

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

Josip Alpeza

Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, univ. bacc. ing. geod. et geoinf., jalpeza@geof.hr

Andrea Marić

Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, univ. bacc. ing. geod. et geoinf., amaric@geof.hr

Olga Bjelotomić Oršulić

Sveučilište Sjever, Odjel za geodeziju i geomatiku, doc. dr. sc., oborsulic@unin.hr

Sanja Šamanović

Sveučilište Sjever, Odjel za geodeziju i geomatiku, doc. dr. sc., sasamanovic@unin.hr

Sažetak: U ovom radu je analizirana pojava urbanih toplinskih otoka (UTO) na području Grada Mostara primjenom satelitskih snimki misije Landsat. Površinska temperatura tla (LST) određena je korištenjem termalnog kanala za ljetno razdoblje od 2021. do 2025. godine. Analiza je provedena u okviru GIS-a primjenom LST-a i spektralnih indeksa NDVI, NDWI, NDBI i BSI koji omogućuju izdvajanje vegetacijskih, vodenih, izgrađenih površina te golog tla. Na osnovi dobivenih parametara izračunat je indeks kritičnosti okoliša (ECI) kojim je procijenjena razina toplinske ugroženosti pojedinih dijelova urbanog prostora. Rezultati ukazuju na jasnu povezanost između karakteristika zemljišnog pokrova te LST-a i ECI-ja. Izgrađene površine i golo tlo povezani su s višim temperaturama, dok vegetacija i vodene površine imaju izražen rashlađujući učinak. Dobiveni rezultati, realizirani u obliku web-karte, omogućuju uvid u prostornu raspodjelu urbanih toplinskih otoka te mogu poslužiti kao podloga za planiranje urbanog razvoja i povećanje udjela zelenih površina.

ključne riječi: urbani toplinski otoci (UTO), indeks kritičnosti okoliša (ECI), urbani zeleni otoci, površinska temperatura tla (LST), web-karta urbanih toplinskih otoka, Mostar

Determination, mapping and analysis of heat islands in the urban area of the City of Mostar using satellite imagery

Abstract: This paper analyzes the occurrence of urban heat islands in the City of Mostar using satellite imagery from the Landsat mission. Land Surface Temperature (LST) was derived from the thermal band for the summer period from 2021 to 2025. The analysis was conducted in a GIS environment using LST and spectral indices NDVI, NDWI, NDBI and BSI, which enable the identification of vegetated areas, water bodies, built-up surfaces and bare soil. Based on these parameters, the Environmental Criticality Index (ECI) was calculated to assess the level of thermal vulnerability in different parts of the urban area. The results indicate a clear relationship between land cover characteristics and LST and ECI values. Built-up areas and bare soil are associated with higher temperatures, while vegetation and water bodies exhibit a pronounced cooling effect. The obtained results, presented through an interactive web map, provide insight into the spatial distribution of urban heat islands and may serve as a basis for urban planning and increasing the proportion of green areas.

Key words: urban heat islands (UHI), environmental criticality index (ECI), urban green islands, land surface temperature (LST), urban heat island web map, Mostar



Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

1. UVOD

Satelitske snimke važan su izvor prostornih podataka jer omogućuju analizu promjena na površini Zemlje, uključujući praćenje urbanizacije, promjene zemljišnog pokrova i klimatskih uvjeta [1, 2].

Za praćenje temperature kao važnog klimatskog čimbenika često se koriste snimke snimljene termalnim sensorima kojima se mjere dvije vrste temperature: temperatura zraka i površinska temperatura tla (LST, engl. *Land Surface Temperature*). Temperatura zraka mjeri se standardno na visini od 2 m u meteorološkim postajama [3], dok LST opisuje toplinsko stanje same površine i snažno ovisi o tipu zemljišnog pokrova. Mjeri se na određenim visinama neposredno od samoga tla (5 cm i više) [4], a često se procjenjuje upravo analizom snimki dobivenih snimanjem termalnih senzora (TIRS kod Landsat 8 i 9) koji mjere odaslano infracrveno zračenje u termalnom dijelu spektra (od 8 do 14 μm). Sensori registriraju emitirano infracrveno zračenje te ga pretvaraju u podatke o temperaturi površine, a sposobni su detektirati vrlo male promjene (manje od 0.1°C) [1, 5].

U kontekstu globalnog porasta temperature i sve intenzivnije urbanizacije posebnu pozornost privlači pojava urbanih toplinskih otoka (UTO, engl. *Urban Heat Islands*), odnosno porasta temperature tla i zraka zbog koncentrirane urbanizacije. Izgradnjom gradova i smanjenjem udjela prirodnih površina dolazi do povećanja temperature u odnosu na okolna područja. Sustavno praćenje određenog područja primjenom daljinskih istraživanja omogućuje dobivanje detaljnih informacija o prostornoj raspodjeli temperature površine i ponašanja temperature ovisno o vrsti zemljišnog pokrova. Na osnovi tih vrijednosti može se zaključiti o postojanju toplinskih otoka u gradu [5, 6].

UTO predstavljaju dijelove grada čija je temperatura površine veća od temperature okolnoga područja, pri čemu povećane temperature negativno utječu na ljudsko zdravlje i kvalitetu života. Razlog njihova nastanka jest prevladavanje umjetnih materijala u sastavu gradivnih elemenata toga područja, odnosno betona i asfalta, koji imaju drugačiji način zagrijavanja od prirodnih tala, posebice vegetacije i vode. Posljedica toga jest povećanje temperature područja za nekoliko Celzijevih stupnjeva u odnosu na okolno, neizgrađeno područje. Na njihovo stvaranje utječe i gustoća izgrađenosti područja koja može još dodatno povećati temperaturu [5, 6]. UTO se potencijalno dodatno razvijaju uslijed intenzivnog prometa, izgaranja fosilnih goriva i velikog udjela asfaltiranih površina te predstavljaju odraz zajedničkog djelovanja temperature i nedostatka rashlađujućih čimbenika (vode i vegetacije) u urbanim sredinama [7, 8]. U svrhu opisivanja utjecaja urbanizacije na toplinsko stanje okoliša u istraživanjima se često koriste različiti pokazatelji koji povezuju površinsku temperaturu i karakteristike zemljišnog pokrova. Jedan od takvih pokazatelja jest indeks kritičnosti okoliša (ECI, engl. *Environmental Criticality Index*) koji daje mjeru utjecaja urbanizacije na okoliš i služi za identifikaciju područja izloženih povećanom okolišnom pritisku uslijed urbanizacije, odnosno za procjenu razine toplinske ugroženosti prostora [9, 10].

S druge strane, može se govoriti i o urbanim zelenim otocima. To su dijelovi grada čija je temperatura zraka i tla niža od okolnog područja, poglavito zahvaljujući vegetaciji koja djeluje kao prirodni rashladni čimbenik zbog stvaranja hlada i isparavanja vode te na taj način smanjuje utjecaj toplinskih otoka [11]. Vegetacija apsorbira plavi i crveni dio spektra potreban za fotosintezu, a reflektira zeleni i bliskoinfracrveni dio spektra čime doprinosi hlađenju okoliša [12]. Postojanje vegetacije i stvaranje hlada u gradu zato je ključno, posebice u ljetnim mjesecima, kad su temperature zraka, a napose temperature tla, vrlo visoke [13].

Cilj ovoga rada jest određivanje, kartiranje i analiza UTO-a na području Grada Mostara primjenom satelitskih snimki misije Landsat te analiza njihove povezanosti s karakteristikama zemljišnog pokrova i stupnjem urbanizacije. Pojava UTO-a predmet je brojnih istraživanja. Zbog rastuće urbanizacije i klimatskih promjena, fenomen UTO-a posljednjih je godina u središtu brojnih međunarodnih istraživanja koja analiziraju povezanost LST-a i karakteristika zemljišnog pokrova [14]. Primjenom

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

daljinskih istraživanja i satelitskih snimki moguće je analizirati prostornu raspodjelu LST-a i povezanost s karakteristikama zemljišnog pokrova. Istraživanjem u Turskoj (Kayseri, Kapadocija) utvrđeno je da povećanje udjela izgrađenih površina i smanjenje vegetacije dovodi do porasta LST-a te jačanja UTO-a [15]. Za područje Brazila (Sao Paulo) analizirana je povezanost između LST-a i spektralnih indeksa NDVI i NDBI, pri čemu je potvrđeno da vegetacija i vodene površine imaju izražen rashlađujući učinak, dok izgrađena područja i golo tlo doprinose povećanju temperature [16]. U sličnom radu, provedenom za područje Cipra (Pafos), analizirani su UTO primjenom daljinskih istraživanja, prikazujući da kombinirana analiza LST-a i spektralnih indeksa omogućuje učinkovitu identifikaciju toplinski opterećenih urbanih područja te procjenu utjecaja urbanizacije na toplinsko stanje okoliša [17]. Također, jedno od istraživanja ističe da satelitske snimke i analiza spektralnih indeksa predstavljaju pouzdan pristup za praćenje prostorne raspodjele UTO-a i promjena u toplinskim uvjetima urbanih sredina [18]. Slična istraživanja provedena su i na području Hrvatske te Bosne i Hercegovine. Primjerice, na području Varaždina analizirana je dinamika UTO-a na osnovi izračuna LST-a i spektralnih indeksa, pri čemu su utvrđene promjene povezane s urbanizacijom i smanjenjem vegetacijskog pokrova [19]. Drugi primjer jest analiza raspodjele UTO-a na području Zagreba primjenom LST-a i ECI-ja, čime su identificirana područja povećane toplinske ugroženosti u gradskom središtu i oko industrijskih pogona [10]. Posebno je zanimljiv rad proveden za područje Grada Mostara [20] u kojem je analizirana raspodjela LST-a za dulje vremensko razdoblje, pri čemu su identificirana glavna područja povišenih temperatura povezana s urbaniziranim i industrijskim površinama. Navedeno istraživanje predstavlja važno polazište za određivanje UTO-a na području Mostara te služi kao referentna osnova za daljnju analizu provedenu u ovom radu.

Iako su UTO često istraživani primjenom satelitskih podataka, istraživanja usmjerena na područje Bosne i Hercegovine, a osobito na grad Mostar, i dalje su vrlo ograničena. Za područje Mostara dosadašnja su istraživanja ponajprije analizirala dugoročne promjene LST-a do 2018. godine, dok su novije promjene povezane s intenziviranjem urbanizacije i porastom temperature zraka nedovoljno istražene. Također, integrirane analize koje povezuju LST s više spektralnih indeksa i pokazateljima kritičnosti okoliša u kontekstu urbanih toplinskih otoka u ovom području praktički ne postoje. Stoga je cilj ovoga rada analizirati prostornu raspodjelu UTO-a na području Mostara primjenom satelitskih snimki misije Landsat 8/9 (aktivne Landsat misije s termalnim kanalom) te procijeniti razinu okolišne kritičnosti, odnosno ECI-ja, korištenjem LST-a i spektralnih indeksa.

Istraživanje je provedeno u okviru projekta "Utjecaj 3D strukture grada na intenzitet urbanog toplinskog otoka" (UNIN-TEH-26-1-4), Varaždin, Hrvatska (2026).

2. SVRHA ISTRAŽIVANJA

Za istraživanje i razumijevanje pojave i rasprostiranja UTO-a izabrano je područje Grada Mostara. Mostar ima izrazito toplu klimatska obilježja koja proizlaze iz njegova položaja u dolini rijeke Neretve te blizine Jadranskog mora. Prema Köppenovoj klasifikaciji klime, Mostar pripada tipu Csa, odnosno sredozemnoj klimi s vrućim i suhim ljetima te blagim i vlažnijim zimama [21]. Spada među najtoplija urbana područja jugoistočne Europe. Upravo ovdje je zabilježena najviša temperatura zraka zemalja nastalih raspadom bivše Jugoslavije: 46.2°C izmjereno dana 31. srpnja 1901. godine [21]. Taj rekord i do danas nije oboren. Prosječna godišnja temperatura zraka iznosi 15°C-16°C, dok su ljetni mjeseci obilježeni vrlo visokim temperaturama. Dnevne temperature tijekom toplinskih valova mogu dosežati i preko 40 °C [21]. Zbog takvih klimatskih uvjeta područje je posebno pogodno za proučavanje UTO-a. Zemljopisni smještaj Mostara dodatno pogoduje zadržavanju topline. Grad je smješten u dolini Neretve (ispod 100 m. n. v.) okruženoj brdskim masivima (više od 500 m. n. v.), što može doprinijeti zadržavanju topline, smanjenoj ventilaciji i težem priljevu vjetrova koji bi rashladio prostor. Kombinacija visokih ljetnih temperatura, izražene urbanizacije te smještaja u kotlini stvara povoljne uvjete za pojavu i razvoj

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

UTO-a. Osim toga, značajan utjecaj imaju i tipovi zemljišnog pokrova. Izgrađene površine poput betona, asfalta i krovnih površina imaju visoku sposobnost apsorpcije topline, dok vegetacijske i vodene površine djeluju kao prirodni regulator temperature. Upravo zbog tih razlika u toplinskim svojstvima različitih površina [22], UTO u Mostaru mogu biti izrazito naglašeni, osobito tijekom ljetnih mjeseci.

Za područje Grada Mostara već je provedeno istraživanje [20] u kojemu je određen LST Mostara primjenom satelitskih metoda. Istraživanje je provedeno za razdoblje od 1999. do 2018. godine. Međutim, novije promjene povezane s urbanizacijom i porastom temperature zraka nakon 2018. godine nisu detaljnije analizirane. Dosadašnja istraživanja za Mostar uglavnom su bila usmjerena na analizu LST-a, bez detaljnije integracije spektralnih indeksa i procjene toplinske ugroženosti urbanog prostora. Za razliku od samog LST-a, koji u značajnoj mjeri ovisi o meteorološkim uvjetima prisutnima u trenutku snimanja, integracija LST-a i spektralnih indeksa u ECI omogućuje cjelovitiju procjenu toplinske ugroženosti urbanog prostora. Time se analiza ne temelji isključivo na trenutnom toplinskom stanju površine, već i na karakteristikama zemljišnog pokrova koje također utječu na razvoj UTO-a. Dodatno, rad obuhvaća recentno razdoblje 2021.-2025., koje nije bilo uključeno u prethodna istraživanja za područje Mostara. Danas na globalnoj razini dolazi do značajnog i stalnog porasta temperature zraka, s predodžbom daljnjeg rasta barem do 2050. godine [23]. Osim toga, brojni medijski napisi potvrdili su i protekle, 2025. godine, da je Mostar najtopliji grad jugoistočne Europe [24, 25]. Zbog očite tendencije porasta temperature i guste izgrađenosti, Grad Mostar, kao takav, predstavlja pogodno područje za stvaranje UTO-a gdje, zbog izgrađenosti, dolazi do visoke toplinske ugroze.

Ovaj rad analizira UTO-e na području Mostara za razdoblje 2021.-2025. kombiniranjem LST-a i spektralnih indeksa koji predstavljaju ključne tipove zemljišnog pokrova relevantne za toplinsko ponašanje urbanog prostora. Na osnovi integrirane analize može se provesti prostorna identifikacija UTO-a i procjena toplinske ugroženosti urbanog prostora. Jedan od doprinosa rada ogleda se i u operacionalizaciji rezultata kroz javno dostupnu interaktivnu web-kartu koja omogućuje prostornu i vremensku analizu UTO-a te može poslužiti kao alat za prostorno planiranje i klimatsku prilagodbu urbanog prostora.

Cilj je istraživanja odrediti područja Grada koja zbog urbaniziranosti značajno utječu na porast LST-a te tako dolazi do ozbiljne kritičnosti okoliša. Na osnovi podataka zaključuje se o rasprostiranju urbanih toplinskih otoka, a konačni korak jest kartirati ta područja. Pretpostavlja se da su najviše vrijednosti LST-a povezane s područjima najveće urbanizacije i manjeg udjela vegetacije i vodenih površina.

3. PODRUČJE ANALIZE

Područje Grada Mostara nalazi se u Bosni i Hercegovini, u središnjem dijelu Hercegovačko-neretvanske županije i pokriva površinu od 1166.12 km². Broji 60 naselja [26].

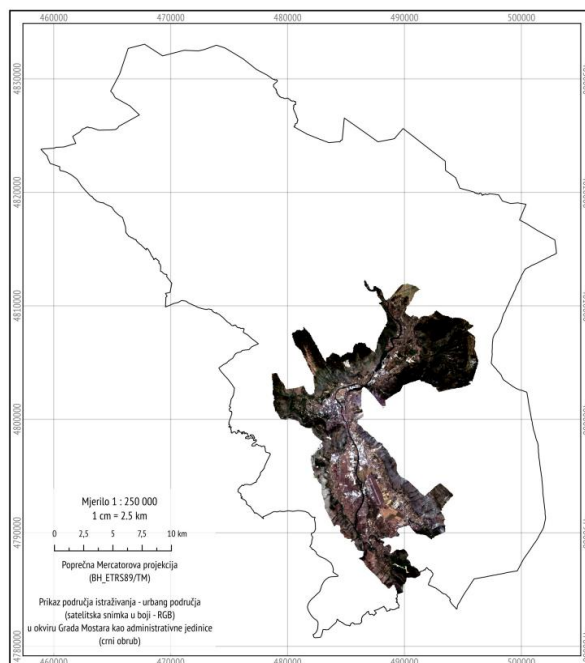
U svrhu provedbe istraživanja odabrano je naselje Mostar te prigradska naselja slijedeći dva kriterija. Prvi kriterij odnosi se na izgrađenost područja. U analizu su uključena naselja s izraženijim udjelom izgrađenih površina, pri čemu je dodatno uzeta u obzir prostorna blizina naselju Mostar. Udio izgrađenih površina procijenjen je vizualnom interpretacijom satelitskih snimki (Landsat 8 snimke za razdoblje 2021.-2025., ESRI World Imagery [27] i Google Maps [28]) te kartografskih podloga (OpenStreetMap [29]), pri čemu su kao izgrađene površine uzete stambene, industrijske i prometne zone. Drugi kriterij je broj stanovništva (više od 1000 stanovnika) prema popisu stanovništva u Bosni i Hercegovini iz 2013. godine [30]. Na taj je način izdvojeno urbano i prigradsko područje Mostara u kojem se očekuje izraženiji utjecaj urbanizacije na pojavu UTO-a.

Uključeno je 21 naselje Grada Mostara, i to: Mostar, Ilići, Cim, Rodoč, Vihovići, Gnojnice, Raštani, Vrapčići, Potoci, Kutilivač, Vojno, Buna, Blagaj, Lakševine, Ortiješ, Kosor, Dračevce, Jasenica, Bačevići, Hodbina te Željuša. Ukupna je površina područja istraživanja 194 km². Odabrana naselja obuhvaćaju

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

urbano i prigradsko područje s većim udjelom izgrađenih površina, dok preostalih 39 naselja ima pretežno ruralni karakter s dominantnim vegetacijskim pokrovom te stoga nisu uključena u analizu urbanih toplinskih otoka. Prikaz odabranog područja u okviru Grada Mostara predočen je na Slici 1.



Slika 1. Prikaz područja istraživanja unutar administrativnih granica Grada Mostara s označenim analiziranim područjem

4. METODOLOGIJA IZRADE

Metodologija istraživanja zasniva se na obradi satelitskih snimki s ciljem računanja LST-a te određivanja područja s izraženim toplinskim otocima u Gradu Mostaru. Rasprostiranje UTO-a određeno je korištenjem ECI-ja kojim se daje uvid u različite stupnjeve ugroženosti određenog područja zbog zadržavanja topline.

Cjelokupna obrada i analiza satelitskih snimki provedena je korištenjem GIS alata, QGIS-a (verzija 3.32, "Lima") pri čemu su rezultati prikazani u obliku web-karata LST-a i ECI-ja. Web-karta izrađena je pomoću modula "QGIS2WEB", djelomično uređena putem Visual Studio Code-a, a zatim objavljena na platformi GitHub.

4.1 Izvori podataka

Za potrebe određivanja i kartiranja UTO-a na području Grada Mostara glavni izvor podataka predstavljaju satelitske snimke. Za obradu su korištene snimke misije Landsat 8, preuzete od Geološkog zavoda SAD-a (engl. USGS, *United States Geological Survey*) putem sučelja Earth Explorer [31], koja jedina od besplatnih misija nudi termalne snimke više rezolucije potrebne za ovo istraživanje (npr. Sentinel nema termalne kanale, a MODIS daje snimke kilometarske rezolucije). Prostorna razlučivost multispektralnih snimki (kanali 1-7 i 9) iznosi 30 m, za pankromatski kanal je 15 m (kanal 8), dok je prostorna razlučivost termalnih snimki (kanali 10 i 11) 100 m [32]. Termalni kanali (10 i 11) korišteni u ovom istraživanju imaju prostornu razlučivost od 100 m, a za potrebe analize preuzorkovani su na 30 m kako bi se uskladili s rezolucijom multispektralnih kanala. Upravo će kanal 10 biti korišten za analizu

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

LST-a i UTO-a, obzirom da kanal 11 ima određene probleme s kalibracijom (iako i sam snima u termalnom dijelu spektra) [33].

Razmatrano je ljetno razdoblje, od 1. lipnja do 31. kolovoza, za snimke od 2021. do 2025. godine. Preuzeta je po jedna snimka bez naoblake (0%) za svaku godinu. Na taj se način izbjegava stvaranje nepouzdanih rezultata, obzirom da se može stvoriti kriva predodžba uvjeta na nekom području nad kojim se nalaze oblaci. Oblaci su naime hladniji od područja iznad kojega se nalaze pa slijedom toga će i rezultirajući piksel snimke imati niže vrijednosti LST-a.

Preuzeto je pet snimki razine 1 (engl. *Level-1*) snimljenih na dane 13. kolovoza 2021., 15. srpnja 2022., 11. srpnja 2023., 18. lipnja 2024. i 8. kolovoza 2025. Sve snimke snimio je satelit Landsat 8 između 11:27 i 11:34 po lokalnom vremenu (UTC+2, CEST). Budući da je za svaku godinu korištena po jedna satelitska snimka bez naoblake, dobiveni rezultati predstavljaju stanje LST-a i toplinske ugroženosti u trenutku snimanja te ne prikazuju cjelokupnu sezonsku dinamiku. Meteorološki uvjeti prisutni u trenutku snimanja, poput kratkotrajnih temperaturnih odstupanja, vlažnosti zraka ili prethodnih oborina, mogu utjecati na reprezentativnost dobivenih rezultata.

Drugi korišteni izvor jesu administrativne jedinice, odnosno područje Grada Mostara, njegove gradske četvrti i naselja. Za potrebe ovoga rada ustupio ih je Grad Mostar, Odjel za urbanizam i građenje, Služba za katastar [26]. Sadrži geometrijske i atributne podatke: područje Grada Mostara te njegova naselja u ESRI Shapefile formatu.

4.2 Izbor kartografske projekcije

Izvorne satelitske snimke dostupne su u univerzalnoj poprečnoj Mercatorovoj projekciji (UTM, zona 33). Snimke su reprojicirane u službeni koordinatni sustav Federacije Bosne i Hercegovine BH_ETRS89/TM (EPSG: 10329), koji predstavlja novu kartografsku projekciju Federacije Bosne i Hercegovine zasnovanu na ETRS89. Drugi korišteni izvor podataka, administrativne granice, još uvijek je dostupan u staroj Gauss-Krügerovoj projekciji (DKS1901), koja je u praksi i dalje u širokoj uporabi. Razlog tomu je postupni prijelaz službenih prostornih podataka na novi referentni sustav [34].

Primjena nove projekcije BH_ETRS89/TM u okviru ovoga istraživanja ujedno predstavlja doprinos postupnom prijelazu na novi referentni sustav te može poslužiti kao poticaj za širu primjenu u budućim istraživanjima i radovima.

4.3 Klasifikacija zemljišnog pokrova

Provođenje analize i zaključivanje o područjima s UTO-ima zahtijeva prvotnu klasifikaciju zemljišnog pokrova.

Određivanje klasa provedeno je pomoću nadzirane, odnosno poluautomatske metode klasifikacije. Klase u okviru rada definirane su odabirom karakterističnih piksela na snimkama koji će služiti kao uzorci pojedinih klasa za provođenje klasifikacije. Na osnovi tako definiranih uzoraka provedena je klasifikacija satelitske snimke primjenom metode najmanje udaljenosti (engl. *Minimum Distance*) koja svakoj klasi dodjeljuje piksele prema uzorku, prateći njihovu normalnu (Gaussovu) razdiobu, pri čemu je mjera udaljenosti od središta razdiobe zapravo mjera sličnosti pojedinog piksela reprezentativnom uzorku klase [35].

Detaljnim vizualnim uvidom uočeno je da na području postoje četiri makroklase zemljišnog pokrova koje dalje imaju svoje klase: vode (klase su rijeka Neretva i jezera), vegetacija (s klasama drveće, šume, livade), golo tlo (oranice, kamenito tlo) i izgrađeno zemljište (prometnice, kuće, zgrade). Navedene makroklase odabrane su zbog njihove dominantne zastupljenosti na području Mostara te različitih toplinskih svojstava i utjecaja na LST i ECI. Druge klase zemljišnog pokrova (primjerice, opožarena područja) nisu uočene, dok nejasni dijelovi snimki nisu uzeti u obzir tijekom klasifikacije. Odabir četiriju makroklasa zemljišnog pokrova zasniva se na cilju istraživanja i prostornoj razlučivosti

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

korištenih Landsat 8 multispektralnih snimki (30 m). Na toj razini razlučivosti nije moguće pouzdano izdvajati detaljnije urbane podklase poput visokih i niskih zgrada jer jedan piksel često obuhvaća više različitih površina. Detaljnija analiza urbanih elemenata, poput gustoće izgradnje, visine objekata ili drugih vrsta materijala (osim krovova kuća i zgrada), zahtijevala bi snimke veće prostorne razlučivosti i dodatne podatke o građevinama.

Klasifikacija je provedena za svaki od odabranih setova podataka petogodišnjeg razdoblja korištenjem plavog, zelenog, crvenog i bliskoinfracrvenog kanala Landsat 8 (kanali B2-B5). Reprezentativni uzorci pojedinih klasa određeni su vizualnom interpretacijom samih satelitskih snimki te satelitskih podloga ESRI World Imagery [27] i Google Maps [28]. Odabir navedenih makroklasa i klasa unutar njih zasniva se na njihovoj dominantnoj zastupljenosti unutar urbanog područja Grada Mostara te njihovom utjecaju na LST i pojavu UTO-a. Kvaliteta klasifikacije procijenjena je usporedbom klasificiranih vrijednosti svakoga rastera s referentnim točkama određenim vizualnom interpretacijom kolor-kompozita (RGB) satelitskih snimki, pri čemu je ostvarena ukupna točnost klasifikacije prikazana u Tablici 1.

Procjena točnosti klasifikacije provedena je na razini makroklasa zemljišnog pokrova. Ovaj pristup odabran je budući da svaka klasa pripada nekoj od makroklasa (npr. klasa oranice spada pod golo tlo) te se eventualne pogreške u klasifikaciji pojedinačnih klasa odražavaju i na ukupnu točnost pripadne makroklaste, a slijedom toga i na ukupnu točnost klasifikacije. Za svaku makroklasu određeno je stotinjak referentnih točaka za koje se na osnovi vizualnog uvida zasigurno moglo zaključiti da pripadaju jednoj od četiri makroklaste, izbjegavajući miješane piksele. Kako se ne bi za svih pet snimki određivale referentne točke, nastojalo se odrediti takve točke koje odgovaraju jednakim položajima na svim snimkama. S obzirom na cilj istraživanja, koji je usmjeren na analizu prostornog rasporeda UTO-a, kao i ograničenu prostornu razlučivost Landsat 8 snimki (30 m), validacija na razini makroklasa kao i rezultati prikazani u Tablici 1 mogu se smatrati zadovoljavajućim. Najlošiji rezultat klasifikacije ostvaren je za 2023. godinu, dok je najviša točnost klasifikacije na snimci iz 2024. godine.

Tablica 1. Ukupna točnost klasifikacije po snimkama

Snimka (godina)	Ukupna točnost klasifikacije
2021.	82%
2022.	88%
2023.	77%
2024.	91%
2025.	85%

Prostorna razlučivost korištenih Landsat 8 multispektralnih kanala (30 m), odnosno termalnih kanala (100 m), predstavlja određeno ograničenje istraživanja, osobito u urbanim područjima gdje unutar jednog piksela može doći do pojave miješanih piksela zbog različitog zemljišnog pokrova. Posljedično, pojedini pikseli mogu sadržavati kombinaciju izgrađenih površina, vegetacije i golog tla, što može utjecati na preciznost klasifikacije i određivanja LST-a.

4.4 Vrijednosti emisivnosti površine

Sve su vrijednosti unutar makroklasa reklasificirane pomoću vrijednosti emisivnosti različitih objekata. Emisivnost je omjer termalne energije koju je tijelo zračilo te zračenja idealnog crnog tijela, a definirana je izrazom [36]:

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

$$e_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}(\text{objekt}, T)}{M_{\lambda}(\text{crno tijelo}, T)} \quad (1)$$

Vrijednosti emisivnosti razlikuju se ovisno o vrsti zemljišnog pokrova te imaju značajnu ulogu pri određivanju LST-a [37]. U okviru ovoga rada korištene su prosječne vrijednosti emisivnosti preuzete iz literature za pojedine makroklaste zemljišnog pokrova [38]. Na osnovi provedene klasifikacije svakoj makroklasti pridružena je odgovarajuća vrijednost emisivnosti korištena u daljnjem postupku izračuna LST-a.

Dobivene vrijednosti emisivnosti korištene u okviru ovoga rada prikazane su u Tablici 2. Predstavljaju prosječne vrijednosti za svaku pojedinu makroklastu.

Tablica 2. Vrijednosti emisivnosti za pojedine makroklaste [38]

Makroklasta	Vrijednost emisivnosti
Voda	0.980
Izgrađeno područje	0.937
Vegetacija	0.982
Golo tlo	0.928

4.5 Računanje površinske temperature tla (LST)

Sirove podatke zapisane u obliku digitalnih brojeva (DN) potrebno je pretvoriti u oblik pogodan za daljnju obradu i izračunavanje LST-a i ECI-ja. Termalni kanal broj 10 pretvara se stoga u spektralnu radijancu vrha atmosfere, potom u refleksiju vrha atmosfere, nakon čega slijedi dobivanje satelitskog odsjaja temperature [39] te se može izračunati LST. Za procjenu LST-a te proučavanje UTO-a od posebne koristi je termalni infracrveni kanal. Ovdje je korišten kanal 10, središnje (efektivne) valne duljine $\lambda = 10.895 \mu\text{m}$. Kanal 11 zanemaren je zbog već navedenih poteškoća s kalibracijom. Svi su izračuni provedeni pomoću QGIS-a, odnosno njegova alata "Raster Calculator".

LST u Celzijevim stupnjevima (izvorno je izražena u Kelvinima, pa je potrebno izvršiti konverziju temperature ljestvice, $0 \text{ K} = -273.15^{\circ}\text{C}$) dobiva se po izrazu [39]:

$$\text{LST } [^{\circ}\text{C}] = \frac{T_B}{1 + \frac{\lambda \cdot T_B}{C_2} \cdot \ln(\epsilon)} - 273.15 \quad (2)$$

pri čemu je C_2 druga radijacijska konstanta koja se zasniva na izrazu [40]:

$$C_2 = h \frac{c}{k} \quad (3)$$

gdje je h Planckova konstanta koja iznosi $6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$, a brzina svjetlosti $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Vrijednost k je Boltzmannova konstanta, $k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$. Uvrštavanjem navedenih konstanti dobiva se $C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$. Obzirom da se u izrazu (2) često koriste valne duljine izražene u mikrometrima, slijedi da druga radijacijska konstanta iznosi $14388 \mu\text{mK}$. Vrijednost T_B je temperatura svjetline odnosno satelitski odsjaj temperature u Kelvinima koja se dobiva pomoću formule [39]:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (4)$$

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

gdje su vrijednosti K_1 i K_2 termalne konstante konverzije kanala definirane u metapodatkovnoj datoteci pojedine snimke. U konkretnom slučaju, za termalni kanal broj 10 iznose $K_1 = 774.8853$ i $K_2 = 1321.0789$. Izraz (4) koristi i L_λ koja predstavlja spektralnu radijancu vrha atmosfere (TOA), a dobiva se kao [39]:

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L \quad (5)$$

pri čemu su M_L specifična multiplikacijska konstanta kanala iz datoteke metapodataka (za kanal 10 iznosi 0.00033), Q_{cal} je cjelobrojna standardna vrijednost slikovnog elementa odnosno digitalnog broja snimke, a A_L specifična adicijska konstanta kanala iz datoteke metapodataka (za kanal 10 iznosi 0.1).

Na ovaj su način dobivene LST vrijednosti za svih pet snimki, a dodatno je stvoren prikaz prosječne ljetne temperature tla za razdoblje 2021.-2025.

4.6 Računanje indeksa kritičnosti okoliša (ECI)

Pomoću LST-a i spektralnih indeksa može se izračunati ECI, koji se koristi kao pokazatelj toplinske ugroženosti urbanog prostora. Osnovni oblik ECI-ja u literaturi se definira kao jednostavan omjer LST-a i NDVI-ja [41]:

$$ECI = \frac{LST}{NDVI} \quad (6)$$

Ova formula ipak ne uzima u obzir više tipova površina, već samo vegetaciju, a zanemaruje vodene površine i napose izgrađena područja koja su zapravo ključ za definiranje UTO-a. Korišten je stoga prošireni izraz iz literature [41] koji uključuje vodena područja i izgrađeno zemljište:

$$ECI = \frac{LST + NDBI}{NDVI + NDWI} \quad (7)$$

pri čemu je NDVI vegetacijski indeks normalizirane razlike, definiran kao omjer razlike i zbroja bliskoinfracrvenog i crvenog dijela spektra [42], NDBI je indeks normalizirane razlike izgrađenosti, predstavljen kao omjer razlike i zbroja vrijednosti kratkovalnoinfracrvenog te bliskoinfracrvenog dijela spektra [43], a NDWI vodeni indeks normalizirane razlike, odnosno omjer razlike i zbroja zelenog i bliskoinfracrvenog dijela spektra [44]. Računaju se prema izrazima:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (8)$$

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (9)$$

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (10)$$

Na taj način su izrazom (7) uključene glavne vrste zemljišnog pokrova: vode i vegetacija koje smanjuju učinak toplinskih otoka te izgrađene površine koje zbog svog sastava utječu na porast temperature i samim time, pojavu UTO-a.

Testno je uključeno i golo tlo, u svrhu istraživanja mogućnosti proširenja samog ECI-ja, kako bi se pokrile sve makroklase, budući da od njih trenutno jedino nije uključeno golo tlo u računanje ECI-ja. Uveden je indeks golog tla (BSI) koji se računa po formuli [45]:

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

$$BSI = \frac{(SWIR + RED) - (NIR + BLUE)}{(SWIR + RED) + (NIR + BLUE)} \quad (11)$$

te je izraz (7) proširen, uz pretpostavku da su ECI (i LST) te BSI proporcionalni: s porastom BSI-ja (prisutnost golog tla, kao što su kamenita područja i oranice) raste ECI (i LST) i obrnuto:

$$ECI = \frac{LST + NDBI + BSI}{NDVI + NDWI} \quad (12)$$

ECI je računat u dva slučaja, izostavljajući BSI te koristeći BSI, odnosno prema izrazu (7) i izrazu (12). Korištenje BSI-ja isključivo je eksperimentalno te je dodatak izrazu (12).

Urbanizirane površine, kao glavni uzrok UTO-a, izdvaja spektralni indeks NDBI koji mjeri intenzitet izgrađenosti (površine kao što su beton, asfalt, krovovi). Vodene površine pak snažno hlade okoliš posebice zbog isparavanja. Bez NDWI-a model ne razlikuje vegetaciju od vodene površine, iako imaju različit toplinski učinak. NDVI daje jasan uvid u gustoću i zdravlje vegetacije, odnosno sposobnost vegetacije da hladi površinu zbog isparavanja vode iz listova biljaka [42, 43, 44]. Kombiniranjem LST-a s NDBI-jem se već na neki način dobiva odraz toplijih područja grada koja imaju višu temperaturu tla (posebice zbog izgrađenosti i zgusnutosti), a stavljanjem u omjer s NDVI-jem i NDWI-jem dobiva se snažniji kontrast vrućih i manje vrućih dijelova grada. Odabrani spektralni indeksi predstavljaju glavne tipove zemljišnog pokrova koji utječu na LST te se često koriste u istraživanjima UTO-a za analizu odnosa između pokrova tla i LST-a [46]. U radu je testirana i povezanost LST-a s korištenim spektralnim indeksima. Linearna povezanost između varijabli procijenjena je primjenom Pearsonova koeficijenta korelacije (r) čije su vrijednosti u rasponu od -1 (potpuna negativna korelacija, obrnuta proporcionalnost dviju varijabli) do 1 (potpuna pozitivna korelacija, varijable su proporcionalne) [47]:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

gdje su x vrijednosti LST-a, y vrijednosti spektralnih indeksa, a \bar{x} i \bar{y} njihove srednje vrijednosti. Izraz se može pojednostaviti korištenjem kovarijanci varijabli te njihova standardnog odstupanja [47]:

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (14)$$

Za potrebe računanja izraza (7), odnosno (12), provedena je reklasifikacija spektralnih indeksa NDBI, NDVI, NDWI, BSI te samog LST-a. Korištene su prosječne vrijednosti indeksa i LST-a za razdoblje 2021.-2025. Vrijednosti su reklasificirane iz vrijednosti [-1, 1] za indekse, odnosno [0, 50] za LST, u vrijednosti [0, 1]. Time će i vrijednosti ECI-ja poprimiti vrijednosti od 0 do 1. Reklasifikacija indeksa i LST-a na istu mjernu ljestvicu osigurava uravnotežen doprinos svakog parametra u konačnoj vrijednosti ECI-ja te se izbjegava prevladavanje jednoga čimbenika nad ostalima.

Brojčane vrijednosti ECI-ja [0, 1] potrebno je pretvoriti u razumljive razine kritičnosti okoliša, odnosno kvantificirati vrijednosti. Vodene površine uključene su u izračun ECI-ja putem NDWI-ja budući da prisutnost vode značajno utječe na smanjenje toplinske ugroženosti prostora. Međutim, same vodene površine nisu uključene u klasifikaciju razina kritičnosti okoliša jer ne predstavljaju područja podložna razvoju UTO-a. Stoga su izdvojene maskom NDWI-ja i prikazane kao zasebna kategorija.

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

Kategorije ECI-ja izdvojene su u razrede jednakih intervala, predočene u Tablici 3. Budući da su u okviru rada korištene isključivo ljetne Landsat 8 snimke, ECI se interpretira u kontekstu ljetne toplinske ugroženosti urbanog prostora i pojave UTO-a. Vrijednosti ECI-ja stoga bi, primjerice za zimu, bilo potrebno prilagoditi po razredima, budući da toplinske ugroženosti prostora tada nema, odnosno nije izražena u istoj mjeri kao tijekom ljetnih mjeseci.

Tablica 3. Razredi kritičnosti okoliša (toplinske ugroženosti)

Razred	Razina kritičnosti okoliša
0.00–0.10	nema kritičnosti okoliša
0.11–0.21	jako niska kritičnost okoliša
0.22–0.32	niska kritičnost okoliša
0.33–0.44	umjereno niska kritičnost okoliša
0.45–0.55	umjerena kritičnost okoliša
0.56–0.66	umjereno visoka kritičnost okoliša
0.67–0.77	visoka kritičnost okoliša
0.78–0.88	jako visoka kritičnost okoliša
0.89–1.00	ozbiljna kritičnost okoliša

4.7 Kartiranje urbanih toplinskih i zelenih otoka

Izrada web-karte LST-a za razdoblje 2021.-2025. te toplinske ugroženosti, odnosno ECI-ja, predstavlja način vizualizacije rezultata istraživanja, a ima za cilj prikazati prostornu raspodjelu toplinskih i zelenih otoka na području Grada Mostara. Karta je zamišljena kao interaktivni prikaz koji korisniku omogućuje jasan i pregledan uvid u različitosti toplinske ugroženosti područja ovisne o izgrađenosti, količini vegetacije i rasporedu vodenih površina.

Karta je obogaćena atributnim podacima koji daju informaciju o vrijednosti temperature za LST, odnosno o kritičnosti okoliša (toplinskoj ugroženosti) za ECI. Rasteri su vektorizirani (poligonizirani) kako ne bi izgubili svoje atribute. Interaktivna web-karta realizirana je i izvezena iz QGIS-a korištenjem modula "QGIS2WEB" [48] koji omogućuje pregled karte na web-u lokalno, na korisničkom računalu.

Web-karta koju je generirao "QGIS2WEB" ima nešto slabije oblikovanu kartografiku te ima brojne suvišne detalje pa je stvoreni HTML dokument reduciran i uređen (sa 7000, većinom suvišnih, na 600 linija koda). Prikaz je oblikovan korištenjem Leaflet [49] biblioteke, besplatne i otvorene JavaScript biblioteke za izradu interaktivnih web-karata. Uređivanjem CSS-a, s ciljem stvaranja boljeg izgleda karte i korisničkog sučelja, i JavaScripta, za postizanje interaktivnosti karte, dobiven je skladno oblikovan kartografski prikaz. Oblikovanje koda izvršeno je u Visual Studio Code-u [50], besplatnom uređivaču koda s brojnim mogućnostima koji je razvila tvrtka Microsoft.

Zasebno su oblikovana dva prikaza. Prvi je "Karta ljetnih temperatura tla" s prikazom ljetnih temperatura za ljetne dane 2021.-2025. te prosječna ljetna temperatura u istom razdoblju, s dvjema podlogama: satelitskom snimkom (ESRI World Imagery osnovna karta satelitskih i zračnih snimki visoke prostorne rezolucije, od 30 cm do 1 m, po specifikaciji za urbana područja [27], koja pruža detaljan prikaz Zemljine površine) te kartografska podloga (postavljena kao glavna i jednostavna podloga, Voyagerov sloj [51] sličan OpenStreetMap-u, ali s nešto skladnijim oblikovanjem i većom brzinom učitavanja). Objema podlogama dodana je mogućnost pojačavanja ili smanjivanja vidljivosti za lakše snalaženje na karti. Drugi prikaz je "Karta toplinskih i zelenih otoka" jednakoga oblikovanja kao i prva karta, no glavni je prikaz razina kritičnosti okoliša, odnosno toplinske ugroženosti na području Grada Mostara.

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

Obje karte omogućuju filtriranje, po temperaturi za prvi te po razinama kritičnosti za drugi, za jasniji prikaz i uvid u elemente karte, kao i ljestvicu temperature i kritičnosti okoliša te mogućnost prikaza položaja korisnika. Dodatno, karta ljetnih temperatura omogućuje vremenski prikaz temperatura, odnosno automatsku izmjenu prikaza slojeva kako bi se mogle vizualno pratiti promjene LST-a na određenom području kroz vrijeme. Karta je obogaćena dodavanjem koordinatnog okvira s prikazom položaja u WGS84 (prikaz geodetske širine ϕ i dužine λ), staroj Gauss-Krügerovoj projekciji (vrijednosti y i x) te novoj poprečnoj Mercatorovoj projekciji BH_ETRS89/TM (vrijednosti E i N).

Dva odvojena kartografska prikaza povezana su u jedan oblikovanjem ulaznog portala kako bi ih korisnik mogao percipirati kao jednu cjelinu i mogao im pristupiti putem jednog web-sučelja. Dodatno je web-karta prilagođena za prikaz na mobilnim uređajima.

Za prikaz globalno, odnosno, kako bi svi korisnici mogli otvoriti web-kartu, postavljena je na globalni poslužitelj, GitHub [52], besplatnu i popularnu platformu za pohranu i dijeljenje programskog koda, ali i za objavljivanje web-karata. Web-karta je pohranjena kao repozitorij sa svim popratnim datotekama, a zatim je na ulazni portal generirana poveznica koja omogućuje pristup web-karti.

Naposlijetku je izvršeno indeksiranje same web-karte, odnosno dodavanje u Googleovu bazu podataka putem Google Search Console, na način da korisnik može pristupiti web-karti putem pretraživača upisivanjem ključnih riječi (npr. "karta toplinskih otoka Mostar") te tako ne ovisi o samoj poveznici na objavljenu kartu.

5. REZULTATI

Rezultati uključuju prostornu raspodjelu LST-a i ECI-ja u Gradu Mostaru te analizu povezanosti između LST-a, ECI-ja i spektralnih indeksa zemljišnog pokrova.

5.1 Površinska temperatura tla

LST na području istraživanja u promatranom razdoblju pokazuje značajne prostorne razlike. Najniže vrijednosti zabilježene su na planinskom području naselja Kutilivač, u blizini vrha Veliko Pločno (1440 m. n. v.). Na svim analiziranim snimkama minimalne temperature izmjerene su upravo na tom području te su iznosile oko 21°C na snimkama od 13. kolovoza 2021. i 15. srpnja 2022., zatim oko 20°C 11. srpnja 2023., 18°C 18. lipnja 2024. te približno 15°C 8. kolovoza 2025.

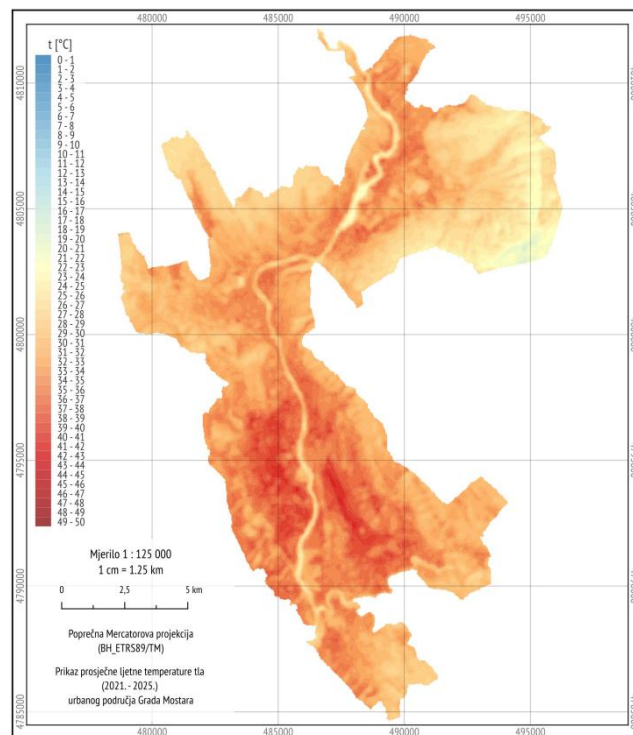
Najviše površinske temperature zabilježene su na izrazito urbaniziranim i industrijskim površinama, kao i na velikim otvorenim asfaltiranim prostorima. Tako je 13. kolovoza 2021. temperatura od 46°C zabilježena na području industrijskog kompleksa Aluminij u naselju Bačevići. Na snimci od 15. srpnja 2022. najviše vrijednosti, oko 47°C, zabilježene su na području mostarske zračne luke te ponovno u industrijskoj zoni Aluminija. Tijekom 2023. maksimalne temperature bile su nešto niže te je 11. srpnja zabilježeno oko 41°C u području vojarne u naselju Rodoč. Na snimci od dana 18. lipnja 2024. najviša temperatura od približno 43°C zabilježena je na području industrijskog kompleksa Soko, dok je 8. kolovoza 2025. najviša vrijednost (42°C) ponovno zabilježena na području zračne luke.

Prosječna ljetna temperatura tla za razdoblje od 2021. do 2025. pokazuje sličan prostorni raspored. Najniže prosječne temperature zabilježene su na planinskom području Kutilivača (oko 19°C). Vodotok rijeke Neretve nešto je topliji od tog područja. Najviše vrijednosti temperature zabilježene su u južnom dijelu urbanog područja, osobito na području zračne luke i industrijskih zona, gdje prosječne temperature dosežu od 41°C do 43°C. Srednja temperatura na cijelom području Mostara iznosi 32°C.

Posebno je izdvojeno i analizirano samo područje naselja Mostar na sloju prosječnog LST-a. Zabilježena je prosječna temperatura od 33°C. Minimalna je zabilježena temperatura od 28°C uz Neretvu i sjeverno od Zalika, a maksimalna gotovo 39°C na Bišćem Polju.

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki



Slika 2. Prosječna ljetna temperatura tla na području Grada Mostara (2021.-2025.)

Prosječne ljetne temperature tla na području Mostara prikazane su na kartografskom prikazu na Slici 2, a pregledan cjelokupni prikaz temperatura na sve analizirane dane (2021.-2025.), zajedno s prosječnom temperaturom, može se pogledati na realiziranoj web-karti ljetnih temperatura [53].

5.2 Kritičnost okoliša

ECI je računat iz osrednjenih vrijednosti LST-a (Slika 2), te na Slici 3 prikazanih indeksa NDVI-ja (a), NDWI-ja (b), NDBI-ja (c) te BSI-ja (d). Više, pozitivne vrijednosti (maksimalno do 1) pojedinog indeksa prikazane su tamnijom, sivom bojom te označavaju prisutnost vegetacije za NDVI, vode za NDWI, izgrađenosti za NDBI te golog tla za BSI. NDVI ima najviše vrijednosti na područjima s gustim vegetacijskim pokrovom, osobito na brdskim i ruralnim dijelovima područja istraživanja. NDWI jasno ističe vodene površine rijeke Neretve. S druge strane, NDBI pokazuje povišene vrijednosti na urbaniziranim dijelovima grada, industrijskim zonama i području zračne luke. Povišene vrijednosti BSI-ja uočavaju se na područjima golog tla i kamenitih površina.

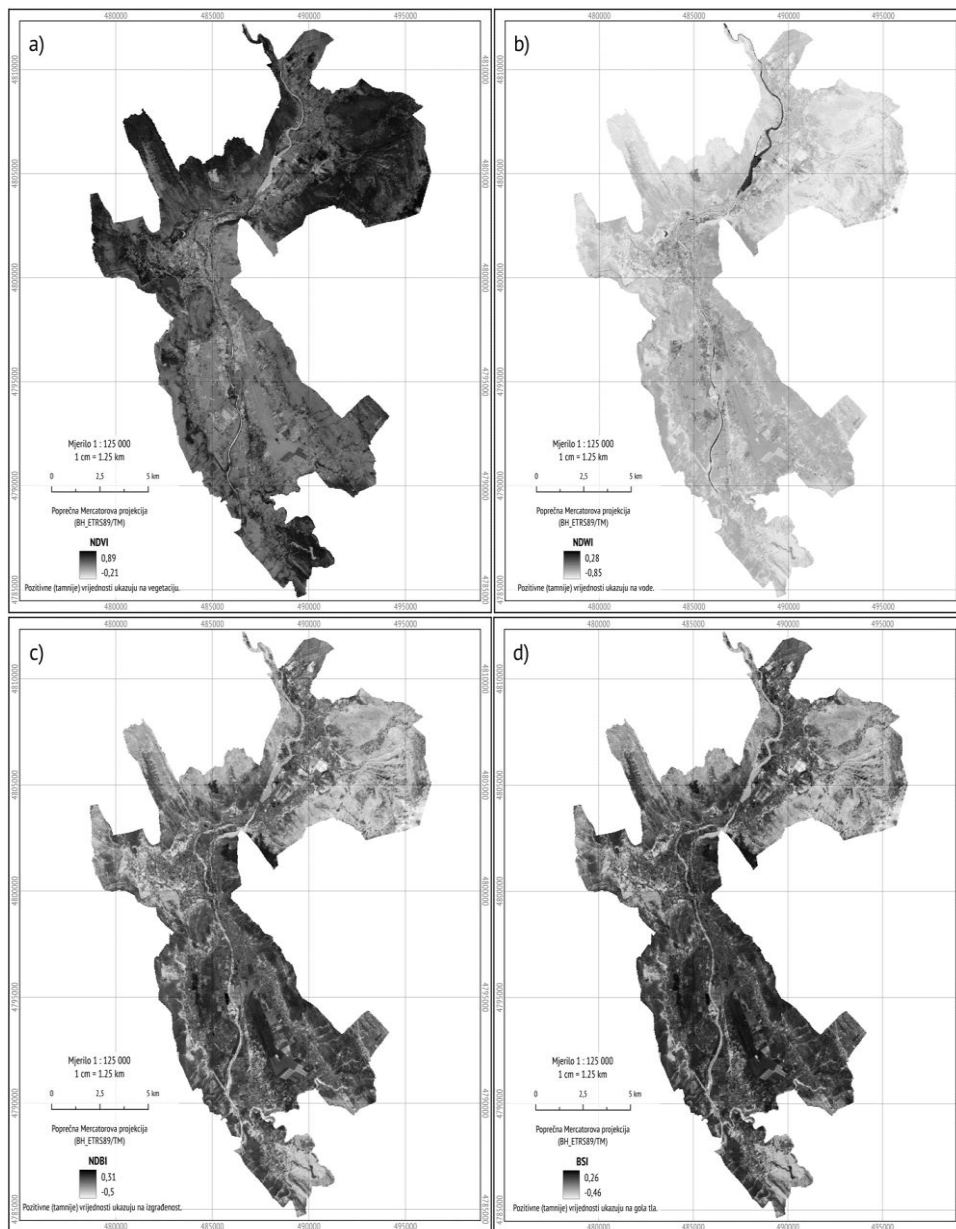
Izračun ECI-ja prema izrazima (7) i (12) rezultirao je vrlo sličnim vrijednostima indeksa. Prikazan je stoga i kartiran ECI dobiven po izrazu (7), koji se koristi i u literaturi [41].

Samim vizualnim uvidom uočava se raspored klasa toplinske ugroženosti pojedinih područja Grada. Tako je ozbiljna kritičnost okoliša uočena na pojedinim dijelovima naselja Mostar te poglavito u industrijskoj zoni i oko zračne luke. Ta se područja upravo nazivaju urbanim toplinskim otocima. Njih okružuju i područja s nešto nižom, ali i dalje visokom kritičnošću: jako visoka, visoka i umjereno visoka kritičnost okoliša. UTO se nalaze poglavito uz rijeku Neretvu, a preklapaju se s izgrađenim područjima Grada. Južno od Bišćeg Polja, toplinski otoci šire se prema zapadu i istoku, prelazeći u područja naselja Rodoč, Jasenica, Gnojnice, Bačevići, Dračevica i Blagaj. Uočeni su i u industrijskim zonama, na odlagalištu Uborak, poslovnoj zoni Gajevi, pogonu Zinktehnika, istočno od željezničkog mosta u Raštanima, području Sjevernog logora, industrijskom području oko Bišćeg Polja i Južnog logora, Sokolu u Rodoču, pogonu oko tvrtke Hercegovinavino i županijskog zatvora, Aluminijska u Bačevićima te zračne

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

luke Mostar. U "crvenom" su i urbana, izgrađena područja naselja Mostar: Centar, Centar 2 i Centar 3, dio Rudnika, Zgoni, Bijeli Brijeg kod Sveučilišne kliničke bolnice Mostar, carina, željeznička stanica Mostar, Majdan, Cernica i dio Staroga Grada uz Stari most. Izdvajaju se i područja bez kritičnosti okoliša, odnosno zeleni otoci gdje nema toplinske ugroženosti. To su planinska područja Vihovića prema Gorancima te vrhovi Vrapčića i Kutilivača. Na jugu se izdvajaju dijelovi Hodbine i Blagaja te Rodoča, Jasenice i Bune. Područje Ilića i Cima je posebno zanimljivo jer je gotovo cijelo u "zelenom", odnosno gotovo nema kritičnosti okoliša, unatoč neposrednoj povezanosti s urbanim područjem Mostara i izraženim prigradskim obilježjima. Ponovno je posebno pregledano i područje naselja Mostar, gdje su urbani zeleni otoci od velike važnosti za poništavanje utjecaja toplinskih otoka i kao zaštita od toplinske ugroženosti. Izdvajaju se veća zelena područja prema Miljkovićima, Trimuša i šetalište Bare, južno područje Bijelog Brijega te sjeverni dio Zalika. Nisku kritičnost okoliša ima većina parkova i stadioni u gradu, poput Zrinjevca i stadiona pod Bijelim Brijegom.

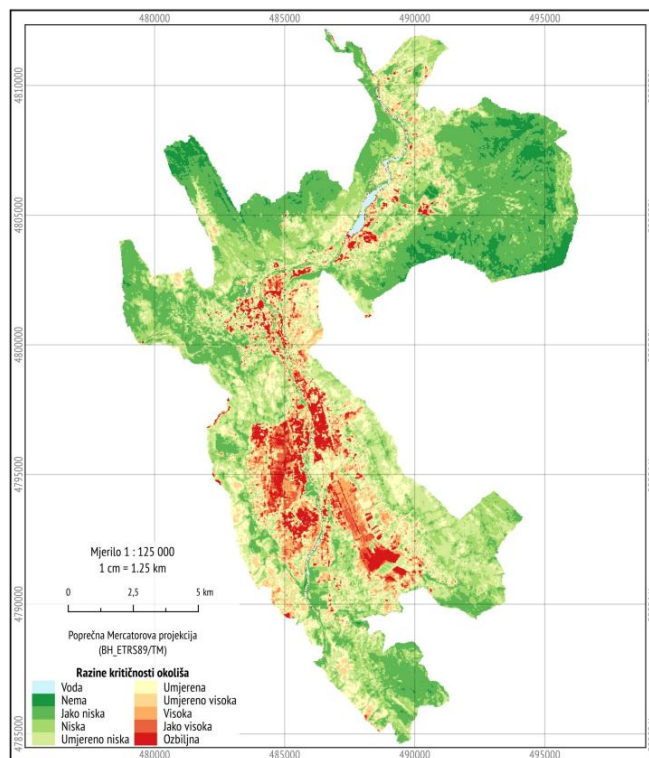


Slika 3. Prosječni spektralni indeksi: a) NDVI, b) NDWI, c) NDBI i d) BSI

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

Kritičnost okoliša urbanog dijela Grada Mostara, odnosno toplinska ugroženost na području Grada Mostara predočena je na Slici 4. Cjelokupan prikaz može se pregledati i na web-karti [53].



Slika 4. Kritičnost okoliša na području Grada Mostara (2021.–2025.)

5.3 Analiza rezultata

Budući da je računanje ECI-ja izravno ovisno o parametrima uključenima u izraz (7), a LST ovisi o provedenoj klasifikaciji zemljišnih pokrova i reklasifikaciji u vrijednosti emisivnosti, izrađena je i analiza uspješnosti određivanja UTO-a. U Tablici 4 prikazane su prosječne površinske temperature po makroklasama zemljišnog pokrova: vodama, vegetaciji, golom tlu i izgrađenom zemljištu, kao i prosječni razred ugroženosti okoliša.

Tablica 4. Prosječni LST i ECI po makroklasama zemljišnog pokrova

Makroklasa	LST [°C]	ECI [kritičnost okoliša]
Voda	26.94	Nema
Vegetacija	28.87	Jako niska
Golo tlo	32.85	Umjereno niska
Izgrađeno zemljište	35.48	Umjereno visoka

Dobiveni rezultati pokazuju očekivane rezultate po makroklasama zemljišnog pokrova. Izgrađene i gole površine karakteriziraju više vrijednosti LST-a i ECI-ja, dok vegetacija i vodene površine pokazuju niže vrijednosti LST-a i ECI-ja. Jedina moguća pogreška vezana je uz vodu, obzirom da je izdvojena iz računanja ECI-ja, no očito je da su pojedini pikseli ostali neuklonjeni. Ipak, kako nema kritičnosti okoliša, zaključuje se da su i vodena područja uspješno klasificirana.

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

Druga je analiza izvedena za određivanje povezanosti LST-a i makroklasa zemljišnog pokrova predstavljenih putem spektralnih indeksa. Pretpostavljeno je, kako je i predočeno izrazom (7), da s porastom NDBI-ja (veća izgrađenost) raste i LST (veća temperatura), a da se s porastom NDVI-ja (više vegetacije) i NDWI-ja (postojanje vodenih površina) smanjuje LST (niža temperatura). ECI nije testiran, obzirom da predstavlja izvedenu veličinu od korištenih parametara.

Za potrebe korelacijske analize izvorni rasteri LST-a i spektralnih indeksa pretvoreni su u skup točkastih podataka, pri čemu je iz svakog piksela izdvojena pripadajuća vrijednost rastera. Na taj je način dobiven skup od približno 215 000 opažanja, na osnovi kojih je izračunat Pearsonov koeficijent korelacije između LST-a i pojedinih indeksa.

Neovisno su korišteni podatci LST-a te NDVI-ja, NDWI-ja, NDBI-ja i BSI-ja, a dobiveni su rezultati: $r(LST, NDVI) = -0.66$, $r(LST, NDWI) = -0.63$, $r(LST, NDBI) = 0.72$, $r(LST, BSI) = 0.73$.

Analiza pokazuje da su korišteni parametri smisljeno povezani s LST-om i ECI-jem te slijedom toga da su izrazi (7) i (12) dobro formulirani te da doista LST ovisi o zemljišnim klasama, odnosno da postoji jaka korelacija između LST-a te izgrađenih površina, vegetacije i vodenih površina.

Dodatno je analizirano područje oko rijeke Neretve stvaranjem stupnjevitih područja, kako bi se uočilo djeluje li voda kao rashlađujući čimbenik na okolno područje. Analiza je provedena budući da postoje određeni (neznanstveni) navodi da je upravo Neretva najhladnija rijeka svijeta [54]. Stvorene su zone od 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 i 1000 metara od rijeke Neretve, kako je predočeno u Tablici 5.

Tablica 5. Utjecaj rijeke Neretve na smanjenje toplinske ugroženosti

Udaljenost [m]	LST [°C]	ECI [kritičnost okoliša]
5	28.46	Jako niska
10	28.42	Jako niska
20	28.49	Jako niska
50	28.66	Jako niska
100	29.26	Niska
200	30.85	Niska
500	33.18	Umjereno niska
1000	34.05	Umjerena

Analiza pokazuje da se s povećanjem udaljenosti od rijeke Neretve povećavaju prosječne vrijednosti LST-a i ECI-ja. Navedeni trend upućuje na povezanost blizine vodenih površina s nižim površinskim temperaturama i manjom toplinskom ugroženošću, iako se rashladni učinak rijeke ne može jednoznačno izdvojiti od ostalih čimbenika, poput urbanizacije koja je izražena uz samu rijeku te zemljišnog pokrova. Uočava se da nakon približno 200 m dolazi do izraženijeg porasta prosječnih vrijednosti LST-a, što može upućivati na slabljenje utjecaja rijeke na okolni prostor.

Analizirani su i prosječni LST te ECI po naseljima Grada Mostara uključenima u analizu. Više vrijednosti LST-a i ECI-ja zabilježene su u naseljima s izraženijom urbanizacijom, industrijskim površinama i manjim udjelom vegetacije, poput Bačevića, Kosora, Jasenice, Rodoča te Gnojnice. S druge strane, niže vrijednosti zabilježene su u perifernim i vegetacijom bogatijim naseljima poput Kutilivača, Potoka, Vihovića, Ilića i Vrapčića. Takvi rezultati mogu biti korisni pri određivanju područja za povećanje zelenih površina i planiranje mjera ublažavanja učinka UTO-a. Ipak, rezultate treba interpretirati uz određeni oprez budući da predstavljaju osrednjene vrijednosti na razini naselja. Slijedom toga, i unutar naselja s nižim prosječnim vrijednostima mogu postojati lokalna područja s višim vrijednostima LST-a i ECI-ja povezana s izgrađenim površinama, dok veći udio vegetacije snižava prosječne vrijednosti na razini cijelog naselja. Detaljan uvid dan je u Tablici 6.

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

Tablica 6. Prosječni LST i ECI po naseljima Grada Mostara

Naselje	LST [°C]	ECI [kritičnost okoliša]
Bačevići	36.12	Umjereno visoka
Kosor	36.11	Umjerena
Jasenica	35.89	Umjereno niska
Rodoč	35.76	Umjerena
Gnojnice	35.29	Umjerena
Lakševine	35.22	Umjereno niska
Ortiješ	35.05	Umjereno niska
Blagaj	34.11	Umjereno niska
Dračevice	33.74	Umjereno niska
Buna	33.68	Niska
Mostar	33.35	Umjerena
Željuša	33.24	Umjereno niska
Čim	33.12	Niska
Hodbina	32.23	Niska
Raštani	31.49	Niska
Vojno	31.12	Jako niska
Vrapčiči	31.01	Niska
Ilići	30.91	Niska
Vihovići	30.82	Niska
Potoci	29.76	Niska
Kutilivač	27.57	Nema

6. RASPRAVA

Rezultati istraživanja jasno pokazuju da je prostorna raspodjela LST-a i UTO-a na području Grada Mostara u velikoj mjeri povezana s tipom zemljišnog pokrova i stupnjem urbanizacije. Najviše temperature zabilježene su na područjima s velikim udjelom izgrađenih površina, dok su najniže temperature prisutne na područjima s vegetacijskim pokrovom te u blizini vodenih površina.

Posebno se izdvajaju izraženi UTO na područjima industrijske i prometne infrastrukture. Najkritičnije lokacije identificirane su na području mostarske zračne luke, industrijske zone Aluminij u naselju Bačevići, industrijskog kompleksa Soko u Rodoču, industrijskog područja Bišće Polje te odlagališta otpada Uborak. Na tim lokacijama zabilježene su najviše vrijednosti LST-a koje u pojedinim slučajevima prelaze 40°C, dok vrijednosti ECI-ja dosežu najviše razrede toplinske ugroženosti.

Dobiveni rezultati potvrđuju snažnu povezanost između LST-a i karakteristika zemljišnog pokrova. Korelacijska analiza pokazala je pozitivnu povezanost između LST-a i NDBI-ja ($r = 0.72$), što potvrđuje da povećana urbanizacija, odnosno izgrađenost i materijali poput betona i asfalta, dovode do porasta površinske temperature. Suprotno tome, utvrđena je negativna korelacija između LST-a i NDVI-ja ($r = -0.66$), kao i između LST-a i NDWI-ja ($r = -0.63$). Ovi rezultati potvrđuju rashladni učinak vegetacije i vodenih površina zahvaljujući isparavanju vode kod vodenih površina i vode u listu biljaka te stvaranju hlada od prisutne vegetacije. Najjaču korelaciju LST ima s golim tlom, odnosno BSI-jem ($r = 0.73$) što ukazuje da su snažno povezani i međusobno ovisni. Ipak, vrijednost je gotovo jednaka korelaciji LST-a i NDBI-ja što upućuje na mogućnost da NDBI u određenoj mjeri već obuhvaća i dio površina (npr. kamenito tlo) koje se spektralno ponašaju poput izgrađenih površina. Oba indeksa već uključuju kratkovalnoinfracrveni i bliskoinfracrveni dio spektra (osim što BSI u obzir još uzima crveni i plavi kanal) pa se može zaključiti, obzirom da uključivanje BSI-ja nije dovelo do značajnijih promjena u raspodjeli

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

toplinski ugroženih područja, da je u izrazu (7) dovoljno koristiti indeks izgrađenosti NDBI, kako se i navodi u literaturi [41].

Posebno zanimljiv rezultat istraživanja odnosi se na utjecaj rijeke Neretve na smanjenje toplinske ugroženosti okolnog prostora. Analiza udaljenosti od riječnog toka pokazala je postupno povećanje temperature tla s udaljavanjem od same rijeke. Izgrađenost je najveća upravo oko rijeke Neretve te je stoga očekivana viša toplinska ugroženost tog područja. Ipak, Neretva je očigledno snažan čimbenik koji značajno smanjuje LST, ali i kritičnost okoliša područja uz samu rijeku. Ovakav trend potvrđuje značaj vodenih površina kao prirodnog regulatora toplinske ugroženosti urbanog područja Grada Mostara.

Rezultati istraživanja također ukazuju na važnost urbanih zelenih površina u smanjenju toplinske ugroženosti. Područja s većim udjelom vegetacije, poput parkova, sportskih terena i zelenih zona pokazuju znatno niže vrijednosti LST-a. To potvrđuje značaj planiranja i očuvanja urbanih zelenih površina u svrhu ublažavanja učinka UTO-a. Osim toga, povećanje udjela gradskog zelenila i očuvanje vodenih površina može predstavljati jednu od ključnih mjera za smanjenje toplinske ugroženosti u urbanim sredinama.

Istraživanje ima i određena ograničenja. Prostorna razlučivost od 30 metara može ograničiti preciznost određivanja temperatura, posebice na manjim izgrađenim ili zelenim površinama. To se primjerice može zorno prikazati na primjeru rijeke Neretve. Budući da je na određenim dijelovima sama rijeka Neretva čak i uža od 30 metara, dok je prostorna rezolucija Landsat 8 snimki upravo 30 metara te također, na određenom broju piksela vode zauzimaju tek manji dio, dok okolno područje zauzima veći dio, dolazi do stvaranja miješanih piksela pa stoga područje rijeke Neretve ne može biti prikazano. Jednako tako dolazi do stvaranja miješanih piksela i na drugim površinama, odnosno klasama zemljišnog pokrova.

Nadalje, analiza je provedena na ograničenom broju satelitskih snimki bez naoblake tijekom ljetnog perioda od 2021. do 2025. godine, pa rezultati predstavljaju prosječne vrijednosti relativno kratkog petogodišnjeg razdoblja. Dobivene vrijednosti LST-a odražavaju stanje u trenutku snimanja. LST, a slijedom toga i toplinska ugroženost, ovise i o meteorološkim uvjetima u trenutku snimanja, poput temperature zraka, vlažnosti tla, oborina i atmosferskih uvjeta [55, 56, 57]. Zbog toga se razlike u LST-u između pojedinih godina ne mogu u potpunosti i jednoznačno tumačiti isključivo kao posljedica urbanizacije i drugih promjena u prostoru, već su djelomično uvjetovane i trenutačnim meteorološkim uvjetima. Iz tog razloga naglasak analize stavljen je prvenstveno na prostornu raspodjelu površinske temperature i toplinske ugroženosti unutar urbanog područja Mostara, dok usporedba pojedinih godina ima ograničeno interpretacijsko značenje.

Osim toga, snimanje se provodi u prijepodnevnim satima, oko 11:30 sati, dok je najvrući dio dana tek poslije podne, od oko 13 do 17 sati, pa površine tada još nisu dosegnule maksimalno dnevno zagrijavanje. U budućnosti bi se to moglo promijeniti zahvaljujući planiranoj misiji Copernicusa za praćenje površinske temperature tla (LSTM, engl. *Land Surface Temperature Monitoring*), koji bi od 2028. trebao snimati Zemlju jednako kao i sateliti Landsat 8 i 9, dajući primarno temperaturne podatke, i to s dvostruko boljom rezolucijom od Landsata (50 m umjesto 100 m), većom vremenskom rezolucijom (2 dana umjesto 8) i raznolikijim vremenima preleta [58].

Unatoč navedenim ograničenjima, rezultati istraživanja pružaju kvalitetan uvid u prostornu raspodjelu UTO-a na području Mostara. Dobiveni rezultati u velikoj su mjeri u skladu s prethodnim istraživanjima provedenima na cjelokupnom području Mostara. U radu Duplančić Leder i Leder [20] analizirana je raspodjela LST-a za razdoblje od 1999. do 2018. godine te su identificirana slična područja povišenih temperatura, osobito na urbaniziranim i industrijskim površinama grada. Kao i u ovom istraživanju, najviše temperature zabilježene su na područjima s velikim udjelom izgrađenih površina i slabim vegetacijskim pokrovom, dok su niže temperature prisutne na područjima s vegetacijom i u blizini vodenih površina. Podudarnost rezultata obaju istraživanja dodatno potvrđuje pouzdanost

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

primijenjene metodologije i ukazuje na stabilnost prostorne raspodjele UTO-a u Mostaru kroz duže vremensko razdoblje.

7. ZAKLJUČAK

U okviru istraživanja izračunati su i analizirani LST i ECI na području Grada Mostara primjenom satelitskih snimki misije Landsat 8 za razdoblje 2021.-2025., s ciljem identifikacije toplinskih otoka i procjene toplinske ugroženosti urbanog prostora. Integracijom LST-a te spektralnih indeksa NDVI, NDWI i NDBI, uz eksperimentalno uključivanje BSI-ja, u ECI omogućena je prostorna identifikacija područja povećane toplinske ugroženosti te analiza njihove povezanosti s karakteristikama zemljišnog pokrova.

Rezultati istraživanja pokazali su da se najviše vrijednosti LST-a i ECI-ja javljaju na izgrađenim i industrijskim površinama, odnosno područjima s intenzivnijom urbanizacijom, dok su niže temperature prisutne na područjima s vegetacijskim pokrovom te u blizini vodenih površina, što ukazuje na značajan utjecaj vrste zemljišnog pokrova na pojavu UTO-a. Najviše vrijednosti LST-a i ECI-ja zabilježene su u južnim i industrijskim dijelovima urbanog područja Mostara, osobito na području mostarske gradske četvrti Bišće Polje te u naseljima Gnojnice (posebno kod zračne luke Mostar), Rodoč i Bačevići. Najniže vrijednosti utvrđene su na vegetacijom bogatijim i višim područjima poput Kutilivača, Potoka i Vihovića. Prosječne vrijednosti LST-a po makroklasama potvrđuju navedeni odnos: voda 26.94°C, vegetacija 28.87°C, golo tlo 32.85°C te izgrađeno područje 35.48°C. Korelacijska analiza potvrdila je snažnu povezanost između karakteristika zemljišnog pokrova i LST-a, a time i ECI-ja. Pozitivna korelacija između LST-a i NDBI-ja ($r = 0.72$) te LST-a i BSI-ja ($r = 0.73$) ukazuje da izgrađene površine i golo tlo doprinose porastu temperature. Negativna korelacija između LST-a i NDVI-ja ($r = -0.66$) te LST-a i NDWI-ja ($r = -0.63$) upućuje da vegetacija i vodene površine djeluju kao ublažujući, odnosno rashlađujući čimbenik toplinskih uvjeta.

Dobiveni rezultati usporedivi su s ranijim istraživanjima za područje Mostara, osobito u pogledu pojave povišenih LST vrijednosti u urbanim i industrijskim dijelovima grada. Međutim, ovaj rad proširuje dosadašnja istraživanja uključivanjem recentnog razdoblja 2021.-2025. te integriranom analizom UTO-a primjenom ECI-ja. Za razliku od analize isključivo LST-a, ECI omogućuje cjelovitiju procjenu toplinske ugroženosti povezivanjem LST-a i karakteristika zemljišnog pokrova dobivenih spektralnim indeksima. Na taj način omogućena je jasnija prostorna identifikacija područja povećane toplinske ugroženosti u odnosu na vegetacijom i vodenim površinama bogatija područja s nižim vrijednostima LST-a i ECI-ja. Dodatan doprinos rada ogleda se u operacionalizaciji rezultata kroz javno dostupnu interaktivnu web-kartu UTO-a koja omogućuje uvid te prostornu i vremensku analizu toplinske ugroženosti urbanog prostora uz pregled vrijednosti LST-a u istraživanom razdoblju.

Može se zaključiti da je primjena satelitskih snimki učinkovita metoda za određivanje prostorne raspodjele UTO-a. Predloženi pristup može poslužiti kao osnova za buduća istraživanja UTO-a te kao podrška prostornom planiranju, povećanju udjela zelenih površina i klimatskoj prilagodbi urbanih područja radi ublažavanja negativnih posljedica UTO-a i povećanja kvalitete života stanovništva.

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

LITERATURA

1. Campbell, J. B., Wynne, R. H.: Introduction to Remote Sensing, 5. izdanje, The Guilford Press, New York, 2011.
2. Kurt, E.: Prikupljanje i obrada prostornih podataka u GIS-u za potrebe uspostave i održavanja jedinstvene evidencije i registra prostornih jedinica, Geodetski glasnik, 2012., br. 42, str. 44-52
3. Valiente, J. A., Niclos, R., Barbera, M. J., Estrela, M. J.: Analysis of Differences Between Air-land Surface to Estimate Land Surface Air Temperature from MSG Data, EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 2010.
4. Federalni hidrometeorološki zavod: <https://www.fhmzbih.gov.ba/latinica/AGRO/tempTla.php> (22. 02. 2026.)
5. Voogt, J. A., Oke, T. R.: Thermal Remote Sensing of Urban Climates, Remote Sensing of Environment, 2003., sv. 86, str. 370-384
6. Weng, Q.: Thermal Infrared Remote Sensing for Urban Climate and Environmental Studies: Methods, Applications, and Trends, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009., sv. 64, str. 335-344
7. Splitsko-dalmatinska županija: Program ublažavanja klimatskih promjena, prilagodbe klimatskim promjenama i zaštite ozonskog sloja Splitsko-dalmatinske županije, Split, 2023.
8. Santamouris, M.: Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions, Science of the Total Environment, 2015., sv. 512-513, str. 582-598
9. Jayasinghe, C. B., Withanage, N. C., Mishra, P. K., Abdelrahman, K., Fnais, M. S.: Evaluating Urban Heat Islands Dynamics and Environmental Criticality in a Growing City of a Tropical Country Using Remote-Sensing Indices: The Example of Matara City, Sri Lanka. Sustainability, 2024., sv. 16, čl. 10635.
10. Čmrlec, K.: Određivanje i kartiranje toplinskih otoka u Gradu Zagrebu pomoću satelitskih podataka, diplomski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2019.
11. Duplančić Leder, T., Bačić, S.: Utjecaj lokalnih klimatskih zona na termalna obilježja grada Splita, Zbornik radova 14. simpozija ovlaštenih inženjera geodezije - Žene u geodeziji, Hrvatska komora ovlaštenih inženjera geodezije, 2021., str. 73-80.
12. National Aeronautics and Space Administration: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/tutorials/use-remote-sensing-data-study-vegetation-dynamics> (25. 05. 2026.)
13. Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., Pullin, A. S.: Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence, Landscape and Urban Planning, 2010., sv. 97, str. 147-155
14. Cheval, S., Amihăesei, V.-A., Chitu, Z., Dumitrescu, A., Falcescu, V., Iraşoc, A., Micu, D. M., Mihulet, E., Ontel, I., Paraschiv, M.-G., Tudose, N. C.: A systematic review of urban heat island and heat waves research (1991-2022), Climate Risk Management, 2024., sv. 44, čl. 100603.
15. Cetin, M., Ozenen Kavlak, M., Senyel Kurkcuoglu, M. A., Ozturk, G. B., Cabuk, S. N., Cabuk, A.: Determination of land surface temperature and urban heat island effects with remote sensing capabilities: the case of Kayseri, Türkiye, Nat Hazards, 2024., sv. 120, str. 5509-5536
16. Venkatraman, S., Kandasamy, V., Rajalakshmi, J., Sabarunisha Begum, S., Sujatha, M.: Assessment of urban heat island using remote sensing and geospatial application: A case study in Sao Paulo city, Brazil, South America, Journal of South American Earth Sciences, 2024., sv. 134, čl. 104763
17. Dimitriou, Ch., Michaelides, S., Themistocleous, K., Hadjimitsis, D. G., Papadavid, G., Gitas, I., Kyriakides, N.: Assessing the Urban Heat Island (UHI) Effect Using Land Surface Temperature (LST) and Normalized Difference Built-Up Index (NDBI): A Case Study on Paphos, Cyprus, Environmental and Earth Sciences Proceedings, 2025., sv. 35, br. 1, čl. 65

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

18. Kimothi, S., Thapliyal, A., Gehlot, A., Aledaily, A. N., Gupta, A., Bilandi, N., Singh, R., Malik, P. K., Akram, S. V.: Spatio-temporal fluctuations analysis of land surface temperature (LST) using remote sensing data (LANDSAT TM5/8) and multifractal technique to characterize the urban heat islands (UHIs), *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023., sv. 55, čl. 102956.
19. Šamanović, S., Bjelotomić Oršulić, O., Krajina, T., Markovinović, D.: Tracking Urban Heat Island Dynamics Using Open Source Tools and Free Data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2025., sv. 48, str. 217-224
20. Duplančić Leder, T., Leder, N.: Određivanje površinske temperature tla grada Mostara satelitskim metodama, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije*, br. 15, 2018., str. 66-75
21. Federalni hidrometeorološki zavod: <https://www.fhmzbih.gov.ba/latinica/KLIMA/klimaBIH.php> (22. 02. 2026.)
22. Soltanifard, H., Amani-Beni, M.: The cooling effect of urban green spaces as nature-based solutions for mitigating urban heat: insights from a decade-long systematic review, *Climate Risk Management*, 2025., sv. 49, čl. 100731
23. Wang, L., Wang, L., Li, Y., Wang, J.: A century-long analysis of global warming and Earth temperature using a random walk with drift approach, *Decision Analytics Journal*, 2023., sv. 7, čl. 100237
24. Jutarnji list: <https://www.jutarnji.hr/vijesti/svijet/u-mostaru-pao-temperaturni-rekord-za-2025-u-ovom-dijelu-europe-15600322> (24. 02. 2026.)
25. Associated Press (AP News): <https://apnews.com/article/western-balkan-drought-heatwave-no-rainfall-2843b95842e75807a608e7eaa57a96f1> (24. 02. 2026.)
26. Grad Mostar, Odjel za urbanizam i građenje, Služba za katastar: <https://www.mostar.ba/odjel-za-urbanizam-i-gradenje/> (25. 02. 2026.)
27. Environmental Systems Research Institute (ESRI), ESRI World Imagery: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a> (03. 03. 2026.)
28. Google: <https://www.google.com/maps> (25. 05. 2026.)
29. OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org/> (25. 05. 2026.)
30. Federalni zavod za statistiku: <https://fzs.ba/index.php/category/popis-2013/> (25. 02. 2026.)
31. United States Geological Survey, Earth Explorer: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (27. 02. 2026.)
32. United States Geological Survey: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (27. 02. 2026.)
33. United States Geological Survey: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-oli-and-tirs-calibration-notice> (25. 05. 2026.)
34. Federalna uprava za geodetske i imovinsko-pravne poslove: *Pravilnik o osnovnim geodetskim radovima*, Sarajevo, 2019.
35. Wacker, A. G., Landgrebe, D. A.: *Minimum Distance Classification in Remote Sensing*, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Indiana, 1972.
36. Li Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Zh., Trigo, I. F., Sobrino, J. A.: Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives, *Remote Sensing of Environment*, 2013., sv. 131, str. 14-37
37. Yu, X., Guo, X., Wu, Z.: Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS-Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method, *Remote Sensing*, 2014., sv. 6, br. 10, str. 9829-9852
38. Bustamante, M., Mora, D., Austin, M. C.: Use of Land Surface Temperature Estimation with Geographical Information Tools for Validation of Numerical Microclimate Studies at Urban Scale, *E3S Web of Conferences*, 2021., 76th Italian National Congress, sv. 312, čl. 06004.
39. United States Geological Survey: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook> (28. 02. 2026.)

Alpeza, J., Marić, A., Bjelotomić Oršulić, O., Šamanović, S.

Određivanje, kartiranje i analiza toplinskih otoka urbanog područja Grada Mostara primjenom satelitskih snimki

40. Tran, M.: Planck's and Callendar's Blackbody Radiation Formulas and Their Fitness to Experimental Data, City University of New York, New York, 2019.
41. Češić, M., Rogulj, K., Krtalić, A.: Combined Thermal Index Development for Urban Heat Island Detection in Area of Split, Croatia, Land, 2025., sv. 14, br. 1, čl. 175.
42. Lillesand, Th. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W.: Remote Sensing and Image Interpretation, 7. izdanje, John Wiley & Sons, New York, 2015.
43. Zha, Y., Gao, J., Ni, S.: Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, International Journal of Remote Sensing, 2003., sv. 24, br. 3, str. 583-594
44. McFeeters, S. K.: The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features, International Journal of Remote Sensing, 1996., sv. 17, br. 7, str. 1425-1432
45. Rikimaru, A., Roy, P. S., Miyatake, S.: Tropical forest cover density mapping, Tropical Ecology, 2002., br. 43, str. 39-47
46. Guha, S., Govil, H., Gill, N., Dey, A.: Analytical study on the relationship between land surface temperature and land use/land cover indices, Annals of GIS, 2020., br. 26, str. 201–216
47. Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., Ye, K.: Probability and Statistics for Engineers and Scientists, 9. izdanje, Pearson Education, 2016.
48. QGIS: <https://qgis.org/> (03. 03. 2026.)
49. Leaflet: <https://leafletjs.com> (03. 03. 2026.)
50. Visual Studio Code: <https://vscode.dev/?vscode-lang=hr-hr> (03. 03. 2026.)
51. Carto: <https://carto.com/blog/new-voyager-basemap> (03. 03. 2026.)
52. GitHub: <https://github.com/> (03. 03. 2026.)
53. Karta urbanih toplinskih otoka Grada Mostara: <https://web-karta.github.io/karta-toplinskih-otoka-mostar/> (03. 03. 2026.)
54. World Atlas: <https://www.worldatlas.com/articles/which-is-the-coldest-river-in-the-world.html> (03. 03. 2026.)
55. Zhou, D., Zhao, Sh., Liu, Sh., Zhang, L., Zhu, Ch.: Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers, Remote Sensing of Environment, 2014., sv. 152, str. 51-61
56. Naserikia, M., Hart, M. A., Nazarian, N., Bechtel, B., Lipson, M., Nice, K. A.: Land surface and air temperature dynamics: The role of urban form and seasonality, Science of The Total Environment, 2023., sv. 905, čl. 167306
57. Hong, T.; Heo, Y.: Exploring the impact of urban factors on land surface temperature and outdoor air temperature: A case study in Seoul, Korea, Building and Environment, 2023., sv. 243, čl. 110645
58. Copernicus LSTM: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/lstm> (03. 03. 2026.)