

SATELITSKO TERMIČNO
SNEMANJE SARAJEVASATELLITE THERMOGRAPHY
OF SARAJEVO

Admir Mulahusić, Nedim Tuno, Jusuf Topoljak, Tarik Kolić, Dušan Kogoj

UDK: 528.8(497.6Sarajevo)
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
Prispelo: 22. 2. 2018
Sprejeto: 4. 5. 2018

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2018.02.173-187
SCIENTIFIC ARTICLE
Received: 22. 2. 2018
Accepted: 4. 5. 2018

IZVLEČEK

Spreminjanje ozračja v velikih svetovnih mestih zaradi urbanizacije postaja vse izrazitejša. S tem je povezan tudi pojav mestnega toplotnega otoka. Daljinsko zaznavanje, zasnovano na satelitih in senzorjih, občutljivih za različne dele elektromagnetnega spektra, omogoča nov in lažji način spremljanja mestnih toplotnih otokov. V prispevku je opisano določanje temperature območja Sarajeva na podlagi satelitskih posnetkov Landsat. Opisan je izračun mestnega toplotnega otoka, izvedene so analize po conah, izdelani značilni temperaturni profili ter izvedena primerjava s podatki meteoroloških postaj. Delo ponuja osnovne smernice za izračun mestnega toplotnega otoka in zagotavlja podlago za nadaljnje raziskave mestnega toplotnega otoka Sarajeva.

ABSTRACT

The phenomena of atmospheric changes due to urbanisation are increasing in big cities worldwide, one of the most prominent of which is the appearance of urban heat islands. Remote sensing based on satellites and sensors sensitive to different parts of the electromagnetic spectrum has enabled new and easier ways of monitoring urban heat islands. This paper describes a procedure for determining the temperature of the Sarajevo area based on Landsat satellite images. In addition to measuring urban heat islands, more detailed analyses of the zones were carried out, profiles have been made through characteristic surfaces, and finally, comparisons with the air temperatures of the weather stations were done. The paper offers basic guidelines for calculating the phenomenon of urban heat islands and represents the basis for further studies of the urban heat island in the Sarajevo area.

KLJUČNE BESEDE

daljinsko zaznavanje, mestni toplotni otok, površinski mestni toplotni otok, Landsat, Sarajevo

KEY WORDS

remote sensing, urban heat island, surface urban heat island, Landsat, Sarajevo

1 UVOD

S širjenjem mest se spreminja dejanska raba tal, nepozidana območja namreč postanejo pozidana. Pozidava povzroči mnoge pojave, ki negativno vplivajo na zdravje ljudi, naravna območja, ekosisteme, podnebje, energetska učinkovitost in kakovost življenja (Bektas Balcik in Ergene, 2016). Z urbanizacijo izzvane spremembe povzročajo nekatere okoljske pojave, ki so značilni za mesta ter vplivajo na kakovost življenja stanovalcev na urbanem območju in v okolici, posredno pa učinkujejo na svetovne podnebne spremembe. Značilen primer sprememb ozračja zaradi urbanizacije so mestni toplotni otoki (Oke, 1981). Raziskujejo jih številne znanstvene discipline, raziskovanja so zelo aktualna. Ljudje dolgo niso dojeli škodljivih vplivov urbanizacije, zato so težave začeli reševati šele po tem, ko so se že razmahnile.

Razvoj satelitskih sistemov za daljinsko zaznavanje je omogočil nov način raziskovanja mestnih toplotnih otokov, ki dopolnjuje tradicionalne metode, temelječe na merjenju temperature na meteoroloških postajah. Uporaba senzorjev, občutljivih za različne spektre elektromagnetnega valovanja, je omogočila določitev temperature na daljavo. Metode daljinskega zaznavanja so odprle nove možnosti. Meteorološke postaje zajemajo podatke točkovno, so številčno in lokacijsko zelo omejene, satelitsko snemanje pa omogoča množični zajem podatkov na velikem območju, s čimer je zagotovljena velika prostorska in časovna pokritost opazovanj (Fabrizi, Bonafoni in Biondi, 2010). Za raziskave na področju daljinskega zaznavanja se dandanes pogosto uporabljajo posnetki satelitskega sistema Landsat. Ta sistem je zelo priljubljen zaradi brezplačnega dostopa do podatkov in njihovega dolgoročnega hranjenja v arhivu.

Za raziskavo, opisano v prispevku, so uporabljeni prav satelitski posnetki Landsat. Arhiv satelitskih sistemov Landsat hrani podatke od leta 1972. Teoretično je torej mogoče slediti trendom širjenja mestnih toplotnih otokov v zadnjih 46 letih. Satelitske posnetke iz arhiva je treba izbrati in jih ustrezno obdelati. Podlaga so tako imenovani termični posnetki, to so satelitske podobe, ki prikazujejo svetilno temperaturo površja. Takšna podoba vsebuje informacijo o temperaturi v okviru piksela. Z analizo podob se določi temperatura izbranih območij, na podlagi temperature pa vrednosti mestnega toplotnega otoka. Dobljene rezultate statistično vrednotimo in jih primerjamo z že znanimi podatki. Na podlagi vrednosti mestnih toplotnih otokov in trendov sprememb je mogoče iskati rešitve za zmanjšanje pojava mestnih toplotnih otokov in njihovih negativnih vplivov na bivanje.

2 MESTNI TOPLOTNI OTOK

Površinske spremembe, ki so posledica urbanizacije, vplivajo na lokalne spremembe podnebja. Urbanizirano območje postane toplejše od neurbanizirane okolice, pri čemer je temperaturna razlika posebno očitna ponoči. Ta pojav je poznan kot mestni toplotni otok. (angl. *urban heat island* – UHI) (Voogt in Oke, 2003). Poenostavljeno je mestni toplotni otok pojav, pri katerem imajo mestna območja višjo temperaturo od manj urbaniziranih območij v bližnji okolici.

Glavni vzrok za nastanek in oblikovanje mestnega toplotnega otoka je naraščajoča zamenjava nepozidanih površin z grajenimi objekti. Na razvoj mestnih toplotnih otokov najbolj vplivata dva primarna vremenska pojava, to so veter in oblaki. Mestni toplotni otok je najintenzivnejši, kadar je nebo jasno in ni vetra. Oblaki zmanjšajo sončevo obsevanje tal in nižjih plasti ozračja, zaradi česar se dnevno segrevanje v mestih občutno zmanjša. Veter pa okrepi mešanje zračnih mas ter zmanjšuje razlike v temperaturah med mestom in okolico.

S pojavom mestnih toplotnih otokov so se ukvarjali mnogi znanstveniki. Kim (1992) je prišel do pomembnih kazalnikov, povezanih z mestnim toplotnim otokom glavnega mesta Združenih držav Amerike. Na podlagi podatkov, pridobljenih s satelitskih posnetkov Landsat TM, je ugotovil, da so temperature mestnih območij glede na bližnje gozdne površine poleti višje tudi do 10 °C. Simptomi dnevnega segrevanja se začnejo pojavljati sredi dopoldneva, razlog pa je velik višek toplote zaradi hitrega segrevanja mestnih površin, kot so zgradbe, asfaltne površine, gola tla in nizka trava.

Zelo zanimiv pregled z vidika klimatologije mestnih območij je ponudil Arnfield (2003). Nič manj niso zanimive raziskave, ki so jih izvedli Santamouris (2014); Santamouris (2015), Zhou in sod. (2017); Chun in Guldmann (2014); Busato, Lazzarin in Noro (2014); Debbage in Marshall Shepherd (2015); Leder, Leder in Hećimović (2016) ter Cedilnik, Oštir in Kokalj (2016).

Ločimo tri vrste toplotnih otokov, to so površinski toplotni otok SHI (angl. *surface heat island*), toplotni otok pokrova CLHI (angl. *canopy layer heat island*) in mejni toplotni otok BLHI (angl. *boundary layer heat island*) (Oke, 1982; Voogt, 2002).

Agencija Združenih držav Amerike za varstvo okolja EPA (EPA, 2008) loči dva tipa mestnih toplotnih otokov. To sta površinski mestni toplotni otok SUHI (angl. *surface urban heat island*) in atmosferski mestni toplotni otok AUHI (angl. *atmospheric urban heat island*).

Za identifikacijo mestnih toplotnih otokov uporabljamo metode, ki temeljijo na numeričnem modeliranju ter ocenah, zasnovanih na empiričnih modelih. Površinski mestni toplotni otok SUHI je opredeljen na podlagi merjenja temperature zemeljskega površja (angl. *land surface temperature – LST*), običajno zasnovanega na tehnologiji termičnega daljinskega zaznavanja (Farina, 2012), torej pridobljenega iz termičnih satelitskih posnetkov.

3 MOŽNOSTI UPORABE DALJINSKEGA ZAZNAVANJA PRI RAZISKAVAH IN SPREMLJANJU TOPLLOTNIH OTOKOV

Raziskovanja mestnih toplotnih otokov so se v prvih letih osredotočala na proučevanje atmosferskega mestnega toplotnega otoka (AUHI) na temelju meteoroloških podatkov iz mreže stalnih meteoroloških postaj. Za izdelavo natančne termične (toplotne) karte mesta je bilo treba zagotoviti veliko prostorsko enakomerno razporejenih meteoroloških postaj. Njihovo vzdrževanje in kalibracija pa prinašata visoke stroške, dodatna težava je v tem, da sprememba okolja v bližini meteoroloških postaj vpliva na natančnost in verodostojnost dolgoročnih podatkov snemanja (Wang, 2015).

Večspektralni detektorji zaznavajo elektromagnetno sevanje zlasti v vidnem in infrardečem spektru, pa tudi v termičnem infrardečem delu spektra. Zaznavanje energije na območju termičnega sevanja je povsem drugačno od zaznavanja odbite sončne svetlobe (Oštir in Mulahusić, 2014). Termični detektorji, občutljivi za fotone toplotnega sevanja, morajo biti dobro ohlajeni (blizu absolutne ničle), saj je treba njihovo lastno sevanje zmanjšati na minimum. Ti senzorji merijo površinsko temperaturo ali termične značilnosti opazovanih objektov (Oštir in Mulahusić, 2014).

Z razvojem daljinskega zaznavanja so se raziskave usmerile na določanje površinskih mestnih toplotnih otokov (SUHI). Metoda temelji na uporabi senzorjev za snemanje termičnega infrardečega sevanja (TIR-senzorji) in omogoča merjenje temperature površja velikih mestnih območij z veliko večjo prostorsko

pokritostjo, kot jo je mogoče zagotoviti s podatki zemeljskih meteoroloških postaj (Wang, 2015; Fabrici in sod., 2010).

Oceno SUHI na podlagi podatkov daljinskega zaznavanja je prvi predlagal Rao (1972). Sledile so številne raziskave, ki so ponudile izboljšave glede na predhodne različice senzorjev. Podatki termičnega infrardečega senzorja (TIRS) satelita Landsat 8 se množično uporabljajo za študije stanja in dinamike urbanega toplotnega okolja (Wang, 2015; Weng, 2009). Merjenje SUHI je mogoče čez dan in ponoči, saj se ne zaznava odbita sončna svetloba, temveč sevanje Zemljine površine (Oštir in Mulahusić, 2014).

Satelitsko določena LST je ključni parameter v procesih SUHI. Ne samo, da deluje kot kazalnik podnebnih sprememb, ampak lahko z njo preučujemo sevanje površine in s tem tok toplotne energije med površino in ozračjem. Temperatura površine posredno, vendar pomembno vpliva na temperaturo zraka. Parkovno in drugo rastje v mestu ima običajno nižjo temperaturo od pozidanih zemljišč in prispeva k znižanju temperature zraka, gosto naseljena območja pa zrak neposredno segrevajo in tako zvišujejo njegovo temperaturo (Srivani in Hokao, 2012).

Dobljeni rezultati raziskav so lahko zelo koristni pri opredeljevanju urbanih dejavnosti in projektiranju infrastrukture. Prav tako so lahko podlaga za ustrezne strategije za zmanjšanje mestnih toplotnih otokov v procesu širjenja mestnega območja.

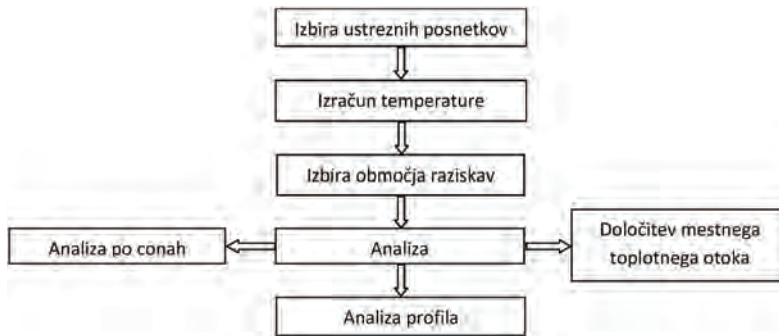
4 PRIPRAVA PODATKOV IN METODOLOGIJA

Za raziskavo uporabljeni satelitski posnetki Landsat omogočajo časovno primerjavo, ki je osnovni pogoj za izvajanje študij trenda širjenja mestnih toplotnih otokov. Prvi korak v raziskavi je izbira ustreznih posnetkov, kar je odvisno od območja raziskave. To območje je treba določiti smiselno in dovolj natančno (slika 1).



Slika 1: Mesto Sarajevo z mejami območij pozidanih zemljišč in zemljišč, načrtovanih za gradnjo.

Raziskava je razdeljena na dva dela. Prvi obsega primerjavo površinskih mestnih toplotnih otokov SUHI, dobljenih iz posnetkov treh različnih časovnih obdobj. To so posnetki satelita Landsat 5 iz leta 1986, Landsat 7 iz leta 2000 in Landsat 8 iz leta 2015. Drugi del raziskave obsega določitev površinskega mestnega otoka SUHI za štiri letne čase v letu 2015. Pri tem sta za vsak letni čas uporabljena dva posnetka satelita Landsat 8. Vsi satelitski posnetki so prevzeti s servisa USGS (angl. *United States Geological Survey*). Obdelavo podatkov smo izvedli v korakih, kot je prikazano na diagramu poteka raziskave (slika 2).



Slika 2: Diagram poteka raziskave.

Postopki računanja temperature zemeljskega površja (angl. *land surface temperature* – LST) na podlagi satelitskih posnetkov so podani v ustrezni literaturi, na primer Oštir, Kokalj in Cedilnik (2014). Postopki računanja LST na podlagi posnetkov Landsat 8 so opisani v člankih, kot je Geletič, Lehnert in Dobrovolný (2016). Po pridobitvi LST za tri obdobja (za leta 1986, 2000, 2015) smo pripravili karte z dodajanjem barv za ustrezne temperature. Površinski mestni toplotni otok SUHI se izračuna iz temperatur površja, pridobljenih s posnetkov. Definiran je z naslednjo enačbo (Shah in Ghauri, 2015; Tiangco, Lagmay in Argete, 2008):

$$\text{SUHI} = (\text{LST})_{\text{Mesto}} - (\text{LST})_{\text{Okolica}}, \quad (1)$$

kjer je $(\text{LST})_{\text{Mesto}}$ povprečna vrednost temperature površja za območje, ki se obravnava kot mestno, $(\text{LST})_{\text{Okolica}}$ pa je povprečna vrednost temperature površja za mestno okolico (Shah in Ghauri, 2015).

Enačba (1) za izračun površinskega mestnega toplotnega otoka SUHI je smiselna in se uporablja le, če sta pozidano in nepozidano območje dobro opredeljeni. Če so območja slabo opredeljena, se lahko zgodi, da je izračunana vrednost površinskega mestnega toplotnega otoka SUHI negativna.

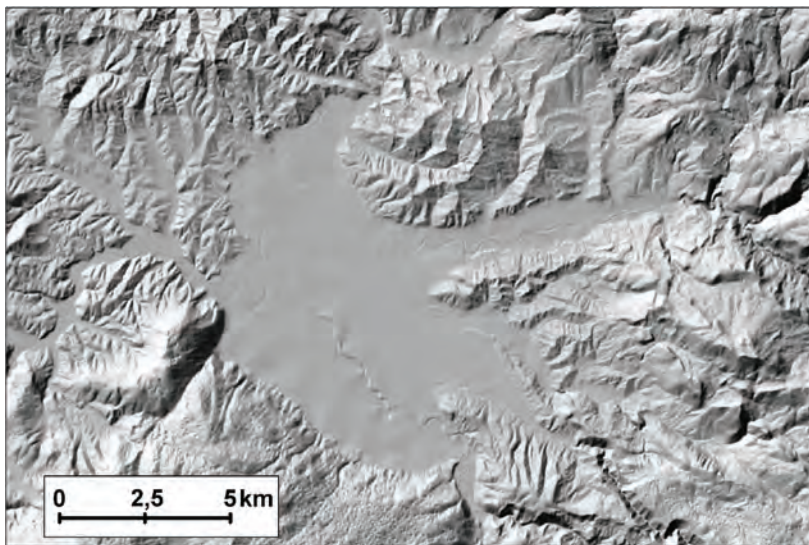
Redke študije UHI za sušna območja sta Tarleton in Katz (1995) opravila v Phoenixu in Tucsonu (Arizona, ZDA), Nasrallah in sod. (1990) v mestu Kuvait, Rasula in sod. (2016) za mesto Erbil in oazo Al Ahsa Al-Ali (2015). Splošno prepričanje, da je temperatura zraka na zelenih površinah nižja od temperature na nezelenih površinah, je bilo potrjeno s številnimi raziskavami temperature parkov in gozdnih površin (Bowler, Buyung-Ali, Knight in Pullin, 2010). V povprečju so večji parki hladnejši od manjših, a ne vedno. Mestni hladni otoki (angl. *urban cool island* – UCI) so bolj povezani z značilnostmi parkov (Chang, Li in Chang, 2007).

Do danes je objavljeno veliko raziskav na temo SUHI in SUCI (površinskih mestnih hladnih otokov; angl. *surface urban cool islands*) na zelenih in vodnih površinah v mestih, le v nekaterih študijah raziskujejo SUCI

na celotnem mestnem območju, kar zahteva boljše razumevanje te problematike (Rasul in sod., 2017).

5 PRIMERJAVA POVRŠINSKIH MESTNIH TOPLOTNIH OTOKOV IZ TREH ČASOVNIH OBDOBIJ

Obnavano območje je zelo hribovito. Primerjava površinskih mestnih toplotnih otokov iz treh različnih časovnih obdobj je precej odvisna od topografije okolice Sarajeva in dela topografije v samem mestu Sarajevo (Mulahusić, 2010) (slika 3).

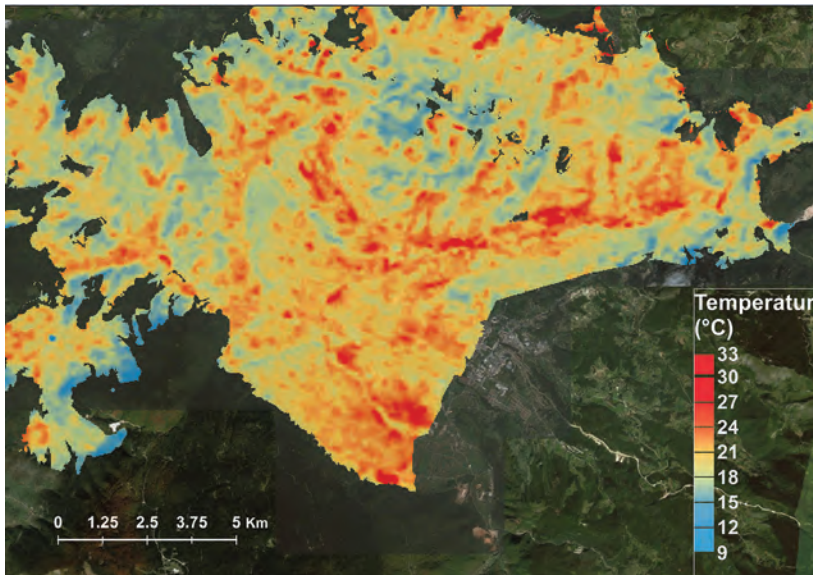


Slika 3: DMR mesta Sarajevo z okolico.

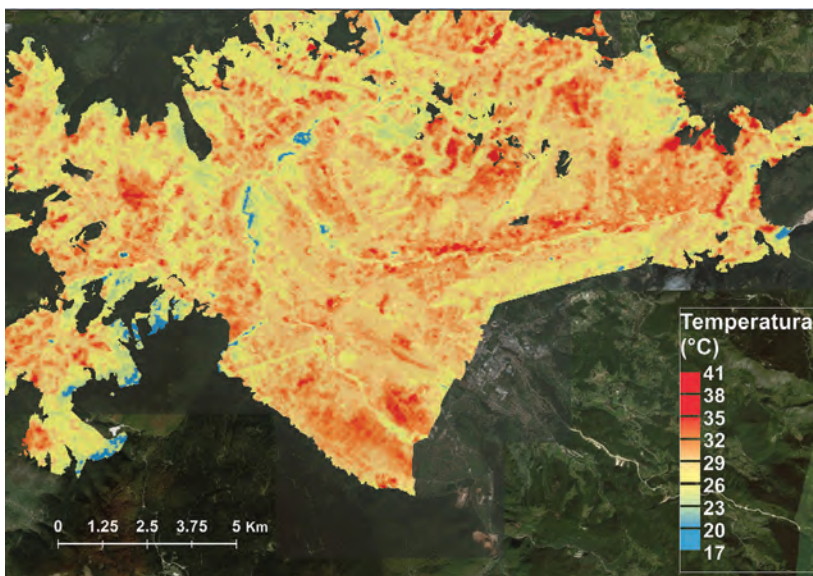
Na podlagi pridobljenih temperatur površja s posnetkov iz treh različnih časovnih obdobj (posnetki z dne 2. 9. 1986, 20. 8. 2000 in 12. 7. 2015) ugotovimo, da so se koncentracije najvišjih temperatur v devetnajstih letih premaknile.

Posnetek temperature površja iz leta 1986 (slika 4) kaže, da je na tako rekoč vseh lokacijah temperatura porazdeljena precej enakomerno. Razlike med temperaturami pozidanega območja ter temperaturami parkov in zelenih površin so zelo majhne. Posnetek iz leta 2000 (slika 5) kaže na višje temperature na celotnem območju. Čeprav so tudi tokrat temperature precej enakomerno porazdeljene, pa je opazna koncentracija višjih temperatur na pozidanih površinah. Na posnetku temperature površja iz leta 2015 (slika 7) opazimo koncentracijo najvišjih temperatur na površinah največje gostote naseljenosti prebivalstva in površinah najgostejše pozidave.

Na podlagi izračunane temperature površja smo določili povprečno temperaturo za pozidano in nepozidano območje. Površinski mestni toplotni otok za leto 1986 znaša + 0,82 °C, kar pomeni, da je v pozidanem delu mesta Sarajevo v povprečju topleje za 0,82 °C. Posnetek iz leta 2000 po izračunani temperaturi površja in izločenih vrednosti temperature za pozidani in nepozidani del pokaže, da je temperatura pozidanega dela povprečno za 0,96 °C višja. Vrednost SUHI je +4,40 °C.



Slika 4: Temperatura površja (LST), pridobljena na podlagi posnetka Landsat 5 z dne 2. 9. 1986.



Slika 5: Temperatura površja, pridobljena na podlagi posnetka Landsat 7 z dne 20. 8. 2000.

Vsi obravnavani posnetki so iz poletnega obdobja. Segrevanje površine tal je takrat najintenzivnejše, temperatura je dlje visoka. Vrednosti površinskega mestnega toplotnega otoka SUHI dosežejo vrhunec čez dan. Satelit Landsat snema okrog 10. ure zjutraj po lokalnem sončevem času, ponoči le izjemoma. Zato ni mogoče izmeriti površinskega mestnega toplotnega otoka v trenutku, ko je ta najizrazitejši.

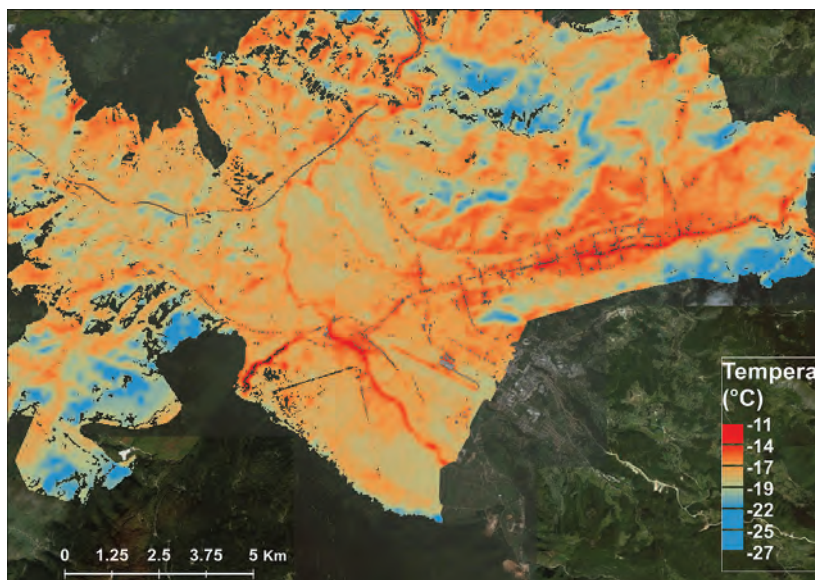
Ob običajnem razvoju mestnega okolja bi v štirinajstih letih pričakovali občutno večje povečanje. Razlago

lahko iščemo v dejstvu, da je za del tega obdobja značilno vojno rušenje in uničevanje mestnih območij. To je privedlo do razseljevanja prebivalcev, s čimer so se zmanjšale človekove dejavnosti na mestnem območju. Objekti so sicer ostali, raba tal pa se tudi ni bistveno spremenila.

6 PRIMERJAVA TEMPERATUR V ŠTIRIH LETNIH ČASIH ISTEGA LETA

Pomembne informacije o termičnem obnašanju so kodirane v letnem ciklusu površinskih temperatur. Ugotovljeno je bilo, da je mogoče oceniti srednjo vrednost in amplitudo letnega ciklusa površinske temperature (iz termičnih infrardečih posnetkov) z natančnostjo približno 1 K. Zaradi tega se mestna toplotna območja opisujejo z veččasovnimi cikli (Bechtel, 2012).

Namen raziskave je bil opredeliti spremembe mestnega toplotnega otoka glede na letni čas. Uporabili smo satelitske posnetke Landsat 8, ki so bili posneti v januarju, maju, juniju, juliju in novembru leta 2015. Temperaturo površja za januar in julij prikazujeta sliki 6 in 7.

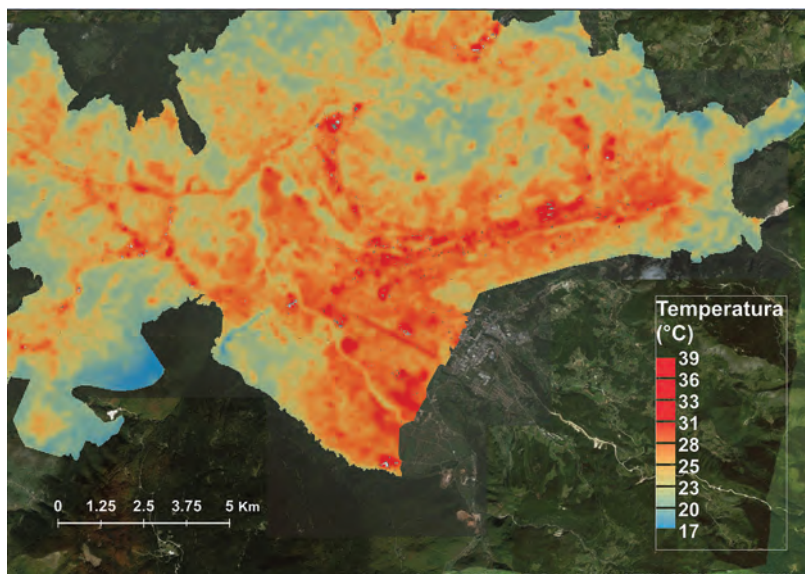


Slika 6: Temperatura površja na podlagi posnetka Landsat 8 z dne 1. 1. 2015.

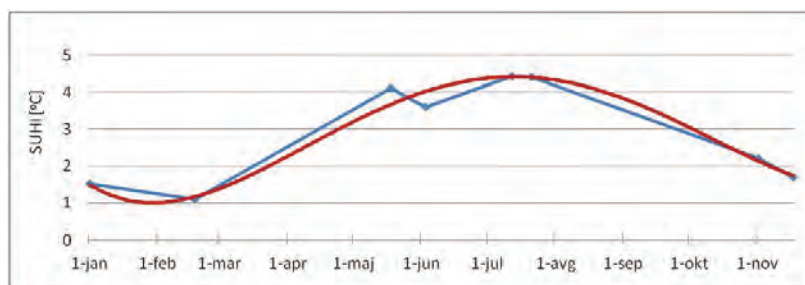
Na podlagi izračunane temperature površja smo pridobili vrednosti mestnega toplotnega otoka SUHI. Površinski mestni toplotni otok SUHI spomladi znaša + 4,10 °C za 18. maj, za 3. junij pa + 3,60 °C. Iz posnetkov iz poletnega obdobja so izračunane vrednosti površinskega mestnega toplotnega otoka SUHI + 4,44 °C za 12. julij in + 4,40 °C za 21. julij. Jeseni znaša izračunani površinski mestni toplotni otok SUHI + 2,20 °C za 1. november in + 1,70 °C za 17. november. Kljub veliki količini odstranjenih pikselov zaradi oblakov je bilo mogoče določiti vrednosti mestnega toplotnega otoka tudi za zimsko obdobje. Vrednost SUHI za 1. januar je +1,52 °C, za 18. februar pa +1,10 °C (slika 8).

Dobljene vrednosti površinskega mestnega toplotnega otoka SUHI so največje v poletnih mesecih, kar je v skladu z dejstvom, da so površinski mestni toplotni otoki SUHI najintenzivnejši v dneh z najvišjo temperaturo. Vseeno pa razlike glede na izračunan SUHI maja in junija, ki sta tudi lahko zelo topla,

niso velike. Površinski mestni toplotni otok SUHI je občutno manjši jeseni in pozimi. Poskušajmo trend opisati numerično. Ugotovimo, da se polinom 4. stopnje zelo dobro prilega opazovanim vrednostim. Krivulja je tudi precej smiselna – izraža ciklični potek spreminjanja vrednosti SUHI v letu – največji avgusta, najmanjši ob koncu januarja. Cikel s približno mesečnim časovnim zamikom sledi letnemu spreminjanju osončenosti površja, ki ga, kot je mogoče sklepati na podlagi Zakšek, Oštir in Podobnikar, (2008), tudi lahko opišemo s podobno krivuljo.



Slika 7: Temperatura površja na podlagi posnetka Landsat 8 z dne 12. 7. 2015.



Slika 8: Mestni toplotni otok SUHI glede na letni čas – leto 2015.

7 PRIMERJAVA REZULTATOV S PODATKI METEOROLOŠKIH POSTAJ

Na območju kantona Sarajevo delujejo štiri meteorološke postaje zveznega hidrometeorološkega zavoda, le dve od teh sta v mestu Sarajevo (Sarajevo-Bjelave in Butmir-Aerodrom). Landsat snema območje Sarajeva okrog 9.30, meteorološki postaji pa registrirata vrednosti ob vsaki polni uri. Temperatura meteoroloških postaj je zato določena kot srednja vrednost izmerjenih temperatur ob 9.00 in 10.00 (preglednica 1).

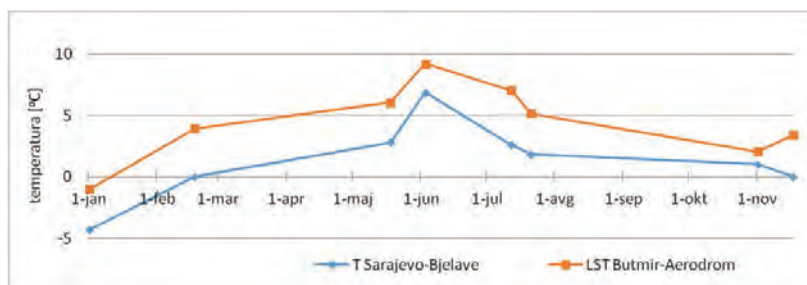
Svetilna temperatura ni enaka dejanski temperaturi tal, je le prvi kazalnik temperaturnega stanja površja. Da se približamo pravih temperaturnim vrednostim, moramo upoštevati še vpliv atmosfere in emisivnost površja. Izbira algoritma za izračun temperature tal je odvisna predvsem od števila termičnih kanalov, ki jih ima satelit, ter razpoložljivosti atmosferskih podatkov, ki so na voljo med preletom (Cedilnik, Oštir in Kokalj, 2016).

Za satelitske posnetke Landsat 8 avtorji priporočajo številna dela, v katerih so opisane možnosti uporabe senzorjev navedenega satelita za določitev temperature površja, na primer Jiménez-Muñoz in sod. (2014); Bektas Balcik in Ergene (2016); Avdan in Jovanovska (2016); Leder, Leder in Hećimović (2016) ter Laosuwan, Gomasathit in Rotjanakusol (2017).

Preglednica 1: Temperature, odčitane na posnetku, in temperature meteoroloških postaj ter razlike med njimi

Datum 2015	Sredina merjenih temperatur zraka ob 9.00 in 10.00 (T) [°C]		Temperatura tal, odčitana s posnetka ob 9.30 (LST) [°C]		Razlika med temperaturami (LST – T) [°C]		Razlika LST – T Butmir – Bjelave [°C]
	Sarajevo-Bjelave	Butmir-Aerodrom	Sarajevo-Bjelave	Butmir-Aerodrom	Sarajevo-Bjelave	Butmir-Aerodrom	
1. januar	-11,55	-15,05	-15,85	-16,08	-4,30	-1,03	3,72
18. februar	-0,55	-3,30	-0,52	0,65	0,03	3,95	3,93
18. maj	21,75	20,25	24,55	26,30	2,80	6,05	3,25
3. junij	23,80	21,60	30,67	30,83	6,87	9,23	2,36
12. julij	25,60	22,35	28,19	29,38	2,59	7,03	4,44
21. julij	30,30	27,50	31,85	32,67	1,82	5,17	3,35
1. november	12,05	6,60	13,07	8,66	1,02	2,06	1,04
17. november	9,70	4,45	9,67	7,85	0,03	3,40	3,37

Na podlagi izračunanih razlik med temperaturo površja in temperaturo zraka, izmerjeno na meteoroloških postajah, lahko ugotovimo, da so razlike najočitnejše v poletnem obdobju, ko je temperatura površine tal tudi najvišja (slika 8). Zanimiva je večja razlika v primerjanih temperaturah na merilni postaji Butmir-Aerodrom. Glede na merilno postajo Sarajevo-Bjelave je temperaturna razlika z izjemo meritve 1. novembra zelo majhna, saj se giblje med 3 °C in 4 °C (slika 9). Očitno gre za velik vpliv letaliških površin na zvišanje temperature zraka oziroma je temperaturna mikrolokacija meteoroloških postaj bistveno različna.

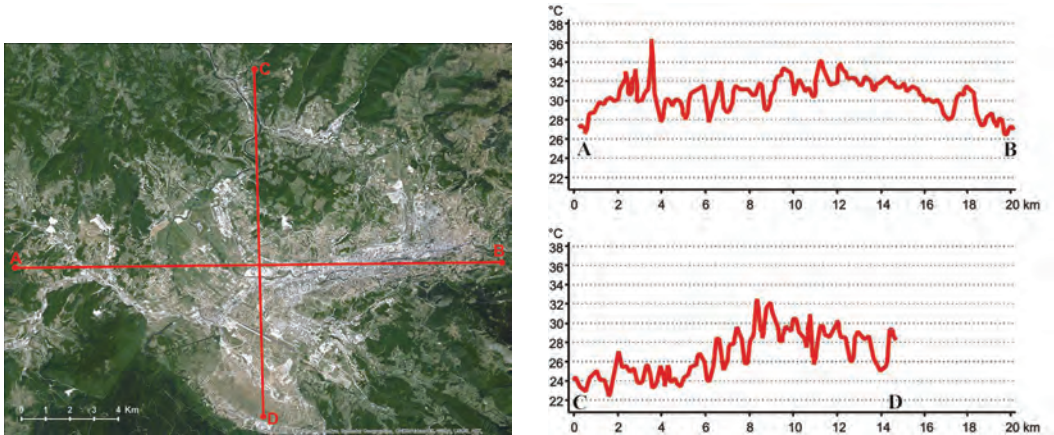


Slika 9: Temperature površja in temperature zraka T na območju letališča Butmir leta 2015.

8 ANALIZA IZBRANIH PROFILOV

Natančnejši vpliv vrste rabe tal na temperaturo površja je mogoče najbolje prikazati s profiliranjem. Na območju raziskave izberemo značilne profile. Vzdolž izbranih profilov izračunamo temperaturo površja in jo primerjamo z rabo tal ter na podlagi primerjave poskušamo sklepati o vzrokih, ki določajo obliko temperaturnega profila.

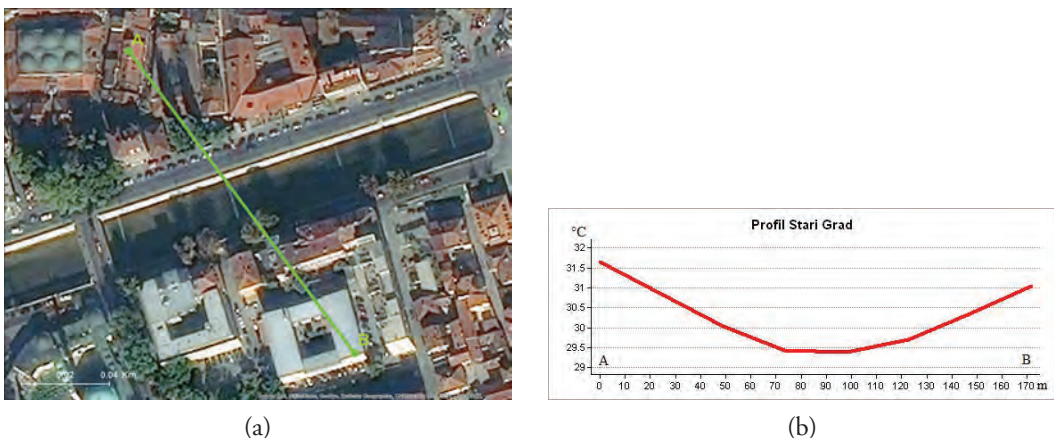
Izdelali smo dva glavna profila prek obravnavanega območja mesta Sarajevo. Prvi poteka v smeri zahod–vzhod, drugi pa v smeri sever–jug (slika 10a). Temperaturna profila sta prikazana na slikah 10b in 10c.



Slika 10: (a) profila zahod–vzhod (A – B) in sever–jug (C – D) ter (b) vrednosti temperature profila zahod–vzhod (dne 21. 7. 2015), (c) vrednosti temperature profila sever–jug (dne 21. 7. 2015).

Iz profilov lahko razberemo, da je najvišja temperatura površja na območju grajenih objektov ter betonskih in asfaltnih površin. Območja z rastjem, travniki, gozdovi, vrtički, parki in njive pa izkazujejo občutno nižje vrednosti temperature površja (slika 10b in slika 10c). Potrjeno je torej znano dejstvo. Razlike v vrednostih LST na obeh obravnavanih profilih dosegajo tudi do 10 °C.

Dodatno smo izdelali temperaturne profile za izbrane mikrolokacije v mestu Sarajevo. Prikazujemo štiri primere, ki izkazujejo uporabnost metod daljinskega zaznavanja in prednosti te tehnologije pred klasičnimi metodami.

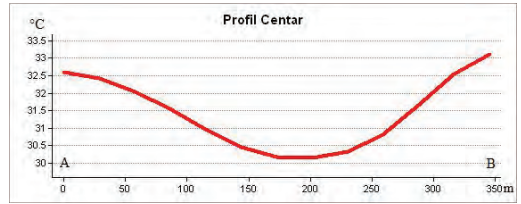


Slika 11: (a) lokacija profila Stari Grad in (b) vrednosti temperature površja profila Stari Grad 10 (dne 21. 7. 2015).

Profil temperature površja na območju Starega Grada (slika 11) poteka prek reke Miljacke. Vrednost LST se zniža zaradi vode, temperatura površja pa je višja na strehah grajenih objektov. Razlika v temperaturi je sicer le 2,30 °C.



(a)

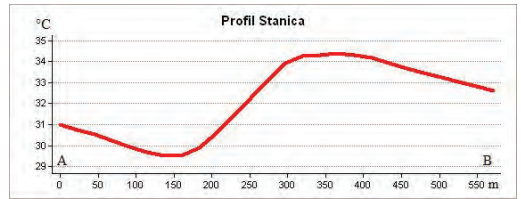


(b)

Slika 12: (a) lokacija profila Centar in (b) vrednosti temperature površja profila Centar (dne 21. 7. 2015).



(a)

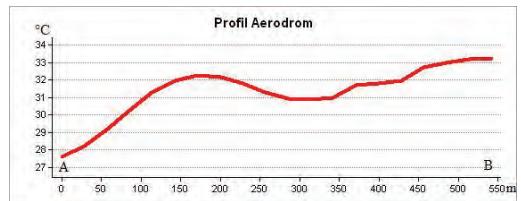


(b)

Slika 13: (a) lokacija profila Stanica in (b) vrednosti temperature površja profila Stanica (dne 21. 7. 2015).



(a)



(b)

Slika 14: (a) lokacija profila Aerodrom in (b) vrednosti temperature profila Aerodrom (dne 21. 7. 2015).

Profil, ki smo ga analizirali na območju mestne občine Centar, kaže, da rastje močno zmanjšuje učinek segrevanja površja, s tem pa tudi učinek mestnega toplotnega otoka (slika 12). Naslednji profil (slika 13) smo izdelali na območju železniške postaje. Temperaturni profil kaže, da imajo strehe hiš in betonske površine občutno višjo temperaturo kot zelene površine. Razlika je kar 5 °C.

Eden od najzanimivejših temperaturnih profilov površja je izračunan na območju letališča Sarajevo (slika 14a). Profil kaže zanimivo porazdelitev temperature nad enim najtoplejših objektov v Sarajevu. Vrednosti temperature površja so najvišje nad asfaltiranimi površinami in betonskimi deli objekta (slika 14b), razlika v temperaturi pa znaša skoraj 6 °C.

9 SKLEP

Metode daljinskega zaznavanja so učinkovite za preučevanje mestnih toplotnih otokov. V raziskavah posebnosti (mikro)podnebja nekega območja je mogoče kombinirati podatke iz različnih virov. Tako so v okviru mnogih študij, v katerih proučujejo toplotne otoke velikih mest (Bangkok, Toronto, Madrid, itd.), uporabljeni podatki, pridobljeni iz satelitskih posnetkov, v kombinaciji z drugimi viri podatkov. V navedenih študijah je raziskan pojav toplotnega otoka z vidika povečanja števila prebivalstva ali povečanja prometa in števila vozil v prometu. Takšne študije zahtevajo veliko finančnih sredstev.

Pri raziskavi mestnega toplotnega otoka mesta Sarajevo so uporabljeni brezplačni posnetki satelitov Landsat. Ti posnetki imajo nekatere pomanjkljivosti, ki jih je v postopku obdelave treba upoštevati. Satelit Landsat neko območje snema vedno v istem delu dneva. Območje Sarajeva snema okrog 9.30 po sončevem času, lokalno ob 10.30. Dobljeni rezultati obdelave se zato ne nanašajo na vrednosti temperature površine, ko je ta najvišja (v času, ko je Sončevo obsevanje največje), ampak na temperaturo tal dopoldne, ko je zaradi nočnega ohlajanja nižja. Težava je tudi v tem, da izračunana temperatura ni temperatura zraka, temveč temperatura površja. Zvezo med njima je težko določiti, saj je odvisna od temperaturnih značilnosti površja. Tretja pomanjkljivost je razmeroma majhna pogostnost snemanja in oblačnost. Landsat snema isto območje vsakih 16 dni. Uporabnost posnetkov ob oblačnih dnevih je omejena, s čimer se dodatno zmanjšuje frekvenca uporabnih posnetkov. Oblaki so velika težava zlasti jeseni in pozimi. Sodobni modeli za odstranjevanje oblakov, ki se uporabljajo, omogočajo brisanje piksla, kjer senzor registrira območje kot oblak (informacija je vsebovana v tako imenovanem kakovostnem kanalu (angl. *quality analysis* – kanalu QA)). Tako avtomatiziranega odstranjevanja pikslov ni mogoče nadzorovati, zato se lahko zgodi, da so odstranjeni tudi piksli na delih posnetka, kjer ni oblaka.

Rezultati obdelave območja mesta Sarajevo so pokazali prisotnost mestnega toplotnega otoka, ki je najintenzivnejši v poletnih mesecih (+4,4 °C). Jeseni in spomladi je ta intenzivnost manjša (okrog +2,5 °C), kar je skladno z dejstvom, da je poleti SUHI večji, saj je takrat Sončevo obsevanje veliko intenzivnejše.

Raziskava kaže, da se najvišje temperature pojavljajo vzdolž glavne in najfrekventnejše prometnice mesta Sarajevo, pa tudi na krajih največjega pretoka prebivalstva (trgovska središča, večji stanovanjski bloki itd.). Najpogosteje so ta območja v najgosteje naseljenih delih mesta, kjer ni veliko zelenih površin.

S termičnim satelitskim snemanjem je mogoče v kratkem času pridobiti termalne posnetke obsežnih območij. Pridobljeni rezultati raziskave toplotnih obremenitev mesta Sarajevo se lahko koristno uporabijo pri dolgoročnem načrtovanju prostorske širitve naselja. Termalne posnetke lahko uporabimo tudi ob

iskanju rešitev za rekonstrukcijo objektov in uporabo novih gradbenih materialov. Tako je mogoče precej zmanjšati vpliv pojava mestnega toplotnega otoka, ki negativno vpliva na zdravje in ugodje prebivalcev.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se Zavodu za planiranje razvoja kantona Sarajevo in Zveznemu hidrometeorološkemu zavodu za vse podatke, ki sta nam jih odstopila za namene raziskave.

Literatura in viri

- Al-Ali, A., Mubarak, H. (2015). The Effect of Land Cover on the Air and Surface Urban Heat Island of a Desert Oasis. Ph.D. Thesis, Durham University, Durham, UK.
- Arnfield, A. J. (2003). Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island. *International Journal of Climatology*, 23 (1), 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Avdan, U., Jovanovska, G. (2016). Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors*, 2016, Article ID 1480307, 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Bechtel, B. (2012). Robustness of Annual Cycle Parameters to Characterize the Urban Thermal Landscapes. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9 (5), 876–880. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2185034>
- Bektas Balcik, F., Ergene, E. M. (2016). Determining the impacts of land cover/use categories on land surface temperature using Landsat8-OLI. V: L. Halounova, V. Šafář, P. L. N. Rajiu, L. Plánka, V. Ždímal, T. Srinivasa Kumar, F. S. Faruque, Y. Kerr, S. M. Ramasamy, J. Comiso, Y. A. (Yousif) Hussin, P. S. Thenkabil, S. Lavender, A. Skidmore, P. Yue, P. Patias, O. Altan, Q. Weng (ur.), XXIII ISPRS Congress, Commission VIII: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B8 (str. 251–256). Praga, Češka: ISPRS. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-251-2016>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97, 147–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Busato, F., Lazzarin, R. M., Noro, M. (2014). Three years of study of the Urban Heat Island in Padua: Experimental results. *Sustainable Cities and Society*, 251–258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.05.001>
- Cedilnik, R., Oštir, K., Kokalj, Ž. (2016). Satelitsko termično snemanje Ljubljane. GIS v Sloveniji 13: Digitalni podatki, 83–93. Ljubljana: Založba ZRC.
- Chang, C. R., Li, Chang, S. D. (2007). A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 80, 386–395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.09.005>
- Chun, B., Guldmann, J. M. (2014). Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities. *Landscape and Urban Planning*, 125, 76–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.016>
- Debbage, N., Marshall Shepherd, J. (2015). The urban heat island effect and city contiguity. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 181–194. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compenvurbys.2015.08.002>
- EPA – U.S. Environmental Protection Agency (2008). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. <https://www.epa.gov/heat-islands/reducing-urban-heat-islands-compendium-strategies>, pridobljeno 16. 9. 2016.
- Fabrizi, R., Bonafoni, S., Biondi, R. (2010). Satellite and ground-based sensors for the Urban Heat Island analysis in the city of Rome. *Remote Sensing*, 2 (5), 1400–1415. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs2051400>
- Farina, A. (2012). Exploring the relationship between land surface temperature and vegetation abundance for urban heat island mitigation in Seville, Spain. Magistarski rad, Lund, Švedska: Lund University, Department of Physical Geography and Ecosystem Analysis.
- Geletič, J., Lehnert, M., Dobrovolný, P. (2016). Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities. *Remote Sensing*, 8 (10), 788. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8100788>
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., Cristóbal, J. (2014). Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11 (10), 1840–1843. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>
- Kim, H. H. (1992). Urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, 13 (12), 2319–2336. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169208904271>
- Laosuwat, T., Gomasathit, T., Rotjanakul, T. (2017). Application of Remote Sensing for Temperature Monitoring: The Technique for Land Surface Temperature Analysis. *Journal of Ecological Engineering*, 18 (3), 53–60. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/69358>
- Leder, T. D., Leder, N., Hečimović, Ž. (2016). Split Metropolitan area surface temperature assessment with remote sensing method. *Građevinar*, 68 (11), 895–905. DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.1661.2016>
- Mulahusić, A. (2010). Upotreba satelitskih snimaka visoke rezolucije za prostorno planiranje grada. Doktorska disertacija. Građevinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo.
- Nasrallah, H. A., Brazel, A. J., Balling, R. C. (1990). Analysis of the Kuwait City urban heat island. *International Journal of Climatology*, 10, 401–405. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3370100407>
- Oke, T. R. (1981). Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations. *Journal of Climatology*, 1, 237–254. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>

- Oštir, K., Kokalj, Ž., Cedilnik, R. (2014). Satelitsko termično snemanje Ljubljane. Ljubljana: ZRC SAZU.
- Oštir, K., Mulahusić, A. (2014). Daljinska istraživanja. Sarajevo: Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu.
- Rao, P.K. (1972). Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53, 647–648.
- Rasul, A., Balzter, H., Smith, C. (2016). Diurnal and Seasonal Variation of Surface Urban Cool and Heat Islands in the Semi-Arid City of Erbil, Iraq. *Climate*, 4, 42. DOI: <https://doi.org/10.3390/cl4030042>
- Rasul, A., Balzter, H., Smith, C., Remedios, J., Adamu, B., Sobrino, J. A., Srivani, M., Weng, Q. (2017). A Review on Remote Sensing of Urban Heat and Cool Islands. *Land*, 6 (2), 38. DOI: <https://doi.org/10.3390/land6020038>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*, 512–513, 582–598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>.
- Shah, B., Ghauri, B. (2015). Mapping Urban Heat Island Effect in Comparison with the Land Use, Land Cover of Lahore District, Pakistan. *Journal of Meteorology*, 11 (22), 37–48.
- Srivani, M., Hokao, K. (2012). Thermal infrared remote sensing for urban and environmental studies: An application for the city of Bangkok, Thailand. *Journal of Architectural / Planning Research and Studies*, 9 (1), 83–100.
- Tarleton, L. F., Katz, R. W. (1995). Statistical explanation for trends in extreme summer temperatures at Phoenix, Arizona. *Journal of Climate*, 8, 1704–1708. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<1704:seftie>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<1704:seftie>2.0.co;2)
- Tiangco, M., Lagmay, A. M. F., Argete, J. (2008). ASTER-Based Study of the Night-Time Urban Heat Island Effect in Metro Manila. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 2799–2818. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160701408360>
- Voogt, J. A. (2002). Urban heat island, *Encyclopedia of global environmental change*, 3, 660–666.
- Voogt, J. A., Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370–384. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wang, M. (2015). Characterization of Surface Urban Heat Island in the Greater Toronto Area Using Thermal Infrared Satellite Imagery. *Magistrsko delo*. Waterloo, Kanada: University of Waterloo.
- Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 (4), 335–344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjrs.2009.03.007>
- Zakšek, K., Oštir, K., Podobnikar, T. (2003). Osončenost površja Slovenije. *Geodetski vestnik*, 47 (1 in 2), 55–63.
- Zhou, D., Zhao, S., Liu, S., Zhang, L., Zhu, C. (2017). Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 152, 51–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.017>.



Mulahusić A., Tuno N., Topoljak J., Kolić T., Kogoj D. (2018). Satelitsko termično snemanje Sarajeva. *Geodetski vestnik*, 62 (2), 173–187. DOI: [10.15292/geodetski-vestnik.2018.02.173-187](https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2018.02.173-187)

Izr. prof. dr. Admir Mulahusić, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Sarajevu, Građevinski fakultet 2
Patriotske lige 30, BIH-71000 Sarajevo
e-naslov: admir_mulahusic@gf.unsa.ba

Doc. dr. Nedim Tuno, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Sarajevu, Građevinski fakultet 2
Patriotske lige 30, BIH-71000 Sarajevo
e-naslov: nedim_tuno@gf.unsa.ba

Doc. dr. Jusuf Topoljak, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Sarajevu, Građevinski fakultet 2
Patriotske lige 30, BIH-71000 Sarajevo
e-naslov: jusuf_topoljak@gf.unsa.ba

Tarik Kolić, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Sarajevu, Građevinski fakultet 2
Patriotske lige 30, BIH-71000 Sarajevo
e-naslov: tarik_sj91@hotmail.com

Izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si