

UDK 551.521.1:621.311.243:681.782.42:711.12(497.5)
Izvorni znanstveni članak / Original scientific paper

Analiza prostornih podataka o solarnom potencijalu za Hrvatsku

Iva GAŠPAROVIĆ¹, Mateo GAŠPAROVIĆ², Damir MEDAK³,
Mladen ZRINJSKI⁴

SAŽETAK. Zbog svojeg smještaja, blage mediteranske klime i velikog broja sunčanih sati Hrvatska je pogodna za iskorištavanje solarne energije. Novoinstalirani kapaciteti fotonaponskih sustava i koncentriranih solarnih elektrana zbog zaštite okoliša imaju sve značajniju ulogu u ukupnoj elektroenergetskoj potrošnji. Za potrebe energetske planiranja te geoprostorne analize danas je najčešće upotrebljavana mjera solarnog zračenja globalno zračenje na horizontalnoj površini (engl. Global Horizontal Irradiation – GHI). Glavni cilj ovog istraživanja bio je istražiti sve dostupne izvore podataka o solarnom potencijalu za Hrvatsku, s obzirom na to da su podaci o solarnom potencijalu osnovni parametar za energetske planiranje solarnih elektrana. Pritom su uspoređeni podaci poznatih svjetskih baza podataka solarnog zračenja te je uz već dostupne podatke za Hrvatsku, GHI modeliran primjenom programa GRASS GIS, tj. njegova modula r.sun. Također je provedena usporedba i analiza r.sun podataka u odnosu na podatke solarnog zračenja prikupljene satelitskim mjerjenjima te mjerene na zemaljskim postajama Referentne mreže površinskog zračenja (engl. Baseline Surface Radiation Network – BSRN). Istraživanjem izvora podataka o solarnom potencijalu za Hrvatsku uočeno je da ni jedan od dostupnih, nekomercijalnih izvora podataka o solarnom potencijalu ne zadovoljava kriterij velike prostorne rezolucije, stoga se preporuča modeliranje solarnog potencijala. Provedena usporedba vrijednosti GHI-a s različitim izvorima pokazala je kako podaci solarnog potencijala mjereni na MSG (engl. Meteosat Second Generation) satelitu najbolje koreliraju s mjerjenjima na postajama BSRN-a. Analizom modeliranih podataka solarnog potencijala utvrđeno je kako su podaci dobiveni modulom r.sun točniji od podataka SoDa (engl. Solar Radiation Data), pogodne su rezolucije te se mogu upotrebljavati u svrhu određivanja optimalnih lokacija za iskorištavanje solarne energije.

Ključne riječi: solarni potencijal, prostorni podaci, geoprostorne analize, GIS, energetske planiranje, GHI.

¹ Dr. sc. Iva Gašparović, Državna geodetska uprava, Gruška 20, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: iva.gasparovic@dgu.hr;

² Doc. dr. sc. Mateo Gašparović, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mgasparovic@geof.hr;

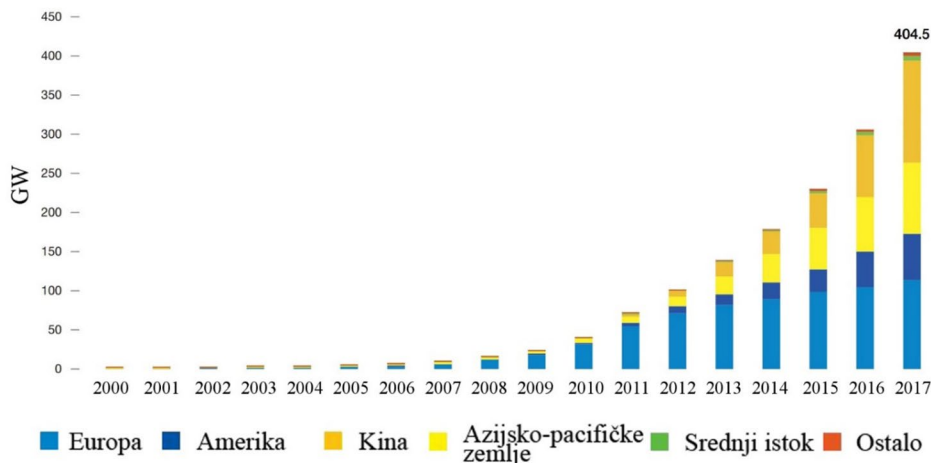
³ Prof. dr. sc. Damir Medak, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: dmedak@geof.hr;

⁴ Izv. prof. dr. sc. Mladen Zrinjski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mzrinjski@geof.hr.

1. Uvod

Posljednjih se godina zbog povećane potrošnje fosilnih goriva, odnosno visoke emisije CO₂ u atmosferu i zagađivanja okoliša koje nepovratno uništava prirodu, svijet sve više okreće obnovljivim, ekološki prihvatljivim izvorima energije. Svrha je iskorištavanja obnovljivih izvora energije prije svega zaštita okoliša, ali pritom dolazi i do povećanja lokalnog i regionalnog razvoja kao i povećanja zaposlenja stanovništva. Osim smanjenja zagađivanja okoliša, smanjenja emisije stakleničkih plinova uzrokovanih upotrebom fosilnih goriva poboljšava se kvaliteta života i povećava sigurnost stanovništva.

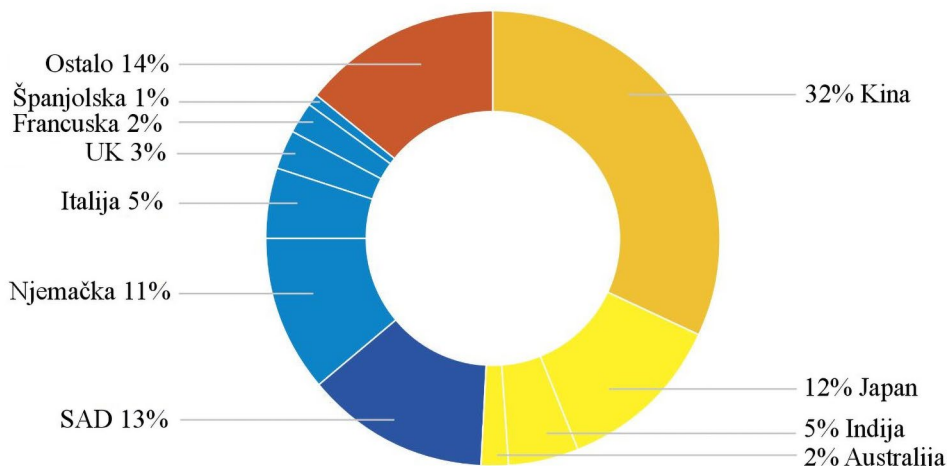
Svake godine sve je više novoinstaliranih kapaciteta fotonaponskih sustava i koncentriranih solarnih elektrana, stoga solarna energija danas ima značajnu ulogu u ukupnoj elektroenergetskoj potrošnji. Do kraja 2017. godine u svijetu je instalirano fotonaponskih sustava kapaciteta približno 400 GW. U 2017. godini instalirano je gotovo 1 GW fotonaponskih kapaciteta, što je približno jednako ukupnom kapacitetu instaliranom do 2012. godine (SPE 2018, slika 1).



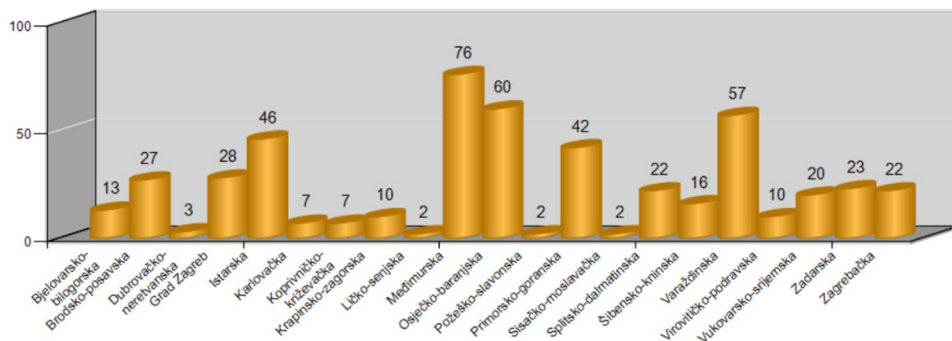
Slika 1. Globalni razvoj instaliranoga kapaciteta solarne energije (SPE 2018).

Kina i ostale azijsko-pacifičke zemlje u 2016. godini pretekle su Europu i postale najveći proizvođači solarne energije u svijetu. Svoju dominaciju nastavile su u 2017. godini i sada proizvode više od 55% svjetske solarne energije, dok se Europa nalazi na drugom mjestu među najvećim svjetskim proizvođačima solarne energije. Pregled 10 najvećih svjetskih proizvođača instaliranoga kapaciteta pokazuje kako Njemačka i dalje prednjači u iskorištavanju solarne energije u Europi, dok rezultati za Hrvatsku nisu dostupni (slika 2).

Prema najnovijim podacima u Registar obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (Registar OIEKPP-a), koji vodi Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, upisan je velik broj projekata koji se odnose na iskorištavanje solarne energije kroz solarne elektrane, fotonaponske sustave i solarne parkove (slika 3).



Slika 2. Udio instaliranoga solarnog kapaciteta 10 najvećih svjetskih proizvođača solarne energije (SPE 2018).



Slika 3. Broj solarnih elektrana po županijama u Hrvatskoj za godinu 2018. iz Registra OIEKPP-a.

Za potrebe projektiranja, odabira optimalnih lokacija te projekcija količine generirane električne energije iz solarnih elektrana potrebno je odrediti potencijal iskorištavanja solarne energije na interesnom području. Kako bi se odredio potencijal iskorištavanja solarne energije, treba prikupiti podatke o solarnom zračenju (Carmargo i dr. 2015, Liang i dr. 2015). Solarno zračenje pritom se dijeli na različite vrste zračenja u odnosu na položaj plohe ili utjecaj atmosfere. Istraživanja Šuri i Hofierka (2004), Martins i dr. (2007), Amillo i dr. (2014) i Huld (2017) kao jednu od vrsta solarnog zračenja navode i obrađuju globalno horizontalno zračenje (engl. Global Horizontal Irradiation – GHI), koje je kao parametar solarnog potencijala također korišteno i u ovome radu. Istraživanjem solarnog potencijala bavili su se Kostoulas i dr. (2004), Vernay i dr. (2014) te Tahir i Asim (2018), koji su u svojim radovima predstavili najveće i najpouzdanije baze podataka solarnog zračenja (tablica 1).

Prikupljanje podataka solarnog zračenja na Zemlji odvija se na globalnim, regionalnim i nacionalnim meteorološkim postajama (Schmithüsen i dr. 2012, König-Langlo i dr. 2013, Escobar i dr. 2015, García i dr. 2017, Gašparović i dr. 2018, Wang i dr. 2019), ali solarno se zračenje može mjeriti i različitim satelitskim misijama koje prikupljaju meteorološke podatke (Martins i dr. 2007, Müller i dr. 2015). Također, solarno zračenje može se modelirati primjenom fizikalnih, ali i empirijskih modela zračenja temeljenih na satelitskim mjerenjima, o čemu se više može pronaći u istraživanjima Paulescu i dr. (2012), Perez i dr. (2013) te Gašparović i dr. (2018).

Jedan od ciljeva ovoga rada bio je prije svega pronaći, analizirati te dati pregled podataka solarnog zračenja za Hrvatsku. Pritom su uspoređeni podaci poznatih svjetskih baza podataka solarnog zračenja, ali uz već dostupne podatke za Hrvatsku, modeliran je GHI primjenom programa GRASS GIS, tj. njegova modula *r.sun*, koji su razvili Hofierka i Šuri (2002), a poslije ga primjenjivali i mnogi drugi autori, npr. Hofierka i dr. (2014), Camargo i dr. (2015), Liang i dr. (2015), Huld (2017) i Gašparović (2018). Također je provedena i usporedba te analiza *r.sun* podataka u odnosu na podatke solarnog zračenja prikupljene satelitskim mjerenjima te mjerene na zemaljskim postajama Referentne mreže površinskog zračenja (engl. Baseline Surface Radiation Network – BSRN).

2. Solarno zračenje

Solarno je zračenje po svojoj prirodi elektromagnetsko zračenje. Elektromagnetski valovi nastaju ubrzanjem nabijenih čestica te se u vakuumu šire brzinom svjetlosti 299 792 458 m/s (Smets i dr. 2016). Elektromagnetski se valovi razlikuju prema načinu nastanka pa se nazivaju radiovalovi, mikrovalovi, toplinski valovi, vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgensko zračenje i gama zračenje. Solarno zračenje koje dopire do nas na Zemlji posljedica je toplinskog zračenja Sunčeve površine, odnosno atomskih ili molekularnih prijelaza (Perić 2002).

Solarno zračenje dijeli se na različite vrste zračenja pa u odnosu na položaj plohe može biti horizontalno, nagnuto ili normalizirano solarno zračenje, a u odnosu na utjecaj atmosfere dijeli se na izvanatmosfersko i atmosfersko solarno zračenje.

2.1. Izvanatmosfersko zračenje na horizontalnu plohu

Izvanatmosfersko zračenje je solarno zračenje na gornjoj granici Zemljine atmosfere, tj. pretpostavka je da Zemljina atmosfera ne postoji. S obzirom na to da se udaljenost Zemlje od Sunca mijenja tijekom godine, mijenja se i izvanatmosfersko zračenje od 1321 W/m² do 1412 W/m². Izvanatmosfersko zračenje okomito na Sunčeve zrake za srednju udaljenost Zemlje od Sunca naziva se solarna konstanta (Matić 2007).

Dnevno izvanatmosfersko zračenje na horizontalnu plohu (H_0) definirano je kao (Perić 2002):

$$H_0 = \frac{86400}{\pi} \bar{E}_0 \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360}{365} n \right) \right) \left(\frac{\pi}{180} \omega_s \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \sin(\omega_s) \right), \quad (1)$$

gdje su:

\bar{E}_0 – solarna konstanta 1367 W/m²

n – redni broj dana u godini

ω_s – Sunčevo vrijeme izlaska Sunca izraženo u kutnoj vrijednosti (°)

δ – deklinacija Sunca

φ – geografska širina Sunca.

2.2. Utjecaj atmosfere na solarno zračenje

Na putu kroz Zemljinu atmosferu solarno zračenje slabi jer se raspršuje na molekulama plinova, vode i česticama prašine te apsorbira prilikom međudjelovanja s molekulama plinova (Duffie i Beckman 2013). Atmosferski utjecaj (A) može se definirati izrazom (Broesamle i dr. 2001):

$$A = \tau_R \cdot \tau_{Ozon} \cdot \tau_{Plin} \cdot \tau_{VP} \cdot \tau_{Ae} \cdot \tau_O, \quad (2)$$

gdje su:

τ_R – Rayleighovo raspršenje

τ_{Ozon} – apsorpcija ozona

τ_{Plin} – apsorpcija u atmosferskim plinovima (O₂ i CO₂)

τ_{VP} – apsorpcija u vodenoj pari (H₂O)

τ_{Ae} – raspršenje na krutim česticama (aerosoli)

τ_O – raspršenje u oblacima.

Perez i dr. (2013) solarno zračenje dijeli na sljedeće komponente:

- direktno horizontalno zračenje
- difuzno horizontalno zračenje
- odbijeno horizontalno zračenje
- globalno horizontalno zračenje.

2.2.1. Direktno horizontalno zračenje

Direktno horizontalno zračenje [engl. Beam (Direct) Horizontal Irradiation – BHI] može se definirati kao količina solarnog zračenja primljena od Sunca bez atmosferskog raspršenja (slika 4). Prolaskom elektromagnetskih valova kroz atmosferu dolazi do međudjelovanja s plinovima i česticama te se solarno zračenje može apsorbirati, odbiti ili nesmetano proći kroz atmosferu.

2.2.2. Difuzno horizontalno zračenje

Difuzno horizontalno zračenje (engl. Diffuse Horizontal Irradiation – DHI) označava solarno zračenje primljeno od Sunca nakon što je njegov smjer promijenjen zbog atmosferskog raspršenja (slika 4). Raspršivanje zračenja uzrokuju molekule plinova i čestice koje se nalaze u atmosferi, a koje solarno zračenje pobuđuje na titranje. Pritom se primljena energija ne širi u jednom smjeru kao pri ulasku u atmosferu, već u svim smjerovima. Zbog toga je utjecaj raspršenja dvojak, smanjuje jačinu solarnog zračenja, ali i uzrokuje raspršeno zračenje s neba (Matić 2007).

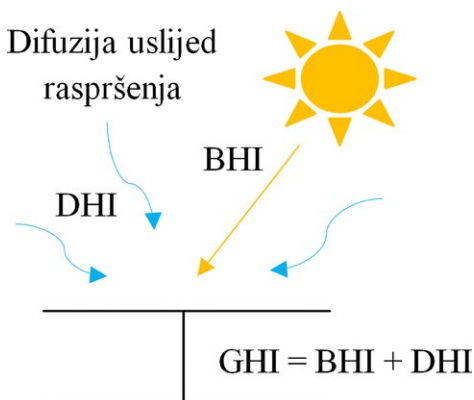
2.2.3. Odbijeno horizontalno zračenje

Nakon prolaska kroz atmosferu solarno zračenje dolazi na Zemljinu površinu, koja ovisno o svojstvima podloge reflektira (odbija) zračenje. Svojstvo podloge da reflektira zračenje izražava se koeficijentom refleksije ili albedom (Smets i dr. 2016). Crno tijelo ima albedo jednak 0, dok bijelo tijelo reflektira zračenje i njegov je albedo 1.

2.2.4. Globalno horizontalno zračenje

Najčešće korištena mjera solarnog zračenja je globalno zračenje na horizontalnoj površini. U istraživanjima solarnog potencijala Hofierka i dr. (2014), Camargo i dr. (2015), Liang i dr. (2015) te Huld (2017) su za potrebe energetskog planiranja upotrebljavali GHI kao mjeru solarnog zračenja. Globalno horizontalno zračenje (GHI) suma je direktnog i difuznog zračenja na Zemljinoj površini (slika 4):

$$\text{GHI} = \text{BHI} + \text{DHI} . \quad (3)$$



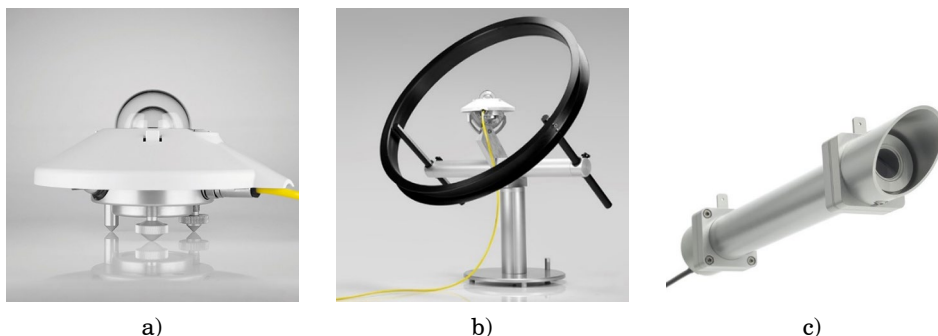
Slika 4. Globalno horizontalno zračenje (Gašparović 2018).

3. Prikupljanje podataka o solarnom zračenju

3.1. Mjerenje solarnog zračenja

Mjerenje solarnog zračenja na Zemlji odvija se na meteorološkim postajama, ali solarno se zračenje može mjeriti i različitim satelitskim misijama koje prikupljaju meteorološke podatke. Mjerenje solarnog zračenja obuhvaća prikupljanje podataka o direktnom ili difuznom kratkovalnom solarnom zračenju te dugovalnom zračenju (Matić 2007).

Mjerenje globalnog solarnog zračenja na horizontalnu plohu sastoji se od direktnog Sunčeva zračenja i difuznog zračenja s neba. Instrument kojim se mjeri globalno horizontalno zračenje naziva se piranometar (slika 5a). Pri postavljanju piranometra važno je da instrument nema prepreke koje su visine veće od 5° u području gdje Sunce izlazi i zalazi te da ne registriira zračenje odbijeno od tla i okolnih objekata (Matić 2007). Piranometrom se provodi i mjerenje difuznoga solarnog zračenja, ali treba zasjeniti Sunčev disk tako da do instrumenta ne dolazi direktno solarno zračenje (slika 5b) (Duffie i Beckman 2013). Odbijeno solarno zračenje mjeri se na visini od 1 m do 2 m iznad Zemljine površine, također piranometrima, ali s posebno dizajniranom maskom koja sprečava da kupolu uređaja obasjava Sunce na izlasku i zalasku (Matić 2007). Direktno solarno zračenje mjeri se pirheliometrom, koji konstantno mora pratiti prividno kretanje Sunca što se najčešće postiže dvoosnim mehanizmima praćenja (slika slika 5c). Vidni kut pirheliometra je samo 5° , kako bi uređaj mjerio samo zračenje koje dolazi iz uskog pojasa oko Sunčeva diska, ali ne i difuzno zračenje s neba (Paulescu i dr. 2012).

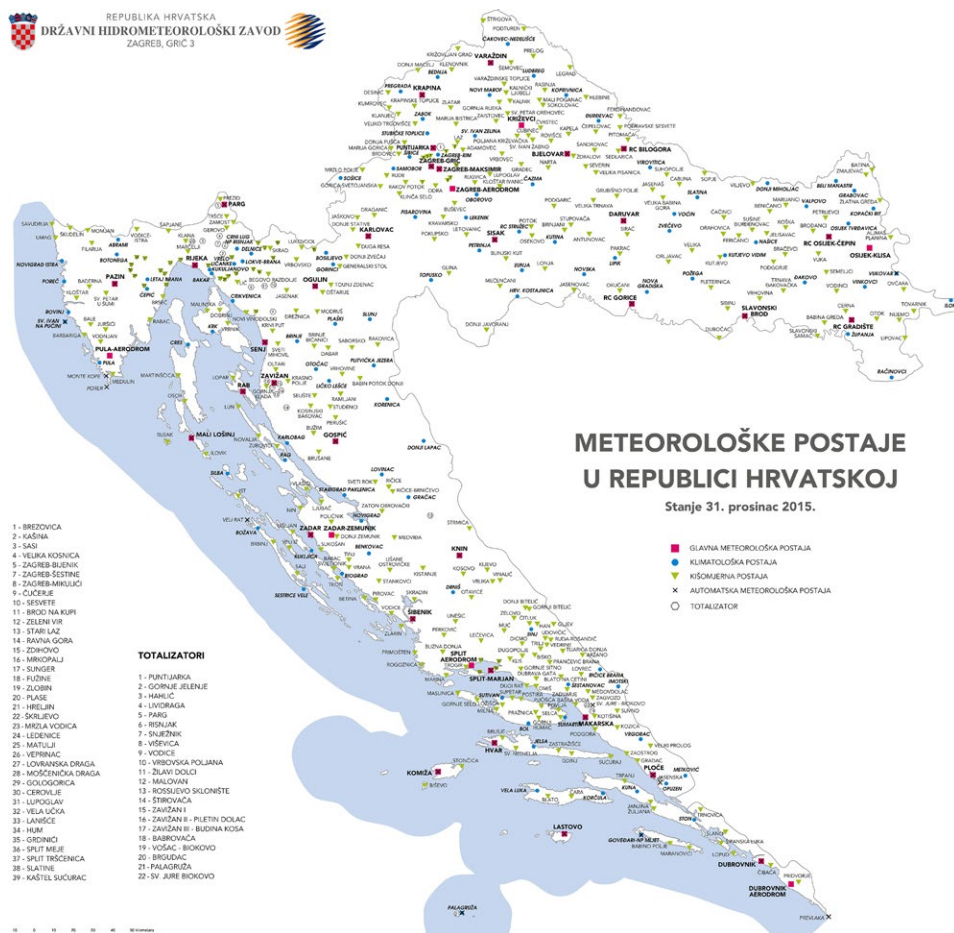


Slika 5. a) Piranometar SMP11 tvrtke Kipp & Zonnen (URL 1), b) piranometar s kružnim sjenilom tvrtke Kipp & Zonnen (URL 2), c) pirheliometar DR02 tvrtke Hukseflux (URL 3).

3.1.1. Državni hidrometeorološki zavod

Mjerenje solarnog zračenja u Hrvatskoj započelo je 1948. godine na opservatoriju Zagreb-Grič, a 1949. godine uspostavljeno je mjerenje globalnoga solarnog zračenja na meteorološkim postajama Sljeme i Split. Mjerenja su tada bila neredovita te je vrlo malo podataka sačuvano, a u razdoblju od 1989. do 2003. godine mjerenje je prekinuto. Tek uspostavom mjerenja na postaji Parg 2003. godine ponovno započinje mjerenje globalnoga solarnog zračenja u Hrvatskoj (Matić 2007).

Državni hidrometeorološki zavod provodi mjerenja na 43 glavne postaje diljem Hrvatske, ali i na klimatskim, fenološkim, kišomjernim i ostalim postajama (slika 6). Osim meteoroloških podataka, prikupljaju se i podaci o solarnom zračenju. Operativna, stalna mjerenja obavljaju se samo za globalno i difuzno zračenje, dok se mjerenja direktnoga solarnog zračenja obavljaju samo povremeno i služe za kontrolu rada senzora globalnog i difuznog zračenja. Na glavnim meteorološkim postajama mjerni sustavi procesiraju mjerenja globalnog i difuznog zračenja u intervalima od 1 minute (DHMZ 2008).



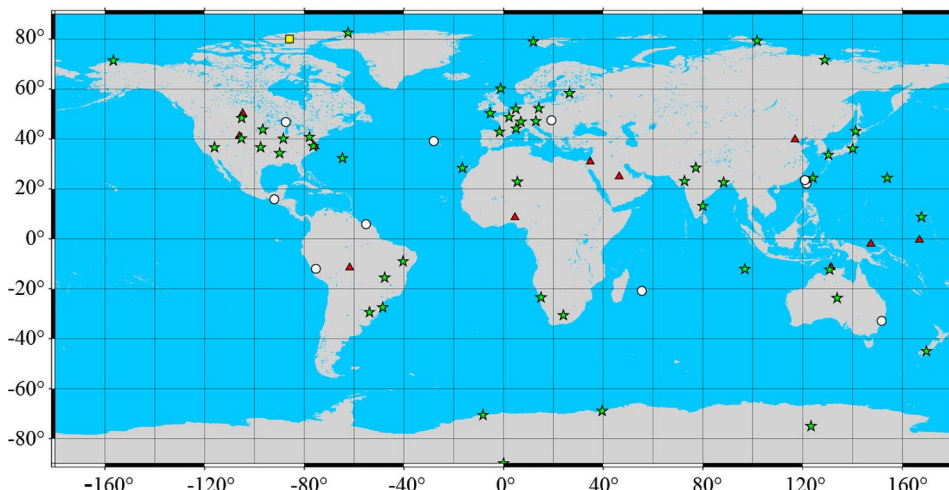
Slika 6. Mreža meteoroloških postaja u Republici Hrvatskoj (URL 4).

3.1.2. Referentna mreža površinskog zračenja

Podatke solarnog zračenja mjerene na Zemlji moguće je preuzeti s postaja Referentne mreže površinskog zračenja (BSRN). Mreža referentnih postaja za površinsko zračenje dizajnirana je 2004. godine u programu Globalnog sustava promatranja klimatskih promjena (engl. Global Climate Observing System – GCOS). BSRN trenutačno ima 63 postaje u različitim klimatskim zonama na svijetu, pokrivajući raspon geografske širine od 80° N do 90° S (slika 7). Solarno i atmosfersko zračenje mjere se instrumentima najviše dostupne točnosti i s visokom vremenskom rezolucijom od 1 do 3 minute. Glavni je cilj BSRN-a osigurati opažanje najbolje moguće kvalitete za kratkovalno i dugovalno zračenje s visokom vremenskom rezolucijom. BSRN upotrebljava se (König-Langlo i dr. 2013):

- za praćenje kratkovalnog i dugovalnog zračenja i njihovih komponenti najkvalitetnijim instrumentima
- za pružanje podataka za validaciju i evaluaciju satelitskih procjena površinskih zračenja
- za izradu visokokvalitetnih podataka motrenja za usporedbu s klimatskim modelima i za razvoj lokalnih klimatologija zračenja.

Podaci o solarnom zračenju mjereni na postajama BSRN-a dostupni su registriranim korisnicima u specifičnom formatu tzv. stanica za arhivu (engl. station-to-archive), koji nije moguće čitati bez uputa danih u priručniku formata BSRN-a. Zbog toga je razvijena aplikacija BSRN-Toolbox (Schmithüsen i dr. 2012), koju je moguće preuzeti na mrežnim stranicama BSRN-a, a služi za jednostavno konvertiranje podataka u čitljive tablične formate.



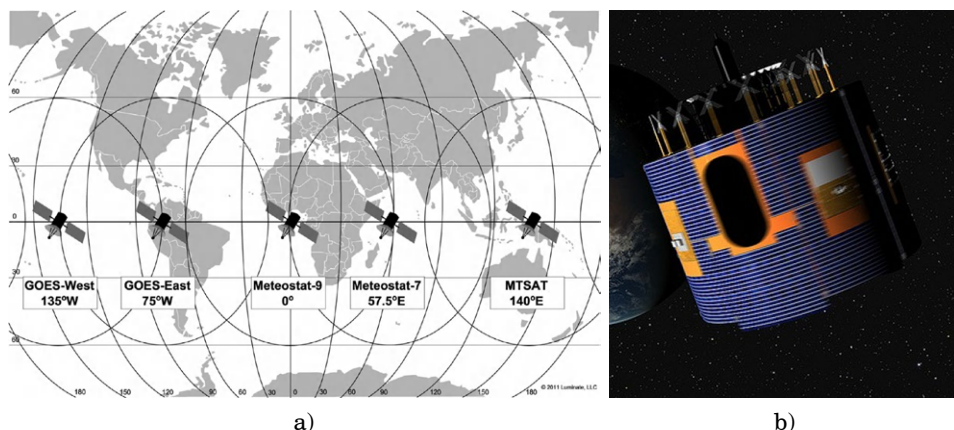
Legenda

- ★ Aktivne
- Neaktivne
- ▲ Zatvorene
- Kandidati

Slika 7. Lokacije postaja BSRN-a sa statusom rada u rujnu 2018. (URL 5).

3.1.3. Satelitska mjerenja solarnog zračenja na Zemlji

Osim mjerenja solarnog zračenja na meteorološkim postajama na Zemlji, podatke o solarnom zračenju moguće je prikupiti opažanjem Zemlje sa satelita. Meteorološki sateliti mogu imati polarne ili ekvatorijalne orbite (geostacionarni sateliti). Sateliti polarnih orbita nalaze se na visini od 850 km iznad Zemljine površine i stoga postižu veću rezoluciju i točnost od geostacionarnih satelita koji se nalaze na 36 000 km iznad Zemlje, ali zbog stalnog motrenja istog dijela Zemlje te mjerenja u većoj vremenskoj rezoluciji preferiraju se geostacionarni sateliti za potrebe praćenja solarnog zračenja. Meteorološki sateliti opremljeni su s nekoliko senzora za mjerenje zračenja. Aktualna generacija meteoroloških satelita (slika 8a) iz kojih je moguće dobiti podatke o solarnom zračenju su GOES 8–15 (engl. Geostationary Operational Environmental Satellite) za područje SAD-a, MSG (slika 8b) (engl. Meteosat Second Generation) koji pokrivaju Europu i Afriku te MTSAT (engl. Multi-Functional Transport Satellite) za područje Australije i Pacifika (Perez i dr. 2013).



Slika 8. a) Geostacionarni meteorološki sateliti (Vignola i dr. 2013), b) MSG satelit (EU-METSAT 2015).

Temeljem opažanja sa satelita Meteosat izvedena su dva seta podataka: SARAH (engl. Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat) i operativni set podataka. SARAH čine klimatološki podaci o površinskom dolaznom kratkovalnom zračenju (engl. Surface Incoming Shortwave radiation – SIS), direktnom normalnom zračenju (engl. Direct Normal Irradiation – DNI) i efektivnom albedu oblaka (engl. Effective Cloud Albedo – CAL) (Amillo i dr. 2014, Müller i dr. 2015).

3.2. Modeliranje solarnog zračenja

Postoje mnogi modeli temeljem kojih se iz podataka satelitskih misija određuju vrijednosti solarnog zračenja na Zemlji, a dijelimo ih na fizikalne, empirijske i poluempirijske. Fizikalni modeli upotrebljavaju satelitske snimke i ostale atmosfere podatke da bi izračunali solarno zračenje koje prolazi kroz atmosferu.

Fizikalni modeli primijenjeni su za određivanje solarnih baza podataka NASA SSE (engl. Surface Meteorology and Solar Energy) koji nudi globalne solarne podatke i Heliosat za Europu i Afriku (Miller i dr. 2013).

Empirijski modeli iz vidljivih kanala satelitskih snimaka određuju koeficijent oblačnosti, koji se upotrebljava za modeliranje GHI-a za vedro nebo. Poluempirijski modeli za određivanje solarnog zračenja upotrebljavaju jednostavne metode prijenosa zračenja i mjerene podatke, a primijenjeni su za određivanje solarnih baza podataka SolarAnywhere i SolarGIS (Perez i dr. 2013).

Modul *r.sun* implementiran u program GRASS GIS primjer je fizikalnog modela. Razvili su ga autori Hofierka i Šúri (2002) za potrebe modeliranja solarnog zračenja. Primjenom modula *r.sun* moguće je modelirati GHI, odnosno njegove maksimalne vrijednosti, GHI_{CS} , koje ne uzimaju u obzir utjecaj atmosfere (Hofierka i Šúri 2002). Za izračun GHI-a treba imati digitalni model visina, a za ovo je istraživanje upotrijebljen ASTER (engl. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM (engl. Global Digital Elevation Model). Ostali ulazni podaci uključuju faktor Linke Turbidity (faktor LT), koji je izračunat korištenjem programa razvijenog u programskom jeziku Python (Gašparović 2018), temeljenog na PVLIB (Holmgren i dr. 2015). S obzirom na to da se faktor LT ne mijenja znatno s promjenom lokacije, bilo je dovoljno izračunati njegove vrijednosti na svakih 10 km x 10 km. Kako bi se uklonio utjecaj visina na faktor LT, njegove su vrijednosti normalizirane na srednju razinu mora (WMO 1981):

$$LT_{\text{norm}} = LT + 0,00035 \cdot h, \quad (4)$$

gdje je LT_{norm} vrijednost normaliziranog LT-a na srednju razinu mora, a h je nadmorska visina.

Radi ubrzanja rada modula *r.sun* napravljeno je nekoliko optimizacija kao i izračun rasterskih matrica *aspect* i *slope*, koje su upotrijebljene kao ulazni parametri za izračun globalnoga horizontalnog zračenja za vedro nebo, GHI_{CS} (Gašparović 2018). Na taj način određen je GHI_{CS} rezolucije 30 m za sve dane 2013. godine.

Prethodno izračunati GHI_{CS} ispravljen je za atmosferski utjecaj temeljem koeficijenta vedrine neba, k_{CS} . Navedeni koeficijent može se odrediti na više načina temeljem direktnog ili difuznog zračenja (Šúri i Hofierka 2004), podataka sa zemaljskih mjernih postaja (Camargo i dr. 2015) ili različitim meteorološkim satelitskim podacima (Müller i dr. 2015). Većina satelitskih podataka koji se upotrebljavaju za određivanje koeficijenta vedrine neba komercijalna je i nije dostupna u vremenskoj rezoluciji od jednog dana (Gašparović i dr. 2018). Ako se upotrebljavaju podaci sa zemaljskih mjernih postaja, postoji problem nejednake rasprostranjenosti postaja u Republici Hrvatskoj, kao i problem nedostupnosti sirovih podataka mjerenja. Stoga su za izračun koeficijenta k_{CS} upotrijebljeni podaci MSG-a, odnosno efektivni albedo oblaka CAL koji su dostupni bez naknade i prethodno primijenjeni u istraživanjima drugih autora (Sancho i dr. 2011, Müller i dr. 2015, Huld 2017). Koeficijent vedrine neba izračunat je primjenom izraza (Müller i dr. 2015):

$$k_{CS} = \begin{cases} 1,05 & \text{za } CAL \leq -0,2 \\ 1 - CAL & \text{za } -0,2 < CAL \leq 0,8 \\ 1,1661 - 1,781 \cdot CAL + 0,73 \cdot CAL^2 & \text{za } 0,8 < CAL \leq 1,05 \\ 0,09 & \text{za } CAL > 1,05 \end{cases} \quad (5)$$

Temeljem sljedećeg izraza određen je i stvarni GHI odnosno GHI na Zemlji (Gašparović 2018):

$$GHI = k_{CS} \cdot GHI_{CS} \quad (6)$$

3.3. Baze podataka solarnog zračenja

U mnogim istraživanjima (Kostoulas i dr. 2004, Vernay i dr. 2014, Amillo i dr. 2014 te Tahir i Asim 2018) autori razvijaju i predlažu upotrebu podataka o solarnom zračenju iz baza podataka solarnog zračenja (tablica 1). Prilikom upotrebe tih baza podataka potrebno je razumjeti različite karakteristike podataka, kao što su: područje primjene podataka, vremenska rezolucija, prostorna rezolucija, vremensko razdoblje prikupljanja podataka, točnost podataka te prisutnost sustavnih ili drugih pogrešaka (Vignola i dr. 2013). Točnost svake od baza podataka varira ovisno o lokaciji istraživanja i vremenskom razdoblju (Vernay i dr. 2014).

Tablica 1. Baze podataka solarnog zračenja (Vernay i dr. 2014).

| Naziv | Pokrivenost | Prostorna rezolucija | Vremenska rezolucija | Vrsta podataka | Dostupnost |
|---------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 3TIER | globalna | 3,7 km | 30 min | GHI, DHI, DNI | komercijalan |
| CM-SAF | Europa, Afrika | 15 km | 15 min | GHI | besplatan |
| DLR-ISIS | globalna | 280 km | 3 h | GHI, DNI | besplatan za znanstvena istraživanja |
| EnMetSol | Europa, dio Afrike | 1 km 2,5 km | 15 min 30 min | GHI, DHI, GTI, DNI | besplatan za znanstvena istraživanja |
| Focus solar | Sjeverna Amerika, Europa, Afrika, dio Azije, Oceanija | 1 km | 30 min | GHI, DHI, DNI | komercijalan |
| Helio-Clim-1 (SoDa) | Europa, Afrika, dio Južne Amerike | 20 km | dnevna | GHI, DHI, DNI | besplatan |
| Helio-Clim-3 (SoDa) | Europa, Afrika, dio Južne Amerike | 3 km | 15 min | GHI, DHI, GTI, DNI | komercijalan (od 2005.) |
| Land SAF | Europa, Afrika, dio Južne Amerike | 3 km | 30 min | GHI | besplatan |

| Naziv | Pokrivenost | Prostorna rezolucija | Vremenska rezolucija | Vrsta podataka | Dostupnost |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------------------|
| meteonorm | globalna | 3 km 30 km | mjesečna | GHI, DHI, GTI, DNI | komercijalan |
| NASA SSE Release 6.0 | globalna | 111 km | 3 h | GHI, DHI, DNI | besplatan |
| OSI SAF | Europa, Afrika, Amerika | 5,6 km | 30 min | GHI | besplatan |
| PVGIS CM-SAF | Europa, Afrika | 2,8 km | 30 min | GHI, DHI, GTI, DNI | besplatan |
| Satel-Light | Europa, sjeverna Afrika | 3 km | 30 min | GHI, DHI, GTI | besplatan |
| SolarAnywhere | Sjeverna Amerika, Havaji, Karibi | 10 km | 1 h | GHI, DHI, DNI | komercijalan |
| SolarGIS | globalna | 3 km | 15 min 30 min | GHI, DHI, GTI, DNI | komercijalan |
| Solemi | Europa, Afrika, dio Južne Amerike, Indijski ocean, Azija | 2,5 km | 30 min | GHI, DHI, DNI | besplatan za znanstvena istraživanja |

4. Usporedba podataka solarnog potencijala za potrebe geoprostornih analiza

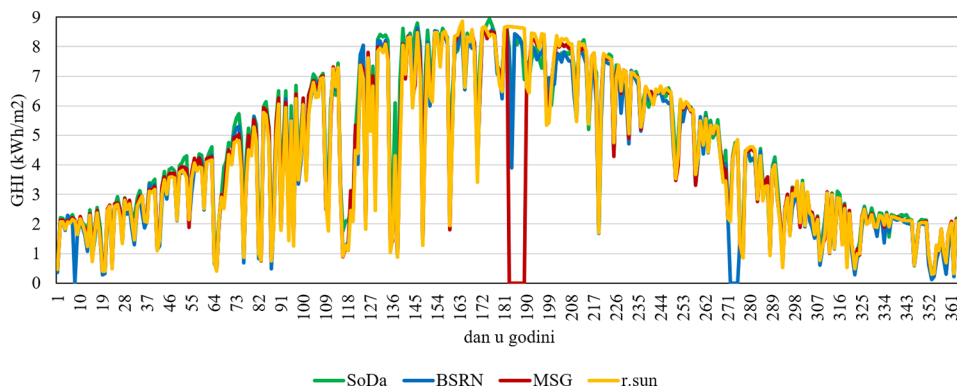
Za potrebe geoprostornih analiza u energetsom planiranju potrebno je imati kvalitetne, točne i aktualne podatke solarnog potencijala velike prostorne rezolucije. Optimalna prostorna rezolucija za potrebe prostornog planiranja u pronalaženju potencijalnih lokacija za solarne elektrane iznosi <100 m (Gašparović 2018). Iako su mjerenja solarnog potencijala na meteorološkim postajama (BSRN, DHMZ i dr.) najtočnija (Gašparović i dr. 2018), ne mogu se upotrebljavati za potrebe geoprostornih analiza zbog svoje prevelike raspršenosti, tj. male prostorne rezolucije (Gašparović 2018). S druge strane komercijalni poslužitelji solarnog potencijala, tj. baze podataka solarnog zračenja poput SoDa (engl. Solar Radiation Data), ne nude dovoljnu rezoluciju za potrebe prostornog planiranja (3 km, iz rada Gašparović i dr. 2018).

Istraživanjem različitih izvora podataka solarnog zračenja ustanovljeno je kako svaki od njih ima određena ograničenja, bilo pristupa i naknade za korištenje ili ograničenja prostorne rezolucije. Podaci solarnog zračenja dobiveni mjerenjem na Zemlji najbolji su podaci za određivanje solarnog potencijala u točki, ali za provođenje analize na širem prostoru nedovoljne su gustoće te zahtijevaju interpolaciju podataka koja smanjuje njihovu točnost. Nadalje, podaci solarnog zračenja izrađeni temeljem satelitskih opažanja MSG-a prostorne su rezolucije 5,6 km x 5,6 km (0,05° x 0,05°), koja nije dovoljna za potrebe energetske planiranja. Upravo stoga za potrebe energetske planiranja preporuča se modeliranje solarnog zračenja u većoj rezoluciji.

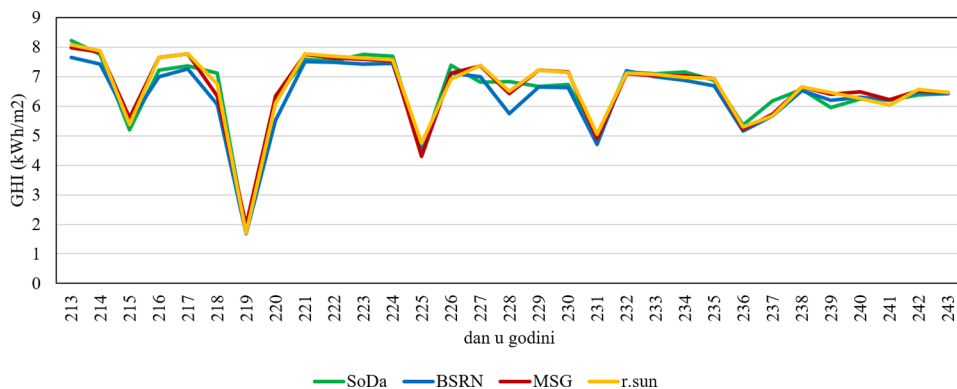
S obzirom na velik broj mogućih izvora podataka solarnog zračenja, odabrani su izvori koji su besplatno dostupni za područje Hrvatske te je napravljena njihova usporedba. Izuzevši modelirani GHI izračunat u Pythonu, a temeljen na modulu

r.sun, istraživanje uključuje i podatke GHI-a dobivene sa satelita MSG-a, odnosno podatke površinskoga dolaznoga kratkovalnog zračenja. Kako bi se mogli usporediti, oba podatka transformirana su u isti sustav i kartografsku projekciju HTRS96/TM i svedena na istovjetnu prostornu rezoluciju od 30 m x 30 m. Za to je primijenjen modul *r.resamp.interp* i metoda bilinearne interpolacije (Gašparović 2018). Također, za usporedbu su upotrijebljeni podaci komercijalnog poslužitelja SoDa te podaci kratkovalnoga globalnog zračenja mjereni na BSRN postaji Carpentras (Morel 2013a, 2013b, 2013c, 2013d, 2013e, 2013f, 2013g, 2013h, 2013i, Morel 2014a, 2014b, 2014c) s obzirom na to da je riječ o podacima solarnog zračenja visoke točnosti. U nastavku je prikazana dnevna varijacija GHI-a iz različitih izvora (SoDa, BSRN, MSG i *r.sun*) za 2013. godinu (slika 9) i varijacija GHI-a za kolovoz 2013. godine (slika 10). Navedena analiza provedena je na mjernoj postaji BSRN-a najbližoj Hrvatskoj, Carpentras (CAR) u Francuskoj.

Iz prethodnih analiza varijacija GHI-a i istraživanja drugih autora (Vignola i dr. 2013, Gašparović i dr. 2018, Tahir i Asim 2018) jasno je vidljiva velika korelacija svih izvornika za GHI. S obzirom na to da su BSRN podaci realni i točni, odnosno mjereni na Zemljinoj površini, uzimamo ih kao referentne. U tom slučaju treba



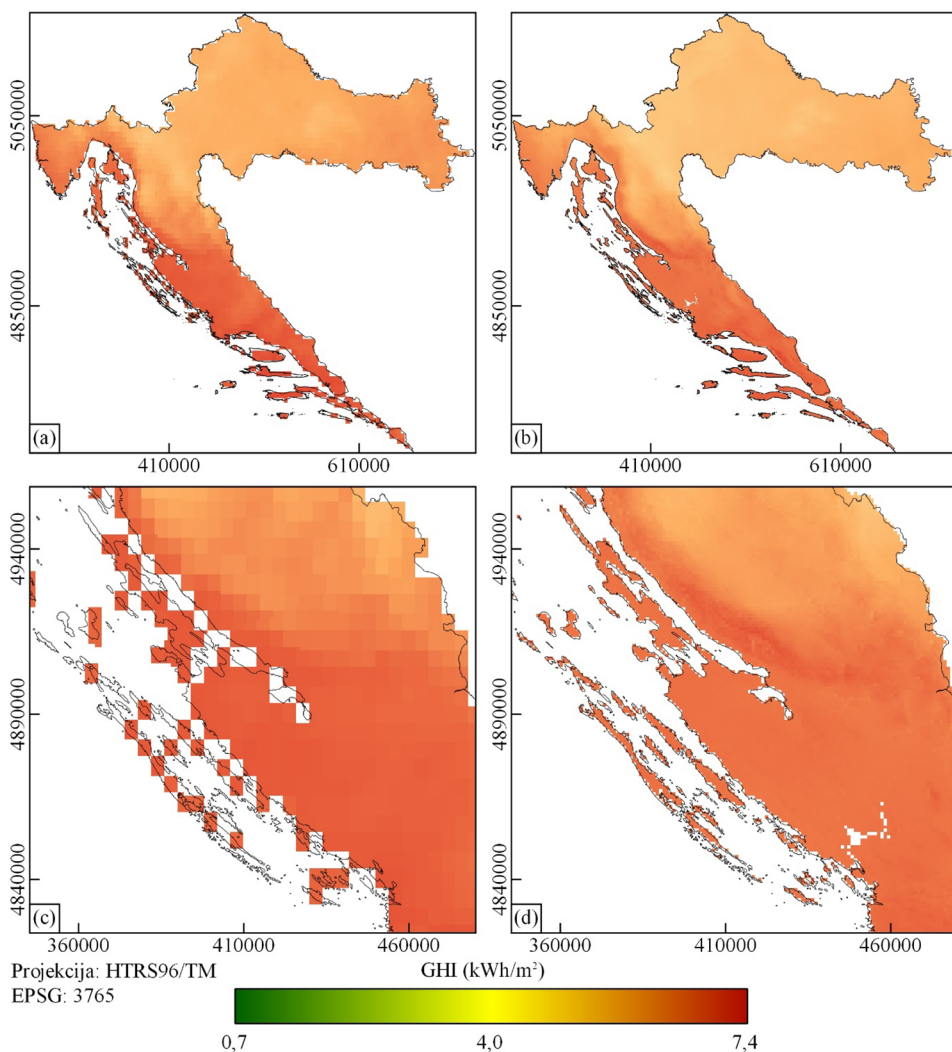
Slika 9. Varijacija GHI-a za 2013. godinu na mjernoj postaji CAR.



Slika 10. Varijacija GHI-a za kolovoz 2013. godine na mjernoj postaji CAR.

istaknuti kako MSG najviše korelira s podacima BSRN-a, zatim *r.sun* te naposljetku SoDa. Analiza točnosti navedenih izvora GHI-a detaljnije je opisana i obrazložena u radu Gašparović i dr. (2018).

Radi jasnijeg razumijevanja važnosti prostorne rezolucije GHI-a za potrebe energetskog planiranja izrađen je prikaz GHI-a na području Hrvatske mjereno temeljem MSG satelita prostorne rezolucije 5,6 km x 5,6 km (slika 11a i slika 11c) i modeliran u programu GRASS GIS prostorne rezolucije 30 m x 30 m (slika 11b i slika 11d). U ovom slučaju, GHI je izračunat kao mjesečni prosjek za kolovoz 2013. godine. Mjesečni ili godišnji prosjeci GHI-a danas se često upotrebljavaju za



Slika 11. GHI za kolovoz 2013. godine na području Hrvatske (a, c) mjereno temeljem MSG satelita, (b, d) modelirano u GRASS GIS-u.

multikriterijske GIS analize. Usporednim prikazom vrijednosti GHI-a određenog temeljem MSG satelita i modeliranog primjenom modula *r.sun* uočava se korelacija dobivenih rezultata, ali i nemogućnost korištenja podataka dobivenih s MSG satelita za energetska planiranje. Temeljem vrijednosti GHI-a prikazanih na slici 11, Hrvatska je pogodna za iskorištavanje solarne energije s obzirom na to da gotovo cijeli njezin teritorij ima vrijednost GHI-a u kolovozu 2013. godine veći od 6 kWh/m². Također, jasno se vidi kako južni i priobalni dio zapadne Hrvatske ima veći GHI od ostatka zemlje. Korištenjem modeliranih podataka GHI-a prostorne rezolucije 30 m x 30 m osigurava se točnije određivanje klimatski pogodnih područja za iskorištavanje solarne energije.

5. Zaključak

Glavni cilj ovog istraživanja bio je istražiti sve dostupne izvore podataka o solarnom potencijalu za Republiku Hrvatsku, s obzirom na to da su podaci o solarnom potencijalu osnovni parametar za energetska planiranje solarnih elektrana.

Istraživanjem izvora podataka o solarnom potencijalu za Republiku Hrvatsku uočeno je da ni jedan od dostupnih, nekomercijalnih izvora podataka o solarnom potencijalu ne zadovoljava kriterij velike prostorne rezolucije, stoga se preporuča modeliranje solarnog potencijala. U istraživanju se upotrebljavao algoritam za računanje solarnog potencijala u Republici Hrvatskoj u velikoj rezoluciji, koji se temelji na modulu *r.sun* programa otvorenoga koda GRASS GIS. Pritom se izračunati solarni potencijal maksimalne vrijednosti umanjuje za utjecaj atmosfere temeljem stvarnih podataka prikupljenih s meteoroloških satelita.

Kako bi se istražila korelacija izračunatoga solarnog potencijala napravljena je usporedba sa stvarnim mjerenjima na Zemlji, na odabranoj meteorološkoj postaji BSRN-a najbližoj Hrvatskoj, Carpentras u Francuskoj te s podacima MSG-a i SoDa. Provedena usporedba vrijednosti GHI-a s različitim izvorima pokazala je kako podaci MSG-a i BSRN-a najbolje koreliraju s obzirom na to da je riječ o mjeranim podacima, dok su *r.sun* i SoDa modelirani. Međutim, utvrđeno je kako su podaci dobiveni modulom *r.sun* točniji od podataka SoDa, pogodne su rezolucije te se mogu upotrebljavati u svrhu određivanja optimalnih lokacija za iskorištavanje solarne energije.

Literatura

- Amillo, A. G., Huld, T., Müller, R. (2014): A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation, *Remote Sensing*, 6, 9, 8165–8189.
- Broesamle, H., Mannstein, H., Schillings, C., Trieb, F. (2001): Assessment of solar electricity potentials in North Africa based on satellite data and a geographic information system, *Solar Energy*, 70, 1, 1–12.
- Camargo, L. R., Zink, R., Dorner, W., Stoeglehner, G. (2015): Spatio-temporal modeling of roof-top photovoltaic panels for improved technical potential assessment and electricity peak load offsetting at the municipal scale, *Computers, Environment and Urban Systems*, 52, 58–69.
- DHMZ (2008): Naputak za opažanja i mjerenja na glavnim meteorološkim postajama, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. (2013): *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
- Escobar, R. A., Cortés, C., Pino, A., Salgado, M., Pereira, E. B., Martins, F. R., Boland, J., Cardemil, J. M. (2015): Estimating the potential for solar energy utilization in Chile by satellite-derived data and ground station measurements, *Solar Energy*, 121, 139–151.
- EUMETSAT (2015): METEOSAT: Europe's geostationary meteorological satellites, Darmstadt, Germany.
- García, R. D., Cuevas, E., García, O. E., Ramón, R., Romero-Campos, P. M., de Ory, F., Cachorro, V. E., de Frutos, A. (2017): Compatibility of different measurement techniques of global solar radiation and application for long-term observations at Izaña Observatory, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 731–743.
- Gašparović, I. (2018): Geoprostorne analize potencijala solarne energije u Republici Hrvatskoj primjenom multikriterijskoga odlučivanja, doktorski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Gašparović, I., Gašparović, M., Medak, D. (2018): Determining and analysing solar irradiation based on freely available data: A case study from Croatia, *Environmental Development*, 26, 2, 55–67.
- 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, 51–70.
- Hofierka, J., Kačuk, J., Gallay, M. (2014): The spatial distribution of photovoltaic power plants in relation to solar resource potential: the case of the Czech Republic and Slovakia, *Moravian Geographical Reports*, 22, 2, 26–33.
- Holmgren, W. F., Andrews, R. W., Lorenzo, A. T., Stein, J. S. (2015): PVLIB python 2015, In *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd*, New Orleans, 1–5.
- Huld, T. (2017): PVMAPS: Software tools and data for the estimation of solar radiation and photovoltaic module performance over large geographical areas, *Solar Energy*, 142, 171–181.
- Kostoulas, A. G. K., Vokas, G. A., Skittides, F. (2004): Review of Solar Radiation estimation and Solar Data Banks elaboration methodologies over Greece, *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 5, 3, 1221–1227.
- König-Langlo, G., Sieger, R., Schmithüsen, H., Bücken, A., Richter, F., Dutton, E. G. (2013): The Baseline Surface Radiation Network and its World Radiation

- Monitoring Centre at the Alfred Wegener Institute, GCOS – 174, WCRP Report 24/2013, Bremerhaven, Germany.
- Liang, J., Gong, J., Zhou, J., Ibrahim, A. N., Li, M. (2015): An open-source 3D solar radiation model integrated with a 3D Geographic Information System, *Environmental Modelling and Software*, 64, C, 94–101.
- Martins, F. R., Pereira, E. B., Abreu, S. L. (2007): Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project, *Solar Energy*, 81, 4, 517–528.
- Matić, Z. (2007): Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske: Priručnik za energetska korištenje Sunčevog zračenja, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb.
- Miller, S. D., Heidinger, A. K., Sengupta, M. (2013): Physically Based Satellite Methods, In *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, Kleissl, J. (ed.), Elsevier, 49–80.
- Morel, J. P. (2013a): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-01), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2013b): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-02), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2013c): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-03), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2013d): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-04), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2013e): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-05), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2013f): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-06), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2013g): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-07), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2013h): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-08), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2013i): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-09), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2014a): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-10), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2014b): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-11), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Morel, J. P. (2014c): Basic measurements of radiation at station Carpentras (2013-12), Centre Radiometrique, PANGAEA, Carpentras, France.
- Müller, R., Pfeifroth, U., Träger-Chatterjee, C., Trentmann, J., Cremer, R. (2015): Digging the METEOSAT treasure – 3 decades of solar surface radiation, *Remote Sensing*, 7, 6, 8067–8101.
- Paulescu, M., Paulescu, E., Gravila, P., Badescu, V. (2012): *Weather modeling and forecasting of PV systems operation*, Springer Science & Business Media, London, UK.
- Perez, R., Cebecauer, T., Šúri, M. (2013): Semi-Empirical Satellite Models, In *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, Kleissl, J. (ed.), Elsevier, 21–48.
- Perić, M. (2002): Računalna simulacija rada fotonaponskog sustava, magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

- Sancho, J. M., Sánchez de Cos, M. C., Jiménez, C. (2011): Comparison of global irradiance measurements of the official Spanish radiometric network for 2006 with satellite estimated data, *Tethys*, 8, 43–52.
- Schmithüsen, H., Sieger, R., König-Langlo, G. (2012): BSRN Toolbox V2.0 – a tool to create quality checked output files from BSRN datasets and station-to-archive files, Alfred Wegener Institute, Helmholtz Center for Polar and Marine Research, PANGAEA, Bremerhaven, Germany.
- Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Zeman, M., van Swaaij, R. (2016): *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*, UIT Cambridge Limited, Cambridge, UK.
- SPE (2018): *Global Market Outlook for Solar Power / 2018 – 2022*, Solar Power Europe, Brussels, Belgium.
- Šúri, M., Hofierka, J. (2004): A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments, *Transaction in GIS*, 8, 2, 175–190.
- Tahir, Z. R., Asim, M. (2018): Surface measured solar radiation data and solar energy resource assessment of Pakistan: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2839–2861.
- Vernay, C., Pitaval, S., Blanc, P. (2014): Review of satellite-based surface solar irradiation databases for the engineering, the financing and the operating of photovoltaic systems, *Energy Procedia*, 57, 1383–1391.
- Vignola, F. E., McMahan, A. C., Grover, C. N. (2013): Bankable Solar-Radiation Datasets, In *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, Kleissl, J. (ed.), Elsevier, 97–132.
- Wang, P., van Westrhenen, R., Meirink, J. F., van der Veen, S., Knap, W. (2019): Surface solar radiation forecasts by advecting cloud physical properties derived from Meteosat Second Generation observations, *Solar Energy*, 177, 47–58.
- WMO (1981): *Meteorological Aspects of Utilization of Solar Radiation as an Energy Source*, World Meteorological Organisation, Technical Note, 172, Geneva, Switzerland.

Mrežne adrese

URL 1: Kipp & Zonen, <http://www.kippzonen.com/>, (1.9.2018.).

URL 2: CM121B/C Shadow Ring for pyranometers – Kipp & Zonen, <http://www.kippzonen.com/Product/42/CM121B-C-Shadow-Ring#.W1ysxdIzaUk>, (1.9.2018.).

URL 3: DR02 pyrheliometer – Hukseflux, <https://www.hukseflux.com/product/dr02-pyrheliometer>, (2.9.2018.).

URL 4: DHMZ, http://meteo.hr/infrastruktura.php?section=mreze_postaja¶m=pmm, (13.9.2018.).

URL 5: Baseline Surface Radiation Network: Maps, <https://bsrn.awi.de/en/nc/stations/maps/>, (11.9.2018.).

Analysis of Solar Potential Spatial Data for Croatia

ABSTRACT. The Republic of Croatia due to its accommodation and mild, Mediterranean climate and a large number of sunny hours is suitable for exploiting solar energy. The newly installed capacities of photovoltaic systems and solar power plants each year are becoming more important in the overall energy consumption due to environmental protection. For the purpose of energy planning and geospatial analysis, the most commonly used solar irradiation measure is global horizontal irradiation (GHI). The main purpose of this study was to explore all available solar energy data sources for Croatia, given that solar potential data is a basic parameter for solar power plant planning. In the research data from known global solar radiation databases were compared. In addition to the available data for Croatia, GHI has been modelled using the module r.sun program in the GRASS GIS program. Its. Comparison and analysis of the r.sun data were also performed with respect to solar radiation data obtained from satellite measurements and measured at Baseline Surface Radiation Network (BSRN) stations. Exploring the solar potential data sources for Croatia, it was concluded that none of the available, non-commercial sources of solar potential data does meet the criterion of large spatial resolution, so solar energy modelling is recommended. A comparison of the GHI values from different sources has shown that solar energy data measured on MSG (Meteosat Second Generation) satellites correlate best with measurements at BSRN stations. Analysing modelled solar potential data has shown that the data obtained by the r.sun module are more accurate than the data of the commercial provider SoDa (Solar Radiation Data) also have suitable resolution and can be used to determine the optimal locations for exploiting solar energy.

Keywords: solar potential, spatial data, geospatial analysis, GIS, energy planning, GHI.

Primljeno / Received: 2019-01-18

Prihvaćeno / Accepted: 2019-02-27