

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**DISLOCIRANI PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI
STUDIJ ENERGETSKE UČINKOVITOSTI
I OBNOVLJIVIH IZVORA U ŠIBENIKU**

ZAVRŠNI RAD br. 101

**PREGLED POTENCIJALNIH LOKACIJA
ZA PLUTAJUĆE SOLARNE ELEKTRANE U
REPUBLICI HRVATSKOJ**

Marjan Anušić

Šibenik, Lipanj 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

STUDIJ ENERGETSKE UČINKOVITOSTI I OBNOVLJIVIH IZVORA

Zagreb, 28. veljače 2022.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 101

Pristupnik: **Marjan Anušić (9996006867)**

Studij: *Energetska učinkovitost I obnovljivi izvori*

Smjer: *Obnovljivi izvori energije*

Mentor: *Goran Krajačić*

Zadatak: **Pregled potencijalnih lokacija za plutajuće solarne elektrane u Republici Hrvatskoj**

Opis zadatka:

Fotonaponski paneli se sve više primjenjuju za proizvodnju električne energije te se trošak primjene fotonaponskih panela smanjuje zadnjih 20 godina. Jedno od ograničenja fotonaponskih elektrana je raspoloživa površina, zbog čega se u nekim slučajevima paneli stavljaju na vodene površine. Paneli u tom slučaju smanjuju vodenu površinu izloženu sunčevom zračenju i vjetrovima te na taj način smanjuju ishlapljivanje vode što može biti jedna od prednosti njihove instalacije na određenim površinama. U okviru rada potrebno je: 1. Mapirati vodene površine u Hrvatskoj te procijeniti njihov potencijal za proizvodnju električne energije iz plutajućih fotonaponskih elektrana uzimajući u obzir namjenu akumulacije ili jezera te eventualna ograničenja (npr. status parka prirode). 2. Razmotriti planirana akumulacijska jezera te ona u izgradnji. Uzeti u obzir jezera hidroelektrana čija je akumulacija u susjednim zemljama, ali su im proizvodne jedinice u Hrvatskoj ili se koriste unutar elektroenergetskog sustava u Hrvatskoj. 3. Procijeniti utjecaj plutajućih PV panela na rad i kapacitet hidroelektrana s akumulacijom na jednom vodotoku ili jezeru u Republici Hrvatskoj. Potrebni podaci mogu se dobiti kod mentora. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualnu dobivenu pomoć.

Rok za predaju rada: 23. lipnja 2022.

Zahvala

Zahvaljujem se dragom Bogu na svemu što mi je darovao u životu, ljubavi koju mi daje, talentima, volji i želji da se trudim i ustrajem u nadi da slijedim Njegov put za sebe te tako preko mene učini moju okolinu i cijeli svijet boljim i sigurnijim mjestom za sve ljude. Vjerujem da rezultat koji sam uz Njegovu pomoć postigao ovim završnim radom nisu brojke već duhovna i mentalna snaga za život.

Zahvaljujem se svom mentoru Izv.prof.dr.sc. Goranu Krajačiću na prenesenom znanju, ustupljenoj literaturi, stručnim savjetima i inovativnim idejama.

Posebne zahvale asistentu mag.ing. Goranu Stunjeku na iznimnom trudu, ustupljenim informacijama, korisnim savjetima, idejama i pomoći.

Zahvaljujem se svojoj djevojci Josipi koja me zadnjih godinu dana motivira da budem bolji, kao u radu tako i u privatnom životu. Najbolje lekcije u životu dala mi je upravo moja voljena.

Hvala mojoj obitelji i prijateljima na podršci i strpljenju koje su uvijek imali sa mnom bez obzira na moje mane i hirove.

Sažetak

Pregled potencijalnih lokacija za plutajuće solarne elektrane u Republici Hrvatskoj

Ključne riječi: *plutajuće solarne elektrane, hidroelektrane, evaporacija vode, jezera, proizvodnja električne energije*

U ovom radu ispisane su sve vodene površine u Hrvatskoj koje se nalaze u bazi podataka pokrova zemljišta Corine. Rad povezuje model potencijala proizvodnje energije iz solarnih elektrana iz 1988. godine i temperature modula na vodenoj površini. Osim toga, Penman – Monteithov model za procjenu evaporacije kombiniran je sa modifikacijom za djelomično pokrivenu površinu solarnom elektranom. Obje metode su u prošlosti validirane. Pomoću baze podataka pokrova zemljišta Corine i Google karti zabilježeno je 127 vodnih tijela koja ne uključuju vodotoke. Površina 120 jezera je dovoljno velika da bi, kada ih se pokrije 20 % sa solarnom elektranom, elektrana na njima imala snagu na pragu elektrane veću od 5 MW. Najveći potencijal od hrvatskih akumulacijskih jezera ima Perućko jezero na kojem bi solarna elektrana imala snagu na pragu elektrane 439,82 MW, ukoliko je elektrana veličine 20 % jezera. Usporedbom sa Chenni modelom za proračun proizvodnje na kopnu dobiveno je da će proizvodnja na jezeru Prančevići biti 3,58 % veća nego u mjestu udaljenom oko 7 km. Zbog dobrog ozračenja i velike mreže hidroelektrana na slivu rijeke Cetinu analiza evaporacije je napravljena za jezero Prančevići. Postavljanjem plutajuće solarne elektrane na jezero Prančevići, ako zauzme 80 % površine jezera, ušteda vode iznosit će 15,18 % ukupnog volumena jezera. Gotovo cijeli proračun proveden je u Microsoft Excelu, a neki podaci su obrađeni u Matlabu.

Summary

Overview of Potential Locations for Floating Solar Power Plants in the Republic of Croatia

Key words: *floating solar power plants, hydroelectric power plants, evaporation of water, lakes, electricity generation*

In this paper, all water bodies in Croatia that are in the database Corine land cover are listed. The paper connects the model for electricity production potential from solar power plants established in 1988 and model for predicting temperature of photovoltaics on the lakes. In addition, the Penman – Monteith evaporation estimation model is combined with a different irradiation for partially covered area by a solar power plant. Both methods have been validated. 127 water bodies were found in the Corina land cover database and on google maps. The area of 120 lakes is large enough that when they are covered by 20% with a solar power plant, the power plant on them would have a power of 5 MW at the grid connection. The highest potential of the Croatian accumulation lakes has Perućko Lake, where the solar power plant would have a power of 439.82 MW at the grid connection if the power plant is 20% the size of the lake. Comparing with the Chennai model for the calculation of energy generating on land, it was obtained that production on Lake Prančevići will be 3.58% higher than in a place about 7 km away. Due to good irradiation and a large network of hydropower plants in the Cetina River Basin, an evaporation analysis was made for lake Prančevići. By installing a floating solar power plant on lake Prančevići, if it occupies 80% of the lake surface, water savings is 15.18% of the total volume of the lake. Entire data processing was made in Microsoft Excel and Matlab.

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Plutajuće solarne elektrane.....	4
2.1.	Trenutno stanje plutajućih solarnih elektrana u svijetu	5
2.2.	Geografski potencijal.....	6
2.3.	Strukture za plutajuće solarne elektrane	6
2.4.	Postojeće plutajuće solarne elektrane	8
3.	Metodologija.....	10
3.1.	Podjela Republike Hrvatske	10
3.2.	Odabir vodenih površina.....	10
3.3.	Potencijal proizvodnje.....	12
3.3.1.	Računanje potencijala proizvodnje	12
3.3.2.	Odabir fotonaponskih modula	15
3.3.3.	Podaci o ozračenju, brzini vjetra i temperaturi	16
3.4.	Procjena evaporacije.....	17
3.4.1.	Računanje evaporativnih gubitaka nepokrivene vodene površine	17
3.4.2.	Računanje evaporativnih gubitaka nakon postavljanja plutajuće solarne elektrane	23
3.4.3.	Podaci o temperaturi, tlaku, relativnoj vlažnosti zraka i protoku	25
3.5.	Usporedba potencijala proizvodnje iz plutajuće solarne elektrane i solarne elektrane na tlu	26
3.6.	Ograničenja	27
3.7.	Osvrt na metode rada i validacija	28
4.	Mapiranje vodenih površina	30

4.1.	<i>Popis vodenih površina</i>	30
4.2.	<i>Potencijal za proizvodnju električne energije iz plutajućih solarnih elektrana 33</i>	
4.3.	<i>Usporedba potencijala sa postojećim plutajućim solarnim elektranama.....</i>	36
5.	<i>Rezultati</i>	37
1.	<i>Bibliografija</i>	38
5.1.	<i>Potencijal odabrane lokacije za plutajuću solarnu elektranu</i>	38
5.1.1.	<i>Usporedba sa potencijalom proizvodnje iz solarne elektrane na tlu</i>	41
5.1.2.	<i>Usporedba sa podacima sa stranice Europske komisije</i>	44
5.2.	<i>Procjena evaporacije prije i nakon ugradnje plutajuće solarne elektrane</i>	47
5.3.	<i>Utjecaj fotonaponskih modula na rad i kapacitet hidroelektrane s akumulacijom.....</i>	51
5.4.	<i>Analiza.....</i>	54
6.	<i>Zaključak.....</i>	56
7.	<i>Literatura.....</i>	57

Popis oznaka i kratica

SKS	<i>Sunčeva koncentrirana snaga</i>
HE	<i>hidroelektrana</i>
RHE	<i>reverzibilna hidroelektrana</i>
MHE	<i>mala hidroelektrana</i>
P	<i>raspoloživa snaga na pragu elektrane u pojedinom satu [MW]</i>
η_{PV}	<i>učinkovitost sustava [%]</i>
P_{STC}	<i>nazivna snaga modula pri standardnim ispitnim uvjetima [W]</i>
α_P	<i>temperaturni koeficijent snage [W/°C]</i>
T_c	<i>temperatura modula [°C]</i>
T_{STC}	<i>temperatura modula pri standardnim uvjetima [°C]</i>
N	<i>broj modula</i>
E_{uk}	<i>potencijal proizvodnje električne energije [MWh]</i>
G	<i>trenutno efektivno ozračenje na plohu [W/m²]</i>
G_{STC}	<i>ozračenje pri standardnim ispitnim uvjetima [W/m²]</i>
Δt_i	<i>vrijeme [h]</i>
G_b	<i>direktno ozračenje na horizontalnu plohu [W/m²]</i>
G_d	<i>difuzno ozračenje na horizontalnu plohu [W/m²]</i>
G_r	<i>reflektirano ozračenje na horizontalnu plohu [W/m²]</i>
H_{sun}	<i>visina Sunca [°]</i>
β	<i>nagib plohe [°]</i>
$G_{b,n}$	<i>direktno ozračenje na nagnutu plohu [W/m²]</i>
$G_{d,n}$	<i>difuzno ozračenje na nagnutu plohu [W/m²]</i>
$G_{r,n}$	<i>reflektirano ozračenje na nagnutu plohu [W/m²]</i>
n	<i>broj uzoraka</i>
T_a	<i>temperatura zraka [°C]</i>
$V_{w,0.5m}$	<i>brzina vjetra na visini od pola metra [m/s]</i>
$V_{w,10m}$	<i>brzina vjetra na visini od 10 metara [m/s]</i>
h_2	<i>visina za koju se traži brzina vjetra [m]</i>
h_1	<i>visina na kojoj je mjerena brzina vjetra [m]</i>

z_0	<i>hrapavost površine [m]</i>
A_{modula}	<i>površina koju prekrivaju moduli [m²]</i>
$A_{sustava}$	<i>površina koju prekrivaju svi dijelovi sustava na jezeru [m²]</i>
$A_{1,modul}$	<i>površina jednog modula [m²]</i>
A_{jezera}	<i>površina jezera [m²]</i>
$p_{jez,\%}$	<i>pokrivenost jezera plutajućom solarnom elektranom [%]</i>
P_n	<i>instalirana (nazivna) snaga elektrane [MW]</i>
E_1	<i>količina vode koja ishlapi [mm/(m²·h)]</i>
λ	<i>latentna toplota isparavanja [MJ/kg]</i>
Δ_w	<i>nagib krivulje zasićenja vodenom parom pri temperaturi vode [kPa/°C]</i>
N_1	<i>promjena akumulirane topline u vodnom tijelu [MJ/(m²·h)]</i>
ρ_a	<i>gustoća zraka [kg/m³]</i>
C_a	<i>specifična toplota zraka [kJ/(kg·K)]</i>
e_w^*	<i>tlak zasićene pare na temperature vode [kPa]</i>
e_a	<i>tlak pare na temperaturi zraka [kPa]</i>
r_a	<i>aerodinamički otpor [s/m]</i>
γ	<i>psihrometrijska konstanta [kPa/°C]</i>
T_w	<i>izračunata temperatura vode [°C]</i>
T_e	<i>ravnotežna temperature [°C]</i>
T_{w0}	<i>temperatura vode u prethodnom satu [°C]</i>
τ	<i>vremenska konstanta [h]</i>
T_n	<i>temperatura vlažnog termometra [°C]</i>
σ	<i>Stefan – Boltzmannova konstanta [MJ/(m²·K⁴·h)]</i>
$f(u)$	<i>funkcija vjetra [MJ/(m²·kPa·h)]</i>
Δ_n	<i>nagib krivulje zasićenja vodenom parom pri temperaturi zraka [kPa/°C]</i>
ρ_w	<i>gustoća vode [kg/m³]</i>
C_w	<i>specifični toplinski kapacitet vode [kJ/(kg·K)]</i>
z	<i>srednja dubina vodenog tijela [m]</i>
T_d	<i>temperatura kondenzacije [°C]</i>

rv	relativna vlažnost [%]
e_s	tlak zasićene pare [kPa]
Q^*	neto ozračenje na površinu jezera [W/m^2]
β_1	koeficijent volumne ekspanzije vode [$1/^\circ C$]
p_d	tlak suhog zraka [kPa]
p_v	tlak vodene pare [kPa]
R_d	specifična plinska konstanta suhog zraka [$J/(kg \cdot K)$]
R_v	specifična plinska konstanta vodene pare [$J/(kg \cdot K)$]
p_1	tlak zasićene pare [kPa]
p_v	stvarni tlak [kPa]
p_d	tlak suhog zraka [kPa]
MW_{omjer}	omjer molekularne mase vodene pare i suhog zraka [-]
$V_{w,2m}$	brzina vjetra na visini od 2 metra [m/s]
z_m	visina [m]
Q_{cover}^*	ozračenje pokrivenog dijela jezera [W/m^2]
SW_{cover}	kratkovalna komponenta Sunčevog ozračenja [W/m^2]
LW_{cover}	dugovalna komponenta ozračenja [W/m^2]
α	faktor apsorpcije [-]
C	faktor naoblake [-]
Q_{free}^*	ozračenje na slobodnu površinu [W/m^2]
x	pokrivenosti jezera solarnom elektranom [%]
E_{FPV}	količina vode koja ishlapi nakon ugradnje solarne elektrane [mm/($m^2 \cdot h$)]
ΔE	ušteda vode [mm/($m^2 \cdot h$)]
η_1	smanjenje evaporacije ugradnjom plutajuće solarne elektrane [%]
$E_{HE,novo}$	nova potencijalna godišnja proizvodnja iz hidroelektrana [MWh]
$V_{HE,uk}$	ukupna količina vode koju hidroelektrana iskoristi tijekom godine [m^3]
E_{HE}	stvarna proizvodnja hidroelektrana [MWh]
$q_{m,dan}$	dnevni protok vode [m^3/dan]

$q_{m,god}$	<i>godišnji protok vode [m^3/god]</i>
$E_{HE,dan}$	<i>dnevna proizvodnja iz hidroelektrane [MWh]</i>
P_{sr}	<i>srednja snaga na pragu elektrane [MW]</i>
$p_{jez,\%}$	<i>površina jezera koju zauzima plutajuća solarna elektrana [%]</i>
$T_{w,min}$	<i>minimalna temperature modula u jednom satu u godini [$^{\circ}C$]</i>
$T_{w,max}$	<i>maksimalna temperature modula u jednom satu u godini [$^{\circ}C$]</i>
$cUSD$	<i>centi dolara</i>

Popis tablica

<i>Tablica 1</i>	<i>Proizvodni kapaciteti u Republici Hrvatskoj u 2020. godini [3]....</i>	<i>2</i>
<i>Tablica 2</i>	<i>Karakteristike fotonaponskog modula [35].....</i>	<i>15</i>
<i>Tablica 3</i>	<i>Specifični toplinski kapacitet u ovisnosti u temperaturi [43]</i>	<i>21</i>
<i>Tablica 4</i>	<i>Potencijal proizvodnje iz solarnih elektrana na jezeru Prančevići</i>	<i>38</i>
<i>Tablica 5</i>	<i>Usporedba potencijala proizvodnje na jezeru i tlu</i>	<i>42</i>
<i>Tablica 6</i>	<i>Ovisnost evaporacije i temperature vode o pokrivenosti jezera uz temperaturu mjerenu u Splitu</i>	<i>48</i>
<i>Tablica 7</i>	<i>Ovisnost evaporacije i temperature vode o pokrivenosti jezera uz temperaturu iznad jezera Prančevići preuzetu sa PV GIS - a</i>	<i>51</i>

Popis slika

<i>Slika 1 Električna energija proizvedena obnovljivim izvorima u svijetu [1] .</i>	<i>1</i>
<i>Slika 2 Plutajuća solarna elektrana u Suveretou [12].....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 3 Solarna elektrana na jezeru Banja [15]</i>	<i>9</i>
<i>Slika 4 Stvaranje nove WFS veze.....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 5 Filtriranje površina</i>	<i>11</i>
<i>Slika 6 Prikaz podataka o odabranoj vodenoj površini.....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 7 Postavke za preuzimanje podataka o ozračenju</i>	<i>16</i>
<i>Slika 8 Goričko jezero</i>	<i>30</i>
<i>Slika 9 Jezero Valić.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 10 Jezero Obsenica</i>	<i>31</i>
<i>Slika 11 Popis vodnih tijela u Republici Hrvatskoj.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 12 Najveća vodna tijela u Hrvatskoj i bližoj okolini vezana uz proizvodnju električne energije iz hidroelektrana u Hrvatskoj.....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 13 Trajanje korištenja solarnih elektrana i volumen vodnih tijela.....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 14 Jezero Prančevići na karti</i>	<i>37</i>
<i>Slika 15 Jezero Prančevići i brana [68]</i>	<i>38</i>
<i>Slika 16 Ovisnost evaporacije o razlici temperatura zraka i vode [46]</i>	<i>48</i>
<i>Slika 17 Prebacivanje dnevnih u satne vrijednosti</i>	<i>52</i>
<i>Slika 18 Prebacivanje satnih u dnevne vrijednosti</i>	<i>53</i>

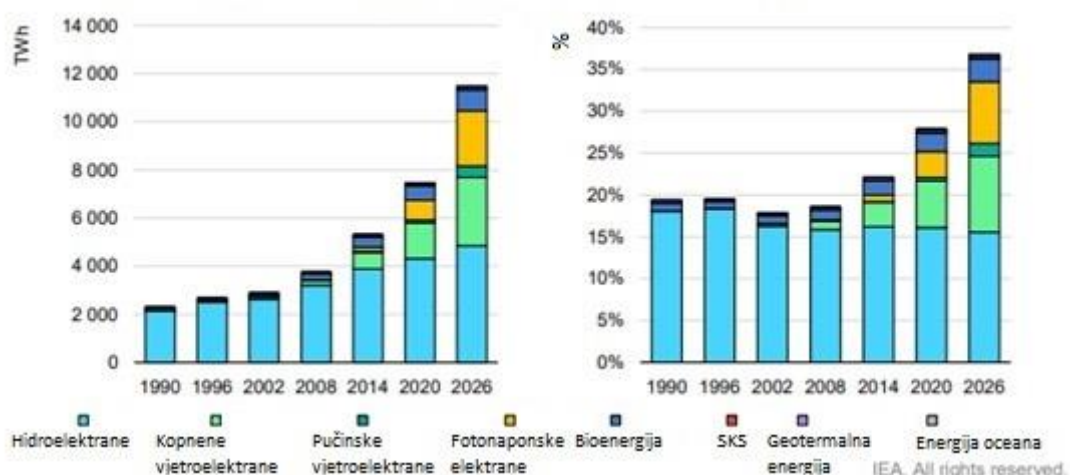
Popis grafikona

<i>Grafikon 1 Specifični toplinski kapacitet u ovisnosti o temperaturi [27]</i>	<i>21</i>
<i>Grafikon 2 Potencijal proizvodnje iz solarne elektrane snage 11,99 MW.</i>	<i>39</i>
<i>Grafikon 3 Potencijal proizvodnje iz solarne elektrane snage 47,97 MW.</i>	<i>40</i>
<i>Grafikon 4 Potencijal proizvodnje iz solarne elektrane tijekom prvih deset dana siječnja i lipnja</i>	<i>40</i>
<i>Grafikon 5 Srednja dnevna učinkovitosti modula</i>	<i>41</i>
<i>Grafikon 6 Usporedba proizvodnje energije na jezeru Prančevići i u selu Prančevići.....</i>	<i>43</i>
<i>Grafikon 7 Usporedba proizvodnje energije na jezeru Prančevići i u selu Prančevići od 13. do 19. srpnja 2020.</i>	<i>43</i>
<i>Grafikon 8 Usporedba proizvodnje energije na jezeru Prančevići i u selu Prančevići u srijedu 15. srpnja 2020.</i>	<i>44</i>
<i>Grafikon 9 Usporedba potencijala dnevne proizvodnje prema modelu i PV GIS - u.....</i>	<i>45</i>
<i>Grafikon 10 Usporedba odabranog modela i PV GIS podataka od 13. do 19. srpnja 2020.</i>	<i>45</i>
<i>Grafikon 11 Usporedba potencijala satne proizvodnje prema modelu i PV GIS - u.....</i>	<i>46</i>
<i>Grafikon 12 Potencijal proizvodnje energije iz plutajuće solarne elektrane na jezeru Prančevići 15. srpnja 2020.</i>	<i>46</i>
<i>Grafikon 13 Ovisnost evaporacije o pokrivenosti u m³</i>	<i>49</i>
<i>Grafikon 14 Ovisnost evaporacije o pokrivenosti u %</i>	<i>49</i>
<i>Grafikon 15 Temperatura vode u ovisnosti o površini elektrane</i>	<i>50</i>
<i>Grafikon 16 Potencijalni dijagram proizvodnje iz HE Zakućac u 2020. godini nakon ugradnje plutajuće solarne elektrane.....</i>	<i>52</i>
<i>Grafikon 17 Usporedba proizvodnje hidroelektrane i plutajuće solarne elektrane na 80 % površine jezera Prančevići.....</i>	<i>54</i>

1. Uvod

Današnji elektroenergetski sustav nezamisliv je bez obnovljivih izvora energije, a njihov udio u proizvodnji svake godine sve je veći. Na Slika 1 preuzete iz [1] vidi se eksponencijalni rast u količini proizvedene energije iz obnovljivih izvora.

Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije prema tehnologijama i prema udjelu u ukupnoj proizvodnji električne energije u svijetu



Slika 1 Električna energija proizvedena obnovljivim izvorima u svijetu [1]

Na taj porast najviše utječu isplativost, klimatske promjene, nesigurnost opskrbe, porast cijena energije, a njihova ekspanzija potpomognuta je od strane država raznim programima potpore. Najveći rast bilježe, i trebali bi tako i nastaviti, solarne i vjetroelektrane čiji bi udio u ukupnoj proizvodnji u Europskoj Uniji 2026. godine trebao iznositi više od 30%, a udio svih obnovljivih izvora gotovo 50% [1]. Hrvatska je 2020. godine imala udio obnovljivih izvora 53,82% u ukupnoj proizvodnji električne energije, a taj udio na razini EU je 22,09% [2]. U Hrvatskoj je samo 0,53% električne energije proizvedeno iz fotonaponskih elektrana. Od 2015. do 2020. godine samo u 2018. godini je proizvodnja iz solarnih elektrana bila manja nego u godini prije, vjetroelektrane su svake godine bilježile veću proizvodnju, a u 2020. je ukupna proizvodnja bila najmanja u tih šest godina. Od ukupno proizvedene energije u iznosu od 18.893,3 GWh Hrvatska je uvezla 7.090,6 GWh od čega je 3.030,4

GWh iz nuklearne elektrane Krško. Neposredna potrošnja iznosila je 15.169 GWh [3].

U Tablica 1 prikazani su proizvodni kapaciteti po elektranama u Republici Hrvatskoj. U probnom radu su dvije vjetroelektrane ukupnog kapaciteta 298 MW uz koje će ukupna snaga vjetroelektrana u Hrvatskoj prijeći 1 GW i 20% udjela u ukupnoj snazi [4]. Hidroelektrane u Hrvatskoj su većinom izgrađene prije više desetaka godina te su potencijali prema tehničkim procjenama iskorišteni 49,2 % [5].

Vrsta	Raspoloživa snaga [MW]
Hidroelektrane	2.199,4
Akumulacijske	1.485,7
Crpne	275,4
Protočne	405,3
Male HE	33,3
Termoelektrane	1.552,6
Ugljen	215
Prirodni plin	848,8
Naftni derivati	343,5
Biomasa	80,2
Geotermalna energija	10
Bioplin	55,1
Vjetroelektrane	801,3
Solarne elektrane	108,5
Ukupno	4.661,8

Tablica 1 Proizvodni kapaciteti u Republici Hrvatskoj u 2020. godini [3]

Prema Desetogodišnjem planu razvoja prijenosne mreže od 2021. do 2030. godine, hidroelektrane koje su se nalazile pred sklapanjem ugovora o priključku u 2020. godini su: HE Varaždin koja povećava snagu na 110 MW, HE Kosinj čija je predviđena priključna snaga 33,7 MW te CHE Vinodol koji povećava svoj kapacitet te će u turbinskom režimu rada imati snagu 159 MW, a u crpnom 159 MW. Prve hidroelektrane u Hrvatskoj koje su u planu, a da bi se trebale priključiti na naponsku razinu 400 kV su:

- RHE Vrdovo snage 2 x 270 MW u turbinskom režimu rada i 2 x 245 MW u crpnom režimu rada čija bi donja akumulacija trebala biti Peruća, a

gornja bi se trebala izgraditi u udolini Ravno Vrdovo 600 m poviše Perućkog jezera [6]

- *RHE Korita snage 600 MW u turbinskom i 500 MW u crpnom režimu rada, također se nalazi u slivu rijeke Cetine, međutim oba jezera ne postoje te će se donje nalaziti u Sinjskom polju blizu Otoka, a gornje otprilike 400 m iznad, kod sela Donja Korita [7]*

Osim njih u planu je i HE Senj 2 snage 380 MW koja će biti spojena na razinu 220 kV ili 400 kV te HE Dubrovnik 2 snage oko 300 MW koja bi se gradila u suradnji sa Bosnom i Hercegovinom sa podijeljenim vlasništvom 50 - 50 [5][8].

Hrvatskoj stoga nedostaje i preostaje instalacija solarnih elektrana koje zemlje sjevernije od Hrvatske i sa manje Sunčevog ozračenja više iskorištavaju. Cijena fotonaponskih sustava je od 2010. od 2020. godine doživjela pad od oko pet puta [9], najviše zbog pada cijena modula koji su značajno bolji, a i u budućnosti najveće se uštede očekuju upravo na povećanju njihove učinkovitosti [10]. Osim proizvodnim procesima i materijalima, učinkovitost se može povećati i hlađenjem modula tijekom eksploatacije. Primjer toga je postavljanje fotonaponskih panela na vodne površine pri čemu će oni biti hlađeni vodom koja se nalazi ispod njih i time imati veću učinkovitost nego da su na tlu, a istovremeno će smanjiti ishlapljivanje vode. Ako se postave na akumulacijsko jezero za hidroelektranu, uštedjena voda bit će iskorištena za proizvodnju električne energije što je detaljnije objašnjeno u nastavku.

2. Plutajuće solarne elektrane

Neke od prednosti plutajućih solarnih elektrana koje nisu navedene u uvodu su:

- *montaža i demontaža plutajućih solarnih elektrana je kompaktnija u odnosu na kopnene izvedbe, upravljanje jednostavnije te ne postoje fiksne strukture [12]*
- *ne zauzimaju kopnene površine, stoga ne konkuriraju agrokulturi te im je limitiran negativan utjecaj na okoliš [12]*
- *iskorištavanje površine koja se vjerojatno ni za što drugo ne bi koristila [11]*
- *povećanje proizvodnje energije blizu mjesta velike potrošnje [11]*
- *velike plutajuće platforme se mogu lako rotirati i koristiti praćenje po azimutu zbog čega dobici mogu biti 15 – 25 %, povezivanjem dvaju nosača modula čeličnim kabelom oba se jednostavno okreću [12]*
- *rotacija je napredna i u horizontalnoj osi pri čemu konstrukcija dobiva oblik slova Z te nisu potrebna dodatna ojačanja [12]*
- *pokrivanjem jezera smanjen je prodor Sunčeve svjetlosti u dubinu što onemogućuje cvjetanje algi i biljaka, čiji prekomjerni rast uzrokuje trošenje kisika i prirodno blokiranje Sunčeve svjetlosti. Razgradnjom algi troši se jako puno kisika zbog čega ugibaju ribe, a to se može spriječiti plutajućim solarnim elektranama [12]*
- *procjenjuje se da će značajniji prekid cvjetanja algi biti kod pokrivenosti 40 – 60 % površine jezera [11]*
- *sinergijom plutajućih solarnih elektrana sa ribolovom profitiraju i ribe i škampi na uzgajalištima jer hladna voda sadrži više kisika, a zbog vlastite proizvodnje nema gubitaka prijenosa i distribucije [12]*
- *unatoč povišenoj cijeni zbog plutajućeg sustava, i s obzirom da nije potrebno upravljanje zemljištem, smanjena je specifična cijena energije [12]*
- *još jedan način za smanjenje cijene je povezivanje u hibridni sustav sa hidroelektranom. Time se iskorištava postojeća infrastruktura i smanjuju*

investicijski troškovi koji su kod solarnih elektrana znatno veći od operativnih [11]

- *produžen vijek trajanja zbog niže radne temperature modula [11]*
- *povećanje elastičnosti sustava [11]*

2.1. Trenutno stanje plutajućih solarnih elektrana u svijetu

Trenutno se manje od 0,1 % električne energije u svijetu dobiva iz plutajućih solarnih elektrana što znači da je potencijal velik.

Interes za njima raste jer:

- *LCOE iznosi od 2 do 5 cUSD/kWh, ovisno o lokalnom ozračenju.*
- *lako se instaliraju, imaju mali utjecaj na okoliš, nije potrebno investirati mnogo novca i vremena za izlazak na tržište*
- *demontaža je jednostavna i površina se može lako vratiti u početno stanje*

Čimbenici koji sprječavaju njihovu penetraciju su:

- *limitirani resursi za proizvodnju modula*
- *konkurencija sa konvencionalnim solarnim elektranama*
- *nedostatak jeftinih i učinkovitih spremnika energije*

Čimbenici koji motiviraju njihovu penetraciju:

- *napredak tehnologije*
- *integracija sa hidroelektranama, gdje se natječu sa vjetroelektranama koji ima više troškove održavanja zbog pokretnih dijelova, i biogorivima čiji se otpad nakon izgaranja mora zbrinuti*
- *moгуće širenje na pučinu*

Tri ključne prognoze:

- *proizvodnja iz solarnih i vjetroelektrana će do 2028. godine biti veća nego iz hidroelektrana*
- *u istom periodu solarne elektrane će dostignuti vjetroelektrane po proizvodnji*

- *plutajuće solarne elektrane će u 2030. godini ostvariti 17 % ukupne proizvodnje iz solarnih elektrana*

Za to sve potrebni su spremnici energije cijene manje od 100 USD/kWh [12].

2.2. Geografski potencijal

Dva su glavna faktora za odabir lokacije:

- *intenzitet zračenja, ovisi prvenstveno o solarnoj konstanti, tj. zračenju na ulasku u atmosferu te o albedo komponenti, tj. stupnju refleksije*
- *dostupnost velikih površina*

Potencijal neke lokacije određen je kao godišnja ozračenost u kWh/m² pomnoženo sa prikladnom površinom za postavljanje solarne elektrane.

Obalna područja zauzimaju 20 % Zemljine površine, a čak 50 % stanovništva Zemlje nalazi se na takvim područjima [12].

2.3. Strukture za plutajuće solarne elektrane

Postoje tri klase nosača modula:

Klasa 1 [12]

- *kombinacija cijevi polietilena visoke gustoće te čeličnih i aluminijskih konstrukcija od kojih se rade splavovi velikih dimenzija*
- *njihove karakteristike su: robusnost, visoka cijena, poteškoće pri sastavljanju, mogućnost korištenja sustava praćenja, splavovi se spajaju kako bi se povećala prohodnost i sigurnost ljudi koji rade na održavanju, sustavi su modularni, fleksibilni za ugradnju hlađenja i sustava praćenja, cijevi su u kontaktu sa vodom samo 20 % u odnosu na površinu cijele platforme*
- *jedni od prvih predstavnika ove tehnologije je talijanska tvrtka Terra Moretti koja je 2011. godine dovršila Suvereto projekt u Italiji kojim je spojila plutajuću solarnu elektranu snage 200 kW na mrežu*



Slika 2 Plutajuća solarna elektrana u Suveretou [12]

Klasa 2 [12]

- *splavovi u potpunosti građeni od polietilena visoke gustoće*
- *karakteristike: jako su lagani i tanki, loši vremenski uvjeti mogu ih lakše oštetiti, 50 % platforme je u kontaktu s vodom, defolijacija plastike*
- *svi oblici ovih sustava su ukalupljeni, a kalupi su vrlo skupi, pa se ne rade po mjeri i nije moguće ugraditi sustav praćenja, a sustav vezivanja je kompleksan*
- *jedna plutača ne može držati osobu*
- *najjeftinija klasa*
- *u vrijeme pisanja knjige [12] specifična cijena 25 cUSD/W, te ovise linearno o cijeni barela nafte*
- *ova klasa prvi put je predstavljena od francuske tvrtke Ciel & Terre, a osim njih najviše ju primjenjuju Sunseap, Isifloating, Sumimoto i ATS/ASB*

Klasa 3 [12]

- *strukture međusobno povezanih plutajućih pontona sposobnih za držanje fotonaponskih modula*
- *karakteristike: otklonjene su poteškoće klase 2, platforma podržava od 10 do 100 modula, a ona je podržavana elementima koji se razlikuju od standardnih pomorskih pontona i tehnologija naftnih platformi*
- *koriste se za izgradnju velikih platformi sa zagarantiranom mogućnošću hoda*
- *cijena je znatno veća od plutača klase 2*
- *prvi predstavnici su talijanska tvrtka NRG Energia koji su 2009. godine napravili prvu plutajuću solarnu elektranu ovog tipa, a nalazi se u Buanu u Italiji snage 500 kW [13]*

2.4. Postojeće plutajuće solarne elektrane

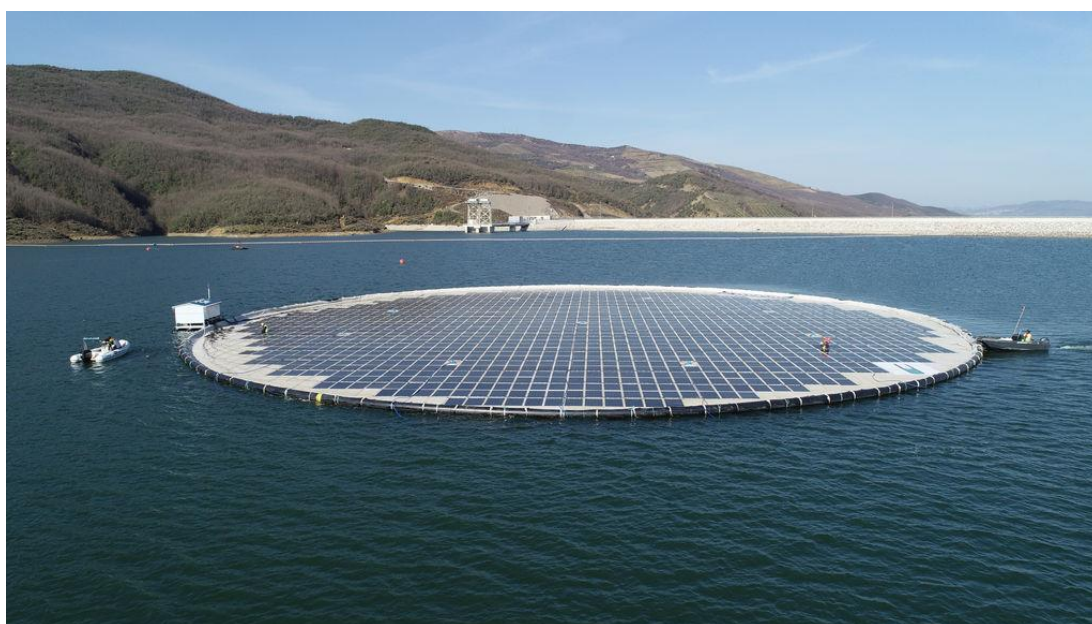
Najbliža plutajuća solarna elektrana Hrvatskoj trenutno je na jezeru Banja u Albaniji snage 500 kW, a ukupno bi trebala imati 2 MW do kraja 2022. godine. Vlasnik plutajuće solarne elektrane upravlja i hidroelektranom koja koristi navedeno jezero kao akumulaciju. Jezero ima površinu 14 km² i volumen 400.000.000 m³ što omogućuje gradnju znatno veće solarne elektrane. Solarna elektrane nastradala je u tornadu, te je nakon toga obnovljena i spremna je za rad 50 godina [14]. Prikazana je na Slika 3, a preuzeta je sa [15].

Najveća plutajuća solarna elektrana nalazi se u Kini, ima snagu 320 MW te se očekuje da će godišnje proizvoditi 550 GWh čime bi faktor opterećenja te elektrane bio 19,62 %. Povezana je sa baterijskim spremnikom kapaciteta 8 MWh i vjetroelektranom snage 100 MW [16].

Druga najveća plutajuća solarna elektrana nalazi se također u Kini, ali na jezeru Tri klanca što znači da radi u paru sa uvjerljivo najvećom hidroelektranom na svijetu. Solarna elektrana ima snagu 150 MW i počela je s opskrbom potrošača u prosincu 2017. godine. Solarna elektrana proizvodi

dovoljno električne energije za opskrbu 94.000 kućanstava [17]. Treća, četvrta i peta najveća plutajuća solarna elektrana također su u Aziji, u Kini, Singapuru i Tajlandu, a snaga između najveće i pete je 275 MW, tj. peta po veličini ima snagu kao 14,06 % najveće elektrane. To pokazuje koliko brzo tehnologija napreduje i kako interes raste [17].

Najveća solarna elektrana u Europi nalazi se u Francuskoj blizu grada Toulousea. Ima snagu 5 MW, a svojom godišnjom proizvodnjom u iznosu 6.250 MWh zadovoljava 10 % potreba općine Volvestre koja ima oko 3.000 stanovnika [18]



Slika 3 Solarna elektrana na jezeru Banja [15]

Druga najveća plutajuća solarna elektrana u Europi biti će puštena u pogon ove godine u Portugalu, a imat će snagu 5 MW. EDP najavljuje gradnju druge plutajuće solarne elektrane snage 70 MW čime bi ušao u trenutnih pet najvećih solarnih elektrana u svijetu. Očekivana proizvodnja iz elektrane je 7,5 GWh godišnje, a njezin rad balansirat će se pomoću baterije kapaciteta 2 GWh. Solarna elektrana nalazi se na jezeru koje koristi reverzibilna hidroelektrana Pedrogao Dam, snage 10 MW, kao svoju akumulaciju. Godišnja proizvodnja hidroelektrane iznosi 45 GWh [19][20].

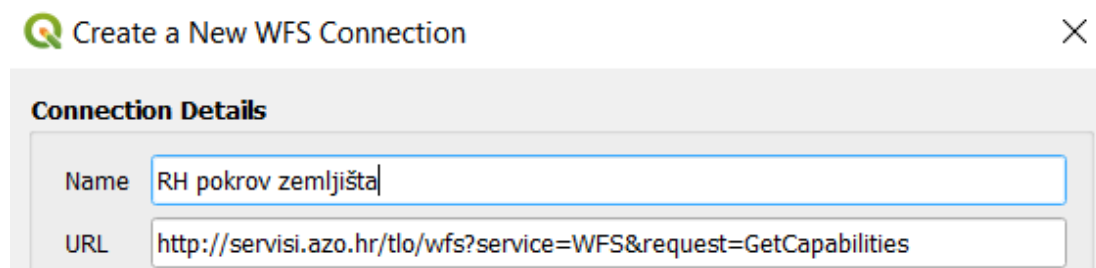
3. Metodologija

3.1. Podjela Republike Hrvatske

Hrvatska se prema novoj regionalnoj podjeli od 1. siječnja 2021. godine dijeli na četiri regije: Panonska Hrvatska, Jadranska Hrvatska, Grad Zagreb i Sjeverna Hrvatska [21]. Hrvatska ima velik omjer opsega i površine, stoga je za prijenos energije potrebna veća infrastruktura što direktno povećava cijenu. Sve vjetroelektrane nalaze se u Jadranskoj Hrvatskoj. Tri hidroelektrane su u Sjevernoj Hrvatskoj, dvije su u Panonskoj te su sve ostale u Jadranskoj [22][23]. Nuklearna elektrana je u Sloveniji, a od većih postrojenja u Zagrebu su samo dvije kogeneracijske termoelektrane na prirodni plin koje slijede toplinsko opterećenje [3]. Elektrifikacijom i urbanizacijom rast će zahtjevi za prijenosnom moći vodova, a Zagreb je grad sa više od 750.000 stanovnika [24]. Male su šanse da će prijenosni sustav moći zadovoljiti potrebne svih stanovnika. Iz tog razloga potrebna je distribuirana proizvodnja. Najbolja opcija distribuirane proizvodnje su obnovljivi izvori, od kojih se osobito ističu solarne elektrane. Solarne elektrane se mogu postaviti na dostupne površine kao su fasade, krovovi kuća i zgrada, ali ako su potrebni veći kapaciteti može ih se postaviti i na dostupne vodne površine što je detaljno razrađeno u nastavku.

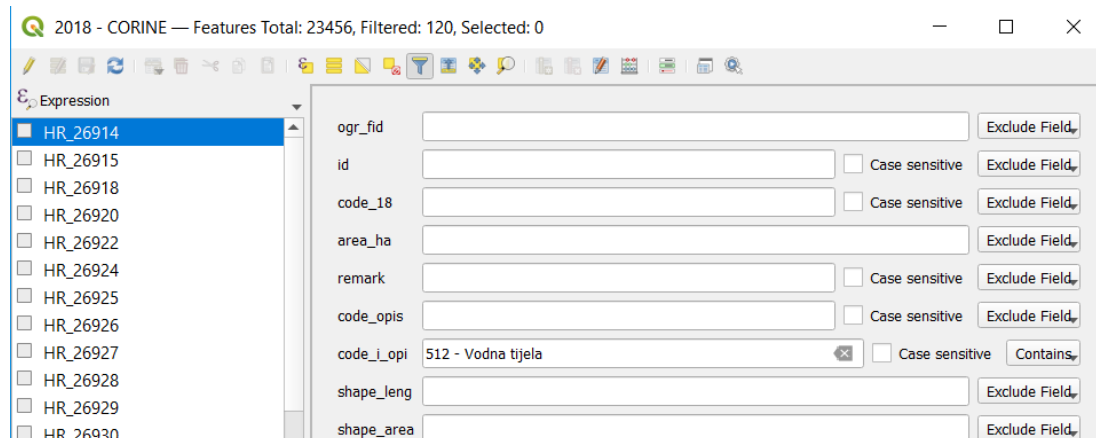
3.2. Odabir vodenih površina

Pretraga vodenih površina izvršena je uz pomoć Zavoda za zaštitu okoliša i prirode Republike Hrvatske od kojih je dobiven metapodatkovni zapis izvora podataka [25], a podaci su izvučeni pomoću QGIS alata [26] učitavanjem vektorskog sloja Corine pokrova zemljišta [27] što je prikazano na Slika 4.



Slika 4 Stvaranje nove WFS veze

WFS (eng. Web Feature Service) sloj koji je potrebno učitati u QGIS alat je pisan u XML jeziku za označavanje podataka, a najnoviji za Hrvatsku je iz 2018. godine. Nakon učitavanja u tablici atributa pretraživanjem su pronađene površine čiji je kod „512“, a opis „Vodna tijela“. Na Slika 5 prikazano je kako su filtrirane vodene površine.



Slika 5 Filtriranje površina

Za svako vodeno tijelo očitani su površina, duljina i identifikacijski broj kao što je prikazano na Slika 6, a desnim klikom na željenu površinu pronađene su i koordinate za pronalazak na kartama [28] gdje su očitana imena jezera, ribnjaka i ostalih voda stajaćica. U obzir za analizu potencijala proizvodnje iz plutajućih solarnih elektrana nisu uzeti vodotoci.

ogr_fid	23328
id	HR_26914
code_18	512
area_ha	111,987186236
remark	NULL
code_opis	Vodna tijela
code_i_opi	512 - Vodna tijela
shape_leng	6791,32222556
shape_area	1119871,86236

Slika 6 Prikaz podataka o odabranoj vodenoj površini

3.3. Potencijal proizvodnje

U ovom poglavlju dan je opis izračuna potencijala proizvodnje iz fotonaponskih modula te koji su moduli odabrani i na temelju kojih podataka je napravljen proračun.

3.3.1. Računanje potencijala proizvodnje

Za izračun snage i potencijalno proizvedene električne energije prvo je definirano koliki dio jezera će biti prekriven solarnom elektranom. Pokrivenost iznosi 20%, 40%, 60% i 80% neovisno o površini jezera.

Raspoložive snage na pragu elektrana izračunate su iz jednadžbe [29]:

$$P = \eta_{PV} \cdot P_{STC} \cdot [1 - \alpha_P \cdot (T_c - T_{STC})] \cdot N \quad (1)$$

Pri čemu je:

- η_{PV} - faktor učinkovitosti sustava koji uračunava gubitke u ožičenju, gubitke na izmjenjivaču, kvarove komponenti, zaprljanje i starenje, za ovaj proračun uzeta je vrijednost $\eta_{PV} = 0,85$;
- P_{STC} - nazivna snaga jednog modula pri standardnim ispitnim uvjetima, W; standardni ispitni uvjeti su: $T_{STC} = 25 \text{ °C}$, $G = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$;
- α_P - temperaturni koeficijent snage, to je pokazatelj koliko se povišenjem temperature modula smanjuje njegova izlazna snaga, $\frac{\%}{\text{°C}}$;
- $[1 - \alpha_P \cdot (T_c - T_{STC})]$ - faktor koji govori koliko će, pri temperaturi modula T_c , učinkovitost sustava biti veća (ako je $(T_c < T_{STC})$) ili manja (ako je $(T_c > T_{STC})$) u odnosu na učinkovitost pri standardnoj ispitnoj temperaturi [30];
- T_c - trenutna temperatura modula, °C;
- T_{STC} - temperatura modula pri standardnim ispitnim uvjetima, °C;
- N - broj modula [29]

Potencijali proizvodnje električne energije računati su iz jednadžbe [29]:

$$E_{uk} = \eta_{PV} \cdot P_{STC} \cdot \left(\frac{G}{G_{STC}}\right) \cdot [1 - \alpha_P \cdot (T_c - T_{STC})] \cdot N \cdot \Delta t_i \quad (2)$$

Ili skraćeno uvrštavanjem (1) u (2):

$$E_{uk} = P \cdot \left(\frac{G}{G_{STC}} \right) \cdot \Delta t_i \quad (3)$$

Pri čemu je:

- G - trenutno efektivno ozračenje na plohu, $\frac{W}{m^2}$;
- G_{STC} - ozračenje pri standardnim ispitnim uvjetima, $\frac{W}{m^2}$;
- Δt_i - vrijeme tijekom kojeg su izmjerene i za koje su izračunate vrijednosti iz jednadžbe, 1h;

Sunčeva ozračenja na nagnutu plohu izračunata su iz jednadžbe [31]:

$$G = G_b \cdot \cos(H_{sun}) + G_d \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + G_r \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (4)$$

Pri čemu je:

- G_b – direktno ozračenje na horizontalnu plohu, $\frac{W}{m^2}$;
- G_d – difuzno ozračenje na horizontalnu plohu, $\frac{W}{m^2}$;
- G_r – reflektirano ozračenje na horizontalnu plohu, $\frac{W}{m^2}$;
- H_{sun} - visina Sunca, °;
- β – nagib plohe (modula), °;

S obzirom da je u preuzeto direktno, difuzno i reflektirano ozračenje sa PVGIS-a već uračunat nagib plohe i visina Sunca, ukupna ozračenja na nagnutu plohu izračunata su iz jednadžbe:

$$G = G_{b,n} + G_{d,n} + G_{r,n} \quad (5)$$

Pri čemu je:

- $G_{b,n}$ – direktno ozračenje na nagnutu plohu, $\frac{W}{m^2}$;
- $G_{d,n}$ – difuzno ozračenje na nagnutu plohu, $\frac{W}{m^2}$;
- $G_{r,n}$ – reflektirano ozračenje na nagnutu plohu, $\frac{W}{m^2}$;

Srednje snage dobivene su prema jednadžbi:

$$P_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (6)$$

Pri čemu je:

- n - broj uzoraka, iznosi 8784 za 2020. godinu jer je prijestupna godina;
- P_i - snaga elektrane u jednom intervalu za određene vrijednosti T_c i G ;

Jednadžba za temperaturu modula za plutajuću solarnu elektranu uzeta je iz [32] i glasi:

$$T_c = 2,0458 + 0,9458 \cdot T_a + 0,0215 \cdot G - 1,2376 \cdot V_{w,0.5m} \quad (7)$$

pri čemu je:

- T_a - temperatura zraka;
- G - ukupno ozračenje na nagnutu plohu;
- $V_{w,0.5m}$ - brzina vjetra na visini od pola metra

Razlog zbog kojeg se odabrana visina 0,5 m je to što je to visina na kojoj je odabrano da će se nalaziti fotonaponski moduli računajući visinu pontona [33]. S obzirom da se brzina vjetra mjeri na visini od 10 metara i ima logaritamski profil, brzina vjetra na 0,5 metara može se izračunati iz jednadžbe:

$$V_{w,0.5m} = V_{w,10m} \cdot \frac{\ln(\frac{h_2}{z_0})}{\ln(\frac{h_1}{z_0})} \quad (8)$$

Pri čemu je:

- $V_{w,10m}$ - brzina vjetra na visini od 10 metara, $\frac{m}{s}$;
- h_2 - visina za koju se traži brzina vjetra, 0,5 m;
- h_1 - visina na kojoj je mjerena brzina vjetra, 10 m;
- z_0 - hrapavost površine, za jezero iznosi 0,0002 m;

Jednadžba (8) i hrapavost površine za jezero uzeti su iz [34].

Prilikom odabira količine modula u obzir je uzeto da će površina jezera koju prekrivaju moduli biti jednaka 70% ukupne površine sustava, stoga se ukupna količina modula računa kao:

$$N = \frac{A_{modula}}{A_{sustava}} \cdot \frac{1}{A_{1,modul}} \cdot \frac{p_{jez,\%}}{100} \cdot A_{jezera} \quad (9)$$

Pri čemu je:

A_{modula} – površina koju prekrivaju moduli, m^2 ;

$A_{sustava}$ – površina koju prekrivaju svi dijelovi sustava na jezeru, m^2 ;

$A_{1,modul}$ – površina jednog modula, m^2 ;

A_{jezera} – površina jezera, m^2 ;

$p_{jez,\%}$ - pokrivenost jezera plutajućom solarnom elektranom, %

Nastavno na jednadžbu (9), instalirana, a ujedno i nazivna snaga elektrane jednaka je umnošku broja modula i njihove snage u standardnim ispitnim uvjetima:

$$P_n = N \cdot P_{STC} \quad (10)$$

3.3.2. Odabir fotonaponskih modula

Jedini hrvatski proizvođač fotonaponskih modula je Solvis, stoga su za analizu odabrani moduli Solvis model SV72-390 E čije su karakteristike prikazane u Tablica 2.

P_{STC} [W]	390
Struja kratkog spoja I_{SC} [A]	8,33
Napon praznog hoda U_{OC} [V]	44,3
Učinkovitost modula [%]	19,69
Dimenzije [mm]	1.981 x 1.000 x 40
Temperaturni koeficijent snage [%/°C]	-0,42
Degradacija snage [%/god]	U prvoj godini 3, do 25. godine 0.7083
Broj i vrsta ćelija	72 ćelije, monokristalični Si (PERC), 158x158 mm +/- 2 mm
Masa [kg]	22,5
Maksimalno opterećenje	Ispitano do 5.400 Pa, stražnja strana 2.400 Pa

Tablica 2 Karakteristike fotonaponskog modula [35]

Solvis proizvodi i module sa 144 ćelije, međutim moduli sa 60 ćelija i 72 ćelije su puno češće u primjeni za plutajuće solarne elektrane, stoga su plutače češće dimenzionirane za njih. Plutače predviđene za ovu elektranu su Hydrelia classic koje se može fiksirati tako da nagib panela bude 5°, 12° i 22° [36]. S obzirom da je bilo teško doći do podataka od Ciel et Terre koliko iznosi omjer

površine fotonaponskih modula i cijelog sustava uzet je podatak iz [37] koji iznosi 70%, a izabrani nagib je 22°.

3.3.3. Podaci o ozračenju, brzini vjetra i temperaturi

Podaci o ozračenju, brzini vjetra i temperaturi zraka uzeti su sa stranice europske komisije i njihovog alata PV GIS [38], a zbog veće preciznosti koriste se satni podaci iz 2020. godine, stoga proračun ima 8784 intervala. Dobiveni podaci su:

- T_a (izvorno T_{2m}) – temperatura zraka na visini od 2 m, °C;
- $V_{w,10m}$ (izvorno WS_{10m}) – brzina vjetra na visini od 10 m, $\frac{m}{s}$;
- G_b, G_d, G_r i H_{sun}

Slika 7. prikazuje koje postavke su podešene prilikom preuzimanja podataka iz geografskog informacijskog sustava.

Slika 7 Postavke za preuzimanje podataka o ozračenju

3.4. Procjena evaporacije

U ovom poglavlju opisano je kako je izračunata ušteda vode koja bi nastala postavljanjem plutajućih solarnih elektrana na odabrano akumulacijsko jezero te koliko je povećanje potencijala hidroelektrane koja bi iskoristila sačuvanu vodu.

3.4.1. Računanje evaporativnih gubitaka nepokrivene vodene površine

Prvi dio proračuna je računanje evaporativnih gubitaka kada vodena površina nije pokrivena, a zatim je izračunato koliko će vode evaporirati kada se postave plutajuće solarne elektrane veličine 20, 40, 60 i 80 posto površine jezera.

Za računanje evaporativnih gubitaka glavna jednačba je ona koja govori koliko milimetara vode po metru kvadratnom ispari tijekom određenog vremena [39]:

$$E_1 = \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{\Delta_w \cdot (3600 \cdot Q^* - 10^3 N_1) + 3600 \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot \frac{e_w^* - e_a}{r_a}}{\Delta_w + \gamma} \right) \quad (11)$$

Pri čemu je:

- E_1 – evaporativni gubitak, $\frac{mm}{m^2 \cdot h}$;
- λ – latentna toplota isparavanja, $\frac{MJ}{kg}$;
- Δ_w – nagib krivulje zasićenja vodenom parom pri temperaturi vode, $\frac{kPa}{^\circ C}$;
- Q^* - neto ozračenje na površinu jezera, $\frac{MJ}{m^2 \cdot h}$;
- N_1 – promjena akumulirane topline u vodnom tijelu, $\frac{MJ}{m^2 \cdot h}$;
- ρ_a – gustoća zraka, $\frac{kg}{m^3}$;
- C_a – specifična toplota zraka, $1,005 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ [40];
- e_w^* - tlak zasićene pare na temperature vode, kPa ;
- e_a - tlak pare na temperaturi zraka, kPa ;
- r_a – aerodinamički otpor, $\frac{s}{m}$;

- γ – psihrometrijska konstanta, $\frac{kPa}{^{\circ}C}$;

Veličine ovisne o ozračenju, vjetru, tlaku, temperaturi ili relativnoj vlažnosti su: λ , Δ_w , Q^* , ρ_a , e_w^* , e_a , r_a i γ . S obzirom da su promjenjive, a proračun se radi na satnoj razini i one su računate na satnoj razini.

Latentna toplota isparavanja za pojedini sat izračunata je iz izraza [39]:

$$\lambda = 2,501 - T_a \cdot 2,361 \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

Nagib krivulje zasićenja vodenom parom pri temperaturi vode je funkcija koja glasi [39]:

$$\Delta_w = \frac{4098 \cdot \left[4098 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_w}{T_w + 237,3} \right)} \right]}{(T_w + 237,3)^2} \quad (13)$$

Pri čemu je:

- T_w – izračunata temperatura vode, $^{\circ}C$;

Temperatura vode nije mjerena, već je za svaki sat računata uz set jednadžbi [39]:

$$T_w = T_e + (T_{w0} - T_e)^{\frac{1}{\tau}} \quad (14)$$

Pri čemu je:

- T_e – ravnotežna temperatura, temperatura površine pri kojoj će izmjena topline sa okolišem biti nula, $^{\circ}C$;
- T_{w0} – temperatura vode u prethodnom satu, $^{\circ}C$;
- τ – vremenska konstanta, h ;

Ravnotežna temperatura iznosi [39]:

$$T_e = T_n + \frac{Q^*}{4 \cdot \sigma \cdot (T_n + 273,15) + f(u) \cdot (\Delta_n + \gamma)} \quad (15)$$

Pri čemu je:

- T_n – temperatura vlažnog termometra, najniža temperatura na koju se zrak može ohladiti ishlapljivanjem vode u zrak pri konstantnom tlaku, $^{\circ}C$;
- σ – Stefan - Boltzmannova konstanta, $2,04133 \cdot 10^{-10} \frac{MJ}{m^2 \cdot K^4 \cdot h}$;

- $f(u)$ – funkcija vjetra, $\frac{MJ}{m^2 \cdot kPa \cdot h}$;
- Δ_n – nagib krivulje zasićenja vodenom parom pri temperaturi zraka, $\frac{kPa}{^\circ C}$;

Vremenska konstanta kontrolira promjene temperature vode i uglavnom se temelji na dubini vodenog stupca, a dobivena je za pojedini sat iz jednadžbe [39]:

$$\tau = \frac{\rho_w \cdot C_w \cdot z}{4 \cdot \sigma \cdot (T_n + 273,15)^3 + f(u) \cdot (\Delta_n + \gamma)} \quad (16)$$

Pri čemu je:

- ρ_w – gustoća vode, $\frac{kg}{m^3}$;
- C_w – specifični toplinski kapacitet vode, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$;
- z – srednja dubina vodenog tijela, m;

Temperature vlažnog termometra dobivene su iz jednadžbe [39]:

$$T_n = \frac{0,00066 \cdot 100 \cdot T_a + \left[\frac{4098 \cdot e_a}{(T_d + 237,3)^2} \right] \cdot T_d}{0,00066 \cdot 100 + \left[\frac{4098 \cdot e_a}{(T_d + 237,3)^2} \right]} \quad (17)$$

Pri čemu je:

- T_d – temperatura kondenzacije, temperatura na koju zrak, pri konstantnom tlaku, treba biti ohlađen da bi dosegao relativnu vlažnost od 100% pri čemu ne bi mogao akumulirati više vlage, $^\circ C$;

Temperature kondenzacije dobivene su iz jednadžbe [39]:

$$T_d = \frac{116,9 + 237,3 \cdot \ln(e_a)}{16,78 - \ln(e_a)} \quad (18)$$

Za računanje stvarnog tlaka pare na temperaturi zraka potrebni su podaci o relativnoj vlažnosti i tlaku zasićene pare [40]:

$$e_a = e_s \cdot \frac{rv}{100} \quad (19)$$

Pri čemu je:

- rv – relativna vlažnost, %;
- e_s – tlak zasićene pare, kPa;

Tlakovi zasićene pare određeni su iz jednadžbe [40]:

$$e_s = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_a}{T_a + 237,3}\right)} \quad (20)$$

Nagib krivulje zasićenja vodenom parom pri temperaturi zraka je funkcija [39]:

$$\Delta_n = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_a}{T_a + 237,3}\right)}\right]}{(T_a + 237,3)^2} \quad (21)$$

Funkcija vjetra za svaki sat određena je jednadžbom [39]:

$$f(u) = \left(\frac{5}{A}\right)^{0,05} \cdot (3,80 + 1,57 \cdot V_{w,10m}) \quad (22)$$

Pri čemu je:

A_{jezera} – površina vodnog tijela, m^2 ;

Neto ozračenja na površinu jezera, Q^* dobivena su sumiranjem direktne (u koju je uračunata visina Sunca) i difuzne komponente Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu [31]:

$$Q^* = G_b + G_d \quad (23)$$

Promjene akumulirane topline u vodnom tijelu određene su izrazom [39]:

$$N_1 = \rho_w \cdot C_w \cdot z \cdot (T_w - T_{w0}) \quad (24)$$

S obzirom da gustoća vode ovisi o promjeni temperaturi vode, a temperatura vode ovisi o gustoći postupak je bio iterativan, uz pretpostavku konstantne gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta izračunata je temperatura vode, a zatim su gustoća i specifični toplinski kapacitet izračunati prema toj temperaturi i uvršteni za ponovno računanje temperature vode sve dok se ulazne i izlazne vrijednosti ne izjednače.

Jednadžba za gustoću vode glasi [41]:

$$\rho_w = \frac{998,2}{1 + \beta \cdot (T_w - T_{w0})} \quad (25)$$

Pri čemu je:

β_1 – koeficijent volumne ekspanzije vode, prema [42] iznosi $0,0002 \frac{1}{^\circ C}$;

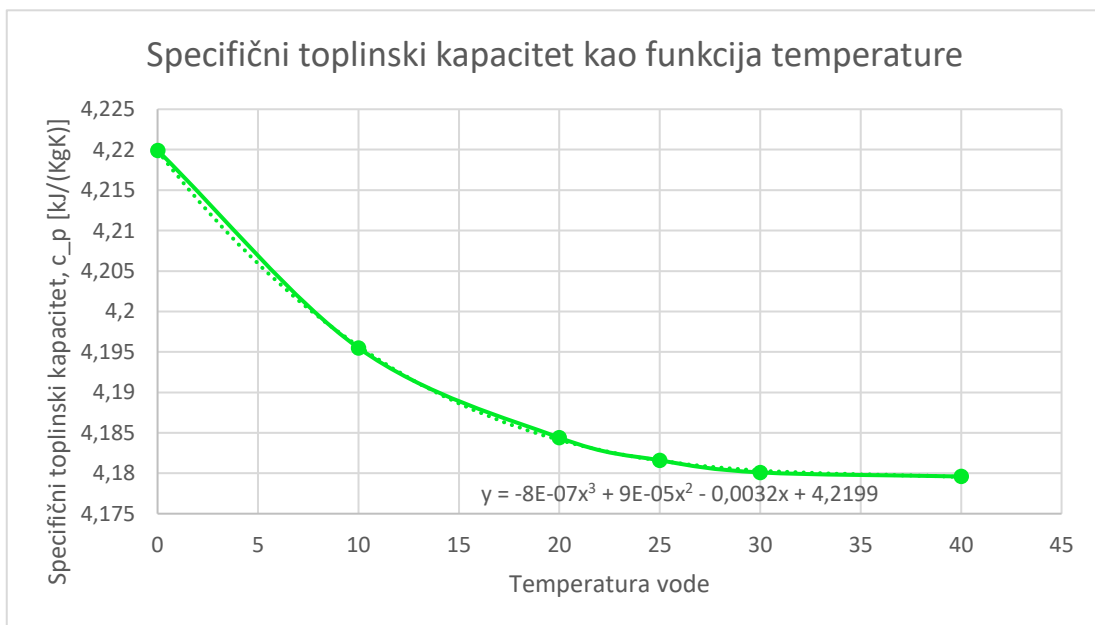
Za specifični toplinski kapacitet jednažba ovisnosti o temperaturi vode dobivena je excelovim alatom crta trenda na grafikonu temeljem temperatura od 0,01 °C do 40 °C preuzetih sa [43], izabrana je polinomska crta trenda trećeg reda i glasi:

$$C_w = -8 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,0032 \cdot T + 4,2199 \quad (26)$$

Tablica 3 i Grafikon 1 prikazuju kako se mijenja specifični toplinski kapacitet na različitim temperaturama.

$T [^{\circ}\text{C}]$	$c_p [\text{kJ}/(\text{kgK})]$
0,01	4,2199
10	4,1955
20	4,1844
25	4,1816
30	4,1801
40	4,1796

Tablica 3 Specifični toplinski kapacitet u ovisnosti u temperaturi [43]



Grafikon 1 Specifični toplinski kapacitet u ovisnosti o temperaturi

Gustoće zraka određene su iz jednažbe [44]:

$$\rho_a = \frac{p_d}{R_d \cdot T_a} + \frac{p_v}{R_v \cdot T_a} \quad (27)$$

Pri čemu je:

➤ p_d – tlak suhog zraka, Pa;

- p_v – tlak vodene pare, Pa;
- R_d – specifična plinska konstanta suhog zraka, $287,058 \frac{J}{kg \cdot K}$;
- R_v – specifična plinska konstanta vodene pare, $461,495 \frac{J}{kg \cdot K}$;

Tlak zasićene pare iznosi [44]:

$$p_1 = 6,1078 \cdot 10^{\left[\frac{7,5 \cdot T_a}{(T_a + 237,3)}\right]} \quad (28)$$

Stvarni tlakovi su određeni prema jednadžbi [44]:

$$p_v = p_1 \cdot r_v \quad (29)$$

Oduzimanjem tlaka vodene pare od ukupnog izmjerenog tlaka zraka dobiven je tlak suhog zraka [44]:

$$p_d = p_a - p_v \quad (30)$$

Psihrometrijska konstanta povezuje parcijalni tlak vode u zraku s temperaturom zraka i sadrži dvije konstante, međutim i dvije varijabilne vrijednosti, stoga nije konstantna [40]:

$$\gamma = \frac{p_a \cdot C_a}{MW_{omjer} \cdot \lambda} \quad (31)$$

Pri čemu je:

- MW_{omjer} – omjer molekularne mase vodene pare i suhog zraka, 0,622 [39];

Aerodinamički otpor dobiven je iz jednadžbe [45]:

$$r_a = \frac{4,72 \cdot \left[\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)\right]^2}{1 + 0,536 \cdot V_{w,2m}} \quad (32)$$

Pri čemu je:

- $V_{w,2m}$ – brzina vjetra na visini od 2 metra, $\frac{m}{s}$;
- z_m – visina, može varirati, ali najpreciznija je za visinu od 2 m;

Brzine vjetra na visini od 2 m dobivene su iz jednadžbe [40]:

$$V_{w,2m} = V_{w,10m} \cdot \frac{4,87}{\ln(687 \cdot 10 - 5,42)} \quad (33)$$

Tlak zasićene pare na temperaturi vode određen je iz jednadžbe [39]:

$$e_w^* = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_w}{T_w + 237,3}\right)} \quad (34)$$

3.4.2. Računanje evaporativnih gubitaka nakon postavljanja plutajuće solarne elektrane

Sada kada su poznate sve jednadžbe za određivanje evaporativnih gubitaka slijedi korak u kojem se određuje koliko će vode biti uštedeno. Temeljna razlika je u Sunčevom ozračenju, kada se površina vode prekrije ona prima manje topline, te teže isparava, zračenje koje dobiva ispod pokrivenog dijela dijeli se na dugovalno i kratkovalno [46]:

$$Q_{cover}^* = SW_{cover} + LW_{cover} \quad (35)$$

Pri čemu je:

- SW_{cover} – kratkovalna komponenta Sunčevog ozračenja, $\frac{W}{m^2}$;
- LW_{cover} – dugovalna komponenta ozračenja, $\frac{W}{m^2}$;

S obzirom da je konfiguracija modula takva da do površine ne može doprijeti direktno Sunčevo ozračenje kratkovalna komponenta iznosi [46]:

$$SW_{cover} = (1 - \alpha) \cdot R_d \quad (36)$$

Pri čemu je:

- α – faktor apsorpcije;

Izraz $(1 - \alpha)$ je faktor refleksije koji se još naziva albedo, a za potrebe ovog proračuna uzeta je vrijednost 0,05 zato što se radi o relativno maloj geografskoj širini, pri većim visinama Sunca ili za veće vodene površine iznosi od 0,03 do 0,1. Kad je Sunce nisko na jezeru može iznositi i više od 0,1 [29].

Dugovalno ozračenje dobiveno je iz jednadžbe [46]:

$$LW_{cover} = \sigma \cdot T_w^4 \cdot (0,56 - 0,0092 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot (0,1 + 0,9 \cdot C) \quad (37)$$

Pri čemu je:

- C – faktor naoblake;

Faktor naoblake varira između 0 za potpuno čisto nebo i 0,3 za maksimalnu naoblaku, u proračunu je korištena naoblaka od 0,2 kako bi potencijal za smanjenje evaporacija ostao što veći. Ukupno ozračenje iznosit će [46]:

$$Q^* = Q_{free}^* \cdot (1 - x) + Q_{cover}^* \quad (38)$$

Pri čemu je:

- Q_{free}^* - ozračenje na slobodnu površinu koje ostaje jednako kao u prvom dijelu proračuna, $\frac{W}{m^2}$;
- x – pokrivenosti jezera solarnom elektranom, $[0, 1]$;

Svi ostali dijelovi proračuna ostaju jednaki, a o ukupnom ozračenju direktno su ovisni jedino ravnotežna temperatura i količina vode koja ishlapi.

Zbog lakšeg razlikovanja količina vode koja ishlapi nakon ugradnje solarne elektrane označava se sa E_{FPV} [39].

$$E_{FPV} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\Delta_w \cdot (3600 \cdot Q^* - 10^3 N) + 3600 \cdot \rho_a \cdot C_a \frac{(e_w^* - e_a)}{r_a}}{\Delta_w + \gamma} \right) \quad (39)$$

Ušteda vode dostupne za proizvodnju iz hidroelektrane

Ušteda vode jednaka je:

$$\Delta E = E_1 - E_{FPV} \quad (40)$$

Poboljšanje je definirano kao omjer uštede i evaporacije čistog jezera:

$$\eta_1 = \frac{\Delta E}{E_1} \quad (41)$$

Znajući ukupnu količinu vode koja prođe preko turbine tijekom godine moguće je izračunati koliko će ušteda vode omogućiti povećanje proizvodnje hidroelektrane.

Na osnovu toga proizvodnja bi mogla iznositi:

$$E_{HE,novo} = \left(1 + \frac{\Delta E}{V_{HE,uk}}\right) \cdot E_{HE} \quad (42)$$

Pri čemu je:

- $E_{HE,novo}$ – nova potencijalna godišnja proizvodnja iz hidroelektrane, MWh;
- $V_{HE,uk}$ – ukupna količina vode koju hidroelektrana iskoristi tijekom godine, m³;
- E_{HE} – stvarna proizvodnja hidroelektrane, $\frac{MWh}{god}$;

Za usporedbu rada sa solarnom elektranom iskorišteni su podaci o dnevnom protoku i godišnjoj proizvodnji očitanoj iz [3] te su na temelju tih podataka kreirani grafovi. Dnevna proizvodnja iz hidroelektrane jednaka je:

$$E_{HE,dan} = \frac{q_{m,dan}}{q_{m,god}} \cdot E_{HE} \quad (43)$$

Pri čemu je:

$q_{m,dan}$ – dnevni protok vode, $\frac{m^3}{dan}$;

$q_{m,god}$ – godišnji protok vode, $\frac{m^3}{god}$;

3.4.3. Podaci o temperaturi, tlaku, relativnoj vlažnosti zraka i protoku

Podaci o temperaturi, tlaku i relativnoj vlažnosti zraka dobiveni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) za najbližu glavnu meteorološku postaju. S obzirom da je odabrano jezero akumulacija Prančevići podaci su uzeti za Split. Najbliža klimatološka postaja nalazi se u Senju, ali na klimatološkim postajama mjerenja se vrše samo tri puta dnevno, a Split nije puno dalje stoga je preciznost veća. Temperature u Splitu u odnosu na temperaturu iznad jezera Prančevići su stabilnije zato što more hladi Split ljeti, a zimi ga grije, ali prosječna temperatura je u Splitu veća za tri stupnja.

Bez obzira na razliku u srednjoj godišnjoj temperaturi manje bi bilo ispravno raditi proračun sa mješovitim podacima za tlak i temperaturu.

Za procjenu dnevne proizvodnje iz hidroelektrane korišteni su podaci o protoku dobiveni od DHMZ-a za mjerne stanice Omiš i Tisne Stine I, a zatim su njihovi protoci oduzeti kako bi se dobio i protok kroz HE Zakučac. Kroz HE Kraljevac teče voda biološkog minimuma $8 \frac{m^3}{s}$ i onda služi kao rezerva za druge hidroelektrane u slivu rijeke Cetine [47].

3.5. Usporedba potencijala proizvodnje iz plutajuće solarne elektrane i solarne elektrane na tlu

Za otkrivanje koliko dobrobiti za učinkovitost donosi postavljanje na vodna tijela potrebno je napraviti usporedbu sa elektranom koja bi bila postavljena u blizini, ali na zemlji. Za proračun potencijala takve elektrane potrebno je koristiti različite modele za određivanje temperature modula, jer je ona direktno povezana sa učinkovitošću.

Korišteni modeli za kopno su nazvani prema autorima, a prvi od njih je Schott (1985) prema kojem temperatura modula iznosi [48]:

$$T_c = T_a + 0,028 \cdot G - 1 \quad (44)$$

Ovaj model je validiran za brzine vjetra od $1 - 1,5 \frac{m}{s}$ i temperature zraka od $0 - 35^\circ C$.

Sljedeći korišteni model je Ross i Smokler (1986) koji vrijedi za samostojeće solarne elektrane [48]:

$$T_c = T_a + 0,035 \cdot G \quad (45)$$

Treći korišteni model Chenni (2007) u obzir ne uzima koeficijent toplinskih gubitaka, ali je najbliži modelu korištenom za plutajuću solarnu elektranu [48]:

$$T_c = 0,943 \cdot T_a + 0,028 \cdot G - 1,528 \cdot V_{w,0,5m} + 4,3 \quad (46)$$

3.6. Ograničenja

Prilikom odabira vodenih površina na vektorskom sloju pokrova zemljišta Corine nije bilo Jezera Bukovnik koje koristi HE Gojak. Isto tako nije označeno ni na Google kartama, a podaci o površini nisu pronađeni niti na internetu. Osim Bukovnik jezera, nije bilo podataka ni za Kompenzacijski bazen Selište koje koristi HE Senj. Tri akumulacijska jezera za hidroelektrane, koja su u planu ili su trebala biti izgrađena, za koja ne postoje javni podaci su Krčić u slivu rijeke Krke za MHE Krčić, Zoretići i Kukuljani. Problem jezera Krčić je to što bi potpuno nestao Slap Krčić, a proizvodnja iz hidroelektrane ne bi bila dovoljna ni za potrebe grada Knina [49]. Druge dvije potencijalne akumulacije trebale su biti na rijeci Rječini za HE Rijeka. Kukuljani su trebali imati volumen 8 mil. m^3 , Zoretići $16,5 \text{ mil. m}^3$. Njihova gradnja bila je planirana krajem 20. stoljeća, ali moralo bi se potopiti pedesetak kuća u Kukuljanima stoga je projekt obustavljen [50]. Iseljnjem stanovništva kao u slučaju Kosinja postoji mogućnost izgradnje jezera.

Podaci o tlaku zraka i relativnoj vlažnosti za proračun evaporacije nisu 100% točni jer se satna mjerenja vrše samo na glavnim meteorološkim postajama koje se nalaze u gradovima, a jezera za hidroelektrane su uglavnom smještena van gradova osim Varaždinskog jezera koje je jako blizu grada. Temperatura vode u jezeru nije mjerena već je proračunski određena što također smanjuje točnost, ali je rađeno prema testiranom i verificiranom.

U analizu potencijala proizvodnje nisu uključeni Crveno i Modro jezero kod Imotskoga, ali su površinom mali i nepogodni za instalaciju elektrane zbog strmih stijena koje ih okružuju.

Prilikom određivanja rada hidroelektrane nije bilo podataka o satnoj i dnevnoj proizvodnji. Ne postoje podaci po protoku za mjernu stanicu Omiš u 2020. godini od kojih bi se oduzeli podaci koje izmjeri stanica Tisne Stine I te bi to bio protok kroz HE Zakučac. Druga opcija je da se mjerenjima sa mjerne stanice Vedrine pridodaju oborine koje izmjeri kišomjerna postaja Prančevići - brana u 2020. godini, ali od 2017. godine nisu definirani podaci o protoku jer

se Ruda nizvodno ulijeva u Cetinu i usporava ju. Kao posljedica toga iskorišteni su podaci iz 2016. godine za protok na mjernoj stanici Vedrine.

Prilikom proračuna evaporacija u obzir nije uzeta mogućnost smrzavanja jezera što znači da bi u nekim trenucima evaporacija bila manja od izračunate. Na određenim vodenim površinama u Hrvatskoj smrzavanje bi moglo biti problem, a ukoliko je pokrivenost jezera 80 %, većina jezera će biti na granici smrzavanja. Iz tog razloga podkonstrukcija mora biti proračunata i otporna na smrzavanje.

3.7. Osvrt na metode rada i validacija

Za odabir jezera korišteni su izvori koje koriste ministarstva stoga se može zaključiti da su to jedni od najpouzdanijih podataka. Copernicus (prethodno GMES) je program Europske Unije koji se od 1990. godine bavi promatranjem Zemlje i promjenama na njoj u četiri etape. Baza podataka Corine napravljena je u suradnji sa europskim državama i besplatna je za sve. Njezina točnost za 2018. godinu je veća ili jednaka 85%. Za njezinu izradu bilo je potrebna jedna i pol godina za razliku od prve iz 1990. godine koja se radila 10 godina. Razlika u vremenu potrebnom za izradu je razumljiva s obzirom da za prvu snimku Zemlje nisu imali predznanja kao za četvrtu. Isto tako u 1990. godini sudjelovalo je 27 država, dok je u zadnjoj etapi 39 država [51][52].

Model koji je korišten za računanje potencijala proizvodnje dan je od NREL - a. Nacionalni Laboratorij za obnovljivu energiju nalazi se u Sjedinjenim Američkim Državama u Coloradu i vodeći je razvojni centar za istraživanja na području obnovljivih izvora energije i energetske učinkovitosti u državi. Model za računanje potencijala proizvodnje postoji od 1988. godine [53][54]. Razlike između tog modela i onog koji je korišten ovdje je u tome što je ovdje temperatura modula računata na drugačiji način. To je zato što se ovdje radi o plutajućim solarnim elektranama. U ovom modelu za sve potencijalne elektrane izračunata je srednja snaga na pragu elektrane umjesto instalirane snage. Temperatura modula određena je modelom iz članka [32] koji je 2018.

godine objavljen u časopisu Energies. Model je validiran usporedbom sa mjerenjima na jezeru Hapcheon u Južnoj Koreji. Pogreška temperature modela iznosi od 2,06% do 4,40% u odnosu na izmjerene vrijednosti. Točnije temperatura iz modela je u prosjeku veća od izmjerene temperature. Može se zaključiti da će performanse plutajuće solarne elektrane biti bolje nego što je određeno proračunom [32].

Model za računanje evaporacije na slobodnom jezeru koji je korišten u ovom proračunu korišten je i za računanje evaporacije na jezeru u australskoj najvažnijoj poljoprivrednoj regiji (Murray – Darling Basin) koja čini više od 39% australske bruto vrijednosti u poljoprivrednoj proizvodnji [55]. Taj model se naziv Penman – Monteith i definiran je 1965. godine, ali korištene su i neke jednadžbe koje nisu korištene u proračunu za evaporaciju na Murray – Darling Basinu. Te jednadžbe su preuzete u skladu sa Penman – Monteith-ovim modelom. Razlika u odnosu na referentni proračun, u kojem se računa dnevna evaporacija, je i to što su konstante i izmjereni i izračunati podaci uzorkovani svaki sat pa je tako i evaporacija računata za jedan sat.

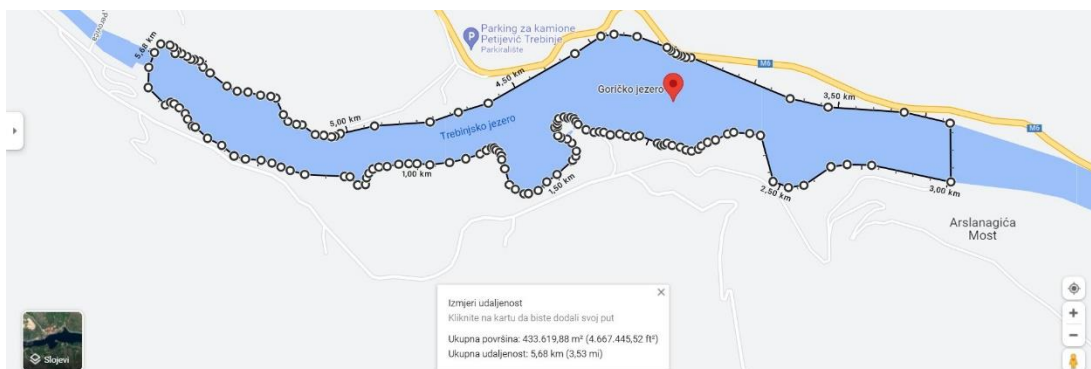
Potencijal povećanja proizvodnje iz hidroelektrane napravljen je proporcionalnošću. Ako se uz trenutni protok proizvede jedna količina energije i taj protok se poveća nekoliko posto, isto toliko posto povećat će se i proizvodnja iz hidroelektrane. Uz poznatu godišnju proizvodnju, očitano iz [3], i satni te dnevni protok kroz hidroelektranu moguće je odrediti koliko energije se proizvelo koji sat i koji dan u godini. Na temelju toga napravljeni su dijagrami za usporedbu sa proizvodnjom iz plutajuće solarne elektrane.

4. Mapiranje vodenih površina

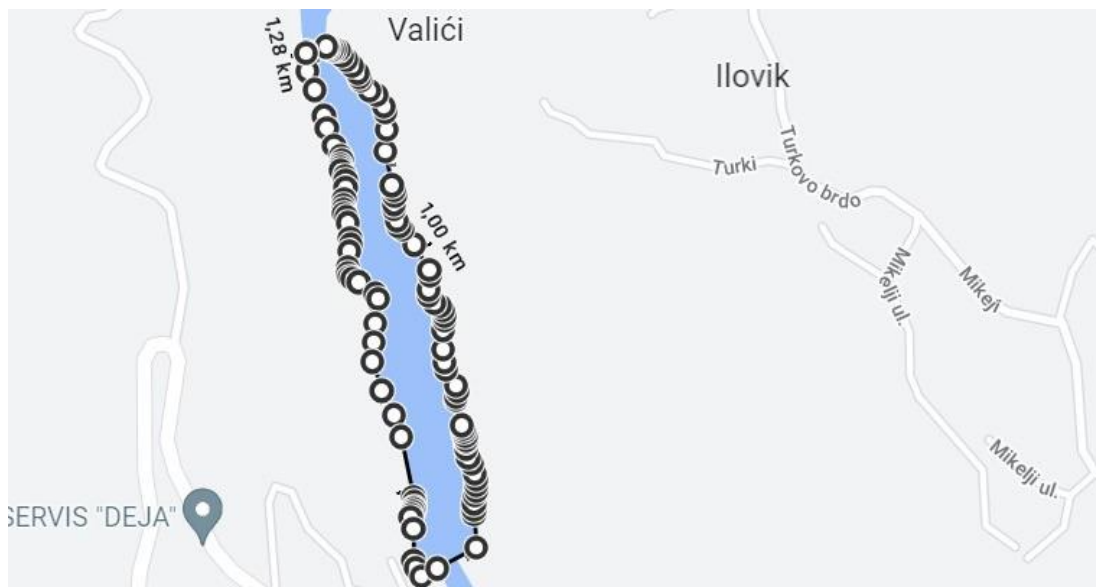
Prema metodama definiranim u 3.2 u ovom poglavlju izlistane su vodene površine u Republici Hrvatskoj te su prikazane snage elektrana s obzirom na zauzeće površine jezera. Analizirano je 127 vodenih površina bez obzira jesu li su rezervati, ribnjaci, nacionalni parkovi ili parkovi prirode.

4.1. Popis vodenih površina

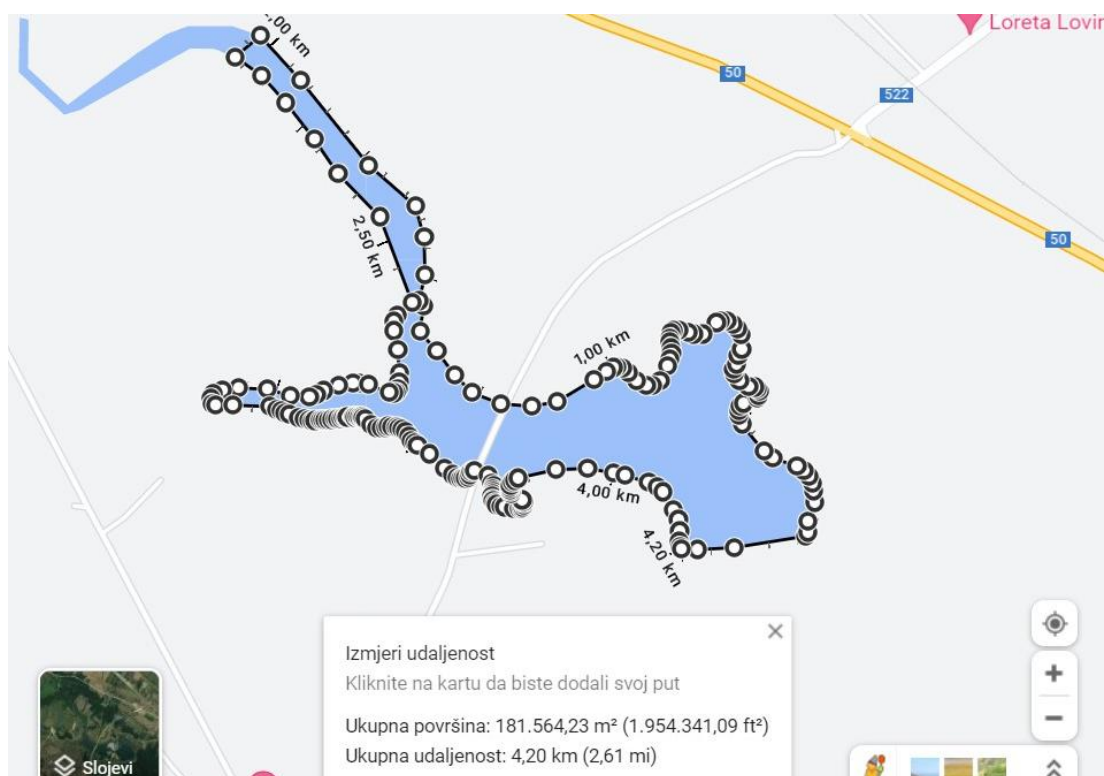
Popis vodnih tijela nalazi se na Slika 11. Iako su sortirana po abecedi nedostatak je to što je nekima u imenu pridodano jezero kao prva riječ stoga nije precizno, međutim za većinu tijela je na Google kartama tako i napisano. Za neka jezera nisu postojali podaci u bazi podataka. Za njih je površina izmjerena alatom Google karti za mjerenje udaljenosti. To su Goričko jezero koje se nalazi na Slika 8, a naziva se još i Trebinjsko. Nalazi se na rijeci Trebišnjici te je akumulacija za hrvatske hidroelektrane Zavrelje i Dubrovnik. Drugo jezero je Valić (Slika 9) na rijeci Rječini koje koristi HE Rijeka. Zadnje jezero za koje je rađena samo usporedba je jezero Obsenica (Slika 10) koje je treća akumulacija RHE Velebit (voda iz nje ide u jezero Štikada). Na Slika 11 „Obsenica jezero Google Maps“ predstavlja jezero mjereno pomoću alata Google Karti, a „Obsenica Krivalj“ je isto jezero, ali podaci o njemu su preuzeti iz Copernicusove baze podataka (Corine Land Cover) za 2018. godinu stoga su ti podaci korišteni za procjenu potencijala proizvodnje [28][52].



Slika 8 Goričko jezero



Slika 9 Jezero Valić



Slika 10 Jezero Obsenica

Podaci o Bilećkom i Buškom jezeru preuzeti su sa Wikipedije [56][57]. Visovačko jezero 2 predstavlja dio Visovačkog jezera kod Roškog Slapa koji je prema Copernicusovoj snimci odvojen rijekom Krkom od većeg dijela

Visovačkog jezera. Druga jezera i ribnjaci koji imaju brojku „2“ u imenu također su drugi dio tog vodnog tijela. Neka vodna tijela su toliko mala da nemaju službene nazive stoga su označeni prema imenu rijeke ili mjesta koje se blizu njih nalaze, a to su: Drava Somogy Megye na granici sa Mađarskom, Erdut Dunav, Gliboki potok Dvorac Inkey, Gliboki potok Rasinja, Glogovnica Čabraj, Grudnjak Vučica, Hrvatska Dubica Una, Jaruge Sikirevci, Jastrebarsko ribnjak, Kneževi Vinogradi, Kolarevo Selo Česma, Kostanj Česma, Legrad – Murakeresztur, Kula Norinska, Kuti Badžula, Mura Miklavec, Novaki Pazinski Pazinčica, Orešje, Njivice, Popovac, Popovac Karašica, Popovača Repušnica, Šandorovec, Šodolovci, Švajcarnica, Trstenik, Vukovina. Iako je na popisu Trakošćansko jezero je trenutno isušeno zbog čišćenja mulja [58]. Podaci za jezero Kosinj uzeti su iz [59] s obzirom da još nije napravljeno.

Naziv	Površina [km ²]	Naziv	Površina [km ²]	Naziv	Površina [km ²]
Abesinja	0,595661	Jezero Jegeniš	0,671044	Popovača Repušnica	0,424988
Akumulacijsko jezero Bačica	0,256328	Jezero Koritnjak (Bučje Gorjansko)	0,858396	Prančevići jezero	0,496000
Akumulacijsko jezero Kosinj	11,550000	Jezero Kozjak	2,587692	Prokljansko jezero	11,677989
Bačinska jezera	1,416783	Jezero Lepenica	0,666165	Prološko jezero	1,883586
Banova jaruga ribnjaci	2,776548	Jezero Bajer	0,309037	Razovac	0,474440
Bijelo brdo	1,349884	Jezero Mir	0,250818	Ribnjaci Draganić	3,595785
Bilečko jezero	33,000000	Jezero Petnja	3,040985	Ribnjaci Draganić 2	1,077773
Biljsko jezero	0,911319	Jezero Petnja 2	0,258029	Ribnjaci Garešnica	19,844530
Blačansko jezero	1,426746	Jezero Sabljaci	1,485933	Ribnjaci Jasinja	14,670091
Brijansko jezero	0,391454	Jošava jezero	0,907633	Ribnjaci Lipovljani	4,296181
Buško Blato (jezero)	55,800000	Kneževi Vinogradi	0,000331	Ribnjaci Lipovljani 2	1,529662
Butoniga jezero	1,977526	Kolarevo Selo Česma	5,859421	Ribnjaci Sveti Đurađ	0,436828
Crna Mlaka	6,456364	Kompenzacijski bazen Gusić polje	0,456336	Ribnjak Breznica Našička	13,222268
Čigoč	0,254605	Kopačevo jezero	1,038302	Ribnjak Kopački rit	3,671540
Čingi-Lingi	0,367103	Kostanj Česma	3,157469	Ričice (Zeleno jezero)	1,244785
Desansko jezero	0,343845	Krušičko jezero	3,572366	Siromaja	0,323464
Donji Miholjac ribnjaci	9,526938	Kula Norinska	0,318397	Sportski ribnjaci Pisarovina	1,428287
Drava Somogy Megye	0,000232	Kuti Badžula	1,119872	Sportski ribnjaci Pisarovina 2	0,263990
Draž	0,165733	Kutina Ilova	0,328112	Stara Sava	0,569244
Dubravsko jezero	17,251474	Lapovac	0,657912	Staro Štefanje Česma ribnjaci	7,248927
Đurđevac ribnjaci	0,448261	Legrad - Murakeresztur	0,000366	Sveti Đurđ	0,509323
Erdut Dunav	0,659615	Letovanić	0,340036	Sveti Đurđ 2	0,476580
Feričanci	0,352100	Lokvarsko jezero	1,643867	Šandorovec	0,251691
Fuka jezero	0,417282	Lonjsko polje	0,362042	Šoderica	2,173762
Gliboki potok Dvorac Inkey	0,341203	Lonjsko polje ribnjaci	6,584945	Šodolovci	0,323700
Gliboki potok Rasinja	0,288757	Mali Balaton	0,403031	Štikada	3,116257
Glogovnica Čabraj	0,250617	Mlinac	0,270074	Švajcarnica	0,347435
Gmajna	0,308202	Motičnjak	0,451449	Toplica Garešnica 1	0,476729
Golubičko jezero	0,350000	Mura Miklavec	0,059401	Toplica Garešnica 2	0,518407
Goričko jezero	0,433620	Nadolez, Votok, Juš i Finzula, Rakitje	1,709201	Trakošćan	0,283927
Grubišno polje Ilova	13,827096	Nova Drenčina	0,267000	Tribaljsko jezero	0,417720
Grudnjak Vučica	10,118326	Novaki Pazinski Pazinčica	0,329587	Trstenik	0,560501
Hrvatska Dubica Una	0,004822	Njivice	0,329738	Valić jezero	0,036086
Ivankovo	0,266689	Obsenica jezero Google Maps	0,181564	Varaždinsko jezero	10,582641
Jaruge Sikirevci	1,857028	Obsenica Krivaj	0,257598	Vela Solina	0,743148
Jarun	0,888560	Odretni kanal Sava-Odra	0,996867	Visovačko jezero	7,366186
Jastrebarsko ribnjak	0,309867	Orešje	0,416076	Visovačko jezero 2	0,408763
Jegeniš 2	0,315303	Ormoško jezero	1,521891	Višnjica	0,302702
Jezera Savica	0,748166	Peručko jezero	18,084941	Vransko jezero	30,650299
Jezero Birina	0,258140	Pomoćin	0,343195	Vransko jezero Cres	5,482255
Jezero Borovik	1,324666	Ponikve Krk	0,492416	Vukovina	0,272094
Jezero broj 1-8	0,423132	Popovac	0,578067	Zajarki	0,431726
Jezero Čiče	1,167843	Popovac Karašica	0,252291		

Slika 11 Popis vodnih tijela u Republici Hrvatskoj

4.2. Potencijal za proizvodnju električne energije iz plutajućih solarnih elektrana

Potencijal proizvodnje iz plutajućih solarnih elektrana najviše ovisi o površini jezera, jer se na veću površinu može postaviti više modula. Na Slika 12 prikazano je koliku srednju snagu može imati elektrana ukoliko zauzima određenu površinu vodnog tijela za trideset najvećih tijela. Srednja snaga označena je sa $P(0,x)$ pri čemu je x postotak pokrivenosti jezera (20,40,60 i 80). Srednja snaga odabrana je za vremenski interval od 8784 h tijekom prijestupne 2020. godine, razlog za to je što se svaki sat mijenja temperatura modula, pa tako i učinkovitost. Za računanje potencijala proizvodne energije ne bi bilo ispravno uvrstiti navedenu snagu u jednadžbu (3), nego se za svaki sat uzima raspoloživa snaga u tom satu. Detaljnija analiza prikazana je u sljedećem poglavlju za odabrano jezero.

Unutar trideset najvećih vodenih površina čak je devet akumulacijskih jezera za hidroelektrane, od kojih se dva najveća (Buško i Bilečko jezero) nalaze u Bosni i Hercegovini, a jedanaesto najveće (Kosinj) još nije napravljeno. Ostala akumulacijska jezera hidroelektrana su Peručko koje koristi više elektrana u slivu rijeke Cetine koje su prikazane na Slika 13, zatim Dubravsko i Varaždinsko u Sjevernoj Hrvatskoj, Visovačko jezero blizu NP Krka, Krušičko jezero (drugog naziva Kruščica) koje koriste hidroelektrane Senj i Sklope, te Štikada koju koristi RHE Velebit.

Najveće jezero koje nije akumulacijsko jezero za hidroelektranu je Vransko jezero kod Biograda, a ono je jedno od dvanaest parkova prirode u Hrvatskoj. Tamo je viđeno 235 vrsta ptica, na jezeru postoji sportski ribolovni turizam, a prisutan je i kupališni turizam. Gubici vode iz njega su izraženi, a ljeti je voda iznimno plitka. Pri nižim vodostajima dolazi do zaslanjivanja jezera jer je kanalom povezano s morem. Na sjeverozapadu Vranskog jezera 1983. godine proglašen je ornitološki rezervat, a osim njega i Crna Mlaka je ornitološki rezervat. Iz navedenih razloga postavljanje plutajućih solarnih elektrana na Vransko jezero kod Biograda je potreba. Postavljanje je na određene dijelove potpuno zabranjeno, a za druge treba dobiti dozvolu koju je

u slučaju parka prirode teže dobiti. Drugi parkovi prirode čija su jezera među najvećih trideset su Kopački rit i Lonjsko polje, a od Nacionalnih parkova tu su jezero Kozjak koje je dio Plitvičkih jezera, te Visovačko jezero koje se dijelom nalazi uz Nacionalni park Krka. Osim toga Visovačko jezero je i akumulacija za HE Jaruga za koju jedinu nisu pronađeni podaci o volumenu. Još jedno jezero koje je od velike važnosti za prirodu je slano jezero Mir, u Parku prirode Telašćica, koje ima izraženo ishlapljivanje vode te zbog toga visok salinitet.

R. br.	Jezero	A [km ²]	P(0,2) [MW]	P(0,4) [MW]	P(0,6) [MW]	P(0,8) [MW]
1	Buško Blato (jezero)	55,80	1.361,02	2.722,04	4.083,06	5.444,08
2	Bilečko jezero	33,00	800,51	1.601,01	2.401,52	3.202,03
3	Vransko jezero kod Biograda	30,65	773,44	1.546,88	2.320,32	3.093,76
4	Ribnjaci Garešnica	19,84	481,83	963,67	1.445,50	1.927,33
5	Peručko jezero	18,08	439,82	879,63	1.319,45	1.759,26
6	Dubravsko jezero	17,25	419,98	839,96	1.259,94	1.679,92
7	Ribnjaci Jasinje	14,67	356,01	712,02	1.068,03	1.424,04
8	Grubišno polje Ilova	13,83	335,36	670,73	1.006,09	1.341,45
9	Ribnjak Breznica Našička	13,22	321,15	642,30	963,44	1.284,59
10	Prokljansko jezero	11,68	281,14	562,28	843,42	1.124,56
11	Akumulacijsko jezero Kosinj	11,55	282,35	564,71	847,06	1.129,42
12	Varaždinsko jezero	10,58	257,69	515,38	773,07	1.030,76
13	Grudnjak Vučica	10,12	245,77	491,54	737,31	983,07
14	Donji Mihaljac ribnjaci	9,53	231,39	462,77	694,16	925,54
15	Visovačko jezero	7,37	177,35	354,71	532,06	709,41
16	Staro Štefanje Česma ribnjaci	7,25	176,00	352,01	528,01	704,02
17	Lonjsko polje ribnjaci	6,58	159,69	319,39	479,08	638,78
18	Crna Mlaka	6,46	156,72	313,45	470,17	626,90
19	Kolarevo Selo Česma	5,86	142,29	284,58	426,88	569,17
20	Vransko jezero Cres	5,48	138,41	276,82	415,23	553,64
21	Ribnjaci Lipovljani	4,30	104,19	208,38	312,57	416,75
22	Ribnjak Kopački rit	3,67	89,12	178,23	267,35	356,47
23	Ribnjaci Draganić	3,60	87,32	174,63	261,95	349,27
24	Krušičko jezero	3,57	87,24	174,48	261,72	348,96
25	Kostanj Česma	3,16	77,26	154,52	231,77	309,03
26	Štikada	3,12	75,90	151,81	227,71	303,62
27	Jezero Petnja	3,04	73,82	147,65	221,47	295,30
28	Banova jaruga ribnjaci	2,78	67,34	134,67	202,01	269,34
29	Jezero Kozjak	2,59	63,74	127,48	191,22	254,96
30	Šoderica	2,17	52,89	105,79	158,68	211,57

Slika 12 Najveća vodna tijela u Hrvatskoj i bližoj okolini vezana uz proizvodnju električne energije iz hidroelektrana u Hrvatskoj

Prilikom odabira jezera za koje je napravljena detaljnija analiza, tj. procjena evaporacije i usporedba proizvodnje se elektranom na tlu na lokaciji blizu jezera te procjena utjecaja na hidroelektranu, najvažniji faktori bili su trajanje

korištenja, srednja dubina i proizvodnja hidroelektrane koji su prikazani na Slika 13.

Trajanje korištenja je vrijeme potrebno da se maksimalnom snagom proizvede količina energije E_{uk} , prilikom čega je period razmatranja proizvodnje 2020. godina, izraženo u satima. [60]

Srednja dubina izračunata je kao omjer površine jezera i njegovog volumena uz pretpostavku da je jezero u obliku kvadra. Preciznost takvog izračuna je upitna, ali reljefi jezera su nepoznati, stoga je ovo najbolja opcija.

Proizvodnja hidroelektrane je također bitna, i hoće li se solarna i hidroelektrana moći nadopunjavati. U današnjem sustavu gdje je cilj postići što

Jezero	površina [km ²]	Trajanje korištenja [h]	Hidroelektrana	Zapremnina [m ³]	Srednja dubina [m]
Visovačko jezero	7,366186	1763,508228	HE Jaruga	nepoznato	nepoznato
Brljansko jezero	0,391454	1724,099182	HE Miljacka	375000	0,957967667
Razovac	0,474440	1720,786294	RHE Velebit	1810000	3,815024615
Goričko jezero	0,433620	1709,224489	HE Trebinje II HE Dubrovnik HE Zavrle RHE Čapljina	9000000	20,75550595
Bilečko jezero	33,000000	1706,119521	HE Trebinje I HE Trebinje II HE Dubrovnik HE Zavrle RHE Čapljina	1280000000	38,78787879
Prančevići jezero	0,496000	1699,827413	HE Zakućac HE Kraljevac	6800000	13,70967742
Buško Blato (jezero)	55,800000	1656,618622	HE Orlovac HE Đale HE Zakućac HE Kraljevac	800000000	14,33691756
Peručko jezero	18,084941	1651,676182	HE Peruća HE Đale HE Zakućac HE Kraljevac	540000000	29,85909659
Golubičko jezero	0,350000	1642,166098	HE Golubić	187000	0,534285714
Štikada	3,116257	1580,625476	RHE Velebit	136500000	43,80254838
Jezero Valić	0,036086	1567,887861	HE Rijeka	470000	13,02444161
Obsenica Krivalj	0,257598	1557,983889	RHE Velebit	2700000	10,48144193
Jezero Lepenica	0,666165	1544,606107	CHE Lepenica	3800000	5,704292503
Krušičko jezero	3,572366	1530,045625	HE Sklope HE Senj	128000000	35,8305999
Varaždinsko jezero	10,582641	1525,885931	HE Čakovec	51000000	4,81921292
Ormoško jezero	1,521891	1522,668856	HE Varaždin	8000000	5,256619811
Dubravsko jezero	17,251474	1515,072204	HE Dubrava	93500000	5,41982676
Kompenzacijski bazen Gusić polje	0,456336	1490,852068	HE Senj	1500000	3,287048479
Lokvarsko jezero	1,643867	1477,238793	HE Vinodol CHE Fužine	33800000	20,56127916
Jezero Bajer	0,309037	1471,43455	HE Vinodol CHE Fužine CHE Lepenica	1250000	4,044824127
Jezero Sabljaci	1,485933	1460,629147	HE Gojak	3300000	2,220826821

Slika 13 Trajanje korištenja solarnih elektrana i volumen vodnih tijela

veću proizvodnju iz solarnih elektrana poželjno je da se svi mogući izvori i spremnici prilagode njima.

U ovom radu izabrano je jezero na kojem će se hidroelektrana moći prilagoditi solarnoj elektrani u svakom trenutku. Za većinu akumulacijskih jezera volumeni su uzeti iz [61], a jezera za koja su podaci pronađeni u drugoj literaturi su: Bilečko jezero [62], Buško jezero [57], Krušičko jezero [63], Golubičko jezero [64], akumulacijsko jezero Kosinj [59].

4.3. Usporedba potencijala sa postojećim plutajućim solarnim elektranama

Kada bi na bilo kojem od najvećih 30 jezera u Hrvatskoj postojala plutajuća solarna elektrana koja bi zauzela minimalno 20 % površine jezera, ta elektrana bi po instaliranoj snazi bila bolja od barem jedne od trenutnih pet najvećih plutajućih solarnih elektrana u svijetu. Čak na 120 od ukupno 127 obrađenih vodenih površina, srednja raspoloživa snaga na pragu elektrane koja zauzima 20 % površine jezera je veća od 6 MW čime bi bila najveća u Europi.

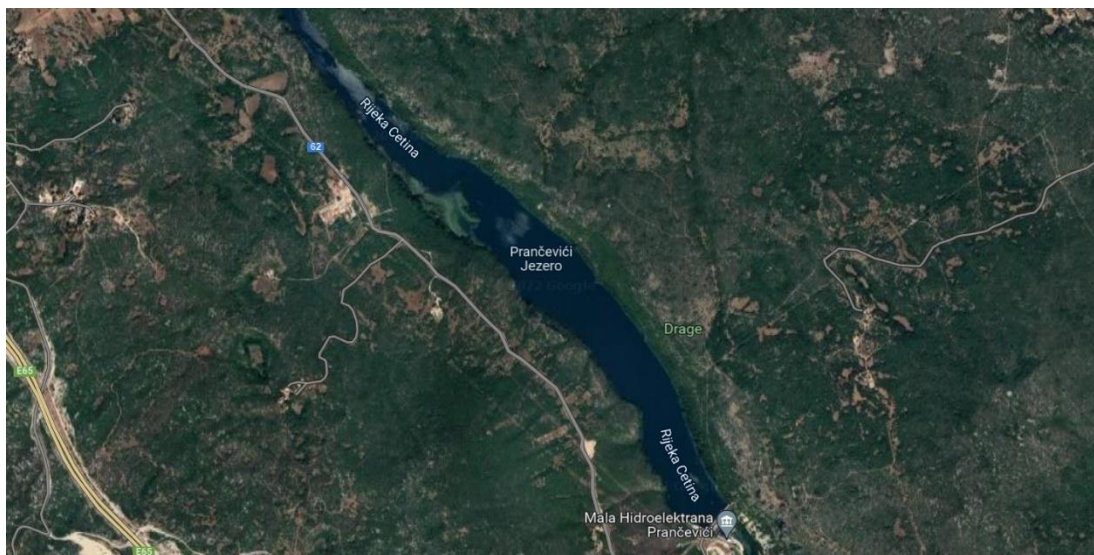
Petnaest jezera u Hrvatskoj ima veći specifični potencijal proizvodnje iz plutajuće solarne elektrane, tj. više trajanje korištenja koji se može izraziti i kao faktor opterećenja, od najveće solarne elektrane.

Ovi podaci govore da Hrvatska može biti među pionirima plutajućih solarnih elektrana u Europi, to uvelike olakšavaju hidroelektrane koje se mogu regulirati prema potrebama, pri čemu bi solarne elektrane radile u točki maksimalne snage. Prema potencijalu proizvodnje čak četiri akumulacijska jezera vezana za elektroenergetski sustav u Hrvatskoj, kad bi ih se pokrilo 20 % sa solarnom elektranom bi imali veću snagu od najveće plutajuće elektrane na svijetu. To su Buško i Bilečko jezero u Bosni i Hercegovini te Perućko i Dubravsko jezero u Hrvatskoj.

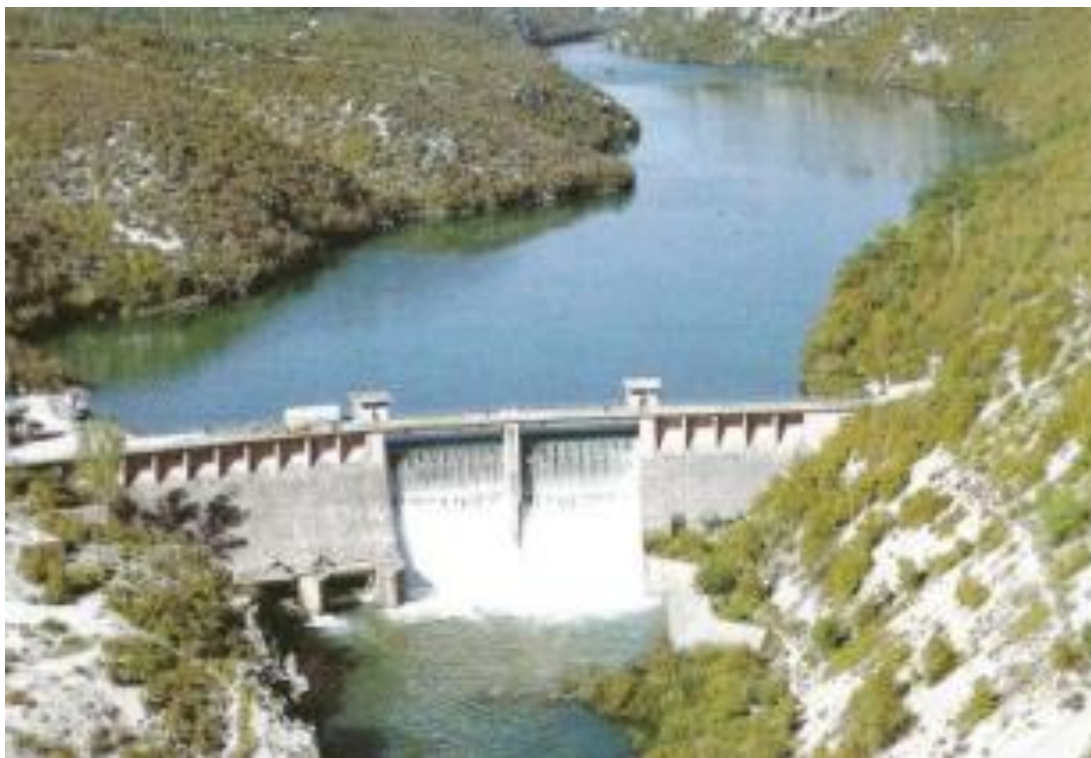
Najveća solarna elektrana na tlu u Hrvatskoj bit će u Međimurju i imati će snagu na pragu elektrane 9,99 MW [65], potencijal za postavljanje plutajuće solarne elektrane veće snage od 9,99 MW ima 121 vodena površina u Hrvatskoj.

5. Rezultati

S obzirom na najvažnije karakteristike za odabir jezera, odabrano jezero je akumulacija Prančevići za HE Zakučac. Osim u HE Zakučac, voda iz tog jezera ide i u MHE Prančevići i HE Kraljevac, ali njihov rad ne utječe na rad HE Zakučac. Prema trajanju korištenja jezero Prančevići je šesto jezero od akumulacijskih jezera u Hrvatskoj, to znači da je šesto prema gustoći Sunčevog ozračenja. Prema srednjoj dubini Prančevići je osmo jezero u Hrvatskoj, ali niti jedno jezero sa većim trajanjem korištenja nema veću srednju dubinu, osim Goričkog i Bilećkog jezera koje se nalaze u Bosni i Hercegovini. Za optimalan pogon plutajuće solarne elektrane preporučena je dubina veća od 5 m, a minimalno 1 m [66]. Isušanjem jezera dolazi do smanjenja fleksibilnosti, jer rotacija elektrane u tom slučaju nije moguća, također doći će i do smanjenja proizvodnje jer elektrana više neće biti hlađena vodom. Ovisno o dnu jezera, može doći i do većih problema, kao što je pad u mulj [67]. Na Slika 14 [28] i Slika 15 [68] prikazano je jezero Prančevići koje je uzeto u obzir za detaljnu analizu.



Slika 14 Jezero Prančevići na karti



Slika 15 Jezero Prančevići i brana [68]

5.1. Potencijal odabrane lokacije za plutajuću solarnu elektranu

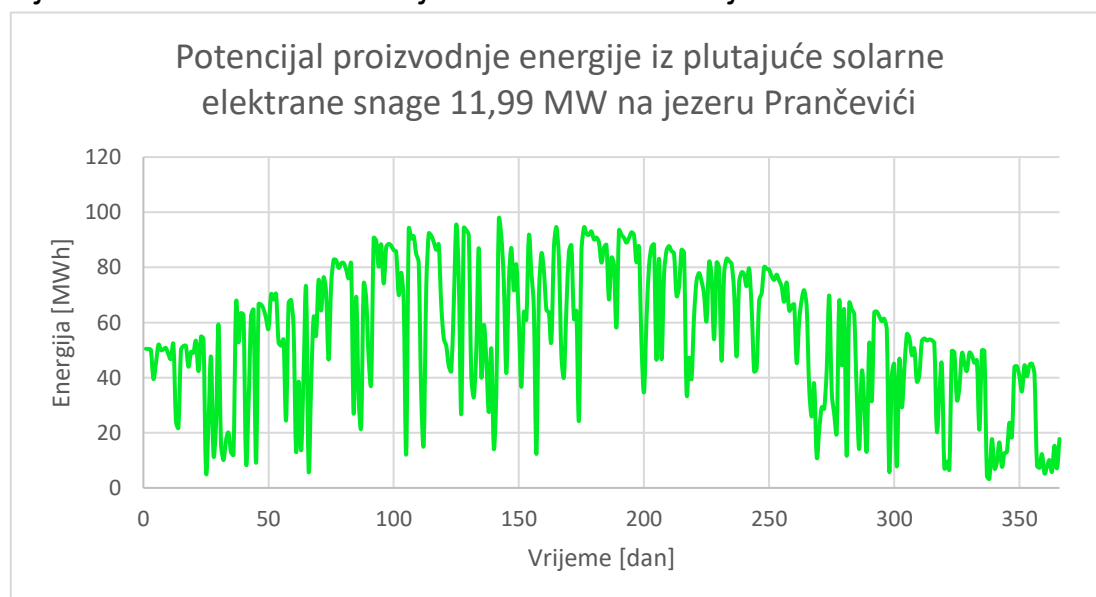
Za odabrano jezero potencijal proizvodnje iz plutajuće solarne elektrane prikazan je na Tablica 4, $A_{sustava}$ – površina cijelog sustava, m^2 , A_{modula} – površina fotonaponskih modula za koju je procijenjeno da iznosi 70% površine cijelog sustava [37], m^2 , N – broj modula zaokružen na viši cijeli broj iz jednadžbe (9), P_n – instalirana snaga elektrane, MW, P_{sr} – srednja snaga na pragu elektrane, MW, E_{uk} – godišnja proizvodnja, MWh.

$p_{jez, \%}$	20%	40%	60%	80%
$A_{sustava} [m^2]$	99.200,00	198.400,00	297.600,00	396.800,00
$A_{modula} [m^2]$	69.440,00	138.880,00	208.320,00	277.760,00
N	35.054,00	70.107,00	105.160,00	140.213,00
$P_n [MW]$	13,671	27,341	41,012	54,683
$P_{sr} [MW]$	11,99	23,98	35,98	47,97
$E_{uk} [MWh]$	20.385,00	40.769,43	61.153,85	81.538,27

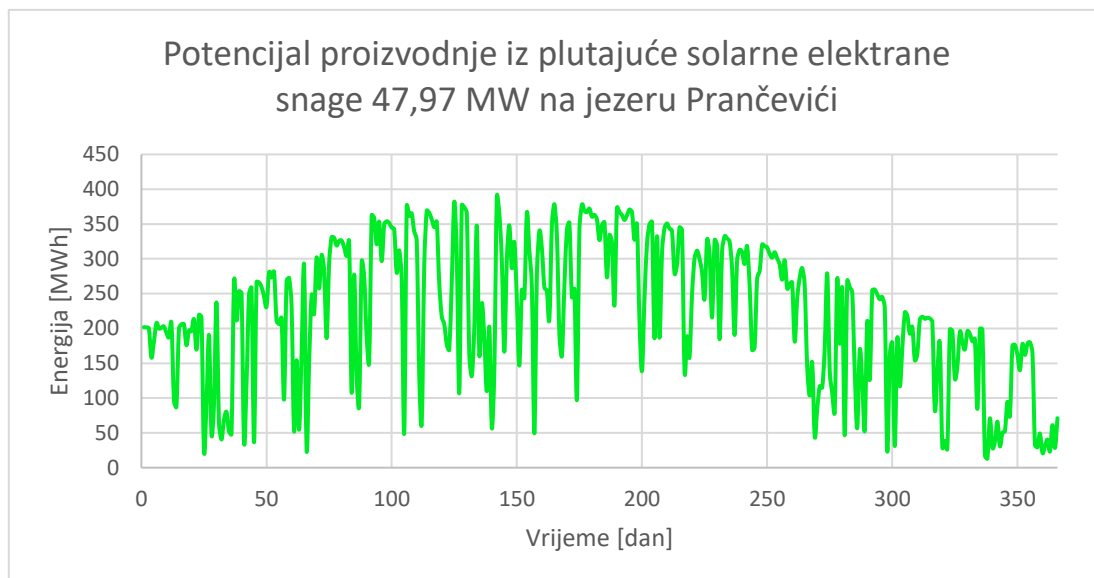
Tablica 4 Potencijal proizvodnje iz solarnih elektrana na jezeru Prančevići

Dijagram proizvodnje elektrane koja zauzima 20% površine jezera i koja ima snagu 11,99 MW prikazan je na Grafikon 2, a na Grafikon 3 nalazi se dijagram potencijala proizvodnje iz elektrane snage 47,97 MW. Dnevna krivulja proizvodnje dobivena je sumiranjem potencijala proizvodnje tijekom 24 sata za svaki dan koji su dobiveni iz (2). Poznato je da je proizvodnja iz solarnih elektrana intermitentna i neupravljiva, a u slučaju elektrane snage 11,99 MW događaju se oscilacije između dva dana od čak 80% (pad sa 81 MWh na 16 MWh). Jedan od primjera naglog pada proizvodnje je kraj travnja 2020. godine kad je u jednom danu (29.4.2020.) bilo 16,6 mm/m² oborina, tjedan dana prije dogodio se sličan slučaj samo sa manje oborina prema podacima dobivenima od DHMZ-a na kišomjernoj stanici Prančevići - brana. Kišovito i oblačno vrijeme kratkoročno djeluje negativno na solarnu elektranu, međutim ispiranjem prljavštine i ostalih uzročnika smanjenja proizvodnje dugoročno djeluje pozitivno, osim ako vjetar donese još više prljavštine.

Velike oscilacije zahtijevaju mogućnost regulacije protoka na tjednoj razini, zato što se može ponoviti više dana sa slabijim ozračenjem uzastopno. Upravo zbog toga idealno je jezero Prančevići koje ima dovoljnu zalihu vode za takvu regulaciju, a i pomoćna jezera Buško blato za godišnje izravnavanje protoka te Peručko jezero za sezonsko. Na protok iz tih jezera prema jezeru Prančevići utječe i rad hidroelektrana koje se nalaze između njih.

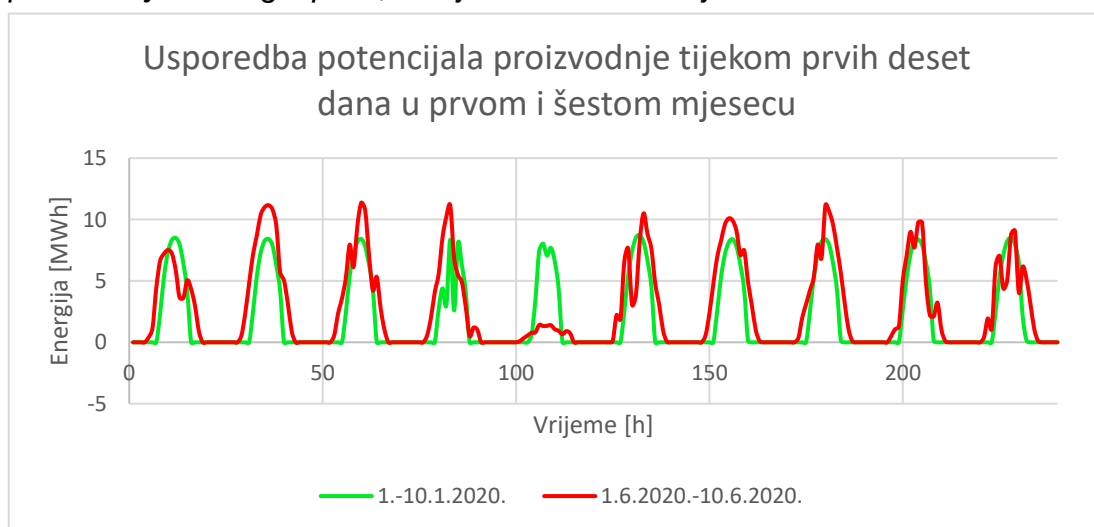


Grafikon 2 Potencijal proizvodnje iz solarne elektrane snage 11,99 MW



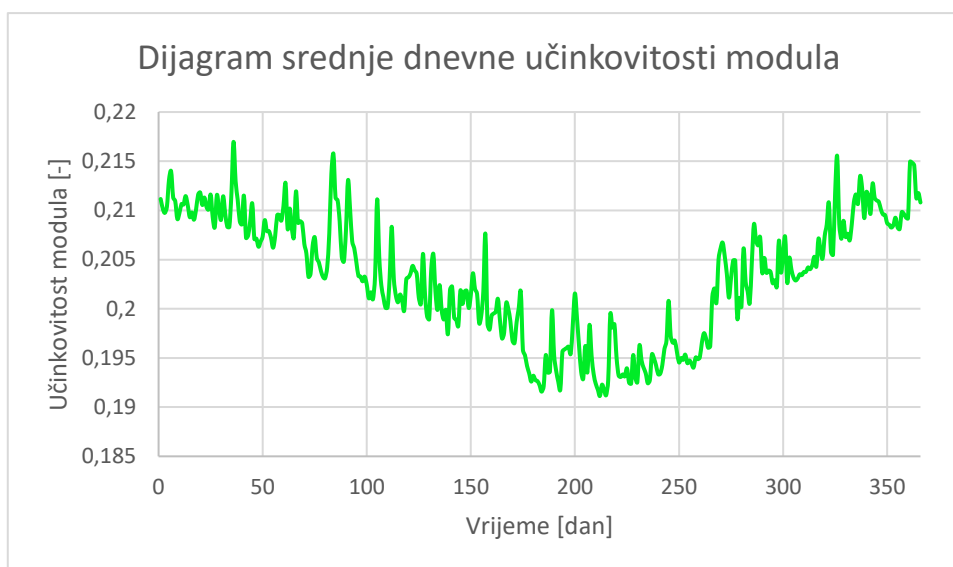
Grafikon 3 Potencijal proizvodnje iz solarne elektrane snage 47,97 MW

Na Grafikon 4 nalazi se usporedba potencijala proizvodnje iz solarne elektrane tijekom prvih deset dana u siječnju (plava krivulja) i prvih deset dana u lipnju (narančasta krivulja). Proizvodnja je veća krajem proljeća nego zimi jer je Sunce više pa je ozračenje koncentriranije, a i manja je naoblaka. Ono što ide u prilog proizvodnji zimi je manja temperatura modula te manja raspršenost Sunčeve svjetlosti zbog manje vlage u zraku [69]. Ipak proizvodnja je stalnija zimi, jer malom pojavom naoblake ljeti doći će do velikog poremećaja i proizvodnja će naglo pasti, dok je zimi takvo stanje kontinuirano.



Grafikon 4 Potencijal proizvodnje iz solarne elektrane tijekom prvih deset dana siječnja i lipnja

Na Grafikon 5 prikazano je kako se učinkovitost modula mijenja tijekom godine. Nominalna učinkovitost je 19,69 % [35], ali zimi srednja dnevna ide i do 21,70 %, a ljeti padne na 19,13%. Srednja godišnja učinkovitost iznosi 20,32 % što je izuzetno visoka učinkovitost za ove module. Glavni razlog je to što je u prosjek uračunata i učinkovitost tijekom noći kada elektrana ne proizvodi. Kad se izuzmu ti sati srednja dnevna učinkovitost modula iznosi 19,75 % što je više od nominalnih 19,69 %. Minimalna učinkovitost tijekom jednog sata, izuzevši sate kad je ozračenje nula, u 2020. godini iznosila bi 17,61 % što je realna vrijednosti, dok maksimalna satna učinkovitost iznosi 22%.



Grafikon 5 Srednja dnevna učinkovitosti modula

5.1.1. Usporedba sa potencijalom proizvodnje iz solarne elektrane na tlu

U ovom potpoglavlju obrađen je jedan od uzroka izrade ovog završnog rada. Naime ovdje je opisano kolika bi proizvodnja bila iz elektrane koja se nalazi u selu Prančevići udaljenom 7 kilometara od akumulacijskog jezera.

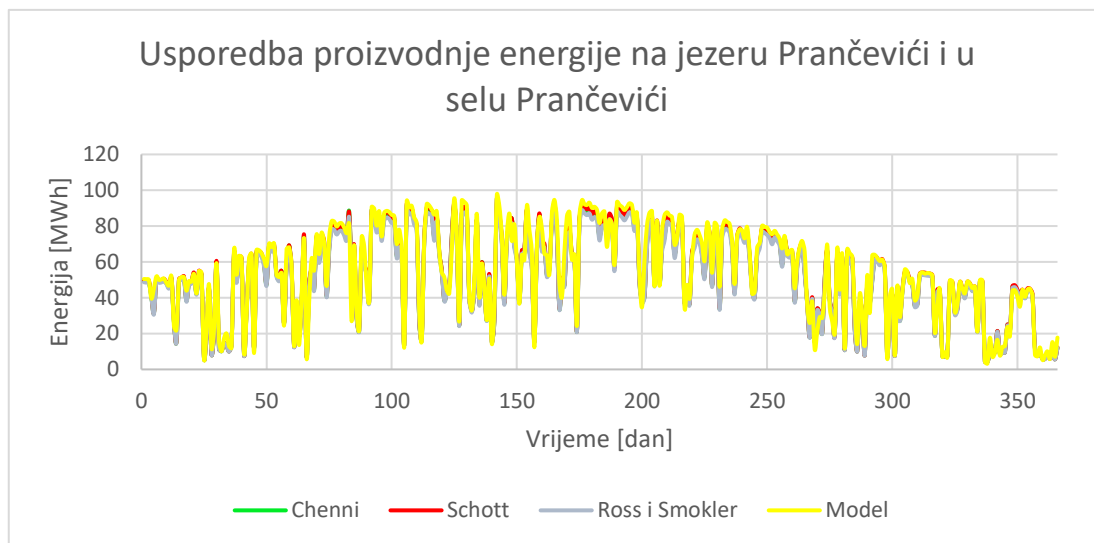
Na Tablica 5 prikazana je usporedba potencijala proizvodnje prema različitim modelima i prema lokaciji (na jezeru i tlu), prvi model za tlo je Schottov. Prema Schottu srednja snaga elektrane jednake instalirane snage bila bi 50 kW manja što je manje od 1 %, ali proizvodnja bi bila čak 2,74 % manja. Proizvodnja prema modelu Ross i Smokler iznosi puno manje, čak 5,63

% dok je prema najnovijem korištenom modelu Chenni 3,58 %. Kao što je opisano ranije, Chenni model je najbliži modelu korištenom u ovom proračunu stoga je najbolji za usporedbu. Za razliku od druga dva, Chenni u temperaturu modula računa i brzinu vjetra, a kod drugih je brzina vjetra već je uvrštena u formulu. Međutim ne vrijedi iznad 1,5 m/s, a srednja brzina vjetra je oko 2 m/s na visini od 0,5 m u Prančevićima. Razlika potencijala proizvodnje između Chenni i Taeyon modela za elektranu koja zauzima 20 % jezera bila bi 730,27 MWh u 2020. godini.

Autor	$p_{\text{jez},\%}$	20%	40%	60%	80%
	$A_{\text{sustava}} [\text{m}^2]$	99.200,00	198.400,00	297.600,00	396.800,00
	$A_{\text{modula}} [\text{m}^2]$	69.440,00	138.880,00	208.320,00	277.760,00
	N	35.054,00	70.107,00	105.160,00	140.213,00
	$P_n [\text{MW}]$	13,671	27,341	41,012	54,683
Schott	$P_{sr} [\text{MW}]$	11,95	23,90	35,85	47,80
	$E_{uk} [\text{MWh}]$	19.826,16	39.651,76	59.477,36	79.302,96
Ross i Smokler	$P_{sr} [\text{MW}]$	11,83	23,67	35,50	47,34
	$E_{uk} [\text{MWh}]$	19.236,48	38.472,41	57.708,34	76.944,27
Chenni	$P_{sr} [\text{MW}]$	11,85	23,69	35,54	47,39
	$E_{uk} [\text{MWh}]$	19.654,73	39.308,89	58.963,06	78.617,23
Taeyon	$P_{sr} [\text{MW}]$	11,99	23,98	35,98	47,97
	$E_{uk} [\text{MWh}]$	20.385,00	40.769,43	61.153,85	81.538,27

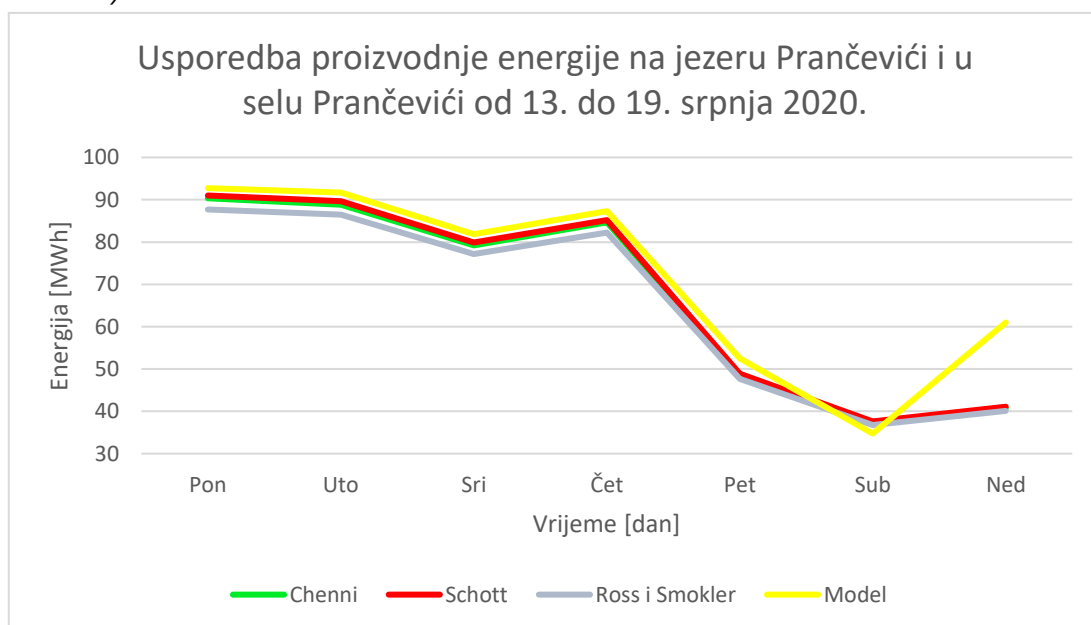
Tablica 5 Usporedba potencijala proizvodnje na jezeru i tlu

Na Grafikon 6 iscrtani su dijagrami potencijala proizvodnje prema četiri korištena modela. Tijekom najtoplijih dana najviše energije proizvela bi elektranu na jezeru. Analizom u MS Excelu dobiveno je da bi tijekom cijele godine plutajuća solarna elektranu 261 dan nadmašila druga tri modela proizvedenom energijom. Prema modelu Schott 105 dana bi proizvodnja u selu bila veća nego na jezeru. Od tih 105 dana model Ross i Smokler je nadmašio plutajuću solarnu elektranu 64 dana, ali nikad nije nadmašio model Schott. Model Chenni nadmašio je model Schott tijekom 32 dana i ono što je najbitnije je da je model Chenni 82 dana nadmašio plutajuću solarnu elektranu što je 22,4 % dana u godini.



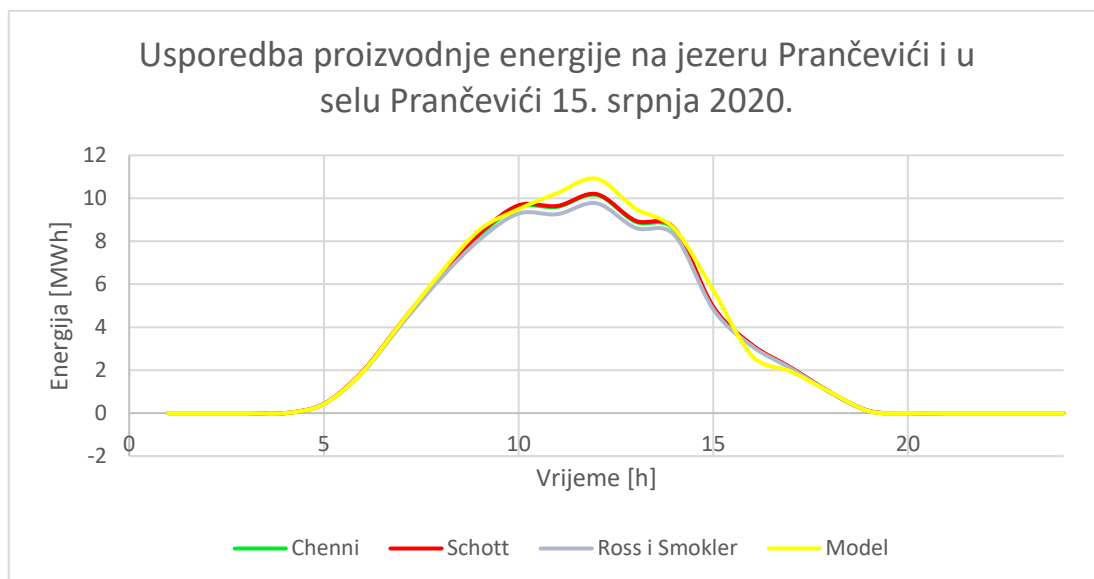
Grafikon 6 Usporedba proizvodnje energije na jezeru Prančevići i u selu Prančevići

Na Grafikon 7 može se bolje vidjeti kako je Taeyonov model za solarnu elektranu na jezeru uvjerljivo pokazatelj najvećeg potencijala dok je Ross i Smoklerov najslabijeg. U subotu 18.7. pala je manja količina oborina što je uzrokovalo da ozračenje bude manje, a time temperature modula prema modelima koji najviše ovise o ozračenju (Schott, Ross i Smokler i malo manje Chenni).



Grafikon 7 Usporedba proizvodnje energije na jezeru Prančevići i u selu Prančevići od 13. do 19. srpnja 2020.

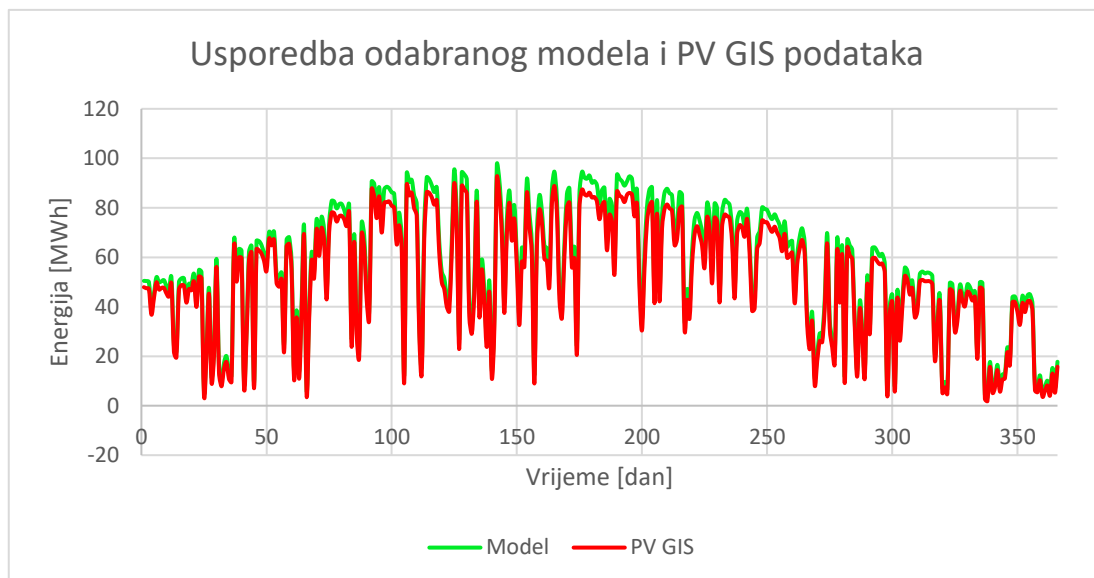
Na Grafikon 8 prikaza je potencijalna proizvodnja prema pojedinim modelima za karakterističan dan. U određenim satima kada nije vrh proizvodnje model za plutajuću solarnu elektranu pokazuje slabiju proizvodnju, to je iz razloga što je u tim trenucima brzina vjetra bila manja od 1 m/s. Tijekom vršne proizvodnje brzina vjetra bila je između 2,29 m/s i 2,94 m/s što potvrđuje veću proizvodnju.



Grafikon 8 Usporedba proizvodnje energije na jezeru Prančevići i u selu Prančevići u srijedu 15. srpnja 2020.

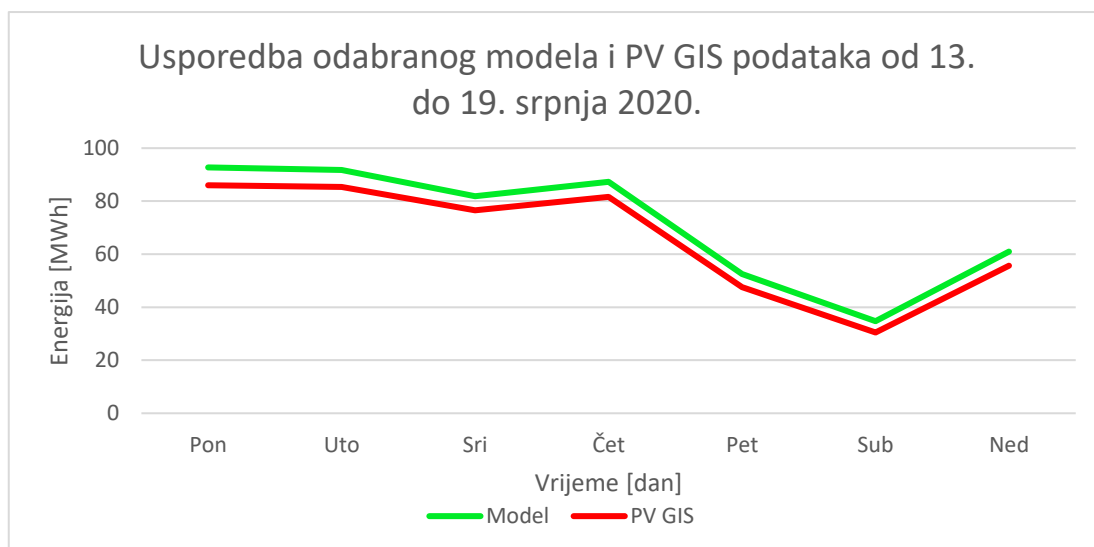
5.1.2. Usporedba sa podacima sa stranice Europske komisije

Poznati alat Europske komisije PV GIS bio je izvor većine potrebnih podataka za proračun, ali osim toga iskorišten je i njihov proračun potencijala proizvodnje energije iz solarne elektrane. Ulazni podatak za snagu elektrane je 13.671,1 MW, a za gubitke u sustavu 15 % iz čega je dobiven dijagram proizvodnje prikazan na Grafikon 9. Vidljivo je da niti jedan dan proizvodnja prema PV GIS – u ne bi bila veća od proizvodnje prema korištenom modelu. Detaljnom provjerom i usporedbom satne proizvodnje utvrđeno je da niti jedan sat tijekom godine solarna elektrana prema PV GIS – u ne bi proizvodila više nego prema modelu što je prikazano na Grafikon 11.

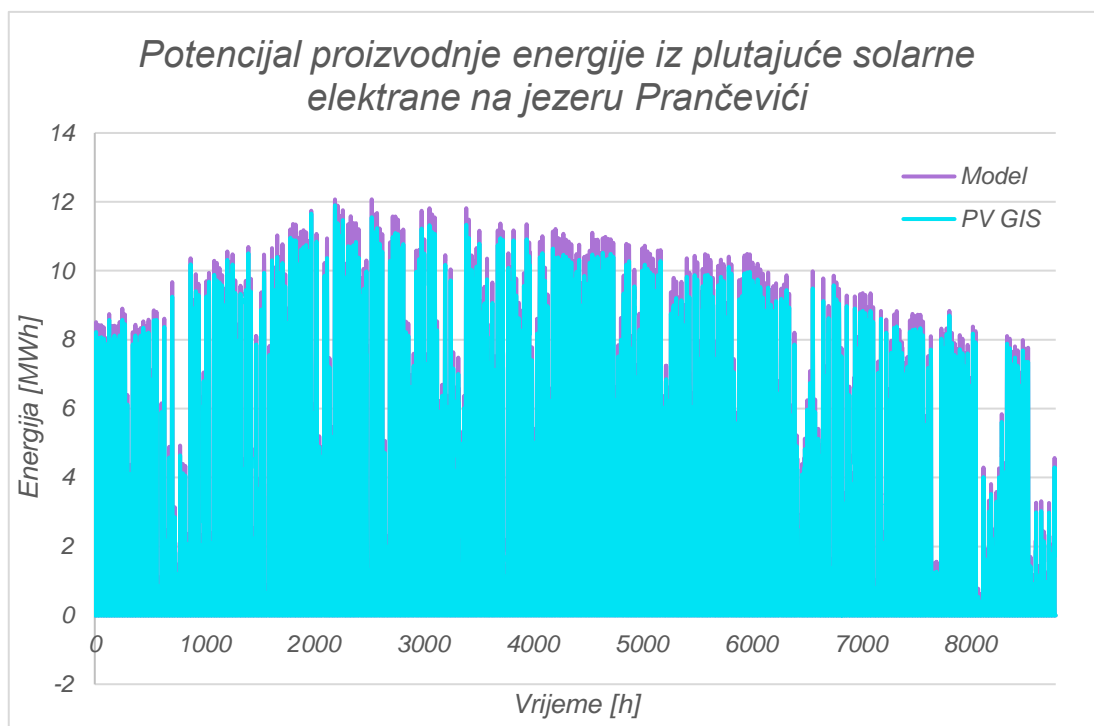


Grafikon 9 Usporedba potencijala dnevne proizvodnje prema modelu i PV GIS - u

Na Grafikon 10 uvećan je prikaz jednog tjedna iz Grafikon 9 kako bi se jasnije moglo vidjeti da model koji koristi Europska komisija pokazuje manji potencijal u odnosu na Taeyonov model. Osim što je uvijek manji, model europske komisije ima prilično jednaka odstupanja koja u prosjeku iznose 5,5 MWh dnevno. Ta odstupanja su zimi 2 do 3 MWh dnevno čime srednje dnevno odstupanje tijekom 2020. godine bi iznosilo 3,95 MWh.

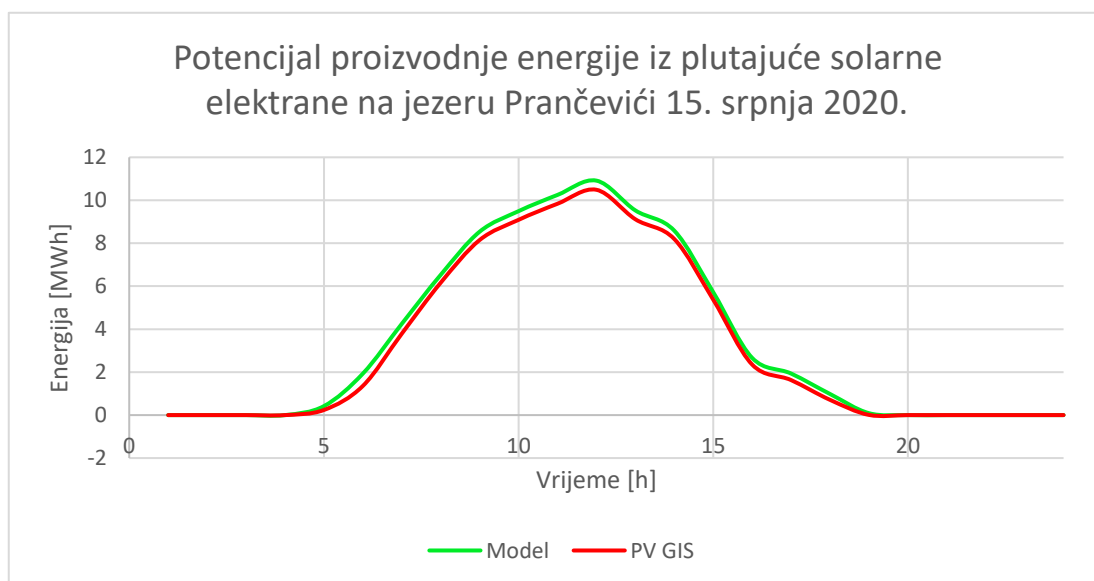


Grafikon 10 Usporedba odabranog modela i PV GIS podataka od 13. do 19. srpnja 2020.



Grafikon 11 Usporedba potencijala satne proizvodnje prema modelu i PV GIS - u

Na Grafikon 12 uvećan je prikaz potencijala proizvodnje za 15. srpanj 2020. godine. Model sa PV GIS – a uvjerljivo u svim satima prati Taeyonov model, ali uvijek mu nedostaje barem malo više potencijala da bi bio bolji.



Grafikon 12 Potencijal proizvodnje energije iz plutajuće solarne elektrane na jezeru Prančevići 15. srpnja 2020.

5.2. Procjena evaporacije prije i nakon ugradnje plutajuće solarne elektrane

Jedan od načina kako će plutajuća solarna elektrana utjecati na hidroelektranu je koliko će joj vode sačuvati za prolazak preko lopatica turbina i proizvodnju na generatorima.

Prije svega proračun je napravljen za 2019. godinu jer je temperatura vode 31.12.2019. ulazna veličina za proračun evaporacije u 2020. godini. Dobivena je vrijednost od 6,46° te će biti takva i uz pretpostavku da je temperatura 1.1.2019. 5 °C i da je 15 °C. To je zato što se radi o 8760 h te se temperatura vode stigne stabilizirati.

Penman – Monteith-ovim modelom definiranim u poglavlju 3.4.1 dobiveno je da u prosijeku ishlapi 6,93 mm/dan vode po kvadratnom metru jezera Prančevići, a s obzirom da je njegova površina 496.000 m² godišnje će ishlapiti 1.257.981,6 m³ što je 18,5 % ukupnog volumena jezera. Iako gubici vode nisu značajni na ovom jezeru, gradnja plutajuće solarne elektrane bi imala nekoliko benefita od kojih su neki već potvrđeni, a neki će biti u nastavku. Minimalna temperatura vode iznosi 6,4 °C, a maksimalna 18,2 °C.

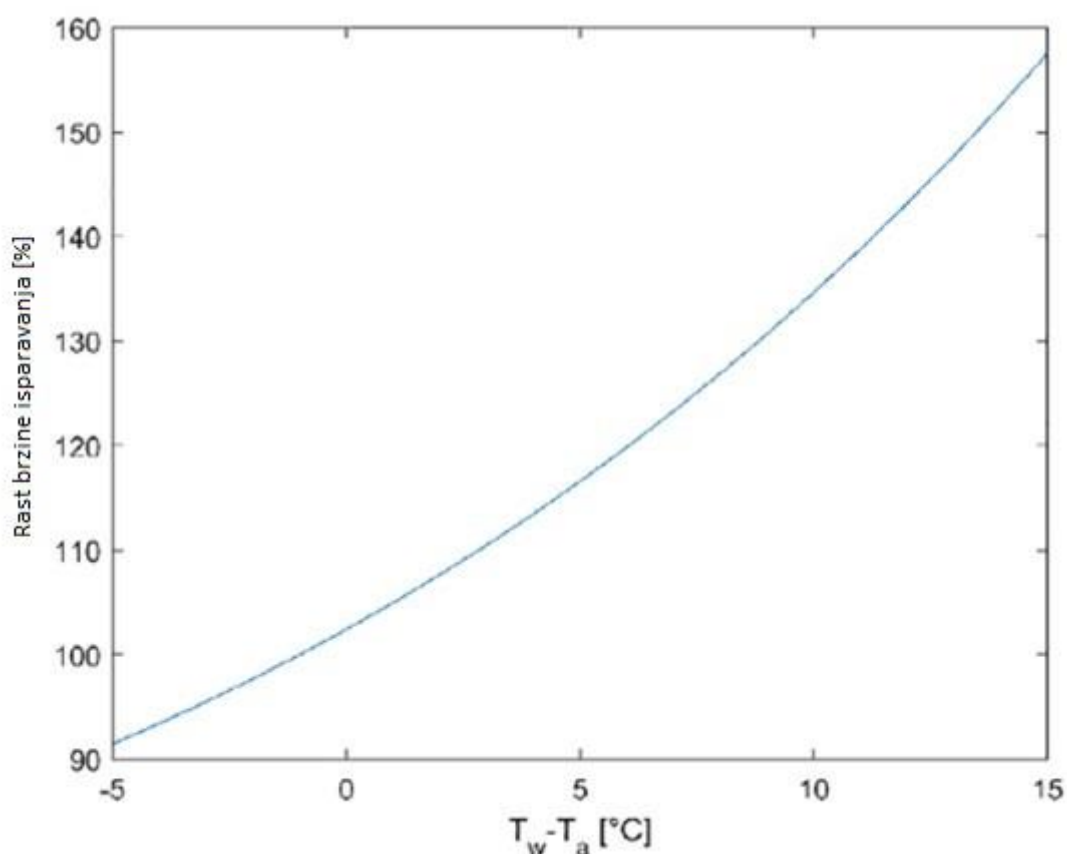
Modelom opisanim u poglavlju 3.4.2 korištenom za procjenu evaporacije nakon ugradnje fotonaponskih modula dobije se da evaporacija pri pokrivenosti 0% iznosi 1.247.904,5 m³ vode. To je 0,80 % manje nego sa proračunom iz prvog dijela modela. Važan čimbenik ovdje je i naoblaka za koju je pretpostavljeno da iznosi 0,2, tj. 75 %., a ukoliko iznosi 0,25 procjena evaporacije će biti veća od vrijednosti dobivene u prvom dijelu modela.

Na Tablica 6 prikazano je kako se povećanjem pokrivenosti evaporacija mijenja eksponencijalno, tako da bi već na pokrivenosti od 82,935 % evaporacija bila 79,3 m³. Razlog tomu je što se povećanjem razlike temperature vode i zraka evaporacija prema Penman – Monteith-ovom modelu evaporativni gubici povećavaju eksponencijalno što se može vidjeti na Slika 16 [46]. Srednja razlika temperatura vode i zraka pri slobodnoj površini jezera iznosi -5,21 °C, pri pokrivenosti površine od 20 % je -7,26 °C, a pri pokrivenosti površine od 80 % je čak -14,08 °C što znači da rezultati imaju smisla.

Kada bi na primjer umjesto korištene temperature za Split bila uzeta temperatura iznad jezera Prančevići koja je dobivena sa [38] evaporacija pri 80 % pokrivenosti iznosila bi 215.818 m^3 , to znači da je ušteda $1.032.086 \text{ m}^3$, odnosno poboljšanje sustava je 82,71 % što je realnije. Zbog veće smislenosti kasnije će biti prikazani i podaci za proračun sa temperaturom iznad jezera.

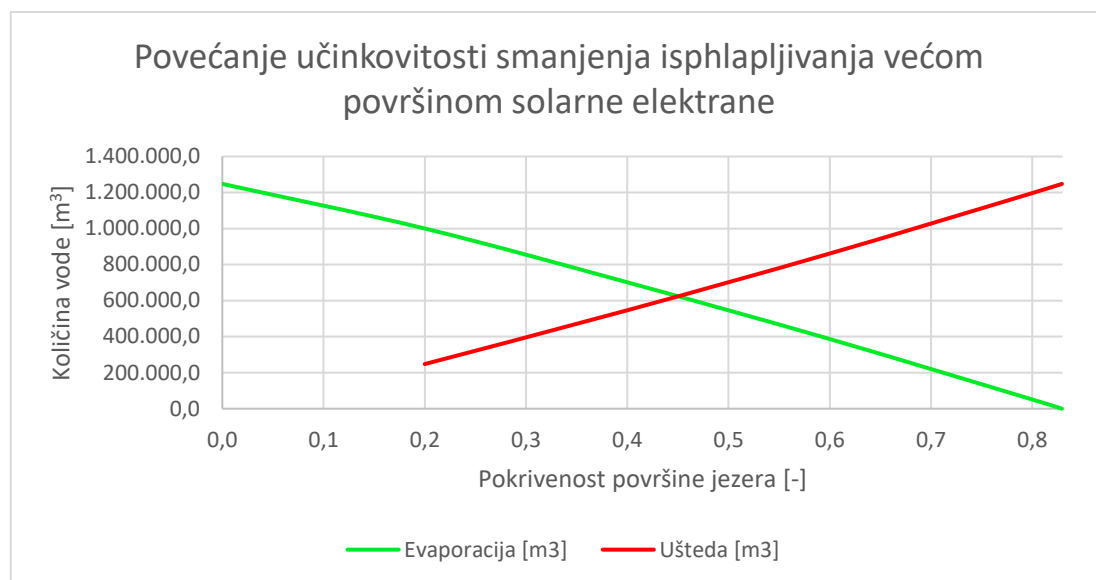
$p_{\text{jez},\%}$	20 %	40 %	60 %	80 %	82,935 %
Evaporacija [m^3]	1.000.140,4	701.589,1	386.616,2	51.280,4	79,3
Ušteda [m^3]	247.764,2	546.315,4	861.288,4	1.196.624,2	1.247.825,3
Poboljšanje [%]	19,85	43,78	69,02	95,89	99,99
$T_{w,\min}$	5,58	4,23	2,87	1,52	1,32
$T_{w,\max}$	14,95	11,33	7,71	6,46	6,46

Tablica 6 Ovisnost evaporacije i temperature vode o pokrivenosti jezera uz temperaturu mjerenu u Splitu

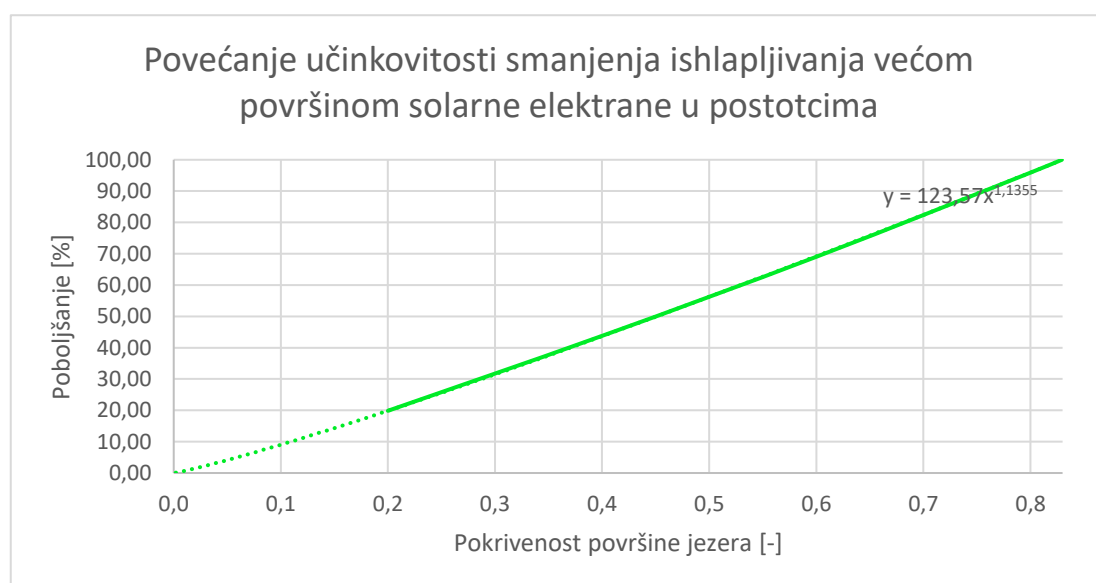


Slika 16 Ovisnost evaporacije o razlici temperatura zraka i vode [46]

Na Grafikon 13 grafički su prikazani podaci o evaporaciji i uštedi iz Tablica 6, a na Grafikon 14 prikazana je eksponencijalna ovisnost smanjenja evaporacije o povećanju površine solarne elektrane.



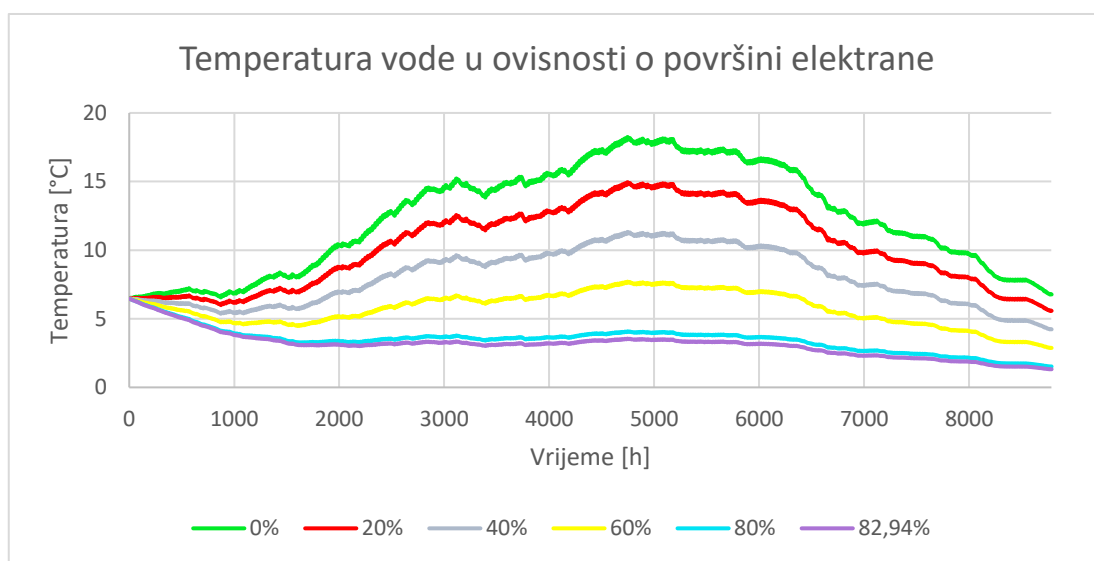
Grafikon 13 Ovisnost evaporacije o pokrivenosti u m^3



Grafikon 14 Ovisnost evaporacije o pokrivenosti u %

Kako se mijenja temperatura vode tijekom godine za pojedine površine plutajuće solarne elektrane prikazano je na Grafikon 15. Srednja godišnja razlika temperature nepokrivenog jezera i onoga koje je pokriveno 20 % iznosila bi 1,35 °C. Temperatura jezera, kada ga se pokrije sa solarnom

elektranom na 80 % površine, iznosila bi 8,64 °C manja od slučaja kada na njemu nema ničega. To je posljedica sprječavanja da Sunčevo ozračenje dođe do jezera. Pri tome dio energije zračenja se pretvara u kinetičku energiju elektrona čije se gibanje naziva električna struja, tj. dolazi do proizvodnje električne energije. Dio elektrona ne primi količinu energije veću od energije veze, a dio ih primi i više od energije veze. Obje pojave uzrokuju grijanje kristala, tj. pretvorbu Sunčeve energije u toplinsku. Treći način na koji je spriječen prodor svjetlosti u jezero je refleksija, a nju znatno mogu povećati plutače koje sadržavaju aluminij. Iz ovih razloga dolazi do smanjenja toplinskih dobitaka jezera, pa tako i niže temperature. Niža temperatura jezera uzrokuje smanjenje evaporacije jer je evaporacija eksponencijalno proporcionalna sa razlikom temperatura vode i zraka. Razlog tome je što molekule toplije vode imaju više energije da se oslobode sa površine i pretvore u vodenu paru.



Grafikon 15 Temperatura vode u ovisnosti o površini elektrane

Korištenjem podataka o temperaturi iznad jezera Prančevići umjesto sa meteorološke postaje u Splitu dobiveni su značajno različiti rezultati koji se mogu vidjeti na Tablica 7. Oni pokazuju da će evaporacija biti blizu 0 m³ tek iznad pokrivenosti jezera 92,80%. Pri pokrivenosti od 80 % razlika između temperature vode i zraka je -10,588 °C, a pri pokrivenosti od 20 % je -3,76 °C, što je u oba slučaja za 3,5 °C manje nego sa podacima za Split.

$p_{\text{jez, \%}}$	20 %	40 %	60 %	80 %	92,80%
Evaporacija [m^3]	1.113.457,8	830.036,5	532.101,6	215.818,8	1.573,4
Ušteda [m^3]	134.446,8	417.868,0	715.803,0	1.032.085,8	1.246.331,2
Poboljšanje [%]	10,77	33,49	57,36	82,71	99,87
$T_{w, \text{min}}$	6,17	4,68	3,18	1,68	0,72
$T_{w, \text{max}}$	15,97	12,11	8,24	6,46	6,46

Tablica 7 Ovisnost evaporacije i temperature vode o pokrivenosti jezera uz temperaturu iznad jezera Prančevići preuzetu sa PV GIS - a

5.3. Utjecaj fotonaponskih modula na rad i kapacitet hidroelektrane s akumulacijom

Hidroelektrana i plutajuća solarna elektrana mogu se međusobno nadopunjavati, međutim ukoliko je velika razlika u proizvodnji kao što je to u ovom slučaju onda su prilike za regulaciju jedne sa drugom male.

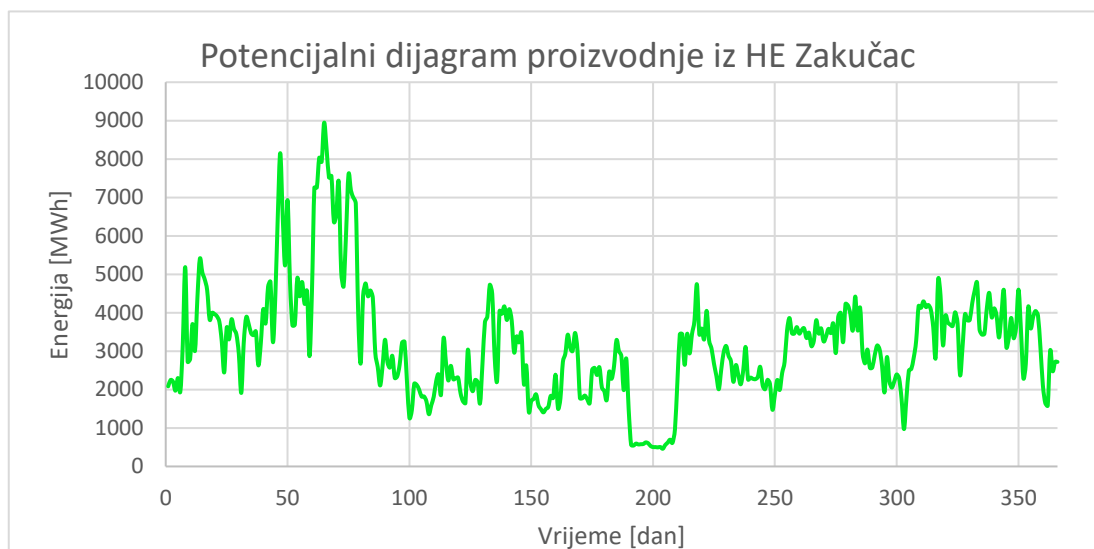
Da je tijekom 2020. godine na jezeru Prančevići bila plutajuća solarna elektrana njihovo bi funkcioniranje moglo biti kao što je opisano u nastavku.

Prije svega bilo je potrebno saznati kako je raspodijeljena proizvodnja iz hidroelektrane. Količina proizvedene energije iznosila je 1.191 GWh [3], ali nije poznata razdioba.

Prema modelu koji je definiran u 3.4.2 i osobito u 3.6 gdje su definirani svi nedostaci proizvodnja iz HE Zakućac bi u 2020. godini mogla izgledati kako je prikazano na Grafikon 16. U tu proizvodnju uračunato je da su sve oborine izmjerene na stanici Prančevići – brana ravnomjerno korištene za proizvodnju dva dana kasnije u vremenu od 6 ujutro do ponoći. Slično tome, predviđeno je da je svaka količina uštede vode, sprječavanjem ishlapljivanja, iskorištena točno 48 sati kasnije. Između ovog dijagrama i stvarnoga ne bi se vidjela razlika jer najveći mogući udio korištenja uštede vode tijekom jednog sata u ovakvom principu raspodjele iznosi 1,4 %. Gledajući ukupne volumene, solarna elektrana površine 80 % jezera ostvarila bi uštede 1.032.085 m^3 vode.

Nažalost s obzirom da nema dovoljno podataka o HE Zakućac nije moguće odrediti koliko bi se električne energije moglo proizvesti tom vodom. Međutim poznat je volumen uzvodnih akumulacija koji iznosi 1.346.800.000 m^3 . Prema

tome ušteda vode u jednoj godini iznosi 0,0766 % ukupnog volumena svih uzvodnih akumulacija, a to su Peruća, Buško blato i Prančevići. Ukoliko se uspoređuje samo sa jezerom Prančevići ušteda iznosi 15,18 % ukupnog volumena jezera.



Grafikon 16 Potencijalni dijagram proizvodnje iz HE Zakućac u 2020. godini nakon ugradnje plutajuće solarne elektrane

Neizostavan dio je način na koji su satne vrijednosti pretvarane u dnevne i obrnuto. Prvo su oborine prebačene u satne vrijednosti postupkom sa Slika 17 da bi se mogle sumirati sa protokom na Vedrinama i satnom uštedom vode.

```
T = readtable('oborine.csv'); %učitavanje tablice
T1 = table2array(T); %pretvorba tablice u polje

obor = zeros(8784,1); %kreiranje praznog vektora za pohranu novih vrijednosti

for i = 1:365
    %raspodjela padalina od jednog dana na 18h, od 6h ujutro do ponoći za
    %dva dana kasnije
    for j = 1:24
        if j > 6
            obor(i*24+j+24) = T1(i,1)/16;
        end
    end
end

T2 = array2table(obor); %pretvorba vektora u tablicu
writetable(T2,'oborina.xlsx'); %kreiranje excel datoteke
```

Slika 17 Prebacivanje dnevnih u satne vrijednosti

Zatim je pronađen udio protoka u jednom satu u ukupnom godišnjem udjelu te pomnožen sa godišnjom proizvodnjom. Tako je dobivena satna proizvodnja koja je prebačena u dnevnu pomoću koda sa Slika 18.

```
T = readtable('pHE.xlsx'); %učitavanje tablice
T1 = table2array(T); %pretvorba tablice u polje

T2z = zeros(366,1); %kreiranje praznog vektora za pohranu novih vrijednosti

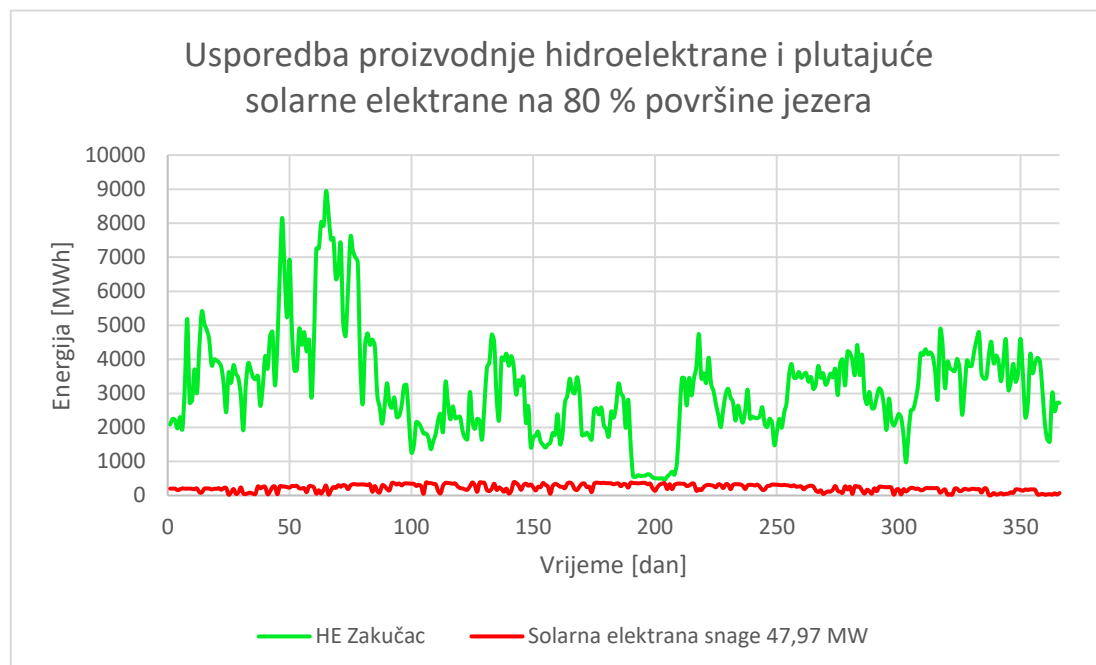
k = 1; %postavljanje brojača sati na jedan
suma = 0; %deklariranje varijable za brojanje sati u danu

for i = 1:366
    for j = 1:24
        suma = suma + T1(k,1); %zbrajanje vrijednosti tijekom 24h
        k = k+1; %broji 8784 sata u 2020. godini
    end
    T2z(i) = suma; %za 366 dana spremanje vrijednosti proizvodnje dobivene u for petlji
    suma = 0; %resetiranje proizvodnje za novi dan
end
|
T2 = array2table(T2z); %pretvorba vektora u tablicu
writetable(T2,'pHE1.xlsx') %kreiranje excel datoteke
```

Slika 18 Prebacivanje satnih u dnevne vrijednosti

Penetracijom obnovljivih izvora energije dolazi do problema sa upravljanjem elektroenergetskog sustava. Međutim ako solarna elektrana ima pokriće od hidroelektrane znatno većeg kapaciteta doći će do znatno manjih pogrešaka u predviđanjima proizvodnje agregiranih elektrana. To vrijedi pod uvjetom da ima dovoljno vode i da je sve ispravno. Godišnja proizvodnja iz plutajuće solarne elektrane bila bi 81.538 MWh u 2020. godini, a hidroelektrana je proizvela 1.161.000 MWh. To znači da kad bi jezero bilo 80 % pokriveno solarnom elektranom da bi njezina proizvodnja bila 7,023 % proizvodnje hidroelektrane. Dnevna proizvodnja solarne elektrane i hidroelektrane u novim okolnostima prikazana je na Grafikon 17 gdje se može vidjeti da niti u jednom trenutku solarna elektrana neće proizvoditi više od hidroelektrane, ali će u druge dvije trećine srpnja proizvodnja hidroelektrane biti jako blizu. S obzirom da je korišten protok iz 2016. godine, a u to vrijeme je HE Zakućac obnavljana postoji mogućnost da je iz tih razloga u tom periodu manja proizvodnja. Izgledniji razlog je to što je vodostaj mjeren na postaji Vedrine gotovo 20 dana

iznosio manje od 50 cm, a srednji vodostaj od početka 2013. godine do završetka 2016. iznosi 152,63 cm.



Grafikon 17 Usporedba proizvodnje hidroelektrane i plutajuće solarne elektrane na 80 % površine jezera Prančevići

5.4. Analiza

Ušteda vode postavljanjem solarne elektrane na jezero Prančevići nije značajna, niti je godišnja proizvodnja visoka te iznosi od 0,11 % ukupne godišnje potrošnje u Republici Hrvatskoj za pokrivenost 20% do 0,45 % za pokrivenost jezera 80 %.

Veća jezera u slivu rijeke Cetine su Peručko i Buško jezero. Gradnjom dvije reverzibilne hidroelektrane u slijevu rijeke Cetine napraviti će se nove tri akumulacije (prva je u udolini Ravno Vrdovo, druga u Sinjskom polju blizu Otoka, te zadnja kod sela Donja Korita). Time će postojati pet idealnih lokacija na kojima se može ostvariti sinergija plutajućih solarnih i hidroelektrana. Površina Buškog jezera je 55,8 km² što otvara mogućnost za elektranu snage 3,4 GW na pragu elektrane ukoliko je jezero pokriveno samo 50 %. Srednja dubina jezera je 14,34 m što je gotovo 3 puta više od preporučenih 5 m. Za

razliku od njega Perućko jezero ima 3,09 puta manju površinu, ali 2,08 puta veću srednju dubinu što znači da plutajuća solarna elektrana može podnijeti velike oscilacije količine vode u jezeru, pa bi reverzibilna hidroelektrana mogla neometano raditi. Između ostalog balans između RHE Vrdovo, HE Peruća i solarne elektrane, koja bi u slučaju zauzimanja 50% površine jezera imala snagu 1,1 GW na pragu, omogućio bi pohranu velike količine energije, te bi sva jezera u bližoj okolini mogla biti pokrivena i bez obzira na to određene hidroelektrane bi to mogle izravhati.

Postavljanje plutajućih solarnih elektrana ima smisla i na druga jezera koja ne akumuliraju vodu za hidroelektrane, jer mogu napajati obližnja mjesta, nude bolje karakteristike, kao što su veća učinkovitost, spremanje vode, duže trajanje modula zbog manjih radnih temperatura, sigurnost opskrbe električnom energijom, stabilna cijena električne energije, uklanjanje potrebe za proširivanjem distribucijske i prienosne mreže. Neka od tih jezera imaju vrlo dobro ozračenje, kao što su Vela Solina, Vransko jezero na Cresu, Baćinska jezera, Prokljansko jezero te jezera Mir i Birina koji svi imaju bolju ozračenost od najozračenijeg akumulacijskog jezera za hidroelektranu.

Primjena plutajućih solarnih elektrana mogla bi imati važnu ulogu za održavanje bioraznolikosti. Tako bi se tijekom sušnog ljeta kada su temperature visoke, a nebo bez oblaka, uz proizvodnju energije iz njih omogućilo da sačuvaju veće količine vode za upotrebu, ali i životinjski svijet u jezeru. Životinje će profitirati i iz razloga što bi pojačanim Sunčevim ozračenjem došlo do porasta algi u jezeru koje bez toga ne mogu opstati. Smanjenje rasta algi nije razmatrano u ovom radu, ali trebalo bi biti predmet budućih analiza jer plutajuće solarne elektrane čine zatvoreni krug ovisnosti sa klimatskim promjenama. Povećanjem srednje temperature na zemlji dolaziti će do većih ekstrema sušnih i kišnih razdoblja, ali smanjivat će se i učinkovitost modula. Upravo ti moduli, svojom proizvodnjom i šticeanjem vodenih površina, mogu spriječiti da dođe do eutrofikacije i prekomjerne evaporacije.

6. Zaključak

Plutajuće solarne elektrane jedan su od najvećih noviteta u svijetu energetike koji u novije vrijeme imaju sve veću podršku zbog svojih prednosti koje imaju u odnosu na solarne elektrane montirane na zemlju. Dva temeljna segmenta prilikom razmatranja postavljanja plutajuće solarne elektrane su potencijal proizvodnje te utjecaj na hidroelektranu ili više njih na istom vodotoku. Osnovni problem solarnih elektrana je varijabilnost, a hidroelektrana suša, stoga ljeti kada solarna elektrana proizvodi najviše hidroelektrana može čuvati vodu koja više evaporira, a ima manje oborina. Proračuni su izrađeni u Microsoft Excelu, pri čemu su neki podaci obrađeni u Matlabu. Za proračun temperature modula korišten je Taeyeonov model DY-HW-7NN, a za procjenu evaporacije Penman – Monteithov model. Potencijal proizvodnje prema Taeyonovom modelu uspoređen je sa potencijalima proizvodnje koji su definirali Schott 1985., Ross i Smokler 1986. te Chenni 2007. godine. Analiza za plutajuću solarnu elektranu na jezeru Prančevići napravljena je za elektrane površina 99.200 m², 198.400 m², 297.600 m², 396.800 m² pri čemu su instalirane snage 13,671 MW, 27,341 MW, 41,012 MW te 54,683 MW. Srednje snage na pragu elektrana su prema tome 11,99 MW, 23,98 MW, 35,98 MW te 47,97 MW. Prednost više takvih manjih plutajućih solarnih elektrana na različita jezera je smanjenje varijabilnosti i povećanje sigurnosti proizvodnje u sustavu u kojem se nalaze. Uštede koje se mogu ostvariti smanjenjem gubitka vode koja ispari na jezeru Prančevići u 2020. godini su samo 18,33 % ukupnog volumena jezera. Ušteda vode nije primarni razlog postavljanja plutajuće solarne elektrane, stoga je sva uštedjena voda prihod koji bi trebao biti obračunat zasebno u operativnim troškovima. Prančevići jezero je, računajući hrvatska jezera i ona koja su povezana sa hrvatskim elektroenergetskim sustavom, 66. po površini. Od njega veću površinu ima 12 drugih akumulacijskih jezera na kojima bi sa pokrivenosti od 20 % snaga plutajuće solarne elektrane bila od 16,24 MW (na jezeru Lepenica) do 1.361,02 MW na Buškom jezeru.

7. Literatura

- [1] IEA, *Renewables 2021*, Int. Energy Agency Publ. Int. (2021) 167.
www.iea.org/t&c/%0Ahttps://webstore.iea.org/download/direct/4329.
- [2] B. Kulišić, *Sektorske analize - energetika: obnovljivi izvori energije*, (2021).
<https://www.eizg.hr/userdocsimages/publikacije/serijske-publikacije/sektorske-analize/SA-Energetika-2021.pdf>.
- [3] B. Vuk, M. Ban, V. Kos Grabar Robina, R. Fabek, D. Golja, B. Milešević, N. Matijašević, J. Maras, S. Knežević, S. Živković, T. Borković, V. Krstulović, B. Židov, Ž. Jurić, *Energija u Hrvatskoj 2020, 2021*.
https://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2022/01/Velika_EIHP_Energija_2020.pdf.
- [4] Wikipedija, *Vjetroelektrane u Hrvatskoj*, Wikipedija. (2022).
https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj.
- [5] Zelena energetska zadruža, *Prelazak Hrvatske na 100 % obnovljivih izvora energije*, 2015. <https://www.greenpeace.org/static/planet4-croatia-stateless/2015/11/522c6b30-prelazak-hrvatske-na-obnovljive-izvore-energije.pdf>.
- [6] Vis Viva, *RHE VRDOVO Reverzibilna hidroelektrana*, (n.d.).
<http://www.vis-viva-energija.com/rhe-vrdovo/>.
- [7] Dabro Mate, R. Čedo, J. Vedran, R. Goran, *Reversible hydroelectric power plant Korita RHE Korita*, (2011).
<https://www.semanticscholar.org/paper/Reversible-hydroelectric-power-plant-Korita-RHE-Mate-Čedo/c1e18dd3bd10f4af2c70c25d841bb761ae12c2a6>.
- [8] HOPS, *DESETOGODIŠNJI PLAN RAZVOJA PRIJENOSNE MREŽE 2021.-2030. S DETALJNOM RAZRADOM ZA POČETNO TROGODIŠNJE I JEDNOGODINJE RAZDOBLJE*, (2019).
https://www.hera.hr/hr/docs/2020/Prijedlog_2020-10-08_01.pdf.
- [9] D. Feldman, V. Ramasamy, R. Fu, A. Ramdas, J. Desai, R. Margolis,

- <https://www.nrel.gov/news/program/2021/documenting-a-decade-of-cost-declines-for-pv-systems.html>, 2021.
- <https://www.nrel.gov/news/program/2021/documenting-a-decade-of-cost-declines-for-pv-systems.html>.
- [10] NREL, *Solar Levelized Cost of Energy Analysis, Sol. Technol. Cost Anal.* (2020). <https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/solar-levelized-cost.html>.
- [11] S. Gadzanku, H. Mirletz, N. Lee, J. Daw, A. Warren, *Benefits and critical knowledge gaps in determining the role of floating photovoltaics in the energy-water-food nexus*, *Sustain.* 13 (2021) 1–17. <https://doi.org/10.3390/su13084317>.
- [12] J.J. Fisher, *Floating PV Plants*, 1987. [file:///Users/alex.neumann/Documents/Mendeley Desktop/Edited by Edited by/World/\[Darren_Swanson\]_Creating_Adaptive_Policies_A_Gui\(Book See.org\).pdf](file:///Users/alex.neumann/Documents/Mendeley%20Desktop/Edited%20by%20World/[Darren_Swanson]_Creating_Adaptive_Policies_A_Gui(Book%20See.org).pdf).
- [13] N.E. NRG, *Floating Photovoltaic Systems*, (n.d.). <http://www.nrg-energia.it/floating-pv-systems.html>.
- [14] I. Todorović, *Floating solar power plant in Albania repaired*, (2022). <https://balkangreenenergynews.com/floating-solar-power-plant-in-albania-repaired>.
- [15] A. Garanovic, *Albania's 500kWp floating solar plant restarts commercial operation*, (n.d.). <https://www.offshore-energy.biz/albanias-500kwp-floating-solar-plant-restarts-commercial-operation/>.
- [16] M. Lewis, *World's largest floating solar farm comes online with wind and storage*, (2022). <https://electrek.co/2022/01/07/worlds-largest-floating-solar-farm-comes-online-with-wind-and-storage/>.
- [17] Y.S. YSGS, *5 Largest Floating Solar Farms in the World in 2022 | YSG Solar*, (2022). <https://www.ysgsolar.com/blog/5-largest-floating-solar-farms-world-2022-ysg-solar>.

- [18] Wikipedija, Montesquieu-Volvestre, (n.d.).
<https://en.wikipedia.org/wiki/Montesquieu-Volvestre>.
- [19] E. de P. EDP, Pedrogão Hydro Power Plant, (n.d.).
<https://portugal.edp.com/en/pedrogao-hydro-power-plant>.
- [20] W.E.F. WEF, Portugal set to start up Europe's largest floating solar park, (n.d.).
<https://www.weforum.org/agenda/2022/05/portugal-europe-floating-solar-farm-renewable-energy/>.
- [21] MRRiFEU, Nova podjela Republike Hrvatske na statističke regije 2 razine NUTS 2 dodatni poticaj regionalnom razvoju, (2020).
<https://lokalna.hr/clanak.php?id=100>.
- [22] Marko Biočina, Kako se odvažna ideja pretvorila u milijunski biznis, a onda završila u crnoj kronici?, Večernji List. (2020).
<https://novac.jutarnji.hr/novac/aktualno/kako-se-odvazna-ideja-pretvorila-u-milijunski-biznis-a-onda-zavrsila-u-crnoj-kronici-10379692>.
- [23] Dominik Klen, Hidroelektrana, Elektro Mreža u Hrvat. (n.d.).
<https://sites.google.com/site/elektromrezauhrvatskoj/home/hidroelektrana>.
- [24] Državni zavod za statistiku, Popis stanovništva, kućanstava i stanova 2021.godine, (2021) 1–1. https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/Pokazatelji/Popis2021-Prvi_rezultati.xlsx.
- [25] Z. za zaštitu okoliša i prirode R.H. ZZOP, ZZOP katalog metapodataka, (n.d.).
<https://envi-metapodaci.azo.hr/geonetwork/srv/hrv/catalog.search#/map>.
- [26] QGIS, QGIS, (n.d.). <https://qgis.org/en/site/forusers/download.html>.
- [27] Z. za zaštitu okoliša i prirode R.H. ZZOP, WFS servis - vektorski sloj Corine pokrova zemljišta, (n.d.).
<http://servisi.azo.hr/tlo/wfs?service=WFS&request=GetCapabilities>.
- [28] Google, Google Karte, (n.d.). <https://www.google.com/maps/>.
- [29] M. López, F. Soto, Z.A. Hernández, Assessment of the potential of

- floating solar photovoltaic panels in bodies of water in mainland Spain, *J. Clean. Prod.* 340 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130752>.
- [30] L. Liu, Q. Wang, H. Lin, H. Li, Q. Sun, R. Wennersten, Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems, *Energy Procedia.* 105 (2017) 1136–1142. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.483>.
- [31] S. Šadek, Fotonaponski članak - Fizikalne osnove i tehnička izvedba, (n.d.).
- [32] W.C.L. Kamuyu, J.R. Lim, C.S. Won, H.K. Ahn, Prediction model of photovoltaic module temperature for power performance of floating PVs, *Energies.* 11 (2018). <https://doi.org/10.3390/en11020447>.
- [33] N. Ravichandran, N. Ravichandran, B. Panneerselvam, Performance analysis of a floating photovoltaic covering system in an Indian reservoir, *Clean Energy.* 5 (2021) 208–228. <https://doi.org/10.1093/ce/zkab006>.
- [34] S. Suisse Eole, Wind Profile Calculator, (n.d.). <https://wind-data.ch/tools/profile.php?lng=en>.
- [35] SOLVIS, SOLVIS fotonaponski moduli SV72_E, (n.d.).
- [36] C.& T. C&T, C&T Catalog Hydrelia® Technology 2018, Issuu. (2018). https://issuu.com/cieletterre/docs/c_t_catalog_hydrelia__technology_20.
- [37] L. Wästhage, Optimization of Floating PV, (2017). <https://mdh.diva-portal.org/smash/get/diva2:1118654/FULLTEXT01.pdf>.
- [38] PVGIS, Photovoltaic Geographical Information System, EU Sci. Hub - Eur. Comm. (2012) 1–2. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#PVP%0Ahttps://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis.
- [39] D.L. McJannet, I.T. Webster, M.P. Stenson, B.S. Sherman, Estimating open water evaporation for the Murray-Darling Basin, A Rep. to Aust.

- Gov. from CSIRO Murray-Darling Basin Sustain. Yields Proj. (2008) 58.
- [40] H.E. Gad, S.M. El-Gayar, *Climate parameters used to evaluate the evapotranspiration in delta central zone of Egypt*, *Fourteenth Int. Water Technol. Conf. IWTC14*. (2010) 529–548.
- [41] Thomas Fritsch, *Water density as a function of temperature*, (2020). <https://physics.stackexchange.com/questions/535667/water-density-as-a-function-of-temperature>.
- [42] Dr. Paul Peter Urone;, Dr. Roger Hinrichs;, D.K.D.M.S. Dirks;, *Thermal Expansion of Solids and Liquids*, in: *Coll. Phys. OpenStax, BCcampus Pressbooks*, 2015. <https://pressbooks.bccampus.ca/collegephysics/chapter/thermal-expansion-of-solids-and-liquids/>.
- [43] *The Engineering ToolBox*, *Water - Specific Heat vs. Temperature*, (n.d.). https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html (accessed June 15, 2022).
- [44] Dominik Czernia, Bogna Szyk, Małgorzata Koperska, Jack Bowater, *Kalkulator gęstości zraka*, (2022).
- [45] O.A.M.A. H Kara, *The energy balance of the earth's surface*, *Pap. Knowl. Towar. a Media Hist. Doc.* 7 (2014) 107–15.
- [46] F. Bontempo Scavo, G.M. Tina, A. Gagliano, S. Nižetić, *An assessment study of evaporation rate models on a water basin with floating photovoltaic plants*, *Int. J. Energy Res.* 45 (2021) 167–188. <https://doi.org/10.1002/er.5170>.
- [47] T. Bartulović, *Analiza Vierendeel-ovog krovnog nosača strojarnice Hidroelektrane Kraljevac*, *University of Split*, 2018. <https://zir.nsk.hr/islandora/object/gradst:1147/datastream/PDF/download>.
- [48] A.Q. Jakhrani, A.K. Othman, A.R.H. Rigitand, S.R. Samo, *Comparison of solar photovoltaic module temperature models*, *World Appl. Sci. J.* 14 (2011) 1–8.

- [49] E. udruga KRKA-KNIN, HE Krčić, (2014). <https://eu-krka-knin.hr/85-prostorno-planiranje-intervencije-u-okolisu/271-he-kri>.
- [50] B. Marinov, Očuvanje ekosustava doline Rječine, University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences / Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet, 2019. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:186:645846>.
- [51] Copernicus, (n.d.). <https://www.copernicus.eu/en>.
- [52] Copernicus, CORINE Land Cover, (n.d.). <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>.
- [53] W.F. Marion, Overview of the PV Module Model in PVWatts, PV Perform. Model. Work. (2010). <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/49607.pdf>.
- [54] A.P. Dobos, PVWatts Version 5 Manual (NREL/TP-6A20-62641), Natl. Renew. Energy Lab. (2014) 20. <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62641.pdf>.
- [55] Murrayriver, Murray Darling Basin, (n.d.). <http://www.murrayriver.com.au/about-the-murray/murray-darling-basin/>.
- [56] Wikipedia, Bilečko jezero, (n.d.). https://hr.wikipedia.org/wiki/Bilečko_jezero.
- [57] Wikipedija, Buško jezero, (n.d.). https://hr.wikipedia.org/wiki/Buško_jezero.
- [58] RTL.hr, Pogledajte kako izgleda potpuno isušeno jezero oko prekrasnog dvorca Trakošćan. Za isušivanje su se pripremali 15 godina, (n.d.). <https://www.rtl.hr/vijesti/hrvatska/pogledajte-kako-izgleda-potpuno-isuseno-jezero-oko-prekrasnog-dvorca-trakoscan-za-isusivanje-su-se-pripremali-15-godina-f46657c0-c353-11ec-bd24-fe475b7c2d1e>.
- [59] A. Lucić, Idejno rješenje hidroenergetskog sustava Kosinj, University of Split, 2020.
- [60] D.R. Schneider, Predavanje: "Uvod u obnovljive izvore energije I. Karakteristike hidroelektrana. Karakteristike sunčevih elektrana. Karakteristike vjetroelektrana.," 2008.

- [61] HEP, *Hidroelektrane u Hrvatskoj*, 2020.
- [62] HowwikiHR, *Bilećko jezero*, (n.d.).
https://howwikihr.com/wiki/Билећко_језеро.
- [63] GRAĐEVINAR, *Uloga Elektroprojekta u korištenju vodnih snaga u Hrvatskoj*, *Gradjevinar*. 71 (2019) 218–233.
- [64] N. Drešković, L. Lorber, D. Cigale, *Zbornik radova Trećeg kongresa geografa Bosne i Hercegovine.pdf*, *Geografsko društvo u Federaciji Bosne i Hercegovine*, Sarajevo, 2014.
- [65] I. Beti, *Gradi se najveća sunčana elektrana u Hrvatskoj: Projekt vrijedan 58 milijuna kuna*, (2022). <https://www.vecernji.hr/vijesti/medimurje-dobiva-najvecu-suncanu-elektranu-u-hrvatskoj-prostirat-ce-se-na-176-hektara-1559944>.
- [66] S.M. Kim, M. Oh, H.D. Park, *Analysis and prioritization of the floating photovoltaic system potential for reservoirs in Korea*, *Appl. Sci.* 9 (2019).
<https://doi.org/10.3390/app9030395>.
- [67] K. Kwang-ho, *Floating solar power plant sunk to the ground due to drought*, (2017). <https://www.yna.co.kr/view/AKR20170626109700061>.
- [68] M. König, *Vertikalni podizni uređaj za kontrolu i održavanje tlačnog cjevovoda hidroelektrane*, *Sveučilište u Zagrebu*, 2010.
- [69] N.N. Tasie, C. Israel-Cookey, L.J. Banyie, *The Effect of Relative Humidity on the Solar Radiation Intensity in Port Harcourt, Nigeria*, *Int. J. Res.* 5 (2018) 128–136.
<https://journals.pen2print.org/index.php/ijr/article/view/16369>.

Privitak

Potencijali proizvodnje svih jezera

R. br.	Jezero	A [km ²]	P(0,2) [MW]	P(0,4) [MW]	P(0,6) [MW]	P(0,8) [MW]
1	Buško blato (jezero)	55,80	1.361,02	2.722,04	4.083,06	5.444,08
2	Bilečko jezero	33,00	800,51	1.601,01	2.401,52	3.202,03
3	Vransko jezero kod Biograda	30,65	773,44	1.546,88	2.320,32	3.093,76
4	Ribnjaci Garešnica	19,84	481,83	963,67	1.445,50	1.927,33
5	Peručko jezero	18,08	439,82	879,63	1.319,45	1.759,26
6	Dubravsko jezero	17,25	419,98	839,96	1.259,94	1.679,92
7	Ribnjaci Jasinje	14,67	356,01	712,02	1.068,03	1.424,04
8	Grubišno polje Ilova	13,83	335,36	670,73	1.006,09	1.341,45
9	Ribnjak Breznica Našička	13,22	321,15	642,30	963,44	1.284,59
10	Prokljansko jezero	11,68	281,14	562,28	843,42	1.124,56
11	Akumulacijsko jezero Kosinj	11,55	282,35	564,71	847,06	1.129,42
12	Varaždinsko jezero	10,58	257,69	515,38	773,07	1.030,76
13	Grudnjak Vučica	10,12	245,77	491,54	737,31	983,07
14	Donji Miholjac ribnjaci	9,53	231,39	462,77	694,16	925,54
15	Visovačko jezero	7,37	177,35	354,71	532,06	709,41
16	Staro Štefanje Česma ribnjaci	7,25	176,00	352,01	528,01	704,02
17	Lonjsko polje ribnjaci	6,58	159,69	319,39	479,08	638,78
18	Crna Mlaka	6,46	156,72	313,45	470,17	626,90
19	Kolarevo Selo Česma	5,86	142,29	284,58	426,88	569,17
20	Vransko jezero Cres	5,48	138,41	276,82	415,23	553,64
21	Ribnjaci Lipovljani	4,30	104,19	208,38	312,57	416,75
22	Ribnjak Kopački rit	3,67	89,12	178,23	267,35	356,47
23	Ribnjaci Draganić	3,60	87,32	174,63	261,95	349,27
24	Krušičko jezero	3,57	87,24	174,48	261,72	348,96
25	Kostanj Česma	3,16	77,26	154,52	231,77	309,03
26	Štikada	3,12	75,90	151,81	227,71	303,62

27	Jezero Petnja	3,04	73,82	147,65	221,47	295,30
28	Banova jaruga ribnjaci	2,78	67,34	134,67	202,01	269,34
29	Jezero Kozjak	2,59	63,74	127,48	191,22	254,96
30	Šoderica	2,17	52,89	105,79	158,68	211,57
31	Butoniga jezero	1,98	47,78	95,56	143,34	191,13
32	Prološko jezero	1,88	45,67	91,34	137,01	182,68
33	Jaruge Sikirevci	1,86	45,02	90,03	135,05	180,07
34	Nadolez, Votok, Juš, Finzula, Rakitje	1,71	41,52	83,05	124,57	166,10
35	Lokvarsko jezero	1,64	40,31	80,62	120,93	161,24
36	Ribnjaci Lipovljani 2	1,53	37,10	74,19	111,29	148,39
37	Ormoško jezero	1,52	37,09	74,18	111,26	148,35
38	Jezero Sabljaci	1,49	36,29	72,57	108,86	145,14
39	Sportski ribnjaci Pisarovina	1,43	34,69	69,37	104,06	138,75
40	Blačansko jezero	1,43	34,99	69,97	104,95	139,94
41	Baćinska jezera	1,42	35,75	71,50	107,26	143,01
42	Bijelo brdo	1,35	32,75	65,49	98,24	130,99
43	Jezero Borovik	1,32	32,20	64,41	96,61	128,82
44	Ričice (Zeleno jezero)	1,24	30,23	60,46	90,69	120,92
45	Jezero Čiče	1,17	28,36	56,71	85,07	113,42
46	Kuti Badžula	1,12	26,93	53,87	80,80	107,73
47	Ribnjaci Draganić 2	1,08	26,17	52,34	78,52	104,69
48	Kopačevo jezero	1,04	25,20	50,40	75,59	100,79
49	Odteretni kanal Sava-Odra	1,00	24,22	48,44	72,65	96,87
50	Biljsko jezero	0,91	22,11	44,22	66,33	88,45
51	Jošava jezero	0,91	22,03	44,06	66,08	88,11
52	Jarun	0,89	21,58	43,15	64,73	86,31
53	Jezero Koritnjak (Bučje Gorjansko)	0,86	20,85	41,71	62,56	83,42
54	Jezera Savica	0,75	18,17	36,33	54,50	72,67
55	Vela Solina	0,74	18,75	37,50	56,24	74,99
56	Jezero Jegeniš	0,67	16,33	32,66	48,99	65,32
57	Jezero Lepenica	0,67	16,24	32,48	48,72	64,96
58	Erdut Dunav	0,66	16,00	32,01	48,01	64,02
59	Lapovac	0,66	15,98	31,96	47,93	63,91
60	Abesinija	0,60	14,46	28,92	43,38	57,84
61	Popovac	0,58	14,03	28,06	42,10	56,13

62	Stara Sava	0,57	13,81	27,61	41,42	55,22
63	Trstenik	0,56	13,61	27,21	40,82	54,42
64	Toplica Garešnica 2	0,52	12,59	25,18	37,76	50,35
65	Sveti Đurđ	0,51	12,40	24,80	37,20	49,60
66	Prančevići jezero	0,50	11,99	23,98	35,98	47,97
67	Ponikve Krk	0,49	12,44	24,87	37,31	49,74
68	Toplica Garešnica 1	0,48	11,56	23,13	34,69	46,25
69	Sveti Đurđ 2	0,48	11,60	23,20	34,81	46,41
70	Razovac	0,47	11,49	22,98	34,47	45,96
71	Kompenzacijski bazen Gusić polje	0,46	11,16	22,32	33,49	44,65
72	Motičnjak	0,45	11,00	21,99	32,99	43,98
73	Đurđevac ribnjaci	0,45	10,91	21,81	32,72	43,62
74	Ribnjaci Sveti Đurađ	0,44	10,61	21,22	31,82	42,43
75	Goričko jezero	0,43	10,53	21,05	31,58	42,10
76	Zajarki	0,43	10,50	21,00	31,49	41,99
77	Popovača Repušnica	0,42	10,31	20,63	30,94	41,25
78	Jezero broj 1-8	0,42	10,28	20,55	30,83	41,11
79	Tribaljsko jezero	0,42	10,11	20,23	30,34	40,45
80	Fuka jezero	0,42	10,13	20,26	30,40	40,53
81	Orešje	0,42	10,12	20,23	30,35	40,47
82	Visovačko jezero 2	0,41	9,86	19,73	29,59	39,46
83	Mali Balaton	0,40	9,82	19,63	29,45	39,27
84	Brljansko jezero	0,39	9,47	18,94	28,41	37,88
85	Čingi-Lingi	0,37	8,93	17,86	26,79	35,72
86	Lonjsko polje	0,36	8,78	17,56	26,34	35,12
87	Feričanci	0,35	8,57	17,14	25,70	34,27
88	Golubičko jezero	0,35	8,52	17,04	25,57	34,09
89	Švajcarnica	0,35	8,43	16,86	25,29	33,72
90	Desansko jezero	0,34	8,27	16,53	24,80	33,06
91	Pomoćin	0,34	8,33	16,66	24,98	33,31
92	Gliboki potok Dvorac Inkey	0,34	8,30	16,61	24,91	33,21
93	Letovanić	0,34	8,25	16,50	24,75	33,00
94	Njivice Krk	0,33	8,33	16,66	24,98	33,31
95	Novaki Pazinski Pazinčica	0,33	7,97	15,94	23,91	31,88
96	Kutina Ilova	0,33	7,96	15,91	23,87	31,83
97	Šodolovci	0,32	7,85	15,71	23,56	31,42

98	Siromaja	0,32	7,85	15,70	23,56	31,41
99	Kula Norinska	0,32	7,65	15,31	22,96	30,62
100	Jezero Jegeniš 2	0,32	7,67	15,35	23,02	30,69
101	Jastrebarsko ribnjak	0,31	7,53	15,05	22,58	30,10
102	Jezero Bajer	0,31	7,58	15,16	22,74	30,32
103	Gmajna	0,31	7,52	15,03	22,55	30,07
104	Višnjica	0,30	7,66	15,32	22,98	30,64
105	Gliboki potok Rasinja	0,29	8,30	16,61	24,91	33,21
106	Trakošćan	0,28	6,92	13,84	20,76	27,69
107	Vukovina	0,27	6,60	13,21	19,81	26,42
108	Mlinac	0,27	6,56	13,11	19,67	26,22
109	Nova Drenčina	0,27	6,48	12,96	19,44	25,92
110	Ivankovo	0,27	6,47	12,93	19,40	25,87
111	Sportski ribnjaci Pisarovina 2	0,26	6,41	12,82	19,23	25,64
112	Jezero Birina	0,26	6,52	13,03	19,55	26,06
113	Jezero Petnja 2	0,26	6,27	12,53	18,80	25,06
114	Obsenica Krivalj	0,26	6,27	12,54	18,81	25,08
115	Akumulacijsko jezero Bačica	0,26	6,21	12,42	18,64	24,85
116	Čigoč	0,25	6,18	12,35	18,53	24,70
117	Popovac Karašica	0,25	6,12	12,25	18,37	24,50
118	Šandorovec	0,25	6,13	12,26	18,39	24,52
119	Jezero Mir	0,25	6,33	12,66	18,99	25,32
120	Glogovnica Čabraji	0,25	6,09	12,18	18,27	24,36
121	Draž	0,17	4,03	8,05	12,08	16,11
122	Mura Miklavec	0,06	1,45	2,89	4,34	5,79
123	Jezero Valić	0,04	0,91	1,83	2,74	3,65
124	Hrvatska Dubica Una	0,00	0,12	0,23	0,35	0,47
125	Legrad - Murakeresztur	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04
126	Kneževi Vinogradi	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03
127	Drava Somogy Megye	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02

Trajanje korištenja solarnih elektrana na jezerima koja ne koristi niti jedna hidroelektrana kao akumulaciju

<i>R. br.</i>	<i>Jezero</i>	<i>površina [km²]</i>	<i>Trajanje korištenja [h]</i>
1	<i>Vela Solina</i>	<i>0,743148</i>	<i>1831,2</i>
2	<i>Vransko jezero Cres</i>	<i>5,482255</i>	<i>1805,7</i>
3	<i>Baćinska jezera</i>	<i>1,416783</i>	<i>1803,9</i>
4	<i>Prokljansko jezero</i>	<i>11,677989</i>	<i>1794,7</i>
5	<i>Jezero Mir</i>	<i>0,250818</i>	<i>1791,4</i>
6	<i>Jezero Birina</i>	<i>0,258140</i>	<i>1785,7</i>
7	<i>Kula Norinska</i>	<i>0,318397</i>	<i>1756,1</i>
8	<i>Desansko jezero</i>	<i>0,343845</i>	<i>1755,9</i>
9	<i>Vransko jezero kod Biograda</i>	<i>30,650299</i>	<i>1754,4</i>
10	<i>Njivice</i>	<i>0,329738</i>	<i>1723,6</i>
11	<i>Kuti Badžula</i>	<i>1,119872</i>	<i>1722,1</i>
12	<i>Ponikve Krk</i>	<i>0,492416</i>	<i>1721,6</i>
13	<i>Visovačko jezero 2</i>	<i>0,408763</i>	<i>1721,2</i>
14	<i>Prološko jezero</i>	<i>1,883586</i>	<i>1675,8</i>
15	<i>Ričice (Zeleno jezero)</i>	<i>1,244785</i>	<i>1665,8</i>
16	<i>Butoniga jezero</i>	<i>1,977526</i>	<i>1619,3</i>
17	<i>Tribaljsko jezero</i>	<i>0,417720</i>	<i>1614,1</i>
18	<i>Novaki Pazinski Pazinčica</i>	<i>0,329587</i>	<i>1612,0</i>
19	<i>Gmajna</i>	<i>0,308202</i>	<i>1581,9</i>
20	<i>Gliboki potok Dvorac Inkey</i>	<i>0,341203</i>	<i>1536,9</i>
21	<i>Gliboki potok Rasinja</i>	<i>0,288757</i>	<i>1536,9</i>
22	<i>Sveti Đurđ 2</i>	<i>0,476580</i>	<i>1535,8</i>
23	<i>Sveti Đurđ</i>	<i>0,509323</i>	<i>1535,4</i>
24	<i>Akumulacijsko jezero Kosinj</i>	<i>11,550000</i>	<i>1532,9</i>
25	<i>Staro Štefanje Česma ribnjaci</i>	<i>7,248927</i>	<i>1532,6</i>
26	<i>Fuka jezero</i>	<i>0,417282</i>	<i>1532,3</i>
27	<i>Šoderica</i>	<i>2,173762</i>	<i>1531,6</i>
28	<i>Kolarevo Selo Česma</i>	<i>5,859421</i>	<i>1528,2</i>
29	<i>Šandorovec</i>	<i>0,251691</i>	<i>1526,1</i>
30	<i>Ribnjaci Garešnica</i>	<i>19,844530</i>	<i>1525,6</i>
31	<i>Višnjica</i>	<i>0,302702</i>	<i>1525,0</i>
32	<i>Mlinac</i>	<i>0,270074</i>	<i>1524,7</i>
33	<i>Vukovina</i>	<i>0,272094</i>	<i>1524,7</i>
34	<i>Toplica Garešnica 2</i>	<i>0,518407</i>	<i>1523,9</i>
35	<i>Jezero Čiče</i>	<i>1,167843</i>	<i>1523,5</i>
36	<i>Motičnjak</i>	<i>0,451449</i>	<i>1523,4</i>
37	<i>Feričanci</i>	<i>0,352100</i>	<i>1522,9</i>
38	<i>Đurđevac ribnjaci</i>	<i>0,448261</i>	<i>1522,4</i>
39	<i>Jezero Jegeniš 2</i>	<i>0,315303</i>	<i>1521,7</i>
40	<i>Jezera Savica</i>	<i>0,748166</i>	<i>1521,5</i>

41	<i>Ribnjak Breznica Našička</i>	13,222268	1520,6
42	<i>Legrad - Murakeresztur</i>	0,000366	1520,2
43	<i>Glogovnica Čabraji</i>	0,250617	1519,8
44	<i>Jezero Jegeniš</i>	0,671044	1519,8
45	<i>Trstenik</i>	0,560501	1519,6
46	<i>Abesinija</i>	0,595661	1519,6
47	<i>Siromaja</i>	0,323464	1519,4
48	<i>Čingi-Lingi</i>	0,367103	1519,2
49	<i>Toplica Garešnica 1</i>	0,476729	1517,2
50	<i>Grubišno polje Ilova</i>	13,827096	1517,1
51	<i>Grudnjak Vučica</i>	10,118326	1516,1
52	<i>Jezero Koritnjak (Bučje Gorjansko)</i>	0,858396	1515,6
53	<i>Jarun</i>	0,888560	1513,1
54	<i>Jastrebarsko ribnjak</i>	0,309867	1511,9
55	<i>Ribnjaci Sveti Đurađ</i>	0,436828	1511,4
56	<i>Letovanić</i>	0,340036	1511,3
57	<i>Lapovac</i>	0,657912	1511,3
58	<i>Biljsko jezero</i>	0,911319	1511,2
59	<i>Nova Drenčina</i>	0,267000	1510,5
60	<i>Mura Miklavec</i>	0,059401	1510,0
61	<i>Švajcarnica</i>	0,347435	1508,9
62	<i>Pomoćin</i>	0,343195	1508,3
63	<i>Drava Somogy Megye</i>	0,000232	1508,3
64	<i>Kopačevo jezero</i>	1,038302	1507,2
65	<i>Erdut Dunav</i>	0,659615	1506,8
66	<i>Popovača Repušnica</i>	0,424988	1506,6
67	<i>Orešje</i>	0,416076	1505,7
68	<i>Šodolovci</i>	0,323700	1505,0
69	<i>Zajarki</i>	0,431726	1504,8
70	<i>Odteretni kanal Sava-Odra</i>	0,996867	1504,6
71	<i>Kneževi Vinogradi</i>	0,000331	1504,5
72	<i>Nadolez, Votok, Juš, Finzula, Rakitje</i>	1,709201	1504,3
73	<i>Jezero broj 1-8</i>	0,423132	1504,0
74	<i>Ivankovo</i>	0,266689	1503,6
75	<i>Banova jaruga ribnjaci</i>	2,776548	1503,3
76	<i>Popovac</i>	0,578067	1503,3
77	<i>Ribnjaci Lipovljani 2</i>	1,529662	1503,3
78	<i>Ribnjaci Lipovljani</i>	4,296181	1503,2
79	<i>Lonjsko polje ribnjaci</i>	6,584945	1503,2
80	<i>Mali Balaton</i>	0,403031	1501,6
81	<i>Jošava jezero</i>	0,907633	1501,2
82	<i>Donji Miholjac ribnjaci</i>	9,526938	1500,9
83	<i>Popovac Karašica</i>	0,252291	1500,2
84	<i>Bijelo brdo</i>	1,349884	1500,1
85	<i>Jaruge Sikirevci</i>	1,857028	1499,4

86	<i>Ribnjak Kopački rit</i>	3,671540	1496,2
87	<i>Draž</i>	0,165733	1494,8
88	<i>Sportski ribnjaci Pisarovina</i>	1,428287	1494,7
89	<i>Lonjsko polje</i>	0,362042	1494,5
90	<i>Sportski ribnjaci Pisarovina 2</i>	0,263990	1494,5
91	<i>Kutina Ilova</i>	0,328112	1493,9
92	<i>Čigoč</i>	0,254605	1493,3
93	<i>Hrvatska Dubica Una</i>	0,004822	1491,5
94	<i>Trakošćan</i>	0,283927	1491,0
95	<i>Crna Mlaka</i>	6,456364	1489,5
96	<i>Jezero Borovik</i>	1,324666	1488,9
97	<i>Ribnjaci Draganić 2</i>	1,077773	1488,1
98	<i>Ribnjaci Draganić</i>	3,595785	1488,0
99	<i>Akumulacijsko jezero Bačica</i>	0,256328	1484,6
100	<i>Stara Sava</i>	0,569244	1482,5
101	<i>Jezero Petnja</i>	3,040985	1480,2
102	<i>Ribnjaci Jasinje</i>	14,670091	1479,4
103	<i>Jezero Kozjak</i>	2,587692	1478,1
104	<i>Blaćansko jezero</i>	1,426746	1468,0
105	<i>Kostanj Česma</i>	3,157469	1464,7
106	<i>Jezero Petnja 2</i>	0,258029	1448,5