doi: 10.46793/EEE26-3.01P

Originalni naučni rad
UDK 620.9:711.4]:004.9

Multisenzorsko prostorno mapiranje energetskih gubitaka u urbanim sredinama: dokaz koncepta

Aleksandar Peulić[*], Srećko Ćurčić[**]

[*] Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet
[**] Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka, Čačak

Rezime **-** Gubici energije u urbanim sredinama predstavljaju jedan od ključnih faktora koji utiču na energetsku efikasnost, održivost i troškove infrastrukture. Tradicionalne metode za analizu energetskih performansi, kao što su stacionarne senzorske mreže, ručne termalne inspekcije i individualni građevinski energetski pregledi, često nisu dovoljno precizne niti vremenski efikasne, jer ne pružaju visok nivo prostorne rezolucije niti pregled mikroklimatskih promena u realnom vremenu. U ovom radu predstavljen je predlog sveobuhvatnog sistema za procenu urbanih energetskih gubitaka koji kombinuje podatke sa senzorske mreže, prostorno-analitičke metode i termalne mape dobijene upotrebom bespilotnih letelica (drone). Predloženi sistem integriše zemaljske ekološke senzore (temperatura, vlažnost, brzina vetra, CO_2), mobilne senzorske jedinice postavljene na vozila javnog prevoza, kao i termalne podatke dobijene letovima bespilotnih letelica. Prikupljeni podaci obrađuju se primenom naprednih metoda prostorne analitike, modela veštačke inteligencije za interpolaciju i fuzije podataka, kao i GIS tehnika za višeslojnu vizuelizaciju. Termalne slike koje generišu bespilotne letelice omogućavaju preciznu detekciju curenja toplote, degradacije materijala, gubitaka kroz krovne i fasadne strukture, ali i identifikaciju urbanih toplotnih ostrva koja klasične metode teško registruju. Predložena metodologija predstavlja skalabilno i isplativo rešenje pogodno za različite urbane konfiguracije i pruža temelje za prediktivne modele, kontinuirani nadzor i razvoj inteligentnih energetskih sistema.

Ključne reči - energetski gubici, mikroklima, bespilotne letilice, IoT senzori, GIS analiza, veštačka inteligencija

I UVOD

Urbanizacija i klimatske promene u poslednjim decenijama značajno utiču na energetsku efikasnost i održivost gradskih sistema. Sve veće koncentracije stanovništva u urbanim sredinama dovode do povećanih energetskih zahteva, kako za grejanje i hlađenje objekata, tako i za javnu infrastrukturu, uključujući osvetljenje, transport i klimatizaciju javnih prostora. Istovremeno, mikroklimatske varijacije, poput urbanih toplotnih ostrva (eng. *heat islands*), nejednakih temperaturnih distribucija i lokalnih anomalija u insolaciji, direktno utiču na performanse energetski intenzivnih sistema, uključujući solarne elektrane, ventilacione sisteme i distribucione mreže. Precizno praćenje i modeliranje ovih fenomena predstavlja ključni izazov za planiranje održivih i energetski efikasnih gradova.

Tradicionalni pristupi, zasnovani na stacionarnim senzorima, ručnim inspekcijama ili analizama na nivou pojedinačnih objekata, često nisu dovoljno precizni niti vremenski efikasni. Ove metode ne omogućavaju visok nivo prostorne rezolucije niti kontinuirani uvid u promene mikroklime u realnom vremenu, što ograničava identifikaciju lokalizovanih izvora gubitaka energije, posebno u kompleksnim urbanim sredinama sa heterogenim tipovima zgrada, materijala i rasporedom zelenih površina. Kao posledica, donošenje strateških odluka o energetskoj infrastrukturi i optimizaciji solarnih panela ili sistema grejanja i hlađenja ostaje neprecizno i nedovoljno informisano. Savremeni pristupi integrišu višeslojne podatke prikupljene putem bespilotnih letelica, IoT senzora i GIS platformi, omogućavajući detaljno mapiranje urbane mikroklime i energetskih gubitaka. Bespilotne letelice pružaju visoko-rezolutne termalne i multispektralne podatke o krovovima, fasadama, zelenim površinama i javnim prostorima, što omogućava identifikaciju toplotnih anomalija, curenja toplote i degradacije materijala. IoT senzori dopunjuju ove podatke kontinuiranim vremenskim serijama parametara okoline, uključujući temperaturu, vlažnost, insolaciju i koncentraciju CO_2.Integracija ovih podataka sa GIS-om omogućava prostorno preciznu analizu energetskih tokova i mikroklimatskih efekata [1,2]. GIS platforma kombinuje informacije o visinskim modelima zgrada, materijalima, senčenju i urbanom zelenilu, čime se kreira slojeviti digitalni model grada. Ovaj model omogućava identifikaciju kritičnih tačaka sa najvećim energetskim gubicima, mapiranje urbanih toplotnih ostrva i optimizaciju rasporeda solarnih panela i zelenih površina.

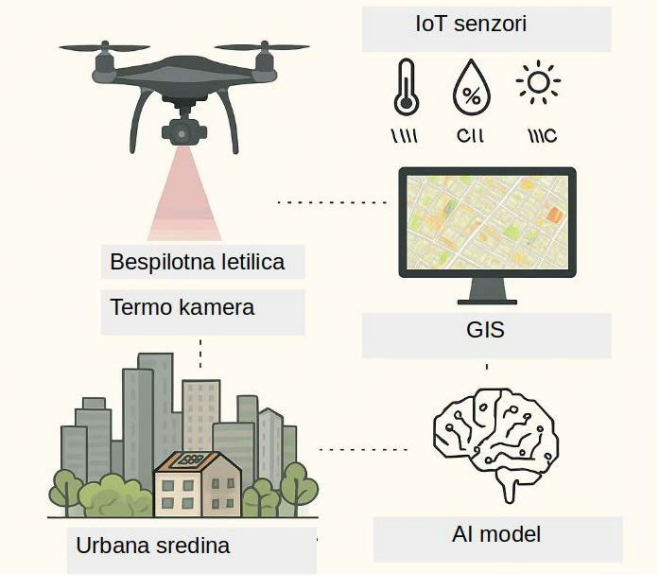
Poseban doprinos ovog rada je primena veštačke inteligencije (AI) u analizi i predikciji energetskih gubitaka. Korišćenjem algoritama mašinskog učenja, poput Random Forest i XGBoost, i generativnih modela kao što je Pix2Pix, moguće je rekonstruisati termalne mape visoke rezolucije, interpolirati nedostajuće podatke i predvideti mikroklimatske parametre sa visokim stepenom tačnosti. AI omogućava simulaciju različitih scenarija „šta ako“ [3,4,5]. Identifikaciju kritičnih zona gubitka toplote i optimizaciju sistema solarnih panela, termoizolacije i rasporeda urbanih zelenih površina. Ovaj integrisani pristup predstavlja skalabilno i primenljivo rešenje za različite urbane konfiguracije, pružajući naučnu osnovu za kontinuirani nadzor, evaluaciju i unapređenje energetske efikasnosti. Implementacija takvog sistema doprinosi smanjenju operativnih troškova, povećanju efikasnosti obnovljivih izvora energije i podršci pametnim gradovima u donošenju strateških odluka o energetskoj

infrastrukturi i urbanom planiranju. Pored toga, sistem omogućava adaptivno planiranje i prediktivno upravljanje energijom, što je posebno važno u kontekstu klimatskih promena i povećanih energetskih zahteva urbanih sredina.

II Arhitektura predloženog koncepta

Predloženi sistem se sastoji od tri ključne komponente, bespilotne letilice, IoT senzorske mreže i GIS-AI integracije [6,7,8]. Bespilotne letilice su opremljene termalnim i multispektralnim senzorima, prikupljaju podatke o temperaturi, insolaciji, zelenim površinama i krovnim strukturama. Primenom algoritama veštačke inteligencije, kreiraju prostorne mape visoke rezolucije za GIS integraciju. Kreiraju visoko-rezolutne prostorne mape za GIS integraciju. IoT senzori su postavljeni na važnim, strateškim mestima, ili na vozilima javnog prevoza, što omogućava merenje temperature, vlažnosti, koncentracije CO_2 i insolacije.

AI modeli (Random Forest, XGBoost, Pix2Pix) predviđaju mikroklimatske parametre i energetske gubitke, koji se intergrišu u GIS prostorni model, tako da se kreira digitalni model grada, što kao rezultat ima preporuke za optimizaciju solarnih panela, raspored zelenih površina i planiranje energetske infrastrukture [9,10]. Arhitektura predloženog koncepta prikazana je na Slici 1.



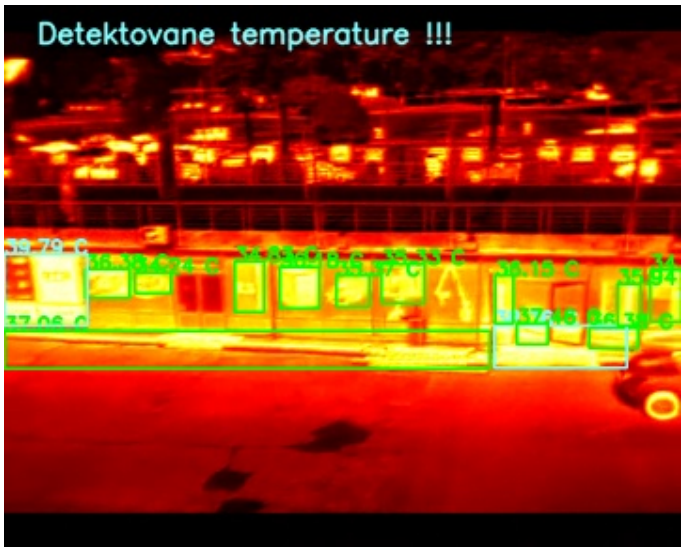
Slika 1. Arhitektura predloženog koncepta

III Metodologija

Prikupljanje podataka obavlja se tako što bespilotne letelice(dron) lete definisanim rutama i snimaju termalne i multispektralne mape, dok IoT senzori beleže podatke u realnom vremenu. GIS integriše visinske modele zgrada, urbane površine i podatke bespilotnih letelica. Za analizu podatakta i AI model u ovom radu je predložen kombinovani dataset koji koristi se za treniranje AI modela. Random Forest i XGBoost modeli predviđaju lokalnu temperaturu, insolaciju solarnih panela, efikasnost i gubitke u mikroklimi. Generativni modeli Pix2Pix mogu da se koriste za rekonstrukciju nedostajuće termalne zone.

Na slici 2, prikazan je termalni snimak područja naselja, dobijen pomoću termo kamere montirane na dron. Snimak je procesiran softverskim algoritmom koji identifikuje i vizualizuje oblasti sa povišenom temperaturom. Prvo je termalna slika konvertovana u sivu skalu radi izdvajanja intenziteta toplote, zatim su primenjene metode binarne segmentacije i detekcije kontura kako bi se identifikovale kritične zone. Za svaku izdvojenu oblast izračunata je prosečna temperatura, koja je prikazana direktno na snimku, dok su zone sa temperaturama iznad definisanog praga istaknute bojom i označene upozorenjem. Ovaj proces omogućava preciznu identifikaciju toplih tačaka u urbanom okruženju i vizuelnu prezentaciju podataka sa visokom prostornom rezolucijom. Pored vizuelne obrade termalnog snimka, kreirana je tabela koja sadrži identifikovane oblasti sa pripadajućim prosečnim temperaturama i koordinatama pravougaonika na snimku. Ova tabela se može kasnije povezati sa podacima dobijenim sa IoT senzora, omogućavajući integrisanu analizu i prikaz u GIS-u. Na osnovu ovih podataka moguće je primeniti algoritme veštačke inteligencije za predikciju i procenu kritičnih zona, detekciju anomalija u distribuciji temperature ili pravljenje modela za praćenje urbanih mikroklimatskih promena.

Takva integracija omogućava kombinovanje vizuelnih i senzorskih podataka za preciznije i automatizovane odluke u realnom vremenu.



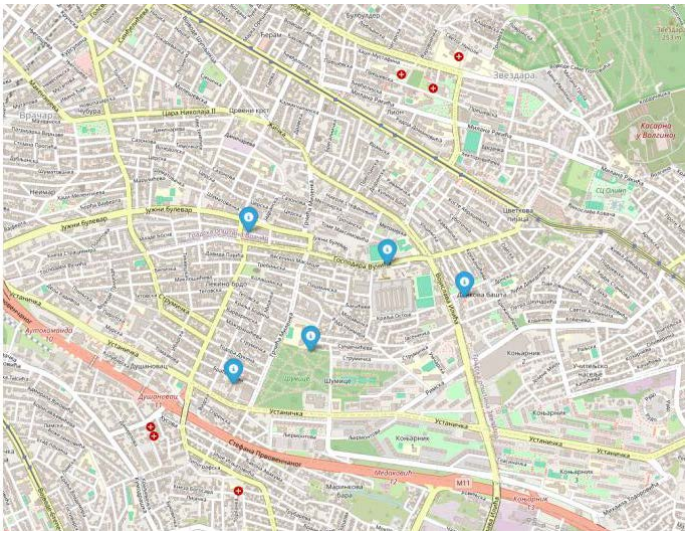
Slika 2. Termalni snimak obrađen za detekciju toplih zona

IoT senzori postavljeni na ključnim lokacijama u urbanom prostoru beleže podatke u realnom vremenu, uključujući temperaturu, vlažnost vazduha, koncentraciju PM2.5 i PM10 čestica. Senzorski čvorovi su geografski raspoređeni tako da pokrivaju različite tipove okoline, uključujući ulice, parkove i javne površine, čime se omogućava detaljna prostorna analiza. Prikupljeni podaci se putem bežične komunikacije šalju u centralnu bazu, gde se automatski organizuju u tabelarni format radi jednostavnijeg pregleda i analize.

Paralelno, GIS sistem integriše visinske modele zgrada, urbane površine i podatke bespilotnih letelica, omogućavajući vizuelizaciju senzorskih informacija u kontekstu urbanog

pejzaža.

Na slici 3. prikazan je raspored senzora po urabnom području u QGIS-u, uključujući njihove koordinate i tipove merenih parametara, što omogućava sinhronizovanu analizu prostornih i vremenskih promena u realnom vremenu.



Slika 3. Raspored senzora po urabnom području

IoT senzori postavljeni na ključnim lokacijama u urbanom prostoru omogućavaju prikupljanje podataka u realnom vremenu, pružajući informacije o osnovnim mikroklimatskim i ekološkim parametrima, kao što su temperatura, vlažnost vazduha i koncentracije PM2.5 i PM10 čestica. Svaki senzor predstavlja samostalni čvor koji kontinuirano meri ove parametre i putem bežične mreže šalje podatke u centralnu bazu, gde se automatski organizuju u tabelarni format radi daljeg pregleda i analize. Pored fiksnih senzorskih tačaka, sistem koristi termalne snimke prikupljene bespilotnim letelicama, koje pokrivaju šire prostorne oblasti i omogućavaju vizualizaciju temperaturnih razlika u gradskom okruženju.

Integracija senzorskih i termalnih podataka zasniva se na geografskoj referenci: koordinate svake senzorske tačke se povezuju sa odgovarajućim oblastima na termalnim snimcima. Na taj način za svaku lokaciju u gradu može se pratiti trenutna mikroklimatska situacija, dok termalni snimci pružaju prostornu distribuciju temperature koja omogućava identifikaciju zona sa specifičnim karakteristikama, poput toplotnih ostrva ili oblasti sa većim zagađenjem vazduha. Takva sinhronizacija podataka omogućava sveobuhvatnu analizu, jer se numerički podaci senzora i prostorne informacije sa termalnih snimaka mogu kombinovati u jedinstvenu tabelu, što omogućava napredne statističke metode i primenu mašinskog učenja, na primer Random Forest, za predikciju mikroklimatskih i ekoloških parametara u urbanom okruženju.

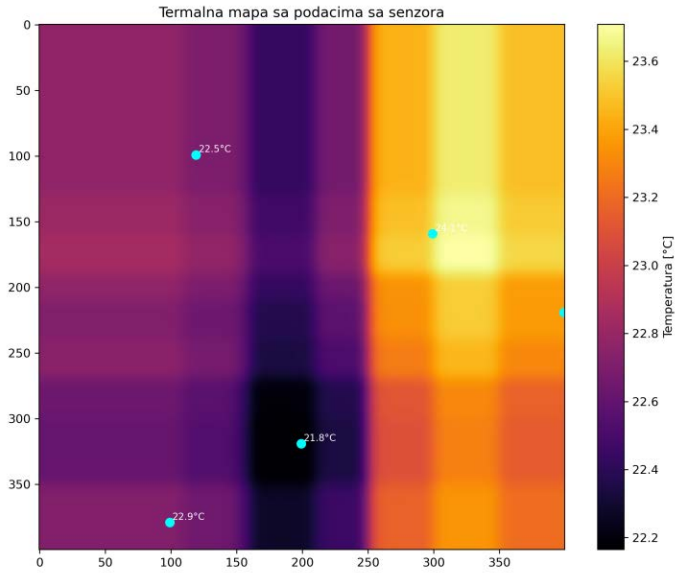
GIS tehnologija igra ključnu ulogu u ovom sistemu, jer omogućava integraciju visinskih modela zgrada, urbane infrastrukture i prostornih podataka sa dronova sa senzorskim informacijama. Time se postiže vizuelizacija urbanog pejzaža u kontekstu mikroklimatskih i ekoloških podataka, omogućavajući identifikaciju ključnih faktora koji utiču na kvalitet života u gradu. GIS takođe omogućava prostornu analizu i filtriranje podataka, npr. prikazivanje svih senzorskih tačaka unutar određenih urbanih zona ili poređenje merenja različitih tipova senzora u realnom vremenu.

Rezultat ove integracije je sveobuhvatna baza podataka koja obuhvata geografski raspored senzora, njihove merenja i prostornu raspodelu temperature sa termalnih snimaka. Tabela 1 prikazuje primer ovakvih kombinovanih podataka. Ovaj sistem omogućava ne samo detaljno praćenje urbanih mikroklimatskih parametara, već i njihovu analizu i vizualizaciju u GIS-u, čime se olakšava donošenje odluka u oblasti urbanog planiranja, zaštite životne sredine i unapređenja kvaliteta života građana.

Tabela 1. Podaci sa IoT senzora

Lokacija	T [°C]	H [%]	UV	PM2.5	PM10
Zona 1	22.5	55.2	6.1	35.4	60.2
Zona 2	24.1	48.7	5.8	40.5	70.1
Zona 3	23.3	52.0	6.3	38.0	65.7
Zona 4	21.8	50.5	5.5	32.7	58.4
Zona 5	22.9	54.1	6.0	36.9	62.3

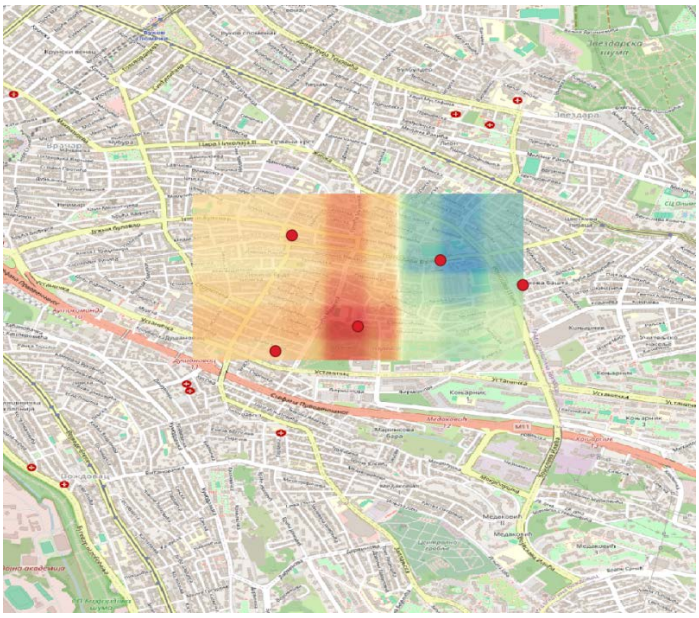
Slika 4. prikazuje interpoliranu termalnu mapu urbanog područja, generisanu kombinovanjem podataka sa termo-kamera drona i realnih IoT senzora raspoređenih na terenu. Na slici su jasno označene cijan tačke, koje predstavljaju lokacije senzora. Boje na mapi predstavljaju temperaturu površine u stepenima Celzijusa, pri čemu svetlije nijanse označavaju višu temperaturu, a tamnije nijanse nižu temperaturu.



Slika 4. Interpolirana termalna mapa sa senzorima i dron podacima

Za generisanje ove mape korišćen je Random Forest algoritam mašinskog učenja zasnovan na grupi stabala odluka. Algoritam je treniran na poznatim tačkama senzora, tj. na koordinatama piksela i njihovim temperaturama. Random Forest funkcioniše tako što kreira veliki broj stabala odluka na slučajnim

podskupovima podataka, svako stablo predviđa vrednost temperature za nepoznate piksele, a konačna predikcija za svaki piksel se dobija prosekom predikcija svih stabala, čime se postiže glatka interpolacija i smanjuje uticaj pojedinačnih grešaka. Ovaj pristup omogućava da se temperatura izmerena na ograničenom broju senzorskih tačaka proširi na celo područje, uz očuvanje lokalnih varijacija i realističnog rasporeda toplotnih vrednosti, što je ključno za analize mikroklime. Prednost Random Forest modela je njegova otpornost na šum u podacima i sposobnost da modeluje nelinearne zavisnosti, što je posebno važno u urbanim sredinama gde se temperatura može brzo menjati zbog različitih površina, vegetacije i zgrada. Na slici se takođe može uočiti detaljna raspodela temperature, sa glatkim prelazima između tačaka senzora, što omogućava vizualno i kvantitativno praćenje termalnih anomalija i identifikaciju kritičnih zona gubitka toplote. Ovakva mapa je idealna za dalje GIS analize, jer omogućava precizno mapiranje temperaturnih varijacija i povezivanje sa prostornim podacima poput zgrada, ulica i zelenih površina. Slika 5 prikazuje isti dataset u formatu GeoTIFF, učitan u QGIS – open source GIS softveru. GeoTIFF je georeferencirani raster format, što znači da svaki piksel mape ima precizno definisane geografske koordinate u standardnom koordinatnom sistemu.



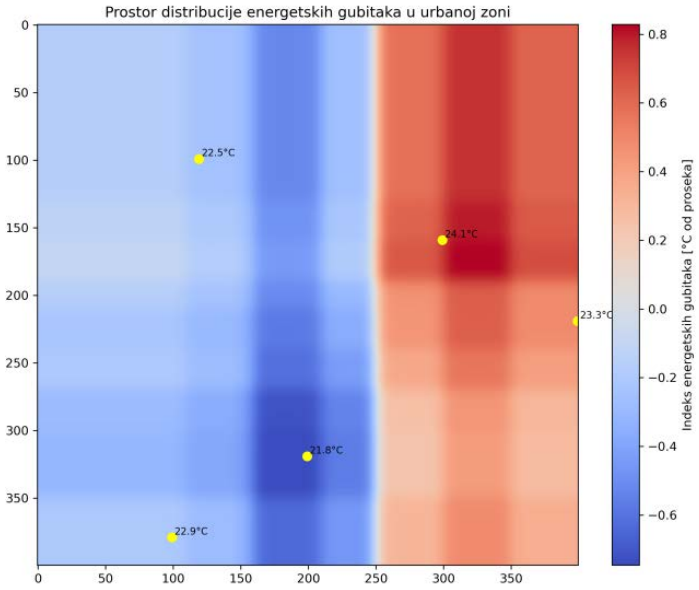
Slika 5. GeoTIFF termalne mape u QGIS-u sa označenim senzorima

Proces uvoza GeoTIFF-a u QGIS omogućava prikaz termalne mape u prostornom kontekstu, direktno preko karte grada, integraciju sa drugim GIS slojevima, kao što su zgrade, saobraćajnice i vegetacija, analize prostorne distribucije temperature uključujući identifikaciju toplih i hladnih zona, izračunavanje statistika po parcelama ili blokovima i planiranje mera za optimizaciju mikroklime. QGIS omogućava interaktivno istraživanje podataka, zumiranje, panoramiranje, primenu kolormapa i kreiranje legendi koje olakšavaju vizualnu interpretaciju. GeoTIFF generisan putem Random Forest interpolacije sadrži temperaturu svakog piksela mapiranu na tačne geografske koordinate. Kada se uveze u QGIS, mapa se može koristiti za overlay sa satelitskim snimcima ili ortofotomapama, simulaciju efekata urbanih objekata na raspodelu toplote, planiranje postavljanja novih senzora ili solarnih panela i analize u vezi sa urbanim toplotnim ostrvima. Kombinacija dron termalne slike, IoT senzorskih tačaka, Random Forest interpolacije i GeoTIFF formata daje realističnu i prostorno preciznu termalnu mapu, GIS-ready dataset koji se može koristiti u softverima otvorenog koda poput QGIS-a i osnovu za dalja istraživanja i optimizaciju urbanih sistema i mikroklime, uključujući identifikaciju kritičnih zona i planiranje adaptivnih intervencija. Ovaj pristup omogućava da se povežu merenja sa tla i drona, obrade AI algoritmom i dobiju visoko kvalitetne prostorne informacije koje mogu da se koriste za naučne i praktične urbanističke analize.

IV Analiza energetskih gubitaka

Analiza energetskih gubitaka u urbanim zonama predstavlja ključni korak u razumevanju prostorne distribucije toplotnih anomalija koje nastaju kao posledica neefikasne izolacije zgrada, različitih materijala u izgradnji urbanih površina, kao i uticaja mikroklimatskih faktora. U okviru ovog istraživanja, energetski gubici procenjeni su na osnovu temperaturnih podataka prikupljenih IoT senzorskom mrežom raspoređenom po odabranoj urbanoj oblasti. Senzori su postavljeni na strateškim lokacijama kako bi obuhvatili različite tipove površina, uključujući stambene i komercijalne zgrade, zelene površine i asfaltirane ulice, čime se omogućava reprezentativan prikaz lokalnih temperaturnih karakteristika. Prikupljeni podaci korišćeni su za kreiranje interpolovane termalne mape čitave oblasti. Za interpolaciju je primenjen algoritam Random Forest, koji omogućava predikciju temperaturnih vrednosti u svim pikselima mape na osnovu poznatih vrednosti sa senzora. Nakon interpolacije, rezultat je dodatno obrađen pomoću Gaussian filtera radi glatkog prikaza, čime su eliminisane nagle lokalne fluktuacije i dobijena je vizualno konzistentna termalna mapa. Energetski gubici definisani su kao odstupanje lokalne temperature od prosečne temperature cele oblasti. Na ovaj način, pozitivne vrednosti indikativno ukazuju na lokacije sa potencijalno većim gubicima toplote, što može biti posledica loše izolacije krovova, zidova i fasada, kao i nedostatka vegetacije ili prisustva površina koje akumuliraju toplotu, poput betona ili asfalta. Negativne vrednosti odstupanja predstavljaju područja sa nižim gubicima toplote, što može ukazivati na bolju izolaciju, senovite zone ili zelene površine koje doprinose smanjenju lokalnih temperatura. Dobijena analiza omogućava prostornu kvantifikaciju energetskih gubitaka i identifikaciju kritičnih tačaka u urbanom okruženju. Na osnovu rezultata moguće je planirati prioritetne intervencije, uključujući poboljšanje izolacije zgrada, uvođenje zelenih krovova, sadnju drveća ili korišćenje reflektujućih materijala na urbanim površinama. Pored toga, prostorna vizualizacija omogućava da se uočavaju koncentrisane zone sa visokim gubicima energije, što je od posebnog značaja za planiranje energetski efikasnih i održivih urbanih sredina. Interaktivne i GIS vizualizacije omogućavaju dalje prostorno istraživanje podataka i pružaju osnovu za povezivanje sa drugim prostornim informacijama, kao što su urbanistički planovi,

struktura saobraćajne mreže i prostorni raspored građevinskih objekata. Analiza energetskih gubitaka u ovom radu stoga ne predstavlja samo kvantitativnu procenu toplotnih anomalija, već i praktičan alat za planiranje održive urbane sredine. Na slici 6, prikazana je termalna mapa sa prikazom prostorne distribucije energetskih gubitaka u urbanoj zoni. Na slici su označene lokacije senzora, a različite boje predstavljaju odstupanja lokalnih temperatura u odnosu na prosečnu temperaturu oblasti, gde crvenije nijanse ukazuju na veće energetske gubitke.



Slika 6. Prostorna distribucija energetskih gubitaka u urbanoj zoni

V ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je koncept sveobuhvatnog sistema za procenu energetskih gubitaka u urbanim sredinama, koji integriše podatke sa IoT senzora, termalne i multispektralne snimke bespilotnih letelica, GIS tehnologiju i algoritme veštačke inteligencije. Glavni cilj rada bio je prikazati mogućnost kombinovanja višeslojnih podataka radi detaljnog mapiranja mikroklimatskih parametara i identifikacije zona sa povećanim energetskim gubicima, čime se omogućava donošenje odluka u oblasti urbanog planiranja, energetske efikasnosti i zaštite životne sredine.

Poseban doprinos ovog istraživanja ogleda se u proceni energetskih gubitaka na osnovu odstupanja lokalnih temperatura od prosečne vrednosti posmatrane oblasti. Na osnovu interpolacija termalne površine generisane Random Forest algoritmom, kreirana je prostorna mapa koja jasno izdvaja zone sa izraženim pozitivnim termalnim anomalijama. Ove anomalije ukazuju na mesta gde su energetski gubici verovatno najveći, najčešće usled loše termičke izolacije objekata, prekomerne akumulacije toplote gradskih površina ili nedostatka vegetacije. Istovremeno, hladnije zone predstavljaju oblasti sa manjim gubicima energije i boljim mikroklimatskim uslovima. Dobijena vizualizacija energetskih gubitaka u GeoTIFF formatu i interaktivnom HTML prikazu omogućava dalje prostorne analize u GIS okruženju i predstavlja konkretan izlaz sistema spreman za primenu u realnim urbanim intervencijama.

Predloženi koncept demonstrira kako integracija različitih izvora podataka, primena algoritama veštačke inteligencije za interpolaciju i predikciju, kao i GIS vizualizacija mogu zajedno da pruže prostorno i vremenski preciznu analizu mikroklime, detekciju urbanih toplotnih ostrva i kritičnih tačaka sa povećanim energetskim gubicima. Time se značajno unapređuje planiranje i optimizacija energetske infrastrukture, kao i određivanje prioriteta za intervencije poput unapređenja izolacije, ozelenjavanja i optimizacije građevinskih materijala. Sistem je koncipiran kao skalabilno rešenje primenljivo na različite urbane konfiguracije, što otvara mogućnosti za kontinuirani nadzor i evaluaciju u realnom vremenu. Iako je reč pre svega o prikazu koncepta, u budućnosti se sistem može dodatno unaprediti uvođenjem dinamičkog modeliranja meteoroloških promena, proširenjem senzorskih mreža, primenom naprednijih dron platformi i simulacijom „šta ako“ scenarija radi optimizacije urbanih i energetskih intervencija. Predloženi pristup predstavlja temelj za razvoj inteligentnih energetskih sistema i prelazak sa statičkih analiza na prediktivno i adaptivno upravljanje urbanom energijom, čime se doprinosi smanjenju operativnih troškova, povećanju energetske efikasnosti i razvoju pametnih, održivih i klimatski otpornih gradova.

LITERATURA

[1] Ćurčić, S., Peulić, A. Izrada energetske mape raspoloživih sirovina u geografskom informacionom sistemu (GIS), Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 3, pp. 48-51, 2024. https://doi.org/10.46793/EEE24-3.48C

[2] Ćurčić, S., Stanić G. Raspoloživi energetski potencijali od drvne i biljne biomase sa teritorije opštine Užice, Energija, ekonomija, ekologija, No. 3-4, pp. 177-183, 2017.

[3] Peulić, A., Peulić, M., Jovanović, Ž., Joković, M., Stojković, S., Vagić, N. Locating and categorizing causes of discomfort during transport of patients to medical facilities, Transactions in GIS, Vol. 25, pp. 2963–2981, 2021. https://doi.org/10.1111/tgis.12797

[4] Jovanović, Ž., Blagojević, M., Janković, D., Peulić, A. Patient comfort level prediction during transport using artificial neural network, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 27, No. 4, pp. 2817-2832, 2019. https://doi.org/10.3906/elk-1807-258

[5] Stojković, S., Jovanović, D., Peulić, A. Veštačka inteligencija u geografiji: za ili protiv?, in Proc. *VI Kongres geografa Srbije sa međunarodnim učešćem: Upotreba GIS alata i veštačke inteligencije, knjiga 1*, Zlatibor, pp. 513-523, avgust 2024. https://doi.org/10.5937/KonGef24057S

[6] Dimitrov, S., Iliev, M., Borisova, B., Semerdzhieva, L., Petrov, S. UAS-Based thermal photogrammetry for microscale surface urban heat island intensity assessment in support of sustainable urban development, Sustainability, Vol. 16, No. 5, pp. 1766, 2024. https://doi.org/10.3390/su16051766

[7] Lyu, F., Wang, S., Han, S.Y., Catlett, C., Wang, S. An integrated cyberGIS and machine learning framework for fine-scale prediction of Urban Heat Island using satellite remote sensing and urban sensor network data, Urban Informatics, Vol. 1, No. 6, 2022. https://doi.org/10.1007/s44212-022-00002-4

[8] Mutani, G., Scalise, A., Sufa, X., Grasso, S. Synergising machine learning and remote sensing for urban heat island dynamics: a comprehensive modelling approach, Atmosphere, Vol. 15, No. 12, pp. 1435, 2024. https://doi.org/10.3390/atmos15121435

[9] Afroosheh, S., Askari, M. Fusion of deep learning and GIS for advanced remote sensing image analysis, arXiv, No. 2412.19856, 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19856

[10] Hong, X., Sheridan, S., Li, D. Mapping built environments from UAV imagery: a tutorial on mixed methods of deep learning and GIS, Computational Urban Science, Vol. 2, No. 12, 2022. https://doi.org/10.1007/s43762-022-00039-w

AUTORI

dr Aleksandar Peulić, redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno matematički fakultet, aleksandar.peulic@pmf.kg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-3043-6879

dr Srećko Ćurčić, redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka, Čačak, srecko.curcic@ftn.kg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-6632-293X

Multisensor Spatial Mapping of Energy Losses in Urban Environments: Proof of Concept

Abstract – Energy losses in urban environments represent one of the key factors affecting energy efficiency, sustainability, and infrastructure costs. Traditional methods for analyzing energy performance—such as fixed sensor networks, manual thermal inspections, and individual building energy audits—are often neither sufficiently precise nor time-efficient, as they do not provide high spatial resolution or real-time insight into microclimatic variations. This paper presents a proposal for a comprehensive system for assessing urban energy losses, which combines sensor-network data, spatial-analytical methods, and thermal maps obtained using unmanned aerial vehicles (drones). The proposed system integrates ground-based environmental sensors (temperature, humidity, wind speed, CO_2), mobile sensing units installed on public transportation vehicles, as well as thermal data collected during UAV flights. The collected data are processed using advanced spatial-analytics techniques, artificial intelligence models for interpolation and data fusion, and GIS methods for multi-layer visualization. Thermal images generated by unmanned aerial vehicles enable precise detection of heat leakage, material degradation, energy losses through roof and façade structures, as well as the identification of urban heat-island zones that are difficult to detect using classical methods. The proposed methodology represents a scalable and cost-effective solution suitable for various urban configurations and provides a foundation for predictive models, continuous monitoring, and the development of intelligent energy systems.

Index Terms – Energy losses, Microclimate; Unmanned aerial vehicles, IoT sensors, GIS analysis, Artificial intelligence

Rad primljen: 12.03.2026., prihvaćen: 18.08.2026.