

UDK: 502.3:504.7;614.71
DOI: 10.5937/KonGef24018P
Прегледни научни рад

SMART-MOBILE-BIOMETEOS МОБИЛНА БИОМЕТЕОРОЛОШКА СТАНИЦА ЗА ПРАЋЕЊЕ ТОПЛОТНОГ СТРЕСА У РЕАЛНОМ ВРЕМЕНУ

Милица Пецељ¹

Апстракт: Урбано загревање указује на потребу за мерама прилагођавања за унапређење отпорности становништва. Екстремно топла лета доносе дуже, интензивније и учесталије топлотне таласе. Изложеност екстремној топлоти постаје једно од честих питања са којим се суочавају урбане средине. То показује и концепт под називом "отпорни градови" креиран да ублажи нежељене ефекте које доносе екстремна топлота и топлотни таласи као и загађење ваздуха. Један од предуслова за мере ублажавања последица екстремне топлоте је процена топлотног стреса. Оно што недостаје у урбаној средини Београда је могућност директног праћења микрометеоролошких услова које би пружиле fine информације о просторној расподели топлотног стреса у градовима. Да би процена изложености топлоти била што ефикаснија неопходно је упоставити микрометеоролошки мониторинг у реалном времену. У овом раду се жели представити нискобуџетна паметна IoT мини мобилна Биометеоролошка Станица ("sMaRT-mobile-BioMeteoS") која је употпуњена хардверско софтверским подешавањем сензора за микрометеоролошка мерења. Метеоролошки сензори и сензор квалитета ваздуха интегрисани су у један уређај за мерење метеоролошких параметара и квалитета ваздуха са циљем интеграције у систем за праћење топлотног стреса, термалног комфора, урбаног острва топлоте и загађења ваздуха у градовима.

Кључне речи: Мобилна биометеоролошка станица, топлотни стрес, квалитет ваздуха, sMaRT-mobile-BioMeteoS

УВОД

Тема овогодишње конференције симболизује тренутак обележен ескалацијом глобалних температура и дубоким утицајима климатских промена. Топлотни таласи, као невидљива природна катастрофа, представљају једну од највећих претњи људском здрављу у погледу климатских промена. Често имају негативан ефекат, изазивају топлотни стрес у људском телу, посебно у урбаним срединама. Како наводи McGregor и сар. (2015) топлотни стрес може узроковати топлотни удар, топлотну исцрпљеност и низ медицинских импликација. Велики део светске популације живи у густо насељеним урбаним срединама, а процес урбанизације ствара многе еколошке проблеме који негативно утичу на здравље људи (Pecelj и др., 2021; Lukić и др., 2021). Најистакнутији су екстремни топлотни стрес и загађење ваздуха. Изложеност екстремној топлоти појавила се као горући проблем у урбаним срединама. Ово такође показује концепт „отпорних градова“, креиран да ублажи штетне ефекте које изазивају екстремне врућине, топлотни таласи, ширење урбанох острва топлоте и загађење ваздуха. Процена спољашње топлотне удобности и топлотног стреса је од суштинског значаја за решавање проблема утицаја екстремне топлоте. Званична метеоролошка мерења често нису у могућности да дају адекватне податке за детаљнију анализу урбаних микрометеоролошких услова па их ваља допунити типским мерењима. До сада су типска микрометеоролошка мерења највећим делом била део истраживања термалног комфора и урбаног острва топлоте у Новом Саду (Milošević и сар.; 2022, Vasić и др., 2022; Savić и сар.; 2023) са успостављањем мреже аутоматских станица за праћење термичког комфора на отвореном (Sećerov и др., 2015; Sećerov и др., 2019). Спорадично их је било у Београду (Savić и др., 2024) и Бања Луци (Savić и др., 2022), међутим недовољно за свеобухватнија истраживања у Београду као највећој урбаној средини. У Београду недостаје континуирано директно праћење микрометеоролошких услова, што је кључно за разумевање просторне дистрибуције топлотног стреса и урбаног острва топлоте.

¹ САНУ, Географски институт „Јован Цвијић“, Ђуре Јакшића 9, Београд, Србија, m.pecelj@gi.sanu.ac.rs, ORCID: 0000-0001-9404-4044

Неопходно је званичне временске податке допунити наменским мерењима како би се омогућило детаљније представљање микроклиматских карактеристика градова и постигла прецизнија просторна расподела топлотног стреса и урбаног острва топлоте. Развој технологије је довео до иновативних приступа за праћење података о времену, где су предложени бројни системи паметних метеоролошких станица заснованих на IoT-технологији (Ganesan и др., 2024), који би управо омогућили интегрисана наменска мерења у урбаним срединама.

О утицају топлотних екстрема на човека јаснију интерпретацију нам дају хумана биометеоролошка и биоклиматска истраживања јер поред температуре ваздуха истовремено вреднују и друге метеоролошке параметре као што су релативна влажност ваздуха, брзина ветра и зрачење. Од свих наведених параметара, дуготаласно и краткоталасно зрачење, интерпретирано као средња температура зрачења (MRT), има највећи утицај на субјективни осећај топлоте (Middel и др., 2016). Како наводи Middel и др. (2016, 2019), нарочито је то изражено у топлим и сувим климатским условима. Дакле, средња температура зрачења (MRT) квантификује укупно топлотно оптерећење зрачења на људско тело и представља покретачки параметар у многим индексима топлотног комфора (Kulkarni и др., 2022). Веома често овај параметар се не представља као извор података у истраживањима, а веома добро описује како људи субјективно доживљавају топлоту (Middel и др., 2016). Врло често наменске аутоматске метеоролошке станице не поседују сензор за мерење температуре зрачења, без које није могуће израчунати средњу температуру зрачења (MRT). Изражен топлотни стрес делује као ограничавајући фактор у боравку на отвореном и негативно утиче на здравље људи. Поред топлотног стреса, степен загађења ваздуха такође игра значајну улогу у утицају на здравље људи (Aničić и др., 2007; Stanojević и др., 2019; Stanojević и др., 2023), нарочито у урбаним срединама.

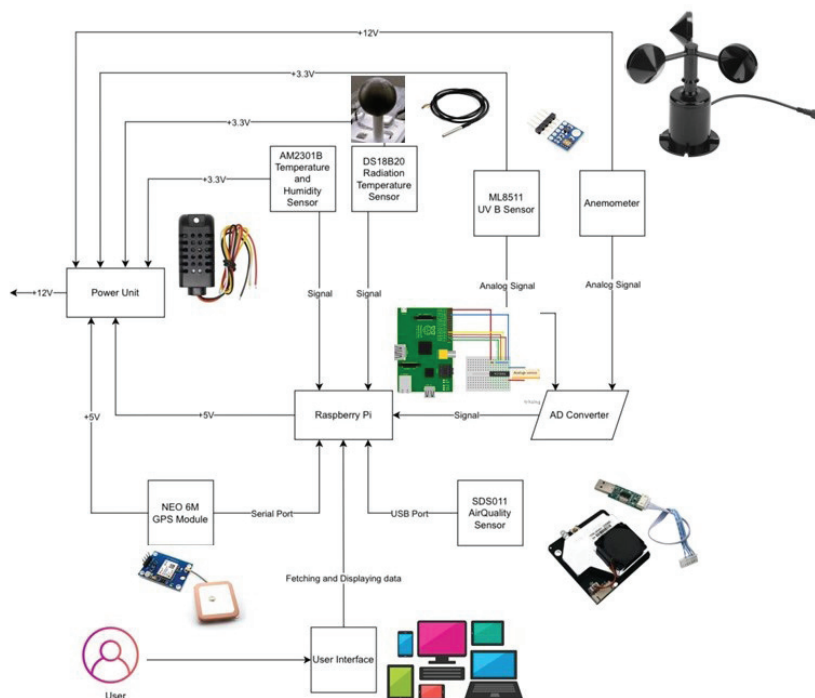
Имајући у виду наведено конструисали смо мини мобилну паметну биометеоролошку станицу коју смо назвали **sMaRT-mobile-BioMeteoS** (Smart Mobile Biometeorological Weather Station) са интегрисаним хардверским и софтверским подешавањем сензора. Овај рад има за циљ да представи паметни IoT уређај дизајниран за мерење одређених метеоролошких параметара и квалитета ваздуха, као и да истакне његове могућности.

Фокус је на развоју система мобилне биометеоролошке станице и постављању основе за истраживања у области биоклиматологије, посебно урбане климатологије и медицинске климатологије. Циљ је интеграција у систем за праћење динамике топлотног стреса, термалног комфора, урбаног острва топлоте и загађења ваздуха у Београду, највећој урбаној средини у региону.

ДИЗАЈН МОБИЛНЕ БИОМЕТЕОРОЛОШКЕ СТАНИЦЕ

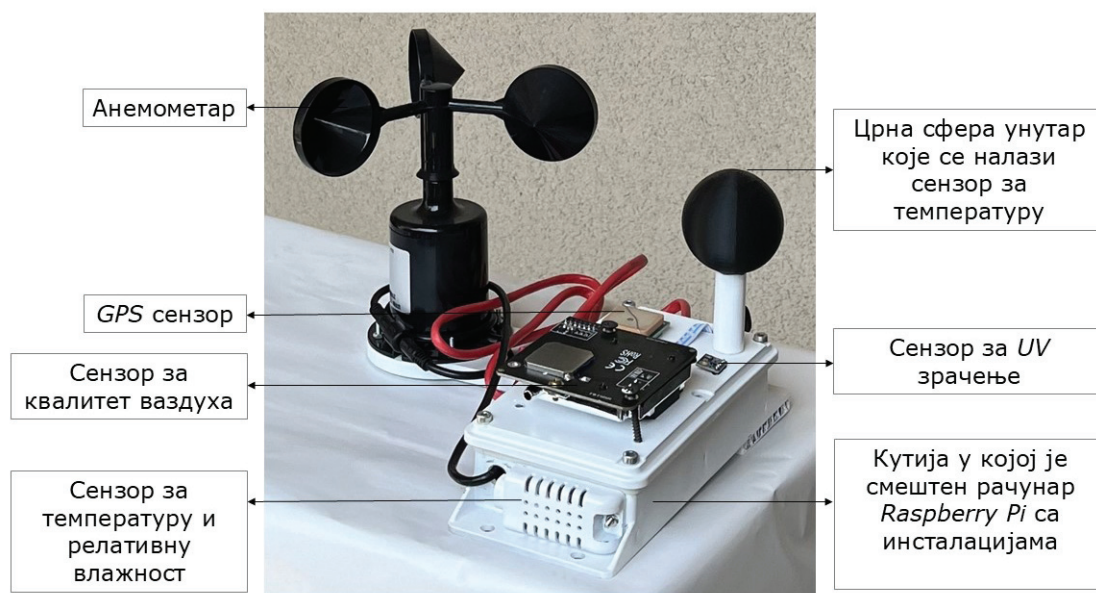
За адекватну процену топлотног стреса којем су људи изложени неопходни су мерни инструменти који нам на лицу места могу обезбедити микрометеоролошке податке. Често су такви инструменти скупи, теже преносиви са места на место, спорији су или нису конструисани да измере све неопходне параметре укључујући и неопходну температуру зрачења (Tg) помоћу које даље рачунамо средњу температуру зрачења.

Предложени нискобуџетни уређај за праћење топлотног стреса, назван паметна мобилна биометеоролошка станица (**sMaRT-mobile-BioMeteoS**), је малих димензија и лако је преносив. Мобилна биометеоролошка станица је заснована на рачунару Raspberry Pi Zero WH (Raspberry Pi (Trading) Limited, Cambridge, UK) која системски интегрише различите микроконтролере помоћу сензора за прикупљање микрометеоролошких параметара релевантних за одређивање топлотног стреса и параметара за оцену квалитета ваздуха. Микрометеоролошки параметри које сензори мере су, температура ваздуха (Ta), влажност ваздуха (RH), брзина ветра (v), температура зрачења (Tg) као и интензитет UV зрачења, док су параметри за оцену квалитета ваздуха суспендоване честице PM 2.5 и PM10. Цео систем је опремљен GPS модулом који даје податке о реалном простору и времену. Станица прикупља измерене податке на сваких 2 минута и директно их складишти у CSV фајл (Comma-separated values) именован према датуму када се мерење врши што омогућава да измерени подаци буду визуелно доступни у реалном времену. У дијаграму испод се могу видети све компоненте система на основу којих је уређај дизајниран (Прилог 1).



Прилог 1. Шематски приказ компонената sMaRT-mobile-BioMeteoS

Станица се напаја преко адаптера од 5V и микро-USB кабла, а може да се напаја и комерцијалним батеријама у трајању од неколико дана. Већина сензора које смо користили је тестирана на тачност у реалним условима на отвореном као и у специјалним климатским коморама у затвореном простору користећи најсавременије сензоре као референце (Genikomsakis и др., 2018; Sulzer и др., 2022; Kulkarni и др., 2022). Станица је конструисана тако да се сви сензори налазе на белој кутији облика правоугаоника како би могли несметано да реагују на спољашње услове. Унутар дизајниране беле кутије налазе се инсталације које повезују сензоре са главним рачунаром (Raspberry Pi Zero WH) смештеним унутар кутије (Прилог 2).



Прилог 2. Изглед мобилне биометеоролошке станице sMaRT-mobile-BioMeteoS

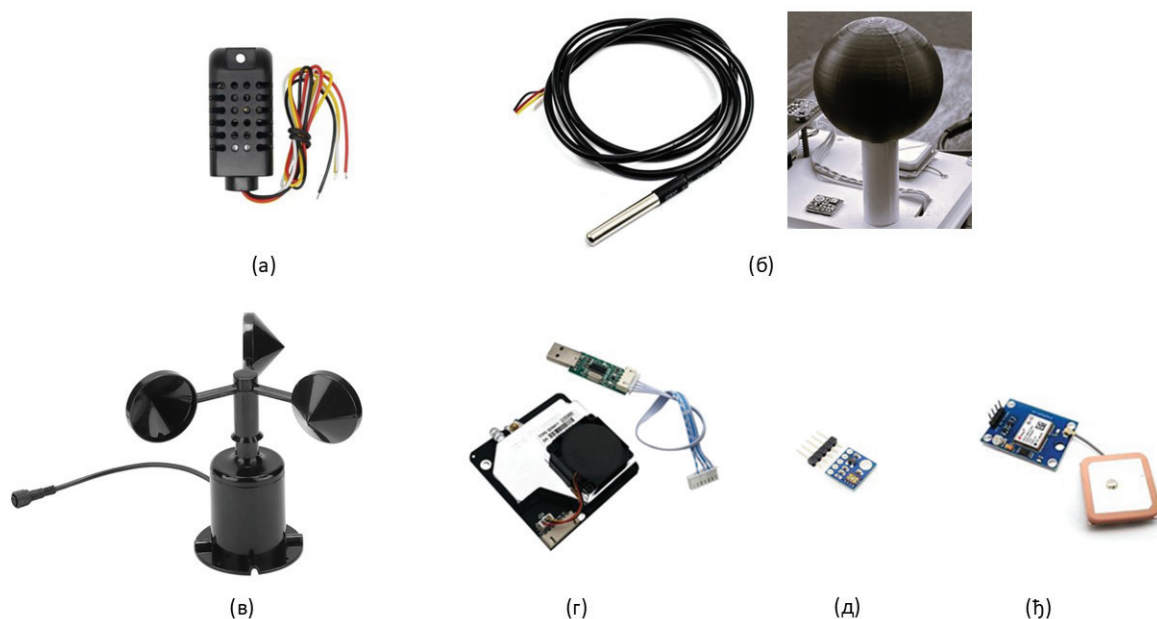
У следећој фази рада станице идеја је да се успостави SQL база података (Structured Query Language) која ће структурирано да чува све измерене вредности. Такође, намера је да се успостави кориснички интерфејс где ће бити приказане вредности сензора и мерења у реалном времену. Даље, идеја је да овај уређај према задатим кодовима софтверски обрађује мерне параметре на основу којих даље рачуна топлотне индексе као што су: MRT, WBGT, HUMIDEX, ET, PET, mPET и UTCI и др.

ОПИС СЕНЗОРА ИНТЕГРИСАНИХ У УРЕЂАЈ

Сензори који су одабрани за дизајн станице су се већ користили у сличним уређајима и показали су добар одговор за мерење на отвореном и затвореном терену. За мерење температуре ваздуха и влажности помоћу **sMaRT-mobile-BioMeteoS** изабран је комбиновани нискобуџетни сензор за влажност и температуру (AM2301B - Wired Enclosed AHT20 - Temperature and Humidity Sensor) димензија 58.8x26.8x13.2 mm (Прилог 2, а). Опсег мерења релативне влажности ваздуха је од 0 до 100% са типичном тачношћу од $\pm 2\%$ при 20-80% релативне влажности, док је опсег мерења температуре ваздуха од -40°C до 80°C са типичном тачношћу од $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ при $20-60^{\circ}\text{C}$.

Код мерења средње температуре зрачења (MRT) одабран је сензор за температуру DS18B20 (Maxim Integrated Products, Inc., Сан Хозе, Калифорнија, САД) који мери температуре у интервалу од -55°C до $+125^{\circ}$ типичне тачности од $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ од -10°C у интервалу од -10 до $+85^{\circ}\text{C}$. Сензор за температуру је смештен у прилагођену наменски направљену црну сферу пречника 5mm (Прилог 3, б). Температура измерена унутар сфере назива се температура зрачења или температура црне сфере (globe temperature, Tg).

За мерење брзине ветра искористили смо аналогни анемометар од поли-карбона (Прилог 3, в). Опсег брзине ветра који мери је од 0 до $70 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$ са минималном брзином ветра од $0.2 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$. Пошто рачунар Raspberry PI нема могућност читања аналогних сигнала са анемометра, додали смо аналогно-дигитални конвертер (ADC, MCP3008) који може примити излазни напон анемометра и послати дигиталну вредност Raspberry PI рачунару да би могла бити измерена.



Прилог 3. Сензори који су одабрани за дизајн станице: (а) сензор за температуру ваздуха и релативну влажност, (б) сензор за температуру и црна сфера за мерење температуре зрачења, (в) анемометар за мерење брзине ветра, (г) сензор за квалитет ваздуха, (д) сензор за УВ зрачење и (ђ) GPS сензор

За мерење интензитета зрачења користили смо UV сензор (ML8511). И овај сензор као и анемометар шаље аналогне сигнале па смо искористили исти аналогно-дигитални конвертер. Овај сензор за ултравиолетно зрачење ради тако што даје излазни сигнал у складу са интензитетом UV светлости који детектује. Сензор најефикасније детектује светлост у опсегу од 280 до 390 nm сунчевог спектра, што спада у UVB (290-320 nm) зрачење које изазива горење и црвенило коже и већину UVA (320-400 nm) зрачења које изазива да кожа потамни. Вредност интензитета је изражена у $\text{mW}\times\text{cm}^{-2}$ (Прилог 3, д).

Што се тиче квалитета ваздуха за његово мерење смо користили оптички сензор (Nova SDS011 High Precision Laser Dust Sensor) који врши ласерско детектовање честица или прашине (Прилог 3, г). Опсег мерења честица је у распону од 0.0 до 999.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ где се излазни подаци генеришу као PM2.5 и PM10 честице.

ДИСКУСИЈА И ЗАКЉУЧАК

Напредак у технологији довео је до тога да се нискобуџетни сензори све више користе за конструисање IoT сензорских мрежа, као што је на пример систем за праћење загађења ваздуха (Xiaojun и др., 2015; Genikomsakis и др., 2018), затим систем за праћење термалних услова у радним окружењима (Sulzer и др., 2022) или систем за праћење како људи користе јавне просторе под екстремном врућином (Kulkarni и сар., 2022) и други примери. Како наводи Mehdi poor и сар. (2017) ширење података, модела и нових информација на интернационалном нивоу никада није било брже и поузданије захваљујући управо информационам и комуникационим технологијама.

Ова мини мобилна станица је иновативна нискобуџетна, лако преносива, паметна IoT биометеоролошка станица (**sMaRT-mobile-BioMeteoS**) која може да мери локалне метеоролошке услове на одређеној локацији комбинујући температуру ваздуха, температуру зрачења, релативну влажност ваздуха, брзину ветра, интензитет УВ зрачења и квалитет ваздуха. Подаци добијени типским микрометеоролошким мерењима у урбаним срединама могу се делити и користити за различите мултидисциплинарне студије.

Следећи кораци у истраживању се односе на калибрацију и валидацију уређаја директно на терену као и на компаративну анализу са најмање још једном комерцијално доступном нискобуџетним уређајем који је већ афирмисан у другим публикацијама.

Даљи правци истраживања су усмерени на умножавање станица и интегрисање у један биометеоролошки систем за праћење просторне расподеле топлотног стреса, термалног комфора, урбаног острва топлоте и загађења ваздуха у Београду, највећој урбаној средини у региону. Као део таквог система могуће је да се станице распореде на циљаним локацијама градског језгра Београда. нпр. парковима, игралиштима трговима итд.

ЛИТЕРАТУРА:

- Aničić, M., Frontasyeva, M.V., Tomašević, M., Popović A. (2007). Assessment of atmospheric deposition of heavy metals and other elements in Belgrade using the moss biomonitoring technique and neutron activation analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129(1-3), 207-219. doi: 10.1007/s10661-006-9354-y. Epub 2006 Sep 7. PMID: 16957840.
- Genikomsakis, H., Galatoulas, N-F., K., Dallas, I.P., Candanedo Ibarra, LM., Margaritis, Ioakimidis, C. S. (2018). Development and On-Field Testing of Low-Cost Portable System for Monitoring PM2.5 Concentrations. *Sensors*. 18(4), 1056. <https://doi.org/10.3390/s18041056>
- Kulkarni, K.K. Schneider, F.A. Gowda, T. Jayasuriya, S. Middel, A. (2022). MaRTiny—A Low-Cost Biometeorological Sensing Device With Embedded Computer Vision for Urban Climate Research. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 866240. doi: 10.3389/fenvs.2022.866240
- McGregor, G.R., Bessemoulin, P., Ebi, K.L., Menne, B. World Meteorological Organization; World Health Organization. Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development; WHO: Geneva, Switzerland, 2015; ISBN 978-92-63-11142-5.
- Mehdi poor, H., Vanos, J.K., Zurita-Milla, R., et al. (2017). Short communication: emerging technologies for biometeorology. *International Journal of Biometeorology*, 61 (Suppl 1), 81-88. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1399-9>
- 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, 1, p. 29-45 17 p.
- Pecelj, M., Matzarakis A., Vujadinović M., Radovanović M., Vagić N., Đurić D., and Cvetkovic M. (2021). Temporal Analysis of Urban-Suburban PET, mPET and UHCI Indices in Belgrade (Serbia). *Atmosphere* 12(7), 916. <https://doi.org/10.3390/atmos12070916>
- Pecelj M., Lukić M., Filipović D., Protić B., Bogdanović U. 2020. Analysis of the Universal Thermal Climate Index during heat waves in Serbia, *Natural Hazards and Earth System Science*, 20, 2021–2036, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2021-2020>
- Pecelj, M., Matzarakis A., Vujadinović M., Radovanović M., Vagić N., Đurić D., and Cvetkovic M. (2021). Temporal

- Analysis of Urban-Suburban PET, mPET and UTCI Indices in Belgrade (Serbia). *Atmosphere* 12(7), 916. <https://doi.org/10.3390/atmos12070916>
- Lukić M, Pecelj MM, Protić B, Filipović D. (2019) An Evaluation of Summer Discomfort In Urban Area Of Niš (Serbia) Using Humidex, *Journal of the Geographical Institut Jovan Cvijic SASA*, 69 (2), 109–122. <http://www.gi.sanu.ac.rs/zbornik/index.php/zbornik/article/view/119>
- Lukić M., Filipović D., Pecelj M., Crnogorac L., Lukić B., Divjak L., Lukić A.(2021). Vučićević A. Assessment of Outdoor Thermal Comfort in Serbia's Urban Environments during Different Seasons. *Atmosphere*. 12(8):1084. <https://doi.org/10.3390/atmos12081084>
- Savić, S., Trbić, G., Milošević, D., Dunjić, J., Ivanišević, M., Marković, M. 2022. Importance of assessing outdoor thermal comfort and its use in urban adaptation strategies: a case study of Banja Luka (Bosnia and Herzegovina). *Theoretical and Applied Climatology* 150, 1425-1441. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04237-8>
- Savić, S., Šećerov, I., Lalić, B., Nie, D., Roantree, M. 2023. Air Temperature and Relative Humidity Datasets from an Urban Meteorological Network in the City Area of Novi Sad (Serbia). *Data in Brief* 49, 109425. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109425>
- Savić, S., Milovanović, B., Milošević, D., Dunjić, J., Pecelj, M., Lukic, M., Ostojic, M., Fekete, R. (2024). Thermal assessments at local and micro scales during hot summer days: a case study of Belgrade (Serbia). *Quarterly Journal of the HungaroMet Hungarian Meteorological Service*, 128(1), 121-141.
- Ganesan, S., Lean C.P., Li, C., Yuan, K.F., Kiat, NP & Khan. MRB (2024). IoT- enabled Smart Weather Stations: Innovations, Challenges, and Future Directions. *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology*, 4(2), 180–190. <https://doi.org/10.56532/mjsat.v4i2.293>
- Sulzer, M. Christen, A. Matzarakis, A. (2022). A Low-Cost Sensor Network for Real-Time Thermal Stress Monitoring and Communication in Occupational Contexts. *Sensors*, 22(5),1828. <https://doi.org/10.3390/s22051828>
- Stanojević, G., Malinović Miličević, S., Ćurčić, N.B., Radovanović, M., Radivojević, A., Popović, T., Ćurčić, S. (2023). An Assessment of the Multidimensional Drivers and Determinants of Public Risk Perception of and Behaviors Related to Exposure to Air Pollution in Serbia. *Sustainability*, 15, 16901. <https://doi.org/10.3390/su152416901>
- Stanojević, G., N. Miljanović, D., Doljak, D., Ćurčić, N.B., Radovanović, M., Malinović-Miličević, S., Hauriak, O. (2019). Spatio-temporal variability of annual PM2.5 concentrations and population exposure assessment in Serbia for the period 2001–2016. *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic" SASA*, 69(3), 197–211. <https://doi.org/10.2298/IJGI1903197S>
- Šećerov, I., Savić, S., Milošević, D., Marković, V., Bajšanski, I. (2015) Development of an Automated Urban Climate Monitoring System in Novi Sad (Serbia) *Geographica Panonica*, 19,174-183.
- Šećerov, I., Dolinaj, D., Pavić, D., Milošević, D., Savić, S., Popov, S. and Živanov, Ž. (2019). Environmental Monitoring Systems: Review and Future Development. *Wireless Engineering and Technology*, 10, 1-18. <https://doi.org/10.4236/wet.2019.101001>
- Vasić, M., Milošević, D., Savić, S., Bjelajac, D., Arsenović, D. & Dunjić, J., 2022, Micrometeorological measurements and biometeorological survey in different urban settings of Novi Sad (Serbia). *Bulletin of the Serbian Geographical Society*. 102, 2, p. 45-66 22

SMART-MOBILE-BIOMETEOS A MOBILE BIOMETEOROLOGICAL STATION DESIGNED FOR THE REAL TIME MONITORING OF HEAT STRESS

Abstract: Urban areas are increasingly challenged by rising temperatures, demanding adaptive measures to strengthen community resilience. With hotter summers and more frequent, severe heatwaves, managing exposure to extreme heat has become a critical issue. The concept of „resilient cities“ aims to mitigate the negative impact of extreme heat and air pollution. A key requirement for effective mitigation is the heat stress assessment. Currently, Belgrade, the largest urban area in region, lacks direct monitoring of micrometeorological conditions. This gap means there is limited spatial insight into heat stress and thermal comfort distribution. Real-time micrometeorological monitoring is essential for improving heat exposure assessment. This paper introduces mini smart mobile biometeorological station (sMaRT-mobile-BioMeteoS), a device that combines meteorological and air quality sensors to monitor heat stress, thermal comfort, and air pollution in urban environments.

Key words: sMaRT-mobile-BioMeteoS, mobile biometeorological station, heat stress, thermal comfort, air quality