

## **OCENA SOLARNEGA POTENCIALA OBČINE SLOVENSKA BISTRICA**

### **Špela Arzenšek**

Magistrica geografije in filozofije  
Zgornje Selce 18, SI - 3232 Ponikva, Slovenija  
e-mail: arzensekspela@gmail.com

### **Danijel Davidovič**

Magister geografije in filozofije, ast.  
Oddelek za geografijo  
Filozofska fakulteta  
Univerza v Mariboru  
Koroška cesta 160, SI – 2000 Maribor, Slovenija  
e-mail: danijel.davidovic@um.si

### **Danijel Ivajnsič**

Dr., prof. geografije in biologije, doc.  
Oddelek za geografijo in Oddelek za biologijo  
Filozofska fakulteta in Fakulteta za naravoslovje in matematiko  
Univerza v Mariboru  
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija  
e-mail: dani.ivajnsic@um.si

UDK: 620.92:728:911.2  
COBISS: 1.01

### ***Izvleček***

#### **Ocena solarnega potenciala občine Slovenska Bistrica**

V prispevku obravnavamo metodo računanja solarnega potenciala za pridobivanje električne energije z lidar podatki na primeru občine Slovenska Bistrica. Sprava je izračunana količina in trajanje globalnega sončnega obsevanja z modeloma Uniform Sky in Standard Sky za potencialne površine na strehah zgradb, ki so identificirane z natančnim digitalnim modelom površja in katastrom stavb. Z digitalnim modelom površja so ugotovljene tudi značilnosti streh, ki vplivajo na izkoriščanje solarnega potenciala, kot so površine, nakloni in ekspozicije. Nato je ocenjen solarni potencial celotne občine na podlagi dejanskih podatkov treh izbranih solarnih elektrarn. Na koncu so z ANOVA preizkusom preverjene razlike med dejanskim in ocenjenim izkoristkom. Tovrstni pristop je uporaben za načrtovanje energetske samooskrbe posameznih gospodinjstev, lokalnih skupnosti, podjetij in občin, s čimer se lahko krepí energetska varnost in zmanjša vpliv podnebnih sprememb.

#### ***Ključne besede***

Lidar, obnovljivi viri energije, solarne elektrarne, sončna energija

### ***Abstract***

#### **Solar energy potential assessment in the Slovenska Bistrica municipality**

The research demonstrates the methodological implementation of lidar data for assessment of solar energy potential for electricity generation in the case of municipality Slovenska Bistrica. First, Uniform Sky and Standard Sky models were used to calculate quantity and duration of global solar radiation on potential areas on building roofs, which were identified with an accurate digital surface model and building cadastre. The digital surface model was also used to determine the characteristics of roofs that influence the utilisation of solar potential, such as total available area, slope and aspect. Further, the solar potential of the entire municipality was estimated based on the actual data of three selected solar power plants. Finally, the ANOVA test was

performed to verify the differences between actual and calculated values. This approach is useful for planning the energy self-sufficiency of individual households, local communities, businesses and municipalities, which can strengthen energy security and thus reduce the impact of climate change.

**Keywords**

Lidar, renewable energy resources, solar energy, solar power plants

## 1. Uvod

Energija je ključna za proizvodnjo, transport, komunikacije in gospodinjstva, zato predstavlja enega najpomembnejših dejavnikov gospodarskega in družbenega razvoja. Energija se lahko pridobiva iz lokalnih obnovljivih virov, kot so Sonce, voda, veter in biomasa, vendar v globalnem merilu še vedno približno 84% energije pridobivamo iz fosilnih goriv, kot so nafta, premog in zemeljski plin (Ritchie 2020). Ker so viri fosilnih goriv skoncentrirani le v posameznih regijah sveta, predstavljajo večji uvozni strošek, hkrati njihova obsežna uporaba povzroča velike okoljske težave s segrevanjem ozračja, z onesnaževanjem zraka, vode in tal ter ogrožanjem živalskih in rastlinskih vrst.

V Sloveniji so največji porabniki energije promet (39%), industrija in gradbeništvo (29%) ter gospodinjstva (21%) (Medmrežje 20). Energetska mešanica (ang. energy mix) pomeni razmerje oziroma deleže posameznih primarnih virov energije, ki so uporabljeni za nadaljnjo pretvorbo in končno porabo. V Sloveniji je leta 2019 energetska mešanica sestavljena iz energije naftnih proizvodov (33%), nuklearne energije (22%), trdih goriv (16%), zemeljskega plina (11%), obnovljivih virov in odpadkov (11%), hidroenergije (6%) ter geotermalne in solarna energije (1%) (Medmrežje 20). Velik del porabljene energije je odvisne od uvoza (48,7%) (Medmrežje 21). Glede na domačo proizvodnjo je energetska mešanica sestavljena iz nuklearne energije (43%), trdih goriv (25%), obnovljivih virov in odpadkov (18%), hidroenergije (11%) ter geotermalne in solarne energije (3%) (Medmrežje 20). Pomembna oblika energije, ki je proizvedena iz primarnih virov, je električna energija. Električna mešanica (ang. electricity mix, power generation mix) pomeni razmerje oziroma deleže primarnih virov energije, ki so uporabljeni za proizvodnjo električne energije. V Sloveniji je leta 2019 električna mešanica sestavljena iz nuklearne energije (36%), energije termoelektrarn (33%), hidroenergije (29%) in solarne energije (2%) (Medmrežje 22).

Zaradi zagotavljanja večje energetske varnosti, neodvisnosti od uvoza in preprečevanja okoljskih težav, ki so posledica pretežne uporabe fosilnih goriv, se krepi pomen obnovljivih virov energije. V Energetskem zakonu so obnovljivi viri energije definirani kot "obnovljivi nefosilni viri energije (veter, sonce, aerotermalna, hidrotermalna in geotermalna energija, energija oceanov, vodna energija, biomasa, plin, pridobljen iz odpadkov, plin iz naprav za čiščenje odplak in bioplin)" (Medmrežje 8). Njihova prednost je trajnost oziroma neprestano obnavljanje in enakomerna prostorska distribucija oziroma dostopnost brez geopolitičnih ovir. Tako je za Slovenijo značilen majhen potencial za izkoriščanje vetra, vendar večji za izkoriščanje solarne, vodne in geotermalne energije ter energije biomase (Medved in Novak 2000, 34), ki je glede na omenjene statistične podatke v veliki meri še neizkoriščen. V Sloveniji je leta 2019 delež energije iz obnovljivih virov v bruto končni porabi energije znašal 21,15% (Medmrežje 21), kar vključuje les in drugo trdo biomaso (70%), biodizel (13%), geotermalno energijo in toploto iz okolice (7%), industrijske odpadke (7%), solarno termično energijo (1%), biobencin (1%) ter plin iz čistilnih naprav, deponijski plin in drugi bioplini (1%) (Medmrežje 23). Poleg energetske varnosti, neodvisnosti od uvoza in okoljske primernosti raba obnovljivih virov energije omogoča ustvarjanje novih delovnih mest ter prispeva h krepitvi enakomernega prostorskega razvoja (Kolednik 2009, 55).

Med različnimi oblikami obnovljivih virov energije se spodbuja predvsem solarna energija, ki nastaja pri procesu fuzije v Soncu in se prenaša do Zemlje v obliki

elektromagnetne radiacije. Tako Zemlja od Sonca prejme okoli  $4 \times 10^{24}$  J energije letno, kar je 7500-krat več energije, kot je porabljene v enem letu na globalni ravni (Papler 2012, 72). Poleg neposredne radiacije je pomembna tudi pretvorjena solarna energija v obliki termalne (toplota), kinetične (veter) in potencialne (topla voda) energije (Medved in Novak 2000, 31).

Poleg omenjenih naravni pretvorb se solarna energija lahko pretvarja v toploto, svetlobo, električno energijo in mehansko delo na pasiven način z uporabo različnih konstrukcij, kot so okna, sončne stene in rastlinjaki ali na aktiven način z uporabo naprav, kot so solarni kolektorji in solarne celice. Slednje se uporabljajo za pretvorbo elektromagnetne radiacije Sonca v električno energijo s polprevodniškimi napravami, pretežno izdelanimi iz silicija. Ko silicijevi atomi v solarnih celicah absorbirajo energijo Sonca, se sproži usmerjeno gibanje elektronov v obliki električnega toka (t. i. fotovoltaični efekt). Nato razsmernik pretvori DC (enosmerni električni tok, ang. direct current) v AC (izmenični električni tok, ang. alternating current) za nadaljnjo uporabo. Kljub nizkemu izkoristku oziroma slabi pretvorbi solarne energije v električno ( $\approx 20\%$ ) so uporabne predvsem za oskrbo manjših naprav in objektov na neelektificiranih območjih. Z razvojem tehnologije se njihov izkoristek večja in cene nižajo, zato se večja uporaba tudi v proizvodnih obratih in naseljih, v katerih so za pridobivanje električne energije primerne predvsem strehe (Medved in Novak 2000, 32–33; Pristovnik in sod. 2012, 111).

Zaradi geografske širine, ki določa večji vpadni kot solarne radiacije in dolžino dneva, ter reliefa, ki obsega naklone in ekspozicije, je za Slovenijo značilen velik solarni potencial, s katerim se lahko zagotovi zadovoljevanje vseh potreb po energiji (Dolar 2016, 7, 48). Solarni potencial Slovenije znaša  $1.242 \text{ kWh/m}^2$ . Poleg tega je enakomerno razporejen, saj je na letni ravni razlika med bolj in manj osončenimi pokrajinami samo 15% (Pristovnik in sod. 2012, 111), prav tako se povprečne vrednosti sončnega obsevanja v Sloveniji večajo (Medmrežje 17). Leta 2019 je solarni potencial v Sloveniji izkoriščalo 8.038 sončnih elektrarn (233% povečanje glede na leto 2018), ki so proizvedle 268 GWh električne energije (2,3% vse energije brez hrvaškega deleža električne energije iz NEK). Z izgradnjo solarni elektrarn se ukvarja med 10 in 20 podjetij, ki zaposlujejo med 200 in 300 delavcev. Največja instalirana moč sončnih elektrarn je v podravski in koroški (82,1 MW), najmanj pa v obalno-kraški (19 MW) statistični regiji (Medmrežje 17).

Pri identifikaciji lokacij in njihovega potenciala za izkoriščanje solarne energije, ki so v Sloveniji pretežno neizkoriščene, so še kako uporabne raziskave z geografskimi informacijskimi sistemi. Tako v prispevku ugotavljamo naslednje: (1) kje so locirane obstoječe solarne elektrarne in kje so potencialne površine za namestitev solarnih panelov, (2) kakšna je količina in trajanje globalnega sončnega obsevanja na potencialnih površinah, (3) kakšne so razlike med izračunanimi vrednostmi in dejanskimi vrednostmi treh obstoječih solarnih elektrarn ter (4) kakšen je skupni solarni potencial občine?

## 2. Območje raziskave

Občina Slovenska Bistrica se nahaja v severovzhodni Sloveniji v Podravski statistični regiji. S površino  $260 \text{ km}^2$  spada med največje slovenske občine. Občina vključuje 79 naselij, v katerih v letu 2020 živi 25.890 prebivalcev (Medmrežje 24). Najpomembnejši dejavnik izkoriščanja solarne energije je količina sončne energije oziroma obsevanja. V občini Slovenska Bistrica povprečno letno obsevanje znaša

1.269 kWh/m<sup>2</sup>, kar predstavlja potencial letne proizvodnje električne energije 444 kWh/m<sup>2</sup>. Glede na celotno površino je teoretični potencial letne proizvodnje energije približno 115.440 GWh. Ob upoštevanju neprimernih površin je teoretični potencial občine manj kot 50 GWh, kar pomeni relativno ugoden izkoristek (Pristovnik in sod. 2012, 112–113). Na regionalni ravni je pomemben dejavnik relief z nakloni in ekspozicijami površja. Nadmorske višine znašajo med 240–1515 m (povprečno 608 m) in nakloni med 0–46° (povprečno 9°). Najobsežnejše kategorije ekspozicij v občini so JV (16,8%), J (15,3%), V (15%), SV (14%) in JZ (12,2%). Vpliv reliefa se lahko prilagodi z različnimi konstrukcijami, ki s primernim naklonom in ekspozicijo solarnih panelov lahko zagotovijo največji možni izkoristek.

Poleg reliefa je raba tal pomemben dejavnik izkoriščanja solarne energije, pri tem gozd, travniki, sadovnjaki, vinogradi in ostali trajni nasadi, zaraščene površine, njive in vrtovi ter vode in mokrotne površine predstavljajo neprimerna območja, med primernejšimi pa so pozidane površine. Tako neprimerna območja obsegajo 93,6% (244,2 km<sup>2</sup>), potencialno primerna pa 6,4% (16,7 km<sup>2</sup>) površin občine. Pozidane površine se nahajajo predvsem na ravnini ob avtocesti Ljubljana – Maribor. Poleg primernega naklona, ekspozicije in rabe tal, so pozidane površine primerne zaradi gostejše poselitve in koncentracije možnih uporabnikov, kot so gospodinjstva, predelovalna industrija in ponudniki storitev. Predvsem zgradbe večjih podjetij, za katere so navadno značilne večje površine streh, predstavljajo možnost za izkoristek solarnega potenciala. Solarni paneli na zgradbah podjetij lahko pomenijo tudi prednost za podjetja zaradi cenejše električne energije in zanesljive oskrbe z obnovljivo energijo. V občini je vzpostavljena obrtna cona, v prihodnje pa je predvidena njena širitev ob izvozu z avtoceste (Občina Slovenska Bistrica, b. d.), kar pomeni nove primerne površine za montažo solarnih panelov. Postavitev sončnih elektrarn je po oceni strokovnjakov enostavna, hitra in brez večjih posegov (Pristovnik in sod. 2012, 115).

### 3. Metodologija

#### 3.1. Identifikacija obstoječih in potencialnih površin

Glavni namen raziskave je ocena solarnega potenciala občine Slovenska Bistrica. Sprva so s pomočjo aplikacije Google Earth identificirane obstoječe solarne elektrarne v občini. Nato je z lidar podatki izdelan natančen model površja z resolucijo 1 m<sup>2</sup>, na podlagi katerega so identificirane potencialne površine za postavitve solarnih elektrarn ter izračunane njihove površine, nakloni in ekspozicije. Priporočljivo je, da ima streha vsaj med 30–35 m<sup>2</sup> uporabne površine z naklonom med 20–40° in usmeritvijo proti J, JV ali JZ (Jacobson in Jadhav 2018; Medmrežje 2). Lidar podatki so prosto dostopni na spletni strani Agencije RS za okolje (Medmrežje 1) po posameznih listih s površino 1 km<sup>2</sup> (skupno 260 listov) kot georeferencirani in klasificirani oblak točk (GKOT). Točke so klasificirane v kategorije tla, stavbe ter nizka, srednja in visoka vegetacija (Medmrežje 9). Podatki so shranjeni v stisnjeni obliki ZLAS. Z orodjem LAS Optimizer 1.2 (Medmrežje 12) smo jih razširili in nato v nadaljevanju obdelali s programsko opremo ESRI ArcGIS 10.6 (Medmrežje 3).

#### 3.2. Globalno sončno obsevanje

S pomočjo izdelanega digitalnega modela površja, katastra stavb (Medmrežje 11) in orodij Solar Radiation v programskem okolju ArcGIS smo v nadaljevanju izračunali globalno sončno obsevanje na potencialnih površinah oziroma strehah obstoječih objektov po modelih za difuzno komponento sevanja Standard Sky in Uniform Sky. Pri Standard Sky modelu se difuzni pretok sevanja razlikuje glede na zenitni kot, kar

pomeni, da je jakost sevanja močnejša v zgornji kulminaciji kot v bližini obzorja, pri Uniform Sky modelu pa razlik glede na zenitni kot ni, saj model temelji na predpostavki, da je vpadno sevanje razpršeno iz vseh smeri neba enakomerno (Thompson, Donn in Osborne 2011, 1833). S t-preizkusom smo ugotavljali ali je modelna vrednost globalnega sončnega obsevanja ob upoštevanju bodisi Uniform ali Standard Sky difuzne komponente primerljiva.

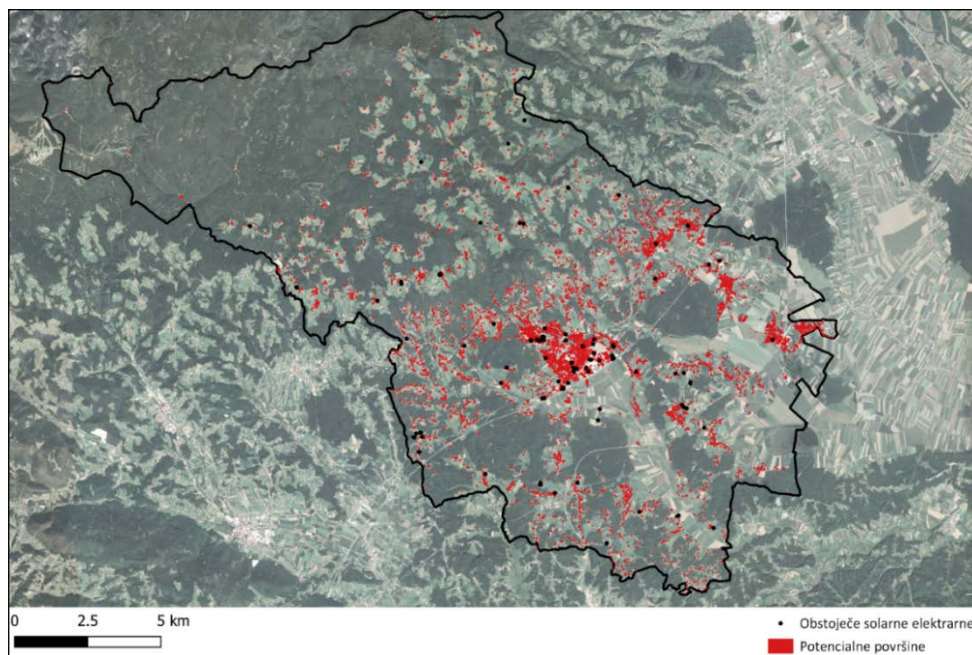
### 3.3. Primerjava modelnih napovedi in dejanskega izkoristka solarne energije

Na koncu je na podlagi podatkov dejanskega izkoristka solarne energije izbranih treh solarnih elektrarn v Slovenski Bistrici (MFE Sursum 1, MFE Sursum 4 in MFE Dušej) v letih 2017 in 2018 izračunan solarni potencial zgradb v celotni občini. Potencialne razlike med dejanskim in ocenjenim izkoristkom po modelih Standard Sky in Uniform Sky preverjamo z analizo variance (ANOVA) v okolju MS Excela (Medmrežje 13).

## 4. Rezultati

### 4.1. Identifikacija obstoječih in potencialnih površin

V občini Slovenska Bistrica smo v letu 2018 s pomočjo satelitskih podob v orodju Google Earth identificirali 111 solarnih elektrarn, ki so pretežno koncentrirane v naselju Slovenska Bistrica in nekaterih drugih naseljih. Večina solarnih elektrarn se nahaja na strehah stanovanjskih objektov, gospodarskih poslopij in večjih podjetij, nekatere pa so postavljene tudi na namensko izdelanih konstrukcijah, podobnim kozolcem ali nadstreškom. Poleg identificiranih so z lidar podatki ugotovljene tudi potencialne površine, ki so prostorsko neenakomerno porazdeljene. Njihova največja gostota je v naseljih Slovenska Bistrica, Zgornja Polskava in Pragersko (Slika 1).



Slika 1: Lokacije obstoječih solarnih elektrarn in potencialnih površin za postavitev novih v občini Slovenska Bistrica.

Vir podlage: Google Satellite 2016.

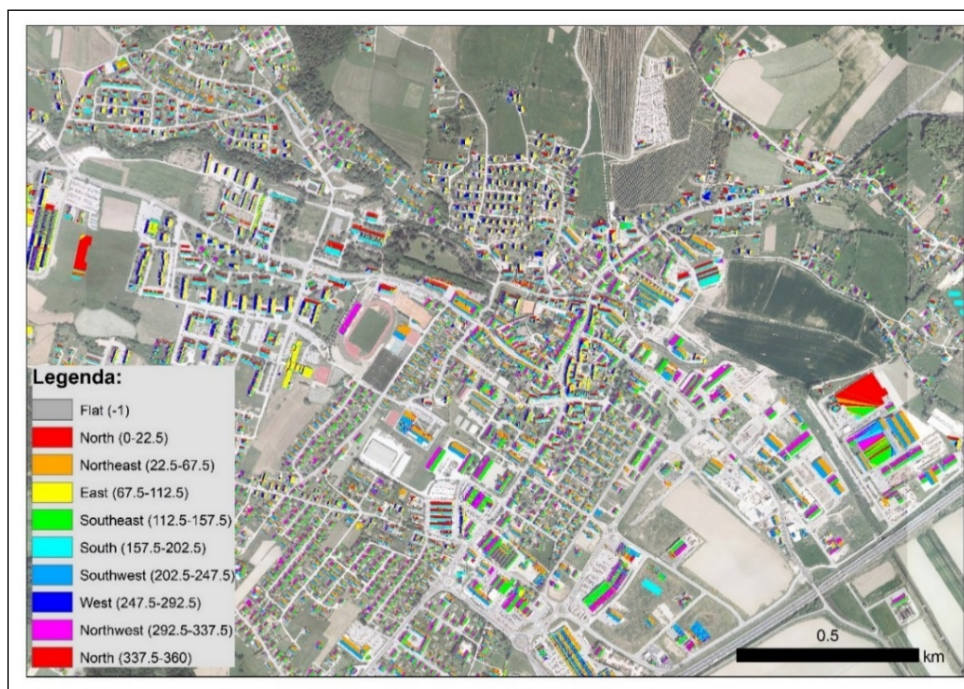
Naklon je eden izmed dejavnikov, ki pomembno vpliva na izkoriščanje potenciala sončne energije, pri tem je najprimernejši naklon strehe med 20–40°. V obravnavani občini je primeren naklon značilen za vse strehe stanovanjskih objektov zaradi splošnih gradbenih pravil (rdeča, rumena barva). Izjeme so pogosto večje stavbe, pri katerih je naklon streh manjši od 20° (zelena barva) (Slika 2).



Slika 2: Nakloni streh objektov v naselju Slovenska Bistrica.

Vir podlage: GURS 2019.

Poleg naklona streh je pomembna tudi njihova ekspozicija oziroma usmerjenost glede na smer neba, pri tem je najprimernejša usmeritev strehe proti J oziroma v smeri vzhod–zahod. V izbrani občini je najpogostejša usmeritev streh S in J (rdeča, turkizna barva), pogosto tudi V in Z (rumena, temno modra barva), SZ in JV (vijolična, zelena barva) ter SV in JZ (oranžna, modra barva) (Slika 3). Kljub manj primernim obstoječim značilnostim omenjenih streh so te lahko primerne za postavitve solarnih elektrarn, saj se nakloni in ekspozicije lahko prilagodijo z dodatnimi konstrukcijami, ki lahko zagotovijo primerne pogoje za proizvodnjo večje količine električne energije.



Slika 3: Ekspozicije streh objektov v naselju Slovenska Bistrica

Vir podlage: GURS 2019.

#### 4.2. Globalno sončno obsevanje

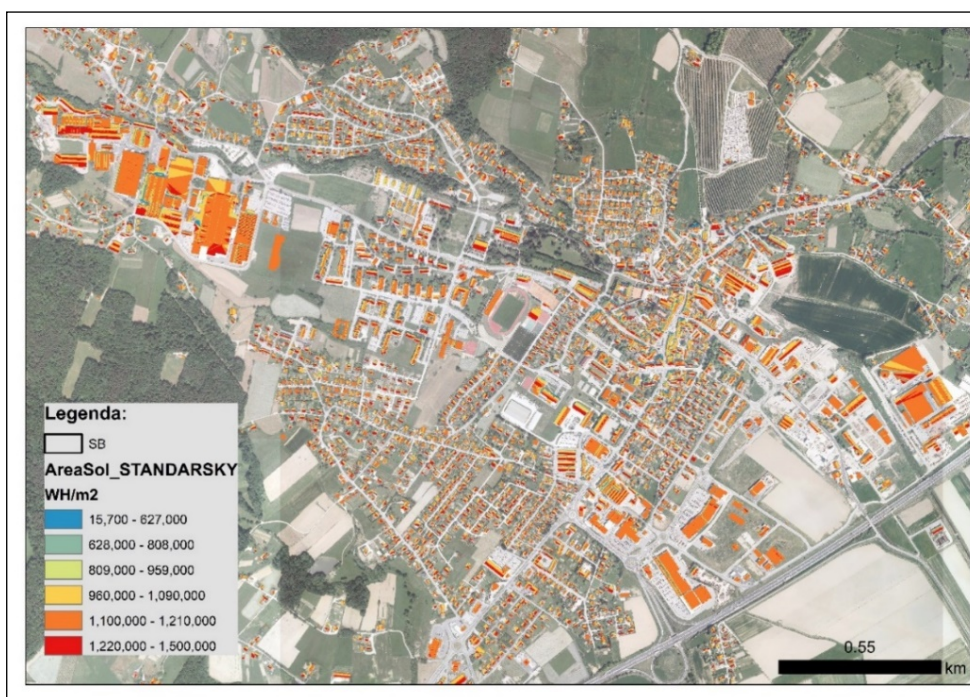
Glede na globalno sončno obsevanje je za občino Slovenska Bistrica značilen dober potencial. Količina globalnega sončnega obsevanja po modelu Standard Sky znaša med 960.000–1.500.000 Wh/m<sup>2</sup> na leto. Najbolj zastopan razred je med 1.100.000–1.210.000 Wh/m<sup>2</sup> (oranžna barva). Razreda nižjih vrednosti med 15.700–627.000 Wh/m<sup>2</sup> (modra barva) in med 628.000–808.000 Wh/m<sup>2</sup> (zelena barva) sta manj zastopana (Slika 4). Količina globalnega sončnega obsevanja v občini Slovenska Bistrica po modelu Uniform Sky znaša med 898.222–1.426.612 Wh/m<sup>2</sup> na leto. Najbolj zastopan razred je med 1.020.586–1.131.826 Wh/m<sup>2</sup> (oranžna barva). Razreda nižjih vrednosti med 8.302–581.188 Wh/m<sup>2</sup> (modra barva) in med 581.188–753.610 Wh/m<sup>2</sup> (zelena barva) sta podobno manj zastopana (Slika 5).

S t-testom je ugotovljeno, da med Standard Sky in Uniform Sky modelom ni statistično signifikantnih razlik v globalnem sončnem obsevanju na potencialnih površinah v občini Slovenska Bistrica. Opažena razlika med vzorcema predvidene vrednosti po modelu Uniform Sky (5371,5 kWh) in predvidene vrednosti po modelu Standard Sky (5356,7 kWh) ne dokazuje razlik v napovedi obeh modelov oziroma modela omogočata primerljivo napoved izkoristka solarnega potenciala (Preglednica 1).



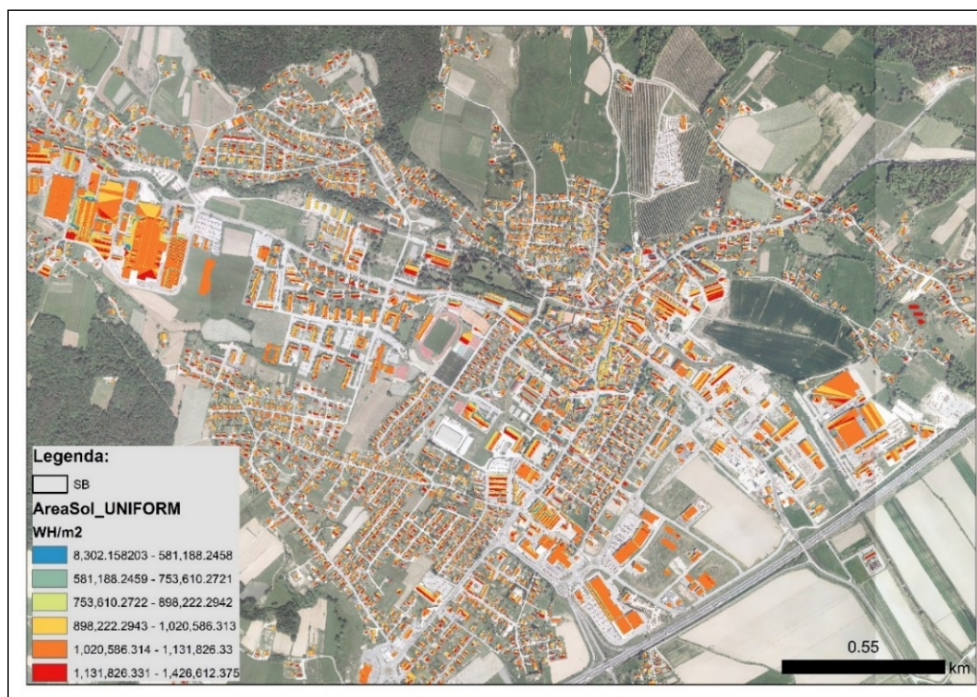
Preglednica 1: Povzetek t-testa med predvidenima vrednostima globalnega sončnega obsevanja po modelih Uniform Sky in Standard Sky.

Kazalci testne statistike	Uniform Sky model	Standard Sky model
povprečna vrednost	5371,50	5356,70
varianca	12666685,21	12485143,05
število razredov	36,00	36,00
združena varianca	12575914,13	
hipoteza (razlika povprečne vrednosti)	0,00	
df	70,00	
t	0,02	
P(T<=t) (en rep)	0,49	
t (en kritičen rep)	1,67	
P(T<=t) (dva repa)	0,99	
t (dva kritična repa)	1,99	



Slika 4: Globalno sončno obsevanje po modelu Standard Sky v naselju Slovenska Bistrica.

Vir podlage: GURS 2019.



Slika 5: Globalno sončno obsevanje po modelu Uniform Sky v naselju Slovenska Bistrica.

Vir podlage: GURS 2019.

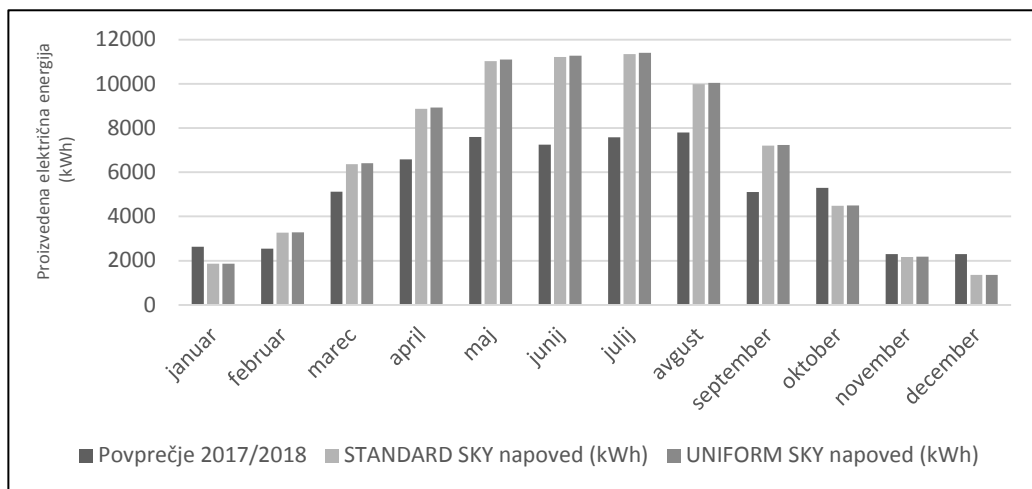
#### 4.3. Primerjava modelnih napovedi in dejanskega izkoristka

Za računanje ocene solarnega potenciala so bile izbrane tri solarne elektrarne v občini Slovenska Bistrica. Dejanska proizvodnja vseh treh izbranih elektrarn je primerjana z modelnimi izračuni na mesečni ravni, tako da je opazna razlika med dejanskimi in teoretičnimi vrednostmi ter med manj in bolj osončenim delom leta. Manj intenzivna osončenost je značilna za obdobje med novembrom in februarjem, zato je tudi proizvodnja energije manjša. Nasprotno je v obdobju med marcem in oktobrom, ko je osončenost bolj intenzivna in proizvodnja energije večja.

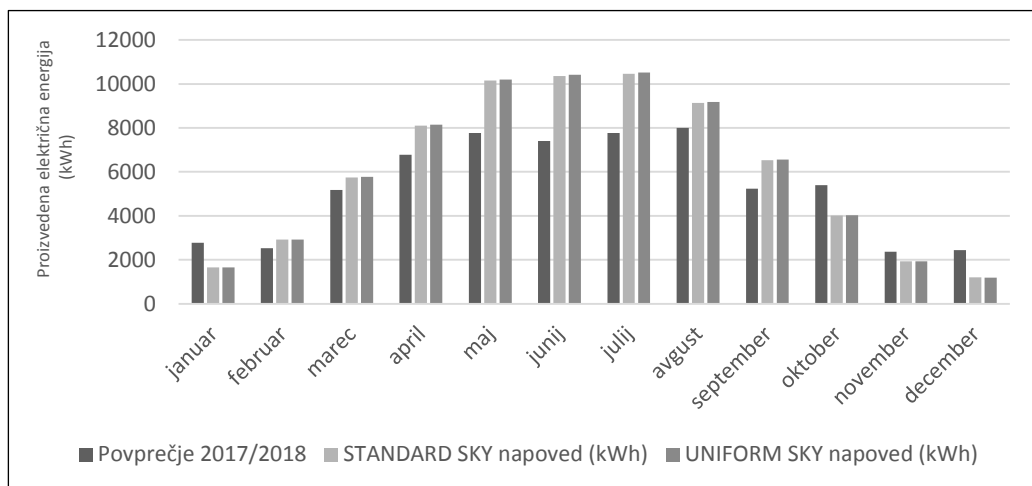
Solarna elektrarna MFE Sursum 1 se nahaja na kozolcu za podjetjem Hosekra. Streha je usmerjena proti J, zaradi česar je zagotovljen največji možni izkoristek. V letu 2017 je solarna elektrarna proizvedla 64.037 kWh, v letu 2018 pa 60.185 kWh (povprečno 62.111 kWh). Dejanska proizvodnja je večja od izračunanih vrednosti v januarju in decembru. Najboljše ujemanje dejanske in izračunanih vrednosti je značilno za november (Slika 6).

Solarna elektrarna MFE Sursum 4 se prav tako nahaja na kozolcu za podjetjem Hosekra in je usmerjena proti J. V letu 2017 je solarna elektrarna proizvedla 66.347 kWh, v letu 2018 pa 60.954 kWh (povprečno 63.651 kWh). Dejanska proizvodnja je večja od izračunanih vrednosti v januarju, oktobru, novembru in decembru. Odstopanja med dejansko vrednostjo in izračunanimi vrednostmi so najbolj izrazita v maju, juniju in juliju, najmanj pa v februarju, marcu in novembru. Najbližje ujemanje dejanske in izračunanih vrednosti je značilno za februar in november (Slika 7).

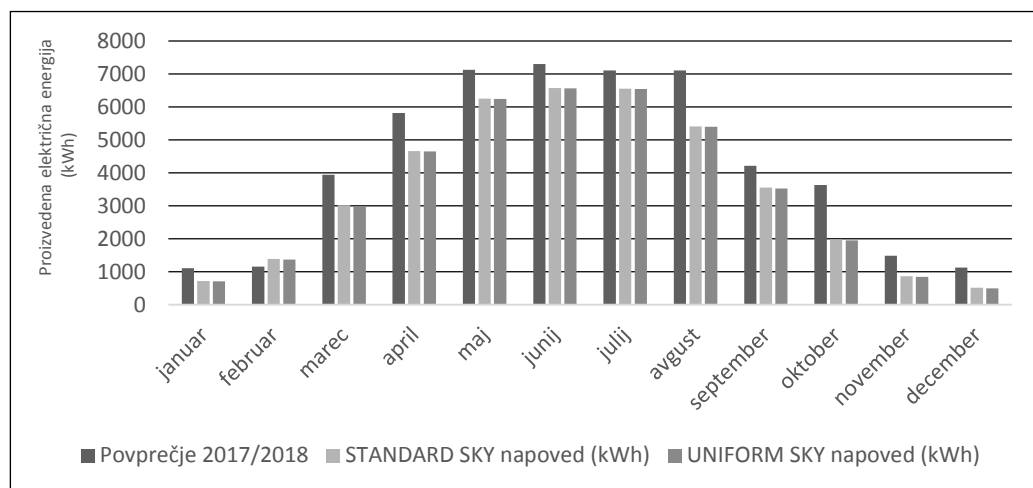
Solarna elektrarna MFE Dušej se nahaja na pomožnem objektu v Prelogah. Streha je usmerjena je proti J. V letu 2017 je solarna elektrarna proizvedla 52.569 kWh, v letu 2018 pa 49.644 kWh (povprečno 51.107 kWh). Odstopanja med dejansko vrednostjo in izračunanimi vrednostmi so najbolj izrazita v obdobju od marca do oktobra. Najbližje ujemanje dejanske in izračunanih vrednosti je značilno za obdobje od novembra do februarja. Za slednji mesec je značilno najbližje ujemanje vseh treh vrednosti, prav tako je februar edini mesec, ko modelski napovedi presegata dejansko povprečje (Slika 8).



Slika 6: Primerjava dejanske mesečne proizvodnje električne energije (kWh) ter napovedane po modelu Standard Sky in Uniform Sky za MFE Sursum 1.

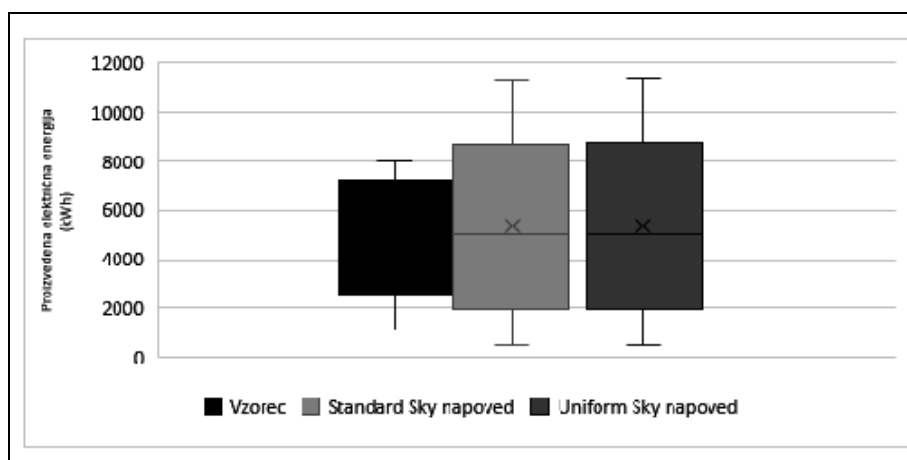


Slika 7: Primerjava dejanske mesečne proizvodnje električne energije (kWh) ter napovedane po modelu Standard Sky in Uniform Sky za MFE Sursum 4.



Slika 8: Primerjava dejanske mesečne proizvodnje električne energije (kWh) ter napovedane po modelu Standard Sky in Uniform Sky za MFE Dušej.

Med modelnima ocenama ni razlik v izkoristku solarne energije. Dejanske povprečne vrednosti proizvodnje energije so v primerjavi z izračunanimi manjše, saj izbrana modela pri izračunih ne vključujeta vpliv ovir, ki se pojavljajo v prostoru, kot so senčenje (drevesa, zgradbe) in vreme (oblačnost). Poleg ovir v prostoru na proizvodnjo vplivajo tudi možne tehnične napake, ki jih modelski izračuni ne upoštevajo (slika 9). Med srednjimi vrednostmi dejanskih in modelskih vrednosti ni statistično signifikantnih razlik (preglednice 2, 3 in 4). Tako izbrane solarne elektrarne skupaj povprečno letno proizvedejo 177.469 kWh, kar je zelo ugodno glede na povprečno letno porabo električne energije slovenskega gospodinjstva, ki znaša 4.146 kWh (Medmrežje 25).



Slika 9: Prikaz razlik izkoristka solarne energije med dejanskim vzorcem (MFE Sursum 1, MFE Sursum 4, MFE Dušej) in modelnima napovedima Standard Sky ter Uniform Sky.

Preglednica 2: Statistični preizkus t-test med predvideno vrednostjo sončnega obsevanja po modelu Standard Sky in dejanskim izkoristkom vzorca.

Kazalci testne statistike	Standard Sky model	Vzorec
povprečna vrednost	5356,70	4913,00
varianca	12485143,05	5516333,01
število razredov	36,00	36,00
hipoteza (razlika povprečne vrednosti)	0,00	
df	61,00	
t	0,63	
P(T<=t) (en rep)	0,27	
t (en kritičen rep)	1,67	
P(T<=t) (dva repa)	0,53	
t (dva kritična repa)	2,00	

Preglednica 3: Statistični preizkus t-test med predvideno vrednostjo sončnega obsevanja po modelu Uniform Sky in dejanskim izkoristkom vzorca.

Kazalci testne statistike	Uniform Sky model	Vzorec
povprečna vrednost	5371,50	4913,00
varianca	12666685,21	5516333,01
število razredov	36,00	36,00
hipoteza (razlika povprečne vrednosti)	0,00	
df	61,00	
t	0,65	
P(T<=t) (en rep)	0,26	
t (en kritičen rep)	1,67	
P(T<=t) (dva repa)	0,52	
t (dva kritična repa)	2,00	

Preglednica 4: Kazalci statističnega preizkusa ANOVA (primerjava razlik med obema modeloma in vzorcem).

Vir variacije	SS	df	MS	F	P	F (kritičen)
Med skupinami	4887751,3	2	2443875,6	0.24	0.79	3.08
Znotraj skupin	1073385644,4	105	10222720,4			
Skupaj	1078273395,7	107				

Na podlagi obeh modelov je izračunan solarni potencial občine (sliki 10 in 11). Izračuni kažejo, da ima občina dober solarni potencial. Večje vrednosti so izračunane po Uniform Sky modelu, vendar med modeloma ni statistično signifikantnih razlik.

Na podlagi kart naklonov in ekspozicij streh bi lahko občina z lastnimi viri, viri investitorjev ali spodbujanjem povezovanja ustanov in gospodinjstev v skupnosti OVE umestila solarne elektrarne na zgradbah, za katere so značilne večje površine streh, kot so Druga OŠ Slovenska Bistrica, Javni zavod za šport Slovenska Bistrica (Dvorana za zimski trening, Center borilnih športov in Tenis dvorana), OŠ Zgornja Polskava, OŠ Zgornja Ložnica, Športna dvorana Slovenska Bistrica, Srednja šola Slovenska Bistrica, Gasilski dom Slovenska Bistrica, Čistilna naprava Slovenska Bistrica, OŠ Črešnjevec – športna dvorana, OŠ Tinje – objekt knjižnica in KS Kebelj – večnamenski dom Kebelj

(Pristovnik in sod. 2012, 115–117). S pregledom satelitskih posnetkov in identifikacijo obstoječih solarnih elektrarn je ugotovljeno, da predlagane zgradbe na svojih površinah nimajo postavljenih sončnih elektrarn, zato te predstavljajo dobro priložnost za investitorje.



Slika 10: Solarni potencial (kWh) po Uniform Sky modelu v naselju Slovenska Bistrica. Vir podlage: GURS 2019.



Slika 11: Solarni potencial (kWh) po Standard Sky modelu v naselju Slovenska Bistrica. Vir podlage: GURS 2019.

## 5. Diskusija

Solarna energija kot eden izmed obnovljivih virov pridobiva na pomenu. Investicije v solarne elektrarne so se povečale za 700% v primerjavi z letom 2010 (Medmrežje 10). Predvsem Evropska unija je kot vodilna politična enota na področju obnovljive energije na globalni ravni sprejela enega najbolj ambicioznih načrtov za implementacijo obnovljivih virov energije, pri tem se spodbuja predvsem izkoriščanje solarnega in vetrnega potenciala. Opredeljen je cilj najmanj 32% energije iz obnovljivih virov do leta 2030 (12% povečanje v primerjavi z letom 2019), s čimer se bo ustvarilo predvidoma 900.000 novih delovnih mest. Do leta 2050 naj bi se samo s solarnimi sistemi proizvedlo 60% električne energije (Medmrežje 19). Tako imajo obnovljivi viri energije oziroma elektrifikacija ekonomije pomembno vlogo pri dekarbonizaciji in doseganju klimatske nevtralnosti do leta 2050, ki je opredeljena v Evropskem zelenem dogovoru (Medmrežje 5). En od ukrepov je večje vključevanje gospodinjestev, ki se lahko povežejo v t. i. energetske skupnosti za lažje investicije in implementacije. Do leta 2030 bi lahko te skupnosti vzpostavile 21% solarnih elektrarn (Medmrežje 7). Za spodbujanje implementacije in ozaveščanja o solarni energiji je vzpostavljena ESTELA, Evropsko solarno termalno električno združenje, ki povezuje EU in države Bližnjega Vzhoda in Severne Afrike (Medmrežje 4). Prav tako je vzpostavljen Fotovoltaični geografski informacijski sistem (PVGIS), na katerem so dostopni podatki za 9 podnebnih spremenljivk, ki vplivajo na solarni izkoristek, podatki za količino solarne radiacije glede na uro, dan ali mesec ter podatki za predvideno učinkovitost solarnih panelov glede na različne solarne sisteme in konfiguracije (Medmrežje 16). Podatki so dostopni za celotno Evropo in Afriko, saj je slednja opredeljena kot partner pri izkoriščanju solarnega potenciala (Medmrežje 6). Podobno so na Slovenskem portalu za fotovoltaike, ki deluje v sklopu Laboratorija za fotovoltaike in optoelektroniko, med ostalim dostopni podatki o sončnem obsevanju, donosu in meteoroloških spremenljivkah po posameznih krajih ter opis postopka pridobivanja obvezne dokumentacije, izgradnje in priklopa lastne solarne elektrarne (Medmrežje 18).

Kljub temu da so solarne elektrarne razumljene kot okoljsko sprejemljiva rešitev oziroma ekološko-energetski ideal, so za njih značilni nekateri negativni vplivi, ki nastajajo pri proizvodnji in transportu ter pri njihovi uporabi in po njej. Prva težava nastaja pri pridobivanju surovin, saj je več kot 90% solarnih panelov izdelanih iz silicija, ki je predelan iz silicijevega oksida (kvarc), ki se pridobiva z rudarjenjem. Rudarjenje ima velik negativen vpliv na okolje, poleg tega negativno vpliva na zdravje rudarjev (pljučna bolezen silikoza). Naslednja težava nastaja pri nadaljnji proizvodnji, saj pri predelavi silicija v 1 t polisilicij nastane do 4 t strupene spojine silicijev tetraklorid (Mulvaney 2014). Slednja se lahko uporabi za nadaljnjo predelavo, vendar zaradi drage infrastrukture jo nekateri proizvajalci odvržejo v okolje. Spojina v stiku z vodo sprošča klorovodikovo kislino, ki poveča zakisanost tal, izpušča škodljive hlape, ubija vodne in druge organizme ter draži oči in dihala. Nadalje se iz polisilicija izdelajo kovinske palice in iz njih plošče, pri tem pa se uporabljajo nevarne spojine kot je fluorovodikova kislina, ki je nevarna za okolje, organizme in delavce. Poleg nevarnih spojin je pri proizvodnji okoljsko sporna velika količina energije, saj predelava silicija poteka pod visokimi temperaturami. Na Kitajskem, ki je globalno največja proizvajalka solarnih panelov, kjer se jih proizvede skoraj polovica, energetika temelji na premogu. Tako ima večina solarnih panelov velik ogljični odtis, saj je njihova proizvodnja odvisna od fosilnih goriv (Mulvaney 2014).

Z namenom zmanjševanja negativnega vpliva izdelave solarnih panelov na okolje in družbo raziskujejo nove spojine in načine proizvodnje. Tako nekateri v proizvodnjo uvajajo etanolom namesto klorovih spojin in natrijev hidroksid (lužni kamen) namesto fluorovodikove kisline. Prav tako se razvijajo t. i. tanki filmski solarni paneli, ki so enako učinkoviti kot silicijevi, a energetsko in surovinsko manj zahtevni. Pri tovrstnih panelih je težavna uporaba kadmija (težka kovina), ki je kancerogen in povzroča mutacije. Ker tanki filmski paneli niso razširjeni, nimajo večjega vpliva, hkrati se raziskujejo možnosti za njihovo varnejšo izdelavo. Z nadaljnjim razvojem se bo zmanjšal tudi ogljični odtis, saj bodo visoke temperature zagotovljene z uporabo obnovljivih virov energije (Mulvaney 2014).

Nekatere težave nastajajo tudi pri nadaljnji uporabi solarnih panelov. Pri njihovi inštalaciji in občasnem čiščenju za zagotavljanje največjega možnega izkoristka, se porabi velika količina vode. Kljub temu je ta količina veliko manjša kot je količina vode, ki se porabi za hlajenje sistemov v termoelektrarnah. Prav tako uporabniki lahko negativno vplivajo na okolje z nepravilnim odlaganjem solarnih panelov po njihovi dokončni uporabi, vendar globalno se širijo mreže zbirnih centrov, ki omogočajo njihovo varno obravnavo (Mulvaney 2014). Nekatere druge težave so še omejen dostop do možnosti za postavitve solarnih elektrarn zaradi omejenih financ ali dostopnosti do tehnologij; odsotnost certifikata, na podlagi katerega bi uporabniki lažje izbrali okoljsko sprejemljivejšo različico pri nakupu solarnih panelov; senčenje solarnih elektrarn, ki lahko vpliva na ekosisteme v njihovem ozadju ter možna vizualna degradacija pokrajine. Kljub temu omenjene slabosti solarne energije niso razlog za neuporabo, temveč povod za natančen razmislek pri načrtovanju proizvodnje in postavljanju solarnih elektrarn ter nadaljnjem spodbujanju znanstvenih raziskav pri njihovem razvoju.

Nekatere slabosti solarne energije se pojavljajo tudi zaradi različnega sončnega obsevanja posameznih lokacij. Slovenije ima ugodno geografsko lego, vendar je lahko težavna ekpozicija streh, ki so večinoma usmerjene proti vzhodu in zahodu, največji izkoristek pa se zagotovi z usmerjenostjo proti jugu. Če je največja poraba električne energije v zgodnjem dopoldanskem času, ko je Sonce na vzhodu, ali poznem popoldanskem času, ko je Sonce na zahodu, potem dodatni ukrepi niso potrebni. V nasprotnem se lahko solarni paneli za zagotavljanje največjega možnega izkoristka postavijo na namenske konstrukcije ali pa se vežejo na baterije, ki shranjujejo energijo, ki je proizvedena v času prekomerne proizvodnje.

Poleg neprimerne naklona in ekpozicij solarnih panelov je lahko omejujoča tudi razpoložljiva površina in okolica. Za solarno elektrarno s kapaciteto 50 MW je potrebnih približno 100 ha površine, medtem ko za postajo za pridobivanje naravna plina z enako kapaciteto samo 2 ha (Kumar Singh in sod. 2020). Prav tako je potrebno zagotoviti, da na teh površinah ni dreves, visokih zgradb ali drugih objektov, ki omejujejo potencial solarne elektrarne. Zaradi manjšega vpliva na okolje in lažjega zagotavljanja optimalnih pogojev so zato primernejše manjše elektrarne na posameznih domovih ali proizvodnih zgradbah.

Slabost solarnih elektrarn je tudi visoka začetna investicija, ki je lahko za posamezno gospodinjstvo omejitveni dejavnik pri odločanju za tovrstne sisteme, ki zagotavljajo individualno samooskrbo. Okvirna cena za štiričlansko gospodinjstvo je med 7.000 in 11.000 €, pri tem solarna elektrarna lahko deluje približno 30 let. Začetna investicija se lahko zmanjša z Eko skladom, ki omogoča subvencije in ugodne kredite, zaradi katerih se investicija lahko povrne v 10 letih. Dodatna finančna ugodnost je, da se



vrednost nepremičnine s solarno elektrarno poviša (Medmrežje 14). Investitorjem so na voljo tudi financiranja, ki jih pod različnimi pogoji ponujajo nekateri izmed izvajalcev. Zato je pred samo implementacijo potreben podroben pregled in primerjava konkurenčnih možnosti na trgu. Druga možnost za zmanjšanje investicij je povezovanje posameznih gospodinjstev in poslovnih subjektov v sklopu t. i. samooskrbe večstanovanjskih stavb ali t. i. skupnosti OVE. Slednje omogočajo, da odjemalci niso lastniki temveč najemniki solarnih elektrarn, ki so postavljene v bližini na stavbah kot so šole in gasilski domovi (Medmrežje 26; Medmrežje 15).

## 6. Zaključek

Solarne elektrarne predstavljajo enega najpomembnejših načinov zagotavljanja obnovljive energije, kar je opazno v ciljih strateških dokumentov in porastu investicij. Kljub temu da so se pojavljajo nekatere negativne posledice pri proizvodnji, transportu in uporabi solarni panelov, je z nadaljnjim razvojem materialov in proizvodnih postopkov lahko zagotovljena večja okoljska in družbena primernost. Pri tem je pomembna tudi natančna identifikacija potencialnih površin za postavitev solarnih elektrarn, saj se tako lahko zagotovi optimalen izkoristek ter s tem energetska varnost in manjši vplivi podnebnih sprememb.

V članku je z uporabo lidar podatkov in dejanskih vrednosti treh solarnih elektrarn ocenjen velik solarni potencial občine Slovenska Bistrica. Z identifikacijo obstoječih solarnih elektrarn in potencialnih lokacij je prepoznanih veliko neizkoriščenih površin, ki se nahajajo na večjih strehah stanovanjskih, javnih in gospodarskih objektov, predvsem v naseljih Slovenska Bistrica, Zgornja Polskava in Pragersko.

Ugotovitve so uporabne pri pripravi razvojnih načrtov občine, ki bi z lastnimi investicijami, zunanjimi investitorji ali s spodbujanjem povezovanja gospodinjstev ter poslovnih in javnih subjektov v skupnosti OVE lahko prispevala k varni oskrbi z obnovljivo energijo, ustvarjanju novih delovnih mest in trajnostnem regionalnem razvoju.

## Literatura

- Dolar, G. 2016: Geografske zasnove rabe obnovljivih virov v Sloveniji do leta 2030. Diplomsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo.
- Google Satellite 2016: NextGIS. <https://qms.nextgis.com/>, povzeto 15. 1. 2021
- GURS 2019: Zbirka podatkov daljinskega zaznavanja – Ortofoto. <https://egp.gu.gov.si/egp/>, povzeto 15.6.2019
- Jacobson, M. Z., Jadhav, V. 2018: World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. *Solar Energy*, 169, 55–66.
- Kolednik, G. 2009: Obnovljivi viri energije – smernice in trendi razvoja. Diplomsko delo. Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za tehniko.
- Kumar Singh, S., Lohani, B., Arora, L., Choudhary, D., Nagarajan, B. 2020: A visual-inertial system to determine accurate solar insolation and optimal PV panel orientation at a point and over an area. *Renewable Energy*, 154, 223–238. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120303025>
- Medved, S. in Novak, P. 2000: Varstvo okolja in obnovljivi viri energije. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.

- Mulvaney, D. 2014: Solar Energy Isn't Always as Green as You Think. Institute of Electrical and Electronics Engineers Spectrum. <https://spectrum.ieee.org/greentech/solar/solar-energy-isnt-always-as-green-as-you-think>, povzeto 2.1.2021
- Papler, D. 2012: Osnove uporabe solarnih toplotnih in fotonapetostnih sistemov. Ljubljana: Energetika marketing.
- Pristovnik, T., Grobelnik, P., Boček, J. in Ferlin, D. 2012: Lokalni energetski koncept občine Slovenska Bistrica. <https://www.slovenskabistrica.si/objava/57008>, povzeto 23.5.2018
- Ritchie, H., 2020: Energy mix. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/energy-mix>, povzeto 12.12.2020
- Thompson, J., Donn, M. in Osborne, J. 2011: Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14 – 16 November: Variation of green building ratings due to variances in sky definitions (1832 – 1839). Wellington: Victoria University of Wellington. [https://www.researchgate.net/publication/267939784\\_Variation\\_of\\_green\\_building\\_ratings\\_due\\_to\\_variances\\_in\\_sky\\_definitions](https://www.researchgate.net/publication/267939784_Variation_of_green_building_ratings_due_to_variances_in_sky_definitions), povzeto 8.10.2019
- Medmrežje 1: [http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas\\_voda\\_Lidar@Arso](http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso), povzeto 2.1.2021
- Medmrežje 2: <http://www.energijaplus.si/soncnaelektrarna/predstavitev/pogoji/>, povzeto 30.8.2019
- Medmrežje 3: <https://www.esri.com/en-us/home>, povzeto 8.10.2019
- Medmrežje 4: <https://www.estelasolar.org/about-us/>, povzeto 2.1.2021
- Medmrežje 5: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en), povzeto 2.1.2021
- Medmrežje 6: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012\\_energy\\_roadmap\\_2050\\_en\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf), povzeto 3.1.2021
- Medmrežje 7: [https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b4e46873-7528-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc\\_id=Searchresult&WT.ria\\_c=null&WT.ria\\_f=3608&WT.ria\\_ev=search](https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b4e46873-7528-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc_id=Searchresult&WT.ria_c=null&WT.ria_f=3608&WT.ria_ev=search), povzeto 2.1.2021
- Medmrežje 8: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO6665>, 2.1.2021
- Medmrežje 9: [http://gis.arso.gov.si/related/lidar\\_porocila/b\\_22\\_izdelava\\_izdelkov.pdf](http://gis.arso.gov.si/related/lidar_porocila/b_22_izdelava_izdelkov.pdf), povzeto 5.9.2019
- Medmrežje 10: <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/142118/solar-generation-v-2008-solar-electricity-one-billion-people-two-million-jobs-2020.pdf>, povzeto 10.12.2020
- Medmrežje 11: <https://www.e-prostor.gov.si/zbirke-prostorskih-podatkov/nepremicnine/kataster-stavb/#tab2-1009>, 8.10.2019
- Medmrežje 12: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=787794cdbc384261bc9bf99a860a374f>, povzeto 21.6.2020
- Medmrežje 13: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel>, povzeto 23.5.2018
- Medmrežje 14: <https://www.mojprihranek.si/izpostavljeno/novice-partnerjev/soncna-elektrarna-za-samooskrbo-koliko-stane-in-ali-se-izplaca/?cn-reloaded=1>, povzeto 15.1.2021

- Medmrežje 15: <https://www.energetika-portal.si/nc/novica/n/izdana-prenovljena-uredba-o-samooskrbi-z-elektricno-energijo-iz-obnovljivih-virov-energije-4178/>, povzeto 15.1.2021
- Medmrežje 16: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>, povzeto 3.1.2021
- Medmrežje 17: <http://pv.fe.uni-lj.si/Dokumenti.aspx>, povzeto 15.1.2021
- Medmrežje 18: <http://pv.fe.uni-lj.si/Welcome.aspx>, povzeto 14.1.2021
- Medmrežje 19: <https://www.solarpowereurope.org/europe-can-achieve-climate-neutrality-before-2050-with-100-renewable-energy-system/>, 2.1.2021
- Medmrežje 20: <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/-/1817901S.px>, povzeto 12.12.2020
- Medmrežje 21: <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/-/1817902S.px>, povzeto 12.12.2020
- Medmrežje 22: <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/-/1817602S.px>, povzeto 12.12.2020
- Medmrežje 23: <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/-/1822303S.px>, povzeto 12.12.2020
- Medmrežje 24: <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/-/05C4002S.px>, povzeto 12.12.2020
- Medmrežje 25: <https://www.stat.si/StatWeb/Field/Index/5/88>, povzeto 15.1.2021
- Medmrežje 26: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED7867>, povzeto 15.1.2021

## **SOLAR ENERGY POTENTIAL ASSESSMENT IN THE SLOVENSKA BISTRICA MUNICIPALITY**

### **Summary**

The research demonstrates the methodological implementation of lidar data for assessment of solar energy potential for electricity generation in the case of Slovenska Bistrica municipality. Fossil fuels are the predominant source of energy, but the importance of renewable energy is growing in order to ensure greater energy security, independence from imports and to prevent environmental problems resulting from their widespread use. Renewable energy share in final energy consumption in Slovenia in 2019 was 21.15% (Internet 21). Among the various forms of renewable energy, solar energy is particularly important, which can be converted to heat using various structures such as windows, solar walls and greenhouses or to electricity using devices such as solar cells.

Due to the latitude, which determines the greater solar incident angle and the duration of the day, but also due to the relief, which includes slopes and aspects, Slovenia is characterized by great solar potential, which can ensure that all energy needs are met (Dolar, 2016, 7, 48). Slovenia's solar potential is 1,242 kWh/m<sup>2</sup>. In addition, it is evenly distributed, as at the annual level the difference between more and less sunny landscapes is only 15% (Pristovnik et al., 2012, 111). In addition, the average values of solar radiation in Slovenia are increasing (Internet 17). In 2019, the solar potential in Slovenia was utilized by 8,038 solar power plants (233% increase compared to 2018), which produced 268 GWh of electricity (2.3% of all energy excluding the Croatian share of electricity from the Krško NPP). The highest installed capacity of solar power plants is in the Podravska and Koroška (82.1 MW), and the lowest in the Obalno-kraška (19 MW) statistical region (Internet 17).

There is great potential for solar energy utilization in Slovenia, which is still not recognized. Research with geographic information systems is very useful in identifying locations and their potential for the use. Thus, the paper, considers the following for the municipality of Slovenska Bistrica: (1) where are the existing solar power plants located and where are the potential areas for the installation of solar panels, (2) what is the amount and duration of global solar radiation on potential areas, (3) what are the differences between calculated and actual values of three existing solar power plants and (4) what is the total solar potential of the municipality?

The municipality of Slovenska Bistrica is located in northeastern Slovenia in the Podravska statistical region. With an area of 260 km<sup>2</sup>, it is one of the largest Slovenian municipalities. The municipality includes 79 settlements with a population of 25,890 in 2020 (Internet 24). The most important factor in solar energy utilization is the amount of energy or radiation. In Slovenska Bistrica, the average annual radiation is 1,269 kWh/m<sup>2</sup>, which represents the potential of annual electricity production of 444 kWh/m<sup>2</sup>. Regarding the total area, the theoretical potential of annual energy production is about 115,440 GWh. Considering unsuitable areas, the theoretical potential of the municipality is less than 50 GWh, which means a relatively favorable efficiency (Pristovnik et al., 2012, 112–113). At the regional level, relief with slopes and aspect is also an important factor. Altitudes in the municipality are between 240–1515 m (average 608 m) and slopes between 0–46° (average 9°). The most extensive aspect categories in the municipality are SE (16.8%), S (15.3%), E (15%), NE (14%) and SW (12.2%). The impact of the relief can be adjusted with different constructions, which can ensure the maximum possible efficiency.

In addition to relief, land use is an important factor in the use of solar energy, with forests, meadows, orchards, vineyards and other permanent plantations, overgrown areas, fields and gardens, water and wetlands being unsuitable areas, while built-up areas being more suitable. Such unsuitable areas cover 93.6% (244.2 km<sup>2</sup>) and potentially suitable areas 6.4% (16.7 km<sup>2</sup>) of the municipality's area. The built-up areas are located mainly on the plain along the Ljubljana - Maribor highway. In addition to the appropriate slope, aspect and land use, built-up areas are suitable because of denser settlements and concentration of potential users, such as households, manufacturing and service providers. In particular, the buildings of larger companies, which are usually characterized by larger roof areas, represent an opportunity to exploit the solar potential.

With the satellite images in the Google Earth application, we identified 111 solar power plants in Slovenska Bistrica municipality in 2018. They are mostly concentrated in the settlement of Slovenska Bistrica and some other surrounding villages. Most solar power plants are located on the roofs of residential buildings, outbuildings and larger companies, and some are also installed on purpose-built structures, similar to hayracks or canopies. In addition to the existing ones, we also identified potential areas using building cadastre and accurate digital surface model produced with lidar data. Potential areas are spatially unevenly distributed, their highest density is in the settlements of Slovenska Bistrica, Zgornja Polskava and Pragersko (Figure 1).

The digital surface model was also used to determine the characteristics of roofs that influence the utilization of solar potential, such as areas, slopes and aspects. Most suitable roof slopes are between 20-40°, which are typical for all residential building's roofs due to the general building code (red, yellow). Exceptions are often larger buildings, where the roof slope is less than 20° (green) (Figure 2). Most suitable aspects are towards the south. In the selected municipality, the most common roof aspect is toward the east and west (red, turquoise), which is appropriate for maximum electricity generation in the morning or evening (Figure 3).

Considering the global solar radiation, the municipality of Slovenska Bistrica has a good potential. The amount of global solar radiation according to the Standard Sky model is between 960,000–1,500,000 Wh/m<sup>2</sup> per year, and according to the Uniform Sky model between 898,222–1,426,612 Wh/m<sup>2</sup> per year. The t-test confirmed that there are no statistically significant differences in the global solar radiation on potential surfaces in the municipality of Slovenska Bistrica between the Standard Sky and the Uniform Sky model.

Three solar power plants in the municipality of Slovenska Bistrica were selected to calculate the solar potential. The actual production of all three selected power plants was compared with model calculations on a monthly basis, so that there is a noticeable difference between actual and theoretical values and between the less and more sunny part of the year. Less intense radiation is typical for the period between November and February, so energy production is also lower. In contrast, in the period between March and October, when radiation is more intense, energy production is higher. There are no differences in solar energy efficiency between model estimates. Actual average values of energy production are lower compared to the calculated ones, as the selected models do not include the influence of obstacles, such as shading (trees, buildings) and weather (cloudiness). In addition to obstacles in space, production is also affected by possible technical errors that are not considered by model calculations (Figure 9). There are no statistically significant differences between

the actual and model values (Tables 2, 3 and 4). The selected solar power plants together produce an average of 177,469 kWh per year, which is very favorable compared to the average annual electricity consumption of a Slovenian household, which amounts to 4,146 kWh (Internet 25). Based on both models, the solar potential of the municipality is calculated (Figures 10 and 11). Calculations show that the municipality has good solar potential.

Based on these findings, the municipality could invest or encourage citizens, companies and public sector to connect in so called energy communities, who share power plants installed on buildings with larger roof areas, such as schools, fire houses and sports halls. By reviewing satellite images and identifying existing solar power plants, it was found that the proposed buildings are not utilized in such way. Despite the fact that there are some negative consequences in the production, transport and use of solar panels, the further development of materials and production processes can ensure security of renewable energy supply, job creation and sustainable regional development.