

IZRAČUN SONČNEGA POTENCIALA STREH IZ PODATKOV LIDAR Z VEČLOČLJIVOSTNIM SENČENJEM

Niko LUKAČ, Danijel ŽLAUS, Sebastijan SEME, Borut ŽALIK, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

Strehe stavb postajajo vedno bolj pomembne za namestitev fotovoltaičnih sistemov. Izboljšajo lahko samooskrbo z električno energijo in zmanjšajo emisije toplogrednih plinov. Žal niso vse strehe primerne za namestitev teh sistemov. V članku predstavljamo reševanje tega problema z ugotavljanjem sončnega potenciala streh, pri čemer pridobimo potrebne geometrijske informacije iz podatkov LiDAR, podatke o direktnem in difuznem obsevanju za dano lokacijo pa iz meritev s piranometrom. Za izboljšanje natančnosti izračuna sončnega potenciala uporabljamo večločljivostno senčenje.

ABSTRACT

Buildings' roofs are becoming increasingly important for photovoltaic systems installation. They can increase efficiency of electrical usage and decrease the amount of greenhouse emissions. However, not all roofs are suitable for photovoltaic systems installation. This work proposes a method for estimating roofs' solar potential. The solar potential is calculated on LiDAR data using measurements of direct and diffuse solar irradiance from pyranometer at a given location. Multiresolutional shadowing is proposed for achieving higher accuracy in the solar potential calculation.

1. UVOD

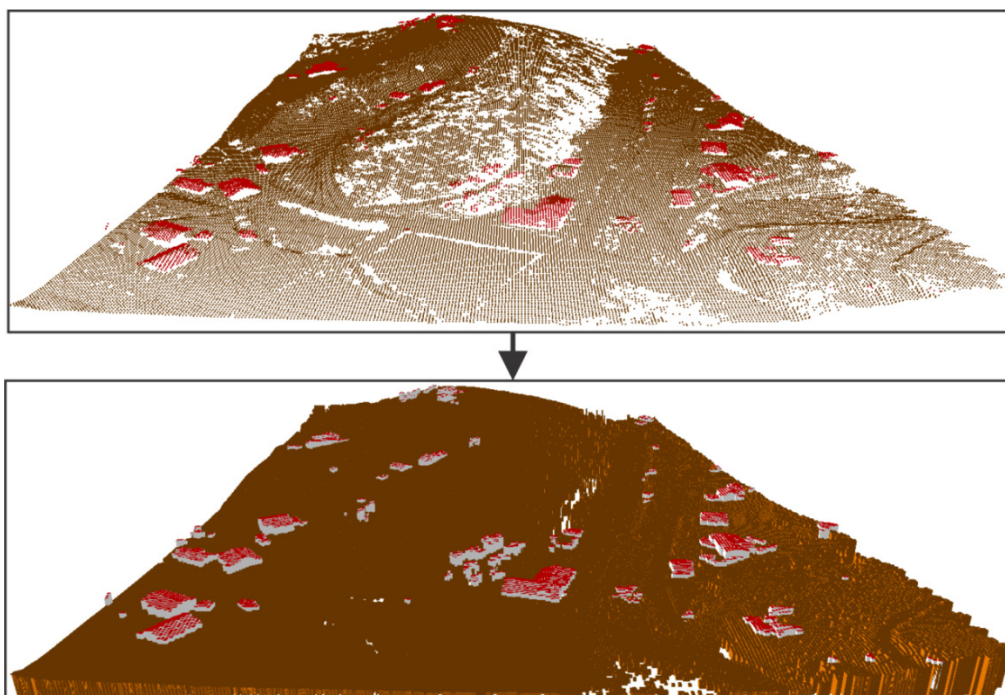
Sončna energija je čist in obnovljiv vir energije, ki delno zamenjuje obstoječe neobnovljive vire energije. Ugotavljanje primernih površij za optimalno postavitev sončnih modulov, ki so del sončne elektrarne, pa je precejšen problem. To delo predstavlja novo metodo za učinkovit izračun sončnega potenciala streh na podatkih LiDAR (Light Detection and Ranging) skupaj s statističnimi podatki meritev sončnega obsevanja iz piranometra. Izračun sončnega potenciala pomaga investitorjem pri odločitvi, kje je najbolje namestiti fotovoltaične sisteme. Za bolj natančni izračun sončnega potenciala je potrebno upoštevati mnogo vplivov: lokacija na Zemlji, lokalna topografija (t.j. naklon in orientacija streh), vpliv oblakov in atmosfere in vpliv senčenja od stavb in površja. Veliko teh vplivov ni možno natančno določiti, zato se izračunajo dobri približki, kjer je natančnost izračuna odvisna od vhodnih podatkov.

Hetrick in soavtorji [1] so predstavili sončni model obsevanja, ki uporablja geoprostorske podatke. Vhodni podatki so bili predstavljeni z digitalnim modelom reliefa (DMR), vendar ti podatki ne vsebujejo natančnih informacij o topografiji stavb. Suri in Hofierka [2] sta razvila model za izračun sončnega obsevanja za geografski informacijski sistem (GIS), ki prav tako upošteva vpliv atmosfere. V zadnjih letih se je obseg podatkov LiDAR precej povečal, kar je pripomoglo k razvoju različnih metod za izračun sončnega potenciala. LiDAR je aktivna tehnologija daljinskega zaznavanja, kjer se pošiljajo laserski impulzi za ugotavljanje pozicij na Zemlji [3]. Rezultati zračnega snemanja LiDAR je nestrukturiran oblak 3D točk. Voegtle in soavtorji [4] so analizirali sončni potencial na izračunanih ravninah streh v urbanem območju. Kassner in soavtorji [5] so predstavili LiDAR kot 2.5D oblak točk in izračunali sončni potencial nad zaznanimi konturami streh. Jochem in soavtorji [6] so predstavili avtomatično detekcijo streh (t.i. segmenti) v 3D oblaku točk in določili sončni potencial z uporabo metode iz [2]. Lukač in soavtorji [7] so ocenili sončni potencial objektov iz podatkov LiDAR skupaj z uporabo statistike o številu sončnih dni na dani lokaciji. Difuzno obsevanje je bilo ocenjeno glede statistike za veliko večjo površino kot dana lokacija, zaradi tega je bil izračun manj natančen. Predstavljena metoda je nadaljevanje [7], kjer se učinkovito izračuna sončni potencial streh z uporabo natančne topografije površja in natančnimi meritvami dnevnega obsevanja. Topografijo površja pridobimo iz podatkov zračnega snemanja LiDAR. Vrednosti večletnega dnevnega direktnega in difuznega obsevanja smo pridobili z meritvami s piranometrom na dani lokaciji. Z uporabo meritev izračunamo dnevno obsevanje za vsako površje, nato se iz vsakodnevnega sončnega obsevanja izračuna sončni potencial. Z izračunom pozicije Sonca je omogočeno časovno in lokacijsko odvisno senčenje. Predstavljena metoda vsebuje večločljivostno senčenje, saj izvedemo senčenje stavb in površja v različnih ločljivostih.

Članek je organiziran v 4 poglavja, pri tem poglavje 2 predstavi metodo za izračun sončnega potenciala. Praktični rezultati pri uporabljanju metode nad realnimi podatki so predstavljeni v 3. poglavju, medtem ko se članek zaključi v 4. poglavju.

2. ZASNOVA METODE ZA IZRAČUN SONČNEGA POTENCIALA STREH

Vhod v metodo so klasificirani podatki LiDAR za površje in stavbe. Najprej vstavimo točke LiDAR v 2.5D enakomerno porazdeljeno mrežno strukturo v dani ločljivosti, kot je prikazano na sliki 1. Vsaka celica vsebuje množico točk za dano lokacijo, kjer se izračuna povprečna točka, ki predstavlja višino celice. Nato se za vsako celico mreže izračuna vektor normale kot povprečje vektorskih produktov vektorjev, ki predstavljajo razlike med dano celico in osmimi okoliškimi celicami. Iz vektorja normale vsake celice določimo kota naklona β_c in orientacije γ_c . Naklon predstavlja kot med horizontalno ravnino in normalo celice. Orientacija je definirana s kotom γ med projekcijo vektorja normale na horizontalno ravnino in vektorjem, ki kaže proti geografskem severu.



Slika 1: Pretvorba oblaka točk v enakomerno porazdeljeno mrežo.

Povprečne podatke sončnega obsevanja iz piranometra nato uporabimo za izračun sončnega obsevanja za vsako celico streh. Sončni potencial dane celice predstavlja povprečje dnevnega sončnega obsevanja na dano površino z upoštevanjem senčenja.

2.1 Izračun sončnega obsevanja

Trenutna vrednost sončnega obsevanja določa, koliko sončnega sevanja pade na dano površje v določenem časovnem trenutku. Za večjo natančnost se uporablja sončni čas, ki je odvisen od gibanja Sonca. Lokalni čas ima zamik od dejanskega sončnega časa. Sončni čas izračunamo z enačbo (1), ki sta jo definirala Duffie in Beckman [8]:

$$Sončni_{čas} = Lokalni_{čas} - 4(\lambda_M - \lambda_c) + E, \quad (1)$$

kjer λ_M predstavlja lokalni poldnevnik, ki pokriva celico c . λ_c je geografska dolžina celice. Variacije od rotacije Zemlje predstavlja izraz (2), ki ga je definirala Spencer [9]:

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868\cos B - 0.032077\sin B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sin 2B), \quad (2)$$

kjer $B = (n - 1)360/365$ in n je dan v letu.

Odboji sončnega sevanja od atmosfere in oblakov predstavlja t.i. difuzno sončno sevanje. Meritve difuznega obsevanja s piranometrom vsebujejo vpliv odbojev od atmosfere, gostote

zraka v atmosferi in vpliv oblakov. Piranometer meri energijo globalnega in difuznega sevanja, zato se energija direktnega sevanja izračuna kot razlika teh dveh. Ker so meritve na razpolago za več let, uporabimo povprečje meritev skozi vsa leta za direktno I_b in difuzno I_d obsevanje za določen časovni interval. Predstavljena metoda ne upošteva refleksijskega odboja.

Za vsako celico se izračuna direktno obsevanje $I_{b,\tau}$ po (3):

$$I_{b,\tau} = I_b \frac{\cos(\theta_{e,\tau})}{\cos(\theta_{e,z})} \left[\frac{kWh}{m^2} \right], \quad (3)$$

kjer se upošteva razmerje vpadnega kota obsevanja na horizontalno površje $\theta_{e,z}$ (4) (t.j. zenitni kot) in kot obsevanja na naklon površja θ_e (5) [16]:

$$\cos(\theta_{e,z}) = \cos(\delta) \cos(\varphi_e) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\varphi_e) \quad (4)$$

$$\cos(\theta_e) = \sin(\delta) \sin(\varphi_e) \cos(\beta_e) - \quad (5)$$

$$- \sin(\delta) \cos(\varphi_e) \sin(\beta_e) \cos(\gamma_e) +$$

$$+ \cos(\delta) \cos(\varphi_e) \cos(\beta_e) \cos(\omega) +$$

$$+ \cos(\delta) \sin(\varphi_e) \sin(\beta_e) \cos(\gamma_e) \cos(\omega) +$$

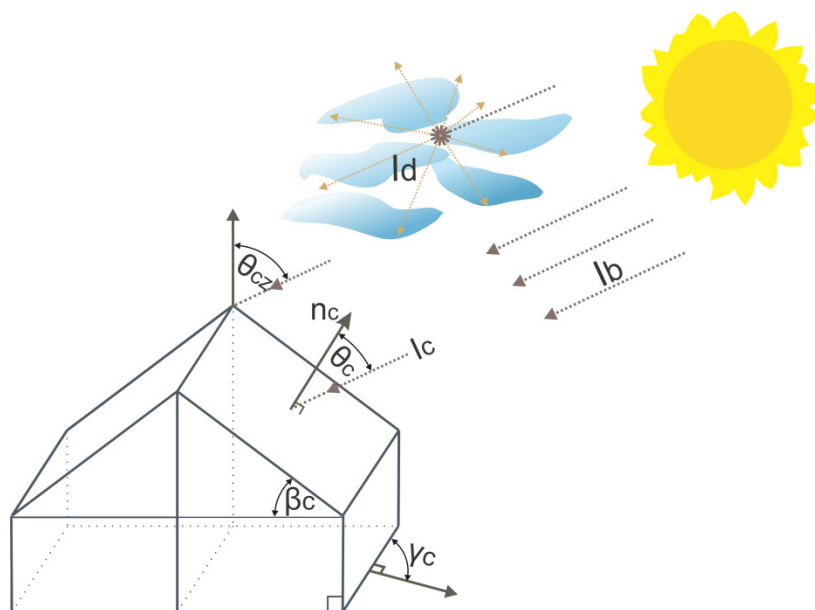
$$+ \cos(\delta) \sin(\varphi_e) \sin(\gamma_e) \sin(\omega),$$

kjer je δ kot sončne deklinacije, ki ga je definirala Cooper [10]: $\delta = 23.45^\circ \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right)$, pri čemer 23.45° predstavlja aproksimativen nagib Zemlje. φ_e je geografska širina celice. ω je urni kot relativno od 12:00 (npr. ob 11:00 je $\omega = -15^\circ$ in ob 13:00 je $\omega = +15^\circ$).

Difuzno obsevanje $I_{d,\tau}$ dane celice definiramo kot (6):

$$I_{d,\tau} = I_d \cos^2 \frac{\beta_e}{2} \left[\frac{kWh}{m^2} \right], \quad (6)$$

kjer upoštevamo kot naklona β_e , saj je difuzni odboj enak ne glede na orientacijo. Na sliki 2 so prikazani zgoraj omenjeni koti $\theta_{e,z}$, θ_e , β_e in γ_e .



Slika 2: Ilustracija izračuna sončnega obsevanja za dano celico.

Alternativa uporabe meritev za izračun sončnega odboja za dano površje je indeks jasnega dne (ang. Clear-Sky Index, CSI) [11].

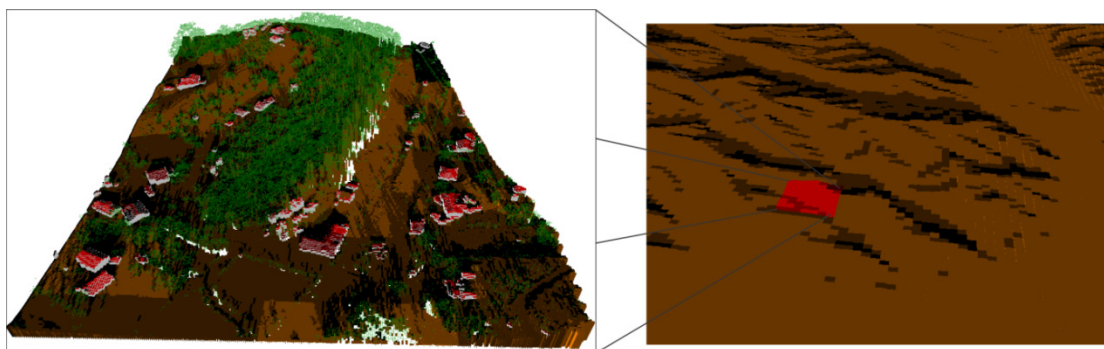
2.2 Večločljivostno senčenje

Z upoštevanjem senčenja se izračun sončnega potenciala bolj približa realnim razmeram, saj sence znižajo sončno obsevanje na dano površje. V tem delu se upoštevajo sence od stavb in površja. Senčenje izvedemo nad mrežo celic za dani časovni trenutek. Pri tem je potrebna pozicija Sonca, ki jo dobimo z algoritmom SPA (Sun Positional Algorithm) [10]. Kriterij, ki določa, če dano celico na poziciji $\mathbf{b} = [b_x, b_y, b_z]$ senči celica na poziciji $\mathbf{a} = [a_x, a_y, a_z]$, je definiran z (7):

$$b_y < a_y - \left(\sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_z - b_z)^2} \right) \frac{c_y}{\sqrt{c_x^2 + c_z^2}}, \quad (7)$$

kjer je $\mathbf{c} = [c_x, c_y, c_z]$ smerni vektor sončnega sevanja.

Predstavljena metoda uporablja podatke v več različnih ločljivostih, kjer se za vsako ločljivost generira mreža. Strehe stavb so predstavljene v najvišji ločljivosti, medtem ko je okoliško hribovje zapisano z veliko nižjo ločljivostjo. Pri večločljivostnem pristopu opravimo senčenje za vsako mrežo različne ločljivosti od najnižje proti najvišji, kot je prikazano na sliki 3. Vsaka celica dobi za dani časovni trenutek vrednost $\mathbf{s}_e = [0 \mid 1]$, kjer $\mathbf{s}_e = 0$ pomeni, da celica ni senčena in $\mathbf{s}_e = 1$, da je. V primeru, da je celica višje ločljivosti X_1 vsebovana znotraj celice X_2 nižje ločljivosti, in $X_2=1$, potem $X_1=1$.



Slika 3: Primer večločljivostnega senčenja, kjer okoliško površje (mreža nižje ločljivosti) senči določeno lokalno področje (v višji ločljivosti).

2.3 Izračun sončnega potenciala

Globalno trenutno obsevanje I_g za dano celico je definirano z (8):

$$I_g = I_{g_d} * (1 - S_c) + I_{g_d} \left[\frac{kW}{m^2} \right], \quad (8)$$

Senčene celice so izpostavljene samo difuznemu sevanju. Kumulativno sončno obsevanje določa, koliko sončnega obsevanja je dana lokacija prejela za določen časovni interval. Dnevno kumulativno sončno obsevanje se izračuna kot integral trenutnih obsevanj med sončnim vzhodom (sv) in zahodom (sz) z določenim časovnim korakom (9):

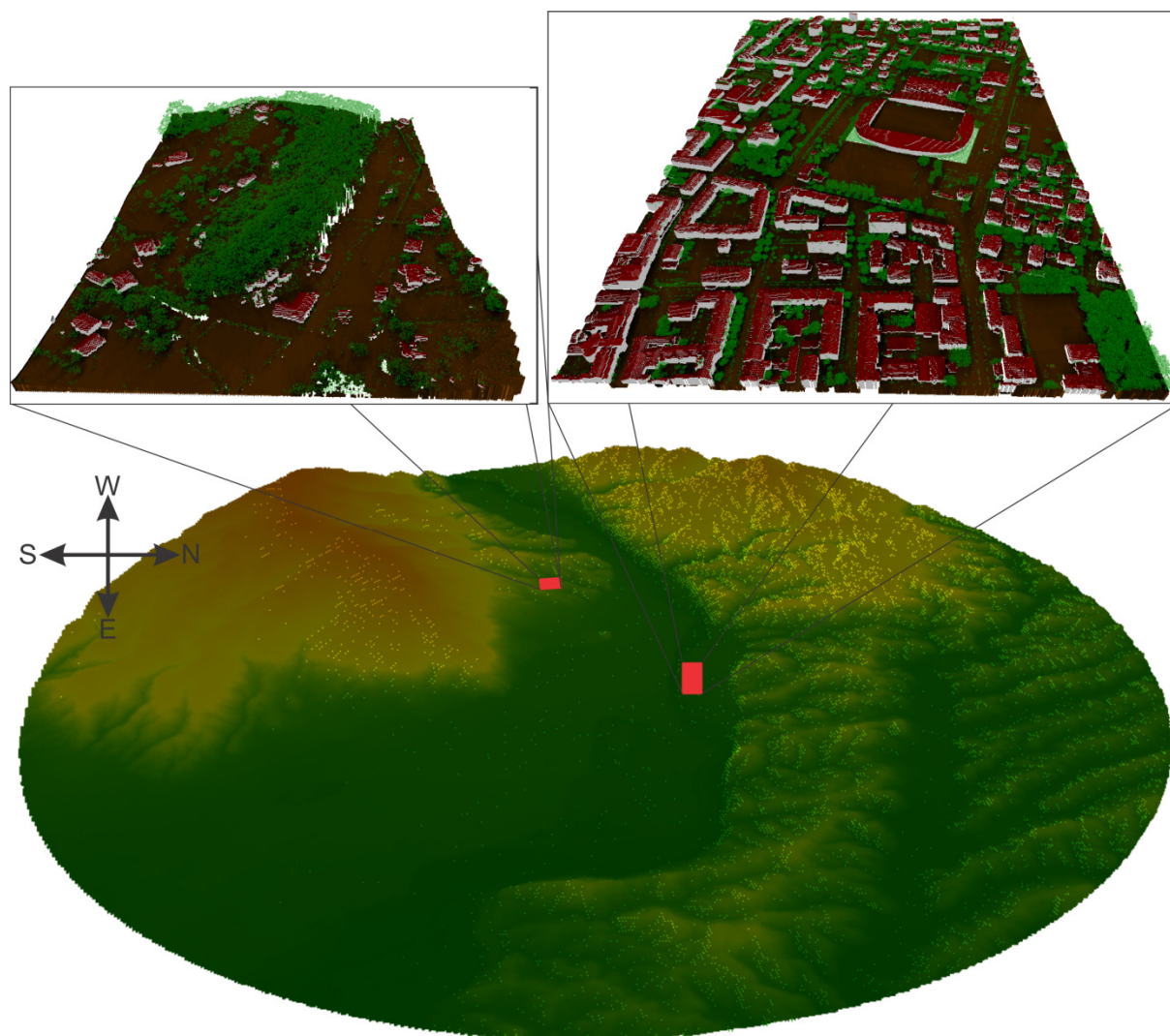
$$I_g = \int_{\omega_{sv}}^{\omega_{sz}} I_g(t) dt \left[\frac{kWh}{m^2} \right] \quad (9)$$

Sončni potencial nato za vsako celico določimo kot povprečno dnevno obsevanje v enem letu (10):

$$P_g = \frac{1}{365} \sum_{i=0}^{365} I_{g_i} \left[\frac{kWh}{m^2} \right] \quad (10)$$

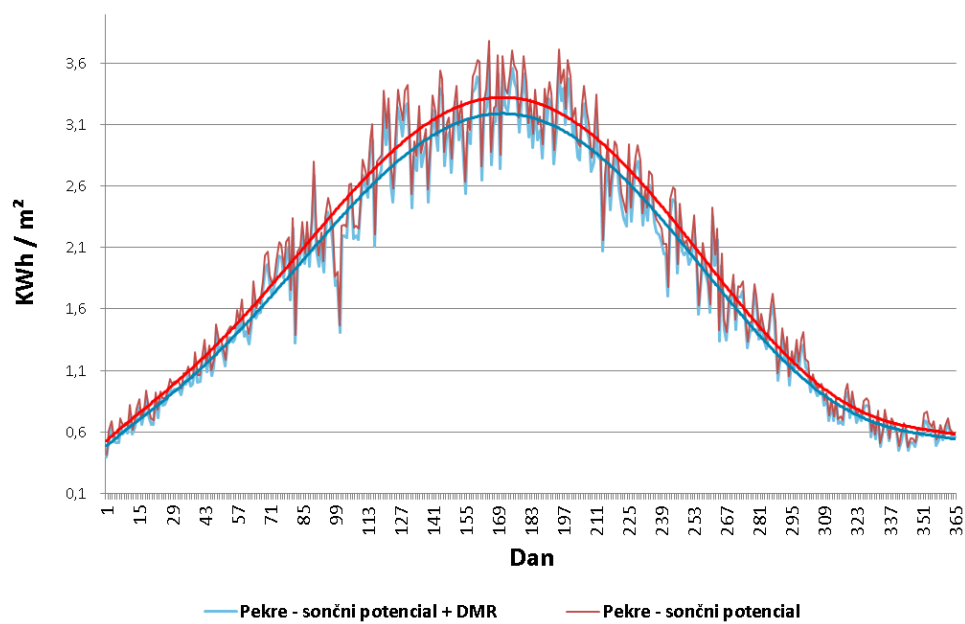
3. REZULTATI

Predstavljena metoda je bila preiskušena na dveh različnih testnih podatkih: del kraja Pekre (46.55° N, 15.5956° E) in del mesta Maribor (46.33° N, 15.39° E). Podatki obeh lokacij so hranjeni v mreži ločljivosti $1m^2$ na celico. Uporabljena je bila tudi mreža z nižjo ločljivostjo ($625m^2$ na celico) in sicer kot DMR okolice obeh lokacij, kot kaže slika 4.

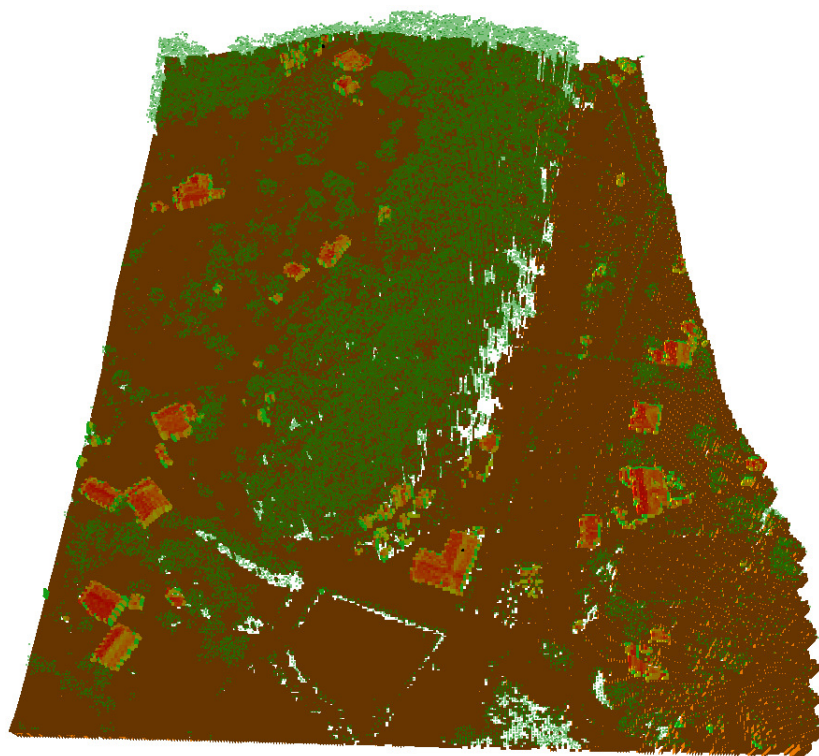


Slika 4: Testni lokaciji (del kraja Pekre in mesta Maribor) in njuno nahajanje znotraj DMR.

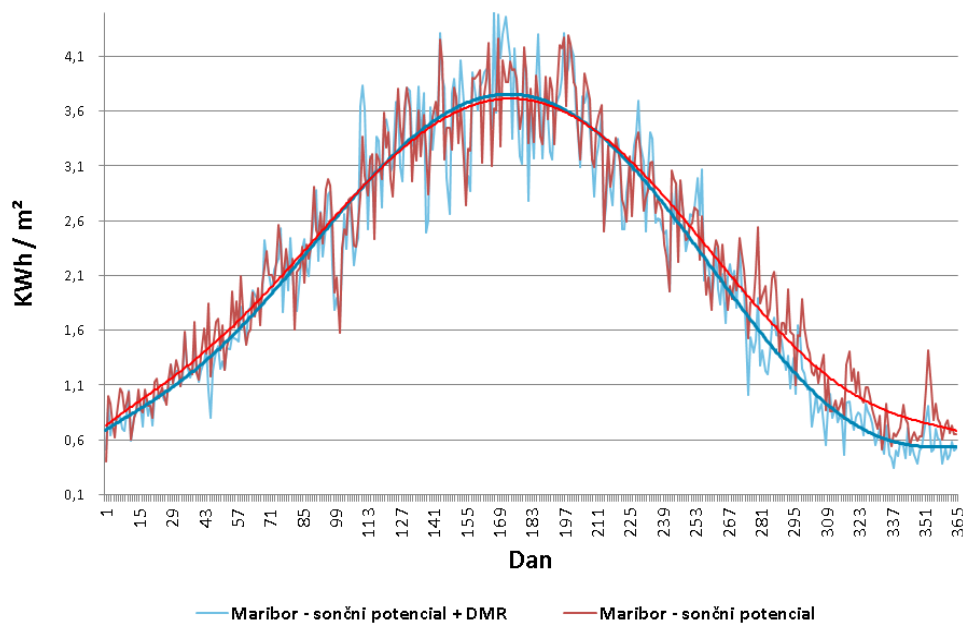
Meritve sončnega obsevanja so bile pridobljene s piranometrom za zadnje desetletje (2001-2011) v bližini obeh testiranih območij. Nato so se meritve povprečile za vsak dan v letu s časovnim korakom ene ure. Pri tem se je izračunal sončni potencial za obe lokaciji z in brez uporabe večločljivostnega pristopa k senčenju prikazano na sliki 5.



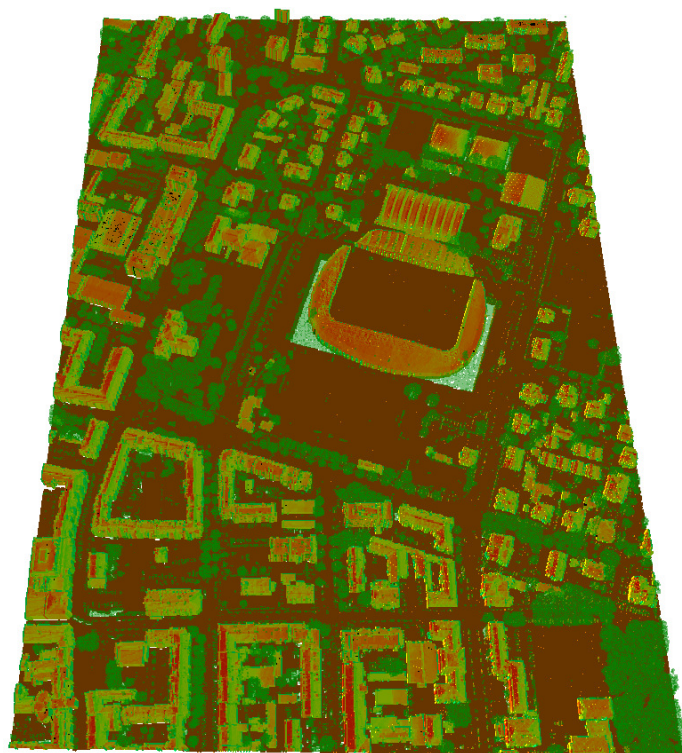
a)



b)



c)



d)

Slika 5: a) in c) Izračunan povprečni sončni potencial vseh celic za a) Pekre ali c) Maribor, z DMR in brez večločljivostnega senčenja; b) in d) vizualizacija sončnega potenciala streh obeh testiranih lokacij.

Iz izračunanega sončnega potenciala z in brez upoštevanja večločljivostnega senčenja je možno ugotoviti, da okoliško hribovje nima velikega vpliva na obe testirani lokaciji. V Mariboru je vpliv še nekoliko manjši kot za Pekre, saj je mesto bolj oddaljeno od Pohorja, ki prispeva k večjemu senčenju v času zime.

4. ZAKLJUČEK

Predstavljena metoda omogoča izračun sončnega potenciala streh iz podatkov LiDAR. Pri tem se upoštevajo meritve sončnega obsevanja iz piranometra na dani lokaciji, kar pripomore k natančnejši oceni sončnega potenciala. Predstavljen je večločljivostni pristop za senčenje stavb in površja, ki dodatno pripomore k približevanju izračuna realnim razmeram. Eksperimenti predstavijo vpliv senčenja okoliškega površja nad dvema različnima lokacijama.

ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo podjetju GEOIN d.o.o. (Maribor, Slovenija) za podatke LiDAR. Zahvala ARSO (Agenciji Republike Slovenije za Okolje) za podatke sončnega obsevanja. Zahvaljujemo se tudi Agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, da je članek del raziskav v okviru projektov P2-0041, L2-3650, L2-2060, in L2-4114.

5. VIRI

- [1] Hetrick W. A., Rich P. M., Barnes F. J., Weiss S. B., GIS-based solar radiation flux models. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, GIS Photogrammetry and Modeling, vol. 3, str. 132-143, 1993.
- [2] Šúri M., Hofierka J., A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. Transactions in GIS, vol.8, no. 2, str. 175-190, 2004.
- [3] Bergamasco L., Asinari P., Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy). Solar Energy, vol. 85, no. 11, str. 2741-2756, 2011.
- [4] Voegtli T., Steinle E., Tóvári D., Airborne Laserscanning Data for Determination of Suitable Areas for Photovoltaics, In: Proc. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 36, Enschede, Netherlands, str. 215-220, 2005.
- [5] Kassner R., Koppe W., Schüttenberg T., Bareth G., Analysis of the solar potential of roofs by using official lidar data, In: Proc. of International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 37, Beijing, China, str. 399-403, 2008.
- [6] Jochem A., Höfle B., Rutzinger M., Pfeifer N., Automatic Roof Plane Detection and Analysis in Airborne Lidar, Sensors, vol. 9, no. 7, str. 5241-5262, 2009.

- [7] Lukač N., Žlaus D., Trstenjak N., Žalik B., Izračun sončnega potenciala objektov iz podatkov Lidar, 20. Mednarodno posvetovanje Komunalna energetika, Maribor, Slovenia, str. 1-11, 2011.
- [8] Duffie J. A., Beckman W. A., Solar Engineering of Thermal Processes (3rd ed.), New York: Wiley-Interscience, 2006.
- [9] Spencer J. W., Fourier Series Representation of the Position of the Sun, Search, vol. 2, no. 5, str. 172, 1971.
- [10] Cooper P. L., The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills. Solar Energy, vol. 12, no. 3, str. 333-346, 1969.
- [11] Batlles F. J., Rubio M. A., Tovar J., Olmo F. J., Alados-Arboledas L., Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance, Energy, vol. 25, no. 7, str. 675-688, 2000.
- [12] Ibrahim R., Afshin A., Solar position algorithm for solar radiation applications, Solar energy, vol. 76, no. 5, str. 577-589, 2004.

NASLOVI AVTORJEV

Niko Lukač (niko.lukac@uni-mb.si) dipl. inž. rač. in inf. tehnol. (UN) ^{1,a}

Danijel Žlaus (danijel.zlaus@uni-mb.si), dipl. inž. rač. in inf. tehnol. (UN) ^{1,a}

asist. dr. Sebastijan Seme (sebastijan.seme@uni-mb.si), univ. dipl. inž. elektrot. ²

red. prof. dr. Borut Žalik (zalik@uni-mb.si), univ. dipl. inž. elektrot. ^{1,a}

red. prof. dr. Gorazd Štumberger (gorazd.stumberger@uni-mb.si), univ. dipl. inž. elektrot. ^{1,b}

¹ Univerza v Mariboru,

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko,

Smetanova ulica 17,

SI-2000 Maribor, Slovenija.

^a Laboratorij za geometrijsko modeliranje in algoritme multimedijev

^b Laboratorij za energetiko

² Univerza v Mariboru,

Fakulteta za energetiko,

Koroška cesta 62e,

SI-3320 Velenje, Slovenija.