

Alen Mangafić, Mitja Košir, Alma Zavodnik Lamovšek: DOLOČITEV SONČNEGA OBSEVANJA URBANIH OBMOČIJ DETERMINATION OF SOLAR IRRADIATION IN URBAN S POMOČJO ODPRTOKODNEGA GIS MODELA: APLIKACIJA AREAS WITH AN OPEN SOURCE GIS MODEL: APPLICATION NA PRIMERU ROŽNE DOLINE V LJUBLJANI ON THE EXAMPLE OF THE ROŽNA DOLINA IN LJUBLJANA

DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/IU-CG.2017.05.068-075> ■ UDK: 711.4 : 502.21 ■ 1.02 Pregledni znanstveni članek / Review Article ■ SUBMITTED: September 2017 / REVISED: October 2017 / PUBLISHED: November 2017

UVODNIK
EDITORIAL
ČLANEK
ARTICLE

IZVLEČEK

Določanje sončnega obsevanja je ključno za načrtovanje solarnih sistemov. Obstajajo različni GIS modeli za določitev sončnega obsevanja, ki se medsebojno razlikujejo po vhodnih podatkih, strojnih zahtevah, zanesljivosti in primernosti glede na posebnosti obravnavanega območja in narave študije. Urbana območja zaradi razgibanosti in raznolikosti predstavljajo večji izziv pri množičnem vrednotenju potenciala prejete sončne energije. V članku je predstavljena metodologija za določitev obsevanja streh urbanih območij s pomočjo GRASS GIS modela *r.sun*, ki ponuja izračun na podlagi visoko ločljivih prostorskih, atmosferskih in meteoroloških podatkov. Uporabljeni vhodni podatki so prosto dostopni za celotno območje Slovenije. Predlagan metodološki pristop smo preizkusili na območju mestne četrti Rožna dolina s severnim delom Viča v Ljubljani. Območje je namreč zelo pestro po tipologiji zgrajenih objektov, pokrovnosti tal in višinskih razlikah.

KLJUČNE BESEDE

sončno obsevanje, GIS, *r.sun*, lidar, Copernicus, Molusce

ABSTRACT

The determination of solar irradiation is crucial when planning the installation of solar systems. There are different GIS models for determining solar irradiation, which differ from each other in terms of input data, hardware requirements, performance, reliability and suitability, depending on the specificity of the study area and the nature of the study. Because of their diversity, urban areas pose a greater challenge for the estimation of the potential of the received solar energy. In the article we present a methodology for determining the irradiation of roofs in urban areas using the GRASS GIS model *r.sun*, which executes the computation with high resolution spatial, atmospheric and meteorological data. The used input data is freely available for the entire territory of Slovenia. The proposed methodological approach was tested on the area of the town quarter Rožna dolina in Ljubljana city with the northern part of Vič. The area is very diverse according to the typology of the built objects, the land cover and altitude differences.

KEY-WORDS

Solar irradiation, GIS, *r.sun*, lidar, Copernicus, Molusce

1. Uvod

Eden večjih izzivov trajnostnega razvoja sta načrtovanje energetske učinkovitosti in energetske samozadostnosti tako na ravni lokalnih skupnosti, kot sosesk in stavb. Nenehni tehnološki napredek terja poglobljeno analizo lastnosti proučevanega prostora in iskanje lokalnega energetskega potenciala. Z analizo je treba prepoznati tudi pomanjkljivosti dosedanjega energetskega sistema ter načine, na katere posegi v prostor vplivajo na spremembe energetskega potenciala. S kombiniranjem dosedanje energetske infrastrukture (npr. elektrovi, plinovodi, itd.) in obnovljivih virov (npr. sončna, vetrna, geotermalna in biomasna energija) lahko izboljšamo energetske učinkovitosti tudi v urbanem okolju in zmanjšamo ogljični odtis dosedanje energetske proizvodnje (Kammen in Sunter, 2016).

V tem članku je predlagan metodološki pristop za izvajanje množičnega ovrednotenja sončnega obsevanja streh v Sloveniji s pomočjo odprtodnih modelov, ki temeljijo na simulacijah sprememb pokrovnosti tal in prosto dostopnih atmosferskih podatkov.

Pri prostorskem načrtovanju solarnih sistemov je treba izvesti študijo o sončni obsevanosti proučevanega območja. Na sončno obsevanost vplivajo različni geografski in atmosferski parametri, na katere ne moremo direktno vplivati. Vplivamo lahko na lokalne fizične lastnosti pri načrtovanju solarnih sistemov, kot so upoštevanje geomorfoloških značilnosti okolja, grajenih objektov, vegetacije in obnašanje solarnih sistemov v različnih pozicijah. Najbolj natančne meritve sončne obsevanosti so terenske, vendar je celoten proces dolgotrajen (več let za pridobivanje ustreznega statističnega vzorca) in neustrezen za primere, v katerih želimo izvesti množično ovrednotenje potenciala. Zaradi močnega vpliva tako medsebojnega kot nebesnega senčenja v urbanih okoljih, le-ta predstavljajo večji izziv pri množičnem vrednotenju potenciala prejete sončne energije, s tem simuliranje količine obsevanja postaja zahtevnejše. Pri prostorskem načrtovanju večjih grajenih objektov (npr. stolpnice), je treba oceniti tudi vpliv takega posega na podlagi dosedanjega lokalnega potenciala sončnega obsevanja. S simuliranjem spremembe sončne obsevanosti v okolici lahko ocenimo tudi potencialno »energetsko škodo«, s katero novozgrajeni objekt indirektno deluje na okolico. Karte, izdelane na podlagi ocene potenciala prejete sončne energije kot tudi ostali rezultati ocene sončnega obsevanja, so lahko zelo pomembna podlaga pri izvajanju prostorske politike, tako na regionalni, kot na lokalni ravni.

2. Dejavniki in modeli za izračun sončnega obsevanja

Dejavnike, ki vplivajo na sončno obsevanost Hofierka in Šuri (2002) delita na tri skupine:

1. Zemljina geometrija, revolucija, rotacija in deklinacija Zemlje, zemljepisna širina analizirane lokacije,
2. geomorfološke značilnosti površja (višina, nakloni, usmerjenost, osončenost, pokrovnost),
3. atmosferski parametri kot so (a) plinske plasti, (b) trdne in kapljevinske snovi (npr. aerosoli, nekondenzirana para) in (c) oblaki (kondenzirana

para) vplivajo na to, v kakšni obliki (direktno, difuzno) in koliko sončnega sevanja preide skozi Zemljino atmosfero.

Pri izračunu potenciala solarnih (fotonapetostnih kot tudi solarno-termičnih) sistemov ocenjujemo globalno, oz. celotno sončno obsevanost. »Globalno obsevanje je vsota direktnega sončnega sevanja in difuznega sevanja neba, ki jo prejme element horizontalne ploskve in se izrazi v W/m^2 . Cirkumglobalno obsevanje je vsota direktnega sončnega sevanja, difuznega sevanja neba ter od tal odbitega dela teh komponent, ki pade na kroglo, ki je dvignjena od tal« (Hočevar in Rakovec, 1975).

Obstajajo različni računalniški modeli za izračun sončnega obsevanja in se razlikujejo po metodologiji in parametrih, katere upoštevajo. Podjetje *ESRI* npr. ponuja orodje *Area Solar Radiation*, ki izvaja izračun sončnega obsevanja na podlagi vhodnega digitalnega modela višin in za izračun zahteva različne topografske in obsevalne parametre, kot so ekspozicija površja in koeficient difuznosti. Za razliko od nekaterih modelov, kot so *Solargis* in *r.sun*, *Area Solar Radiation* za izračun ne ponuja integracije množic atmosferskih podatkov (ESRI, Solargis, 2017). Zaloge vrednosti, kot so npr. rastrski podatki, boljše opisujejo atmosferske lastnosti v prostoru kot posamezni koeficienti, ki posplošuje celoten analiziran prostor z enotno vrednostjo. Nehomogenost je lastnost prostora tako v geometrijskem kot fizičnem pomenu. Fizične lastnosti vezane na pokrovnost tal in prevetrenost (korelirano z vlažnostjo) so še bolj razgibane in nehomogene v urbanih območjih kot v odprtem prostoru. To pomeni, da za pridobitev ustreznjšega rezultata sončnega obsevanja v urbanem okolju potrebujemo model, ki upošteva množice atmosferskih parametrov kot tudi podatke meteoroloških postaj. Odprtodni GRASS GIS ponuja model *r.sun*, ki izvaja izračun sončnega obsevanja z upoštevanjem vseh treh že navedenih dejavnikov po Hofierka in Šuri (2002). Zaradi tega smo se odločili, da bomo študijo našega primera izvedli s pomočjo *r.sun* modela, ki je predstavljen v nadaljevanju.

2.1 Predstavitev r.sun modela za izračun sončnega obsevanja

GRASS GIS ponuja veliko orodij za preračun rastrskih in vektorskih podatkov. Gre za odprtodni program, ki poleg vseh klasičnih geoinformacijskih analiz, izvaja tudi preračune trirazsežnih vektorskih in rastrskih podatkov (sestavljanih iz vokslov). Izvaja tudi kompleksnejše geostatistične izračune, kot so trirazsežno krigenje in ostale volumenske interpolacije. Njegov grafični uporabniški vmesnik in način delovanja nista najprijaznejše narave, ampak je velik delež GRASS GIS orodij integriran v uporabniku veliko bolj prijazen QGIS. QGIS v različici 2.18 Las Palmas ponuja 314 GRASS GIS 7.2.1. orodij. Med njimi je tudi model *r.sun*, ki sta ga razvila Jaroslav Hofierka in Marcel Šuri z Oddelka za Geografijo in Geoekologijo Univerze v Prešovu (2002). Model ponuja dva načina uporabe: (1) izračun globalnega sončnega obsevanja na določenem območju z upoštevanjem od tal odbite komponente sončnega sevanja v pogojih brez upoštevanja oblakov in (2) z določanjem koeficientov jasnosti neba, določenih na podlagi meteoroloških podatkov.

V našem primeru smo najprej izračunali koeficiente jasnosti neba (*clear sky index*) in potem še globalno obsevanje z njihovim upoštevanjem.

Vhodni podatki *r.sun* modela so:

- digitalni model višin,
- usmerjenost (površja ali solarnega sistema),
- naklon (površja ali solarnega sistema),
- Linkeov faktor motnosti (angl.: *Linke turbidity factor*, v nadaljevanju: TL),
- površinski albedo oziroma koeficient odbojnosti,
- geografska širina in dolžina analizirane lokacije,
- število obravnavanih dni v letu,
- deklinacija sonca,
- indeks jasnosti neba za direktno komponento sončnega obsevanja (angl.: *clear sky index - beam*),
- indeks jasnega neba za difuzno komponento sončnega obsevanja (angl.: *clear sky index - diffuse*),
- časovni korak pri seštevanju obsevanosti,
- gostota vzorčenja pri preračunu vpliva senčenja.

Model *r.sun* upošteva atmosferske parametre, ki jih izračuna s pomočjo Linkeovega faktorja motnosti zraka, površinskega albeda in indeksov direktne in difuzne komponente sončnega obsevanja oz. obsevanja pri upoštevanju oblačnosti (Hofierka in Šuri, 2002).

3. Metodološki pristop

Po analizi različnih študijskih primerov (Nguyen in Pearce, 2007; Hofierka in Šuri, 2002; Lucca in Valentini, 2017) smo predlagali lasten metodološki pristop, ki ima izhodišča v dveh študijskih primerih:

1. Razporeditev sončne obsevanosti za ekološke namene na Slovaškem (Hofierka in Šuri, 2002).
2. Solar Lab GIS, Politecnico Di Milano (Lucca in Valentini, 2017).

V prvem študijskem primeru Hofierka in Šuri, avtorja *r.sun* modela, določita obsevanost z upoštevanjem površinskega albeda konstantne vrednosti. Linkeove faktorje motnosti pridobita iz meteoroloških postaj. V drugem primeru, avtorja Lucca in Valentini izvajata izračun albeda na podlagi pokrovnosti tal, vendar določita Linkeove faktorje motnosti na podlagi predlaganih koeficientov v navodilih modula *r.sun* (preglednica 1). Pokrovnost je bila izvedena na podlagi CORINE Land Cover podatkovnih slojev (v nadaljevanju CLC).

V metodološkem pristopu, ki ga predlagamo, smo uporabili kombinacijo korakov iz prvega študijskega primera (Hofierka in Šuri, 2002) z upoštevanjem vrednosti albeda tal na podlagi pokrovnosti (Lucca in Valentini, 2017) in upoštevanjem meteoroloških podatkov v obdobju 2010 – 2017 za določitev Linkeovih faktorjev motnosti neba (CAMS). Iz drugega študijskega primera smo prevzeli način izračuna vrednosti albeda tal, ker je preračun albeda z obdelavo satelitskih posnetkov (npr. MODIS) časovno bolj zahteven in ne ponuja rezultatov, ki bi znatno vplivali na boljši izračun sončnega obsevanja za območje naše velikosti. (Nguyen in Pearce, 2010).

Linkeove faktorje motnosti in meteorološko zaznane količine globalne, direktne in difuzne obsevanosti smo pridobili iz baze podatkov Copernicus

(CAMS, 2010 - 2017), programa Evropske komisije za spremljanje Zemlje. Zaradi izračuna sončnega obsevanja streh v urbanem okolju, je vpliv senčenja upoštevan z izračunom globalnega obsevanja na osnovi digitalnega modela površja in ne digitalnega modela reliefa. Zaradi zastarelosti podatkov CLC, smo izvedli simulacijo spremembe talne pokrovnosti CLC 2018 v odnosu na izhodiščna podatka CLC 2006 in CLC 2012 z orodjem Molusce. Izvedli smo izračun za solarne sisteme z usmerjenostjo proti jugu (usmerjenost 270°) za naklone med 30° in 45°.

Predlagan metodološki pristop smo preizkusili na območju mestne četrti Rožna dolina s severnim delom Viča v Ljubljani. Območje je namreč zelo pestro po tipologiji zgrajenih objektov, pokrovnosti tal in višinskih razlik (teren pada od Rožnika proti jugu), železniškega omrežja ter zaradi različnih lastninskih struktur (izvedba morebitnih investicij v solarne sisteme se razlikuje za zasebne in javne stavbe).

Podrobnejša metodološka pojasnila so dodana v poglavju priprave vhodnih podatkov.

4. Priprava vhodnih podatkov

Pred izračunom globalnega obsevanja smo določili meje študijskega območja. Na podlagi tega smo pridobili in izdelali podatkovno bazo za nadaljnji preračun.

4.1 Izdelava digitalnega modela površja

Pri preračunavanju sončnega obsevanja streh je treba izvajati preračune na čimbolj natančnem digitalnem modelu površja. Trenutno najbolj natančni javno dostopni podatki v Sloveniji so georeferencirani in klasificirani oblaki točk GKOT na ARSO-vem portalu ARSO Lidar. V njem so točke klasificirane na tla, stavbe in tri različne tipe vegetacij (ARSO, 2017). Podatke v LAZ formatu smo obdelali s pomočjo GRASS GIS orodij *r.in.lidar* in *r.resamp.rst* ter izdelali digitalni model površja prostorske ločljivosti 1 m².

4.2 Linkeov faktor motnosti

Linkeov faktor motnosti posplošuje modele atmosferske absorpcije in sipanja (difuzije) sončnega sevanja v vremenskih pogojih z jasnim nebom. »Njegova količina opisuje optično globino atmosfere zaradi absorpcije zaradi vodne pare in absorpcije in sipanja zaradi aerosolnih delcev v primerjavi s popolnoma čisto in suho atmosfero« (SoDa, 2010). Faktor ima vrednosti med 1 in 7, kjer najnižja vrednost predstavlja suho in čisto atmosfero, vse vrednosti med 6 in 7 pa opisujejo zelo onesnažena urbana območja.

Modul *r.sun* ponuja izračun z vpisom enega konstantnega faktorja ali z uvozom rastrskega podatka z različnimi vrednostmi. Predlagani koeficienti v navodilih modula *r.sun* so predstavljeni v preglednici 1. Vhodni rastrski sloji so rezultat interpolacije povprečnih mesečnih vrednosti 45 točk v obdobju 2010 - 2017. Primer interpoliranih povprečnih januarskih vrednosti lahko vidimo na sliki 1 in primerjavo ponujenih TL vrednosti in izračunanih v grafikonu 2.

Preglednica 1: Predlagani koeficienti v navodilih modula *r.sun*.

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt
Gore	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,3	2,3	2,3	2,1	1,8
Podeželje	2,1	2,2	2,5	2,9	3,2	3,4	3,5	3,3	2,9	2,6
Mesto	3,1	3,2	3,5	4,0	4,2	4,3	4,4	4,3	4,0	3,6
Industrija	4,1	4,3	4,7	5,3	5,5	5,7	5,8	5,7	5,3	4,9

Vir: GRASS GIS (2017)

4.3 Površinski albedo

»Albedo je mera za svetlobno odbojnost površine telesa. Poznamo več vrst površinskega albeda. Površinski albedo ima razpon od 0.0 do 1.0. Z večanjem količine vode na površju se vrednost albeda znižuje« (Percival in Clesceri, 2003). Obstaja več metod za izračun površinskega albeda in vse so vezane na analizo pokrovnosti tal in obdelavo teh podatkov. Natančne meritve izvaja NASA s pomočjo inštrumenta MODIS z lastnimi sateliti. Podatke o pokrovnosti tal izdeluje tudi Copernicus program s podatkovno bazo CORINE CLC, ki vsebuje podatke o pokrovnosti za leta 1990, 2000, 2006 in 2012. Podatki so pridobljeni s pomočjo podatkov satelitov Landsat-5 in -7, SPOT-4/5m IRS P6 LISS III in RapidEye. V študijskem primeru Solar Lab (Lucca in Valentini, 2017) so vsaki CLC vrednosti dodelili tudi ocenjeno količino površinskega albeda, kar smo aplicirali tudi na našem proučevanem območju. Ostale podatke o površinskem albedu drugih tipov pokrovnosti smo prevzeli iz izračunov, ki sta izvedla Percival in Miller (2003). Vrednosti površinskega albeda na podlagi CLC so prikazane v preglednici 2.

Pri obravnavanju vpliva podatkovnega sloja moramo upoštevati vsa ostala realna stanja na območju, saj imajo s snegom pokrita tla drugačen albedo (od 0.40 do 0.90). V tem primeru bi to lahko teoretično pomenilo, da bi v primeru snega bila večja količina od tal odbitega dela sončnega sevanja in izračunani parametri ne bi prikazali manjše količine obsevanja. Enako velja za pokritost solarnih sistemov s snegom, zato smo nadaljevali ocenjevanje brez upoštevanja teh vplivov.

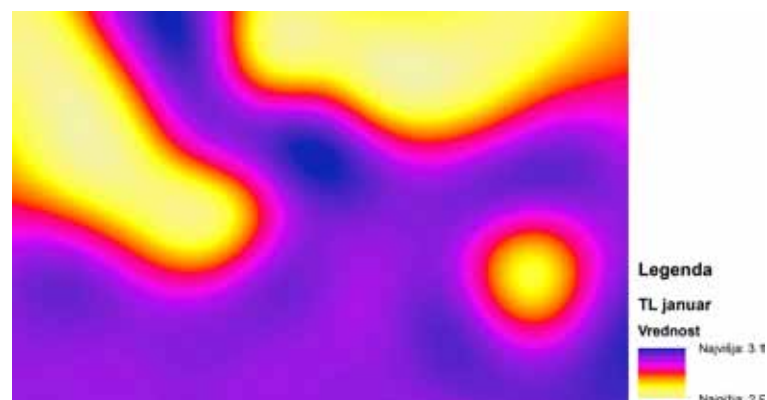
4.3.1 Simulacija sprememb pokrovnosti tal z orodjem MOLUSCE

V primeru, da bi imeli sodobne podatke o pokrovnosti (npr. CLC 2018) bi izvajali izračun na podlagi rastra z vrednostmi reklasificiranimi po načelu preglednice 2. Simulacijo smo izvedli z orodjem MOLUSCE v programu QGIS kot eksperiment. Vhodni podatki so bili CLC 2006 in 2012 (ARSO, 2017) kot reference pokrovnosti tal. Parametri, pri katerih je orodje iskalo razloge za spremembo so bili:

- razdalje od cestnega omrežja (GURS, 2017)
- število prebivalcev iz »mreže 100 m x 100 m« (SURS, 2017)
- razdalje od stavb, zajetih v Katastru stavb (GURS, 2017)

MOLUSCE je preračunal razlike dveh slojev pokrovnosti, poiskal korelacije

Slika 1: Primer interpoliranih količin TL, januar.



Grafikon 1 : Primerjava ponujenih vrednosti TL in izračunanih.

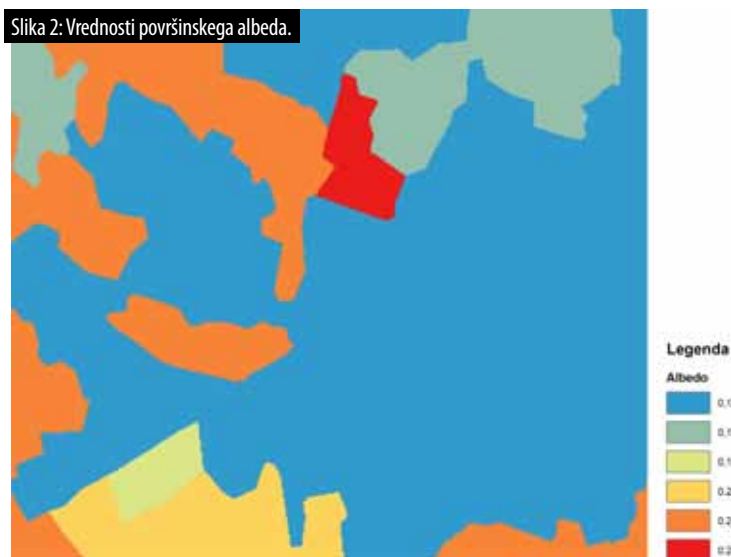


Preglednica 2: Reklasifikacija vrednosti površinskega albeda na podlagi CLC.

CLC KODA	Opis	Albedo
112	Nesklenjene urbane površine	0,10
121	Industrija, trgovina	0,10
122	Cestno in železniško omrežje in pridružene površine	0,10
132	Odlagališča	0,10
142	Površine za šport in prosti čas	0,25
211	Nenamakane njivske površine	0,16
231	Pašniki	0,24
242	Kmetijske površine drobnoposestniške strukture	0,20
311	Listnati gozd	0,10
313	Mešani gozd	0,15

Vir: Percival in Miller (2003) in Solar Lab (2017)

Slika 2: Vrednosti površinskega albeda.



med parametri in spremembami in zgradil model za napoved sprememb v pokrovnosti tal. Iteracijo spremembe smo določili na 1, oz. korak za 6 let, kar pomeni da smo simulirali sloj CLC 2018, ki je prikazan v sliki 2. Spremembe so bile minimalne.

4.4 Indeks jasnosti neba za globalno, direktno in difuzno obsevanje

Meteorološke meritve mesečnih vsot globalnega (GHI), direktnega (BHI) in difuznega (DHI) obsevanja smo pridobili iz baze podatkov CAMS *Radiation Service* in jih dodali v trirazsežni vektorski sloj, enako kot smo to naredili pri preračunu TL. Baza podatkov je vsebovala tudi podatke o količinah GHI, BHI in DHI v pogojih odsotnosti oblakov. Indeksa jasnosti neba direktnega in difuznega sevanja (*clear-sky index*) sta razmerje med izračunanim in meteorološkim podatkom. Za pridobitev indeksov jasnosti neba direktnega in difuznega obsevanja na nagnjeni površini smo upoštevali navodila, katera sta po korakih opisala Hofierka in Šuri (2002). Koeficienti imajo vrednosti med 0 in 1 ter opisujejo oblačnost. Količine bližje 0 opisujejo bolj oblačno, tiste bližje 1 pa manj oblačno hemisfero (grafikon 2).

Statistični vzorec, ki smo ga sestavili, vsebuje vse podatke mesečnih vsot obsevanja za obdobje od 1. januarja 2010 do 1. januarja 2017 za vseh 45 točk, ki smo jih interpolirali s pomočjo trirazsežne interpolacije orodja *v.vol.idw* in pridobljene 3-R raste pretvorili v vrednosti na dvodimenzionalni površini. Koeficienti

Preglednica 3: Koeficienti variacije indeksov jasnosti neba za globalno, direktno in difuzno obsevanje.

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec
KV _{KCGHI}	0.022	0.015	0.012	0.011	0.006	0.005	0.006	0.004	0.007	0.007	0.019	0.020
KV _{KCBHI}	0.022	0.015	0.012	0.011	0.006	0.005	0.006	0.004	0.007	0.007	0.019	0.020
KV _{KCDHI}	0.002	0.004	0.002	0.001	0.000	0.002	0.002	0.001	0.003	0.001	0.003	0.005

variacije indeksov jasnosti neba za globalno obsevanje vseh točk v enem mesecu (KV_{KCI}) imajo vrednosti med 0.004 in 0.022 (preglednica 3).

Glede na pridobljene podatke lahko trdimo, da je na tako majhnem območju s tolikšno višinsko razliko ($\Delta h = 83$ m) ustrezno tudi izvajanje interpolacije z veliko manjšim številom točk predlagamo uporabo vzorca do 10 točk za interpoliranje indeksov jasnosti neba. V primeru preizkusa modela *r.sun* na obravnavanem območju, smo predlagali uporabo povprečnih količin koeficientov za izdelavo rastrov konstantnih vrednosti za posamezne mesečne vrednosti.

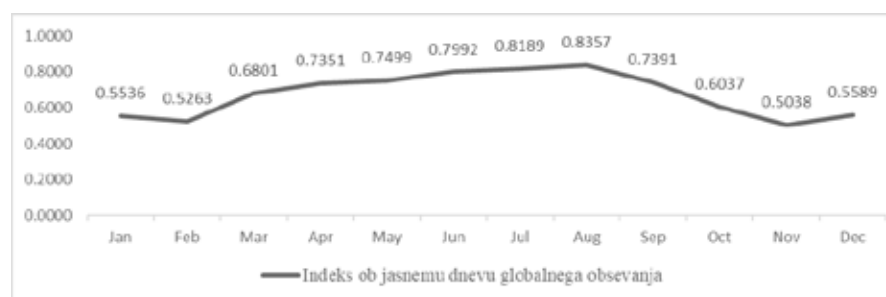
4.5 Določitev referenčnega dneva v letu in deklinacija sonca

Ker uporabljeni model preračunava vsote vrednosti GHI, BHI in DHI za določene dni v letu, je bilo treba izvajati izračun za dneve, ki najbolj zanesljivo kažejo na mesečno povprečje. Aplicirali smo metodo izračuna povprečnih vrednosti, ki ga predlaga ESRA (2000) in določili izhodiščni dan *i* kot vrednost 17. Model *r.sun* lahko avtomatsko določa vrednosti deklinacije sonca in tudi zemljepisne širine in dolžine, v kolikor so podatki georeferencirani. Vnaprej definirani podatki znatno pospešijo čas izračuna. Za našo ločljivost (1m²) je model potreboval več kot 1 uro za izračun rezultatov za en mesec. Izračunanih je bilo 2 krat po 12 scenarijev in sicer za sončne panele z naklonom 30° in 45°. Zahtevane podatke o sončni deklinaciji smo pridobili na portalu Wolfram Alpha (Wolfram Alpha, 2017).

5. Rezultati in njihovo ovrednotenje

Zagnali smo izračun s korakom seštevanja vrednosti 0,25 ure in z gostoto vzorčenja ob preračunu senčenja od 0,7, kot je predlagala ESRA pri ovrednotenju izračuna z iskanjem kompromisa natančnosti in hitrosti izračuna. Rezultati so predstavljali 24 rastrov mesečnih vrednosti sončnega obsevanja ter dva rastra s povprečnimi letnimi vrednostmi za obravnavana naklona. Povprečne letne vrednosti dnevnega globalnega obsevanja z naklonom

Grafikon 2 : Sprememba indeksov ob jasnemu dnevu globalnega obsevanja.



Preglednica 4: Konverzija dni pri oblikovanju vzorca (i = izhodišni dan).

Mesec	Konverzija dni	Prestopno leto	Deklinacija sonca [rad]
Januar	i		-0,36220
Februar	31 + i		-0,20950
Marec	59 + i	(+1)	-0,02396
April	90 + i	(+1)	0,18220
Maj	120 + i	(+1)	0,33690
Junij	151 + i	(+1)	0,40800
Julij	181 + i	(+1)	0,37020
Avгust	212 + i	(+1)	0,23470
September	243 + i	(+1)	0,04005
Oktober	273 + i	(+1)	-0,16080
November	304 + i	(+1)	-0,33100
December	334 + i	(+1)	0,40750

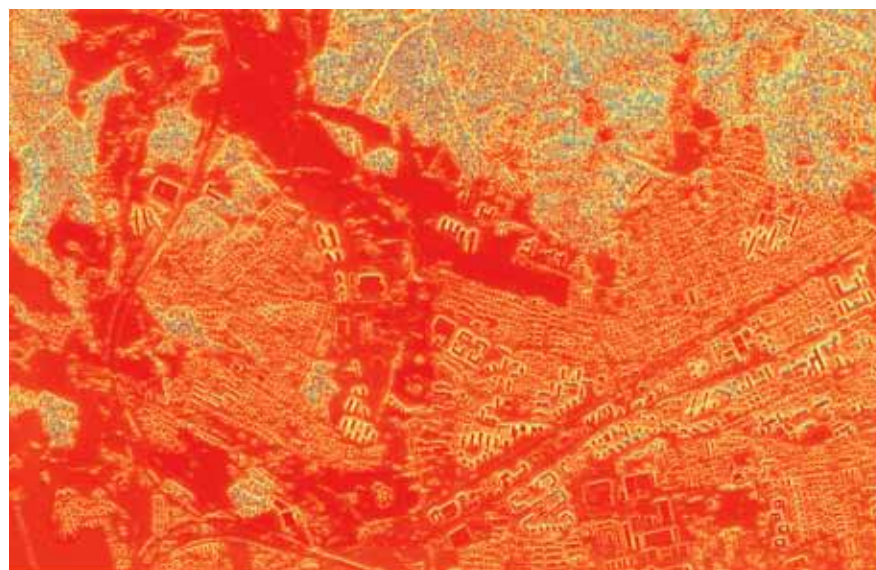
Vir: ESRA (2000)

kolektorja 30° so na sliki 3. Rastrske vrednosti smo dodelili stavbam iz vektorskega sloja Katastra stavb (GURS, 2016) s pomočjo orodja *Zonal Statistics* v QGIS-u. Povprečne letne vrednosti dnevnega globalnega obsevanja z naklonom kolektorja 30° so na sliki 4.

Optimalen naklon se spreminja skozi celotno leto, ter na obravnavnem območju znaša 34° (PVGIS, 2017; grafikon 4). Po preračunih lahko vidimo, da je na obravnavanem območju naklon solarnega sistema 30° boljši v primerjavi s tistim pod 45° v večini leta, razen v obdobju od oktobra do februarja.

Pridobljene rezultate smo primerjali z rezultati, ki jih za Ljubljano preračunava spletni kalkulator Slovenskega portala za fotovoltaike (2017). Ta

Slika 3: Povprečne letne vrednosti dnevnega globalnega obsevanja z naklonom kolektorja 30°.



POVPREČNE LETNE VREDNOSTI DNEVNEGA GLOBALNEGA OBSEVANJA Z NAKLONOM KOLEKTORJA 30°

Legenda:

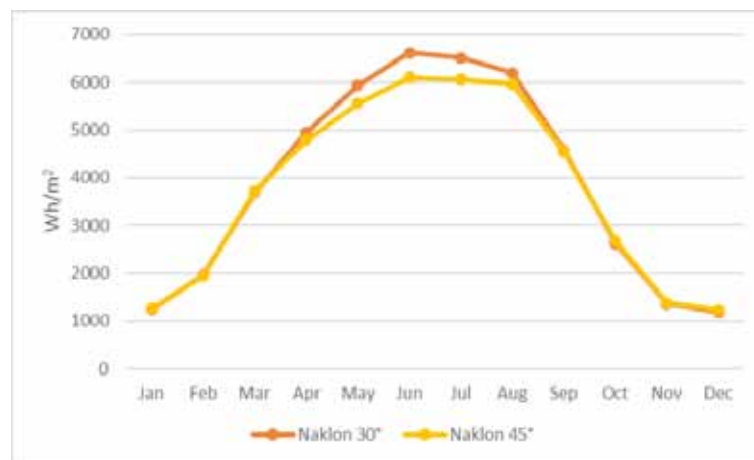
Wh/m²

Najvišje: 4147

Najnižje: 1834

0 250 500 1000 metrov
Mera: 1:15000 Vir: GURS (2017)

Grafikon 3: Količina dnevnega globalnega sončnega obsevanja po mesecih.



za podana naklona z enako usmerjenostjo izračuna količine sončnega obsevanja na horizontalni površini med 1304 kWh/m² in 1346 kWh/m². Odstopanje srednjih vrednosti med našimi in vrednostmi Slovenskega portala za fotovoltaike je 5,87 % in 5,53 %, kar je sprejemljivo, glede na to da smo pridobili rastrske in vektorske podatke z vpogledom sončne obsevanosti za 7516 gradbenih objektov vpisanih v Kataster stavb.

V primeru, da bi razpolagali z večjim vzorcem vhodnih podatkov za pripravo indeksov jasnosti neba za globalno obsevanje (na podlagi meteorološki meritev in vrednosti TL), bi vrednosti rezultatov bile nižje, saj se je po podatkih, zbirke podatkov avtomatskih meritev državne ekološko-meteorološke mreže za spremljanje kakovosti zunanjega zraka, količina izpustov onesnaževal iz industrije, prometa in energetike v obdobju 2003 – 2013

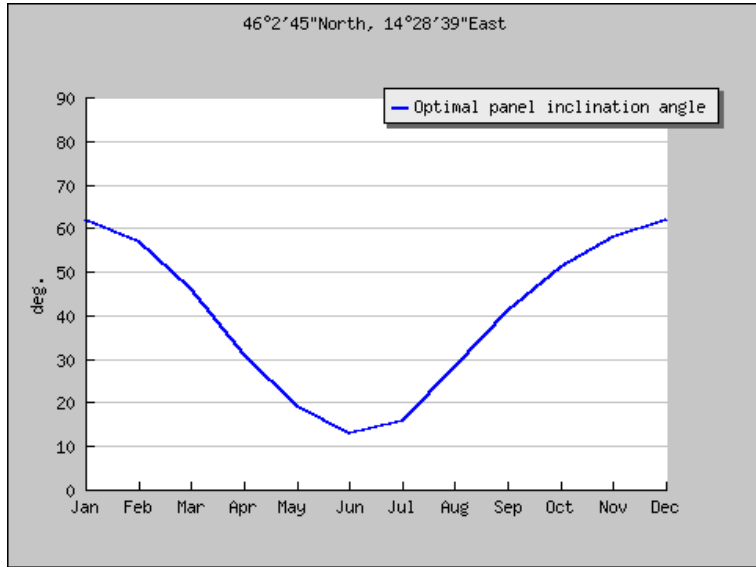
Slika 4: Povprečne letne vrednosti dnevnega globalnega obsevanja na strehah objektov z naklonom kolektorja 30°.



na območju močno zmanjšala od leta 2009 (Ogrin M., Vintar Mally K. et.al., 2014; Glojek K. in Ogrin M., 2015). To dejansko pomeni, da je najbolj primerno izvajati preračun obsevanja na podlagi vzorca sestavljenega od leta 2009 naprej. Povprečne letne vrednosti dnevnega globalnega obsevanja in letna količina prejetega sevanja so izračunane v preglednici 5.

V primeru, da bi 15 % površin obravnavanih streh pokrili s sončnimi sistemi z učinkovitostjo 20 %, bi v enem letu pridelali enako količino

Grafikon 4: Optimalni nakloni solarnega sistema po mesecih.



Vir: PVGIS-CMSAF 2017

električne energije, zaradi katere se v Sloveniji postransko proizvede 7985 ton ogljikovega dioksida, kot je razvidno iz preglednice 6 (240 g CO₂eq/kWh v letu, Electricity Map, 2017).

Trenutno obstaja več aplikacij, ki izvajajo izračun prejetega sončnega obsevanja, kot so PVGIS, PVWatts ter razvijajoči se projekt Google Project Sunroof (PVGIS, 2017; PVWATTS, 2017; Google Project Sunroof, 2017). Prednost naših rezultatov v primerjavi s PVGIS je ta, da PVGIS izračuna obsevanje na podlagi digitalnega modela površja ločljivosti 100 m in ne upošteva vseh vplivov senčenja podrobnega urbanega okolja, kot to upošteva uporabljeni digitalni model površja ločljivosti 1 m (PVGIS, 2017). Aplikacija PVWatts se navezuje na SolarAnywhere® podatke 10 kilometerske mreže (NREL, 2017). Google-ov Project Sunroof je še vedno v razvoju ter ponuja podatke le za ZDA. Izračun izvajajo

Preglednica 5: Povprečne letne vrednosti dnevnega globalnega obsevanja in letna količina prejetega sevanja.

	Dnevno povprečje [Wh/m ²]	Vsota celotnega letnega obsevanja [kWh/m ²]
Naklon 30°	3,905	1425
Naklon 45°	3,770	1376

Preglednica 6: Energetski in ekonomski potencial ter razlike v emisiji CO₂.

Potencial v primeru da bi izkoristili 15 % strešnih površin [kWh/m2] letno	Učinkovitost 20 % [kWh/m2]	Zmanjšanje CO2 [t/leto]
166.360.577	33.272.115	7985

Vir: Electricity Map, 2017

tudi z vhodnimi podatki digitalnega modela površja iz aerosnemanja, katerega lastnost so v dokumentaciji opisali le kot visoko ločljivo (Google Project Sunroof, 2017). Najvišjo ločljivost lidarskih posnetkov v ZDA imajo podatki 3DEP ter so ločljivosti 1 m (Nationalmap, 2017)

6. Sklep

Izračun sončnega obsevanja streh s pomočjo modela *r.sun* s predlagano metodologijo je v kratkem času izvedlo preračun potenciala sončnega obsevanja za veliko število stavb. Končni rezultati so lahko uporabni tako pri projektiranju lastnih solarnih sistemov in preračunu potenciala v okolici, kot za simulacije načrtovanja novega objekta (npr. visoke stolpnice), za katere bi morali podatke le prirediti digitalnemu modelu površja. S to metodologijo lahko v hitrem času pridobimo celotno bazo podatkov za Ljubljano in ostala območja v Sloveniji. Pridobljene podatke bi lahko predstavili javnosti v obliki spletnega pregledovalnika. Rezultati so visoke ločljivosti ter zelo primerni za urbana okolja.

Fizične in ostale podatke lahko uporabimo za različne preračune, kot so npr. energetski in ekonomski potenciali ter spremembe okoljskega odtisa. Upravljalci stavb bi na podlagi teh podatkov lahko začeli načrtovati uporabo skupnih stanovanjskih fondov za izgradnjo sončnih kolektorjev in fotonapetostnih sistemov s čimer bi v nekaj letih znatno znižali skupne stroške električne oskrbe stanovanjskega bloka. Enako velja za objekte v lasti države in lokalnih skupnosti, ki lahko predstavljajo vzorčni primer za sprejemanje sodobnih trajnostnih rešitev. S tem bi prebivalcem lahko pokazali, da je energetska učinkovitost dejansko v javnem interesu.

Viri in literatura

- ARSO (2017). Navodila za prenos podatkov LIDAR. Pridobljeno 1.6.2017 s spletne strani: <http://evode.arso.gov.si/indexd697.html>
- Electricity Map (2017). Tomorrow. Francija, Danska. Pridobljeno 30.6.2017 s spletne strani: <https://www.electricitymap.org/?wind=false&solar=false&page=country&countryCode=SI>
- ESRA (2000). The European Solar radiation Atlas; Vol. 1: Fundamentals and maps (str. 27). Pariz, Les Presses de l'École des Mines.
- ESRI (2017). Area Solar Radiation. Pridobljeno 30. 6. 2017 s spletne strani: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/area-solar-radiation.htm>
- Glojek, K., Ogrin, M. (2015). Kakovost zraka v Sloveniji v obdobju 2003–2013 z vidika prometnega onesnaževanja. Ljubljana: CIPRA Slovenija.
- Google Project Sunroof (2017). Pridobljeno 31.10.2017 s spletne strani: <https://www.google.com/get/sunroof/data-explorer/data-explorer-methodology.pdf>
- Hočevar, A., Rakovec, J. (1975). Komponente sončnega obsevanja na hribu pravilne oblike ob jasnem vremenu Razprave – Papers XVIII. Ljubljana: Društvo meteorologov Slovenije, str. 5–24. Pridobljeno 31.10.2017 s spletne strani: http://www.meteo-drustvo.si/data/Arhiv_razprave_papers/razprave/po_stevilkah/75/XVIII/razprave_75_18.pdf
- Hofierka, J., Šúri, M. (2002). The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. Proceedings of the Open Source GIS-GRASS Users Conference. Trento.
- Pridobljeno 1.5.2017. s spletne strani: https://www.researchgate.net/publication/2539232_The_solar_radiation_model_for_Open_source_GIS_Implementation_and_applications
- Kammen, M. Daniel et al. (2016). City-integrated renewable energy for urban sustainability. Science 352 (Vol. 6228): Urban planet. American Association for the Advancement of Science, str. 922 – 928. <https://doi.org/10.1126/science.aad9302>
- Lucca S., Valentini, L. (2017). Solar Lab. Division of geomatics. Istituto Scienze della Terra – SUPSI. Pridobljeno 6. 2017 s spletne strani: http://geomatrica.como.polimi.it/corsi/geog_info_system/solare.pdf
- Ogrin, M., Vintar Mally, K. et al. (2014). Onesnaženost zraka v Ljubljani. Koncentracije dušikovih oksidov, ozona, benzena in črnega ogljika v letih 2013 in 2014. Ljubljana: Narodna in univerzitetna knjižnica.
- Nationalmap (2017). 3D Elevation Program (EEP) USGS, science for a changing world. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Pridobljeno 1. 10. 2017 s spletne strani: <https://nationalmap.gov/3DEP/>
- Nguyen, H.T., Pearce, J.M. (2009). Estimating potential photovoltaic yield with *r.sun* and the open source. Geographical Resources Analysis Support System. Solar Energy, Vol. 84, 5. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.02.009>
- NREL (2017). Pridobljeno 31. 10. 2017 s spletne strani: <http://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>
- Percival, A.M., Clesceri, N.L. (2003). Waste Sites as Biological Reactors: Characterization and Modelling. Boca Raton, Lewis Publishers, CRC Press LLC. str. 212–214.
- PVGIS (2017). Photovoltaic Geographical Information System. Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology. EU commission, Joint research centre, Institute for energy and transport (IET). Italija. Pridobljeno 31. 10. 2017 s spletne strani: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- PVGIS (2013). Photovoltaic Geographical Information System. Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology. EU commission, Joint research centre, Institute for energy and transport (IET). Italija. Pridobljeno 31. 10. 2017 s spletne strani: <https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/20130626-esti-pvgis.pdf>
- PVGIS calculator. Photovoltaic Geographical Information System. Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology. EU commission, Joint research centre, Institute for energy and transport (IET). Italija. Pridobljeno 31. 10. 2017 s spletne strani: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
- PVWATTS. National Renewable Energy Laboratory, Golden. Colorado, ZDA. Pridobljeno 31. 10. 2017 s spletne strani: <http://pvwatts.nrel.gov/>
- Slovenski portal za fotovoltaike (2017). Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za fotovoltaike in optoelektroniko (LPV). Ljubljana. Pridobljeno s spletne strani 30.6.2017: <http://pv.fe.uni-lj.si/CalcObs.aspx>
- SoDa (2017). MINES ParisTech and Transvalor Dpt SoD. Francija. Pridobljeno s spletne strani 1. 6. 2017: <http://www.soda-pro.com/help/general-knowledge/linke-turbidity-factor>
- Solargis. Solargis s.r.o. Slovaška. Pridobljeno 30. 6. 2017 s spletne strani: <http://solargis.com/support/methodology/solar-radiation-modeling/>
- SURS (2017). Povprečna cena energentov, 1. četrtnje 2017. Pridobljeno 30. 7. 2017 s spletne strani: <http://www.stat.si/StatWeb/Field/Index/30>
- Wolfram Alpha. Sun declination. Pridobljeno 30. 6. 2017 s spletne strani: <https://www.wolframalpha.com/input/?i=sun+declination+january+17th>