [9] M. Kaligarič, M. Culiberg, in B. Kramberger, „Recent vegetation history of the North Adriatic grasslands: expansion and decay of an anthropogenic habitat“, *Folia geobotanica*, let. 41, št. 3, str. 241–258, 2006.
- [10] D. Ivajnsič in M. Kaligarič, „Can evapotranspiration be considered an additional indicator for understanding the changed landscape identity of the classic Karst?“, *Annales. Series historia naturalis*, let. 25, št. 2, str. 173–182, 2015.
- [11] M. Kaligarič in A. Seliškar, „Flora in vegetacija Krasa“, v *Kras – pokrajina, življenje, ljudje*, Inštitut za raziskovanje krasa, 1999.
- [12] I. Gams, *Kras v Sloveniji – v prostoru in času*. Založba ZRC, 2003.
- [13] ESRI, „Esri World Topographic Map“, 2022. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=7dc6cea0b1764a1f9af2e679f642f0f5> (pridobljeno 3. februar 2022).
- [14] M. Kaligarič in D. Ivajnsič, „Vanishing landscape of the “classic” Karst: changed landscape identity and projections for the future“, *Landscape and Urban Planning*, let. 132, str. 148–158, 2014.
- [15] Y. Zhao, Z. Liu, in J. Wu, „Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions“, *Landscape Ecology*, let. 35, št. 4, str. 793–814, 2020.
- [16] M. Kaligarič, M. Culiberg, in D. Ivajnsič, „Novejša zgodovina vegetacije na Primorskem Krasu“, 2011. [Na spletu]. Dostopno na: <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=35371>
- [17] A. Seliškar, R. Slapnik, A. Pirnat, in T. Čelik, „Suha travnišča“, v *Kras: trajnostni razvoj kraške pokrajine*, O. Luthar, H. Dobrovoljc, J. Fridl, J. Mulec, in M. Pavšek, Ur. Znanstvenoraziskovalni center SAZU, 2009, str. 106–108. [Na spletu]. Dostopno na: <https://omp.zrc-sazu.si/zalozba/catalog/book/1069>
- [18] K. Kull in M. Zobel, „High species richness in an Estonian wooded meadow“, *Journal of vegetation science*, let. 2, št. 5, str. 715–718, 1991.
- [19] J. B. Wilson, R. K. Peet, J. Dengler, in M. Pärtel, „Plant species richness: the world records“, *Journal of vegetation Science*, let. 23, št. 4, str. 796–802, 2012.
- [20] J. Dengler *idr.*, „EDGG cooperation on syntaxonomy and biodiversity of Festuco-Brometea communities in Transylvania (Romania): Report and preliminary results (Vol. 4)“, Bulletin of the European Dry Grassland Group, Hamburg, 2009.
- [21] C. N. R. Critchley, M. J. W. Burke, in D. P. Stevens, „Conservation of lowland semi-natural grasslands in the UK: a review of botanical monitoring results from agri-environment schemes“, *Biological Conservation*, let. 115, št. 2, str. 263–278, 2004.
- [22] M. F. WallisDeVries, P. Poschlod, in J. H. Willems, „Challenges for the conservation of calcareous grasslands in northwestern Europe: integrating the requirements of flora and fauna“, *Biol. Conserv.*, let. 104, št. 3, str. 265–273, 2002.
- [23] D. Ivajnsič in D. Donša, „Intenzivnost podnebnih sprememb na območjih Natura 2000 v Sloveniji“, *Revija za geografijo*, let. 13, št. 2, str. 59–72, 2018.
- [24] IPCC, „Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change“, 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- [25] IPCC, „Climate Change 2021. The Physical Science Basis“, 2021. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#Regional>
- [26] K. Zakšek, A. Marsetič, in Ž. Kokalj, „Izkoriščanje sončne energije na Krasu“, *Geodetski vestnik*, let. 51, št. 1, str. 35–47, 2007.
- [27] D. Ivajnsič, S. Škornik, in M. Kaligarič, „Spremembe rabe tal med leti 1830 in 2008 na območju Movraškega Krasa in na bližnjih flišnih predelih“, *Revija za geografijo*, let. 8, št. 1, str. 83–95, 2013.
- [28] D. Kladnik, F. Petek, in M. Urbanc, „Pogozdovanje in ogozdovanje“, v *Kras: trajnostni razvoj kraške pokrajine*, O. Luthar, H. Dobrovoljc, J. Fridl, J. Mulec, in M. Pavšek, Ur. Znanstvenoraziskovalni center SAZU, 2009, str. 146–154. [Na spletu]. Dostopno na: <https://omp.zrc-sazu.si/zalozba/catalog/book/1069>
- [29] USGS, „EarthExplorer“, 2022. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

- [30] Clark Labs, *TerrSet 2020 Geospatial Monitoring and Modeling Software*. 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://clarklabs.org/terrset/>
- [31] CHELSA V2.1, „Climatologies“, 2022. <https://chelsa-climate.org/downloads/>
- [32] ESRI, *ArcGIS Pro*. 2021. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- [33] R Core Team, R: *A language and environment for statistical computing*. Dunaj, Avstrija: R Foundation for Statistical Computing, 2021. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.R-project.org>
- [34] O. Gutjahr *idr.*, „Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1. 2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP)“, *Geoscientific Model Development*, let. 12, št. 7, str. 3241–3281, 2019.
- [35] MKGP, „Grafični podatki RABA za celo Slovenijo“, 2022. <https://rkg.gov.si/vstop/>
- [36] Earth Observing System, „NDVI“, 2020. <https://eos.com/ndvi/>
- [37] Microsoft Corporation, *Microsoft Excel*. 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://office.microsoft.com/excel>
- [38] C. C. Chang in B. L. Turner, „Ecological succession in a changing world“, *Journal of Ecology*, let. 107, št. 2, str. 503–509, 2019.
- [39] W. J. Wang, H. S. He, F. R. III, J. S. Fraser, B. B. Hanberry, in W. D. Dijak, „Importance of succession, harvest, and climate change in determining future composition in US Central Hardwood Forests“, *Ecosphere*, let. 6, št. 12, str. 1–18, 2015.
- [40] D. Veble in V. Brečko Grubar, „Pogostost in obseg požarov v naravi na Krasu in v Slovenski Istri“, *Geografski vestnik*, let. 88, št. 1, str. 9–20, 2016.
- [41] M. Dolgan Petrič, „Gozdni požari na Kraškem gozdnogospodarskem območju Slovenije“, *Geografski vestnik*, str. 71–82, 1989.
- [42] I. Žiberna, „Spreminjanje rabe tal v Sloveniji v obdobju 2000-2012 in prehranska varnost“, *Revija za geografijo*, let. 8, št. 1, str. 23–40, 2013.
- [43] KOPOP, „Kmetijsko-okoljska-podnebna plačila 2015-2020“, 2021. <https://skp.si/download/kmetijsko-okoljska-podnebna-placila-predhodno-usposabljanje-2021>
- [44] D. Ivajnsič, D. Pintarič, S. Škornik, M. Kaligarič, in N. Pipenbaher, „SOSKOPOP Haloze: podporni sistem potencialnim uveljaviteljem ukrepov KOPOP na nivoju travnišč“, *Revija za geografijo-Journal for Geography*, let. 14, št. 1, str. 49–64, 2018.
- [45] LIFE, „About LIFE“, 2022. [https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life/about-life\\_sl](https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life/about-life_sl)
- [46] LIFE III, „LIFE and Europe’s grasslands: Restoring a forgotten habitat“, 2008. <https://ec.europa.eu/environment/archives/life/publications/lifepublications/lifefocus/documents/grassland.pdf>





OBMORSKA  
IN MORSKA  
OKOLJA





# VPLIV PODNEBNIH SPREMEMB NA GNEZDENJE OBREŽNIH PTIC

DANIJEL IVAJNSIČ,<sup>1,2</sup> IZTOK ŠKORNIK,<sup>3</sup>

MITJA KALIGARIČ,<sup>2</sup> LOVRENC LIPEJ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Maribor, Slovenija  
dani.ivajnsic@um.si

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija  
dani.ivajnsic@um.si, mitja.kaligarič@um.si

<sup>3</sup> Krajinski park Sečoveljske soline, Portorož, Slovenija  
iztok.skornik@soline.si

<sup>4</sup> Morska biološka postaja, Nacionalni inštitut za biologijo, Piran, Slovenija  
lovrenc.lipej@nib.si

**Sinopsis** Podatki 6. poročila IPCC nakazujejo še intenzivnejši trend dviga morske gladine v drugi polovici stoletja. Piranski zaliv bi lahko bil v primeru uresničitve pesimističnih napovedi (ssp585) izpostavljen dvigu morske gladine tudi za 120 cm (v primerjavi z obdobjem 1995–2014). Nedvomno bodo zaradi tega prizadeta nizko ležeča obalna mokrišča in nanje vezani organizmi. Obrežne ptice (še posebej gnezdilke) bodo, zaradi visokega položaja v prehranjevalnem spletu obmorskih mokrišč, prvi pokazatelj okoljskih sprememb. V raziskavi obravnavamo odziv štirih vrst obrežnih ptic, kot so polojnik (*Himantopus himantopus*), beločeli deževnik (*Charadrius alexandrinus*), navadna (*Sterna hirundo*) in mala čigra (*Sternula albifrons*), na dvosmerni okoljski pritisk (dvig morske gladine in širjenje antropogenih dejavnosti) v Krajinskem parku Sečoveljske soline (KPSS). Oceno potencialne spremembe gnezditvene površine ptic zaradi dviga morske gladine smo izračunali na podlagi modelov razširjenosti vrst (Mahalanobisova tipičnost in Maxent). Ugotovitve kažejo, da se bosta beločeli deževnik in polojnik v KPSS kmalu soočila z zmanjšanjem potencialne gnezditvene površine, medtem ko so napovedi za obe vrsti čiger manj dramatične. Odkrit individualistični odzivi preučevanih vrst ptic na dvig morske gladine kot posledice podnebnih sprememb je lahko pomembna informacija za varstvene biologe v zavarovanih območjih, ki pripravljajo načrte za ublažitev negativnih vplivov na zavarovane habitate.

## Opomba:

Prispevek temelji na: Ivajnsič, D. (2015). *Prostorsko-časovne spremene habitatov obmorskih mokrišč kot posledica primarne sukcesije in dvigovanja morske gladine*. doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor: D. Ivajnsič

## Ključne besede

obalna mokrišča, dvig morske gladine, gnezditveni vzorci, modeli razširjenosti vrst, Krajinski park Sečoveljske soline

# CLIMATE CHANGE IMPACT ON SEASHORE-BREEDING BIRDS

DANIJEL IVAJNSIČ,<sup>1,2</sup> IZTOK ŠKORNIK,<sup>3</sup>

MITJA KALIGARIČ,<sup>2</sup> LOVRENC LIPEJ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> University of Maribor, Faculty of Arts, Maribor, Slovenia  
dani.ivajnsic@um.si

<sup>2</sup> University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia  
dani.ivajnsic@um.si, mitja.kaligarič@um.si

<sup>3</sup> Sečovlje Salina Nature Park, Portorož, Slovenia  
iztok.skornik@soline.si

<sup>4</sup> Marine Biology Station Piran, National Institute of Biology, Piran, Slovenia  
lovrenc.lipej@nib.si

**Abstract** The sixth IPCC assessment report has indicated an even more intense sea level rise trend in the second half of the century. Pessimistic projections (ssp585) have estimated a potential sea level rise up to 120 cm in the Gulf of Piran (compared to the 1995-2014 baseline). Owing to their high position in the food chain in coastal wetlands, seashore-breeding birds will be the first to be impacted by increased environmental change. The study focused on the existing bilateral environmental pressure (sea levels rise, spread of anthropogenic disturbance) in the area of Sečovlje Salina Nature Park from the perspective of four bird species: the black-winged stilt, the Kentish plover, and the common and little tern. The estimate of potential change in available breeding ground area was calculated using species distribution models (Mahalanobis typicality and Maxent). The findings suggest that the Kentish plover and the black-winged stilt could soon face a reduction in potential breeding ground area, while the forecasts for both tern species are more optimistic. Such predictions of individual responses by these bird species to sea level rise may be a step forward for conservation biologists who are preparing plans to mitigate negative impacts on protected habitats.

## Note:

Chapter is based on: Ivajnsič, D. (2015). *Prstorsko-časovne spremene habitatov obmorskih mokrišč kot posledica primarne sukcesije in dvigovanja morske gladine*. doctoral dissertation, University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor: D. Ivajnsič

## Keywords:

coastal wetlands, sea level rise, nesting patterns, species distribution models, Sečovlje Salina Nature Park

## 1 Uvod

V drugi polovici 21. stoletja je zaradi vse globlje podnebne krize pričakovati pospešeno dviganje morske gladine in posledično pogostejše poplavljanje nizko ležečih obalnih območij. Slednje bo vplivalo na organizme, ki so vezani na obalna mokrišča, vključno z obrežnimi pticami, ki se v teh habitatih prehranjujejo na selitvi, v njih gnezdiijo ali pa prezimujejo.

V obdobju selitev in pozimi je večina obrežnih ptic odvisna od muljastih in peščenih polojev v obmorskih mokriščih, kjer najdejo hrano [1], [124]. Nosilna kapaciteta območja za ptice je v veliki meri odvisna od obsega in gostote ključnih habitatov ter od razpoložljivosti in sezonske predvidljivosti njihovega nevretenčarskega plena; območja z večjo gostoto nevretenčarjev premorejo običajno tudi večjo gostoto obrežnih ptic [2]–[4], [124]. Kakorkoli že, neomejeno število ptic ne more hkrati izkoriščati danega območja ne glede na to, kako bogate so njegove zaloge hrane, saj razpoložljivost prehranjevalnega habitata in plen določata zgornjo mejo števila ptic, ki ga območje lahko prenese [1]. Ko se število prehranjevalnih habitatov zmanjšuje, in se povečuje gostota obrežnih ptic, lahko pride do interakcij, ki so vezane na gostoto (tekmovanje za hrano med posameznimi pticami in motnje med samim hranjenjem). Slednje lahko povzroči teritorialno izključitev posameznih osebkov, s tem posledično povečanje smrtnosti izključenih ptic in ne nazadnje omejevanje števila ptic na teh območjih [5], [6], [124]. Zmanjšanje površine prehranjevalnega habitata ni kompenzirano s preprostim zblizanjem ptic med hranjenjem, temveč z zmanjšanjem števila ptic [1]. Podatki iz krajev, kjer so spremljali število ptic in spremembe v razpoložljivosti prehranjevalnih habitatov, so potrdili, da zmanjšanje površine le-teh povzroči upad števila obrežnih ptic [1]. V južni Angliji je sprememba muljastih in peščenih polojev v obmorsko mokrišče s kolonizacijo metličja (*Spartina anglica*) povzročila upad števila spremenljivega prodnika (*Calidris alpina*) [7]. V estuariju reke Tees v Angliji je izguba muljastih polojev povzročila zmanjšanja abundance številnih obrežnih ptic [8]. Tudi v estuariju reke Oosterschelde na Nizozemskem je 30-odstotno zmanjšanje prehranjevalnih habitatov povzročilo zmanjšanje števila školjkaric (*Haematopus ostralegus*) [9], [124]. Zato je razpoložljivost in kakovost prehranjevalnih habitatov v zimskem času in na selitvi lahko ključen omejitveni dejavnik populacij ptic.

V severnem Jadranu in v Sloveniji je halofitna vegetacija obmorskih mokrišč (tudi kot gnezditveni habitat obmorskih ptic) dobro raziskana [10]–[17]. Mnoge raziskave so obelodanile ogroženost teh posebnih habitatov in opozorile na večplastnost problema izginjanja le-teh bodisi zaradi vpliva antropogenih motenj bodisi podnebnih sprememb.

V 20. stoletju so muljasti in peščeni položi pod vplivom plimovanja deležni intenzivnega antropogenega pritiska, še posebej z osuševanjem, razvojem kmetijstva, urbanizacijo in industrijo [18], [19], [124] ali celo z invazijo tujerodnih rastlinskih vrst [7]. Počivališčem in prezimovalnim območjem obrežnih ptic preti nova grožnja; tj. dvig povprečne morske gladine kot posledica podnebne krize [18]–[21]. Višja globalna temperatura zraka ter posledično razpenjanje oceanov in taljenje kopenskih ledenikov že povzročajo dvig morske gladine. Projekcije globalnih podnebnih modelov napovedujejo dvig morske gladine za 10 do 120 cm do konca 21. stoletja [22]–[25], [124]. Na lokalnem nivoju bo dvig morske gladine večji ali manjši zaradi učinkov bodisi subsidence (pogrezanje) bodisi epirogeneze (počasno dviganje ali spuščanje večjih delov zemeljske površine) [26].

Spričo tega lahko pogostejše poplavljanje povzroči transformacijo muljastih in peščenih polojev pod vplivom plimovanja in privede do zmanjšanja površine ustreznih prehranjevalnih habitatov in prezimovališč za mnoge obrežne ptice. Pričakujemo lahko, da se bodo največje spremembe habitatov pojavile na mestih, kjer je onemogočen vertikalni premik mokrišč zaradi topografije ali antropogene infrastrukture [1]. Potencialni vpliv podnebnih sprememb na izgubo prehranjevalnih habitatov in prezimovališč obrežnih ptic bi lahko bil še bolj uničujoč. Pozni zimski meseci lahko predstavljajo energijsko ozko grlo za mnoge obrežne ptice zaradi nezmožnosti pridobitve zadostne količine hrane in posledica le-tega je povečana smrtnost [27], [124]. V Srednji in Južni Ameriki lahko izguba prehranjevalnih habitatov zaradi sprememb v morski gladini povzroči očitno zmanjšanje nosilne kapacitete prezimovališč. Hkrati pričakujemo, da bodo območja v višjih geografskih širinah, kjer gnezdi večina obrežnih ptic, pod največjim vplivom podnebnih sprememb. Trenutne študije namreč dokazujejo, da se s podnebnimi spremembami povzročene spremembe habitatov že pojavljajo v arktičnih in subarktičnih območjih Severne Amerike [28], [124]. Skupni učinek sprememb gnezditvenih habitatov [29] in izginjanja primernih prezimovališč zaradi dvigovanja morske gladine (muljasti in

peščeni poloji pod vplivom plimovanja) bi lahko imel resnejše posledice kot katerikoli drugi dejavniki.

Za veliko obrežnih ptic selivk je zelo pomembna regionalna sinhronost dogodkov. Predvidene drastične spremembe morske gladine (in druge posledice podnebnih sprememb; npr. povišanje povprečne temperature zraka, spremenjen vzorec padavin) lahko negativno vplivajo na selitvene strategije različnih vrst ptic. Prihodnje raziskave o verjetnih vplivih podnebnih sprememb na obrežne ptice in druge selivke med živalmi bi bilo smiselno usmeriti v bolj celovit "life-cycle" (življenski cikel) pristop, ki bi obravnaval tudi vpliv podnebnih sprememb na prezimovališča in gnezditvene habitate [1], [124].

Na podlagi izpostavljenih dejstev želimo v pričujočem prispevku ugotoviti, kateri okoljski prediktorji sooblikujejo trenutni gnezditveni vzorec obravnavanih obrežnih ptic v KPSS. S tega vidika bi radi ugotovili (1); kakšen je doprinos posameznega prediktorja h gnezditveni ustreznosti za vsako vrsto (2); ali lahko ti okoljski prediktorji razkrijejo različne gnezditvene niše obravnavanih vrst ptic (3); in kako bi lahko ali bo relativni dvig morske gladine, ki ga povzročajo podnebne spremembe, in posledična sprememba habitatnega tipa, skupaj s spremembo okoljskih prediktorjev, vplivala na potencialno gnezditveno površino obravnavanih obrežnih ptic v KPSS (4).

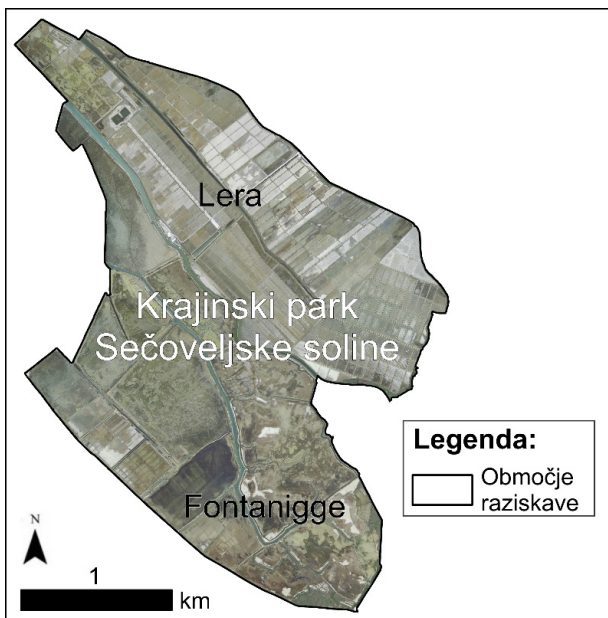
## 2 Metode

### 2.1 Območje raziskave

Sedimentna slovenska obala je nastala kot posledica erozije fliša matične podlage in nanosa rečnih naplavin v morje. V preteklosti so ponekod nastale soline oziroma se je površina kasneje posušila. Nekateri deli te obale so danes opuščeni ali pa so celo umetno povečani [13], [124]. Tako so na majhni slovenski obali nastala tri obmorska mokrišča: Krajinski park Sečoveljske soline, Naravni rezervat Škocjanski zatok in Krajinski park Strunjan, ki imajo danes status zavarovanih območij. Sečoveljske soline (v nadaljevanju KPSS) so glavno obravnavano območje te raziskave. KPSS leži v Piranskem zalivu ob izlivu Dragonje na skrajnem JZ Slovenije ob mejnem območju Slovenija-Hrvaška (45°29' N, 13°37' E). Zaradi ugodne geografske lege J in JZ od Alpsko-Dinarske pregrade, katerege relief se odpira v smeri Jadranskega

morja, imajo ti kraji značilno submediteransko podnebje. Tukaj beležijo največ sončnih dni v Sloveniji (letno več kot 235), povprečno temperaturo najhladnejšega meseca nad 0 °C in najtoplejšega meseca nad 20 °C. Zaradi učinka morja so temperature zraka v oktobru višje kot v aprilu. Za submediteranski padavinski režim so značilne obilne padavine jeseni, na začetku pomladi ali v začetku poletja in sušni meseci v zimskem in poletnem obdobju [30], [124].

KPSS je bil ustanovljen leta 1992 in pokriva 593 ha površine. Razdeljen je na severni (Lera) in južni del (Fontanigge) z reko Drnico (Slika 1). Aktivna pridelava soli poteka danes le še v predelu Lera. Zaradi prevelikih proizvodnih in vzdrževalnih stroškov, povezanih s prebojem obrambnih nasipov, so že leta 1968 trajno ukinili pridobivanje soli v sektorjih Fontanigge in Fazan (v Luciji) [31]. Od takrat bazene in nasipe na Fontaniggah preraščajo različni tipi slanooljubne (halofitne) vegetacije. Glavni dotok sladke vode v KPSS predstavlja Dragonja. Široko strugo je vrezala vzdolž stika flišnih plasti Šavrinskega gričevja, ki obdaja soline na severu, in krednega apnenca Savudrijskega polotoka na jugu. Kljub temu da so soline proizvod človekovega gospodarjenja z naravo od zgodnjega srednjega veka naprej, danes predstavljajo mozaik naravnih življenjskih okolij, zavarovanih pod okriljem sistema Natura 2000.



Slika 1: Območje raziskave. Podlaga: ortofoto posnetki [32]



Tako v KPSS najdemo 5 različnih kopenskih Natura 2000 habitatov: 1. Muljasti in peščeni poloji brez vegetacije višjih rastlin (koda 1140); 2. Sredozemska obmorska mokrišča z ločjem (koda 1410) – red *Juncetalia maritima* (zveza *Juncetum maritimi-acuti*); 3. Muljaste morske obale s prevladujočim metličjem (koda 1320) – zveza *Spartinion maritimae* (asociacija *Limonio-Spartinetum maritimae*); 4. Poplavljeni muljasti poloji s sredozemskimi sestoji slanuš enoletnic, v katerih prevladuje osočnik (koda 1310) – razred *Thero-Salicornietea*: asociacije *Suaedo maritima-Salicornietum patulae in Salicornietum emerici*); 5. Sredozemski sestoji slanuš trajnic na muljastih polysuhih tleh (koda 1420) – razred *Sarcocornetea fruticosi* (asociacije *Puccinellio-Sarcocornetum*, *Puccinellio-Halimionetum fruticosae in Limonio angustifoliae-Artemisietum caerulescentis*) [124].

## 2.2 Kartiranje habitatnih tipov

Na raziskovanem območju KPSS smo leta 2010 kartirali vse negozdne površine po PHYSIS metodi kartiranja habitatov [33], ki temelji na Palearktični klasifikaciji habitatnih tipov [34] in je prilagojena in dopolnjena za slovenske potrebe [35]. Osnova za Palearktično klasifikacijo je sintaksonomija, hierarhično urejen sistem rastlinskih združb po Braun-Blanquetu. Kadar imena združb oziroma višjih taksonomskih skupin (zvez ali redov) niso primerna, uporabimo fiziognomski vidik vegetacije. Tipologija PHYSIS omogoča, da natančno določimo habitat z dodano vrednostjo o nivoju vegetacije. Ker se habitatni tipi halofitne vegetacije lahko spreminjajo na zelo kratki razdalji, smo uporabljali tudi »hibridne« oblike (tranzicijske oblike ali mozaike) med dvema habitatnima tipoma.

## 2.3 Zajemanje nadmorskih višin s pomočjo tehnologije LIDAR

Za potrebe modeliranja prostorske razporeditve habitatnih tipov v KPSS smo posneli glavne nasipe v solinah po zgledu metodologij številnih avtorjev, ki proučujejo vpliv dviganja morske gladine na obmorska mokrišča širom sveta [36]–[39]. V KPSS je bilo snemanje izvedeno leta 2010 na nadmorski višini 600 m s frekvenco snemanja 100 kHz in hitrostjo letenja 80 kts tako, da je bila dosežena povprečna gostota 8 točk na m<sup>2</sup> in horizontalna natančnost večja kot 10 cm. Le-ta je bila preverjena in potrjena s primerjanjem geodetskih oslonilnih točk iz uradne baze podatkov. Snemanje smo izvedli z LIDAR senzorjem Optech GEMINI ALTM 167. Za osnovno obdelavo podatkov smo uporabili programska paketa Dashmap 1.1 in PosPac 5.2. Za klasifikacijo in dokončno obdelavo smo uporabili programski

paket TerraSolid. Praviloma gostota halofitne vegetacije ni prevelika, zato smo lahko klasificirali in določili 1.7 milijona točk (od skupaj posnetih 10.6 milijona), ki so se dotaknile golih tal v KPSS.

## 2.4 Merjenja nadmorskih višin z geodetskimi metodami

V letu 2010 smo izvedli klasične geodetske meritve nadmorske višine glede na slovenski geoidni model [40] z visoko natančno GNSS (Global Navigation Satellite System) napravo Zmax Thales Navigation (geodetska natančnost 1 cm). Clough idr. (2010) [37] poudarjajo, da je potrebno višinske podatke vedno korigirati tako, da upoštevamo povprečno gladino morja. V KPSS smo zaradi pomankanja LIDAR točk izven glavnih nasipov geodetske meritve opravili bolj sistematično. Izmerili smo 221 višinskih točk, razporejenih po celotnem območju KPSS v obliki transektov s tremi točkami na habitatni tip. Tako smo izmerili 73 transektov v 28 različnih habitatnih tipih. Na podlagi različnih študij [41]–[45], ki poročajo, da je prostorska razporeditev (zonacija) rastlinskih združb v obmorskih mokriščih v največji meri odvisna od slanosti in vlažnosti substrata, kot posledica različne nadmorske višine, smo prvo točko transekta izmerili v prvem stičišču dveh habitatov, drugo v jedru habitata in tretjo točko v drugem stičišču dveh habitatov. Točke transektov smo uporabili za horizontalno (vodoravno) in vertikalno (navpično) kalibracijo oblaka LIDAR točk. V nadaljevanju smo uporabili orodja zonalne statistike (*angl. Zonal Statistics*) v programskem paketu ArcGIS [46] za izračun povprečne nadmorske višine habitatnega tipa v KPSS glede na vrednosti geoida za leto 2010. V zaključni stopnji smo povprečno nadmorsko višino posameznega habitata pripisali 307.988 naključno razporejenim točkam v KPSS (100 na habitatni tip), in s tem dobili tudi tukaj podlago za izdelavo digitalnega modela reliefa (DMR) za celotno območje KPSS.

## 2.5 Pridobivanje podatkov o gnezdenju ptic v KPSS

Sistematično vzorčenje avifaune v KPSS poteka že od leta 1983. V letih od 2004 do 2012 je potekalo tedensko vzorčenje ptičjih gnezd po teritorialni metodi [47] na celotnem območju KPSS. Točkovno geolokacijo gnezd posameznih vrst ptic smo pridobili z GPS napravo in jo popisali ter kasneje dokumentirali v 100 x 100-metrski koordinatni mreži UTM [48]. Monitoring ptic in gnezd poteka v KPSS še naprej. Za ugotavljanje vpliva podnebnih sprememb smo uporabili desetletni niz (2004 – 2013)

prostorskih podatkov o gnezdenju štirih vrst obmorskih ptic – polojnik (*Himantopus himantopus*), navadna čigra (*Sterna hirundo*), mala čigra (*Sternula albifrons*) in beločeli deževnik (*Charadrius alexandrinus*) (Slika 2). Vrste so bile ciljno izbrane, saj gnezdijo v majhnih depresijah ali luknjah na številnih muljastih poljih in nasipih v bližini vode v obmorskih mokriščih [49] in so tako zelo uporabne za razumevanje vplivov trenda dviganja morske gladine povsod po svetu. Obravnavane vrste so tudi v Rdečem seznamu ogroženih vrst ptic Mednarodne zveze za ohranjanje narave (IUCN-*International Union for Conservation of Nature*) [50]–[52], zaenkrat še s statusom »manj ogroženo«.



Slika 2: Ciljno izbrane vrste obmorskih ptic, ki so bile vključene v študijo.

Foto: Iztok Škornik in Lovrenc Lipej

## 2.6 Pridobivanje podatkov o dviganju morske gladine, sesedanju površja in nanosu materiala v Piranskem zalivu

Monitoring višine morja v Sloveniji poteka pod okriljem Agencije RS za okolje (ARSO) na mareografski postaji Koper in na oceanografski boji Piran, katere lastnik je Nacionalni inštitut za biologijo (NIB – Morska biološka postaja). ARSO s postajo v Kopru sodeluje tudi z Evropsko službo za spremljanje višine morja (ESEAS), ki

obsega okrog 200 sodobnih mareografov v trindvajsetih evropskih državah z namenom, da raziskovalcem in mednarodni javnosti posreduje podatke o spreminjanju gladine morja. Tako so konec leta 2005 prenovili in nadgradili mareografsko postajo Koper, da le-ta ustreza mednarodnim standardom in zahtevam za registracijo in dolgoročno spremljanje nivoja morja [53]. Postavljena je na Ukmarjevem trgu (oddaljena 1,5 km od Škocjanskega zatoka in 10 km od KPSS), kjer je od leta 1958 stal stari mareograf. Sodobna mareografska postaja ob beleženju srednjega nivoja morja in temperature morja sedaj pridobiva tudi natančne meteorološke podatke (hitrost in smer vetra, zračni tlak, temperaturo in vlažnost zraka itd.) ter izvaja neprekinjena opazovanja iz permanentne GPS postaje [54]. Iz le-te smo povzeli razpoložljive podatke o povprečni letni višini morja za obdobje 1962–2012, ki so dostopni na spletnem naslovu [55]. Trend dviganja morske gladine smo korigirali tudi s povprečno hitrostjo sedimentacije v Piranskem zalivu ( $0,053 \text{ cm leto}^{-1}$ ) po ugotovitvah Ogorelca idr. (1991) [56] in s povprečno hitrostjo pogrezanja površja (subsidenca) v Piranskem zalivu ( $0,0015 \text{ cm leto}^{-1}$ ) po izračunih Lambecka idr. (2004) [57]. Z dobljenim prilagojenim trendom smo tako napovedali scenarij višine morske gladine v KPSS za prvo in drugo polovico stoletja.

Lokalne meritve in posledične napovedi nivoja povprečne gladine morja glede na leto 2010 smo v nadaljevanju primerjali z oceno globalnega spreminjanju morske gladine [58] iz posodobljenega 4. 5. in 6. poročila Medvladnega foruma o podnebnih spremembah (IPCC). Pri 6. poročilu so primerjalni izračuni prilagojeni na obdobje 1995–2014.

## 2.7 Združitev habitatnih tipov in mikrovišinskih intervalov

Kartirane habitatne tipe (v nadaljevanju HT) smo združevali na podlagi njihove povprečne mikronadmorske višine z multivariatno metodo razvrščanja po Wardu (kvadratna Evklidska razdalja) v programskem paketu R [59]. Dobljene skupine so tako lokacijsko specifične; v drugih obmorskih mokriščih lahko skupine tvorijo drugi HT. Večina le-teh v KPSS sledi gradientu povprečne mikronadmorske višine z izjemo tistih HT, ki so neodvisni od režima valovanja in gradientov slanosti ter vlažnosti. Zato smo slednje združili, in tako oblikovali 5 modificiranih Wardovih agregatov (MWA; *angl. Modified Ward Habitat Aggregate*), ki v zaporedju sledijo gradientu nadmorske višine. Z orodjem za prostorsko analizo (*angl. Spatial Analyst Tools*) v programskem okolju ArcGIS [46] smo le-te združili z oblakom LIDAR točk

in dobili frekvenčne porazdelitve mikrovišin po MWHA. Po analizi frekvenčnih porazdelitev smo uporabili višinski interval aritmetična sredina  $\pm 1$  standardni odklon na DMR-ju za vsak MWHA, in tako oblikovali karto MWHA le z višinskimi intervali. Poudariti moramo, da so napovedi za prostorsko razporeditev MWHA v prihodnosti odvisne od strukture površja obravnavanega obalnega mokrišča.

## 2.8 Model premene habitatnih tipov

Na temelju koncepta procesa »coastal squeeze« [60] smo izdelali GIS model za napoved prostorske razporeditve zavarovanih HT v KPSS ob upoštevanju trendov dviga morske gladine glede na primerjalno leto 2010. Po izdelavi karte MWHA z višinskimi intervali na DMR-ku je sledila stopnja validacije, kjer smo slednjo primerjali z realno, v MWHA agregirano, karto HT (kartiranje HT 2010). Uporabili smo statistiko podobnosti slik (*angl. Image Similarity Statistics*) tj.  $\chi^2$  preizkus, Kramerjev koeficient kontingence in Kappa indeks podobnosti slik v programskem paketu Idrisi Selva [61]. Določili smo kritično mejno vrednost ujemanja obeh primerjanih kart ( $Kappa > 0,7$ ); šele ob doseganju zadanega pogoja smo nadaljevali modeliranje prihodnjih scenarijev. V zaključni stopnji smo tako definirali nove mikrovišinske intervale za MWHA glede na relativni dvig morske gladine od leta 2010 bodisi po lokalnem trendu bodisi po globalnih napovedih (IPCC) in oblikovali prihodnje karte MWHA.

## 2.9 Modeliranje potencialnih površin gnezdenja obrežnih ptic pod vplivom dviganja morske gladine

### 2.9.1 Okoljski prediktorji

#### 2.9.1.1 Modificirani Wardov habitatni agregat (MWHA)

Prva okoljska spremenljivka oziroma prediktor za model potencialnih gnezdišč v KPSS pod vplivom dviganja morske gladine je MWHA. Gre za »proxy« podatek, ki hkrati predstavlja tako višinski pas kot HT.

### 2.9.1.2 Gostota vegetacije (NDVI)

Gostoto vegetacije v KPSS (kot drugi prediktor) smo določili s pomočjo normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI), ki smo ga izračunali s pomočjo digitalnega ortofoto posnetka (DOF050) in bližje infrardečega ortofoto posnetka iz leta 2012 (DOF50IR) [62]. Vegetacija ima relativno visoko odbojnost v bližje infrardečem in nizko odbojnost v rdečem spektru svetlobe, česar posledica so pozitivne vrednosti NDVI. Vrednost le-tega je odvisna od količine nadzemne biomase, zato ima bogata vegetacija (npr. gozd) vrednosti NDVI od 0.5 do 1.

### 2.9.1.3 Pestrost okolice gnezda (SI)

Z izračunom Shannonovega diverzitetnega indeksa (SI ali  $H'$ ) na habitatni osnovi (metoda premikanja okna z 10 m radijem za okolico piksla) smo določili tretji prediktor, tj. pestrost okolice gnezda. Uporabili smo orodje LFT (*angl. Land Facet Tools*) za ArcGIS [63]. Vrednosti  $H'$  naraščajo z večanjem števila razredov (oziroma poligonov ali zaplat) in z enakomernostjo porazdelitve le-teh. Diverzitetni indeks izračunamo z enačbo, ki sta jo predstavila Shannon in Weaver (1963) [64]:

$$SI = H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i S$$

Izračunamo delež habitatov ( $i$ ), ki ga zmnožimo z njegovim naravnim logaritmom ( $\ln p_i$ ). Za vsak habitat dobljene vrednosti seštejemo in zmnožimo z -1. Vrednosti indeksa  $H'$  so tako od 0 do  $\ln(S)$ , kjer  $S$  predstavlja število različnih habitatnih tipov, ki se pojavljajo v obravnavanem območju.

### 2.9.1.4 Oddaljenost do vode (DIS2W)

Spremenljivko oddaljenost do vode (DIS2W) smo izračunali z algoritmom Evklidske razdalje v okolju ArcGIS [46], ki deluje po naslednjem načelu: za vsako celico (piksel) določimo razdaljo do vira z računanjem hipotenuze trikotnika s stranicama  $x\_max$  in  $y\_max$ , pri čemer je rezultat prava Evklidska razdalja. Določena je najkrajša razdalja do vira, in če je le-ta manjša od določene maksimalne razdalje,

je vrednost pripisana celici v nastalem rastru (angl. floating-point raster). Kot vir za izračun opisane razdalje smo vstavili nivo morja v letu 2010.

### 2.9.1.5 Oddaljenost do antropogenih motenj (DIS2AD)

Motnja je diskretni dogodek, ki prekine strukturo ekosistema, združbe ali populacije in spremeni razpoložljivost virov ali fizično okolje [65]. Motnje lahko ustvarijo mozaik vegetacijskih vzorcev v večjih stopnjah, ki so jih ekologi že zgodaj prepoznali kot pomemben del na nivoju krajinskih matrik [66]–[69]. Prediktor oddaljenost do antropogenih motenj (DIS2AD) smo izračunali s pomočjo karte HT v KPSS. Izbrali smo vse HT (poligone), ki so pod antropogenim vplivom znotraj raziskovanega območja (ceste, poti, aktivni solinarski bazeni, druga infrastruktura itd.) in izračunali Evklidsko razdaljo med njimi [46].

Po pripravi vseh informacijskih slojev prediktorskih spremenljivk (MWH, NDVI, SI, DIS2W in DIS2AD) smo le-te reklasificirali v 3 razrede (NIZKO, SREDNJE in VISOKO) z uporabo metode razreza enakih površin (angl. *Equal Area Slice Reclassification*) z orodjem za prostorsko analizo v programskem paketu ArcGIS [46]. Metoda določi vhodnim podatkom poljubno število intervalov z enakim številom celic oziroma površino. V nadaljevanju smo ugotavljali zvezo med frekvenco ptičjih gnezd posamezne vrste (polojnik, navadna čigra, mala čigra in beločeli deževnik) in gradientom prediktorskih okoljskih spremenljivk z uporabo  $\chi^2$  statistike v statističnem programu R [59]. Moč opisanih zvez smo izračunali s Kramerjevim koeficientom kontingence (angl. *Cramer's V*).

### 2.9.2 Napoved prihodnjih ustreznih potencialnih gnezditvenih površin v KPSS

Modelirali smo potencialne gnezditvene površine za 4 izbrane vrste ptic glede na prihodnje trende dviganja morske gladine. V model smo vključili 270 reprezentativnih gnezd beločlega deževnika, 211 gnezd male čigre, 201 gnezdo navadne čigre in 248 gnezd polojnika. Izločili smo vsa gnezda v obdobju 2004–2013, ki so bila locirana pod srednjim nivojem morja v letu 2010. Geolokacija gnezd je bila zabeležena z GPS napravo GARMIN 60CSx. Opisanih pet okoljskih spremenljivk (MWH, NDVI, SI, DIS2W in DIS2AD), ki so statistično značilno vplivale ( $p < 0,05$ ,  $\alpha = 0,05$ ) na prostorsko razporeditev gnezd, smo izbrali po Kramerjevi metodi

(*angl. Cramer's V method*) [61]. Glede na potencialno biološko pomembnost posameznih okoljskih spremenljivk [70] smo le-te testirali za multikolinearnost (statistično značilen Pearsonov koeficient korelacije  $> 0,50$ ), da bi se izognili morebitni redundanci prediktorskih spremenljivk. V nadaljevanju smo na podlagi podatkov o prisotnosti ptičjih gnezd in izbranih okoljskih spremenljivk uporabili metodo Mahalanobisove tipičnosti (*angl. Mahalanobis typicalities*) v LCM (*angl. Land Change Modeller*) dodatku programa Idrisi Selva [61] za determinacijo oziroma identifikacijo vrstno specifične potencialne gnezditvene površine (vrstno specifičnih gnezditvenih rangov) v prihodnosti. Dobljena karta verjetnosti po Mahalanobisu izraža stopnjo, do katere so vrednosti nabora okoljskih spremenljivk na določeni lokaciji tipične za specifično vrsto. Le-ta je izračunana na podlagi Mahalanobisove razdalje (*angl. Mahalanobis Distance*), ki je multivariatni ekvivalent vrednosti  $Z$  (*angl. Z-score*) in predstavlja verjetnost katerekoli lokacije, ki ima Mahalanobisovo razdaljo večjo ali enako tisti, ki jo opazujemo [71]. Tako ima Mahalanobisova razdalja verjetnostno porazdelitev  $\chi^2$ , s stopinjami prostosti enakim številom okoljskih spremenljivk minus ena, pri čemer je potem Mahalanobisova tipičnost verjetnost pod repom krivulje  $\chi^2$ , ki je presekana z Mahalanobisovo razdaljo [71]. Tako so vhodni podatki pri tej metodi: originalen rang poligon oziroma točke (lokalitete), s katerimi definiramo vadbeno površino (*angl. training sites*) in nabor okoljskih spremenljivk za izračun vrstno specifičnih rangov (*angl. species range*). V nadaljevanju smo uporabili tudi drugi model distribucije vrst (SDM; *angl. Species Distribution Model*) z namenom primerjave in ocene kakovosti napovedi potencialnih gnezditvenih površin z Mahalanobisovo tipičnostjo. Na tem mestu smo vpeljali model Maksimalne entropije (Maxent; *angl. Maximum Entropy Model*) [72], katerega podrobnosti navajajo Phillipsa idr. (2006; 2009) [73], [74]. Maxent uporablja metodo največje verjetnosti (*angl. maximum likelihood*), ki modelira distribucijo vrst z generiranjem verjetnostne porazdelitve pikslov po območju raziskave. Ta izračuna takšno verjetnostno porazdelitev, ki poveča entropijo, pri čemer veljajo omejitve, določene z dejansko prostorsko razporeditvijo vrste in okoljskih pogojev [75], [76]. Podatke o prisotnosti gnezd posamezne vrste smo naključno razdelili v dve skupini (pri obeh modelih): 75 % podatkov je bilo uporabljenih za konstrukcijo modela in determinacijo funkcijskih razmerij med prisotnostjo gnezd in okoljskimi spremenljivkami, preostalih 25 % podatkov pa je bilo namenjeno testiranju napovedne moči modela. V orodju Maxent je bila uporabljena tehnika pod vzorčenja (*angl. subsampling technique*) za dodatno kalibracijo modela (10 ponovitev). Po standardnih pravilih smo izbrali konvergenčno mejno vrednost (*angl. convergence*



*threshold*) in regularizacijsko vrednost (*angl. regularization value*), pri čemer je izbrano število ponovitev (*angl. iterations*) takšno, da vsi modeli konvergirajo. Po zgledu Phillipsa idr. (2009) [74] smo uporabili tudi podatke ozadja za ciljno skupino, da smo se izognili prostorski pristranskosti, ki je posledica podatkovnega tipa prisotnost/odsotnost.

S pomočjo statistike ROC (*angl. Receiver Operating Characteristic statistics*) smo kvantitativno ocenili kakovost napovedi obeh modelov (Mahalanobisove tipičnosti in Maxent) tako, da smo primerjali dejanske prostorske razporeditve gnezd in dobljene karte verjetnosti v programskem paketu Idrisi Selva [61]. Površino pod krivuljo ROC (AUC; *angl. Area Under the Curve*) obširno uporabljajo pri modeliranju distribucije vrst, saj karakterizira uspešnost modela pri vseh možnih mejnih vrednostih, naslanjajoč se le na eno vrednost, ki jo lahko uporabimo tudi kot objektivno merilo za primerjavo različnih modelov [73], [77], [78]. Kljub kritikam [75], [79] je vrednost AUC zelo uporabna pri primerjavi modelov za isto vrsto na podobnem geografskem območju. Le-ta tako zavzema vrednosti od 0,5 do 1, kjer vrednost 1 predstavlja visoko kakovost (dober model), medtem ko vrednost 0,5 nakazuje, da je rezultat specifičnosti in občutljivosti enak (slab model) [76], [77], [80], [81]. Po zgledu Hosmerja in Lemeshowa (1989) [82] AUC vrednosti krivulje ROC obeh modelov osmisli z naslednjimi kriteriji: <0,5 ni diskriminacije; od 0,5 do 0,7 slaba diskriminacija; od 0,7 do 0,8 sprejemljiva diskriminacija; od 0,8 do 0,9 odlična diskriminacija in >0,9 izrazita diskriminacija [76]. Ob tem smo pri obeh modelih upoštevali tudi celotno obliko krivulje ROC pri vseh možnih mejnih vrednostih, saj le-ta podaja pomembno informacijo o obnašanju modela [83].

V sklopu modela Maxent smo opravili tudi Jackknife preizkus, ki individualno obravnava pomembnost prediktorskih okoljskih spremenljivk. Pri računanju model postopoma izključuje po eno okoljsko spremenljivko, nato oblikuje rezultat le s posamezno ter na ta način izmeri individualni prispevek posamezne okoljske spremenljivke h končnemu rezultatu modela. V zaključni stopnji smo izbrali boljši model (Mahalanobisove tipičnosti ali Maxent) za determinacijo sedanjih in prihodnjih potencialnih gnezditvenih površin štirih izbranih vrst ptic glede na dane okoljske pogoje v KPSS. Za določitev konkretnih površin smo karto verjetnosti (boljšega modela) reklasificirali v diskretno spremenljivko (raster z vrednostima 0 in 1) z uporabo mejne vrednosti ETSSLT (*angl. Equal Training Sensitivity and Specificity Logistic Threshold*), ki po številnih avtorjih velja za najpogostejšo in najustreznejšo

mejno vrednost [76], [81]. Na podlagi slednjega smo lahko napovedali spremembo potencialnih gnezditvenih površin polojnika, male čigre, navadne čigre in beločelega deževnika glede na predvideni relativni dvig morske gladine v Piranskem zalivu (glede na leto 2010).

### **3. Rezultati**

#### **3.1 Habitatni tipi**

V KPSS smo popisali 28 HT, ki so združeni v 5 MWHA glede na njihovo povprečno višino (Preglednica 1). MWHA1 sestavljajo ločje, muljasti položi brez vegetacije, halofitne enoletnice ter kombinacija enoletnic in trajnic. Njihova površina je mejno statistično značilno korelirana z mikronadmorsko višino ( $p = 0,05$ ). MWHA2 sestavljajo pretežno halofitne trajnice. Njihova prostorska razporeditev je zelo odvisna od višine terena. MWHA3 sestavljajo kombinaciji ločja in trstičja, halofitnih trajnic in trstičja ter samo trstičje. Površina, ki jo MWHA3 zaseda v KPSS, ni v korelaciji z mikronadmorsko višino, kar je posledica večmodusne višinske porazdelitve tako ločja kot trstičja. V MWHA4 so združene kombinacije z ruderalno vegetacijo, ki tukaj presenetljivo kažejo odvisnost od višine. Kot v Škocjanskem zatoku je tudi v KPSS MWHA5 mozaik številnih HT, neodvisnih od višinskega gradienta terena.

**Preglednica 1: Habitatni tipi po Palearktični klasifikaciji, njihovi agregati ter povezave med površino MWAH in nadmorsko višino v KPSS**

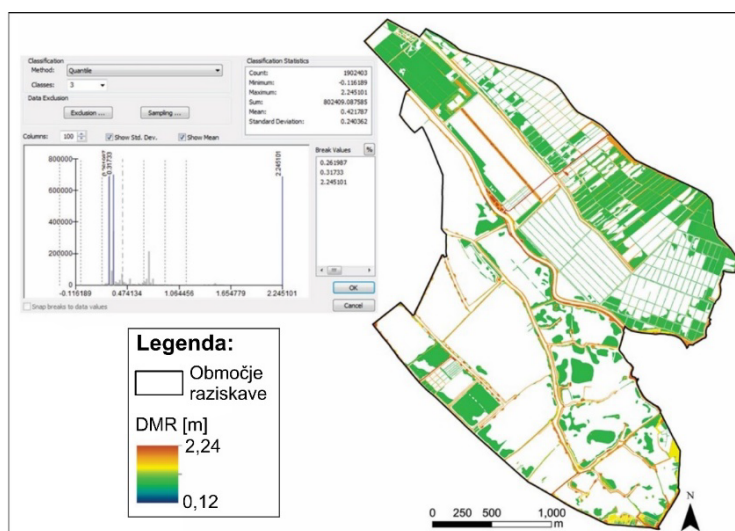
HT	FREKVENCA VIŠINSKIH TOČK	POVPREČNA VIŠINA (m)	WARD AGREGAT	MODIFICIRANI WARDOV AGREGAT (MWAH)	POVPREČNA VIŠINA+STANDARDNI ODKLON (m)	POVRŠINA (m <sup>2</sup> )	KORELACIJSKI KOEFICIENT	P
15.51 x 15.61	446	0,24	1					
15.51	811	0,25	1					
14	136397	0,28	1					
14 x 15.11	7712	0,29	1	1	0,29 ± 0,04	1218209	0,35	0,0517
15	230	0,32	1					
15.113	68663	0,32	1					
15.11 x 15.61	8635	0,34	1					
15.11 x 87.2	188	0,38	2					
14 x 15.61	7469	0,40	2	2	0,41 ± 0,09	145431	0,79	0,0060
15.61	18979	0,42	2					
15.51 x 53.1112	2135	0,48	3					
15.61 x 53.1112	1121	0,51	3	3	0,51 ± 0,11	49274	-0,01	0,9750
53.1112	5720	0,53	3					
14 x 87.2	1175	0,64	4					
15.61 x 87.2	22163	0,68	4					
15.51 x 87.2	39	0,69	4	4	0,70 ± 0,14	345337	0,89	0,0430
87.2	28732	0,71	4					
53.1112 x 87.2	10873	0,72	4					
31.8122 x 86.6	42	0,77	5					
DRUGO	7816	0,78	5					
31.8122 x 53.1112	2110	0,78	5					
31.8122 x 87.2	2706	0,78	5					
31.8122	3936	0,79	5					
31.8122 x 83.324	284	0,81	5	5	0,81 ± 0,43	144223	-0,6	0,1240
86.6	633	1,14	6					
POT	7147	1,33	7					
83.324	11	1,35	7					
86.2	917	1,40	7					

Ključ: 14 (Muljasti in peščeni poloji brez vegetacije višjih rastlin = Natura 2000 koda 1140), 15 (Obmorska slanišča s slanobjubno vegetacijo), 15.11 (Poplavljeni muljasti poloji s sestoji slanuš enoletnic, predvsem osočnika = Natura 2000 koda 1310), 15.113 (Poplavljeni muljasti poloji s sredozemskimi sestoji slanuš enoletnic, v katerih prevladuje osočnik = Natura 2000 koda 1310), 15.51 (Sredozemska obmorska močvirja z ločjem = Natura 2000 koda 1410), 15.61 (Sredozemski sestoji slanuš trajnic na muljastih polsuhih tleh = Natura 2000 koda 1420), 31.8122 (Submediteranska listopadna grmišča), 53.1112 (Slanobjubna stalno ali pretežno poplavljenost trstičja), 83.324 (Nasadi

in gozdni sestoji robinije), 84.2 (Mejice in manjše skupine dreves in grmov), 86.2 (Vasi, robni deli predmestij in posamezne stavbe), 86.6 (Ruševine, opuščeni objekti in arheološke izkopanine), 87.2 (Ruderalne združbe).

### 3.2 Digitalni model reliefa

V KPSS je 1,7 milijona klasificiranih točk (kategorija tla, ang. *ground return*) s tehnologijo LIDAR in 221 naključno razpršenih točk, merjenih z visoko natančnim GNSS sistemom, omogočilo izdelavo digitalnega modela reliefa (DMR) (vodoravna ločljivost 0,5 m). Dobili smo razpon površin od -0,12 do 2,24 m (Slika 3). Frekvenčna porazdelitev višin je bimodalna s prvim vrhom pri 0,3 m in drugim pri 0,75 m. Prvi vrh predstavlja predvsem muljaste poloje v Fontaniggah in na Leri, drugi pa številne nasipe. Povprečna višina obravnavnega območja je 0,42 m s standardnim odklonom 0,24 m.



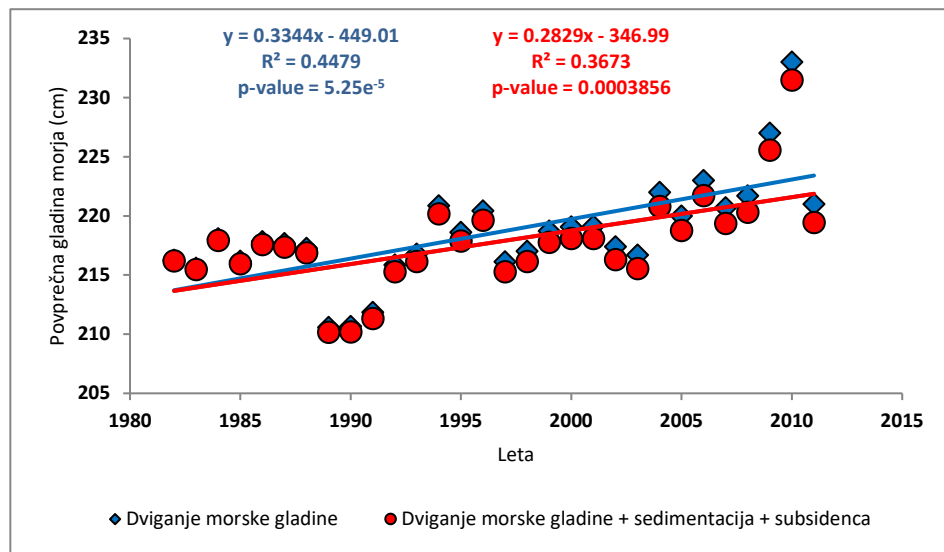
Slika 3: Digitalni model reliefa v Krajinskem parku Sečovljejske soline

Vir: lasten.

### 3.3 Trendi dviganje morske gladine v Piranskem zalivu

Podatki iz mareografske postaje Koper za 30-letno obdobje (1982–2011), ki smo jih umerili s povprečnim trendom sedimentacije in subsidence površja, kažejo hitrost dviganja morske gladine za 0,28 cm na leto (globalno povprečje znaša 0,34 cm na leto) (Slika 4). Na podlagi tega lahko predvidevamo, da bi se lahko povprečna morska

gladina v Piranskem zalivu dvignila za 11 cm do 2040, za 16 cm do 2060, za 22 cm do 2080 in za 28 cm do leta 2100.



Slika 4: Dviganje morske gladine v obdobju od 1982 do 2011 (0,33 cm/leto; modra premica) v Kopru (ARSO, 2011) ter s sedimentacijo (0,053 cm/leto) in subsidenco (0,0015 cm/leto) prilagojeni trend.

Povzeto po: Ivajnsič in Kaligarič 2014 [84]

Globalne napovedi (IPCC AR4 [CMIP4], IPCC AR5 [CMIP5] in IPCC AR6 [CMIP6]) na podlagi različnih scenarijev izpustov toplogrednih plinov predvidevajo v najhujšem primeru (scenarij A1FI; 95-percentil, rcp85; 95-percentil in ssp585; 95-percentil) relativni dvig morske gladine celo za 75, 116 oziroma 120 cm do leta 2100 v primerjavi z letom 2010 oziroma z obdobjem 1995–2014 v primeru 6. poročila IPCC (Preglednica 2).

**Preglednica 2: Relativni dvig morske gladine po globalnih podnebnih napovedih**

CMIP4*	kvantil	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
A1FI	50	0,05	0,06	0,11	0,13	0,20	0,27	0,35	0,40	0,50
A1FI	95	0,08	0,10	0,15	0,23	0,30	0,38	0,50	0,62	0,75
CMIP5*	kvantil	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
rcp45	5	0,05	0,08	0,11	0,14	0,19	0,22	0,28	0,28	0,34
rcp45	50	0,09	0,14	0,18	0,25	0,30	0,38	0,45	0,50	0,58
rcp45	95	0,13	0,20	0,26	0,36	0,43	0,54	0,64	0,74	0,84
rcp85	5	0,04	0,04	0,12	0,16	0,21	0,28	0,35	0,43	0,50
rcp85	50	0,09	0,12	0,19	0,27	0,35	0,44	0,55	0,66	0,80
rcp85	95	0,15	0,21	0,26	0,39	0,50	0,62	0,78	0,93	1,16
CMIP6**	kvantil	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
ssp245	5	0,00	0,02	0,04	0,06	0,09	0,12	0,16	0,20	0,22
ssp245	50	0,05	0,09	0,13	0,18	0,23	0,30	0,36	0,42	0,48
ssp245	95	0,11	0,17	0,24	0,34	0,43	0,55	0,67	0,79	0,90
ssp585	5	0,00	0,02	0,05	0,08	0,12	0,16	0,21	0,29	0,35
ssp585	50	0,05	0,09	0,14	0,21	0,27	0,35	0,44	0,54	0,67
ssp585	95	0,11	0,18	0,26	0,37	0,49	0,63	0,79	0,98	1,20

\*Referenčna gladina morja v letu 2010.

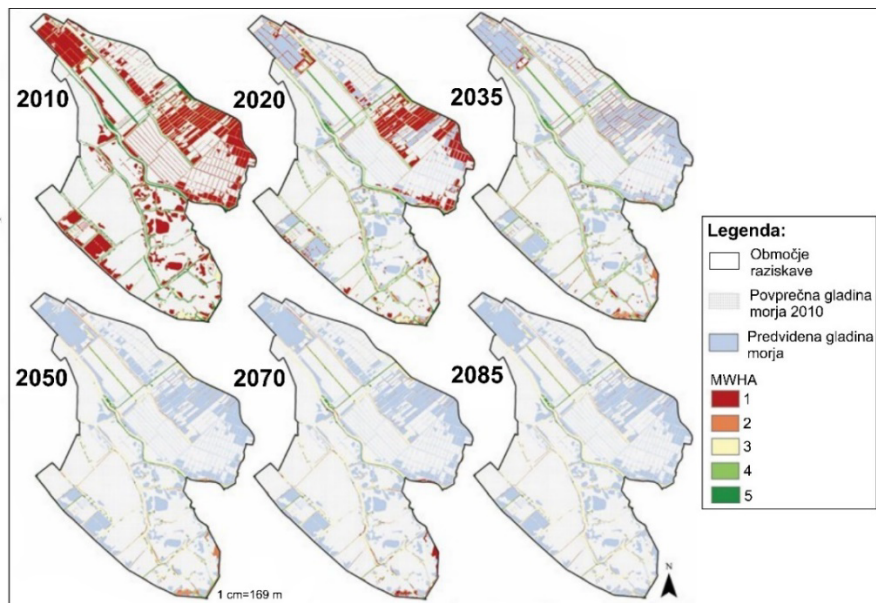
\*\*Referenčna gladina morja v obdobju 1995–2014.

Če smo ob upoštevanju lokalnih meritev dviga morske gladine in podatkov 4. in 5. poročila IPCC ocenili, da bo do drastičnih sprememb v prostorski razporeditvi habitatov v KPSS prišlo predvsem v drugi polovici stoletja, podatki 6. poročila IPCC nakazujejo, da bodo predvidene spremembe realizirane 10 do 15 let hitreje. Natančnejše izmere in ocene številnih vplivov na proces dviganja morske gladine, (skupaj z aktualnimi trendi izpustov toplogrednih plinov) so zmanjšale negotovost napovedi in na ta način premaknile predvideni čas habitatnih premen.

### 3.4 Premene habitatnih tipov

Opuščen predel solin je prepleten z nasipi in s kanali; zaradi strmejšega višinskega gradienta se HT spreminjajo v krajših razdaljah (Slika 5). MWHA1 se bo s časom zmanjševal. Po vseh trendih dviga morske gladine (lokalni in globalni) se bo površina MWHA1 do konca stoletja predvidoma zmanjšala iz današnjih 62 % na približno 2 %. Površina MWHA2 (pretežno kombinacije halofitnih trajnic) se po napovedih lokalnega trenda lahko v prvi polovici stoletja poveča za 3 %, vendar temu sledi potencialno zmanjšanje njegove površine na skoraj zanemarljiva 2 %. Napoved spreminjanja površine MWHA2 ob upoštevanju globalnih scenarijev (bodisi CMIP4, 5 ali 6) je značilno različna. V prvi polovici stoletja večina scenarijev napoveduje majhne spremembe v površini in prostorski razporeditvi MWHA2. V drugi polovici

stoletja lahko temu sledi drastičen umik tega vegetacijsko višinskega pasu. Napoved sprememb površine MWHA3 (kombinacije habitatov z vrsto *Phragmites*) v KPSS lahko razdelimo na dve stopnji. Vsi upoštevani scenariji dviga morske gladine (lokalni in globalni) v modelu premene HT v KPSS napovedujejo zmanjšanje površine MWHA3 z današnjih 9 % na 4 % v prvi polovici stoletja, čemur lahko sledi hitro povečanje površine na 18 % do leta 2080. Za MWHA4 vsi modelirani scenariji predvidevajo kar 6-kratno povečanje površine v prvi polovici stoletja. Temu po napovedih nato lahko sledi intenzivno zmanjšanje na le 1 % celotnega območja KPSS. Usoda MWHA5 je v KPSS pod vplivom nezmožnosti premikanja na novo površino zaradi omejitve širjenja z izgrajeno infrastrukturo. Dvig morske gladine lahko poplavi 77 % KPSS, če upoštevamo srednje modelne vrednosti; v najslabšem primeru bi kopno v KPSS lahko predstavljalo le 3 % zdajšnje površine.

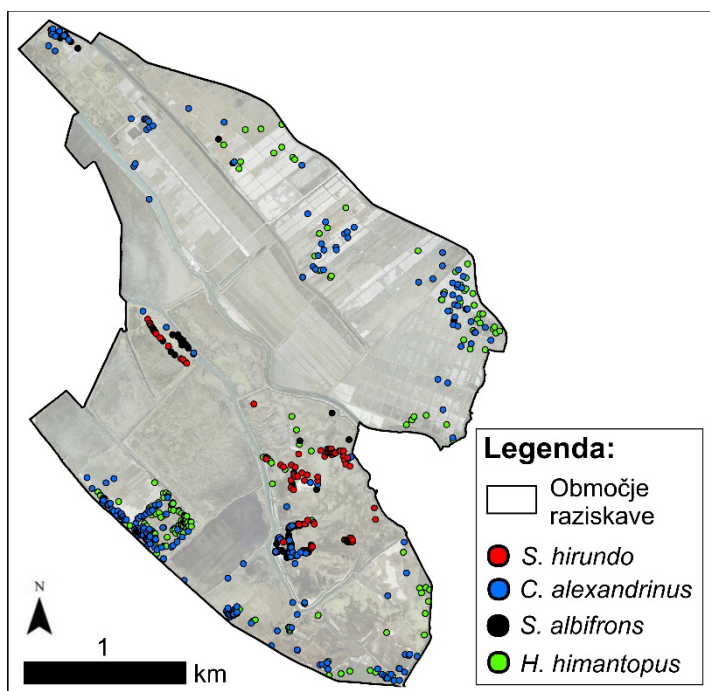


Slika 5: Dejanska in predvidena prostorska razporeditev MWHA v KPSS glede na povprečje lokalne in globalne napovedi dviganja morske gladine po 6. poročilu IPCC. Številke 1–5 predstavljajo kategorije MWHA (glej Preglednico 1)

Vir: lasten.

### 3.5 Aktualni in napovedani prostorski gnezditveni vzorci glede na trend dviganja morske gladine v Piranskem zalivu

Za potrebe raziskave smo uporabili 930 od skupno 1.828 lokacij gnezd v KPSS v letih od 2004 do 2013 (Slika 6, Preglednica 3). Preostala gnezda (898 gnezd) so bila pod povprečnim nivojem morja v letu 2010, zato jih v modelu nismo upoštevali. Od teh je bilo 270 gnezd beločelega deževnika, 211 gnezd male čigre, 201 gnezdo navadne čigre in 248 gnezd polojnika.



Slika 6: Geolokacija gnezd navadne čigre (rdeči krogi), beločelega deževnika (modri krogi), male čigre (črni krogi) in polojnika (zeleni krogi) v KPSS. Podlaga: ortofoto posnetki [32]

Vir: lasten.



**Preglednica 3: Število popisanih in v modelu uporabljenih gnezd štirih vrst raziskovanih ptic v KPSS**

Število gnezd/vrsto	beločeli deževnik	mala čigra	navadna čigra	polojnik
Skupno število popisanih gnezd	450	379	540	459
Število v modelu uporabljenih gnezd	270	211	201	248

Identificirane potencialne gnezditvene površine (rangi) posredno kažejo na zveze med okoljskimi spremenljivkami (prediktorji) in gnezdi posamezne vrste. Tako obstaja statistično značilna zveza med frekvenco ptičjih gnezd in prediktorjem MWHA ( $\chi^2 = 298,30$ ,  $df = 12$ ,  $p = 2,2e-16$ ; Cramer's  $V = 0,33$ ); obravnavane vrste ptic različno gnezdiijo glede na MWHA. Beločeli deževnik in polojnik pogosteje gnezdiita v MWHA2 in MWHA4, medtem ko mala in navadna čigra v MWHA1, MWHA2 in delno v MWHA3. Tudi zveza med gradientom prediktorja NDVI (NIZKO, SREDNJE, VISOKO) in frekvenco ptičjih gnezd je statistično značilna ( $\chi^2 = 134,17$ ,  $df = 6$ ,  $p = 2,2e-16$ ; Cramer's  $V = 0,27$ ). Podatki kažejo, da polojnik najpogosteje gnezdi na najmanj gosto poraslih površinah (kumulativno 81 % v gradientnem razredu NIZKO in SREDNJE) v KPSS v primerjavi z drugimi tremi vrstami, čeprav so za vse obravnavane vrste značilne nizke vrednosti NDVI ( $< 0,5$ ). Večja pestrost habitatov v okolici gnezda negativno vpliva na frekvenco ptičjih gnezd. Tri vrste (beločeli deževnik, mala čigra in navadna čigra) raje gnezdiijo na površinah, katerih okolica je habitatno manj pestra ( $\chi^2 = 103,78$ ,  $df = 6$ ,  $p = 2,2e-16$ ; Cramer's  $V = 0,24$ ), le polojnik gnezdi ali v zelo ali manj pestrem okolju ( $\chi^2 = 5,81$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0,06$ ). Navadna čigra gnezdi najbližje morju (54 gnezd se nahaja v gradientnem razredu NIZKO), sledi ji mala čigra, ki v 90 % gnezd v prvih dveh gradientnih razredih (NIZKO in SREDNJE) spremenljivke oddaljenost od vode (DIS2W). Le frekvenca gnezd polojnika ni v statistično značilni zvezi s prediktorjem DIS2W ( $\chi^2 = 4,60$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0,10$ ). Beločeli deževnik in mala čigra imata zelo različen odziv na prediktor DIS2AD. Prvi gnezdi v bližini antropogeno motenih površin v KPSS (56 % v gradientnem razredu NIZKO), drugi pa v veliki oddaljenosti od le-teh (63 % v gradientnem razredu VISOKO). V primeru navadne čigre je več kot 80 % gnezd najdenih v drugem gradientnem razredu spremenljivke DIS2AD, medtem ko je 77 % gnezd polojnika razporejenih v prvih dveh. Zaradi opisanih razlik med obravnavanimi vrstami ptic je prediktor DIS2AD v najmočnejši

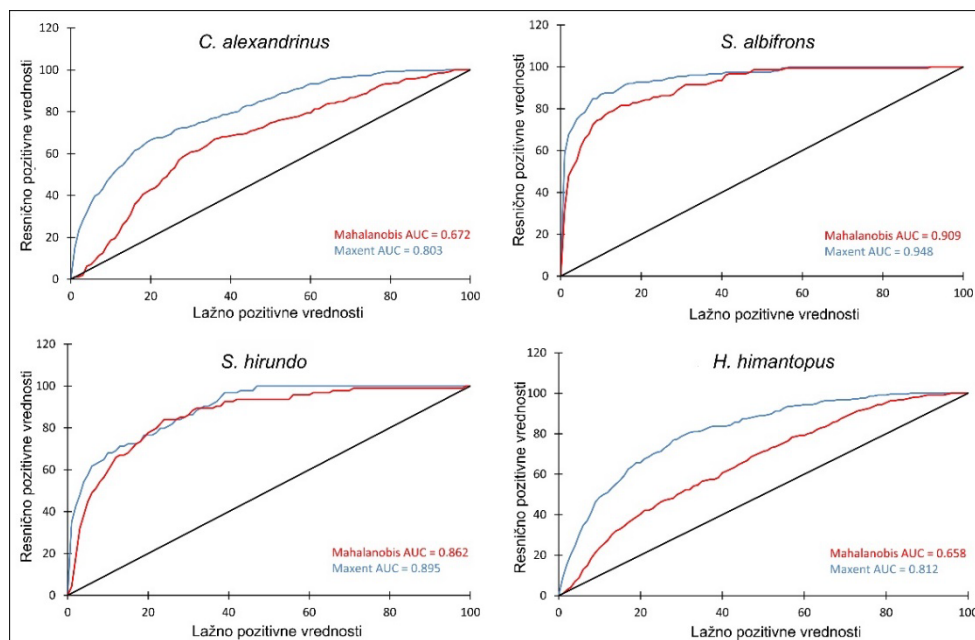
zvezi s frekvenco in prostorsko razporeditvijo gnezd v KPSS ( $\chi^2 = 367,13$ ,  $df = 6$ ,  $p = 2,2e-16$ ; Cramer's  $V = 0,44$ ).

Vrednosti korelacijskih koeficientov (Preglednica 4) kažejo, da prediktorji niso redundantni. Noben ne doseže kritične vrednosti Pearsonovega korelacijskega koeficienta 0,5, kar pomeni, da imajo vsi različen vpliv pri modeliranju potencialnih gnezditenih površin v KPSS. Zveze med DIS2AD, DIS2W in SI kot tudi med NDVI in SI so pozitivne, medtem ko kombinacije DIS2AD in NDVI, DIS2W, NDVI in SI kažejo obratno tendenco. MWAHA je najmočneje koreliran s spremenljivko NDVI.

**Preglednica 4: Matrika Pearsonovih korelacijskih koeficientov ter Kramerjev koeficient kontingence za prediktorske spremenljivke v KPSS**

Tip spremenljivke	Ime spremenljivke	Pearsonov korelacijski koeficient			
		DIS2AD	DIS2W	NDVI	SI
Zvezna	DIS2AD	1	0,12	-0,20	0,30
Zvezna	DIS2W		1	-0,21	-0,48
Zvezna	NDVI			1	0,30
Zvezna	SI				1
		Kramerjev koeficient kontingence			
Kategorična	MWAHA	0,15	0,23	0,28	0,27

Rezultat obeh modelov so karte verjetnih ustreznih gnezditenih površin za štiri raziskane vrste v KPSS. S primerjavo krivulj ROC (pri vseh možnih mejnih vrednostih) je model Maksimalne entropije (Maxent) uporabnejši od Mahalanobisove tipičnosti (Slika 7). Največja razlika med obema nastopi pri polojniku, kjer Mahalanobisova tipičnost doseže slabo diskriminacijo ( $AUC = 0,658$ ), Maxent pa odlično ( $AUC = 812$ ). Podoben rezultat velja za beločlega deževnika; Mahalanobisova tipičnost tukaj doseže sprejemljivo ( $AUC = 0,672$ ) in Maxent vnovič odlično diskriminacijo ( $AUC = 0,803$ ). Oba modela ponujata boljše rezultate za obe vrsti čiger. Izjemna diskriminacija ( $AUC > 0,9$ ) je bila dosežena v obeh modelih v primeru male čigre. Rezultat Mahalanobisove tipičnosti kot Maxenta je pri nizkih mejnih vrednostih in tistih nad 0,5 enak, medtem ko med slednjimi Maxent deluje bolje. Modela se obnašata zelo podobno pri navadni čigri. Nivo diskriminacije je v obeh primerih visok ( $AUC$  med 0,8 in 0,9), pri čemer je Mahalanobisova tipičnost boljša le med mejnima vrednostma 0,2 in 0,3. Zaradi boljših rezultatov smo za nadaljnjo prognozo uporabljali le Maxent model.

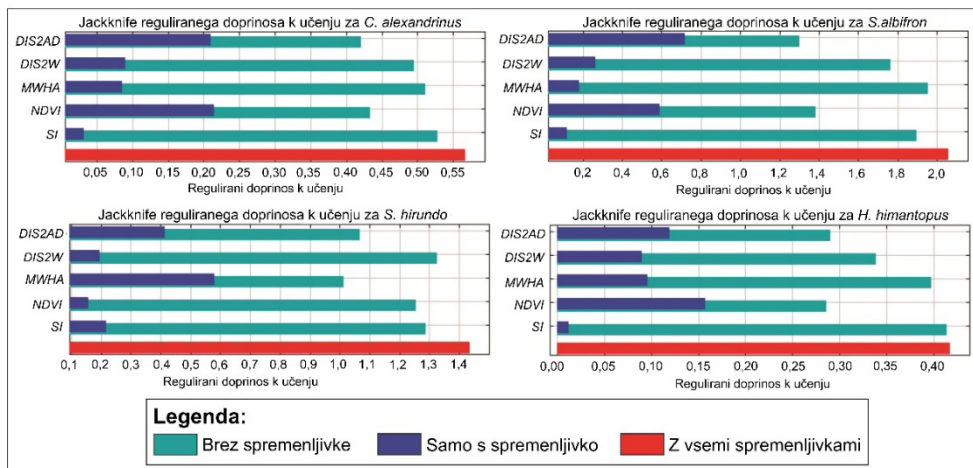


Slika 7: ROC (*ang. Receiver Operating Characteristic*) krivulje in vrednosti AUC (*ang. Area Under the Curve*) modelov Maxent in Mahalanobisove tipičnosti za posamezno obravnavano vrsto ptic v KPSS

Vir: lasten.

Rezultat Jackknife preizkusa za pomembnost prediktorskih spremenljivk kaže individualistični odziv posamezne vrste (Slika 8). Pri beločelem deževniku sta najpomembnejša prediktorja NDVI in DIS2AD. Tudi DIS2W in MWAH pomembno doprineseta k rezultatu modela, medtem ko SI manj vpliva pri modeliranju prostorske razporeditve gnezd beločelega deževnika v KPSS. Podoben odziv kaže tudi polojnik z največjim vplivom prediktorja NDVI, ki mu sledita DIS2AD in MWAH. Najboljši rezultat modela z izbranimi okoljskimi spremenljivkami smo ugotovili pri mali čigri. Največ sta k temu prispevala prediktorja DIS2AD in NDVI. Zanimivo je, da je prispevek ostalih spremenljivk (DIS2W, MWAH in SI) k rezultatu modela za malo čigro v primerjavi z drugimi vrstami še vedno visok. MWAH je daleč najbolj pomembna spremenljivka za navadno čigro, čeprav imata pomembno vlogo tudi DIS2AD in SI. Prav zaradi opisanih individualističnih odzivov posamezne vrste v modelu se končni rezultati –

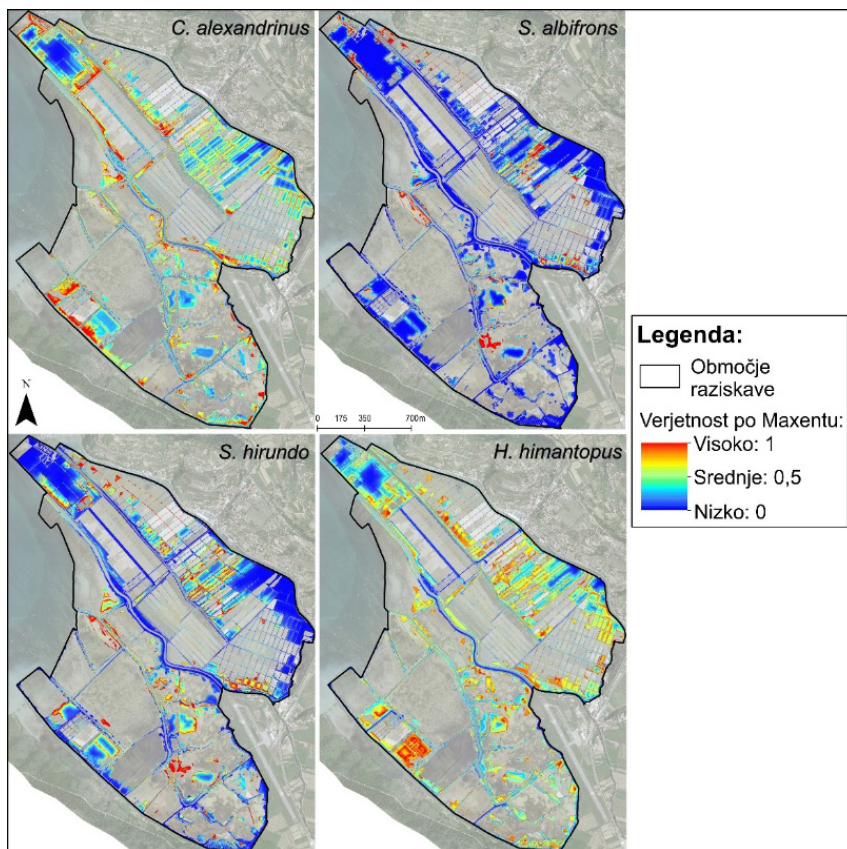
karte verjetnih ustreznih gnezditvenih površin med seboj značilno razlikujejo (Slika 8).



Slika 8: Prispevek posameznih prediktorjev k rezultatu Maxent modela za posamezno vrsto ptice

Vir: lasten.

Potencialna gnezditvena površina za beločelega deževnika in polojnika je definirana v širšem intervalu kot posledica nekoliko slabše splošne uspešnosti modela (nižja vrednost AUC) v primerjavi z rezultati obeh čiger (Slika 9). Tako z uporabo izračunane mejne vrednosti ETSSLT, ki je omogočila reklasifikacijo oziroma transformacijo kart verjetnih ustreznih gnezditvenih površin v diskretno spremenljivko (rang) s primernimi (1) in neprimernimi (0) gnezditvenimi površinami, ugotavljamo, da obravnavane ptice v KPSS zasedajo različne gnezditvene niše. Potencialna gnezditvena površina beločelega deževnika se v 16 % prekriva s potencialno površino male čigre (Klocation = 0,16), v 17 % (Klocation = 0,17) s površino navadne čigre in v 26 % (Klocation = 0,26) s površino polojnika. Največje ujemanje gnezditvenih rangov imata obe vrsti čiger (Klocation=0,39). Potencialna gnezditvena površina male čigre sovпада s polojnikom v 4 %, medtem ko navadna čigra in polojnik delita 22 % primerne gnezditvene površine v KPSS.

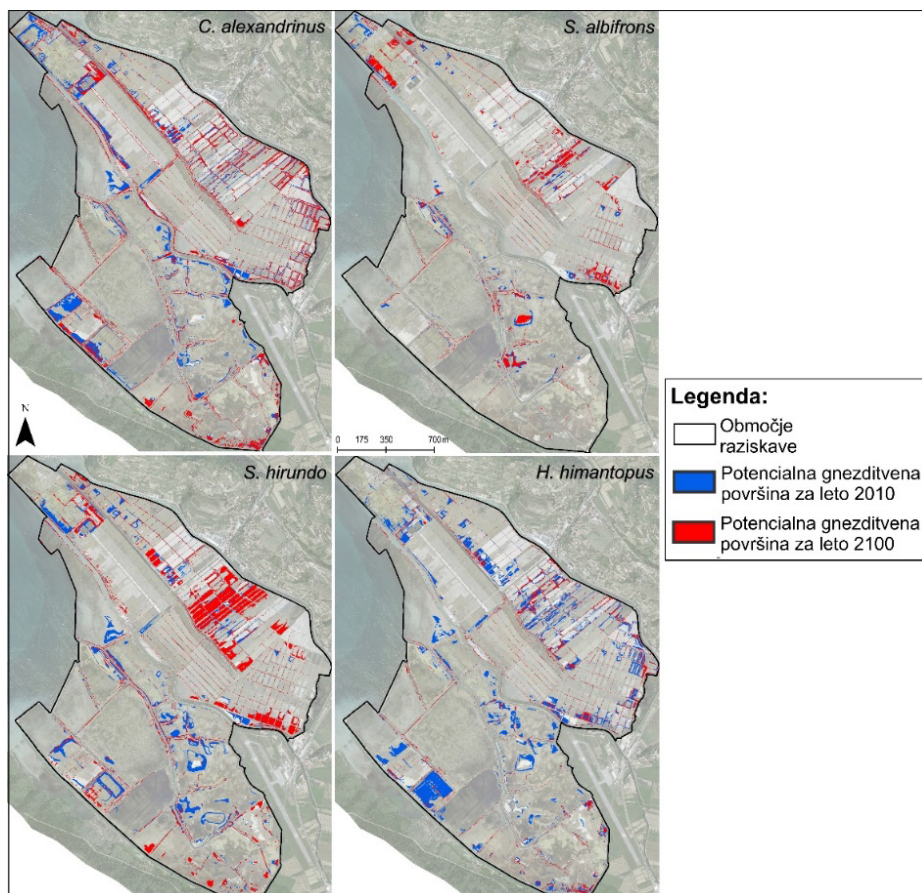


Slika 9: Ustreznost gnezditvenih površin za posamezno vrsto ptic v KPSS na podlagi modela Maxent. Podlaga: ortofoto posnetki [32]

Vir: lasten.

Z uporabo Maxent modela smo izračunali potencialne gnezditvene površine beločelega deževnika, male čigre, navadne čigre in polojnika pod vplivom trenda dviganja morske gladine po lokalnih podatkih ter po 4., 5. in 6. poročilu IPCC. Napoved spreminjanja potencialne gnezditvene površine beločelega deževnika v KPSS lahko opišemo z linearnim trendom, ki predpostavlja letno zmanjšanje za 1.734 m<sup>2</sup>. Do leta 2100 se potencialna gnezditvena površina lahko skrči na vsega 13,7 ha (7,2 % današnjega kopnega v KPSS). S prostorskega vidika bodo prihodnje ustrezne gnezditvene površine pomaknjene na številne višje ležeče nasipe, ki bodo pod vplivom procesa »coastal squeeze« bolj ali manj linearne oblike (Slika 10). Za polojnika je napoved trendov potencialne gnezditvene površine do konca 21. stoletja

bolj neugodna. Predviden je umik ustreznih površin z vrednostjo  $2.929 \text{ m}^2/\text{leto}^{-1}$ , kar pomeni 30,5 ha manj potencialnih gnezditvenih površin do leta 2100. Poljnik bi tako imel do leta 2100 na razpolago 2,7 x manjšo površino za gnezdenje, kot jo ima danes. Prostorska razporeditev gnezdišč bi tako imela težišče v severnem delu KPSS (Lera) in bi tvorila pretežno linearne pasove ob številnih nasipih.



Slika 10: Sedanja (2010) in predvidena (2100) prostorska razporeditev ustreznih gnezditvenih površin beločelega deževnika, male čigre, navadne čigre in poljnika v KPSS. Podlaga: ortofoto posnetki [32]

Vir: lasten.

Napoved za obe vrsti čiger je bolj optimistična. Z vidika površine se potencialno gnezditveno območje male čigre v KPSS ne bo veliko spreminjalo. Izračunani trend lahko opišemo s polinomske funkcijo tretje stopnje, ki predvideva majhno povečanje potencialne gnezditvene površine do 2060 in nato počasno zmanjševanje do 2100, ko bo delež le-teh primerljiv z zatečenim stanjem v KPSS (19,5 ha = 17 % skupne površine v KPSS). Kakorkoli že, spremembe v prostorski razporeditvi potencialnega gnezditvenega območja za malo čigro so kljub temu očitne; predviden je premik v osrednji del južnega opuščene predela (Fontanigge) ter v severni in osrednji del Lere (Slika 10). Glede na rezultate modela bo »zmagovalec« navadna čigra, ki bo kljub intenzivni grožnji s podnebnimi spremembami pogojenega dviganja morske gladine celo pridobila potencialno gnezditveno površino v KPSS. V tem primeru je predvideno morebitno 1.8 x povečanje potencialne površine za gnezdenje v prvi polovici stoletja. Drastično zmanjšanje le-te je napovedano le v letih 2060 in 2080, s samo 4.112 m<sup>2</sup> manjšo predvideno površino, kot jo ima na razpolago navadna čigra danes (Slika 10). Očiten je predviden prostorski premik potencialne gnezditvene površine z navadno čigro iz južnega (Fontanigge) v severni del (Lera) KPSS (Slika 10).

#### 4 Diskusija

Prve žrtve višanja morske gladine bodo gotovo ptice, predvsem močvirniki in pobrežniki in tudi nekatere druge morske in vodne ptice. Gre za izgubo ustreznih prehranjevališč, počivališč in gnezdišč. Takšne skupine ptic so lahko zgodnji indikatorji vpliva višanja morske gladine in opozorilni signal za morebitne ekološke spremembe v obalnih mokriščih. Nenadne spremembe v populaciji gnezdil so lahko tudi neposreden dokaz za širše okoljske spremembe. Ker omenjene ptice gnezdiijo le nekaj centimetrov nad zgornjo mejo plimovanja, bi dvig povprečnega nivoja morske gladine lahko povzročil uničenje gnezd in zarodov ter opustitev takšnih tipov gnezdišč. S tega vidika so najbolj ranljive tiste vrste, ki gradijo gnezda na občasno poplavljenih muljastih in peščenih poljih. Na splošno velja, da se populacije vrst zaradi sprememb podnebja na nekaterih območjih zmanjšujejo oziroma celo izginejo ali pa se preselijo na nova območja, ki presegajo njihov trenutni areal razširjenosti [85], [86], [124]. Nekatero regionalno podnebno študijo so se zato osredotočile na odziv širših taksonomskih skupin ptic. Jiguet idr. (2010) [87] so proučevali dolgoročne trende 110 gnezdečih vrst ptic po vsej Evropi, da bi opredelili podnebne značilnosti njihovih niš. Gregory idr. (2009) [88] so poiskali

značilen vzorec v medvrstnem nihanju znotraj populacijskih trendov v zadnjih tridesetih letih (potencialne spremembe v rangu razširjenosti). Johnstonova idr. (2013) [86] pa so s pomočjo podnebne modela uspešno napovedali trenutni populacijski trend gnezdečih morskih ptic in vodnih ptic (prezimovalk) v evropskem merilu. Vhodni podatki so pri teh v geografskem merilu obsežnih študijah pogosto pridobljeni iz različni virov in z različnimi metodami z različno prostorsko ločljivostjo. Tudi podnebni trendi se spreminjajo v prostoru in času, ponekod celo kontroveržno, zato je negotovost pri napovedih za večje število vrst ptic (npr. 62 vrst ptic v študiji Johnstonove idr. (2013) [86], 110 vrst v študiji Jigueta idr. (2010) [87] ali 124 vrst v študiji Gregorya idr. (2009) [88]) v širšem geografskem merilu (regionalno, globalno) toliko večja. S tega vidika so ključnega pomena tudi lokalne študije, ki temeljijo na dolgoročnih podatkih v boljši prostorski ločljivosti, s katerimi lahko natančno opredelimo okoljske prediktorje in modeliramo spremembe arealov posameznih vrst. Na ta način je lahko v ospredju proučevanja individualistični oziroma Gleasonov [89] odziv vrst na spreminjajoče se naravne pogoje zaradi podnebnih sprememb [90]–[95] ali njegovo nasprotje, tj. Clementsov odziv združb [96] na spreminjanje okoljskih pogojev. Dandanes na splošno velja prepričanje, da se na podnebne spremembe odzovejo vrste in ne združbe. Stewart (2009) [97] v svoji raziskavi poudarja, da se tudi sesalci odzivajo na podnebne spremembe individualistično.

Raziskovalci skušajo oceniti potencialni vpliv podnebnih sprememb na naravne sisteme z razumevanjem verjetnega premika geografske razporeditve vrst in njihovih ustreznih habitatov v prihajajočem podnebnju [98], [99]. V ta namen so razvili veliko modelov (SDM), tudi za območja z nepopolnimi ali s pristranskimi podatki ter za območja brez podatkov [77], [98], [100], [101]. SDM-ji omogočajo kakovostne kvantitativne napovedi geografske razporeditve vrst in se čedalje bolj uporabljajo za reševanje ekoloških problemov [76], [77], [102]–[104]. Temeljijo na predpostavki, da lahko zvezo med danim vzorcem (npr. številčnost vrst, prisotnost/odsotnost vrst) in nizom okoljskih dejavnikov, ki ga predvidoma nadzorujejo, kvantificiramo [98], [103], [105]–[107]. Raziskovalci so v številnih primerjalnih študijah raziskovali učinkovitost različnih metod za modeliranje geografske porazdelitve vrst [77], [108]–[110] in ugotovili, da so nekatere metode modeliranja bolj učinkovite, nobena pa ne ustreza univerzalni uporabi [111]. Tako smo tudi v naši študiji uporabili dve metodi za modeliranje razširjenosti vrst, da bi učinkovito identificirali potencialno gnezditveno površino za štiri izbrane vrste ptic pod vplivom, s podnebnimi



spremembami pospešenega, dvigovanja morske gladine v KPSS. Primerjali smo Mahalanobisovo tipičnost, novo obetavno metodo, ki uporablja drugačen pristop za razvoj SDM, in model Maksimalne entropije. Slednji spada med že uveljavljene tehnike modeliranja s podatki tipa prisotnost oziroma prisotnost/odsotnost vrste in se zelo pogosto uporablja pri ekoloških študijah [73], [112], [124], saj deluje bolje od ostalih podobnih modelov [77], [108] tudi z majhnimi vzorci [108]. Natančen opis razširjenosti vrst je ključnega pomena za razvoj učinkovitih varstvenih ukrepov [103], [107], [113], [114] še zlasti v zavarovanih območjih. Za vse štiri obravnavane vrste ptic je znano, da je njihov razmnoževalni uspeh strogo povezan s poplavljanjem. Podatki kažejo drastično zmanjšanje populacije navadne čigre v bližnji okolici KPSS, v Beneški laguni [115], zaradi pogostejšega poplavljanja habitata gnezdenja. Scarton (2010) [115] opozarja, da je opaženi trend zmanjšanja populacije posledica dvigovanja povprečne gladine morja v Beneški laguni v zadnjih 20 letih (0,5 cm/leto), ki se je v primerjavi s preteklim obdobjem, tj. 1872 do 2005 (0,2 cm/leto), povečal [115], [116]. Navadne čigre običajno gnezdiijo na muljastih ali peščenih poljih v bazenih opuščeni solin [48], [117], [118]. Safina idr. (1989) [119] so ugotovili, da je strategija gnezdenja navadne čigre na muljastih poljih slanih mokrišč (v primerjavi s peščenimi polji) povezana z zmanjšano nevarnostjo plenjenja s strani sesalcev. V primeru KPSS je razmnoževalni uspeh obravnavanih vrst ptic vseeno bolj odvisen od frekvence poplavljanja in količine padavin (neurja in nalivi) v obdobju gnezdenja. Tudi mala čigra in beločeli deževnik gradita svoja gnezda v bližini vode (zgornje meje plimovanja), na neporaslih ali slabo poraslih površinah, ki so dvignjena do 20 cm nad povprečno gladino morja [49], [120], [124]. Beločeli deževnik velja za tipično gnezditilko odprtih habitatov [121]. V KPSS je najmočnejši prediktor potencialnih gnezditvenih površin beločelega deževnika oddaljenost od antropogenih motenj, kar ni presenetljivo, saj tudi druge študije poročajo o intenzivnem vplivu antropogenih motenj na uspešnost zaroda ptic. Schulz in Stoch (1993) [122] sta ugotovila, da se z vse večjo prisotnostjo turistov na peščenih obalah v Schleswig-Holsteinu zmanjšuje populacija beločelega deževnika. Čeprav geolokacija gnezd polojnika ni v statistično značilni zvezi s prediktorjem oddaljenosti do vode v KPSS, študije dokazujejo [123], da le-ti gradijo večja gnezda v bližini vode (preprečevanje poplavljanja) in manjša gnezda v habitatih, ki so bolj oddaljeni od morja. Žal v naši študiji nismo analizirali premera gnezd, zato v modelu ni upoštevan ta vedenjski protipoplavni gnezditveni vzorec polojnika. Za vse obravnavane vrste v KPSS je zelo pomemben prediktor MWHA, ki združuje habitatni tip in nadmorsko višino. Obravnavane vrste ptic v KPSS zasedajo različne

gnezditvene niše in se lahko na dvigovanje morske gladine odzovejo individualistično. Potencialne gnezditvene površine beločelega deževnik in polojnika se bodo postopoma zmanjševale. Za malo čigro bo do leta 2100 v KPSS dovolj gnezditvenih površin, medtem ko se bo gnezditvena površina navadne čigre celo povečala.

## Zahvale

Študijo so omogočili: Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v sklopu projekta »Dejavniki, ki vplivajo na gozdove jadranskih rjavih alg in rešitve za obnovo habitata« (J1-1702), programska skupina P6-0372 (»Slovenska identiteta in kulturna zavest v jezikovno in etnično stičnih prostorih v preteklosti in sedanjosti«) in programska skupina P1-0164 (»Raziskave za zagotavljanje varne hrane in zdravja«).

## Literatura

- [1] H. Galbraith *idr.*, „Global climate change and sea level rise: potential losses of intertidal habitat for shorebirds“, *Waterbirds*, let. 25, št. 2, str. 173–183, 2002.
- [2] P. R. Evans in P. J. Dugan, „Coastal birds: numbers in relation to food resources“, v *Coastal waders and wildfowl in winter*, P. R. Evans, J. D. Goss-Custard, in W. G. Hale, Ur. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [3] J. D. Goss-Custard, *The oystercatcher: from individuals to populations*. Oxford: Oxford University Press, 1996.
- [4] R. I. G. Morrison, „Maritimes Shorebird Survey 1979, Preliminary Report“, *Canadian Wildlife Service, Ottawa*, 1983.
- [5] J. D. Goss-Custard, „The ecology of the Wash. III. Density-related behaviour and the possible effects of a loss of feeding grounds on wading birds (Charadrii)“, *Journal of Applied Ecology*, št. 14, str. 721–739, 1977.
- [6] J. D. Goss-Custard, „Competition for food and interference among waders“, *Ardea*, št. 68, str. 31–52, 1980.
- [7] J. D. Goss-Custard in M. E. Moser, „Rates of change in the numbers of dunlin, *Calidris alpina*, wintering in British estuaries in relation to the spread of *Spartina anglica*“, *Journal of Applied Ecology*, št. 25, str. 95–109, 1988.
- [8] P. R. Evans in M. W. Pienkowski, „Implications for coastal engineering projects of studies, at the Tees Estuary, on the effects of reclamation of intertidal land on shorebird populations“, *Water Science and Technology*, let. 16, št. 3–4, str. 347–384, 1983.
- [9] P. M. Meire, „Effects of a substantial reduction in intertidal area on numbers and densities of waders“, v *Proceedings of the XX International Ornithological Congress*, Wellington, New Zealand: New Zealand Ornithological Congress Trust Board, 1991, str. 2219–2227.
- [10] G. Fornaciari, „Aspetti floristici e fitosociologici della Laguna di Grado e del suo litorale“, *Atti Accad. Sci. Lett. Arti Udine*, št. 6, str. 5–199, 1968.
- [11] M. Kaligarič, „Rastlinstvo Škocjanskega zatoka-deset let kasneje“, *Falca*, Koper, str. 11–12, 1997.
- [12] M. Kaligarič, „Botanični pregled in možne ureditve naravnega rezervata Škocjanski zatok“, *Ann. Ser. Hist. Nat.*, let. 8, št. 13, str. 131–142, 1998.
- [13] M. Kaligarič in S. Škornik, „Halophile vegetation of the Slovenian seacoast: *Thero-Salicornietea* and *Spartinetea maritima*“, *Hacquetia*, let. 5, str. 25–36, 2006.
- [14] M. Kaligarič in M. Tratnik, *Obranimi Sečoveljske soline*. 1981.

- [15] M. Kaligarič in T. Wraber, „Obmorski lan in klasnata tavžentroža v Sloveniji nista izumrla“, *Proteus*, str. 372–373, 1988.
- [16] S. Pignatti, „La vegetazione alofila della laguna veneta, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Memorie“, *Volume XXXIII-Fascicolo I, Venezia*, str. 174, 1966.
- [17] N. Šajna in M. Kaligarič, „Vegetation of the Stjuža coastal lagoon in Strunjan landscape park (Slovenia): a draft history, mapping and conservation evaluation“, *Ann. Ser. Hist. Nat.*, let. 15, št. 1, str. 79–90, 2005.
- [18] P. R. Evans, „Introductory remarks: habitat loss-effects on shorebird populations“, Wellington, New Zealand, 1991, str. 2197–2198.
- [19] P. R. Evans, „Improving the accuracy of predicting the local effects of habitat loss on shorebirds: lessons from the Tees and Orwell estuary studies“, v *Effects of Habitat Loss and Change on Waterbirds*, let. 30, J. D. Goss-Custard, R. Rufino, in A. Luis, Ur. London: The Stationary Office, 1997, str. 35–44.
- [20] B. J. Eris, J. D. Goss-Custard, in T. P. Weber, „Effects of climate change on bird migration strategies along the East Atlantic Flyway“, Dutch National Research Program on Global Air Pollution and Climate Change, Texel, The Netherlands, Št. poročila: 410 100 075, 1995.
- [21] J. P. Myers in R. Lester, „Conservation of migrating shorebirds: staging areas, geographic bottlenecks, and regional movements“, *American Birds*, let. 37, str. 23–25, 1983.
- [22] IPCC, „Summary for Policymakers: Climate Change 2001. Impacts, Adaptation, and Vulnerability“, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 2001.
- [23] IPCC, „AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report“, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Synthesis Report, 2007. Pridobljeno: 27. februar 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>
- [24] IPCC, „AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014“, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Synthesis Report, 2014. Pridobljeno: 27. februar 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- [25] IPCC, „AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis“, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Synthesis Report, 2021. Pridobljeno: 27. februar 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [26] U.S. EPA, „Probability of sea level rise (EPA 230-R- 95-008)“, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Policy, Planning, and Evaluation, Washington, DC, 1995.
- [27] N. C. Davidson in P. R. Evans, „Mortality of Redshanks and Oystercatchers from starvation during severe weather“, *Bird Study*, let. 29, št. 3, str. 183–188, 1982.
- [28] F. S. Chapin, G. R. Shaver, A. E. Giblin, K. J. Nadelhoffer, in J. A. Laundre, „Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate“, *Ecology*, let. 76, št. 3, str. 694–711, 1995.
- [29] C. Zöckler in I. Lysenko, *Water birds on the edge: First circumpolar assessment of climate change impact on arctic breeding water birds*. Cambridge: World Conservation Monitoring Centre, 2000.
- [30] D. Ogrin, *Modern climate change in Slovenia. Slovenia: a geographical overview*. Ljubljana: Zveza geografov Slovenije, Založba ZRC, 2004.
- [31] Krajski park Sečoveljske soline, „Zgodovina: prostor, ki ga je ustvarila reka“, 2015. <https://www.kpss.si/si/zgodovina> (pridobljeno 9. januar 2015).
- [32] Geodetska uprava Republike Slovenije, „Ortofoto“, 2017. <https://www.e-prostor.gov.si/zbirke-prostorskih-podatkov/topografski-in-kartografski-podatki/ortofoto/> (pridobljeno 1. februar 2022).
- [33] Evropska komisija, Generalni direktorat za okolje, „Interpretation manual of European Union habitats“, 2007. Pridobljeno: 20. december 2011. [Na spletu]. Dostopno na: [https://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/habitatsdirective/docs/2007\\_07\\_im.pdf](https://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/habitatsdirective/docs/2007_07_im.pdf)
- [34] P. Devillers in J. Devillers-Terschuren, „A classification of Palearctic habitats. Council of Europe, Strasbourg“, *Nature and environment*, št. 78, 1996.
- [35] J. Jogan, M. Kaligarič, I. Leskovar, A. Seliškar, in J. Dobravec, *Habitatni tipi Slovenije HTS 2004*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija RS za okolje, 2004.

- [36] C. E. Akumu, S. Pathirana, S. Baban, in D. Bucher, „Examining the potential impacts of sea level rise on coastal wetlands in north-eastern NSW, Australia“, *Journal of Coastal Conservation*, let. 15, št. 1, str. 15–22, 2011.
- [37] J. S. Clough, R. A. Park, in R. Fuller, „SLAMM 6 beta Technical Documentation“. 2010. [Na spletu]. Dostopno na: [http://waconservation.org/dl/dl\\_SLAMM6\\_Technical\\_Documentation.pdf](http://waconservation.org/dl/dl_SLAMM6_Technical_Documentation.pdf)
- [38] D. Gesch, „Analysis of lidar elevation data for improved identification and delineation of lands vulnerable to sea-level rise“, *J Coast Res*, št. 53, str. 49–58, 2009.
- [39] R. K. Runting, K. A. Wilson, in J. R. Rhodes, „Does more mean less? The value of information for conservation planning under sea level rise“, *Glob Chang Biol*, let. 19, št. 2, str. 352–363, 2013.
- [40] GURS, „Geodetska Uprava Republike Slovenije, Ljubljana“, 2010.
- [41] J. B. Adams in G. C. Bate, „Ecological implications of tolerance of salinity and inundation by *Spartina maritima*“, *Aquat Bot*, let. 52, št. 3, str. 183–191, 1995.
- [42] B. F. Atwater, S. G. Conrad, J. N. Dowden, C. W. Hedel, R. L. MacDonald, in W. Savage, „History, landforms, and vegetation of the estuary’s tidal marshes“, v *San Francisco bay: the urbanized estuary*, T. J. Conomos, Ur. San Francisco: Assoc Adv Sci, 1979, str. 347–400.
- [43] A. H. Baldwin in I. A. Mendelssohn, „Response of two oligohaline marsh communities to lethal and nonlethal disturbance“, *Oecologia*, let. 116, št. 4, str. 543–555, 1998.
- [44] M. Marani, C. Da Lio, in A. D’Alpaos, „Vegetation engineers marsh morphology through multiple competing stable states“, *PNAS*, let. 110, št. 9, str. 3259–3263, 2013.
- [45] K. L. McKee in I. A. Mendelssohn, „Response of a freshwater marsh plant community to increased salinity and increased water level“, *Aquat Bot*, let. 34, št. 4, str. 301–316, 1989.
- [46] ESRI, *ArcGIS Desktop: Release 9.3*. Redlands, California: Environmental Systems Research Institute, 2010.
- [47] C. J. Bibby, D. Burgess, in D. A. Hill, *Bird Census technique*. London: Academy Press, 1992.
- [48] I. Skornik, *Faunistični in ekološki pregled ptic sečoveljskih solin: Faunistic and ecological survey of birds in the Sečovelje Salina*. Piranske Soline d.o.o., 2012.
- [49] F. Scarton in R. Valle, „The presence of conspicuous associates protects nesting Redshank *Tringa totanus* from aerial predators“, *Ornis Fennica*, let. 76, št. 3, str. 145–148, 1999.
- [50] BirdLife International, „*Charadrius alexandrinus*“, *IUCN Red List of Threatened Species*, 2012.
- [51] BirdLife International, „*Himantopus himantopus*“, *IUCN Red List of Threatened Species*, 2012. [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org) (pridobljeno 2. april 2014).
- [52] BirdLife International, „*Sterna albifrons*“, *IUCN Red List of Threatened Species*, 2012. [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org) (pridobljeno 2. april 2014).
- [53] B. Stopar *idr.*, „Geodetska dela na novi mareografski postaji Koper“, *Geodetski vestnik*, let. 50, št. 4, str. 609–619, 2006.
- [54] S. Savšek-Safić, T. Ambrožič, in D. Kogoj, „Terestrična izmera mikromreže pri vzpostavitvi mareografske postaje Koper“, *Geodetski vestnik*, let. 51, str. 48–58, 2007.
- [55] ARSO, „Kazalci“, 2015. [http://kazalci.arso.gov.si/xml\\_Preglednica?data=graph\\_Preglednica&graph\\_id=12120&ind\\_id=612](http://kazalci.arso.gov.si/xml_Preglednica?data=graph_Preglednica&graph_id=12120&ind_id=612) (pridobljeno 9. januar 2015).
- [56] B. Ogorelec, M. Mišič, in J. Faganeli, „Marine geology of the Gulf of Trieste (northern Adriatic): Sedimentological aspects“, *Marine Geology*, let. 99, št. 1–2, str. 79–92, jul. 1991, doi: 10.1016/0025-3227(91)90084-H.
- [57] K. Lambeck, F. Antonioli, A. Purcell, in S. Silenzi, „Sea-level change along the Italian coast for the past 10,000yr“, *Quaternary Science Reviews*, let. 23, str. 1567–1598, 2004, doi: 10.1016/j.quascirev.2004.02.009.
- [58] J. A. Church, J. M. Gregory, N. J. White, S. M. Platten, in J. X. Mitrovica, „Understanding and projecting sea level change“, *Oceanography*, let. 24, št. 2, str. 130–143, 2011.
- [59] R Development Core Team, *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Dunaj, Avstrija: R Foundation for Statistical Computing, 2008. [Na spletu]. Dostopno na: <http://www.Rproject.org>

- [60] B. Bayliss *idr.*, *Vulnerability assessment of predicted climate change and sea level rise in the Alligator Rivers Region, Northern Territory Australia*. Canberra: Supervising Scientist Report, 1997.
- [61] J. R. Eastman, *IDRISI Selva*. Worcester: Clark University, 2012.
- [62] GURS, „Geodetska Uprava Republike Slovenije, Ljubljana“, 2013.
- [63] J. Jenness, B. Brost, in P. Beier, *Land Facet corridor Designer*. Arizona Board of Forest Research, 2013. [Na spletu]. Dostopno na: [http://www.jennessent.com/downloads/Land\\_Facet\\_Tools.pdf](http://www.jennessent.com/downloads/Land_Facet_Tools.pdf)
- [64] C. E. Shannon in W. Weaver, *The mathematical theory of communication*. Illinois: University of Illinois Press Champaign, 1963.
- [65] P. S. White in S. T. A. Pickett, „Natural disturbance and patch dynamics: an introduction“, v *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*, S. T. A. Pickett in P. S. White, Ur. New York: Academic Press, 1985, str. 3–13.
- [66] G. L. W. Perry, „Landscapes, space and equilibrium: shifting viewpoints“, *Progress in Physical Geography*, let. 26, št. 3, str. 339–359, 2002.
- [67] R. E. Sherman, T. J. Fahey, in J. J. Battles, „Small-scale disturbance and regeneration dynamics in a neotropical mangrove forest“, *Journal of Ecology*, let. 88, št. 1, str. 165–178, 2000.
- [68] A. S. Watt, „Pattern and process in the plant community“, *Journal of ecology*, let. 35, str. 1–22, 1947.
- [69] P. S. White, „Pattern, process, and natural disturbance in vegetation“, *The botanical review*, let. 45, št. 3, str. 229–299, 1979.
- [70] S. Kumar in T. J. Stohlgren, „Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia“, *Journal of Ecology and the Natural Environment*, let. 1, št. 4, str. 94–98, 2009.
- [71] F. Sangermano in R. Eastman, *Re-defining species range polygons using a GIS*. Graduate School of Geography, Clark Labs, Clark University, 2012. [Na spletu]. Dostopno na: <http://www.mapealo.com/Costaricageodigital/Documents/alfabetizacion/2-046-Eastman-Sangermano.pdf>
- [72] Princeton University, „Maxent (angl. Maximum Entropy Model): version 3.3.3“, *Department of Computer Science at Princeton University*, 2014. <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent> (pridobljeno 10. oktober 2014).
- [73] S. J. Phillips, R. P. Anderson, in R. E. Schapire, „Maximum entropy modeling of species geographic distributions“, *Ecol. Modell.*, let. 190, št. 3–4, str. 231–259, 2006.
- [74] S. J. Phillips *idr.*, „Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data“, *Ecol. Appl.*, let. 19, št. 1, str. 181–197, 2009.
- [75] H. Slater in E. Michael, „Predicting the current and future potential distributions of lymphatic filariasis in Africa using maximum entropy ecological niche modelling“, *PLoS one*, let. 7, št. 2, str. e32202, 2012, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032202>.
- [76] L. H. Thorne *idr.*, „Predictive modeling of spinner dolphin (*Stenella longirostris*) resting habitat in the main Hawaiian Islands“, let. 7, št. 8, str. e43167, 2012, doi: [10.1371/journal.pone.0043167](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043167).
- [77] J. Elith *idr.*, „Novel methods improve prediction of species’ distributions from occurrence data“, *Ecography*, let. 29, št. 2, str. 129–151, 2006.
- [78] J. C. Nabout *idr.*, „Combining multiple models to predict the geographical distribution of the Baru tree (*Dipteryx alata* Vogel) in the Brazilian Cerrado“, *Braz. J. Biol.*, let. 70, št. 4, str. 911–919, 2010.
- [79] J. M. Lobo, A. Jiménez-Valverde, in R. Real, „AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models“, *Global ecology and Biogeography*, let. 17, št. 2, str. 145–151, 2008.
- [80] A. H. Fielding in J. F. Bell, „A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models“, *Environ Conserv.*, let. 24, št. 1, str. 38–49, 1997.
- [81] M. Luoto, J. Pöyry, R. K. Heikkinen, in K. Saarinen, „Uncertainty of bioclimate envelope models based on the geographical distribution of species“, *Global Ecology and biogeography*, let. 14, št. 6, str. 575–584, 2005.

- [82] D. W. Hosmer Jr in S. Lemeshow, *Applied logistic regression*. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- [83] R. G. Pontius in B. Parmentier, „Recommendations for using the relative operating characteristic (ROC)“, *Landscape Ecology*, let. 29, št. 3, str. 367–382, 2014, doi: 10.1007/s10980-013-9984-8.
- [84] D. Ivajnsič in M. Kaligarič, „How to preserve coastal wetlands, threatened by climate change-driven rises in sea level“, *Environmental management*, let. 54, št. 4, str. 671–684, 2014, doi: 10.1007/s00267-014-0244-8.
- [85] V. Devictor *idr.*, „Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale“, *Nature climate change*, let. 2, št. 2, str. 121–124, 2012.
- [86] A. Johnston *idr.*, „Observed and predicted effects of climate change on species abundance in protected areas“, *Nature Climate Change*, let. 3, št. 12, str. 1055–1061, 2013, doi: 10.1038/NCLIMATE2035.
- [87] F. Jiguet, V. Devictor, R. Ottvall, C. Van Turnhout, H. Van der Jeugd, in Å. Lindström, „Bird population trends are linearly affected by climate change along species thermal ranges“, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, let. 277, št. 1700, str. 3601–3608, 2010, doi: 10.1098/rspb.2010.0796.
- [88] R. D. Gregory *idr.*, „An indicator of the impact of climatic change on European bird populations“, *PloS one*, let. 4, št. 3, str. e4678, 2009, doi: 10.1371/journal.pone.0004678.
- [89] H. A. Gleason, „The individualistic concept of the plant association“, *Bulletin of the Torrey botanical club*, let. 53, št. 1, str. 7–26, 1926.
- [90] Faunmap Working Group, „Spatial response of mammals to Late Quaternary environmental fluctuations“, *Science*, št. 272, str. 1601–1606, 1996.
- [91] R. W. Graham, „Diversity and community structure of the late Pleistocene mammal fauna of North America.“, *Acta Zoologica Fennica*, let. 170, str. 181–192, 1985.
- [92] R. W. Graham, „Response of mammalian communities to environmental changes during the late Quaternary“, v *Community Ecology*, J. Diamond in T. J. Case, Ur. New York: Harper and Row Publishers, 1985, str. 300–313.
- [93] D. Jablonski in J. J. Sepkoski Jr, „Paleobiology, community ecology, and scales of ecological pattern“, *Ecology*, let. 77, št. 5, str. 1367–1378, 1996.
- [94] J. W. Williams in S. T. Jackson, „Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises“, *Frontiers in Ecology and the Environment*, let. 5, št. 9, str. 475–482, 2007.
- [95] J. W. Williams, B. N. Shuman, in T. Webb, „Dissimilarity analyses of late-Quaternary vegetation and climate in eastern North America“, *Ecology*, let. 82, št. 12, str. 3346–3362, 2001.
- [96] F. E. Clements, „The development and structure of vegetation. Botanical Seminar VII. Studies in the Vegetation of the State III“, Lincoln, Nebraska, 1904.
- [97] J. R. Stewart, „The progressive effect of the individualistic response of species to Quaternary climate change: an analysis of British mammalian faunas“, *Quaternary Science Reviews*, let. 27, str. 2499–2508, 2009.
- [98] K. Garcia, R. Lasco, A. Ines, B. Lyon, in F. Pulhin, „Predicting geographic distribution and habitat suitability due to climate change of selected threatened forest tree species in the Philippines“, *Applied Geography*, let. 44, str. 12–22, 2013.
- [99] E. Martinez-Meyer, „Climate change and biodiversity: some considerations in forecasting shifts in species’ potential distributions“, *Biodiversity Informatics*, let. 2, str. 42–45, 2005.
- [100] M. B. Araujo in A. Guisan, „Five (or so) challenges for species distribution modelling“, *Journal of biogeography*, let. 33, št. 10, str. 1677–1688, 2006.
- [101] Y. Trisurat, R. P. Shrestha, in R. Kjelgren, „Plant species vulnerability to climate change in Peninsular Thailand“, *Applied Geography*, let. 31, št. 3, str. 1106–1114, 2011.
- [102] A. Guisan in W. Thuiller, „Predicting species distribution: offering more than simple habitat models“, *Ecology letters*, let. 8, št. 9, str. 993–1009, 2005, doi: 10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x.
- [103] A. Guisan in N. E. Zimmermann, „Predictive habitat distribution models in ecology“, *Ecological modelling*, let. 135, št. 2–3, str. 147–186, 2000.
- [104] A. C. Yost, S. L. Petersen, M. Gregg, in R. Miller, „Predictive modeling and mapping sage grouse (*Centrocercus urophasianus*) nesting habitat using Maximum Entropy and a long-term

- dataset from Southern Oregon“, *Ecological Informatics*, let. 3, št. 6, str. 375–386, 2008, doi: 10.1016/j.ecoinf.2008.08.004.
- [105] R. P. Anderson, D. Lew, in A. T. Peterson, „Evaluating predictive models of species’ distributions: criteria for selecting optimal models“, *Ecological modelling*, let. 162, št. 3, str. 211–232, 2003.
- [106] R. P. Anderson in E. Martinez-Meyer, „Modeling species’ geographic distributions for preliminary conservation assessments: an implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador“, *Biological conservation*, let. 116, št. 2, str. 167–179, 2004.
- [107] C. J. Raxworthy *idr.*, „Predicting distributions of known and unknown reptile species in Madagascar“, *Nature*, let. 426, str. 837–841, 2003.
- [108] P. A. Hernandez, C. H. Graham, L. L. Master, in D. L. Albert, „The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods“, *Ecography*, let. 29, št. 5, str. 773–785, 2006.
- [109] P. Segurado in M. B. Araujo, „An evaluation of methods for modelling species distributions“, *J Biogeogr*, let. 31, št. 10, str. 1555–1568, 2004.
- [110] A. Tsoar, O. Allouche, O. Steinitz, D. Rotem, in R. Kadmon, „A comparative evaluation of presence-only methods for modelling species distribution“, *Divers Distrib.*, let. 13, št. 4, str. 397–405, 2007, doi: 10.1111/j.1472-4642.2007.00346.x.
- [111] P. A. Hernandez *idr.*, „Predicting species distributions in poorly-studied landscapes“, *Biodiversity Conserv*, let. 17, št. 6, str. 1353–1366, 2008.
- [112] S. J. Phillips in M. Dudík, „Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation“, *Ecography*, let. 31, št. 2, str. 161–175, 2008.
- [113] J. Buse, B. Schröder, in T. Assmann, „Modelling habitat and spatial distribution of an endangered longhorn beetle—a case study for saproxylic insect conservation“, *Biol Cons*, let. 137, št. 3, str. 372–381, 2007, doi: 10.1016/j.biocon.2007.02.025.
- [114] C. H. Graham, S. Ferrier, F. Huetteman, C. Moritz, in A. T. Peterson, „New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis“, *Trends Ecol Evol*, let. 19, št. 9, str. 497–503, 2004.
- [115] F. Scarton, „Long term decline of a Common Tern (*Sterna hirundo*) population nesting in salt marshes in Venice lagoon, Italy“, *Wetlands*, let. 30, št. 6, str. 1153–1159, 2010.
- [116] M. Ferla, M. Cordella, L. Michielli, in A. Rusconi, „Long-term variations on sea level and tidal regime in the lagoon of Venice“, *Estuar Coast Shelf Sci*, let. 75, št. 1–2, str. 214–222, 2007.
- [117] I. Škornik, „Navadna čigra *Sterna hirundo* gnezdi v Sečoveljskih solinah“, *Acrocephalus*, let. 4, št. 16, str. 32–33, 1983.
- [118] I. Škornik, T. Makovec, in L. Lipej, *Sečovelje salina-an ornithological assessment of a Slovene coastal wetland*. 1995.
- [119] C. Safina, D. Witting, in K. Smith, „Viability of salt marshes as nesting habitat for common terns in New York“, *The Condor*, let. 91, št. 3, str. 571–584, 1989.
- [120] I. Škornik, „Mala čigra *Sterna albifrons* gnezdi v Sečoveljskih solinah“, *Acrocephalus*, let. 6, št. 26, str. 55–56, 1985.
- [121] S. Cramp in K. E. L. Simmons, *The birds of the Western Palearctic*, vol. 3. Oxford: Oxford University Press, 1983.
- [122] R. Schulz in M. Stock, „Kentish Plovers and tourists: competitors on sandy“, *Wader Study Group Bulletin*, let. 68, str. 83–91.
- [123] J. J. Cuervo, „Nest-site selection and characteristics in a mixed-species colony of Avocets *Recurvirostra avosetta* and Black-winged Stilts *Himantopus himantopus*“, *Bird Study*, let. 51, št. 1, str. 20–24, 2004.
- [124] Danijel, Ivajnsič. 2015. „*Prostorsko-časovne premene habitatov obmorskih mokerišč kot posledica primarne sukcesije in dvigovanja morske gladine*“. Doktorska dizertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija





# KRČENJE MORSKIH TRAVNIKOV V SLOVENSKEM MORJU ZARADI VPLIVA PODNEBNIH SPREMEMB IN DRUGIH POSREDNIH DEJAVNIKOV

LOVRENC LIPEJ,<sup>1</sup> BORUT MAVRIČ,<sup>1</sup> DOMEN TRKOV,<sup>1</sup>  
MARTINA ORLANDO-BONACA,<sup>1</sup> DANIJEL IVAJNSIČ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Morska biološka postaja, Nacionalni inštitut za biologijo, Piran, Slovenija  
lovrenc.lipej@nib.si, borut.mavric@nib.si, domen.trkov@nib.si,  
martina.orlando@nib.si

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Maribor, Slovenija  
dani.ivajnsic@um.si

<sup>3</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija  
dani.ivajnsic@um.si

**Sinopsis** V zadnjih desetletjih smo pričča postopnemu izginjanju morskih travnikov na globalnem nivoju, pri čemer naj bi se njihova površina skrčila za tretjino. Tudi v slovenskem delu Jadrana prihaja do krčenja morskih travnikov, glavne vzroke za to moramo pripisati dejavnikom, kot so plovne poti in pristaniške dejavnosti, poglobljanje morskega dna, komercialne in rekreacijske dejavnosti, kot sta ribolov in privezovanje, odtekanje vode z urbanih in kmetijskih območij, v zadnjem času tudi vse intenzivnejše podnebne spremembe in kisanje oceanov. V pričujoči publikaciji predstavljamo rezultate kartiranja morskih travnikov v Krajinskem parku Strunjan, kjer je bilo v zadnjih letih, zlasti od leta 2018, opaženo obsežno upadanje. Ob tem razpravljamo o dejavnikih, ki vplivajo na razširjenost in regresijo morskih travnikov. Uporaba digitalnih ortofoto posnetkov in satelitskih podob (daljinsko zaznavanje) sta se izkazali za obetavni metodi, ki sta omogočili ugotavljanje prostorskih sprememb v času. Na predelih notranjega dela Strunjanskega zaliva so se travniki kolenčaste cimodoceje (*Cymodocea nodosa*) skrčili za več kot 80 % površine iz leta 2017. Upoštevanje pokrovnost morskih travnikov v celotnem slovenskem morju se je ta v letih od 2017 do 2018 zmanjšala za približno dobro petino.

## Ključne besede

morski travniki,  
*Cymodocea nodosa*,  
izginjanje,  
kartiranje,  
podnebne  
spremembe

# SHRINKAGE OF SEAGRASS MEADOW COVERAGE IN THE SLOVENIAN SEA AS AN EFFECT OF CLIMATE CHANGE AND OTHER INDIRECT FACTORS

LOVRENC LIPEJ,<sup>1</sup> BORUT MAVRIČ,<sup>1</sup> DOMEN TRKOV,<sup>1</sup>  
MARTINA ORLANDO-BONACA,<sup>1</sup> DANIJEL IVAJNSIČ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Marine Biology Station Piran, National Institute of Biology, Piran, Slovenia  
lovrenc.lipej@nib.si, borut.mavric@nib.si, domen.trkov@nib.si,  
martina.orlando@nib.si

<sup>2</sup> University of Maribor, Faculty of Arts, Maribor, Slovenia  
dani.ivajnsic@um.si

<sup>3</sup> University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor,  
Slovenia  
dani.ivajnsic@um.si

**Abstract** In recent decades, we have witnessed the gradual disappearance of seagrass meadows on a global scale, with their area expected to shrink by a third. Seagrass meadows are also shrinking in the Slovenian part of the Adriatic Sea. The main reasons for this are attributed to factors such as waterways and port activities, seabed deepening, commercial and recreational activities such as fishing and mooring, runoff from urban and agricultural areas and, more recently, increasing climate change and ocean acidification. In the present publication, we present the results of mapping seagrass meadows in the Strunjan Landscape Park, where a significant decline has been observed in recent years, especially in 2018. In addition, we discuss the factors determining the occurrence and regression of seagrass meadows. The use of digital ortho-photo images of satellite imagery (remote sensing) has proven to be a promising method to identify spatial changes over time. In areas of the inner part of Strunjan Bay, *Cymodocea nodosa* meadows have shrunk by more than 80% of the 2017 area. Considering the coverage of seagrass meadows in the entire Slovenian Sea, it decreased by about one-fifth between 2017 and 2018.

**Keywords:**

seagrass meadows,  
*Cymodocea nodosa*,  
disappearance,  
mapping, climate  
change

## 1 Uvod

Morski travniki so med najbolj produktivnimi okolji v morjih in oceanih [1], [2]. So izjemnega pomena, saj nudijo bivalne niše, hrano in zavetje pred plenilci mnogim pomembnim organizmom v lagunskih in morskih ekosistemih [3]. Ta zelo produktivna okolja zelo pomembna za dobrobit človeka [4], [5], saj zagotavljajo številne ekosistemske storitve, kot so umirjanje delovanja valov s posledično zaščito obale pred erozijo, [6], stabilizacija sedimentov [7], [8], urejanje ciklov hranil in sekvestracija ogljika [9], čiščenje morske vode [10] ter predstavljajo sistem za izobraževanje in raziskave [11]. Ob tem so to kritična območja za mnoge vrste tarčnih morskih organizmov z vidika ribištva, še posebej kot zatočišča ribjih mladice [12]. Zaradi navedenega so jih vključili med prioritete habitate v številnih pravnih regulativah, vključno z evropsko habitatno direktivo [13].

Morski travniki so torej bolj ali manj morski ekvivalent tropskih deževnih gozdov, njihovo zdravje pa je povezano z različnimi vrstami antropogenih pritiskov. Glavni stresni dejavniki vključujejo plovne poti in pristaniške dejavnosti, poglobljanje morskega dna, komercialne in rekreacijske dejavnosti, kot sta ribolov in privezovanje, odtekanje vode z urbanih in kmetijskih območij, v zadnjem času tudi vse intenzivnejše podnebne spremembe in kisanje oceanov [14]–[20]. V zadnjih desetletjih se morski travniki povsod po svetu soočajo z drastičnim krčenjem z ocenjeno hitrostjo 2–5 % leto<sup>-1</sup> [2], [21]–[23], predvsem v obalnih območjih [19], [24]–[27]. Poročajo, da je z vidika pokrovnosti tretjina morskih travnikov na planetu že izginila [28], [29].

Na svetu živi 72 vrst različnih morskih cvetnic iz 6 družin in pripadajočih 14 rodovom [30]. V evropskih morskih vodah uspevajo štiri avtohtone vrste morske trave: *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile, *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson, *Zostera marina* Linnaeus in *Zostera noltei* Hornemann [31]. Vse štiri so prisotne tudi v severnem Jadranu in v slovenskem morju. V pričujoči publikaciji predstavljamo rezultate kartiranja morskih travnikov v Krajinskem parku Strunjan, kjer je bilo v zadnjih letih, zlasti od leta 2018 naprej, opaženo obsežno upadanje. Ob tem razpravljamo o dejavnikih, ki vplivajo na razširjenost in regresijo morskih travnikov. Naši rezultati so ključni za prepoznavanje možnih virov vpliva na stanje morskih travnikov, za razvoj strategij celostnega prostorskega načrtovanja v Tržaškem zalivu

in kot izhodišče za prihodnje dejavnosti spremljanja in obnove na območjih, kjer je obseg morskih travnikov že upadel.

## 2 Metode

### 2.1 Raziskave biodiverzitete v Krajinskem parku Strunjan

Na podlagi florističnih in favnističnih argumentov, geoloških značilnosti in krajinske vrednosti [32] so območje lagune Stjuže, pretočne lagune, strunjanskih solin in obrežnega morja v smeri proti Izoli leta 1990 razglasili za Krajinski park Strunjan. Območje je bilo predmet ekoloških raziskav že pred razglasitvijo. Prve so potekale že davnega leta 1973, ko so Avčin idr. (1973) [33] opravili obsežen pregled flore, favne, vegetacije ter spremljajočih ekoloških dejavnikov strunjanske Stjuže in bližnjih solin. Sicer je bilo okolju strunjanske lagune Stjuže in bližnje okolice (navzlic dejstvu, da gre za eno od dveh lagun oziroma specifičnih življenjskih okolij v Sloveniji) posvečeno le malo pozornosti s strani raziskovalcev, bistveno manj kot npr. drugi deli v okviru Krajinskega parka Strunjan. Intenzivna raziskovanja morske biodiverzitete so se v območju parka pričele leta 1998 s popisi biodiverzitete na nivoju favne morskih nevretenčarjev in rib, popisa flore in vegetacije ter popisa habitatnih tipov. Strunjanska Stjuža je bila vnovič inventarizirana trideset let kasneje z obsežnimi vzorčenji [34]. Zadnja inventarizacija lagune Stjuže, pretočne lagune in bližnjih predelov je bila opravljena leta 2019 [35].

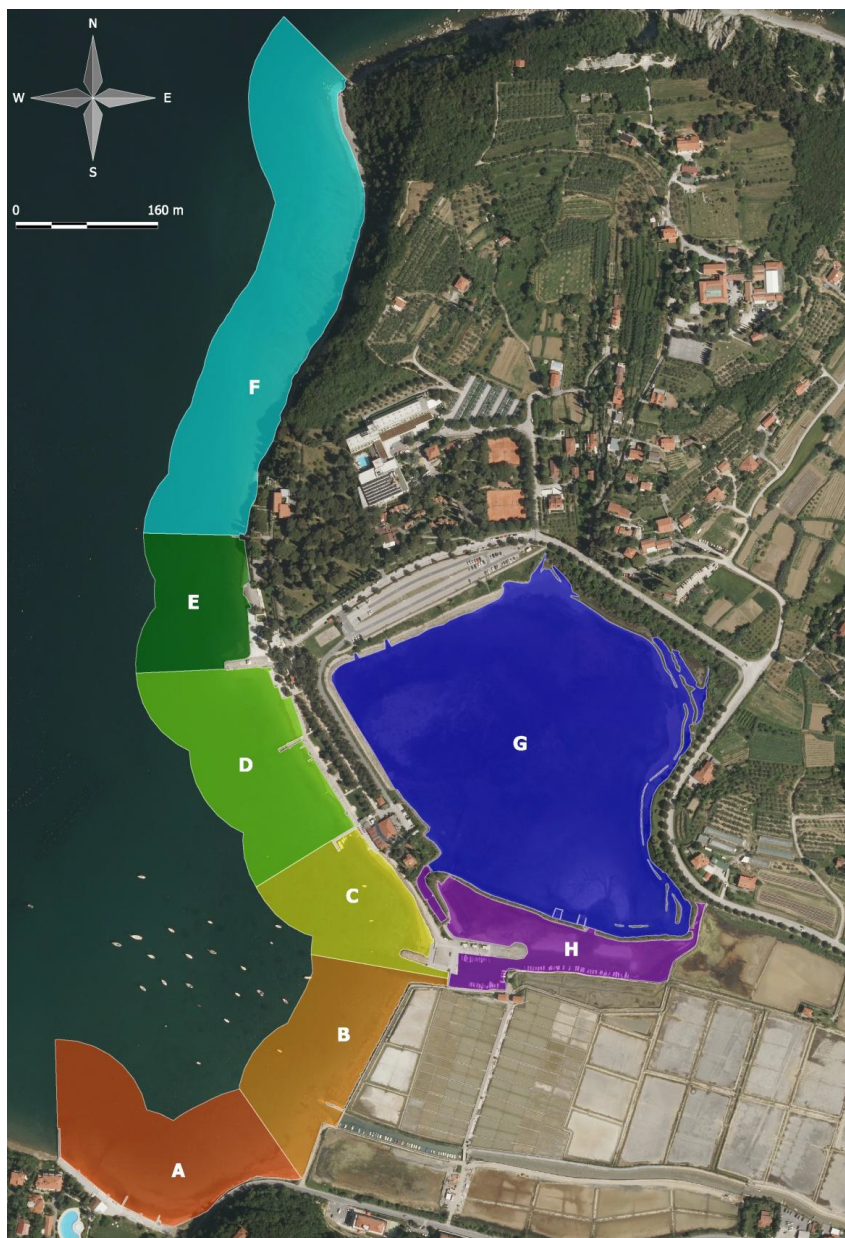
Omenjene raziskave so pokazale, da se lagunsko okolje v Strunjanu sooča z različnimi posrednimi in neposrednimi vplivi, med drugim tudi zaradi podnebnih sprememb. Tako je bilo v Pretočni laguni in Stjuži potrjeno 19 vrst tujerodnih organizmov, ki so v največji meri povezani s pomorskim prometom kot vektorjem vnosa [35]. Pitacco idr. (2017) [36] so skušali ekološko ovrednotiti laguno Stjužo z uporabo biotskih indeksov in jo primerjati z drugimi podobnimi obmorskimi okolji v Sloveniji.

Kolenčasta cimodoceja (*C. nodosa*) je morska cvetnica, ki raste na sedimentnem dnu in tvori morske travnike. Ti so v slovenskem morju prisotni povsod na sedimentnem dnu v globinskem razponu od 1 do 11 m globine. Je najpogostejša vrsta morskih trav v slovenskem morju [37], ob tem je od drugih tudi manj občutljiva. Čeprav je za cimodocejo značilno, da premore veliko fenotipsko plastičnost in je na okoljske

strese, ki jih povzročajo naravni in antropogeni dejavniki, prilagojena z različnimi fiziološkimi in morfološkimi prilagoditvami, se v zadnjih desetletjih soočamo s krčenjem morskih travnikov te vrste na več predelih Sredozemskega morja in Atlantika [38], [39].

Krajinski park Strunjan (KPS) je širše zavarovano območje v Sloveniji, ki vključuje tudi dvestometerski pas obalnega morja (zaščitenega tudi v sklopu Naravnega rezervata Strunjan) in celoten Strunjanski zaliv do Pacuga. Tudi območje lagune Stjuža je pomemben del Naravnega rezervata Strunjan, ki je vključeno v omrežje Natura 2000.

Stjuža je večinoma zelo plitva laguna (Sliki 1G in 2G). Ob najnižji oseki se nekateri njeni predeli prikažejo na plan. Nekoč je bila neposredno povezana z morjem kot odprt zaliv, danes je povezana le s pretočnim kanalom, ki ga imenujemo Pretočna laguna (Sliki 1H in 2H). Na prehodu s Pretočno laguno je globina tudi več kot 5 metrov. Pretočna laguna je podolgovato vodno telo, ki je prek ustja povezano z morjem. Gre za plitvo okolje, ki kaže prehodni habitat iz morja v laguno Stjužo. Le ob večjem prehodu v laguno Stjuža je lahko globina tudi do 3 m. Ob izgradnji ribiškega pristanišča pred nekaj leti se je to okolje soočilo z velikimi spremembami. Izlivni del Pretočne lagune je okolje (Slika 1C), kjer so razmere bolj ali manj enake kot v neposredni morski okolici. To je tudi edini del obravnavanega območja, ki se redno sooča z obremenitvami, kot so pomorski promet in ribiške aktivnosti. Strunjanske soline so najmanjše še delujoče soline v Sloveniji. Večji del ob morju so pred evaporacijski bazeni, ki so že dlje časa opuščeni. V takem okolju prebivajo le najbolj ekološko trpežne vrste, kot so ribe solinarke (*Aphanius fasciatus*). Na robu solin v smeri Salinere je večji solinski bazen, ki so ga Avčin idr. (1973) [33] poimenovali mala laguna. Obrežni del morja KPS predstavljajo predeli s peščenim dnom ali mivko (predela A, B in E), kamnitim dnom iz pretežno večjih prodnikov (predela C in D). Predel od pomola v smeri proti Izoli (F) je največji in ga do 2 m globine tvorijo večji kamni, nato pa preide v peščeno dno.



Slika 1: Ožje območje Krajinskega parka Strunjan. Legenda: A – predel Salinera, B – predel pred strunjanskimi solinami, C – Lambada, D – glavna plaža, E – Villa Tartini, F – Villa Tartini/rtič Strunjan, G – laguna Stjuža in H – pretočna laguna. Podlaga: ortofoto posnetki [40]

Vir: lasten.



Slika 2: Predeli obravnavanega območja znotraj Krajinskega parka. Glej Preglednico 1 za natančno razmejitev posameznih delov akvatorija. Legenda: A – predel Salinera, B – strunjanske soline, C – Lambada, D – glavna plaža, E – Villa Tartini, F – Villa Tartini/rtič Strunjan, G – laguna Stjuža in H – pretočna laguna (lastni posnetki z dronom). Posnetki A; E, F in G izvirajo iz Google Earth [41], posnetki B, C, D in H so bili opravljene z dronom oktobra 2018

Vir: lasten.

## 2.2 Metodološki pristop v raziskovanju stanja in razširjenosti morskih travnikov

Na obravnavanih predelih so bila opravljena podvodna vzorčenja morskih travnikov. Poseben poudarek je namenjen ugotavljanju možnih anoksičnih razmer, možnih dokazov o učinku pašnih organizmov (grazing) in preverjanju stanja korenin in koreninskih delov morske trave kolenčaste cimotoceje. Posebno pozornost smo namenili ugotavljanju obsega zasipavanja morskih travnikov in ugotavljanju razsežnosti pojava v globinski smeri. Ob tem smo fotografirali in posneli stanje. Nadalje smo preverili možne razlike in podobnosti v okolju morskih travnikov na podlagi vzorčenj v drugih okoljih slovenskega obalnega morja.

Ob lastnih posnetkih, pridobljenih z dronom, smo na Geodetski upravi RS (GURS) pridobili ortofoto posnetke obravnavanega območja za časovna okna 2009, 2012, 2014 in 2017. Za leti 2012 in 2014 smo uporabili infrardeče ortofoto posnetke DOF50IR. Za leto 2018 smo pridobili visoko ločljivostni (0,5 m) Google Earth satelitsko podobo obravnavanega območja s pomočjo odprtokodnega orodja SAS Planet (<https://www.openhub.net/p/sasplanet>). Razsežnost pojava izgube morskih travnikov smo ocenili v izgubi deleža pokrovnosti (%), pri čemer smo za izhodišče uporabil izrise morskih travnikov, ki jih je na podlagi sonarskih meritev opravilo podjetje Harpha Sea (2014).

Da smo prišli do zelenih rezultatov, smo izvedli naslednje metodološke korake:

- (1) vse pridobljene ortofoto posnetke in satelitsko podobo smo prostorsko poenotili in združili (mozaičili), pri čemer smo uporabljali državni koordinatni sistem D96TM in geodatabase obliko podatkovnega zapisa;
- (2) za vsako časovno okno smo vse spektralne kanale (vidna svetloba [2009, 2014, 2017 in 2018] in bližje infrardeča svetloba [2012 in 2014]) tako ortofoto kot satelitske podobe transformirali s pomočjo analize glavnih komponent (PCA);
- (3) nato smo izračunane ne korelirane spektralne kanale posameznega časovnega okna uporabili za nenadzorovano klasifikacijo podob (*ang. unsupervised classification*) z isocluster metodo razvrščanja;
- (4) uspešnost klasifikacije smo preverili na podlagi referenčnih podatkov digitalnega zemljevida morskih travnikov iz leta 2014 (HARFA) ter statistike



- podobnosti slik (Kappa indeks  $> 0,8$ ) in nato postopek ponovili za vsako preostalo časovno okno (2009, 2012, 2017 in 2018);
- (5) s pomočjo ustrezno identificiranih slikovnih enot podob (pikslov velikosti 0,5 m), ki so kazali razširjenost morskih travnikov v posameznem časovnem oknu, smo ocenili njihovo površino na ciljnem območju z več kot 80 % natančnostjo (Kappa indeks  $> 0,8$ );
  - (6) za prikaz relativnih sprememb (%) v pokrovnosti morskih travnikov med posameznimi časovnimi okni smo izračunali tudi verižne indekse ((časovno okno 2012/časovno okno 2009)\*100 itd.), ki so prikazani v Preglednici 5.
  - (7) Dobljene rezultate smo grafično in kartografsko prikazali s pomočjo odprtokodne GIS aplikacije QGIS [42].

### 3 Rezultati in razprava

#### 3.1 Stanje travnikov pred 2018

Pred letom 2018 so bili morski travniki kolenčaste cimodoceje razširjeni prav v vseh obravnavanih predelih KPS (glej Preglednico 1 in Sliko 3). To velja tako za obrežni pas kot tudi za obe laguni (Slika 4). Samo v letu 2017 so vidne v obrežnem pasu manjše jase brez vegetacije, ki jih v letih predtem ni bilo. Z bionomskega vidika so se morski travniki med seboj tudi razlikovali, saj so tisti iz pretočne lagune in Stjuže element evrihaline in evritermne biocenoze, v Salineri in notranjem delu strunjanskega zaliva element biocenoze površinskih muljastih peskov v zavetnih legah, na območju Mesečevega zaliva pa v nekaterih delih element biocenoze dobro kalibriranih finih peskov. Tudi sicer je bilo ekološko stanje po Okvirni vodni direktivi [43] cimodoceje na dveh lokalitetah znotraj KPS ocenjeno kot Zelo dobro in Dobro [16].

#### 3.2 Stanje travnikov po 2018

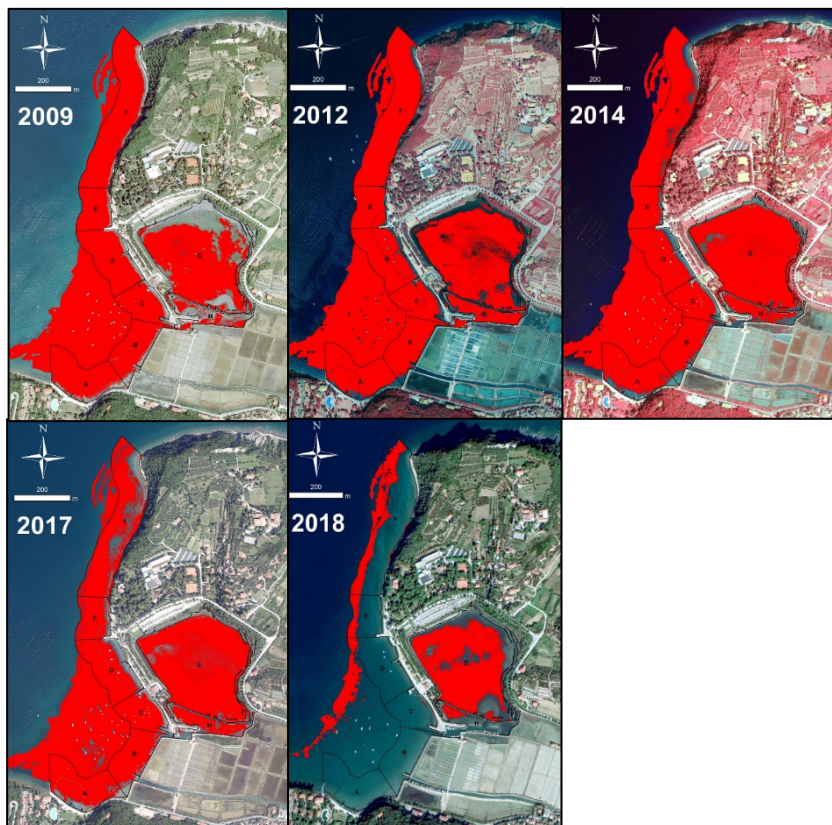
Analiza pokrovnosti morskih travnikov kolenčaste cimodoceje v daljšem obdobju je pokazala, da so vsi obravnavani predeli znotraj KPS v desetletnem obdobju doživeli znatne spremembe (Preglednica 1). Čeprav je ta vrsta z ekološkega vidika znatno bolj trpežna od drugih vrst trav, se na območju KPS sooča z nekaterimi dejavniki, ki jo ogrožajo do te mere, da se je pokrovnost njenih travnikov ( $m^2$ ) znatno zmanjšala ali pa so le-ti povsem izginili. Na obravnavanem območju je tako prišlo

do skoraj popolnega izginotja morskih travnikov. Kot možni vzrok smo identificirali več dejavnikov. Stanje je najslabše na predelu med Salinero (A) in solinami (B). Oba predela sta povsem zasipana s sedimentom, ob tem prihaja do resuspenzije, in s tem povezano motnostjo, kar vpliva na kakovost vode in obenem tudi na življenjske razmere za morske cvetnice. Izkazalo se je, da povzročča zasipavanje cimodoceje povečano smrtnost posameznih šopov, povečano navpično rast (do 4 cm zakopanih – zasipanih primerkov) in povečano nožnico (do 4 cm zakopanih – zasipanih primerkov) ter povečano rast najmanjšega internodija [44]. Pri zasipavanju > 13 cm avtorji navajajo, da je smrtnost 100 %. Tudi obe laguni se soočata s krčenjem morskih travnikov kolenčaste cimodoceje. Še posebej drastične spremembe so očitne v pretočni laguni, kjer so se morski travniki cimodoceje skrčili za več kot 80 % (Preglednica 6) v primerjavi z letom 2009. Tudi v tem primeru lahko krčenje povežemo z depozicijo sedimenta, ki je nastala pri izgradnji ribiškega pristanišča in obnove zahodne lagunske brežine. Če primerjamo površino morskih travnikov med letoma 2017 in 2018, so izgube zelo drastične (Slika 3). Na predelih notranjega dela zaliva (A, B in C) so se travniki cimodoceje skrčili za več kot 80 % površine iz leta 2017. Na predelih E, F in v pretočni laguni (H) pa se je travnik skrčil za približno polovico. V Stjuži znaša ta izguba približno petino izgubljenega travnika v primerjavi z letom poprej.

Ob tem je iz zemljevida očitno (Slika 3), da je degradacija in izguba travnikov najbolj očitna v priobalnem pasu, saj se je v vseh raziskanih predelih ohranil ozek pas travnika le daleč od obale.

**Preglednica 1: Ocenjena površina (m<sup>2</sup>) morskih travnikov po posameznih enotah znotraj Krajinskega parka**

Predel	2009	2012	2014	2017	2018
A	26.991	28.133	25.934	25.755	169
B	20.336	22.227	20.414	20.164	1
C	15.955	16.496	15.868	15.602	70
D	27.772	28.027	26.088	24.567	1.605
E	15.729	16.541	15.663	14.315	4.396
F	52.436	57.350	52.171	43.434	15.344
G	71.384	85.506	97.993	95.849	71.880
H	6.196	12.144	9.705	10.290	2.267

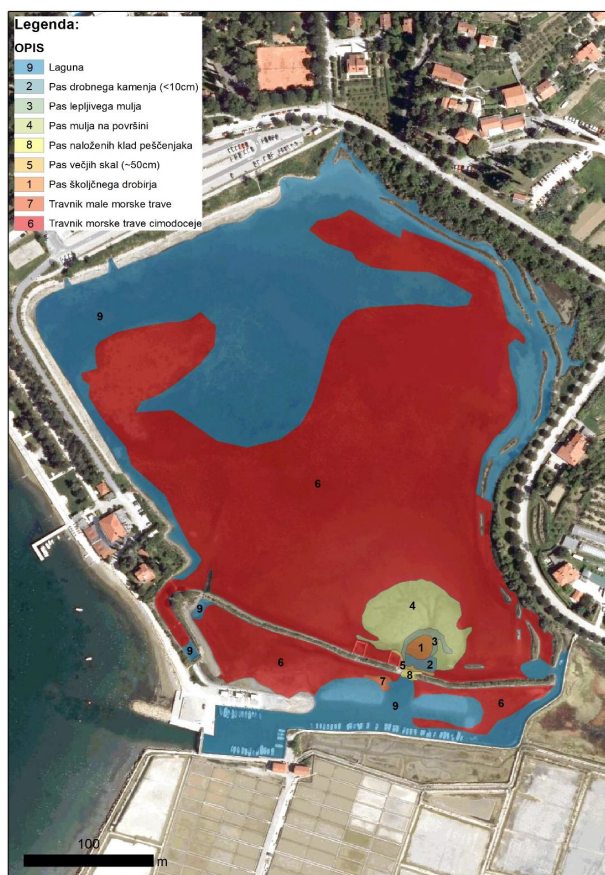


Slika 3: Razširjenost in pokrovnost morskih travnikov kolenčaste cimodoceje znotraj obravnavanega območja po posameznih predelih (A–H) in v različnih letih (2009, 2012, 2014, 2017 in 2018). Za razmejitev posameznih predelov glej Preglednico 1. Podlaga: ortofoto posnetki [40] in posnetki Google Maps [41]

Vir: lasten.

Če lahko zasipavanje oziroma nalaganje sedimenta na teh predelih povezujemo z obnovo kanala Roja, je krčenje travnikov v drugih predelih težje razložiti. Med ustjem in nekdanjo restavracijo Lambado (C) je zelo ozek pas morskega travnika cimodoceje, ki se pojavlja na globini okoli 1 m. V drugih predelih je stanje podobno, vendar prekriva morsko dno znatno manjša količina nanesenega sedimenta. Na obravnavanem območju med Pacugom in rtičem Strunjan se posamezne zaplate morske trave pojavljajo le pred Vilo Tartini in proti rtiču Strunjan na globini od 1 do 3 m. Ne gre za sklenjeni morski travnik, ampak habitatni tip, ki meji na številne

peščine – ostanki nekdanjega morskega travnika. Šopi cimodoceje so tukaj nizki in v slabem stanju, ob tem so tudi prekriti z gosto sluzasto prevleko. Na območju med Villo Tartini in rtičem Strunjan je takih zaplat še več, vendar je njihovo stanje slabo. V globini od 4 do 6 m se pojavlja manjši morski travnik male morske trave (*Z. nolte*), ki je dobro razvit. Sklenjene morske travnike cimodoceje tako najdemo na skrajnem robu predela Rtič Strunjan (F) in v laguni Stjuži (G) (Slika 4). Pri tem noramo omeniti, da v Stjuži travnik ne pokriva lagune v celoti, ampak se ponekod pojavljajo večje jase brez vegetacije. V pretočni laguni je morski travnik razvit v nekdanjem iztoku Stjuže v pretočno laguno in v obliki podolgovate zaplate na meji z ribiškim pristaniščem (Slika 4).



Slika 4: Zemljevid morskih habitatnih tipov v laguni Stjuža in v Pretočni laguni na podlagi podvodnih popisov in digitalnih ortofoto posnetkov iz leta 2018 [40]

Vir: lasten.

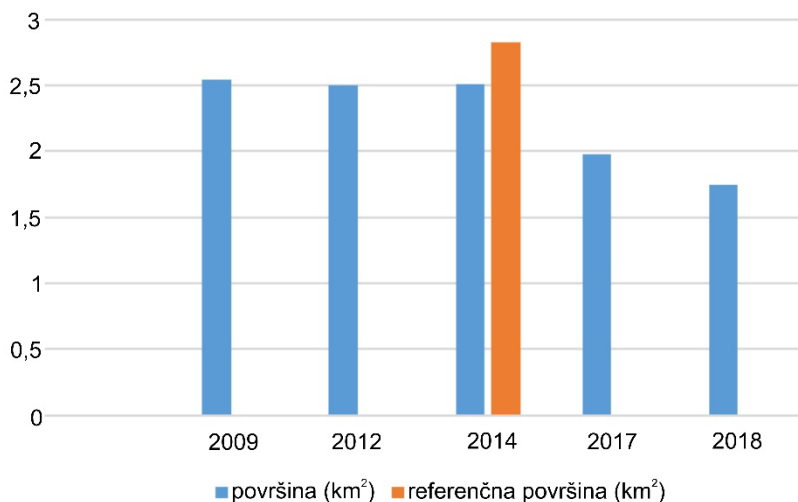
Eden od dejavnikov, za katerega je znano, da je v preteklosti pripomogel k masovnim poginom oziroma degradaciji in izginotju morskih travnikov, so bolezn. Tako je v tridesetih letih prejšnjega stoletja vrsta *Zostera marina* povsem izginila vzdolž atlantskih obal zaradi infekcije z morskim protistom *Labyrinthula zosterae* [45], [46]. Nekatere raziskave so razkrile protista iz rodu *Labyrinthula* tudi kot možen dejavnik za krčenje morskih travnikov kolenčaste cimodoceje [46]. Na okuženost opozarjajo poškodbe na listnih ploskvah. V slovenskem delu Jadrana poteka monitoring biometričnih meritev listnih ploskev kolenčaste cimodoceje z namenom ugotavljanja ekološkega stanja, vendar primeri poškodb na listih, povezanih s pašnjo ali fizičnimi poškodbami niso bili zabeleženi [47]. Orlando-Bonaca idr. (2015) [16] so ugotovili, da visoka stopnja sedimentacije in resuspenzije (tako naravne kot zaradi antropogenih dejavnosti) omejujeta razpoložljivost svetlobe v vodnem stolpcu. *C. nodosa* kaže plastične rastne odzive in povečuje dolžino listov, da bi izboljšala količino zajete svetlobe in zmanjšala zasenčenost [48]–[50]. Daljši listi morske trave tako pomenijo slabše ekološko stanje travnikov [16]. Tudi Najdek idr. (2020) [51] so pred kratkim raziskovali vzroke za krčenje travnika *C. nodosa* v hrvaškem delu severnega Jadrana. Ugotovili so, da je do regresije morskega travnika najverjetneje prišlo v obdobju, ko se je razpoložljivost svetlobe drastično zmanjšala zaradi povečane motnosti morske vode v povezavi s povečanim vnosom snovi s kopnega, na kar kaže zmanjšanje slanosti in znatno povečanje koncentracije trdnih delcev v povezavi z resuspenzациjo sedimenta.

### **3.3 Prostorska analiza kot orodje za ugotavljanje možnih posledic v morskem biodiverziteti**

Habitati so dobri indikatorji stanja biotske raznovrstnosti, saj so spremembe, ki se dogajajo v njih, pogosto odziv antropogenih ali okoljskih dejavnikov. Identifikacija ogroženih in ranljivih morskih habitatov je s tega vidika eden od ključnih korakov pri načrtovanju ohranjanja narave in možnih varstvenih ukrepov. Zato je uporaba digitalnih ortofoto posnetkov in satelitskih podob (daljinsko zaznavanje) obetavna metoda, ki ponuja možnost razumevanja prostorskih sprememb v času [52], [53], kar se je izkazalo tudi v okviru pričujoče raziskave. Ta je v konkretnem primeru pokazala na krčenje morskih travnikov v obrežnem delu KPS in v obeh lagunah.ocene krčenja pokrovnosti habitatov so odvisne tudi od natančnosti historičnih podatkov in kakovosti podob ter velikosti obravnavanega habitata.

### 3.4 Krčenje morskih travnikov v slovenskem morju in možne povezave s podnebnimi spremembami

Krčenje morskih travnikov kolenčaste cimodoceje v KPS ni osamljen primer v slovenskem morju, niti širše v severnem Jadranu. Predtem je do podobnega krčenja prišlo pri morski travi pozejdonki, ki je še pred petdesetimi leti prekrivala velike površine v slovenskem delu Jadrana do približno 25 m globine. Morski travniki pozejdonke so pričeli postopno izginjati v celotnem Tržaškem zalivu, ohranili so se le na manjšem predelu (s površino 0,64 hektarjev) ob obalni cesti med Koprom in Izolo [54].



**Slika 5: Razširjenost morskih travnikov (v km<sup>2</sup>) na celotni slovenski obali v obdobju 2009 in 2018. Graf prikazuje časovni potek spreminjanja njihove površine (oranžni stolpec predstavlja referenčno površino na podlagi podatkov Harpha, 2014)**

Vir: lasten.

Primerjava med obdobjem pred letom 2018 (2009–2017) in letom 2018 je pokazala, da se tudi v slovenskem delu Jadranskega morja soočamo s trendom krčenja morskih travnikov cimodoceje (Slike 3, 4 in 5). Te spremembe sicer še zdaleč niso tako drastične kot vzdolž istrske obale, kažejo pa na trend krčenja. Pri tem moramo za leto 2018 upoštevati ugotovljeno krčenje morskih travnikov v Strunjanskem zalivu, za leto 2017 pa izginotje morskega travnika na območju med Piranom in Bernardinom.

Od drugih predelov, kjer so morski travniki povsem izginili, moramo omeniti tudi območje na Fizinah (Portorož), kjer smo zabeležili popolno izginotje nekdanjega zelo obsežnega morskega travnika cimodoceje. Znatne spremembe so opažene tudi na ustju reke Dragonje, kjer je v najbolj plitvem delu travnik izginil. Po drugi strani pa podatki kažejo, da se je nekoliko razširil travnik cimodoceje v Semedelskem zalivu.

Degradacija (skrčenje pokrovnosti in ožja razširjenost) in/ali izguba morskih travnikov cimodoceje je podobno kot v primeru obravnavanega območja (strunjanskega zaliva in obeh lagun) najbolj intenzivna v najbolj plitvih delih. V globljih predelih so morski travniki še vedno dobro razviti in razširjeni, kar kaže na dejstvo, da so očitno izven dosega različnih vplivov s kopnega. Zato lahko tudi v teh primerih ocenimo, da gre za antropogeno pogojene vzroke. Te lahko identificiramo v pritiskih in obremenitvah iz obalnega pasu in zaledja. Slika 5 prikazuje skrčenje površine morskih travnikov kolenčaste cimodoceje na vseh predelih slovenskega morja. V letih od 2009 do 2014 je znašala celotna površina travnikov cimodoceje približno 2,5 km<sup>2</sup>. Leta 2017 se je zmanjšala za približno 20 %, leta 2018 pa še za dodatnih 10 %. Ocenjena površina travnikov kolenčaste cimodoceje tako danes znaša približno 1,7 km<sup>2</sup>.

Na svetovni ravni sta zakisljevanje in segrevanje oceanov med največjimi grožnjami, ki neposredno ali posredno vplivajo na preživetje, razširjenost in fiziološko učinkovitost morskih travnikov [55]. Za večino morskih makrofitov se je izkazalo, da je temperatura najpomembnejši omejitveni dejavnik za širjenje in fiziološke dejavnosti [56]. Ker se temperatura morja v zadnjih desetletjih počasi, a vztrajno zvišuje v celotnem Sredozemlju, to vpliva tudi na proizvodnjo kisika in dihanje v travnikih kolenčaste cimodoceje, kot sta ugotovila Pérez in Romero (1992) [57].

Jadransko in Sredozemsko morje se v povprečju segrevata hitreje kot druga morja, porast temperature pa se že kaže v množičnih poginih, premikih v razširjenosti vrst ter prihodu tujerodnih vrst [58], [59]. Med raziskovalci vlada konsenz, da podnebne spremembe znateno vplivajo na morske travnike [60]. V nekaterih objavah so že poročali, da segrevanje oceanov povzroča znatno smrtnost pozejdonce [61] in nekateri napovedujejo dramatične izgube njenih travnikov tudi v prihodnje [59]. Eksperimentalne raziskave v zalivu Chesapeake [62] so pokazale, da pride do popolnega izginotja vrste *Z. marina*, če jo za krajši čas izpostavimo hitremu porastu temperature za nekaj stopinj. Spričo nadaljnega globalnega segrevanja napovedujejo

premik v razširjenosti morskih trav v manj obremenjena območja [63], saj temperatura vpliva na ključne procese pri morskih travah, kot so fotosinteza, dihanje, rast in razmnoževanje [63], [64]. Zato je treba v luči podnebnih sprememb načrtovati prihodnje raziskave o dolgoročni aklimatizacijski sposobnosti travnikov morskih trav.

#### 4 Zaključek

Morske cvetnice veljajo za biološke indikatorje, saj vsaka sprememba v razširjenosti morskih trav, kot je zmanjšanje največje globine ali obsežna izguba njihovih travnikov, opozarja na negativne spremembe v okolju [65]. V zadnjih desetletjih so bile tako površine obstoječih morskih travnikov kot njihove izgube zelo grobo ocenjene, medtem ko je bilo natančnih podatkov na dobro raziskanih območjih malo, vključno s številnimi sredozemskimi regijami [21].

Pridobljeni zemljevidi prostorskih in časovnih sprememb travnikov morskih cvetnic služijo kot ključno orodje za odločevalce in upravjalce morskih zavarovanih območjih in bi lahko podprli učinkovitejše ukrepe za ohranjanje in upravljanje teh zelo produktivnih okoljih. Ob tem bi lahko s pomočjo napovedi podnebnih sprememb ustvarili potencialne zemljevide tveganja za morske travnike. Te informacije bi lahko pomagale pri načrtovanju obsežnih obnovitvenih ukrepov, ki so nujno potrebni za obvladovanje okoljskih problemov, neposredno ali posredno povezanih s poglobljajočo se podnebno krizo. Vzpostavitev učinkovitih načrtov upravljanja morskih travnikov, katerih cilj je ublažiti vpliv človekovih dejavnosti, je izjemnega pomena in prispeva k doseganju dobrega ekološkega stanja na evropski in sredozemski ravni.

#### Zahvale

Na tem mestu izrekamo zahvalo za pomoč pri pripravi tega prispevka našim kolegom iz Morske biološke postaje Nacionalnega inštituta za biologijo in sicer Leonu Lojzetu Zamudi, Tihomirju Makovcu, Milijanu Šišku ter Valentini Pitacco. Hvaležni smo tudi prof. dr. Rolandu Melzerju iz bavarske univerze v Muenchnu za podatke o stanju ob hrvaški istrski obali. Ne nazadnje se zahvaljujemo tudi strokovnemu osebju Krajinskega parka Strunjan, ki so nas povabili k izvedbi raziskave o stanju morskih travnikov v Strunjanu.

Študijo je omogočila Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v sklopu projekta »Dejavniki, ki vplivajo na gozdove jadranskih rjavih alg in rešitve za obnovo habitata« (J1-1702).



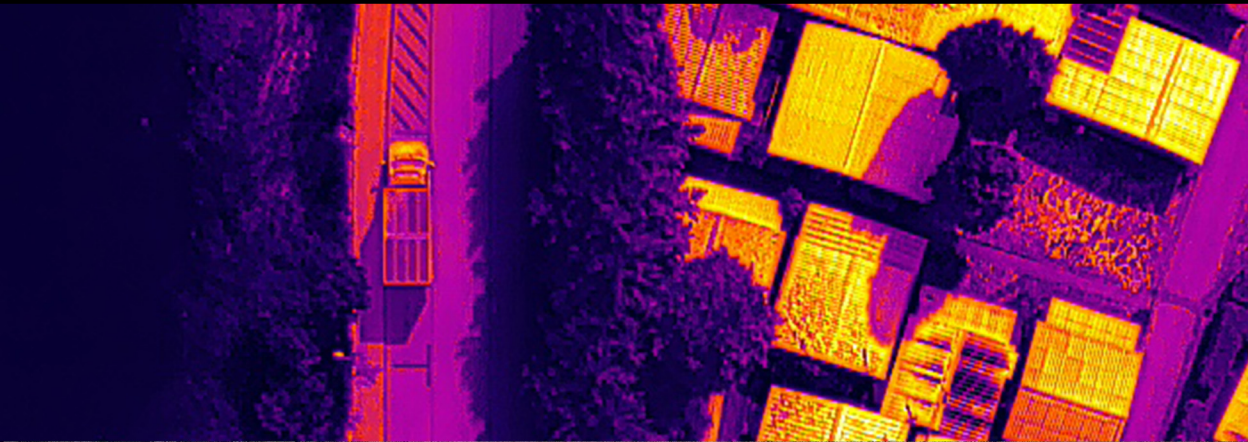
## Literatura

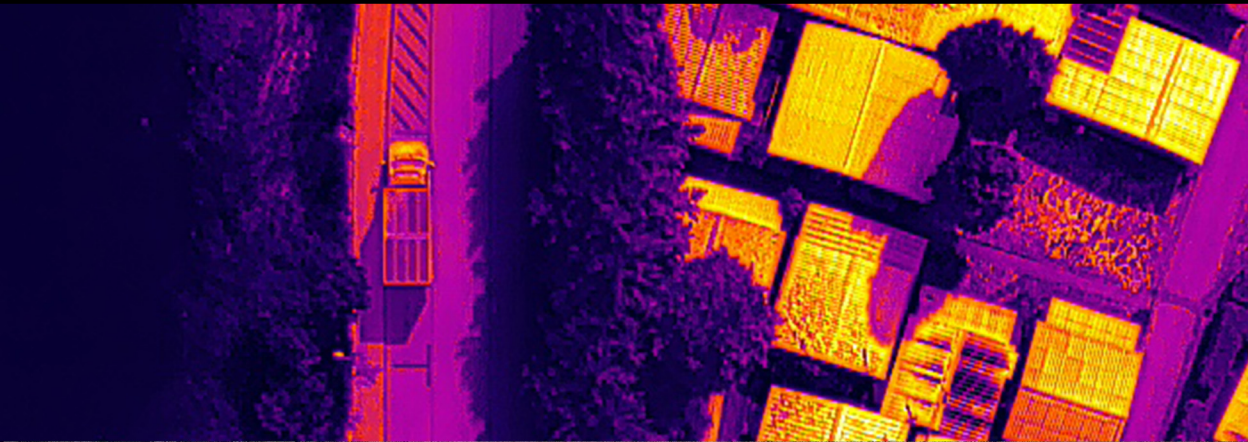
- [1] M. M. Brodersen *idr.*, „Cumulative impacts from multiple human activities on seagrass meadows in eastern Mediterranean waters: the case of Saronikos Gulf (Aegean Sea, Greece)“, *Environ Sci Pollut Res*, let. 25, št. 27, str. 26809–26822, sep. 2018, doi: 10.1007/s11356-017-0848-7.
- [2] M. Spalding, M. Taylor, C. Ravilious, F. Short, in E. Green, „The distribution and status of seagrasses“, v *World atlas of seagrasses*, E. P. Green in F. T. Short, Ur. Berkeley: University of California Press, 2003, str. 1–26.
- [3] M. A. Hemminga in C. M. Duarte, *Seagrass ecology*. Cambridge University Press, 2000.
- [4] L. M. Nordlund, R. K. F. Unsworth, M. Gullström, in L. C. Cullen-Unsworth, „Global significance of seagrass fishery activity“, *Fish Fish*, let. 19, št. 3, str. 399–412, maj 2018, doi: 10.1111/faf.12259.
- [5] R. K. F. Unsworth, L. M. Nordlund, in L. C. Cullen-Unsworth, „Seagrass meadows support global fisheries production“, *Conservation Letters*, let. 12, št. 1, str. e12566, 2018, doi: 10.1111/conl.12566.
- [6] B. Ondiviela *idr.*, „The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate“, *Coastal Engineering*, let. 87, str. 158–168, 2014.
- [7] J. Terrados in J. Borum, „Why are seagrasses important?—Goods and services provided by seagrass meadows“, v *European seagrasses: an introduction to monitoring and management*, J. Borum, C. M. Duarte, D. Krause-Jensen, in T. M. Greve, Ur. The M&MS project, 2004, str. 8–10. [Na spletu]. Dostopno na: <http://www.seagrasses.org>
- [8] J. Widdows, N. D. Pope, M. D. Brinsley, H. Asmus, in R. M. Asmus, „Effects of seagrass beds (*Zostera noltii* and *Z. marina*) on near-bed hydrodynamics and sediment resuspension“, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, let. 358, str. 125–136, 2008.
- [9] T. Luisetti, E. L. Jackson, in R. K. Turner, „Valuing the European ‘coastal blue carbon’ storage benefit“, *Mar. Pollut. Bull.*, let. 71, str. 101–106, 2013.
- [10] J. Richir, N. Luy, G. Lepoint, E. Rozet, A. A. Azcarate, in S. Gobert, „Experimental in situ exposure of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile to 15 trace elements“, *Aquat. Toxicol.*, let. 140, str. 157–173, 2013.
- [11] D. Effrosynidis, A. Arampatzis, in G. Sylaios, „Seagrass detection in the mediterranean: A supervised learning approach“, *Ecol. Inform.*, let. 48, str. 158–170, 2018.
- [12] K. Heck Jr, G. Hays, in R. J. Orth, „Critical evaluation of the nursery role hypothesis for seagrass meadows“, *Marine Ecology Progress Series*, let. 253, str. 123–136, 2003.
- [13] HD, 92/43/EEC, „Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora“. 1992.
- [14] E. Diaz-Almela, N. Marbà, in C. M. Duarte, „Consequences of Mediterranean warming events in seagrass (*Posidonia oceanica*) flowering records“, *Glob. Chang. Biol.*, let. 13, str. 224–235, 2007.
- [15] N. Marbà, E. Díaz-Almela, in C. M. Duarte, „Mediterranean seagrass (*Posidonia oceanica*) loss between 1842 and 2009“, *Biol. Conserv.*, let. 176, str. 183–190, 2014.
- [16] M. Orlando-Bonaca *idr.*, „A new index (MediSkew) for the assessment of the *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson meadow’s status“, *Marine Environmental Research*, let. 110, str. 132–141, sep. 2015, doi: 10.1016/j.marenvres.2015.08.009.
- [17] M. Orlando-Bonaca, J. Francé, B. Mavrič, in L. Lipej, „Impact of the Port of Koper on *Cymodocea nodosa* meadow“, *Annales Series Historia Naturalis*, let. 29, št. 2, str. 187–194, 2019.
- [18] T. Repolho *idr.*, „Seagrass ecophysiological performance under ocean warming and acidification“, *Scientific Reports*, let. 7, št. 1, str. 1–12, 2017.
- [19] F. T. Short *idr.*, „Extinction risk assessment of the world’s seagrass species“, *Biol. Conserv.*, let. 144, št. 7, str. 1961–1971, jul. 2011, doi: 10.1016/j.biocon.2011.04.010.
- [20] F. Tuya, J. Martín, in A. Luque, „Impact of a marina construction on a seagrass bed at Lanzarote (Canary Islands)“, *J. Coast. Conserv.*, let. 8, št. 2, str. 157–162, 2002.

- [21] C. F. Boudouresque, G. Bernard, G. Pergent, A. Shili, in M. Verlaque, „Regression of Mediterranean seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress: a critical review“, *Bot. Mar.*, let. 52, št. 5, str. 395–418, nov. 2009, doi: 10.1515/BOT.2009.057.
- [22] F. T. Short, „Loss and restoration of seagrass ecosystems“, Zurich, 2003, str. 23–27.
- [23] L. Telesca *idr.*, „Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change“, *Sci Rep*, let. 5, št. 1, str. 12505, dec. 2015, doi: 10.1038/srep12505.
- [24] F. Fabbri *idr.*, „Trends of the seagrass *Cymodocea nodosa* (Magnoliophyta) in the Canary Islands: population changes in the last two decades“, *Sci. Mar.*, let. 79, št. 1, str. 7–13, mar. 2015, doi: 10.3989/scimar.04165.19B.
- [25] R. J. Orth *idr.*, „A Global Crisis for Seagrass Ecosystems“, *BioScience*, let. 56, št. 12, str. 987–996, 2006, doi: 10.1641/0006-3568(2006)56[987:AGCFSE]2.0.CO;2.
- [26] F. Tuya, H. Hernandez-Zerpa, F. Espino, in R. Haroun, „Drastic decadal decline of the seagrass *Cymodocea nodosa* at Gran Canaria (eastern Atlantic): interactions with the green algae *Caulerpa prolifera*“, *Aquat. Bot.*, let. 105, str. 1–6, 2013.
- [27] F. Tuya, L. Ribeiro-Leite, N. Arto-Cuesta, J. Coca, R. Haroun, in F. Espino, „Decadal changes in the structure of *Cymodocea nodosa* seagrass meadows: Natural vs. human influences“, *Estuar. Coast. Shelf S.*, let. 137, str. 41–49, 2014.
- [28] A. R. Hughes, S. L. Williams, C. M. Duarte, K. L. Heck, in M. Waycott, „Associations of concern: declining seagrasses and threatened dependent species“, *Frontiers in Ecology and the Environment*, let. 7, št. 5, str. 242–246, jun. 2009, doi: 10.1890/080041.
- [29] M. Waycott *idr.*, „Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems“, *Proceedings of the national academy of sciences*, let. 106, št. 30, str. 12377–12381, 2009.
- [30] F. T. Short, C. A. Short, in A. Novak, „Seagrasses“, v *The Wetland Book: II: Distribution, Description and Conservation*, C. M. Finlayson, G. R. Milton, R. C. Prentice, in N. C. Davidson, Ur. Dordrecht, Nizozemska: Springer Science, 2016.
- [31] J. Borum in T. M. Greve, „The four European seagrass species“, v *European seagrasses: an introduction to monitoring and management*, J. Borum, C. M. Duarte, D. Krause-Jensen, in T. M. Greve, Ur. The M&MS project, 2004, str. 1–7. [Na spletu]. Dostopno na: <http://www.seagrasses.org>
- [32] P. Firbas, *Vsa slovenska jezera: leksikon slovenskih stoječih voda*. Ljubljana: DZS, 2001.
- [33] A. Avčin *idr.*, „Akvatični ekosistemi v Strunjanskem zalivu I: preliminarno poročilo“, Inštitut za biologijo univerze v Ljubljani in Morska biološka postaja Portorož, Ljubljana in Piran, 1973.
- [34] L. Lipej *idr.*, „Raziskave biodiverzitete na območju Strunjanskih solin in Stjuže“, Morska biološka postaja in Nacionalni inštitut za biologijo, Piran in Ljubljana, Naročnik: Zavod Republike Slovenije za varstvo narave, 2004.
- [35] L. Lipej, B. Mavrič, M. Orlando-Bonaca, V. Pitacco, D. Trkov, in L. L. Zamuda, „Inventarizacija favne in flore Pretočne lagune, Stjuže in solin“, 186, 2019.
- [36] V. Pitacco, L. Lipej, B. Mavrič, M. Mistri, in C. Munari, „Comparison of benthic indices for the evaluation of ecological status of three Slovenian transitional water bodies (northern Adriatic)“, *Marine Pollution Bulletin*, let. 129, št. 2, str. 813–821, 2017, doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.10.085.
- [37] L. Lipej, R. Turk, in T. Makovec, *Ogrožene vrste in habitatni tipi v slovenskem morju*. Zavod RS za varstvo narave, 2006.
- [38] S. Jensen in S. Bell, „Seagrass growth and patch dynamics: cross-scale morphological plasticity“, *Plant Ecology*, let. 155, št. 2, str. 201–217, 2001.
- [39] V. Papathanasiou, „*Cymodocea nodosa* as a bioindicator of coastal habitat quality: an integrative approach from organism to community scale“, Doktorska dizertacija, School of Marine Science and Engineering, Faculty of Science and Technology, University of Plymouth, UK, 2013.
- [40] Geodetska uprava Republike Slovenije, „Ortofoto“, 2017. <https://www.e-prostor.gov.si/zbirke-prostorskih-podatkov/topografski-in-kartografski-podatki/ortofoto/> (pridobljeno 1. februar 2022).

- [41] Google Earth, „Satellite Imagery in Google Earth“, 2022. <https://earth.google.com/web/data=CiQSIHlgOGQ2YmFjYjU2ZDIzMTFIOThiNTM2YjMzNGRiYmRhYTA> (pridobljeno 1. februar 2022).
- [42] QGIS Development Team, *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation, 2017. [Na spletu]. Dostopno na: <http://www.qgis.org/>
- [43] WFD, 2000/60/EC, „Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy“. 2000.
- [44] S. Cabaço, R. Santos, in C. M. Duarte, „The impact of sediment burial and erosion on seagrasses: a review“, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, let. 79, št. 3, str. 354–366, 2008.
- [45] L. K. Muehlstein, D. Porter, in F. T. Short, „Labyrinthula zosterae sp. nov., the causative agent of wasting disease of eelgrass, *Zostera marina*“, *Mycologia*, let. 83, št. 2, str. 180–191, 1991.
- [46] Y. S. Olsen in C. M. Duarte, „Combined effect of warming and infection by *Labyrinthula* sp. on the Mediterranean seagrass *Cymodocea nodosa*“, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, let. 532, str. 101–109, 2015.
- [47] L. Lipej *idr.*, „Raziskava z oceno stanja morskih travnikov v Krajinskem parku Strunjan = Assessment of the status of seagrass meadows in the Strunjan Landscape Park“, Marine Biology Station Piran, 174, 2018.
- [48] D. E. Goldberg, „Competitive ability: definitions, contingency and correlated traits“, *Philos. Trans.: Biol. Sci.*, let. 351, št. 1345, str. 1377–1385, 1996.
- [49] S. Orfanidis *idr.*, „Further improvement, validation, and application of CymoSkew biotic index for the ecological status assessment of the Greek coastal and transitional waters“, *Ecological Indicators*, let. 118, str. 106727, nov. 2020, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106727.
- [50] B. W. Touchette in J. M. Burkholder, „Overview of the physiological ecology of carbon metabolism in seagrasses“, *Journal of experimental marine biology and ecology*, let. 250, str. 169–205, 2000.
- [51] M. Najdek *idr.*, „Dynamics of environmental conditions during the decline of a *Cymodocea nodosa* meadow“, *Biogeosciences*, let. 17, št. 12, str. 3299–3315, jun. 2020, doi: 10.5194/bg-17-3299-2020.
- [52] C. Corbane *idr.*, „Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges“, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, let. 37, str. 7–16, maj 2015, doi: 10.1016/j.jag.2014.11.005.
- [53] P. K. Pandian *idr.*, „Seabed habitat mapping techniques: an overview of the performance of various systems“, *Medit. Mar. Sci.*, let. 10, št. 2, str. 29–43, dec. 2009, doi: 10.12681/mms.107.
- [54] R. Turk in A. Vuković, „Phenology of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in the Gulf of Koper (Gulf of Trieste), North Adriatic“, *Rapport du Congrès de la Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée*, let. 35, str. 592–593, 1998.
- [55] A. Jueterbock *idr.*, „Phylogeographic differentiation versus transcriptomic adaptation to warm temperatures in *Zostera marina*, a globally important seagrass“, *Mol. Ecol.*, let. 25, št. 21, str. 5396–5411, nov. 2016, doi: 10.1111/mec.13829.
- [56] B. Duarte *idr.*, „Climate Change Impacts on Seagrass Meadows and Macroalgal Forests: An Integrative Perspective on Acclimation and Adaptation Potential“, *Front. Mar. Sci.*, let. 5, str. 190, jun. 2018, doi: 10.3389/fmars.2018.00190.
- [57] M. Pérez in J. Romero, „Photosynthetic response to light and temperature of the seagrass *Cymodocea nodosa* and the prediction of its seasonality“, *Aquat. Bot.*, let. 43, str. 51–62, jun. 1992, doi: 10.1016/0304-3770(92)90013-9.
- [58] M. Coll *idr.*, „The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats“, *PLoS ONE*, let. 5, št. 8, str. e11842, avg. 2010, doi: 10.1371/journal.pone.0011842.
- [59] G. Jordà, N. Marbà, in C. M. Duarte, „Mediterranean seagrass vulnerable to regional climate warming“, *Nature Climate Change*, let. 2, št. 11, str. 821–824, nov. 2012, doi: 10.1038/nclimate1533.
- [60] M. Waycott *idr.*, „Vulnerability of mangroves, seagrasses and intertidal flats in the tropical Pacific to climate change (Chapter 6)“, v *Vulnerability of Tropical Pacific Fisheries and Aquaculture*

- to *Climate Change. Secretariat of the Pacific Community*, J. D. Bell., J. E. Johnson, in A. J. Hobday, Ur. Secretariat of the Pacific Community, 2011, str. 297–368.
- [61] N. Marbà in C. M. Duarte, „Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality“, *Global Change Biology*, let. 16, št. 8, str. 2366–2375, 2010, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02130.x.
- [62] K. A. Moore, E. C. Shields, in D. B. Parrish, „Impacts of Varying Estuarine Temperature and Light Conditions on *Zostera marina* (Eelgrass) and its Interactions With *Ruppia maritima* (Widgeongrass)“, *Estuaries and Coasts*, let. 37, št. S1, str. 20–30, mar. 2014, doi: 10.1007/s12237-013-9667-3.
- [63] F. T. Short in H. A. Neckles, „The effects of global climate change on seagrasses“, *Aquatic Botany*, let. 63, št. 3–4, str. 169–196, apr. 1999, doi: 10.1016/S0304-3770(98)00117-X.
- [64] S. J. Campbell, L. J. McKenzie, in S. P. Kerville, „Photosynthetic responses of seven tropical seagrasses to elevated seawater temperature“, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, let. 330, št. 2, str. 455–468, mar. 2006, doi: 10.1016/j.jembe.2005.09.017.
- [65] J. A. Thomson *idr.*, „Extreme temperatures, foundation species, and abrupt ecosystem change: an example from an iconic seagrass ecosystem“, *Glob. Change Biol.*, let. 21, št. 4, str. 1463–1474, apr. 2015, doi: 10.1111/gcb.12694.





# PRIMERI PROSTORSKIH ANALIZ VPLIVOV PODNEBNIH SPREMEMB

DANIJEL IVAJNSIČ,<sup>1,2</sup> DAŠA DONŠA,<sup>2</sup>  
VENO JAŠA GRUJIĆ,<sup>2,3</sup> NATAŠA PIPENBAHER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Maribor, Slovenija  
dani.ivajnsic@um.si

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija  
dani.ivajnsic@um.si, dasa.donsal@um.si, veno.grujic@um.si, natasa.pipenbaher@um.si

<sup>3</sup> Univerza v Mariboru, Pedagoška fakulteta, Maribor, Slovenija  
veno.grujic@um.si

**Sinopsis** V obdobju digitalne preobrazbe družbe na pomenu pridobivajo tudi informacijske tehnologije. Sem sodijo geografski informacijski sistemi, ki povezujejo lokacijske podatke z vsemi vrstami opisnih informacij, in s tem zagotavljajo osnovo za kartiranje in prostorsko analizo. Slednja se dandanes uporablja tako v znanosti kot v industriji. S pomočjo tovrstne analize lažje razumemo pretekle in sedanje prostorske vzorce, ki so posledica interakcije naravnih in družbenih razmer. Na podlagi zaznanih trendov lahko nato celo ocenjujemo, kakšen bo nadaljnji prostorski razvoj. Prav zmožnost objektivnega napovedovanja je ena izmed ključnih lastnosti, ki dodatno poveča uporabnost prostorskih analiz z vidika vrednotenja posledic podnebne ali boljše okoljske krize. Prav to dejstvo je povod za nastanek monografije z naslovom Primeri prostorskih analiz vplivov podnebnih sprememb. Monografija je razdeljena na tri poglavja. Prvo obravnava urbana okolja in se dotakne problematike vse pogostejšega toplotnega stresa kot posledice pojava mestnega toplotnega otoka (MTO) in toplejše atmosfere zaradi (antropogeno pospešenih) podnebnih sprememb. Drugo poglavje monografije obravnava vplive podnebnih sprememb na izbrane habitate kulturne krajine, bodisi v intenzivni ali ekstenzivni kmetijski rabi. V tretjem poglavju pa se vsebinsko premaknemo iz kopenskih na obmorska in morska okolja.

## Ključne besede

prostorske analize,  
podnebne  
spremembe,  
geografski  
informacijski  
sistemi,  
prostorski vzorci,  
okoljska kriza

# CASE STUDIES OF CLIMATE CHANGE EFFECTS SPATIAL ANALYSIS

DANIJEL IVAJNŠIČ,<sup>1,2</sup> DAŠA DONŠA,<sup>2</sup>  
VENO JAŠA GRUJIĆ,<sup>2,3</sup> NATAŠA PIPENBAHER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Maribor, Faculty of Arts, Maribor, Slovenia  
dani.ivajnsic@um.si

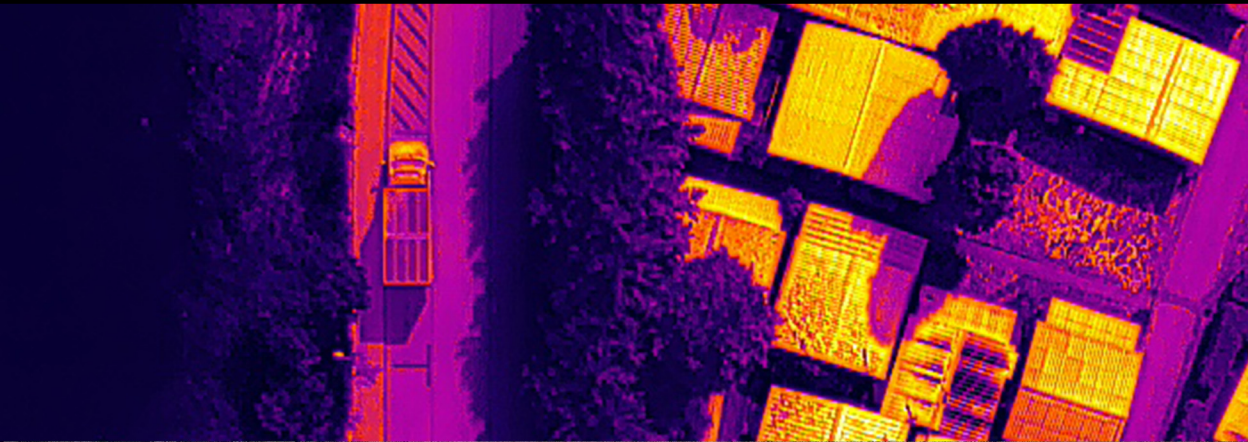
<sup>2</sup> University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia  
dani.ivajnsic@um.si, dasa.donsa1@um.si, veno.grujic@um.si, natasa.pipenbaher@um.si

<sup>3</sup> University of Maribor, Faculty of Education, Maribor, Slovenia  
veno.grujic@um.si

**Abstract** In the period of digital transformation of society, information technologies are gaining in importance. This includes geographic information systems that link location data to all types of descriptive information, thus providing a basis for mapping and spatial analysis. The latter is used today in both science and industry. With the help of this type of analysis, it is easier to understand past and present spatial patterns that are the result of the interaction of natural and social conditions. Based on the recognized trends, we can then estimate what the further spatial development will be. The ability to predict objectively is one of the key features that further increases the usefulness of spatial analysis in terms of evaluating the consequences of climate or environmental crisis. This fact is the reason for the creation of the monograph entitled Case Studies of Climate Change Effects Spatial Analysis. The publication is divided into three chapters. The first deals with urban environments and addresses the issue of increasing heat stress as a consequence of the emergence of urban heat island effect (UHI) and a warmer atmosphere due to (anthropogenically driven) climate change. The second chapter deals with the effects of climate change on selected habitats of the cultural landscape, whether in intensive or extensive agricultural use. In the third chapter, the content shifts from terrestrial to coastal and marine environments.

**Keywords:**  
spatial analysis,  
climate change,  
geographic  
information  
systems, spatial  
patterns,  
environmental  
crisis







ARRS

JAVNA AGENCIJA ZA RAZISKOVALNO DEJAVNOST  
REPUBLIKE SLOVENIJE



Univerza v Mariboru

Fakulteta za naravoslovje  
in matematiko



Univerza v Mariboru

Filozofska fakulteta



Univerza v Ljubljani

*Biotekniška* fakulteta

*petinsedemdesetletnica*

