

LETNA DINAMIKA POJAVA MESTNEGA TOPLOTNEGA OTOKA V MALEM URBANEM SISTEMU

Nataša Pipenbaher

Dr., uni. dipl. inž. kmetijstva, doc.
Oddelek za biologijo
Fakulteta za naravoslovje in matematiko
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija
e-mail: natasa.pipenbaher@um.si

Danijel Ivajnsič

Dr., prof. geografije in biologije, doc.
Oddelek za geografijo in Oddelek za biologijo
Filozofska fakulteta in Fakulteta za naravoslovje in matematiko
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija
e-mail: dani.ivajnsic@um.si

Igor Žiberna

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

Daša Donša

Mag., biologije in ekologije z naravovarstvom, ast.
Oddelek za biologijo
Fakulteta za naravoslovje in matematiko
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija
e-mail: dasa.donsa1@um.si

Mitja Kaligarič

Dr., uni. dipl. biolog, red. prof.
Oddelek za biologijo
Fakulteta za naravoslovje in matematiko
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija
e-mail: mitja.kaligarič@um.si

Sonja Škornik

Dr., prof. biologije in kemije, izr. prof.
Oddelek za biologijo
Fakulteta za naravoslovje in matematiko
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija
e-mail: sonja.skornik@um.si

Lučka Kajfež Bogataj

Dr., uni. dipl. inž. meteorologije, red. prof.
Oddelek za agronomijo
Biotehniška fakulteta
Jamnikarjeva 101, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija
e-mail: lucka.kajfez.bogataj@bf.uni-lj.si

Zalika Črepinšek

Dr., uni. dipl. inž. kmetijstva, asistent
Oddelek za agronomijo
Biotehniška fakulteta
Jamnikarjeva 101, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija
e-mail: zalika.crepinsek@bf.uni-lj.si

Veno Jaša Grujić

Mag., biologije in ekologije z naravovarstvom, ast.
Oddelek za razredni pouk in Oddelek za biologijo
Pedagoška fakulteta in Fakulteta za naravoslovje in matematiko
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor
e-mail: veno.grujic@um.si

UDK: 551.584

COBBIS: 1.01

Izvleček

Letna dinamika pojava mestnega toplotnega otoka v malem urbanem sistemu

Pojav mestnega toplotnega otoka (MTO) je posledica antropogenega spreminjanja prostora ter lokalnih podnebnih razmer. Večina študij o MTO obravnava velika metropolitanska območja. Podatki kažejo da je jakost pojava MTO lahko velika tudi v malih urbanih sistemih. V študiji smo se osredotočili na jakost pojava MTO v luči povprečnih, maksimalnih in minimalnih dnevnih temperatur zraka v različnih vremenskih tipih po sezonah v mestu Ljutomer. Ob anticiklonalni ali advektivni zračni cirkulaciji, predvsem v poletnih mesecih, je jakost MTO v Ljutomeru primerljiva srednjim in velikim urbanim sistemom (tudi do 8°C). Rezultati študije so še posebej zaskrbljujoči z vidika vse pogostejših vročinskih valov kot posledice podnebnih sprememb, ki še dodatno povečujejo, že tako prisotni, toplotni stres v mestih.

Ključne besede

Ljutomer, mestni toplotni otoki (MTO), podnebne spremembe, vremenski tipi, vročinski valovi

Abstract

Annual dynamics of the UHI phenomenon in a small urban system

The urban heat island phenomenon (UHI) is a consequence of anthropogenic activity and local climatic conditions. Most UHI studies address large metropolitan areas. However, the data show that UHI magnitude can reach high values even in small urban systems. The study focused on the seasonal dynamics of the UHI magnitude variable (average, maximum and minimum temperature anomaly) in the town of Ljutomer by considering different weather types. Under anticyclonic or advective air circulation pattern, predominantly in summer, UHI magnitude in Ljutomer can reach values comparable to midsize or large urban systems (up to 8°C). The results of such studies are of particular concern in regard to increasing frequency of heat waves as a consequence of climate change, which further increases the already present heat stress in cities all over the Globe.

Key words

Climate change, Heat waves, Ljutomer, Urban heat islands (UHI), Weather types

Uredništvo je članek prejelo 9.12.2020

1. Uvod

Število prebivalcev v globalnem merilu še vedno narašča, posledično pa se večajo tudi mesta. Po podatkih podatkovne baze The World Bank (Medmrežje 1) je leta 2016 v urbanih naseljih bivalo 54 % svetovnega prebivalstva (leta 1960 le 34 %). Ena izmed očitnejših posledic antropogenega delovanja, zlasti slabo načrtovane urbanizacije in negativnih vplivov industrializacije, je nastanek mestnih toplotnih otokov (MTO), katerih intenzivnost se zaradi vse pogostejših vročinskih valov kot posledice podnebnih sprememb še dodatno povečuje. Odstranjevanje vegetacijskega pokrova v mestih in njihova nadomestitev z umetnimi materiali (npr. beton, asfalt, kovine, itd.) vpliva na sevalne, termične in vlažnostne lastnosti, hkrati pa tudi na fiziognomijo površja (Li in sod. 2009). Rezultat tega je spremenjen energijski tok in povečano razmerja med gostoto turbulentnega toka zaznavne in latentne toplote (Bowenovo razmerje), kar se izkazuje v povečani temperaturi površja ali zraka v skoraj vsakem naselju, mestu ali aglomeraciji (Oke 1982; Stull 1988). Negativne učinke MTO še dodatno povečuje velika gostota prebivalstva v povezavi z neprimernim oblikovanem stavb, zlasti v gostih metropolitanskih območjih in srednje velikih mestih. Ker v urbanem okolju prebiva večina svetovnega prebivalstva, je ohranjanje kakovosti bivalnega okolja v njem velikega pomena. Medtem ko se večina študij MTO osredotoča na velika metropolitanska območja in srednje velika mesta (Rogan in sod. 2013; Zhang in sod. 2013; Al-Hatab in sod. 2017; Evola in sod. 2017), kar zahteva termične podatke daljinskega zaznavanja in stabilne meteorološke razmere za pripravo spremenljivke temperatura površja (LST), pa nasprotno zelo malo študij obravnava lastnosti in letno dinamiko MTO v majhnih mestih (Balazs in sod. 2009; Ivajnsič in sod. 2014), značilnih za Slovenijo. Ker je daljinsko zaznavanje temperature površin omejeno na optimalne vremenske razmere (brez oblakov), je v splošnem vpliv različnih vremenskih tipov na pojav MTO slabo raziskan. Različne meteorološke razmere vplivajo ne samo na jakost pojava MTO, temveč tudi na njegovo morfologijo in prostorski obseg (Johnson in sod. 1991; Moreno-Garcia 1994; Kidder in Essenwanger 1995; Figuerola in Mazzeo 1998; Montavez in sod. 2000; Morris in sod. 2001). Hitrost vetra in oblačnost sta najpomembnejša parametra, ki vplivata na razvoj in jakost MTO (Mihalakakou in sod. 2002; Kassomenos in Katsoulis 2006). Vreme v anticiklonskih pogojih (nebo brez oblakov, rahel veter) običajno okrepi pojav MTO (Mihalakakou in sod. 2002; Kassomenos in Katsoulis 2006). Nasprotno je pri ciklonski cirkulaciji, kjer je kontrast med mestno in podeželsko temperaturo manj očiten zaradi manjših razlik v energijski bilanci (Gedzelman in sod. 2003; Kassomenos in Katsoulis 2006). Dosedanje študije vpliva različnih vremenskih tipov na jakost in prostorski obseg pojava MTO, v zimskem obdobju, kažejo da je njegova največja jakost v anticiklonskih vremenskih razmerah (Ivajnsič in sod. 2014; Ivajnsič, Žiberna 2019).

V prispevku se tokrat osredotočamo na jakost pojava MTO v mestu Ljutomer v vseh letnih časih s posebnim poudarkom na vremenskih tipih. Ugotavljamo kakšna je njegova jakost ob nastopu minimalnih, povprečnih in maksimalnih dnevnihih temperatur zraka. Hkrati upoštevamo naslednje faktorje: lokalna podnebna cona, sezona ter vremenski tip.

2. Metodologija

2.1 Raziskovalno območje

Mesto Ljutomer predstavlja dober poligon za proučevanje pojava MTO. Ostra meja med pozidanimi in ne-pozidanimi površinami, ki jo predstavlja železniška proga, ustvarja značilen kontrast v temperaturnem polju mesta (Slika 1A). Dodatni dejavniki, ki vplivajo na morfologijo pojava MTO v Ljutomeru so še: število in položaj zelenih površin, vodna telesa ter izoblikovanost površja. Dosedanje ugotovitve (Ivajnsič in sod. 2014, Ivajnsič, Žiberna 2019) kažejo na to, da ima Ljutomer neugodno število in razporeditev zelenih površin. Na pojav MTO pa, predvsem ob nastopu advektivnega vremenskega tipa, močno vpliva grič Kamenščak, ki deluje kot reliefna bariera pred pogostim JZ vetrom. Ker večina študij o pojavu MTO obravnavan predvsem večje urbane sisteme s pomočjo podatkov daljinskega zaznavanja (posledično le ob jasnem vremenu) (Rogan in sod. 2013; Zhang in sod. 2013; Al-Hatab in sod. 2017; Evola in sod. 2017), ki so običajno locirani v obsežnih ravninah (brez vpliva reliefa), je proučevanje manjših mest v bolj ali manj razgibanem terenu, kjer lahko uporabljamo tudi časovni niz in-situ meritev, toliko bolj celostno in uporabno.



Slika 1: Lokalizacije avtomatskih merilnikov temperature zraka v lokalnih podnebnih conah mesta Ljutomer.

Vir: kartografska podlaga Google satelit (pridobljeno s vtičnikom QuickMapServices QGIS), Map data ©2015 Google.

2.2 Stacionarne meritve

Za potrebe spremljanja časovnega niza jakosti MTO, smo v mestu Ljutomer locirali 4 stacionarne avtomatske merilnike temperature zraka in relativne zračne vlage (PROGRESPLUS H-GUMBEK 23 dataloggerje [točnost $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$; ločljivost 0.1°C ; vlaga med 0 in 100%]) v Davisovih pasivnih zaslonih (Slika 1B). Vse merilnike smo namestili 3 m visoko na azimut 180° po predhodnem testiranju razlik s standardno višino zajemanja meteoroloških kazalcev. Ključen razlog za izbor nestandardne višine stacionarnih meritev temperature zraka in relativne zračne vlage je zaščita pred vandalizmom. Upoštevali smo gradient pozidanosti, zelene površine in ruralno ozadje.

V praksi gre za lokalne podnebne cone mesta, ki jih je Oke definiral leta 1972 (Oke in Fluggle 1972). Merilniki so beležili temperaturo zraka in relativno zračno vlago v polurnem intervalu. Z meritvami smo pričeli 10.9.2019. V prispevku tako obravnavamo 344 merilnih dni oziroma vse štiri sezone (pomlad, poletje, jesen in zima).

2.3 Vremenski tipi

Značilnosti pojava MTO so močno odvisne od vremenskih tipov. Slednje smo določili s pomočjo prosto dostopnih podatkov avtomatske meteorološke postaje Rakičan, ki je v lasti Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) in je le 14 km oddaljena od raziskovanega območja. Pripravili smo podatkovno bazo izbranih meteoroloških kazalcev za obravnavanih 344 dni. Upoštevali smo: (1) povprečno temperaturo zraka na 2 m [v °C], (2) maksimalno temperaturo zraka na 2 m [v °C], (3) minimalno temperaturo zraka na 2 m [v °C], (4) povprečno hitrost vetra [v m/s], (5) povprečno oblačnost [pokritost neba v %], (6) povprečno relativno vlažnost [v %] in (7) povprečen zračni tak [v hPa]. V nadaljevanju smo v programskem okolju R (R Development Core Team 2020) vseh 7 spremenljivk Z-standardizirali s čimer smo zagotovili poenotenje merskih enot. Sledila je analiza glavnih komponent (ang. Principal Component Analysis), s katero smo: (1) odpravili koreliranost, (2) zmanjšali številčnost in (3) ohranili informacijsko moč vhodnih spremenljivk (prvi dve PCA komponenti pojasnujeta 72% variabilnosti vseh spremenljivk). Nadaljevali smo z metodo razvrščanja z voditelji (ang. KMeans clustering) pri čemer smo uporabili prostor 1. in 2. komponente analize PCA. Rezultat je razvrstitev merilnih dni v skupine z značilno podobnimi vrednostmi izbranih meteoroloških kazalcev. V našem primeru smo na ta način lahko ločili tri vremenske tipe, ki po lastnostih močno spominjajo na ciklonalni (ci), anticiklonalni (ac) in advektivni tip (ad) iz Čadeževe klasifikacije (Čadež 1949), ki je sicer temeljila na vizualnem opazovanju. Analizo razvrščanja z voditelji smo v praksi trikrat ponovili saj smo prvič upoštevali povprečno temperaturo zraka in ostale kazalce, drugič maksimalno temperaturo zraka in ostale kazalce in tretjič minimalno temperaturo zraka in ostale kazalce. Slednje smo potrebovali saj smo v nadaljevanju analize primerjali povprečno, maksimalno in minimalno jakost pojava MTO po različnih vremenskih tipih, mesecih in sezonah v mestu Ljutomer.

2.4 Jakost MTO

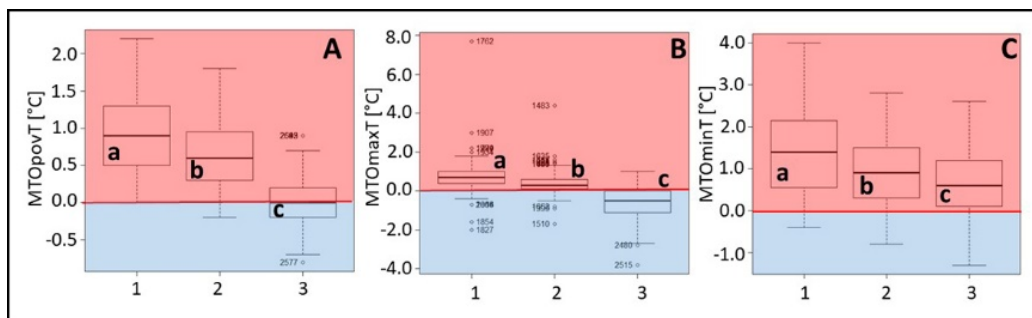
Jakost pojava MTO dobimo, če od meritev temperature zraka v urbani strukturi odštejemo meritve temperature zraka iz ozadja (nepozidana=ruralna okolica). Pravzaprav smo slednje storili za vsak obravnavani dan v analizi (N=344). K temu smo dodali še faktorje vremenski tip (ci, ac in ad), mesec in sezona. V nadaljevanju smo primerjali jakost MTO v treh lokalnih podnebnih conah po vremenskem tipu in sezoni. Uporabili smo enosmerno in večsmerno analizo variance (ang. ANOVA) in Tukey-ev preizkus primerjave parov v programskem okolju R (R Development Core Team 2020).

3. Rezultati in diskusija

3.1 Jakost MTO in lokalne podnebne cone mesta

Dosedanji rezultati študij MTO v mestu Ljutomer (Ivajnsič in sod. 2014; Ivajnsič in Žiberna 2019) so bili vezani na meritve v hladni polovici leta, saj je jakost tega atmosferskega pojava v zmernih klimatih takrat običajno največja. Tokrat obravnavamo celotno sezono in spremljamo dinamiko razvoja MTO bodisi v luči povprečnih, maksimalnih ali minimalnih dnevnih temperatur zraka. Rezultati kažejo, da je mestno jedro (1 – Glavni trg, območje največje gostote zazidave) z vidika povprečnih temperatur zraka tekom leta vedno toplejše od ruralne okolice (Slika 2A).

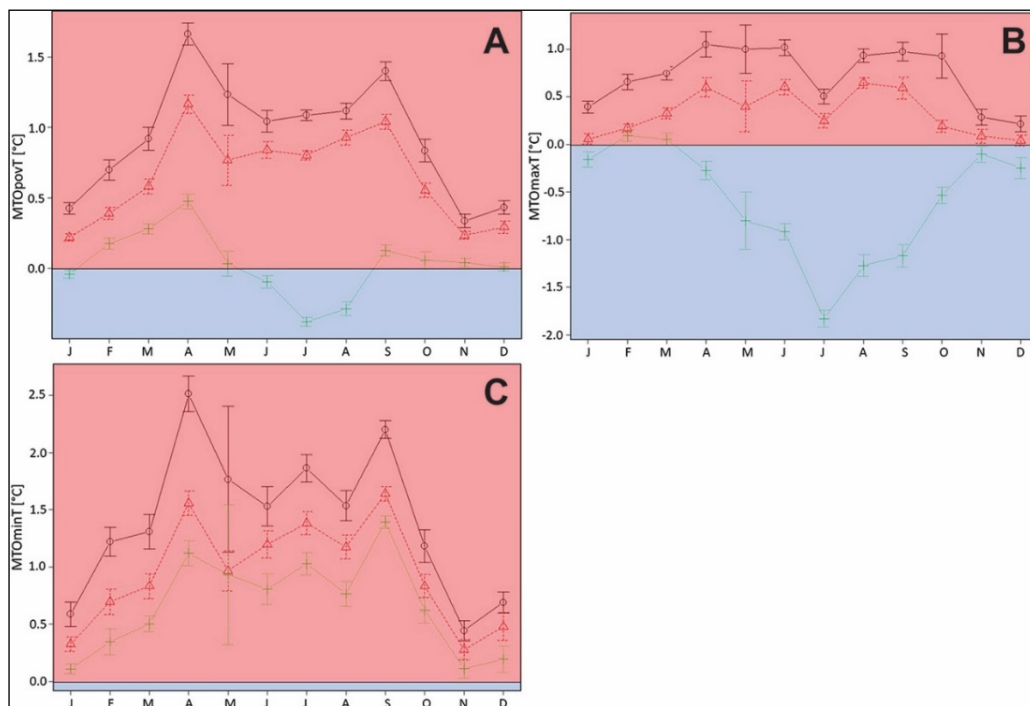
Podobno velja za industrijsko cono meta (2) z nekaj izjemami, ko je izmerjena povprečna dnevna temperatura zraka bila celo nekoliko nižja od nepozidane okolice. Pri zelenih površinah (3) ima polovica vzorčnih dni nižjo povprečno temperaturo zraka od ozadja. Predvsem gre za pozne pomladne, poletne in začetne jesenske mesece (Slika 3A). V splošnem pa se obravnavane podnebne cone (mestno jedro, industrijska cona in zelene površine) po povprečni jakosti MTO tekom celotne sezone značilno razlikujejo ($p < \alpha$, $\alpha = 0.05$). Kakorkoli, z vidika človekovega počutja so bolj pomembni temperaturni ekstremi. V Ljutomeru se lahko pojavijo vremenske situacije, ko je razlika v temperaturi zraka med mestom in okolico tudi 8, morda še več °C (Slika 2B). Običajno gre v teh primerih za anticiklonalne razmere v poletnih mesecih. Zelene površine so takrat lahko dober blažilec nastalega toplotnega stresa v Ljutomeru saj je njihova temperatura zraka lahko tudi do 4°C nižja od ruralnega ozadja. Razlika v maksimalni temperaturi zraka med zelenimi površinami in pozidanimi predeli mesta pa je lahko v teh situacijah še bistveno večja. Razlike med predli mesta, ob nastopu maksimalnih temperatur, so prav tako značilne ($p < \alpha$, $\alpha = 0.05$). Če obravnavamo minimalne dnevne temperature ugotovimo, da je ruralno ozadje po večini hladnejše od urbanega sistema (Slika 2C). Tukaj lahko pričakujemo razlike reda velikosti do 4°C.



Slika 2: Razlike v jakosti MTO v obravnavanih lokalnih podnebnih conah mesta Ljutomer glede na povprečno (A), maksimalno (B) in minimalno (C) jakost MTO. 1 = Glavni trg, 2 = industrijska cona, 3 = mestni park.

3.2 Letni režim toplotnega stresa

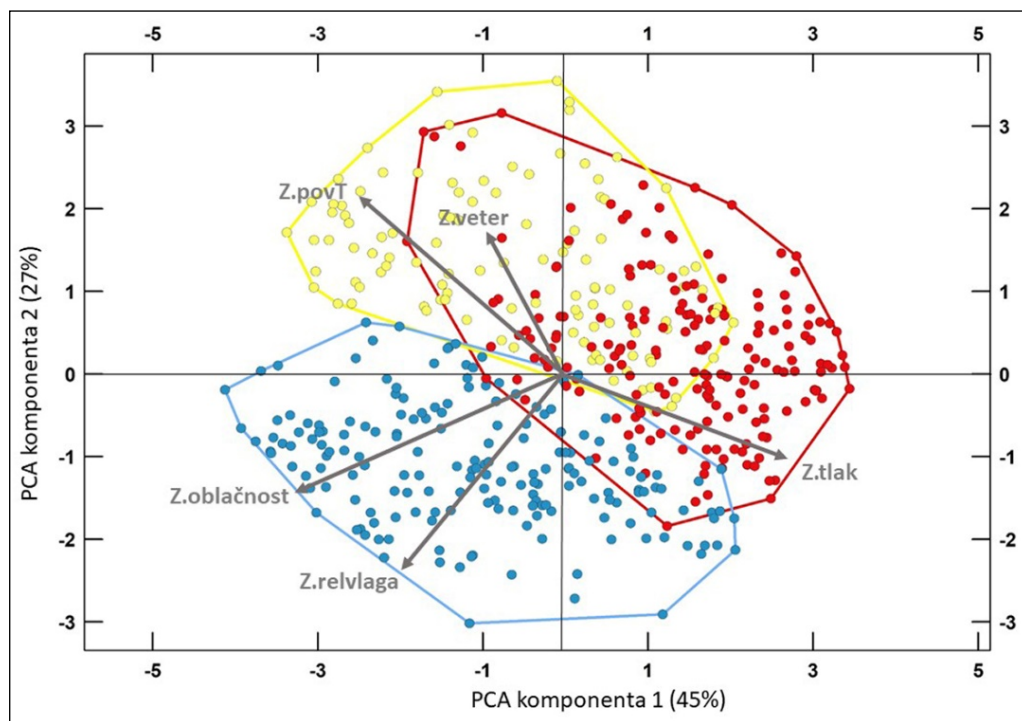
Pri mesečni analizi povprečne jakosti MTO rezultati kažejo na značilen letni režim z največjimi razlikami v oblikovanem temperaturnem polju mesta v poletnih mesecih (junij, julij in avgust) (Slika 3A). Takrat so povprečne temperature zraka zelenih površin mesta celo hladnejše od nepozidane (ruralne) okolice. Še bolj se njihov blažilen vpliv vidi ob nastopu maksimalnih dnevni temperatur zraka (Slika 3B). Praktično so parkovne površine v Ljutomeru po zgornji kulminaciji Sonca tekom celotnega leta, z izjemo februarja in marca, hladnejše od ozadja. V mestnem parku lahko tako ob nastopu vročinskih valov pričakujemo tudi za 3°C hladnejše razmere. Nasprotno velja ob nastopu minimalnih temperatur, ki so v nepozidani okolici vedno nižje v primerjavi z obravnavanimi lokalnimi podnebnimi conami mesta Ljutomer (Slika 3C).



Slika 3: Mesečni režim jakosti MTO v obravnavanih lokalnih podnebnih conah mesta Ljutomer glede na povprečno (A), maksimalno (B) in minimalno (C) jakost MTO. Črna črta s točkami = Glavni trg, rdeča črta z trikotniki = industrijska cona, zelena črta s plusi = mestni park.

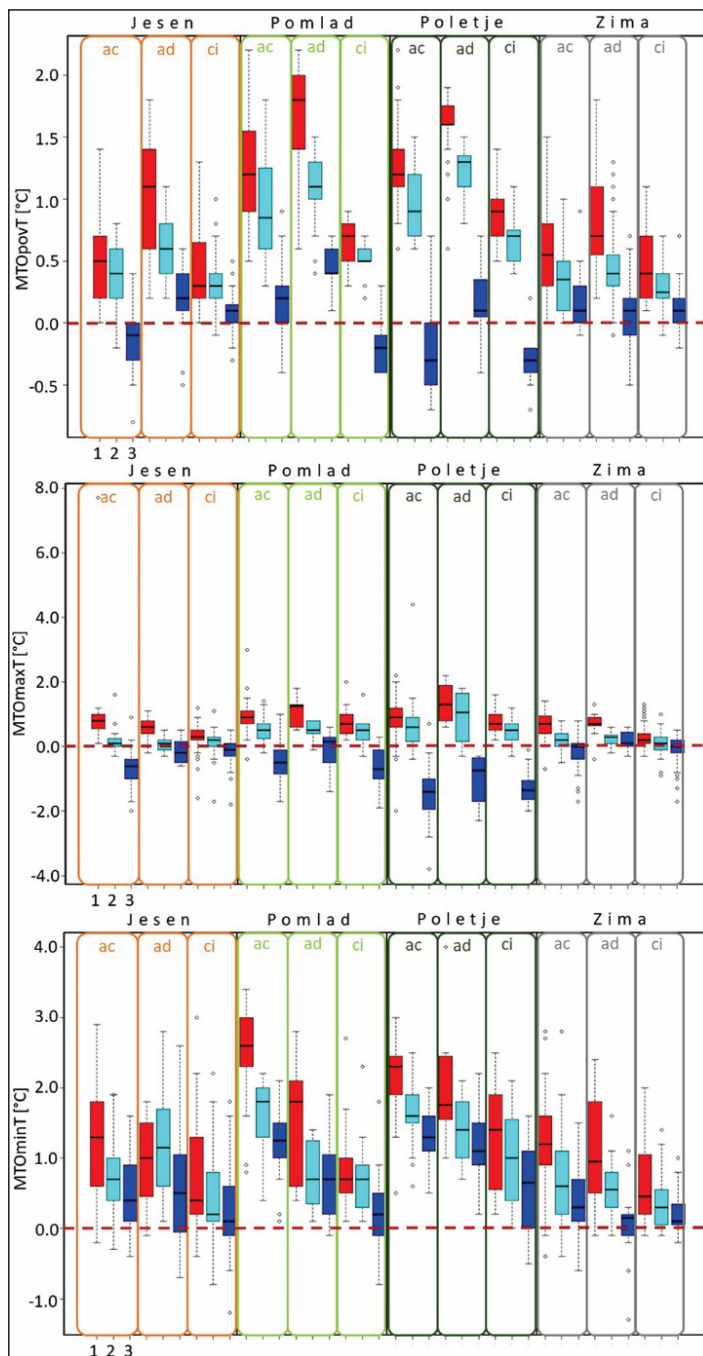
3.3 Vremenski tipi in sezonska dinamika jakosti MTO

Trenutne meteorološke razmere lahko hitro spremenijo ne samo jakost pojava MTO, temveč tudi njegovo morfologijo in prostorski obseg (Johnson in sod. 1991; Moreno-Garcia 1994; Kidder in Essenwanger 1995; Figuerola in Mazzeo 1998; Montavez in sod. 2000; Morris in sod. 2001). Študije so pokazale, da sta lahko hitrost vetra in oblačnost pomembna parametra, ki vplivata na razvoj in jakost MTO (Mihalakakou in sod. 2002; Kassomenos in Katsoulis 2006). Kakorkoli, v zmernih klimatih se običajno v anticiklonalnem vremenskem tipu (jasno nebo, rahel veter) pojav MTO okrepi. Nasprotno velja ob nastopu ciklonske cirkulaciji, kjer je kontrast med mestno in podeželsko temperaturo zraka očitno zmanjšan (atmosfersko protisevanje) (Gedzelman in sod. 2003; Kassomenos in Katsoulis 2006). Na lokalnem nivoju lahko veljajo tudi drugačni vzorci jakosti MTO. Tako sta Morris in Simmonds (2000) dokazala, da je jakost pojava MTO v Melbournu (Avstralija) najnižja ob nastopu advektivnega vremenskega tipa (ob ojačenem severozahodniku). Rezultati naših meritev in klasifikacije le-teh na podlagi izbranih meteoroloških kazalcev v vremenske tipe (Slika 4) nakazujejo, da je v Ljutomeru jakost pojava MTO ob advekciji primerljiva z anticiklonalnim vremenskim tipom, pomladi in v jeseni pa je lahko celo večja (Slika 5A). Predvsem je v takšnih razmerah toplejša mestno jedro, ki leži v zavetni legi, pred najpogostejšim JZ vetrom, na severni strani griča Kamenščak.



Slika 4: Bivariatni prikaz skupin (merilnih dni) glede na spremenljivke povprečna dnevna temperatura zraka, povprečna hitrost vetra, povprečna oblačnost, povprečna relativna vlaga ter povprečni zračni tlak. Rdeči poligon obkroža dneve z anticiklonalno zračno cirkulacijo, modri poligon obkroža dneve z vremenskimi lastnostmi podobnimi ciklonalnemu tipu. Rumeni poligon obkroža dneve kjer je značilno prisotna advekcija.

Če podrobneje analiziramo jakost pojava MTO v luči povprečnih dnevni temperatur zraka ugotovimo, da so razlike med posameznimi predeli (lokalnim podnebnimi conami) mesta, ne glede na vremenski tip, največje poleti (Slika 5A). Sledijo pomlad, jesen ter zima. Mestni trg (1), območje z največjo gostoto zazidave, je toplotno najbolj obremenjeno, še zlasti ob anticiklonalnih ali advektivnih vremenskih pogojih, v pomladanskih in poletnih mesecih. Industrijska cona (2), ki je locirana v severnem predelu mesta, je v primerjavi z centrom, v vsakem letnem času in obravnavanem vremenskem tipu, nekoliko hladnejša. Razlike me tema dvema lokacijama so največje prav v advektivnem vremenskem tipu. Zelene površine (3) imajo blažilno funkcijo predvsem poleti bodisi v anticiklonalnih, ciklonalnih in, nekoliko manj, v advektivnih vremenskih situacijah. Sicer blažilen vpliv zelenih površin na toplotni stres grajenega okolja lahko bolje ocenimo, če primerjamo razlike v temperaturnem polju ob nastopu dnevni maksimalni temperatur zraka (Slika 5B).



Slika 5: Razlike v jakosti MTO v luči povprečnih, maksimalnih in minimalnih temperatur traka glede na lokalno podnebno cono (1 = Glavni trg, 2 = industrijska cona, 3 = mestni park), vremenski tip (ac= anticiklonalni, ad= advektivni, ci= ciklonalni) in sezono.

Praktično so ob razširitvi anticiklonalne zračne cirkulacije zelene površine v Ljutomeru v vsakem letnem času ob nastopu temperaturnega maksimuma značilno hladnejše, ne samo od pozidane okolice pač pa tudi od ruralnega zaledja. Nasprotno velja za obe ostali pozidani lokalni podnebni coni mesta, kjer beležimo povišane temperature zraka v vseh sezonah in obravnavanih vremenskih tipih. Seveda ima povišana temperatura zraka v mestu v zimskem obdobju lahko tudi pozitiven učinek na ljudi (manj zmrzali na cestah in pločnikih, manj pozeb na urbani vegetaciji, manj intenzivno ogrevanje bivalnih okolij, itd.) (Ivajnsič in sod. 2014). Razlike v jakosti pojava MTO so bistveno manjše, a značilno različne glede na vremenski tip in sezono, če obravnavamo minimalne dnevne temperature zraka. Ob nastopu minimuma se nepozidano zaledje mesta venomer bolj ohladi kot pa urbana struktura Ljutomera.

Sliko 5 (A, B in C) dopolnjuje Preglednica 1, ki prikazuje povzetke večsmerne analize variance s katero smo testirali domnevo o vplivu faktorjev lokalna podnebna cona, vremenski tipi in sezona na jakost pojava MTO bodisi v luči v povprečnih, maksimalnih ali minimalnih dnevni temperatur zraka. Rezultati potrjujejo opisane ugotovitve saj imajo vsi faktorji, kot tudi nekatere njihove interakcije, statistično značilen vpliv ($p < \alpha$, $\alpha = 0.05$) na omenjene odvisne spremenljivke (jakost MTO_{pov} , MTO_{max} in MTO_{min}). Na ta način smo kvantitativno dokazali sezonsko variabilnost pojava MTO v odvisnosti od danih vremenskih pogojev značilnih za obravnavano sinoptično situacijo. Kljub temu, da mesto Ljutomer predstavlja majhen urbani sistem, se predvsem v poletju in v jeseni lahko pojavijo toplotne obremenitve (reda velikosti do $10^{\circ}C$), ki lahko škodujejo bolj ranljivi skupini prebivalcev mesta (starostniki, bolniki z respiratornimi težavami, invalidi, itd.). Ker so vročinski valovi v obdobju podnebne krize vse pogostejši (Frölicher in sod. 2018), tovrstne raziskave pridobivajo na pomenu. Urejanje prostora v urbanih sistemih, ne glede na velikost, bomo posledično v prihodnje morali bolj usmeriti v blaženje vse večjega toplotnega stresa, ki ga lahko pričakujemo v drugi polovici 21. stoletja.

Preglednica 1: Povzetek kazalcev večsmerne analize variance.

Parameter	Faktor	Vsota kvadratov	Stopinje prostosti	F vrednost	P vrednost	
MTO _{pov} [°C]	Lokalna podnebna cona	141.8	2	804.3	<2.2E-16	***
	Vremenski tip	18.6	2	105.3	<2.2E-16	***
	Sezona	26.4	3	99.8	<2.2E-16	***
	Lokalna podnebna cona:Vremenski tip	3.9	4	11	1.05E-08	***
	Lokalna podnebna cona:Sezona	24.2	6	45.8	<2.2E-16	***
	Vremenski tip:Sezona	8	6	15.1	<2.2E-16	***
	Lokalna podnebna cona:Vremenski tip:Sezona	1.2	12	1.1	0.3466	
	Ostanki	87.8	996			

Oznaka značilnosti: 0 "****" 0.001 "***" 0.01 "**" 0.05 "*"

Se nadaljuje...

Preglednica 1 (nadaljevanje): Povzetek kazalcev večsmerne analize variance.

Parameter	Faktor	Vsota kvadratov	Stopinje prostosti	F vrednost	P vrednost	
MTO _{max} [°C]	Lokalna podnebna cona	315.1	2	532.5	<2.2E-16	***
	Vremenski tip	5.1	2	8.7	0.0002	***
	Sezona	9.9	3	11.2	3.30E-07	***
	Glavni trg: Vremenski tip	9.3	4	7.9	3.01E-06	***
	Lokalna podnebna cona: Sezona	79.9	5	45	<2.2E-16	***
	Vremenski tip: Sezona	1.8	5	1	0.4028	
	Lokalna podnebna cona: Vremenski tip: Sezona	6.7	12	1.9	0.0327	*
	Ostanki	294.7	996			
MTO _{min} [°C]	Lokalna podnebna cona	91.3	2	135.2	<2.2E-16	***
	Vremenski tip	84.7	2	125.6	<2.2E-16	***
	Sezona	116.2	3	114.8	<2.2E-16	***
	Lokalna podnebna cona: Vremenski tip	4.6	4	3.4	0.0087	**
	Lokalna podnebna cona: Sezona	3.7	5	1.8	0.0946	
	Vremenski tip: Sezona	24.7	6	12.2	2.92E-13	***
	Lokalna podnebna cona: Vremenski tip: Sezona	5.7	12	1.4	0.1616	
	Ostanki	336.1	996			

Oznaka značilnosti: 0 "****" 0.001 "***" 0.01 "**"

4. Zaključek

Letna oziroma sezonska dinamika pojava MTO v mestih je v splošnem dokaj slabo preučena. Rezultati te študije dokazujejo, da je lahko jakost pojava MTO tudi v malih urbanih sistemih, ob anticiklonalni ali advektivni zračni cirkulaciji v poletnih mesecih, zelo visoka (tudi 8, morda celo več °C). Podatki kažejo, da ima mesto Ljutomer najintenzivneje razvit MTO v poletnih mesecih kar je sicer značilnost naših submediteranskih mest. Še sploh je takšen rezultat zaskrbljujoč v luči vse pogostejših vročinskih valov kot posledice podnebnih sprememb. Kakorkoli, interakcija med pojavom MTO in podnebnimi spremembami je dvostranska. Prvič, globalno segrevanje povečuje že tako ali tako višje temperature v urbanem okolju kjer se pojavlja MTO. Drugič, omilitvene strategije za blaženje pojava MTO lahko pomagajo mestni skupnosti pri omejitvi vplivov podnebnih sprememb saj lahko hkrati zmanjšajo emisije toplogrednih plinov, ki povzročajo podnebne spremembe.

Večina prizadevanj za blaženje pojava MTO lahko prinaša številne prednosti, vključno z nižjimi temperaturami, manjšim povpraševanjem po električni energiji, manjšo onesnaženostjo zraka, manj emisij toplogrednih plinov in manj škodljivih vplivov na zdravje človeka. Hkrati ta prizadevanja pomagajo tudi pri reševanju podnebnih sprememb in izboljšanju kakovosti zraka v mestih. Poleg tega lahko ti isti ukrepi pomagajo prebivalcem mesta, da postanejo bolj odporni proti številnim negativnim

učinkom podnebnih sprememb. Tako na primer zasaditev dreves, ki dajejo senco ali namestitve zelenih oziroma tako imenovanih "hladnih" streh lahko zmanjša temperaturo površja in zraka, hkrati pa zmanjša količino energije, potrebne za hlajenje zgradb, kar vodi v izboljšano zanesljivost električnega sistema, še zlasti ob nastopu vse pogostejših vročinskih valov (Žiberna in Ivajnsič 2019). Zelene strehe in nekatere vrste "hladnih" pločnikov lahko zmanjšajo jakost MTO, hkrati pa zmanjšujejo odvod vode in omejujejo poplavne nevarnosti v primeru močnih neviht z dežjem. Povečanje drevesnih krošenj pa služi kot zaščita proti vetru, eroziji in meteornim vodam. Ustrezno locirane zelene in vodne površine lahko hladijo urbana območja. Na ta način pa se zmanjšuje potreba po prevozu s prevoznimi sredstvi na fosilna goriva do hladnejših predelov mesta.

Če želi človeštvo zmanjšati rekordne emisije CO₂ (420 ppm, 16.11.2020) in nekako ublažiti vpliv podnebnih spremembe, bo potrebno sprejeti številne večplastne omilitvene in prilagoditvene ukrepe. Začeti s strategijami blaženja pojava MTO v gosto naseljenih območjih je zagotovo "zadetek v polno", saj bodo na ta način protiukrepi izvedeni natanko pri izvoru emisij toplogrednih plinov.

Zahvala

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

Literatura

- Al-Hatab, M., Samir, A. in Taha, L. 2017: Monitoring and assessment of urban heat islands over the southern region of Cairo Governorate, Egypt. *EJRS*.
- Balazs, B., Unger, J., Gal, T., Sümeghy, Z., Geiger, J. in Szegedi, S. 2009: Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modelling, verification and extension. *Meteorological Applications* 16, 275–287.
- Čadež, M. 1949: O pretvaranju energije u atmosferi: Sur la transformation de l'énergie dans l'atmosphère. Savezna uprava Hidrometeorološke službe pri Vladi FNRJ.
- Evola, G., Gagliano, A., Fichera, A., Marletta, L., Martinico, F., Nocera, F. in Pagano, A. 2017: UHI effects and strategies to improve outdoor thermal comfort in dense and old neighborhoods. *Energy Procedia* 134, 629–701.
- Figuerola, P.I. in Mazzeo, N.A. 1998: Urban–rural temperature differences in Buenos Aires. *International Journal of Climatology* 18, 1709–1723.
- Frölicher, T. L., Fischer, E. M. in Gruber, N. 2018: Marine heatwaves under global warming. *Nature* 560(7718), 360–364.
- Gedzelman, S.D., Austin, S., Cermak, R., Stefano, N., Partridge, S., Quesenberry, S. in Robinson, D.A. 2003: Mesoscale aspects of the urban heat island around New York City. *Theoretical and Applied Climatology* 75, 29–42.
- Ivajnsič, D., Kaligarić, M. in Žiberna, I. 2014: Geographically weighted regression of the urban heat island of a small city. *Applied Geography* 53, 341–353.
- Ivajnsič, D. in Žiberna, I. 2019: The effect of weather patterns on winter small city urban heat islands. *Meteorological Applications* 26(2), 195–203.
- Johnson, G.T., Oke, T.R., Lyons, T.J., Steyn, D., Watson, I.D. in Voogt, J.A. 1991: Simulation of surface urban heat islands under "ideal" conditions at night—part I: theory and tests against field data. *Boundary-Layer Meteorology* 56, 275–294.
- Kartografska podlaga Google satelit. Pridobljeno s vtičnikom QuickMapServices QGIS, Map data ©2015 Google.

- Kassomenos, P.A. in Katsoulis, B.D. 2006: Mesoscale and macroscale aspects of the morning urban heat island around Athens, Greece. *Meteorology and Atmospheric Physics* 94, 209–218.
- Kidder, S.Q. in Essenwanger, O.M. 1995: The effect of clouds and wind on the difference in nocturnal cooling rates between urban and rural areas. *Journal of Applied Meteorology* 34, 2440–2448.
- Lee, Y.Y., Din, M.F.M., Ponraj, M., Noor, Z.Z., Kenzo, I. and Chelliapan, S. 2017: Overview of urban heat island (UHI) phenomenon towards human thermal comfort. *Environmental Engineering in Management Journal* 16(9), 2097–2112.
- Li, J. J., Wang, X. R., Wang, X. J., Ma, W. C. in Zhang, H. 2009: Remote sensing evaluation of urban heat island and its spatial pattern of the Shanghai metropolitan area, China. *Ecological Complexity* 6(4), 413-420.
- Medrežje 1: <https://data.worldbank.org/>, povzeto 20.12.2020
- Mihalakakou, G., Flocas, H.A., Santamouris, M. in Helmis, C. 2002: Application of neural networks to the simulation of the heat island over Athens, Greece, using synoptic types as a predictor. *Journal of Applied Meteorology*, 41 519–527.
- Montavez, J.P., Rodriguez, A. in Jimenez, J.I. 2000: A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology* 20, 899–911.
- Moreno-Garcia, M.C. 1994: Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology* 14, 705–710.
- Morris, C.J.G. in Simmonds, I. 2000: Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. *International Journal of Climatology* 20, 1931–1954.
- Morris, C.J.G., Simmonds, I. in Plummer, N. 2001: Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology* 40, 169–182.
- Oke, T. R. 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108(455), 1-24.
- Oke, T.R. in Fuggle, R.F. 1972: Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Boundary-Layer Meteorology* 2(3), 290–308.
- O'Malley, C., Piroozfar, P., Farr, E. R. in Pomponi, F. 2015: Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis. *Sustainable Cities and Society* 19, 222-235.
- R Development Core Team. 2008: R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, ISBN 3-900051-07-0. pridobljeno na: <http://www.Rproject.org> [Accessed 25th Januar 2021].
- Rogan, J., Ziemer, M., Martin, D., Ratick, S., Cuba, N. in DeLauer, V. 2013: The impact of tree cover loss on land surface temperature: a case study of Central Massachusetts using Landsat thematic mapper thermal data. *Applied Geography*, 45, 49–57.
- Stull, R. B., 1988: An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht. Kluwer.
- Zhang, H., Qi, Z.F., Ye, X.Y., Cai, Y.B., Ma, W.C. in Chen, M.N. 2013: Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China. *Applied Geography*, 44, 121–133

ANNUAL DYNAMICS OF THE UHI PHENOMENON IN A SMALL URBAN SYSTEM

Summary

The annual or seasonal dynamics of the UHI phenomenon in small cities is in general poorly studied. The results of this study prove that UHI intensity in small urban systems, under anticyclonic or advective air circulation patterns in summer, can reach very high values (8, perhaps even more °C). However, such a result should rise citizens' attention considering the increasing frequency of heat waves as a result of climate change. Moreover, the interaction between the UHI phenomenon and climate change has two sides. First, global warming is already increasing average air temperatures thus affecting the urban-rural temperature anomaly. Second, adaption strategies to mitigate the UHI phenomenon can help urban communities limit the impacts of climate change by simultaneously reducing greenhouse gas emissions. Most efforts to mitigate UHIs can bring a number of benefits, including lower temperatures, lower electricity demand, less air pollution, less greenhouse gas emissions and fewer human health problems. At the same time, these efforts are also helping to tackle climate change and improve air quality in cities. In addition, these same measures can help citizens become more resilient to the many negative effects of climate change. For example, planting trees that provide shade or installing green or so-called "cold" roofs can reduce surface and air temperatures while reducing the amount of energy needed to cool buildings, leading to improved electrical system reliability, especially from the perspective of more frequent heat waves (Žiberna in Ivajnšič 2019). Green roofs and some types of "cold" sidewalks can reduce UHI magnitude and contribute to flood prevention under severe rainstorm events. Increasing tree canopies, however, serves as protection against wind, erosion and intense showers. Properly located green areas and water bodies' can cool urban areas. In this way, the need for fossil fuel transport to colder parts of the city is reduced. In order to reduce the record braking CO₂ emissions (420 ppm, 16.11.2020) and somehow mitigate the impact of climate change at the global level, several multifaceted mitigation and adaptation measures must be realized as soon as possible. Starting with UHI mitigation strategies in densely populated areas is certainly a "bull's eye", as in this way countermeasures will be implemented exactly at the source of the greenhouse gas emissions.