

ISTRAŽIVANJE MIKROKLIMATSKIH TERMALNIH USLOVA U RAZLIČITIM URBANIZOVANIM PROSTORIMA: STUDIJE SLUČAJA IZ ODABRANIH GRADOVA U JUGOISTOČNOJ EVROPI

**Stevan Savić¹, Boško Milovanović², Jelena Dunjić³, Daniela Arsenović⁴,
Milica Vasić⁵, Ivan Šećerov⁶**

Apstrakt: Povećani toplotni rizik u gradovima ugrožava zdravlje i blagostanje urbanog stanovništva i podstaknut je klimatskim promenama i intenzivnom urbanizacijom. Zbog toga, ukoliko planiramo da povećamo kapacitete gradova kako bi bili klimatski otporniji u 21. veku, potrebno je detaljnije praćenje urbane klime na lokalnom i mikro nivou. Za ovo istraživanje sprovedi smo kampanje merenja mikroklimе u urbanim sredinama četiri grada (Beograd, Novi Sad, Banja Luka i Trebinje), tokom toplih letnjih dana 2021. i 2022. godine. Ukupno je izabrano 38 mernih mesta u različitim urbanističkim okruženjima i različitim lokalnim klimatskim zonama. Za termalni monitoring (temperatura vazduha – T_a i globalna temperatura – T_g) korišćen je Kestrel Heat Stress Tracker senzor i automatske meteorološke stanice, a mi smo koristili 10-minutne skupove vrednosti za dalje procene. Dobijeni rezultati su pokazali izrazite termalne razlike (u nekim slučajevima i više od 10°C) između gusto izgrađenih područja sa nepropusnom površinom i zelenih površina (uglavnom urbanih parkova). Istovremeno, temperaturne razlike između izgrađenih zona su manje. Konačno, rezultati su pokazali da senke i kratkotlasno i dugotalasno zračenje igraju glavnu ulogu u termalnoj varijabilnosti. Direktno i reflektovano zračenje na jednom mestu merenja povećalo je vrednosti T_a i T_g do 10°C, u poređenju sa drugim mernim mestom koje je bilo u senci.

Ključne reči: klimatske promene, urbana klima, mikroklima, termalni uslovi, urbanizacija

UVOD

Brojne objavljene studije su potvrdile da su termalni uslovi pre svega uslovljeni različitim urbanim dizajnom, i taj uticaj se javlja na lokalnom (Lehnert i sar., 2021) i na mikro nivou (Middel i Krayenhoff, 2019). Urbanizacija direktno utiče na temperaturu (temperatura vazduha i temperatura površine), vlažnost vazduha, brzinu vetra, sunčevo zračenje i druge meteorološke parametre, stvarajući urbanu klimu specifičnu za grad. Koristeći koncept lokalnih klimatskih zona (LCZ) (Stewart i Oke, 2012), moguće je izvršiti procenu toplotnog opterećenja neke lokalne sredine (koja se prostire od nekoliko stotina kvadratnih metara do nekoliko kilometara), koju karakteriše ujednačena urbanizaciona struktura, građevinski materijali, saobraćaj i ljudske aktivnosti. Međutim, termalne razlike se mogu otkriti i na mikro nivou, odnosno na lokacijama koje se nalaze u istom LCZ, a ne samo u različitim LCZ (Shi i sar., 2016; Skarbit i sar., 2017; Quanz i sar., 2018; Shi i sar., 2018; Milošević i sar., 2022). Prema objavljenim rezultatima, toplotni talasi u letnjim periodima su generalno povezani sa negativnim efektima na javno zdravlje u gradovima (Tong i sar., 2021; Tuholske i sar., 2021), ali neki rezultati pokazuju potencijalno pozitivan uticaj toplotnih talasa u zimskom periodu u evropskim

¹ Univerzitet u Novom Sadu - Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, Srbija, stevan.savic@dgt.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4297-129X

² SANU, Geografski institut "Jovan Cvijić", Đure Jakšića 9, Beograd, Srbija, b.milovanovic@gi.sanu.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7080-7334

³ Univerzitet u Novom Sadu - Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, Srbija, jelena.dunjic@dgt.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-5427-378X

⁴ Univerzitet u Novom Sadu - Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, Srbija, daniela.arsenovic@dgt.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-6535-0330

⁵ Univerzitet u Novom Sadu - Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, Srbija, student master studija

⁶ Univerzitet u Novom Sadu - Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, Srbija, ivan.secerov@dgt.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0003-0196-0989

regionima koje karakterišu intenzivnom urbanizacijom (Macintyre i sar., 2021). Kombinacija intenzivnih toplotnih talasa i toplih dana (hot days) tokom leta, i procesa urbanizacije u gradovima vodi ka modifikovanim termalnim uslovima u gradovima u poređenju sa klimom u ruralnim/neurbanizovanim sredinama (Oke i sar., 2017). Zbog toga, globalni uticaji klimatskih promena primoravaju gradove da budu otporniji na klimu i da budu više klimatski prilagodljiviji (Jänicke i sar., 2021). Na osnovu toga, praćenje klime na mikro nivou može biti dragoceno za buduće strategije urbanog dizajna i planiranja, a u skladu sa klimatskim promenama. Iz tog razloga, osnovni ciljevi ovog istraživanja su: a) praćenje mikrometeoroloških uslova u različitim urbanim sredinama, kao što su gusto izgrađeno područje, industrijska zona, urbani park ili urbana park šuma, tokom toplih letnjih dana (hot days); b) detaljna prostorna i vremenska analiza termalnih uslova (temperatura vazduha - T_a i globalna temperatura - T_g) dobijena iz terenskih merenja; i c) razmatranje dobijenih rezultata termalnog stanja u gradovima regiona kako bi se doprinelo boljem prilagođavanju klimatskim promenama.

RESEARCH AREA AND METHODS

Područje istraživanja obuhvata dve zemlje, Srbiju (SRB) i Bosnu i Hercegovinu (BIH), a nalazi se u regionu Jugoistočne Evrope. Klima istraživačkog područja određena je topografijom regiona. Stoga se godišnja temperatura vazduha kreće od 9,5 °C na višim nadmorskim visinama Dinarida do 17 °C duž Jadranskog mora (na osnovu podataka od 2000. do 2020. godine), a leta mogu biti veoma vruća i suva, sa češćim i intenzivnijim toplotnim talasima, posebno u krajevima blizu jadranske obale, ili u dolinama i ravninama (Đurđević i sar., 2023). Većina istraživačkog područja ima Cfb i Cfa kontinentalnu klimu (umerena klima, potpuno vlažna, topla leta, sa najmanje 4 meseca prosečne temperature vazduha iznad 10°C) prema Keppen-Gajgerovom sistemu klasifikacije klime (Kottek i sar., 2006).

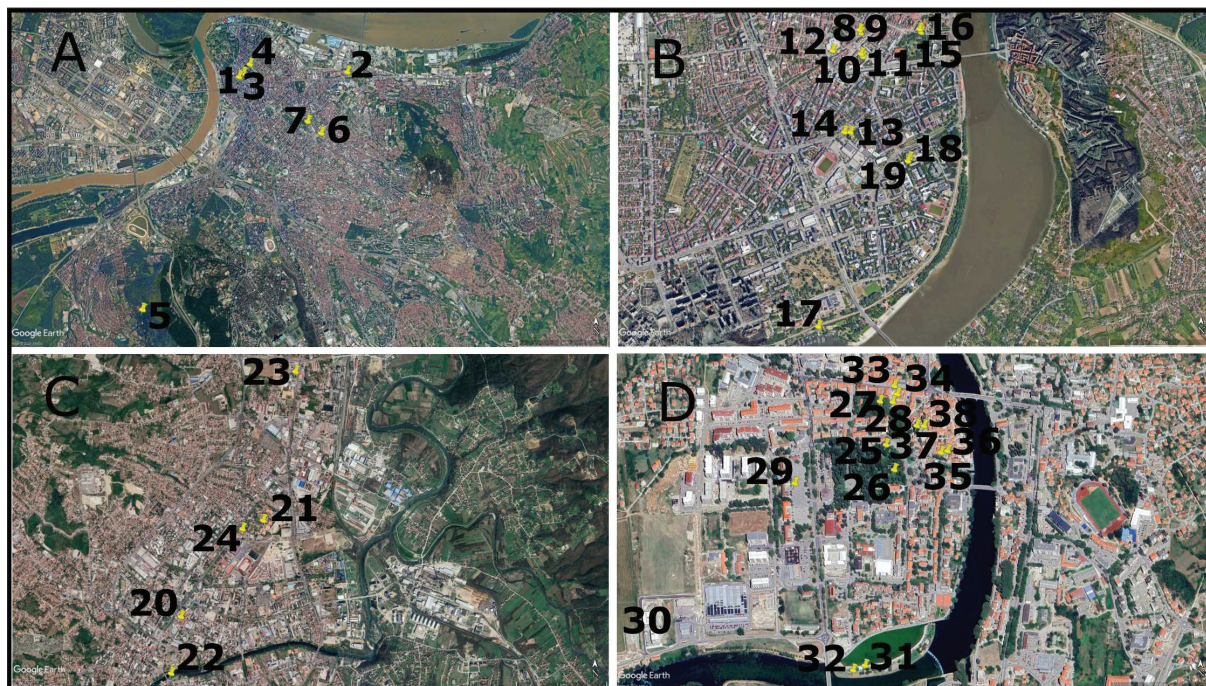
Mjerenja mikroklimе su obavljena na 38 lokacija u okviru četiri grada (Beograd, Novi Sad, Banja Luka i Trebinje) (Slika 1), a ovi gradovi se nalaze u Srbiji i Bosni i Hercegovini (odnosno Republici Srpskoj). Odabrane merne lokacije odlikuju se različitim urbanim dizajnom kao što su: a) centar grada – gusto izgrađene „sive“ oblasti; b) kanjonske ulice; c) Univerzitetski kampus – „sivo-zelene“ oblasti; d) mali urbani trgovi – popločane i 'sive' površine; e) stambena područja – „sivo-zelene“ oblasti; f) urbani parkovi ili urbane šume – „zelene“ površine; g) obale reka – „zelenoplava“ područja itd., a ova merenja su vršena uz pretpostavku da svaki tip izgrađenosti ili zemljišnog pokrivača ima različit termalni otisak.

Stoga su u ovoj studiji za termalnu analizu korišćeni podaci o temperaturi vazduha (T_a), kao i podaci o globalnoj temperaturi (T_g). T_g se naziva globalna temperatura ili temperatura crne kugle i podstavlja toplotnu vrednost neposrednog okruženja, simulirajući toplotne uslove koje oseća ljudsko telo (Testo Globe senzor, 2024).

Kampanje praćenja mikroklimе, u sva četiri grada, organizovane su tokom letnjih sezona 2021. i 2022. godine, odnosno u junu, julu ili avgustu (Tabela 1), tačnije tokom „vrućih dana“. Na osnovu opšte definicije, „vruć dan“ (hot day) je dan kada je maksimalna temperatura vazduha najmanje 30°C, a ovaj prag je reprezentativan za klimatske uslove u Nemačkoj i Centralnoj Evropi (Deutscher Wetterdienst, 2024). Vreme merenja je bilo tokom dana, odnosno od 8 ili 10h CEST do 16 ili 20h CEST, a u nekoliko slučajeva vreme praćenja je produženo na 21h ili 24h CEST. Tokom kampanje praćenja mikroklimatskih termalnih uslova korišćeni su Kestrel 5400 Heat Stress trackeri i automatske meteorološke stanice.

Za analizu dobijenih podataka korišćene su deskriptivne statističke analize, zatim t-test i ANOVA, kao i odgovarajući post hoc testovi. Svi statistički značajni rezultati prikazani su na nivou značaja od $r=0,05$.

Istraživanje mikroklimatskih termalnih uslova u različitim urbanizovanim prostorima: studije slučaja iz odabranih gradova u jugoistočnoj Evropi



Prilog 1. Lokacije 38 mernih lokacija u selektovanim gradovima: a) Beograd; b) Novi Sad; c) Banja Luka; d) Trebinje (brojevi od 1 do 38 su navedeni prema nazivima lokacija u Tabeli 1).

Tabela 1. Osnovne informacije o 38 mernih lokacija u četiri selektovana grada.

| Br. | Grad/Država | Naziv lokacije | Skraćenica | Dan (dd.mm.yyyy) / *vreme merenja (**CEST) |
|-----|------------------|--------------------------|------------|--|
| 1. | Beograd (SRB) | Topličin Venac | BG_TV | 18.6.2021/10-18h; 28.8.2021/12-21h |
| 2. | Beograd (SRB) | Pančevački most | BG_PM | 18.6.2021/10-18h |
| 3. | Belograd (SRB) | Đure Jakšića | BG_DJ | 23.8.2021/12-21h |
| 4. | Beograd (SRB) | Studentski park | BG_SP | 23.8.2021/12-21h |
| 5. | Beograd (SRB) | Košutnjak | BG_KO | 18.6.2021/10-18h |
| 6. | Beograd (SRB) | Park Ćirila i Metodija | BG_CM | 21.6.2022/10-18h |
| 7. | Beograd (SRB) | Park Mali Taš | BG_MT | 21.6.2022/10-18h |
| 8. | Novi Sad (SRB) | Katolička Porta – sun | NS_KS | 13.7.2021/15-21h; 29.7.2022/12-18h; 17.8.2022/8-12h+15-20h |
| 9. | Novi Sad (SRB) | Katolička Porta – shadow | NS_KH | 29.7.2022/12-18h |
| 10. | Novi Sad (SRB) | Hotel Vojvodina – shadow | NS_VH | 17.8.2022/8-12h+15-20h |
| 11. | Novi Sad (SRB) | Hotel Vojvodina - open | NS_VO | 17.8.2022/8-12h+15-20h |
| 12. | Novi Sad (SRB) | Pozorični trg | NS_PT | 17.8.2022/8-12h+15-20h |
| 13. | Novi Sad (SRB) | SPENS – shadow | NS_SH | 30.6.2022/8-12h+15-21h |
| 14. | Novi Sad (SRB) | SPENS – sun | NS_SS | 30.6.2022/8-12h+15-21h |
| 15. | Novi Sad (SRB) | Dunavski park – shadow | NS_DH | 13.7.2021/15-21h; 17.8.2022/8-12h+15-20h |
| 16. | Novi Sad (SRB) | Dunavski park – sun | NS_DS | 17.8.2022/8-12h+15-20h |
| 17. | Novi Sad (SRB) | Dunavski kej | NS_DK | 13.7.2021/15-21h |
| 18. | Novi Sad (SRB) | Kampus Atrijum – shadow | NS_AH | 30.6.2022/8-12h+15-21h |
| 19. | Novi Sad (SRB) | Kampus Atrijum – open | NS_AO | 30.6.2022/8-12h+15-21h |
| 20. | Banja Luka (BIH) | Centar | BL_CE | 22.6.2022/9-24h; 23.6.2022/9-18h; 24.6.2022/9-18h |
| 21. | Banja Luka (BIH) | Park | BL_PA | 22.6.2022/9-24h; 23.6.2022/9-18h; 24.6.2022/9-18h |
| 22. | Banja Luka (BIH) | Reka Vrbas | BL_RV | 22.6.2022/9-18h; 23.6.2022/9-18h; 24.6.2022/9-18h |
| 23. | Banja Luka (BIH) | Budžak | BL_BU | konstantna višegodišnja merenja |

| | | | | |
|-----|------------------|-------------------------------|-------|------------------------------------|
| 24. | Banja Luka (BIH) | Prirodno-matematički fakultet | BL_PM | konstantna višegodišnja merenja |
| 25. | Trebinje (BIH) | Park – shadow | TB_PH | 12.7.2022/10-16h; 13.7.2022/10-21h |
| 26. | Trebinje (BIH) | Park – sun | TB_PS | 12.7.2022/10-16h; 13.7.2022/10-21h |
| 27. | Trebinje (BIH) | Centar Platani – shadow | TB_CH | 12.7.2022/10-16h; 13.7.2022/10-21h |
| 28. | Trebinje (BIH) | Centar Platani – sun | TB_CS | 12.7.2022/10-16h; 13.7.2022/10-21h |
| 29. | Trebinje (BIH) | Visoka škola | TB_VS | 12.7.2022/10-16h |
| 30. | Trebinje (BIH) | Reka Trebišnjica | TB_RT | 12.7.2022/10-16h |
| 31. | Trebinje (BIH) | Bregovi – shadow | TB_BH | 13.7.2022/10-18h |
| 32. | Trebinje (BIH) | Bregovi – sun | TB_BS | 13.7.2022/10-18h |
| 33. | Trebinje (BIH) | u. Jovana Dučića - fountain | TB_UF | 14.7.2022/10-18h |
| 34. | Trebinje (BIH) | u. Jovana Dučića – canyon | TB_UK | 14.7.2022/10-18h |
| 35. | Trebinje (BIH) | Stari Grad Grk – shadow | TB_GH | 14.7.2022/10-18h |
| 36. | Trebinje (BIH) | Stari Grad Grk – sun | TB_GS | 14.7.2022/10-18h |
| 37. | Trebinje (BIH) | Stari Grad Kolo – shadow | TB_KH | 14.7.2022/10-18h |
| 38. | Trebinje (BIH) | Stari Grad Kolo – sun | TB_KS | 14.7.2022/10-18h |

REZULTATI INTRA-URBANIH ANALIZA

Uparednom analizom mernih lokacija u **Beogradu**, statistička metoda ANOVA pokazuje statistički značajne razlike u termalnim uslovima (T_a i T_g) u većini slučajeva. Takođe, Games-Howell test potvrđuje da između svake od mogućih kombinacija parova lokacija postoje statistički značajne razlike u srednjim vrednostima termalnih vrednosti (T_a i T_g). Na osnovu toga, rezultati pokazuju statistički značajnu razliku u temperaturama između urbane šume (Košutnjak) i najurbanizovanijih delova Beograda, gde se pojavljuje T_a razlika od čak 4,8°C. Takođe, u svim slučajevima se javlja statistički značajna razlika između temperatura u urbanom parku (Studentski park) i urbanizovanih delova kao što je ulica Đure Jakšića ili Topličin venac. Prosečne T_g vrednosti u ove dve lokacije su više od 2,6°C do 4,3°C nego u Studentskom parku. Istovremeno, značajne temperaturne razlike se javljaju i između lokacija u urbanim parkovima koje karakterišu različiti koncepti zelenih površina (primer parka Ćirila i Metodija i parka Mali Taš), gde je uočena statistički značajna razlika u T_a od 1,8°C, a kada je reč o T_g razlika ide i do 12,0°C, odnosno za toliko su viši termalni uslovi u parku Ćirila i Metodija jer je to otvoreni park sa retkim rasporedom drveća i velikim površinama pod direktnim sunčevim zračenjem.

Mikroklimatska merenja u **Novom Sadu** pokazala su statistički značajne razlike u termalnim uslovima (T_a i T_g) između lokacija u parkovima ili urbanim zelenim džepovima, kao i pored Dunava, u odnosu na visoko urbanizovane zone kao što su uža centar grada ili velike površine sa veštačkom podlogom (prostor oko Spensa). Kada su u pitanju T_a razlike između lokacija pored Dunava i Dunavskog parka (koji imaju veoma slične podatke) u odnosu na Katoličku portu, javljaju se statistički značajne razlike i one idu do 2,9°C u proseku. Takođe, Games-Howell test je pokazao da postoji statistički značajna razlika i između lokacija koje se nalaze u urbanizovanim zonama, a koje se međusobno razlikuju u prisutnosti zelenih površina i senki od drveća i okolnih objekata. Tako se značajne razlike u T_a i T_g (u ovom slučaju čak i do 10,9°C) javljaju između lokacija Kampus Atrijum hlad/Spens hlad/Kampus Atrijum sunce i Spens sunce. Istovremeno, merne lokacije na prostorima koje imaju minimalno zelenila i maksimalnu površinu pod betonom ili behatonom, kao što su Pozorišni trg, Katolička porta, Hotel Vojvodina (sunce) imaju statistički značajne više termalne uslove u odnosu na lokacije koje su u hladu ili u parkovima. Međutim, u odnosu na ove lokacije ne uočava se statistički značajna razlika u odnosu na osunčane lokacije u parkovima, u našem slučaju u odnosu na Dunavski park sunce.

Monitoring u **Banja Luci** vršen je na pet različitih lokacija, i tokom tri dana merenja, uočene su generalne statistički značajne razlike u termalnim uslovima između lokacija koje su se nalazile u urbanom parku i pored reke Vrbas, sa ostalim lokacijama koje su se nalazile u intenzivno urbanizovanim zonama (centar grada – merna lokacija Centar, i Budžak – merna lokacija u rezidencijalnom delu). T_a razlike između lokacija u apsolutnim vrednostima nisu velike i kreću se do 2,5°C, dok razlike u T_g vrednostima između mernih lokacija imaju više vrednosti i najveće razlike prelaze 7,0°C i najčešće se javljaju između parka i centra.

Merenjem na 16 različitim lokacija u **Trebinju**, tokom toplotnog talasa 2022. godine, pokazalo se da senke u urbanim sredinama imaju veliku ukogu u regulaciju termalnih uslova. Tako na lokaciji Centar Platani hlad se statistički značajno razlikuje, odnosno ta lokacija je hladnija je za T_a 1,2°C do 1,8°C, u odnosu na lokacije Centar Platani Sunce, Park Sunce i Visoka škola. Naravno, te razlike nisu tako visoke u odnosu na lokacije pod hladom u urbanom parku ili pored reke Trebišnjice, gde razlike idu i preko 2,0°C. Kada poredimo vrednosti T_g , osim što su statistički značajne, razlike u apsolutnim vrednostima su više, pa je tako na lokacijama Centar Platani Hlad i Park Hlad gde su T_g vrednosti niže od 8,0°C do čak 14,9°C u odnosu na lokacije koje su izložene direktnom sučevom zračenju. Interesantna situacija je u Starom gradu u Trebinju gde se statistički značajna razlika javlja isključivo između lokacija koje su u hladu (od drveća ili okolnih objekata) i onih koje su na suncu, odnosno locirane na otvorenim prostorima.

DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Kampanje mikrometeoroloških merenja koje su sprovedene u odabranim gradovima tokom toplih letnjih dana i rezultati su potvrdili opštu konsataciju da različiti urbani dizajni imaju specifične termalne karakteristike. Dobijeni rezultati su pokazali da gusto izgrađene površine sa višespratnicama, gusto izgrađene površine sa objektima lake industrije, kao i zelene površine sa drvećem imaju različite termičke uslove tokom dana/večeri/zalaska sunca, a u većini slučajeva ove razlike su statistički značajne.

Rezultati ove studije su pokazali da temperaturne razlike između gusto izgrađenih površina i zelenih površina mogu dostići 7°C ili više, dok su razlike između različitih izgrađenih zona oko 1-4°C, a u nekim slučajevima i veće. Prethodne studije fokusirane na T_a pokazale su da se najviše vrednosti T_a obično nalaze u urbanizovanim delovima grada. Na primer, u Lisabonu (Portugal) kompaktnija urbana područja imala su najviše temperaturne vrednosti (Oliveira i sar., 2021). Istraživačke studije su takođe analizirale urbane senke i zelene površine kao elemente koji utiču na toplotne uslove. Lelović i dr. (2016) prepoznali su urbano hladno ostrvo sa temperaturom nižom za 1°C (u Segedinu, Mađarska) ili 2 ž°C (u Novom Sadu, Srbija) u gusto izgrađenim zonama tokom letnjih dana uzrokovanih uslovima senki. Štaviše, urbani parkovi koji su blizu/ili unutar centara grada mogli bi sniziti temperaturne uslove do 1°C ili više, što je primećeno u Gentu (Belgija) (Top i sar., 2020). Takođe, možemo zaključiti da topli letnji dani koji se javljaju u periodima toplotnih talasa predstavljaju veću problem na osnovu opšte akumulacije toplote i pojave spoljašnjeg toplotnog opterećenja u naseljenim mestima.

Naše istraživanje je pokazalo i temperaturne razlike između lokacija u istom LCZ, odnosno, ovi rezultati naglašavaju da urbana područja karakterišu specifični toplotni uslovi i na mikronivou. Jasna slika se može videti u urbanom delu Beograda, na primeru između lokacija ulice Đure Jašića i Topličinog venca koje su udaljene samo 150 m jedna od druge, i obe se nalaze u LCZ 2. Lokacija Topličin venac je otvoreni trg sa trotoarom i zelenom površinom, dok ulica Đura Jakšić predstavlja kanjonsku ulicu bez zelene površine. Tokom dnevnog merenja od 12h do 14h, lokacija Topličin venac je bila osunčana, dok je ulični kanjon bio u senci, što je dovelo do viših vrednosti T_a (oko 4°C) i T_g (oko 12°C) na prvoj lokaciji. Potpuno različiti termalni uslovi na ove dve lokacije nastaju od 14h do 15.30h. Za to vreme ulica Đura Jakšić je potpuno osunčana, a lokacija Topličin venac je uglavnom u senci zbog drveća i visokih zgrada na južnom delu trga. Za ovih sat i po vremena maksimalna izmerena razlika T_a je iznosila 6°C, a maksimalna izmerena razlika T_g je iznosila 12°C. Posle 15.30h do kraja merenja, oba mesta su u senci, a razlike su od 0°C do 2-3°C. Ovi ishodi su generalno u skladu sa rezultatima Geletić i sar. (2021) gde je izraženo da direktno i reflektovano zračenje pojačava toplotne uslove u urbanom okruženju.

Konačno, da bi se gradovi pripremili da budu otporniji na klimatske promene i rizike od suviše toplote, potrebno je detaljno praćenje toplotnih uslova na mikronivou i stoga bi dalje toplotne procene mogle da se zasnivaju na tehnikama prikupljanja koristeći meteorološke stanice za građane (CWS – Citizen Weather Station), zapise sa pametnih telefona, veb alatki (Fenner i ras., 2017; Fenner i sar., 2019; Venter i sar., 2020) ili namenski dizajnirani mobilni/prenosivi instrumenti sa specifično numerisanim i visoko preciznim sensorima, posebno za merenje zračenja (Middel i Kraienhoff, 2019; Schnell i sar., 2021). Ovakva vrsta praćenja može doprineti postizanju SDG-a (Ciljevi održivog razvoja) u okviru Agende 2030 kroz: a) podizanje svesti o toplotnom riziku i poboljšanju javne zdravstvene zaštite za ugrožene grupe (maloletnici ili siromašni) stanovništva u gradovi (SDG 3); b) doprineti boljoj implementaciji klimatski svesne urbanizacije koja može poboljšati mikroklimatske uslove, zatim povećati kvalitet života stanovništva i prilagoditi gradove klimatskim promenama (SDG 11) i c) doprineti daljoj adaptaciji na klimatske promene, posebno u urbanim područjima gde su mikroklima i lokalna klima dodatno modifikovani usled uticaja urbanizacije (SDG 13).

Potencijalni nedostatak ovog istraživanja može se predstaviti u broju dana kada su vršena merenja, s obzirom da je tokom leta 2021. i 2022. godine bilo znatno više toplih dana. Međutim, nekoliko veoma toplih letnjih dana koji su analizirani u ovoj studiji mogu predstavljati realnu sliku mikroklimatskih uslova u odabranim gradovima, a sa druge strane neophodno je uzeti u obzir i tehničke i ljudske kapacitete prilikom planiranja terenskih merenja. Dalji razvoj ovih istraživanja razvijaće se detaljniji vremensko-prostorni nivo, a posebno će biti zanimljivo sprovesti kampanju merenja u različitim urbanim mikrouslovima tokom tropskih noći i pratiti razlike tokom tog perioda dana, odnosno noći.

ZAHVALNICA

Istraživanje i procene podržao je projekat pod nazivom: „Unapređenje životne sredine u Vojvodini u cilju adaptacije na klimatske promene i smanjenja rizika od prirodnih nepogoda“ (br. 142-451-3485/2023-01), a projekat je finansiran od strane Autonomne Pokrajine Vojvodine (regionalna vlada).

REFERENCE

- Deutscher Wetterdienst, (2024). *Hot days definition*. https://www.dwd.de/EN/ourservices/germanclimateatlas/explanations/elements/_functions/faqkarussel/heissetage.html. Accessed 17 May 2024
- Fenner, D., Meier, F., Bechtel, B., Otto, M., & Scherer, D. (2017). Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, 26, 525–547. 10.1127/metz/2017/0861
- Fenner, D., Holtmann, A., Meier, F., Langer, I., & Scherer, D. (2019). Contrasting changes of urban heat island intensity during hot weather episodes. *Environmental Research Letters*, 14, 124013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab506b>
- Geletič, J., Lehnert, M., Krč, P., Resler, J., & Krayenhoff, E. S. (2021). High-resolution modelling of thermal exposure during a hot spell: a case study using PALM-4U in Prague, Czech Republic. *Atmosphere-Basel*, 12(2), 175. <https://doi.org/10.3390/atmos12020175>
- Lehnert, M., Savić, S., Milošević, D., Dunjić, J., & Geletič, J. (2021). Mapping local climate zones and their applications in European urban environments: A systematic literature review and future development trends. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10, 260. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040260>
- Lelovics, E., Unger, J., Savić, S., Gál, T. M., Milošević, D., Gulyás, Á., Marković, V., Arsenović, D., & Gál, C. V. (2016). Intra-urban temperature observations in two Central European cities: a summer study. *Időjárás*, 120(3), 283-300. <https://www.met.hu/downloads.php?fn=/metadmin/newspaper/2016/09/518d979f57bdc20ca41d1dd0b34eadb3-120-3-2-lelovics.pdf>
- Jänicke, B., Milošević, D., & Manavvi, S. (2021). Review of User-Friendly Models to Improve the Urban Micro-Climate. *Atmosphere-Basel*, 12(10), 1291. <https://doi.org/10.3390/atmos12101291>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. 10.1127/0941-2948/2006/013
- Middel, A. & Krayenhoff, E. S. (2019). Micrometeorological determinants of pedestrian thermal exposure during record-breaking heat in Tempe, Arizona: Introducing the MaRTy observational platform. *Science of the Total Environment*, 687, 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.085>
- Milošević, D., Trbić, G., Savić, S., Popov, T., Ivanišević, M., Marković, M., Ostojić, M., Dunjić, J., Fekete, R., & Garić, B. (2022). Biometeorological conditions during hot summer days in diverse urban environments of Banja Luka (Bosnia and Herzegovina). *Geographica Pannonica*, 26(4), 29-45. 10.5937/gp26-35456
- Oke, T., Mills, G., Christen A, & Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Oliveira, A., Lopes, A., Correia, E., Niza, S., and Soares, A. (2021). An urban climate-based empirical model to predict present and future patterns of the Urban Thermal Signal. *Sciences of the Total Environment*, 790, 147710. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147710>
- Quanz, J. A., Ulrich, S., Fenner, D., Holtmann, A., & Eimermacher, J. (2018). Micro-scale variability of air temperature within a local climate zone in Berlin, Germany, during summer. *Climate*, 6, 5. <https://doi.org/10.3390/cli6010005>
- Shi, Y., Ren, C., Zheng, Y., & Ng, E. (2016). Mapping the urban microclimatic spatial distribution in a sub-tropical high-density urban environment. *Architectural Science Review*, 59(5), 370-384. <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2015.1105195>
- Shi, Y., Lau, K.K.L., Ren, C., & Ng, E. (2018). Evaluating the local climate zone classification in high-density heterogeneous urban environment using mobile measurement. *Urban Climate*, 25, 167-186. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.07.001>
- Skarbit, N., Stewart, I. D., Unger, J., & Gál, T. (2017). Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the 'local climate zones' of Szeged, Hungary. *International Journal of Climatology*, 37, 582-596, <https://doi.org/10.1002/joc.5023>

Schnell, I., Cohen, P., Mandelmlch, M., & Potchter, O. (2021). Portable - trackable methodologies for measuring personal and place exposure to nuisances in urban environments: Towards a people oriented paradigm. *Computers, Environment and Urban Systems*, 86, 101589. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101589>

Stewart, I.D. & Oke, T.R. (2012). 'Local Climate Zones' for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Testo Globe sensor (2024). https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Globe_temperature. Accessed 17 May 2024

Tong, S., Prior, J., McGregor, G., Shi, X., & Kinney, P. (2021). Urban heat: an increasing threat to global health. *BMJ-British Medical Journal*, 375, n2467. <https://doi.org/10.1136/bmj.n2467>

Top, S., Milošević, D., Caluwaerts, S., Hamdi, R., & Savić, S. (2020). Intra-urban differences of outdoor thermal comfort in Ghent on seasonal level and during record-breaking 2019 heat wave. *Building and Environment*, 185, 107103. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107103>

Tuholske, C., Caylor, K., Funk, C., Verdin, A., Sweeney, S., Grace, K., Peterson, P., & Evans, T. (2021). Global urban population exposure to extreme heat. *PNAS* 118, e2024792118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2024792118>

Venter, Z. S., Brousse, O., Esau, I., & Meier, F. (2020). Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111791. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111791>

INVESTIGATING MICRO-SCALE THERMAL CONDITIONS IN DIFFERENT URBANIZED SPACES: CASE STUDIES FROM SELECTED CITIES IN SOUTHEAST EUROPE

Stevan Savić⁷, Boško Milovanović⁸, Jelena Dunjić⁹, Daniela Arsenović¹⁰, Milica Vasić¹¹, Ivan Šećerov¹²

Abstract: Increasing thermal risk in cities is endangering the health and well-being of urban population and is driven by climate change and intensive urbanization. Therefore, if we plan to enlarge the capacities of cities to be more climate resilient in the 21st century, more detailed monitoring of urban climate on local and micro scales is needed. For this research we performed microclimate measurement campaigns in urban areas of four cities (Belgrade, Novi Sad, Banja Luka and Trebinje), during hot summer days in 2021 and 2022. In total, 38 measurement sites were chosen in different urban designs and different local climate zones (LCZs). For thermal monitoring (air temperature – T_a and globe temperature – T_g) was used the Kestrel Heat Stress Tracker sensor and automated weather stations, and we used 10-min values datasets for further assessments. Obtained results showed distinct thermal differences (in some cases more than 10 °C) between densely built-up areas with impervious surface and green areas (mostly urban parks). At the same time, thermal differences between built-up zones are lower. Finally, results showed that shadows and short- and long-wave radiation play a paramount role in thermal variability. Direct and reflected radiation on one measurement site increased T_a and T_g values up to 10 °C, when compared to other measurement site which was in the shadow.

Keywords: climate change, urban climate, microclimate, thermal conditions, urbanization

Acknowledgement: The research and assessments were supported by the project entitled: "Improving the environment in Vojvodina in order to adapt to climate change and reduce the risk of natural disasters" (no. 142-451-3485/2023-01), funded by the Autonomous Province of Vojvodina (regional government).

⁷ University of Novi Sad - Faculty of Science, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, Serbia, stevan.savic@dgt.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4297-129X

⁸ SANU, Geographical Institute "Jovan Cvijić", Đure Jakšića 9, Belgrade, Serbia, b.milovanovic@gi.sanu.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7080-7334

⁹ University of Novi Sad - Faculty of Science, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, Serbia, jelena.dunjic@dgt.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-5427-378X

¹⁰ University of Novi Sad - Faculty of Science, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, Serbia, daniela.arsenovic@dgt.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-6535-0330

¹¹ University of Novi Sad - Faculty of Science, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, Serbia, student master studija

¹² University of Novi Sad - Faculty of Science, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, Serbia, ivan.secerov@dgt.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0003-0196-0989