

# Procjena mogućih scenarija dekarbonizacije Grada Samobora korištenjem računalnih aplikacija EnergyPLAN i PVGIS

---

Rendulić, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:330879>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-31**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO – GEOLOŠKO – NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

**PROCJENA MOGUĆIH SCENARIJA DEKARBONIZACIJE GRADA  
SAMOBORA KORIŠTENJEM RAČUNALNIH APLIKACIJA  
ENERGYPLAN I PVGIS**

Diplomski rad

Mislav Rendulić

N 376

Zagreb, 2022.

PROCJENA MOGUĆIH SCENARIJA DEKARBONIZACIJE GRADA SAMOBORA  
KORIŠTENJEM RAČUNALNIH APLIKACIJA ENERGYPLAN I PVGIS

MISLAV RENDULIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Kako bi izbjegli posljedice klimatskih promjena te zadovoljili obaveze iz Pariškog sporazuma potrebna je dekarbonizacija energetskog sustava te uvođenje obnovljivih izvora energije. U radu će biti objašnjeno izračunavanje potencijalne energije iz fotonaponskih sustava instaliranih na svim raspoloživim objektima. Uz to, detaljno će biti i razrađena procedura dobivanja navedenih podataka te alati kojima su isti dobiveni. Kako bi se iskoristili novo dobiveni resursi, izrađeno je 5 različitih scenarija dekarbonizacije od kojih svaki ima posebnu primjenu novonastale električne energije. Scenariji se nakon toga uspoređuju na temelju smanjenja emisije CO<sub>2</sub> i povećanja ukupnog udjela obnovljivih izvora energije u sustavu.

Ključne riječi: Fotonaponski sustavi, solarni paneli, obnovljivi izvori energije, dekarbonizacija, Grad Samobor, EnergyPLAN, PVGIS, QGIS

Završni rad sadrži: 62 stranice 19 tablica, 41 slike i 14 referenci  
Jezik izvornika: Hrvatski  
Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNF-a  
Ocjenjivači: Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNF-a  
Dr. sc. Tomislav Kurevija, redovni profesor RGNF-a  
Dr. sc. Ivan Medved, docent RGNF-a

Datum i mjesto obrane: 16.09.2022., Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

ASSESSMENT OF POSSIBLE DECARBONIZATION SCENARIOS OF THE CITY OF  
SAMOBORA USING ENERGYPLAN AND PVGIS COMPUTER APPLICATIONS

MISLAV RENDULIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In order to avoid the consequences of climate change and meet the obligations of the Paris Agreement, it is necessary to decarbonize the energy system and introduce renewable energy sources. This thesis will explain the calculation of potential energy from photovoltaic systems installed on all available facilities. In addition, the procedure for obtaining the aforementioned data and the tools used to obtain it will be elaborated in detail. In order to use the newly obtained resources, 5 different decarbonization scenarios were created, each applying the newly generated electricity in a different way. The scenarios are then compared based on the reduction of CO<sub>2</sub> emissions and the increase of the total share of renewable energy sources in the system.

Keywords: Photovoltaic systems, solar panels, renewable energy sources, decarbonization, City of Samobor, EnergyPLAN, PVGIS, QGIS

Thesis contains: 62 pages, 19 tables, 41 figures and 14 references.

Original in: Croatian

Archived at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Luka Perković, PhD

Reviewers: Associate Professor Luka Perković, PhD  
Full Professor Tomislav Kurevija, PhD  
Assistant Professor Ivan Medved, PhD

Date and place of defense: September 16, 2022, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

## SADRŽAJ

<b>I. POPIS SLIKA.....</b>	<b>I</b>
<b>II. POPIS TABLICA.....</b>	<b>III</b>
<b>III. POPIS KORIŠTENIH KRATICA I SI JEDINICA.....</b>	<b>IV</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak diplomskog rada .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Fotonaponski sustavi .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Godišnja proizvodnja .....</b>	<b>5</b>
<b>2. PROCJENA MOGUĆNOSTI PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ FOTONAPONSKIH ELEKTRANA .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. QGIS alat za analizu geografskih podataka.....</b>	<b>7</b>
2.1.1. Dobivanje podataka o objektima u OSM-u .....	8
2.1.2. Dobivanje orijentacije krovišta.....	11
2.1.3. Korištenje alata "Oriented minimum bounding boxes" u QGIS-u .....	12
2.1.4. Iznimke kod korištenja OMBB-a .....	12
2.1.5. Rezultati OMBB-a.....	14
2.1.6. Dobivanje geografske širine i dužine .....	15
<b>2.2. PVGIS alat za izračunavanje proizvodnje solarne energije. ....</b>	<b>15</b>
2.2.1. Baza podataka solarne radijacije .....	16
2.2.2. Odabir PV tehnologije .....	17
2.2.3. Maksimalna instalirana snaga.....	17
2.2.4. Gubici u sustavu .....	18
2.2.5. Položaj ugradnje .....	18
2.2.6. Nagib .....	19
2.2.7. Azimut .....	19
<b>3. METODA PRORAČUNA ENERGETSKIH TOKOVA U PROGRAMU ENERGYPLAN .....</b>	<b>20</b>

<b>3.1.</b>	<b>EnergyPLAN program</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2.</b>	<b>Ulazni podaci</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3.</b>	<b>Izlazni podaci</b> .....	<b>24</b>
<b>4.</b>	<b>ANALIZA SLUČAJA ZA GRAD SAMOBOR</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1.</b>	<b>Postavke slučaja za Grad Samobor</b> .....	<b>25</b>
4.1.1.	Analiza energetske potrošnje u sektoru zgradarstva.....	25
4.1.1.1.	<i>Stambene i javne zgrade u vlasništvu Grada</i> .....	25
4.1.1.2.	<i>Stambeni sektor</i> .....	26
4.1.1.3.	<i>Zgrade komercijalnih i uslužnih djelatnosti na području Grada</i> .....	27
4.1.1.4.	<i>Ukupna potrošnja energenata u sektoru zgradarstva</i> .....	28
4.1.2.	Analiza energetske potrošnje u sektoru prometa.....	29
4.1.2.1.	<i>Vozila u vlasništvu i korištenju Grada Samobora</i> .....	29
4.1.2.2.	<i>Javni prijevoz u Gradu Samoboru</i> .....	29
4.1.2.3.	<i>Osobna i komercijalna vozila</i> .....	30
4.1.2.4.	<i>Ukupna potrošnja energenata u sektoru prometa</i> .....	34
4.1.3.	Analiza energetske potrošnje u sektoru javne rasvjete .....	34
4.1.4.	Ukupna potrošnja električne energije .....	35
4.1.5.	Postojeća proizvodnja iz OIE u Gradu Samoboru.....	35
4.1.6.	Ukupni podaci za bazni scenarij Grada Samobora.....	36
<b>4.2.</b>	<b>Ulazni podaci za PVGIS za Grad Samobor</b> .....	<b>39</b>
4.2.1.	Fiksni ulazni podaci za PVGIS.....	39
4.2.2.	Dobivanje podataka o orijentaciji krovista .....	40
4.2.3.	Preuzimanje podataka za svaki objekt iz PVGIS-a .....	40
4.2.4.	Maksimalna potencijalna snaga solarnih panela na objektima.....	43
<b>4.3.</b>	<b>Dekarbonizirani scenariji</b> .....	<b>45</b>
4.3.1.	Scenarij sa 100 GWh toplinskih dizalica.....	46
4.3.2.	Scenarij s 40% električnih vozila .....	48

4.3.3.	Scenarij s 80 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila .....	50
4.3.4.	Scenarij sa 105 GWh toplinskih dizalica i 30% električnih vozila .....	52
4.3.5.	Scenarij sa 105 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila .....	54
<b>4.4.</b>	<b>Analiza rezultata .....</b>	<b>56</b>
<b>5.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>60</b>
<b>6.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>61</b>

## I. POPIS SLIKA

<b>Slika 1-1.</b> Shema fotoelektričnog efekta .....	3
<b>Slika 1-2.</b> Podjela fotonaponskih sustava .....	4
<b>Slika 2-1.</b> Granice Grada Samobora .....	7
<b>Slika 2-2.</b> Početno sučelje QGIS programa .....	8
<b>Slika 2-3.</b> OSM karta Hrvatske .....	9
<b>Slika 2-4.</b> Izdvojene zgrade na OSM karti Hrvatske.....	10
<b>Slika 2-5.</b> Poligon u obliku granica Grada Samobora.....	10
<b>Slika 2-6.</b> Svi objekti unutar granica Grada Samobora.....	11
<b>Slika 2-7.</b> Primjer djelovanja alata OMBB .....	12
<b>Slika 2-8.</b> Primjer OMBB na objektu s klaustarem .....	13
<b>Slika 2-9.</b> Primjer OMBB na primjeru kompleksa zgrade .....	14
<b>Slika 2-10.</b> Princip izračunavanja kuta dobivena alatom OMBB .....	14
<b>Slika 2-11.</b> Dobivanje koordinata na QGIS-u .....	15
<b>Slika 2-12.</b> Početno sučelje PVGIS alata .....	16
<b>Slika 2-13.</b> Samostojeći moduli .....	18
<b>Slika 3-1.</b> Izgled glavnog sučelja programa EnergyPLAN.....	20
<b>Slika 3-2.</b> Shema električnog sustava Grada Samobora. ....	21
<b>Slika 3-3.</b> Potražnja za električnom energijom u EnergyPLAN-u.....	22
<b>Slika 3-4.</b> Shema toplinskog sustava Grada Samobora.....	23
<b>Slika 3-5.</b> Potražnja za toplinskom energijom u EnergyPLAN-u .....	23
<b>Slika 3-6.</b> Potražnja u sektoru prometa u EnergyPLAN-u .....	24
<b>Slika 4-1.</b> Potrošnja pojedinih oblika energije po podsektorima .....	28
<b>Slika 4.2.</b> Sankeyev dijagram za bazni scenarij .....	38
<b>Slika 4-3.</b> PVGIS početni zaslon s fiksnim podacima .....	39
<b>Slika 4-4.</b> Izdvajanje podataka o orijentaciji krovišta iz QGIS.....	40



<b>Slika 4-5.</b> Geografska širina, dužina i azimut u .txt obliku.....	41
<b>Slika 4-6.</b> Geografska raspodjela godišnje proizvodnje energije objekata Grada Samobora.....	42
<b>Slika 4-7.</b> Proizvodnja godišnje energije ovisno o postavljenom azimutu panela.....	42
<b>Slika 4-8.</b> Primjer distribucije snage solarnih panela na objektima s instaliranih 1 kW snage.....	43
<b>Slika 4-9.</b> Primjer ukupne raspoložive površine za svaki objekt.....	43
<b>Slika 4-10.</b> Ukupna satna proizvodnja.....	44
<b>Slika 4-11.</b> Sankeyev dijagram scenarija sa 100 GWh toplinskih dizalica.....	47
<b>Slika 4-12.</b> Sankeyev dijagram scenarija s 40% električnih vozila.....	49
<b>Slika 4-13.</b> Sankeyev dijagram scenarija s 80 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila.....	51
<b>Slika 4-14.</b> Sankeyev dijagram scenarija sa 105 GWh toplinskih dizalica i 30% električnih vozila.....	53
<b>Slika 4-15.</b> Sankeyev dijagram scenarija sa 105 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila.....	55
<b>Slika 4-16.</b> Omjer emisije CO <sub>2</sub> i uvoza električne energije.....	56
<b>Slika 4-17.</b> Omjer potrošnje plina i električne energije.....	57
<b>Slika 4-18.</b> Struktura potrošnje električne energije po scenarijima.....	57
<b>Slika 4-19.</b> Struktura potrošnje energije u prometu.....	58
<b>Slika 4-20.</b> Struktura potrošnje finalne energije i uvoz električne energije.....	59

## II. POPIS TABLICA

<b>Tablica 4-1.</b> Potrošnja pojedinih energenata u objektima opće i društvene .....	26
<b>Tablica 4-2.</b> Struktura potrošnje energije u stambenom sektoru .....	27
<b>Tablica 4-3.</b> Struktura potrošnje energije u kategoriji komercijalnih i uslužnih djelatnosti .....	28
<b>Tablica 4-4.</b> Potrošnja goriva kod vozila u vlasništvu Grada Samobora.....	29
<b>Tablica 4-5.</b> Potrošnja u kategoriji javnog prijevoza Grada Samobora.....	30
<b>Tablica 4-6.</b> Struktura gradskog parka na području Samobora – teretna vozila.....	31
<b>Tablica 4-7.</b> Struktura voznog parka na području Samobora – osobna i komercijalna vozila .....	32
<b>Tablica 4-8.</b> Struktura voznog parka na području Samobora – Motocikli i mopedi .....	33
<b>Tablica 4-9.</b> Ukupna potrošnja energije iz goriva u kategoriji osobnih i komercijalnih vozila .....	33
<b>Tablica 4-10.</b> Struktura ukupne potrošnje goriva po podsektorima prometa i vrsti goriva	34
<b>Tablica 4-11.</b> Ukupna potrošnja električne energije za Grad Samobor.....	35
<b>Tablica 4-12.</b> Trenutna instalirana snaga fotonaponskih elektrana u Gradu Samoboru.....	36
<b>Tablica 4-13.</b> Podaci za bazni scenarij .....	37
<b>Tablica 4-14.</b> Primjer površine raspoložive za instalaciju solarnih panela .....	44
<b>Tablica 4-15.</b> Prikaz rezultata scenarija sa 100 GWh toplinskih dizalica .....	46
<b>Tablica 4-16.</b> Prikaz rezultata scenarija s 40% električnih vozila .....	48
<b>Tablica 4-17.</b> Prikaz rezultata scenarija s 80 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila .....	50
<b>Tablica 4-18.</b> Prikaz rezultata scenarija sa 105 GWh toplinskih dizalica i 30% električnih vozila .....	52
<b>Tablica 4-19.</b> Prikaz rezultata scenarija sa 105 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila .....	54

### III. POPIS KORIŠTENIH KRATICA I SI JEDINICA

.txt – fiksna datoteka

°C – celzijev stupanj

1D – jednodimenzionalno

CHP – kogeneracijsko postrojenje (engl. *Combined Heat and Power*)

CM SAF – engl. *Satellite Application Facility on Climate Monitoring*

CO<sub>2</sub> – ugljikov dioksid

COP – koeficijent učinkovitosti (engl. *Coefficient Of Performance*)

CTS – centralni toplinski sustav

EH – Grijanje na struju (engl. *Electric Heating*)

EV – električno vozilo (engl. *Electric Vehicle*)

GB – gigabajt

GUP – generalni urbanistički plan

GWh – gigavatsat

h – sat (engl. *Hour*)

H<sub>2</sub> - vodik

HEP – Hrvatska elektroprivreda

HP – toplinska dizalica (engl. *Heat Pump*)

I – struja

I<sub>d</sub> – struja diode

I<sub>s</sub> – fotostruja

km – kilometar

kt – kilotona

ktCO<sub>2</sub> – kilotona ugljikovog dioksida

kW – kilovat

kW/m<sup>2</sup> – kilovat po kvadratnom metru

kWh – kilovatsat

kWh/god. – kilovatsati godišnje

kWh/m<sup>2</sup> – kilovatsat po kvadratnom metru

l – litra

m – metar

m<sup>2</sup> – kvadratni metar

MB – megabajt

MUP RH – Ministarstvo unutarnji poslova Republike Hrvatske

MW – megavat

MWh – megavatsat

nm<sup>3</sup> – normalni kubični metar

ODS – operator distribucijskog sustava

OIE – obnovljivi izvori energije

OIEKPP - obnovljivi izvori energije, kogeneracije i povlašteni proizvođači

OMBB – engl. *Oriented Minimum Bounding Boxes*

OSM – engl. *Open Street Map*

PV – fotonaponski sustav (engl. *Photovoltaic*)

SAD – Sjedinjene Američke Države

t – tona

UNP – ukapljeni naftni plin

V – volt

V2G – engl. *Vehicle to grid*

W - vat

W/m<sup>2</sup> – vat po kvadratnom metru

## 1. UVOD

Brzi i svjetski prelazak na obnovljive izvore energije biti će ključan kako bi se izbjegle najgore posljedice klimatskih promjena. Gradovi su odgovorni za otprilike 75% svjetske potrošnje energije te su nam kao veliki potrošači energije vrlo bitni za energetske tranziciju. Pariškim sporazumom zemlje potpisnice obvezale su se ograničiti povećanje globalne temperature na 1.5 °C od predindustrijskog razdoblja. Nadalje, kako bi ograničili povećanje temperature na 1.5 °C, gradovi bi se trebali prebaciti na 100% čiste električne energije do 2035. te na 100% čiste ukupne energije do 2050 (C40 Cities, 2021). S time, gradovi će biti važni čimbenici sudionici u gradnji novih, decentraliziranih i dekarboniziranih energetskih sustava. Također, smanjenjem zagađenja u gradovima izbjeci će se zdravstveni problemi uzrokovani zagađenjem, što će se odraziti na strukturu lokalne zaposlenosti u pozitivnom smislu. Gradovima sa rastućom populacijom i sa pozitivnim trendom ekonomskog rasta biti će potrebna povećana potražnja za energijom (C40 Cities, 2021).

Glavni izvori obnovljivih izvora energije (OIE) koji gradovi mogu povećati su kapaciteti fotonaponskih sustava (engl. *Photovoltaic* – PV). Uz PV moguće je i razvijanje energije vjetrova, biomase, geotermalne energije, hidroenergije itd. Dok gradovi uz more mogu imati mogućnosti razvitka energije plime i oseke te energije valova. Mogućnost razvitka svakih od navedenih izvora energije ovisi o raspoloživosti prirodnih resursa i uvjeta dostupnih na željenom području. Put prema 100% obnovljive energije ponajprije će ovisiti i o energetske učinkovitosti, tipu namjene energije (električna energija, toplinska energija, gorivo), načinu primjene (zgradarstvo, promet), dionicima (velike energetske kompanije, digitalne kompanije). Također, vrlo je bitno odrediti i tehničke zahtjeve za takav projekt, kao i financijske mogućnosti i regulatorne zahtjeve grada u kojem namjeravamo provesti projekt. Malo je vjerojatno da će grad moći proizvesti svu energiju potrebnu unutar administrativnih granica grada iz obnovljivih izvora. Barem dio energije će se uvoziti iz susjednih općina, manjih gradova ili šire regije (C40 Cities, 2021).

### 1.1. Zadatak diplomskog rada

Diplomski rad se usredotočuje na mapiranje svih objekata kompatibilnih za postavljanje solarnih panela na području Grada Samobora i mogućnostima integracije potencijalno dobivene električne energije u njegov energetski sustav. Nakon izračuna potrebnih podataka za navedene objekte, izračunava se potencijalna snaga i proizvodnja na spomenutim područjima. Nakon izrade baznog scenarija i izračuna aktualne potrošnje energije i emisije

ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>), s dobivenim podacima razrađuju se scenariji dekarbonizacije energetskeg sustava te uspoređuju emisije CO<sub>2</sub> i ostali bitni podaci baznog scenarija s dekarboniziranim scenarijima.

## 1.2. Fotonaponski sustavi

Pod optimalnim uvjetima, na površini Zemlje može se dobiti 1 kW/m<sup>2</sup>, a stvarna vrijednost ovisi o lokaciji, godišnjem dobu, dobu dana, vremenskim uvjetima itd. U Hrvatskoj je prosječna vrijednost dnevne insolacije na horizontalnu plohu 3 - 4.5 kWh/m<sup>2</sup>. Osnovni problemi iskorištavanja su mala gustoća energetskeg toka, velike oscilacije intenziteta zračenja i veliki investicijski troškovi. Dobre strane korištenja sunčeve energije su (Rajković, 2011):

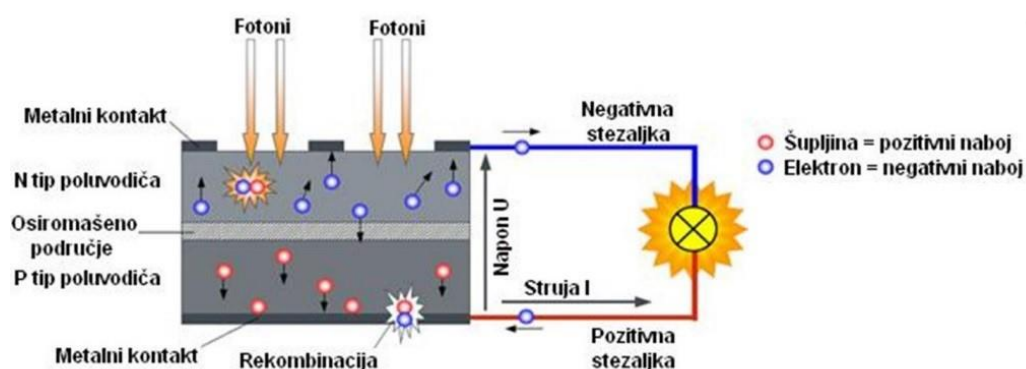
- Značajno smanjenje ovisnosti o uvoznjoj energiji te preusmjerenje energije, koja bi bila potrošena na zagrijavanje spremnika tople vode, u druge korisne oblike pretvorbe;
- OIE su klasično decentralizirani izvori energije koji doprinose sigurnosti elektroenergetskog sustava;
- Analize i iskustva iz prakse zemalja s uspješnim razvojem OIE (Španjolska, Njemačka, Danska) pokazuju da OIE pridonose bržem razvoju lokalnih područja i većem zapošljavanju nego u slučaju neobnovljivih izvora i manjem ekološkom onečišćenju;
- Zadovoljenje uvjeta iz Pariškog sporazuma.

Osnovni principi direktnog iskorištavanja energije sunca su (Rajković, 2011):

- Solarni kolektori – pripremanje vruće vode i zagrijavanje prostorija;
- Fotonaponske ćelije – direktna pretvorba sunčeve energije u električnu energiju;
- Fokusiranje sunčeve energije – upotreba u velikim energetskegim postrojenjima.

Fotonaponski sustavi služe za izravnu pretvorbu sunčeve svjetlosti u električnu energiju kojom se osigurava rad određenog broja istosmjernih i/ili izmjeničnih trošila (Grad Zagreb, 2022). Osnovni princip pretvorbe energije je fotoelektrični efekt. Ključni i reprezentativni dio fotonaponskih sustava je fotonaponska ćelija (Žiher, 2014). Fotonaponska ćelija napravljena je tako da se, kada je osvijetlimo, na njezinim krajevima javlja elektromotorna sila (napon). Kada se fotonaponska ćelija (PN-spoj) osvijetli, apsorbirani fotoni proizvode parove elektron-šupljina. Ako apsorpcija nastane daleko od PN-spoja, nastali par ubrzo se

rekombinira. Međutim, nastane li apsorpcija unutar ili u blizini PN-spoja, unutrašnje električno polje koje postoji u osiromašenom području odvaja nastali elektron i šupljinu – elektron se giba prema N-strani, šupljina prema P-strani. Takvo skupljanje elektrona i šupljina na odgovarajućim stranama PN-spoja uzrokuje elektromotornu silu na krajevima ćelije. Kada se ćelija osvijetli, kontakt na P-dijelu postaje pozitivan, a na N-dijelu negativan. Ako su kontakti ćelije spojeni s vanjskim trošilom, poteći će električna struja. Kada je fotonaponska ćelija spojena s vanjskim trošilom i osvijetljena, u ćeliji će zbog fotonapona nastajati fotostruja  $I_s$ , te će vanjskim trošilom teći struja  $I$ , jednaka razlici struje diode  $I_d$  i fotostruje  $I_s$ . (Rajković, 2011).



**Slika 1-1.** Shema fotoelektričnog efekta (Novak Mavar, 2021)

Fotonaponski modul je element koji nastaje međusobnim povezivanjem više fotonaponskih ćelija. Pri tome se ćelije mogu međusobno spajati serijski u niz ili paralelno u podmodul. Moduli proizvode istosmjernu struju i to obično s naponom od 12 ili 24 V. Glavni razlog za povezivanje fotonaponskih ćelija u module je postizanje puno veće izlazne snage u odnosu na snagu koju bi omogućila pojedina ćelija. (Žiher, 2014). Istosmjerna struja se nakon toga pretvara u izmjeničnu struju, obično uz pomoć invertera i drugih komponenti. Uz to, omogućuju joj i distribuciju energije u elektroenergetsku mrežu. Važno je napomenuti da PV sustavi ne proizvode ili skladište toplinsku energiju, jer direktno proizvode električnu energiju, a električnu energiju nije lako uskladištiti pogotovo ako se radi o velikim snagama (Nwaigwe et al., 2019).

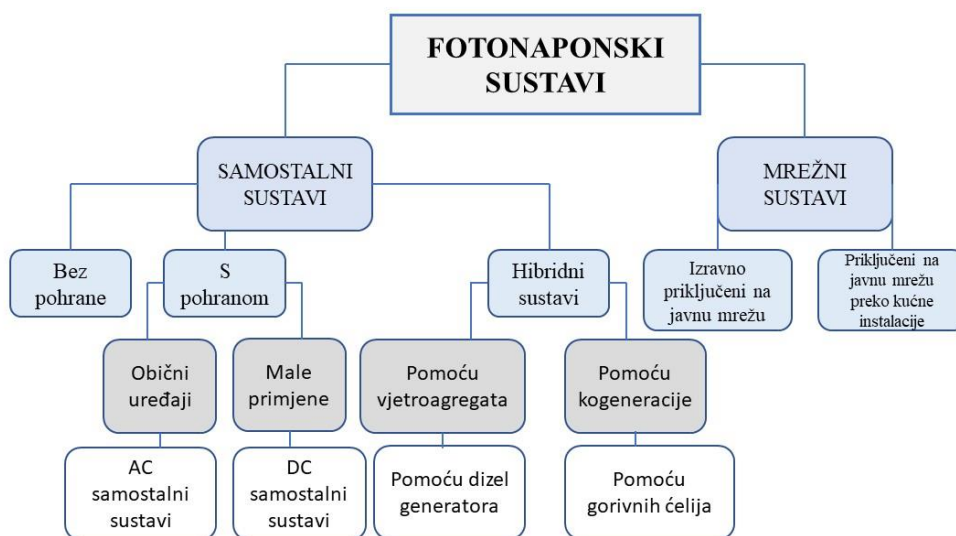
Solarni generator je naziv za jedan ili više međusobno povezanih fotonaponskih elemenata (ćelija ili modula). Iako je često postavljanje solarnih generatora na krovove kuća, fasade ili pročelja zgrada ili nekih drugih građevnih objekata, ne nužno stambenih, solarni se generatori mogu postavljati gdje god je sunčevo zračenje dostatno za proizvodnju električne



energije. Snaga solarnog generatora te izlazni napon i jakost struje ovise o broju i načinu spajanja modula, isto kao i kod spajanja ćelija u module. Naravno, nabrojani izlazni parametri najviše ovise o sunčevom zračenju kao i o temperaturi samog modula. Solarni generator je izvor električne energije pa se u njegovom radu mogu pojaviti problemi kao i kod bilo kojih drugih električnih uređaja, a najčešći su: Kratki spojevi, izboji na masu, prekidi strujnog kruga i zasjenjivanje pojedine ćelije ili dijela modula. Fotonaponski sustavi su cjelokupna postrojenja za proizvodnju električne energije iz energije sunčevog zračenja. Solarni generator je zajednički element svih fotonaponskih sustava (Žiher, 2014).

Postoje dvije osnovne skupine fotonaponskih sustava (Kvaternik, 2019):

- Fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu (off grid), a često se nazivaju i autonomnim, samostalnim ili otočnim sustavima (stand-alone systems),
- fotonaponski sustavi koji su priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu (On grid).



**Slika 1-2.** Podjela fotonaponskih sustava (Kvaternik, 2019)

Samostalni sustavi su oni u kojima proizvedena električna energija služi za pokrivanje potreba potrošača koji nisu spojeni na javnu elektroenergetsku mrežu (vikendice, kampovi, izolirani objekti na otocima ili planinama itd.) Kod takvih sustava nužno je imati akumulator (bateriju) koji služi kao spremnik električne energije. Također je potrebno dodati regulator za kontrolirano punjenje i pražnjenje baterije, a dodavanjem

izmjenjivača takvom samostalnom sustavu mogu se zadovoljiti mrežni potrošači kojima je potreban izmjenični napon kao što su perilice, hladnjaci, televizori, računala, usisavači, mali kućni aparati i druga trošila. Prednost ovakvih sustava je ta što je moguće skladištenje električne energije u akumulatoru koju možemo koristiti bilo kada. Povećava se sigurnost, nema troškova i energetske ovisnosti. Nedostatak je promjena godišnjih doba, kojega možemo nadoknaditi povećanjem skladištenja energije (Kvaternik, 2019).

Hibridni fotonaponski sustavi nastaju povezivanjem samostalnih sustava s nekim drugim alternativnim (pričuvnim) izvorima električne energije, kao što su to vjetroturbine, hidrogeneratori, pomoćni dizelski ili plinski agregati. Vjetroturbine i fotonaponski sustavi se mogu povezati pomoću zajedničkog izmjenjivača. To daje veću sigurnost i raspoloživost električne energije te se time omogućava manji kapacitet akumulatora kao samog spremnika električne energije. Proizvedenom električnom energijom pomoću solarnih modula ili vjetroagregatom napajaju se prvo trošila, a višak energije se pohranjuje u akumulatoru. Ako ne bi postojao uvjet za proizvodnju električne energije pomoću solarnih modula ili vjetroagregata, akumulator postaje izvor za napajanje istosmjernih ili izmjeničnih trošila, a u slučaju da to ne može biti niti akumulator uključuje se generator na dizel ili biodizel gorivo (Kvaternik, 2019).

Fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu ili mrežni fotonaponski sustavi su oni u kojima se proizvedena električna energija koristi za pokrivanje potreba objekta na kojem se sustav nalazi (kuće, zgrade, itd.). Mogu biti izravno priključeni ili priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu preko kućne instalacije (Kvaternik, 2019).

### **1.3. Godišnja proizvodnja**

Mnogo različitih faktora utječe na proizvodnju solarne energije. Stoga, jako je teško reći koliko će energije solarni paneli proizvesti tijekom određenog vremenskog perioda. S obzirom da se nalazimo u vremenima s nepredvidljivim promjenama meteorološkim uvjetima, dolazi i do promjene uvjeta za nastajanje solarne energije. Međutim, postoje različite metode kojima možemo procijeniti koliko energije možemo očekivati (Sveasolar, 2019). Kako bi izračunali očekivani učinak solarnih panela najčešće se navode dvije stvari:

- Učinkovitost solarnih panela

- Količina proizvedene električne energije (kWh) po instaliranom kW.

Učinkovitost solarnih panela uvelike ovisi o kvaliteti izvedbe. Jeftnije izvedbe s amorfnim silicijem imaju učinkovitost oko 10%, dok one sa skupljom izvedbom imaju učinkovitost do 25% (Novak Mavar, 2021).

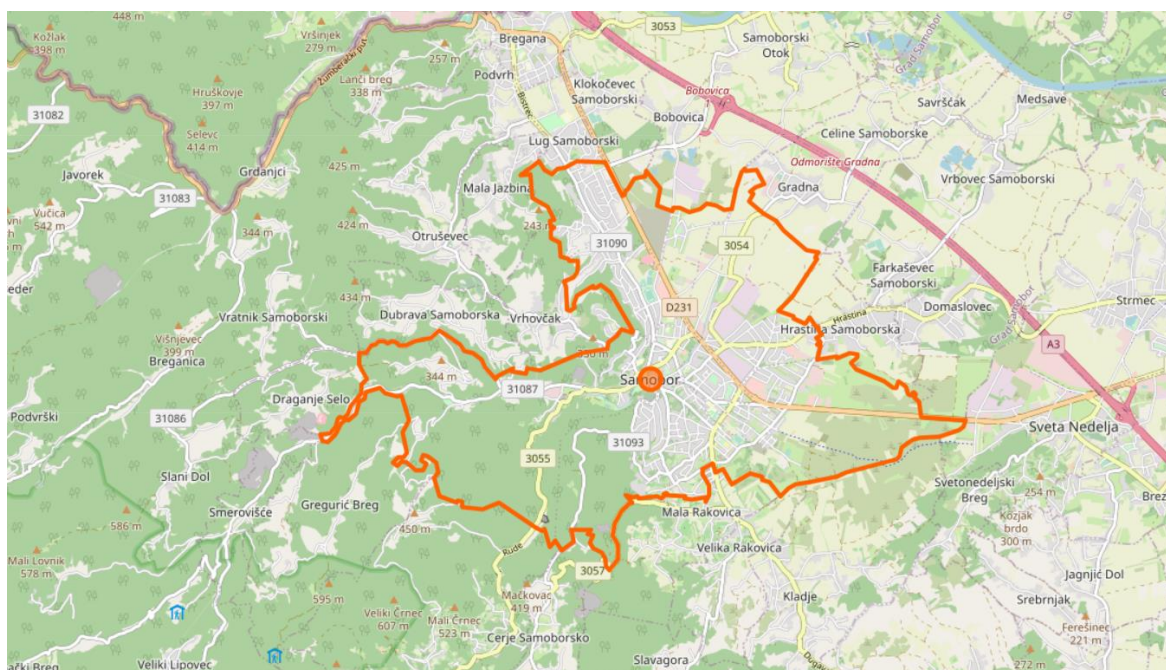
Kad je u pitanju proizvedeni kWh po kW, u pravilu se uvijek navodi da jedan instalirani kW proizvodi oko 800 – 1100 kWh / kW po godini. Ovo znači da sustavi s instaliranom snagom solarnih panela od 2 kW proizvedu 1600 – 2200 kWh električne energije po godini.

Kako je i prethodno navedeno, jako je teško procijeniti koliko energije će solarni paneli proizvesti pojedini mjesec, jer se proizvodnja razlikuje od mjeseca do mjeseca. Ljeti obično proizvodimo više nego što smo u stanju potrošiti, dok u zimi moramo kompenzirati uvozom energije iz mreže. Uz broj sunčanih sati, postoje ostali čimbenici koji utječu na proizvodnju (Sveasolar, 2019):

- Količina sunčanih sati na određenom području;
- Zasjenjenje solarnih panela drvećem, zgradama itd;
- Orijentacija solarnih panela;
- Kut nagiba solarnih panela;
- Temperatura;
- Prisutnost snijega na panelima;
- Prašina ili prljavština na panelima;
- Učinkovitost solarnih ćelija.

## 2. PROCJENA MOGUĆNOSTI PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ FOTONAPONSKIH ELEKTRANA

U ovom radu konkretan primjer dekarbonizacije grada je Grad Samobor. Samobor je grad u Zagrebačkoj županiji, udaljen 20 km (jugozapadno) od Grada Zagreba. Smješten je na istočnim obroncima Samoborskog gorja (dio Žumberačke gore), na izlazu rijeke Gradne u savsku nizinu. Grad Samobor obuhvaća 8 gradskih četvrti: Gradska četvrt – Centar, Gradska četvrt – Cvjetno naselje – Perivoj, Gradska četvrt – Giznik – Anindol, Gradska četvrt – Gornji kraj – Hamor, Gradska četvrt – Južno naselje, Gradska četvrt – Kolodvorsko naselje – Sajmište, Gradska četvrt – Podložnice, Gradska četvrt – Sveta Helena.



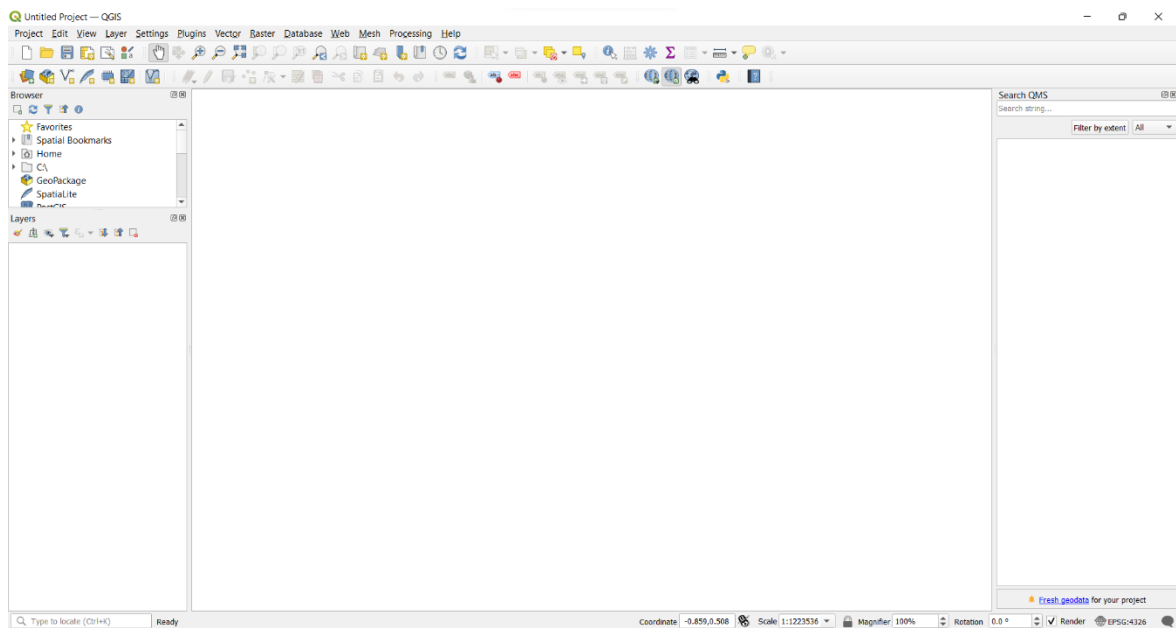
**Slika 2-1.** Granice Grada Samobora

Metoda procjene mogućnosti proizvodnje solarne energije na području Grada Samobora sastoji se od mapiranja svih građevinskih objekata na označenom području pomoću QGIS alata (slika 2-1.). Nakon pronalazjenja objekata i potrebnih podataka, podatke unosimo u alat za procjenu proizvodnje solarne energije – PVGIS. On izbacuje satne podatke o proizvodnji solarne energije na krovu tijekom cijele godine.

### 2.1. QGIS alat za analizu geografskih podataka

Kako bi dobili perspektivu o tome koliko se solarnih elektrana može izraditi na području Samobora, moramo imati program koji je specijaliziran za izvlačenje geografskih podataka.

Stoga, kako bi dobili tražene podatke, u ovom radu koristio se program QGIS. QGIS se koristi za stvaranje karata s različitim podslojevima koji daju različite projekcije karata te daju različite podatke ovisno o potrebi. Karte mogu biti napravljene u različitim formatima te se koristiti za različite namjene. QGIS omogućuje stvaranje karata koje se sastoje rasterskih ili vektorskih slojeva. Vektorski podaci mogu biti pohranjeni kao točke, linije ili poligoni.



**Slika 2-2.** Početno sučelje QGIS programa

### 2.1.1. Dobivanje podataka o objektima u OSM-u

Prvi korak sastoji se od učitavanja OSM (engl. *Open Street Map*) karata u QGIS. Ovdje postoji 2 načina za njihovo učitavanje.

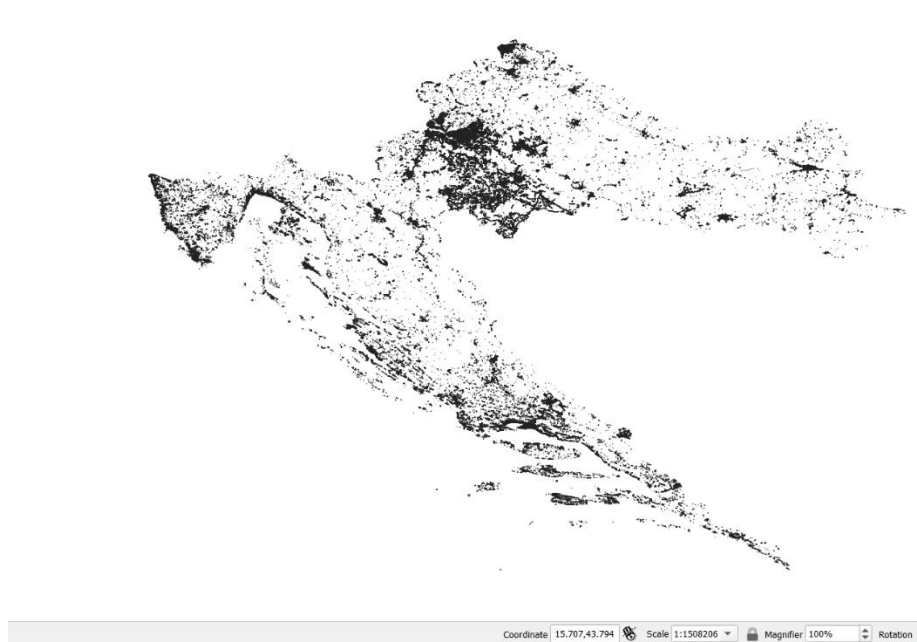
Prvi je ručno učitavanje s OSM stranice. Ovaj način može biti problematičan jer je spomenuta stranica ograničena na 50 000 članova po skidanju podataka. Kako bi se zaobišlo navedeno ograničenje potrebno je preuzeti globalni OSM kartu koja zbog svoje veličine (117 GB) nije podobna za preuzimanje. Stoga kako bi se mapiralo cijelo područje grada potrebno je 7 do 8 preuzimanja podataka iz različitih dijelova grada te njihovo spajanje pomoću funkcije za spajanje karata u jednu kartu. Ovo metoda može biti problematična jer ako prilikom preuzimanja dođe do preklapanja podataka dobiti ćemo dupli broj podataka u preklapljenom dijelu. Odnosno proračun će biti nerealan i količina snage biti će veća nego što u stvarnosti jest.

Druga metoda je preuzimanje karte koja pokazuje samo slojeve u Hrvatskoj. Za razliku od globalne karte koja je zbog svoje veličine nepraktična, OSM karta hrvatske s veličinom od 138 MB dovoljna mala za preuzimanje i učitavanje u QGIS bez većih zastajanja.



**Slika 2-3.** OSM karta Hrvatske

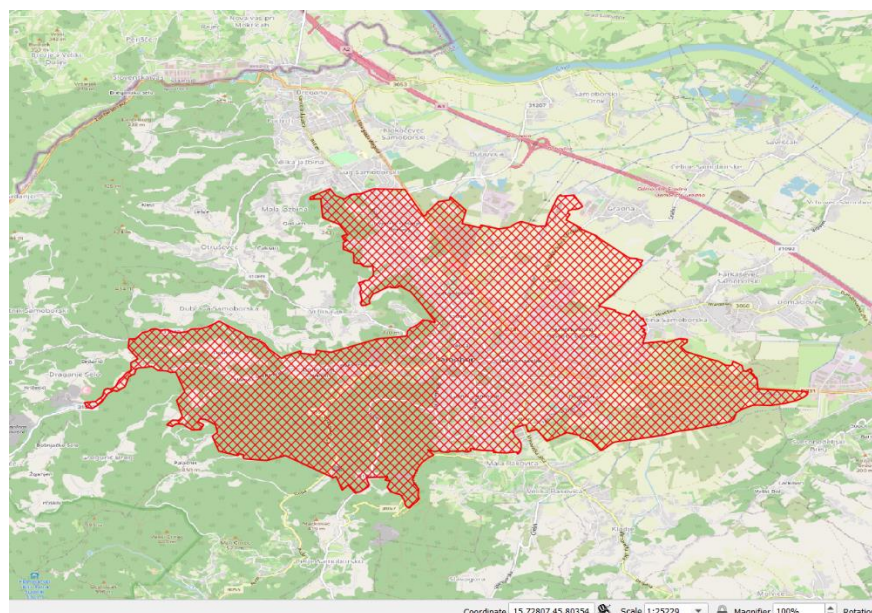
Budući da OSM karta (slika 2-3.) osim zgrada sadrži i ostale značajke, potrebno nam je izdvojiti značajke zgrada od ostalih, čime će se ubrzati proces jer će program imati manje značajki za mapiranje. Uz zgrade, multipoligonalni OSM sloj (slika 2-3.) sadrži prirodne i umjetne značajke, zemljišta, ceste, pruge, vodene tokove itd. Kako bi izdvojili zgrade potrebno je u filteru označiti sve ostale poligone kao "0". Nakon toga, svi ostali poligoni koji nemaju oznaku "building" neće biti vidljivi na sloju. Sada se na sloju vide samo zgrade. (slika 2-4.)



**Slika 2-4.** Izdvojene zgrade na OSM karti Hrvatske

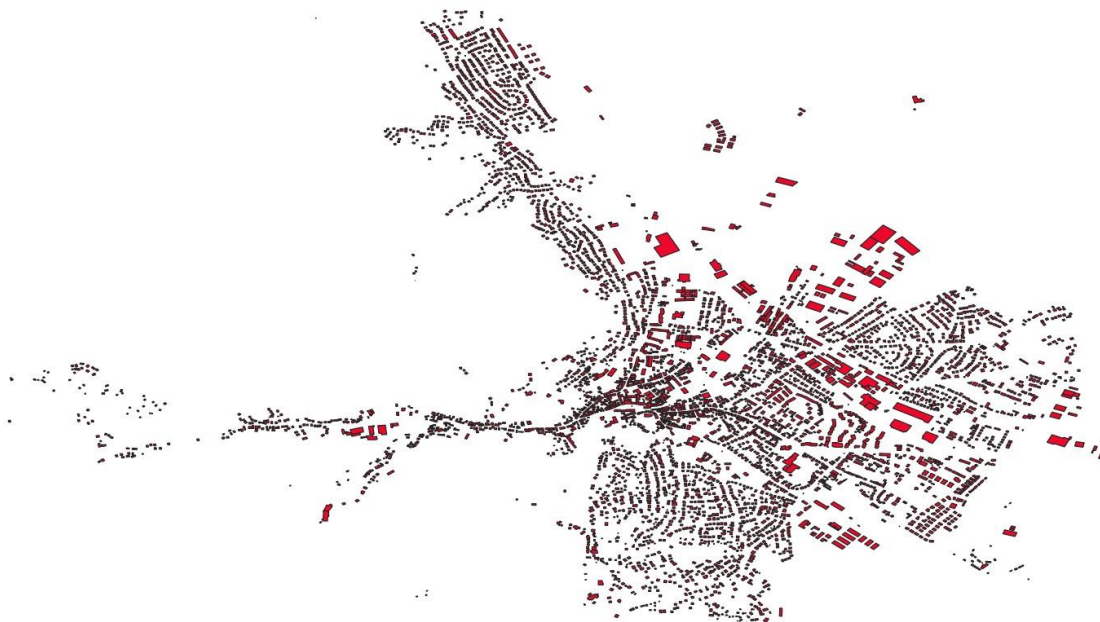
Nakon toga potrebno je izdvojiti zgrade samo za Grad Samobor. Nažalost, OSM slojevi ne sadrže značajke administrativnih granica gradova pa njih moramo napraviti sami.

Kako bi izradili granice koristiti ćemo alat QGIS-a za izradu poligona. Poligon izrađujemo na temelju danih granica na OSM stranici (slika 2-1.). Iako OSM ne sadrži značajke granica, one su svejedno otisnute na karti u grafičkom obliku pa se prema njima možemo orijentirati za izradu poligona granica (slika 2-5.)



**Slika 2-5.** Poligon u obliku granica Grada Samobora

Preklapanjem poligona koji predstavlja granice Grada Samobora (slika 2-5.) s izdvojenim zgradama cijele Hrvatske (slika 2-4.) dobiti ćemo sve raspoložive objekte unutar granica Grada Samobora (slika 2-6.)



**Slika 2-6.** Svi objekti unutar granica Grada Samobora

Nakon što smo dobili sve objekte na traženom području (slika 2-6.). Možemo krenuti s izračunavanjem podataka potrebnih za dobivanje proizvodnje iz PVGIS alata. Potrebni podaci su:

- Orijehtacija krovišta;
- Geografska dužina;
- Geografska širina.

#### 2.1.2. Dobivanje orijentacije krovišta

Položaj i orijentacija solarnih panela bitna je jednako kao i odabir vrste solarnih panela za specifične situacije. Paneli će preuzeti većinu energije ako sunčeve zrake padaju na površinu okomito. Kako bi optimizirali dobitke, moramo osigurati da paneli budu izloženi najvećem intenzitetu sunca najdulji mogući period vremena te nam je zato nagib vrlo bitan. Neki paneli imaju instaliran sustav za praćenje sunca, što znatno povećava dobivenu energiju. Paneli u ovom radu odnosit će se na fiksne solarne sustave.

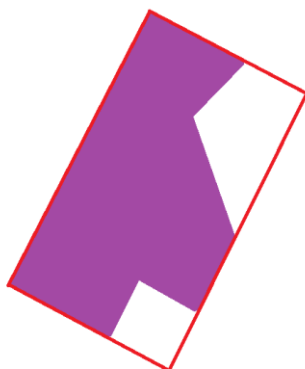
Na sjevernoj hemisferi, općenito je pravilo da solarni paneli trebaju biti okrenuti na jug (a na južnoj hemisferi prema sjeveru). Time, paneli će primati sunčevu energiju tijekom cijelog



dana. Ovisno o tome kako se solarna energija koristi, bilo korisno da paneli imaju blagu zakrivljenost od čistog juga. Iako pri tome dobivaju sveukupno manje energije, energija dolazi kasnije u danu kada je korisnija i potrebnija. Zbog zakrivljenja prema jugozapadu više energije dolazi predvečer kada su ljudi doma i koriste više trošila (University of Calgary, 2015).

### 2.1.3. Korištenje alata "Oriented minimum bounding boxes" u QGIS-u

Minimalni orijentirani granični okvir (engl. *Oriented minimum bounding boxes* – OMBB) je alat QGIS-a. Popisuje sve zgrade (tj. oblike) te ih okružuje s minimalnim pravokutnikom pod kojim stane cijeli oblik zgrade (slika 2-7.)

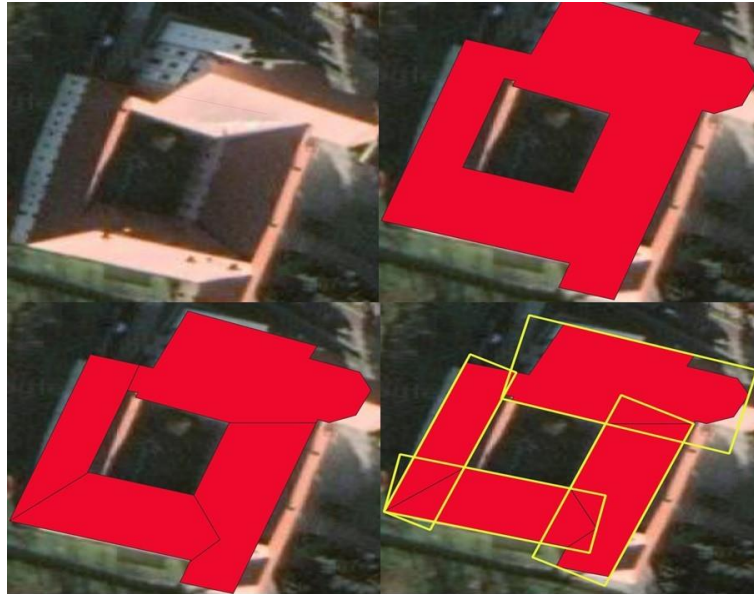


**Slika 2-7.** Primjer djelovanja alata OMBB

### 2.1.4. Iznimke kod korištenja OMBB-a

Kako bi OMBB funkcionirao prema zamisli, potrebno je da svi objekti imaju oblik približno sličan pravokutnom. Uz to, potrebno nam je da najdulja stranica novonastalog pravokutnika prati glavnu os krova kuće (ukoliko se radi o kući s dvostranim ili četverostranim krovom). Ukoliko je krov ravan, valjanost orijentacije nam i nije toliko bitna, jer se solarni paneli mogu okrenuti u bilo kojem smjeru.

Kako bi dobili podatke za veće i kompleksnije zgrade koje nemaju pravokutni oblik, a nemaju ni ravni krov (npr. samostani, škole, bolnice, stambene zgrade s klaustarem) potrebno ih je razdvojiti na manje cjeline tako da svaki odvojeni dio odgovara pripadajućoj orijentaciji krova (slika 2-8.).



**Slika 2-8.** Primjer OMBB na objektu s klaustarem

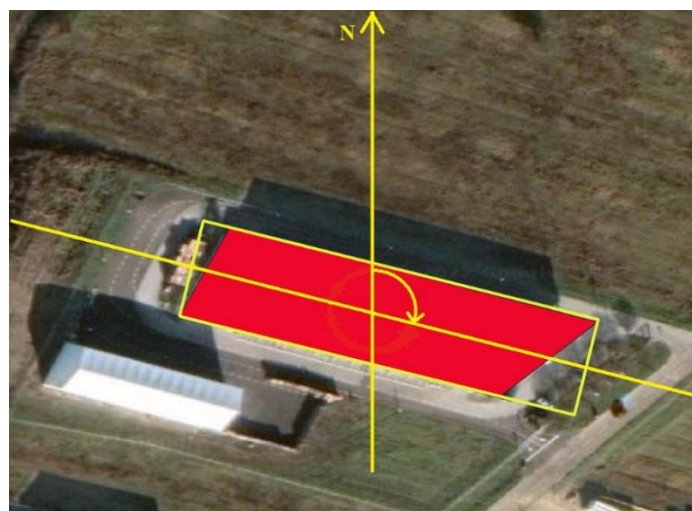
Još jedna bitna promjena koju moramo napraviti su zgrade nizu koje su fizički spojene te imaju zajedničko krovšte, ali su im objekti odvojeni te daju pogrešnu predodžbu kako im krovšte izgleda. Na primjeru slike 2-9. vidi se kako je kompleks zgrada podijeljen na manje dijelove, od kojih je svaki u OSM upisan kao jedna cjelina. Međutim oblik objekta upisanog u OSM ne odgovara orijentaciji glavne grede zgrade koja se kreće okomito na početnu orijentaciju. Kod takvih objekata potrebno je spajanje u jednu cjelinu.



**Slika 2-9.** Primjer OMBB-a na primjeru kompleksa zgrade

#### 2.1.5. Rezultati OMBB-a

Rezultat korištenja alata OMBB prikazan je na slikama 2-8. i 2-9. Uz granične okvire za svaki objekt dobivamo i cijeli niz korisnih podataka (npr. površine, širine, visine). Od dobivenih podataka nama je najkorisniji podatak od orijentaciji dobivenog graničnog okvira, odnosno kut od pravca sjevera do najduže osi graničnog okvira (slika 2-10.).



**Slika 2-10.** Princip izračunavanja kuta dobivena alatom OMBB

### 2.1.6. Dobivanje geografske širine i dužine

Različiti dijelove Zemljine površine dobivaju različite količine sunčeve energije. Sunčeve zrake najpravilnije padaju na Zemljinu površinu na ekvatoru. Na polovima sunčeve zrake padaju na površinu pod kutom. Što direktnije padaju zrake sunca na površinu, to više energije ta površina dobiva.

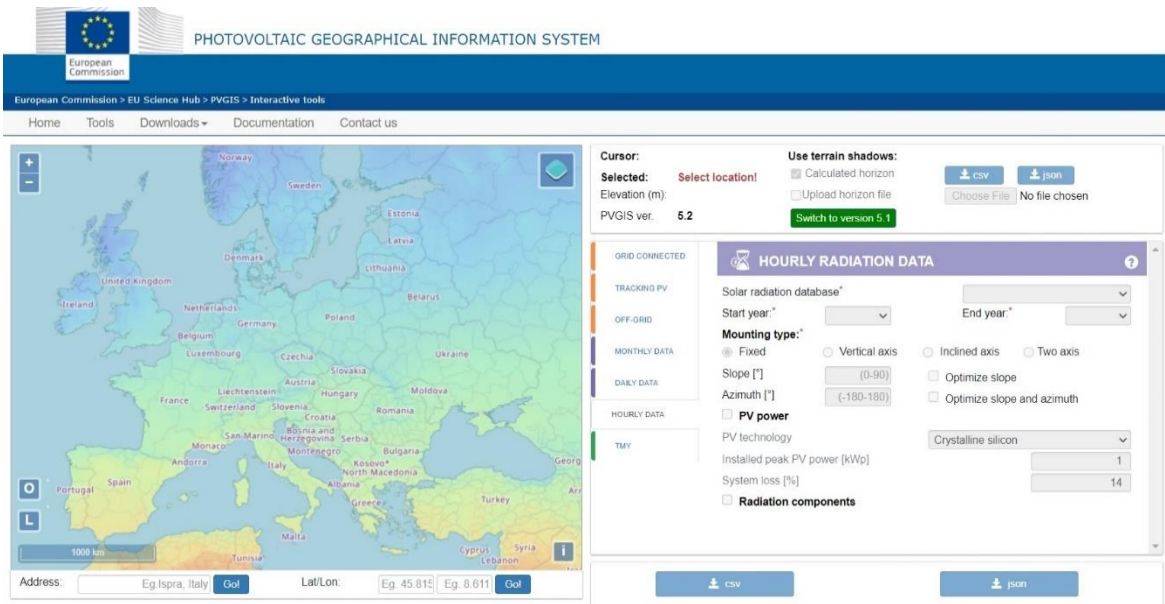
Kako bi odredili koordinate za svaki objekt, potrebno je aktivirati alat QGIS-a koji daje popis centroida s pripadajućim objektima (slika 2-11.). Centroidi su geometrijska središta dvodimenzionalnih objekata. Prednost dobivanja centroida je dobivanje točkastog sloja. Kako bi dobili geografsku širinu i duljinu potrebno ih je dodati u tablicu karakteristika kao geometrijske alate.



Slika 2-11. Dobivanje koordinata na QGIS-u

### 2.2. PVGIS alat za izračunavanje proizvodnje solarne energije.

PVGIS pruža informacije o solarnom zračenju i učinku fotonaponskih sustava za svaku lokaciju u Europi i Africi, kao i na širem području Azije i Amerike. PVGIS koristi kvalitetne globalne visoko rezolucijske podatke dobivene sa satelitskih slika. Isto tako, uzima u obzir prostorne temperature i brzine vjetra kao klimatske faktore koji mogu utjecati na performanse panela.



**Slika 2-12.** Početno sučelje PVGIS alata

### 2.2.1. Baza podataka solarne radijacije

Kako je i navedeno, podaci za izračun solarnog zračenja koji se koriste u PVGIS-u većinom se dobivaju iz satelitskih podataka. Na taj način, imamo podatke za svaku lokaciju na širokom geografskom području sa satnom rezolucijom. PVGIS nudi 4 različite baze podataka sa satnim vrijednostima. Trenutno nudi 3 baze podataka iz satelitskih podataka:

- PVGIS-SARAH – To je baza podataka napravljena od Postrojenja za primjenu satelitu u svrhu meteoroloških nadgledanja (engl. *Satellite Application Facility on Climate Monitoring – CM SAF*). Područja djelovanja su Europa, Afrika, većina Azije i dijelovi Južne Amerike;
- PVGIS-SARAH2 – Baza podataka također napravljena od strane CM SAF-a, napravljena da bi zamijenila SARAH1;
- PVGIS-NSRDB – Baza podataka za područje Sjedinjenih Američkih Država (SAD-a).

Uz spomenute baze podataka postoji i reanalizirana baza podataka koja daje kompletan prikaz prošlih vremenskih uvjeta na čemu se donosi zaključke za buduće vremenske prilike:

- PVGIS-ERA5 – Generalno gledano nesigurnije su nego satelitski prikaz, a koriste se samo kada nemamo satelitski prikaz.

Jedina mana je što točnost izračuna prema geografskim podacima ograničenom na tri decimale, što nam daje točnost od 110 m za svaki izračun. Ovaj podatak može predstavljati problem kod urbanih sredina gdje se veliki broj zgrada i kuća nalazi na malom području.

### 2.2.2. Odabir PV tehnologije

Nakon toga, potreban je unos postojećih solarnih panela ili panela kakve namjeravamo instalirati. Trenutno PVGIS može simulirati uvjete gubitka zbog temperature i efekta zračenja za sljedeća 3 tipa solarnih ćelija:

- Kristalne silicijske ćelije;
- Tankoslojne ćelije od CIS ili CIGS-a;
- Tankoslojne ćelije napravljene od kadmijevog telurida.

Normalni solarni paneli su bazirani na kristalnim silicijskim ćelijama (monokristalnim ili polikristalnim) te će se iste koristiti u proračunima u radu. Razlog tome je što silicijske ćelije imaju vijek trajanja i do 25 godina bez da kod njih dođe do propadanja. Daje učinkovitost pretvorbe sunčeve energije u električnu do maksimalno 22% (Danyalenko, 2018).

Moguće je birati između kristalnih silicijskih ćelija, tankoslojnih modula napravljenih od CIS-a ili CIGS-a te od tankoslojnih modula napravljenih od kadmijevog telurida (CdTe). CIS i CIGS ćelije nisu bazirane na siliciju. One koriste 3 ili 4 elementa s određenim udjelima. Razlika između ovih ćelija i ćelija baziranih na siliciju je to što su CIS i CIGS više osjetljive na svjetlost te će stoga ćelije od 100 W proizvesti 10-15% više energije u godini (Energig, 2017).

### 2.2.3. Maksimalna instalirana snaga

Također, potrebno je navesti instalirani kapacitet u kW. Za potrebe proračuna za svaki pojedini objekt imati će instaliranu snagu od 1 kW solarne snage. U pravilu vrijedi da na svaki metar kvadratni dolazi konstantnih 1000 W solarnog zračenja u ravnini sunčevih zraka na temperaturi od 25 °C. Dobivena konačna snaga na izlazu ovisi o vrsti solarnih panela odnosno o njihovoj učinkovitosti. U slučaju da ne znamo kolika nam je maksimalna snaga modula, a znamo kolika je površina koju zauzimaju moduli (m<sup>2</sup>) i njihova učinkovitost pretvorbe energije, možemo ju izračunati prema formuli:

$$\text{Snaga (kWp)} = 1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} * \text{površina} * \text{učinkovitost}/100 \quad (2-1)$$

#### 2.2.4. Gubici u sustavu

Pretpostavljeni gubici u sustavu su svi gubici u sustavu, koji uzrokuju da energija predana u električnu mrežu bude manja od energije koja je proizvedena fotonaponskim modulima. Nekoliko je uzroka ovih gubitaka, kao npr. gubici u kablovima, pretvaračima snage, prljavštini (ponekad i snijeg) na panelima itd. Tijekom godina, moduli imaju tendenciju da gube postotak svoje maksimalne snage, tako da će prosječni godišnji dobitak tijekom daljnjih godina rada biti za par postotaka manji nego onaj u prvoj godini. Osnovni iznos ovih gubitaka je 14% te će proračuni za sve lokacije u radu imati ovu vrijednost. Inače, ako postoje saznanja da će ova vrijednost biti drugačija (ukoliko sustav koristi jako učinkovite pretvarače snage) moguće je smanjiti ovu vrijednost. Također, moguće je i povećati iznos gubitaka ako dolazi do stvaranja sjena s obližnjih objekata (zgrade, drveća...).

#### 2.2.5. Položaj ugradnje

U radu pretpostavljamo da su solarni paneli u fiksnom položaju ugradnje. Za fiksne sustave, način na koji su paneli ugrađeni imati će utjecaj na temperaturu panela, što će kao posljedica utjecati na učinkovitost panela. Eksperimenti su pokazali da ako protok zraka iza panela bude ograničen, paneli mogu postati znatno topliji i to do 15 °C na 1000 W/m<sup>2</sup> sunca. U PVGIS aplikaciji moguća su dva načina ugradnje:

- Samostojeći – Paneli su instalirani na postolje pri čemu zrak može slobodno cirkulirati iza modula;
- Integrirani/fiksni – moduli su u cijelosti ugrađeni u strukturu zida ili krova zgrade s vrlo malo ili bez prostora za cirkulaciju zraka iza modula.



**Slika 2-13.** Samostojeći moduli

Neki tipovi ugradnje nalaze se između dva prethodno spomenuta načina, npr. ako su paneli instalirani na krovu sa zakrivljenim crjepovima, koji omogućavaju protok zraka iza panela. U slučaju takvog primjer, rezultati će se nalaziti negdje između dva rezultata navedena gore.

#### 2.2.6. Nagib

Nagib fiksno postavljenih solarnih panela je kut između horizontalne ravnine i površine modula.  $0^\circ$  je za horizontalno postavljene module, a  $90^\circ$  je za vertikalno postavljene module. Za neke primjene, nagib će biti predodređen. Ukoliko panele ugrađujemo na krov kuće nagib nam je predodređen i ne može biti manji od nagiba krova. Budući da je nemoguće odrediti nagib svih krovišta na nekom prostoru, u radu je nagib fiksiran na  $30^\circ$ , što je neki prosjek nagiba krovova. Za ravne krovove ovo nije problem, jer na njima može montirati panele u cijelom rasponu od  $0^\circ - 90^\circ$ . PVGIS aplikacija također ima opciju da može odrediti optimalne iznose nagiba, ako se radi o fiksno postavljenim panelima tijekom.

#### 2.2.7. Azimut

Azimut ili orijentacijski kut je kut pod kojim su paneli postavljeni gledano od juga.  $-90^\circ$  označava smjer istoka,  $0^\circ$  je jug, a  $90^\circ$  je zapad. U nekim slučajevima, azimut će biti poznat, npr. kad ugrađujemo panele na postojeće krovište. Međutim, ukoliko postoji mogućnost da se odabere azimut i/ili nagib, PVGIS aplikacija može odrediti optimalne vrijednosti za oba podatka.

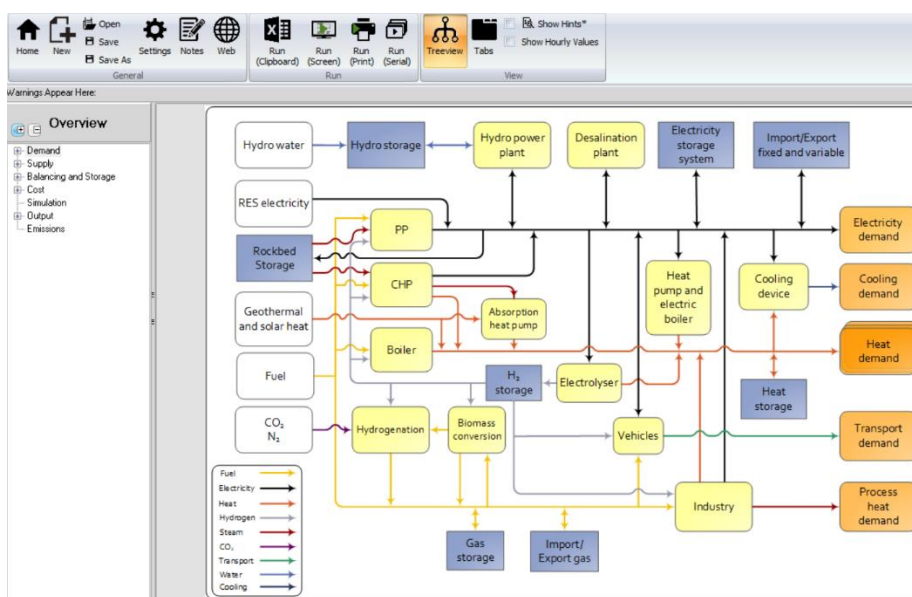


### 3. METODA PRORAČUNA ENERGETSKIH TOKOVA U PROGRAMU ENERGYPLAN

U diplomskom radu, raditi će se simulacije energetske tokova za Grad Samobor u EnergyPLAN-u. Podaci su kombinacija objavljenih podataka gradskog vijeća Grada Samobora i HEP-a.

#### 3.1. EnergyPLAN program

Program EnergyPLAN računalni je model za analizu energetske sustava. Glavna svrha programa je pomoći u kreiranju nacionalnih energetske strategija na principu tehničkih i ekonomskih analiza. Međutim, program je primjenjiv kako za nacionalne nivoe, tako i na one lokalne poput gradova i općina. Od svoje prve verzije, program omogućava analizu raznih simulacijskih strategija s naglaskom na međudnose između kombinirane proizvodnje toplinske i električne energije (CHP) i obnovljivih izvora energije (Lund i Thellufsen , 2022).



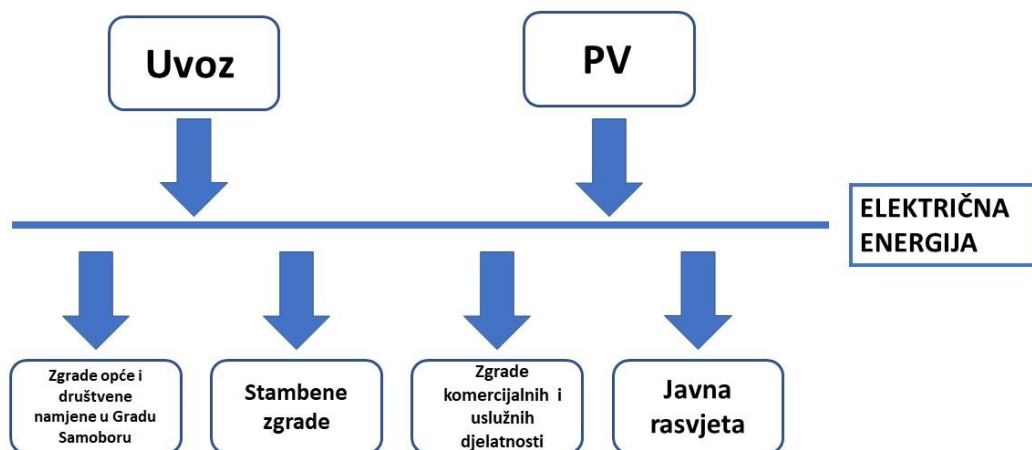
Slika 3-1. Izgled glavnog sučelja programa EnergyPLAN

Dizajn EnergyPLAN-a naglašava mogućnost promatranja cjelovitog energetske sustava u cjelini. Stoga je EnergyPLAN osmišljen kao alat u kojem se, na primjer, mogu koordinirati pametne električne mreže uz korištenje obnovljive energije u druge svrhe osim proizvodnje električne energije. U programu, obnovljiva energija pretvara se i u druge oblike osim električne energije, uključujući toplinu, vodik, sintetičke plinove i biogoriva (Lund i Thellufsen, 2022).

### 3.2. Ulazni podaci

U radu će kao ulazni podaci prvenstveno poslužiti potencijalna električna energija iz solarnih panela. Ukupna snaga panela dobiti će se iz programa QGIS i PVGIS. Simulacija će biti podijeljena na nekoliko scenarija dekarbonizacije. Svaki scenarij dekarbonizacije imat će određenu pokrivenost krovova solarnim panelima u određenom postotku u odnosu na potpunu potencijalnu pokrivenost.

Ulazni podaci su preuzeti iz Akcijskog plana energetske održivosti Grada Samobora. Iz spomenutog dokumenta preuzet je veći dio podataka o potrošnji električne energije, potrošnji toplinske energije, količini automobila u Gradu Samoboru te tipu goriva koje automobili koriste. Nadalje, sa stranica HEP-a preuzete su neke konkretnije brojke o CTS-ima Grada Samobora. Potrebno je i spomenuti kako su sa stranica Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja preuzeti podaci o postojećim proizvođačima OIE na području Samobora iz Registra OIEKPP (obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača). Međutim, iako količina ukupne snage proizvedene iz spomenutog izvora je vrlo mala uvrstiti će se u proračun.



**Slika 3-2.** Shema električnog sustava Grada Samobora.

Potražnja za električnom energijom podijeljena je u četiri sektora na području Grada Samobora:

- Zgrade opće i društvene namjene;

- Stambene zgrade;
- Zgrade komercijalnih i uslužnih djelatnosti;
- Javna rasvjeta.

Pod zgrade opće i društvene namjene svrstavaju se vrtići, osnovne i srednje škole na području Samobora, ustanove u zdravstvu i socijalnoj skrbi, kulturne ustanove, upravne, pravosudne i gradske službe te sportske ustanove Grada Samobora itd. Suma potražnje za električnom energijom je iz svih navedenih sektora zbrojena je te ulazi kao potražnja (*Demand*) u EnergyPLAN-u.

Electricity Demand and Fixed Import/Export			
Electricity demand*	<input type="text" value="0"/>	TWh/year	<input type="button" value="Change distribution"/> Hour_electricity.txt
Additional electricity demand	<input type="text" value="0"/>	TWh/year	<input type="button" value="Change distribution"/> const.txt
Electric heating (IF included)	- <input type="text" value="0"/>	TWh/year	Subtract electric heating using distribution from 'individual' window
Electric cooling (IF included)	- <input type="text" value="0"/>	TWh/year	Subtract electric cooling using distribution from 'cooling' window
Elec. for Biomass Conversion	0.00	TWh/year	(Transferred from Biomass Conversion TabSheet)
Elec. for Transportation	0.00	TWh/year	(Transferred from Transport TabSheet)
Sum (excluding electric heating and cooling)	20.00	TWh/year	
Electric heating (individual)	0.00	TWh/year	
Electricity for heat pumps (individual)	0.00	TWh/year	
Electric cooling	0.00	TWh/year	

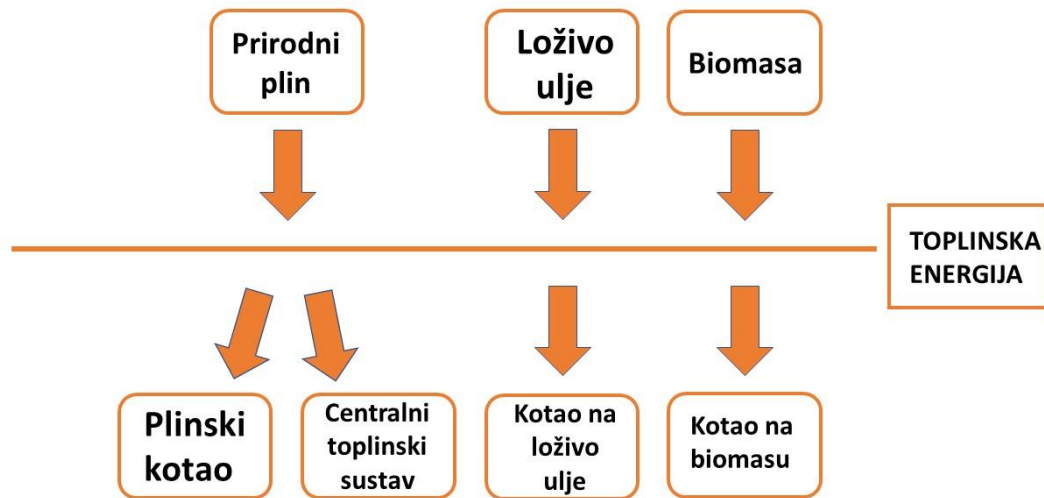
**Slika 3-3.** Potražnja za električnom energijom u EnergyPLAN-u

Većina električne energije dobiva se uvozom preko dalekovoda dok se mali dio električne energije dobiva iz OIE, točnije iz fotonaponskih elektrana.

Korisnici toplinske energije isti su kao i za električnu energiju. Međutim za toplinsku energiju postoje konkretniji podaci na što se energije koristi (slika 3-4.). Toplinska energija se dobiva iz:

- Plinskih bojler (engl. *Ngas boiler*);
- Bojler na loživo ulje (engl. *Oil boiler*);
- Centralnog toplinskog sustava tj. toplane (engl. *District heating*);
- Bojler na biomasu (engl. *Biomass boiler*).

Centralni toplinski sustav proizvodi toplinsku energiju iz prirodnog plina, a potrošnja energenata prirodnog plina, loživog ulja i drva zadovoljava se u cijelosti iz uvoza.



Slika 3-4. Shema toplinskog sustava Grada Samobora

Budući da se u toplani u Samoboru proizvodi samo toplinska energija, odnosno nema kombinirane proizvodnje električne i toplinske energije već samo toplinske svrstavamo ga u prvu grupu u EnergyPLAN-u (slika 3-5.).

Individual Heating:										
TWh/year	Fuel Input	Efficiency Thermal	Heat Demand	Efficiency Electric	Capacity Limit*	Estimated Electricity Production	Heat Storage* (Days of heat demand)	Solar Thermal Share*	Input Output	Resulting Fuel Consumption*
			Heat				Solar			
Distribution:			Hour_distr-heat.txt				Hour_solar1_prod.txt			
Coal boiler :	<input type="text" value="0"/>	0.7	0.00				<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0.00
Oil boiler :	<input type="text" value="0"/>	0.8	0.00				<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0.00
Ngas boiler :	<input type="text" value="0"/>	0.9	0.00				<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0.00
Biomass boiler :	<input type="text" value="0"/>	0.7	0.00				<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0.00
H2 micro CHP :		<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="text" value="1"/>	0.00	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0.00
Ngas micro CHP :		<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="text" value="1"/>	0.00	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0.00
Biomass micro CHP :		<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="text" value="1"/>	0.00	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0.00
Heat Pump :			<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="1"/>	0.00	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0.00
Electric heating :			<input type="text" value="0"/>		<input type="text" value="1"/>	0.00	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0.00
Total Individual:			0.00			0.00				0.00

District Heating:					
	Group 1:	Group 2:	Group 3:	Total:	Distribution:
Production:	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="10"/>	20.00	<input type="button" value="Change"/> Hour_distr-heat.txt
Network Losses:	<input type="text" value="0.2"/>	<input type="text" value="0.15"/>	<input type="text" value="0.1"/>		
Heat Demand:	0.00	8.50	9.00	17.50	

Slika 3-5. Potražnja za toplinskom energijom u EnergyPLAN-u

U sektoru prometa imamo potrošnju vozila na benzin, dizel i ukapljeni naftni plin (UNP). Prema namjeni podijeljeni su na vozni park u vlasništvu grada, javni prijevoz koji čine autobusi te osobna i komercijalna vozila. Sva potreba za gorivima dobiva se iz uvoza.

TWh/year	Fossil	Biofuel	HTL, Pyrolysis and Waste*	Electrofuel	Total
JP (Jet Fuel)	0	0	0.00	0	0.00
Diesel / DME	0	0	0.00	0	0.00
Petrol / Methanol	0	0	0.00	0	0.00
Ngas* (Grid Gas)	0				0.00
LPG	0				0.00

Slika 3-6. Potražnja u sektoru prometa u EnergyPLAN-u

### 3.3. Izlazni podaci

Kod izlaznih podataka, od svih podataka su nam najbitniji podaci o emisiji CO<sub>2</sub> u atmosferu. Budući da je naglasak diplomskog rada na proizvodnji solarne energije iz fotonaponskih elektrana, bitan nam je i izvoz viška proizvedene električne energije. Sekundarni cilj nam je i smanjenje uvoza električne energije te utilizacija proizvodnje iz PV izvora.

Kod scenarija dekarbonizacije bitna je promjena strukture potrošnje primarne energije, odnosno, smanjenje potrošnje i izgaranja fosilnih goriva. Također, dekarbonizirani scenariji moraju biti efikasniji od baznog scenarija.

## 4. ANALIZA SLUČAJA ZA GRAD SAMOBOR

U ovom radu je biti će napravljeno nekoliko scenarija proizvodnje energije iz fotonaponskih sustava koji će biti decentralizirani. Proizvedena električna energija biti će iskorištena za dekarbonizaciju toplinskog i elektrifikaciju prometnog sustava. Višak proizvodnje električne energije iz PV izvora predviđen je za izvoz u električnu mrežu.

### 4.1. Postavke slučaja za Grad Samobor

Prema Akcijskom planu za energetske održiv razvoj Grada Samobora bazni scenarij je podijeljen u tri dijela: Sektor zgradarstva, sektor prometa i javna rasvjeta. Sektor zgradarstva bilježi potražnju u elektroenergetskoj i toplinskoj energiji. U bazni scenarij uvrštena je samo potrošnja u administrativnoj cjelini grada predviđenoj prema Generalnom urbanističkom planu (GUP) Grada Samobora. Stoga, u analizu ne ulaze okolna naselja Grada Samobora, kojih ima 77, već samo naselje Samobor. Također, važno je naglasiti da je sva potrošnja energije izražena u bruto iznosima. Točnije, navedene brojke potrošnje energije predstavljaju definirane su utrošenim gorivom za grijanje, hlađenje i proizvodnju tople vode u centralnom toplinskom sustavu (CTS).

#### 4.1.1. Analiza energetske potrošnje u sektoru zgradarstva

Kao što je i navedeno, sektor zgradarstva dijeli su u tri podsektora:

- Zgrade opće i društvene namjene u Gradu Samoboru;
- Stambene zgrade;
- Zgrade komercijalnih i uslužnih djelatnosti. (Grad Samobor, 2012).

##### 4.1.1.1. Stambene i javne zgrade u vlasništvu Grada

Podsektor zgrada opće i društvene namjene u Gradu Samoboru (obuhvat GUP-a) podijeljen je u sljedeće kategorije:

- Odgojne i obrazovne ustanove;
- Zdravstvene ustanove i ustanove socijalne skrbi;
- Kulturne ustanove;
- Upravne, pravosudne i gradske ustanove;
- Sportski objekti;
- Zgrade ostale namjene (zgrada vatrogasaca, zgrada policije i dr.).

Podjela na spomenute kategorije napravljena je kako bi se dobio što bolji i točniji uvid u stvarnu potrošnju toplinske i električne energije u podsektoru zgrada javne i društvene namjene u Gradu Samoboru (Grad Samobor, 2012). Potrošnja pojedinih energenata na objektima opće i društvene namjene u Gradu Samoboru prikazane su u tablici 4.1.

**Tablica 4-1.** Potrošnja pojedinih energenata u objektima opće i društvene (Grad Samobor, 2012)

<b>Energent</b>	<b>Potrošnja energije (kWh)</b>
<b>Električna energija</b>	<b>1.559.970,80</b>
<b>Prirodni plin</b>	<b>5.054.689,53</b>
<b>CTS</b>	<b>678.748,38</b>
<b>Loživo ulje</b>	<b>230.327,58</b>
<b>UKUPNO:</b>	<b>7.523.736,29</b>

#### *4.1.1.2. Stambeni sektor*

Na osnovu podataka dobivenih od tvrtke EnergoMetan utvrđena je potrošnja prirodnog plina po godini u Gradu Samoboru (obuhvat GUP-a) u iznosu od 10.935.159,00 nm<sup>3</sup> godišnje. Navedeni podatak odnosi se na kućanstva i komunalno uslužne djelatnosti te ne uključuje industrijske potrošače. Od te količine na sektor kućanstva otpada 65,67% odnosno 7.181.068 nm<sup>3</sup> prirodnog plina. Ostatak, 34,33% odnosno 3.754.091 nm<sup>3</sup> odnosi se na korisnike prirodnog plina iz kategorije uslužnih i komercijalnih djelatnosti.

Na osnovu podataka dobivenih od strane HEP - Toplinarstva utvrđena je potrošnja toplinske energije iz centraliziranog toplinskog sustava (CTS) po godini iznosi 14.079.620,90 kWh.

Na osnovu postojećeg iskustva, odnosno na osnovu dostupnih podataka određeno je da omjer između potrošnje loživog ulja i ogrjevnog drveta 60% naprema 40% u korist loživog ulja. Iz svega slijedi da je potrošnja loživog ulja u Gradu Samoboru jednaka 11.449.829,00 kWh godišnje. S druge strane, potrošnja ogrjevnog drveta iznosi 7.633.220,00 kWh.

Prema podacima dobivenih od HEP-ODS (pogon Samobor) godišnja potrošnja električne energije u kategoriji kućanstva iznosila je 21.365.245,00 kWh/god (Grad Samobor, 2012). Ukupna potrošnja energije u Gradu Samoboru za kategoriju kućanstva prikazana je u tablici 4.2.

**Tablica 4-2.** Struktura potrošnje energije u stambenom sektoru (Grad Samobor, 2012)

<b>Energent</b>	<b>Potrošnja energije (kWh)</b>
<b>Električna energija</b>	<b>21.365.245,00</b>
<b>Prirodni plin</b>	<b>66.496.689,68</b>
<b>CTS</b>	<b>14.079.620,90</b>
<b>Loživo ulje</b>	<b>11.449.829,00</b>
<b>Ogrijevno drvo</b>	<b>7.633.220,00</b>
<b>UKUPNO:</b>	<b>121.024.604,58</b>

#### *4.1.1.3. Zgrade komercijalnih i uslužnih djelatnosti na području Grada*

Na osnovu podataka dobivenih od tvrtke EnergoMetan utvrđena je godišnja potrošnja plina u sektoru komercijalnih i uslužnih djelatnosti u iznosu od 3.754.091 nm<sup>3</sup> godišnje. Što je cca 34,33% ukupno isporučenog prirodnog plina od strane tvrtke EnergoMetan.

Na osnovu podataka dobivenih od strane HEP-Toplinarstvo utvrđena je godišnja potrošnja toplinske energije iz CTS-a u sektoru komercijalnih i uslužnih djelatnosti u iznosu od 389.982,80 kWh/god.

Zbog nedostatka odgovarajućih podataka pretpostavljeno je da se ogrjevno drvo ne koristi za zadovoljenje energetske potrebe u sektoru komercijalnih i uslužnih djelatnosti. S druge strane, loživo ulje se definitivno koristi, ali podaci o stvarnoj potrošnji nisu poznati i dostupni. Stoga je na osnovu iskustva procijenjeno da je površina komercijalnih i uslužnih djelatnosti koja je energetske opskrbljena loživim uljem približno jednaka 6% površine komercijalnih i uslužnih djelatnosti opskrbljenih prirodnim plinom te iznosi 8.147,00 m<sup>2</sup>. Ako se pretpostavi da je specifična potrošnja energije korisnika loživog ulja jednaka specifičnoj potrošnji korisnika prirodnog plina, tada ukupna potrošnja loživog ulja u sektoru komercijalnih i uslužnih djelatnosti jednaka 2.225.262,00 kWh/god. odnosno 221.794,31 l loživog ulja godišnje.

Potrošnja električne energije u sektoru komercijalnih i uslužnih djelatnosti iznosi 12.706.470,45 kWh (Grad Samobor, 2012). Ukupna godišnja potrošnja energije u Gradu Samoboru za kategoriju komercijalnih i uslužnih djelatnosti prikazana je u tablici 4.3.

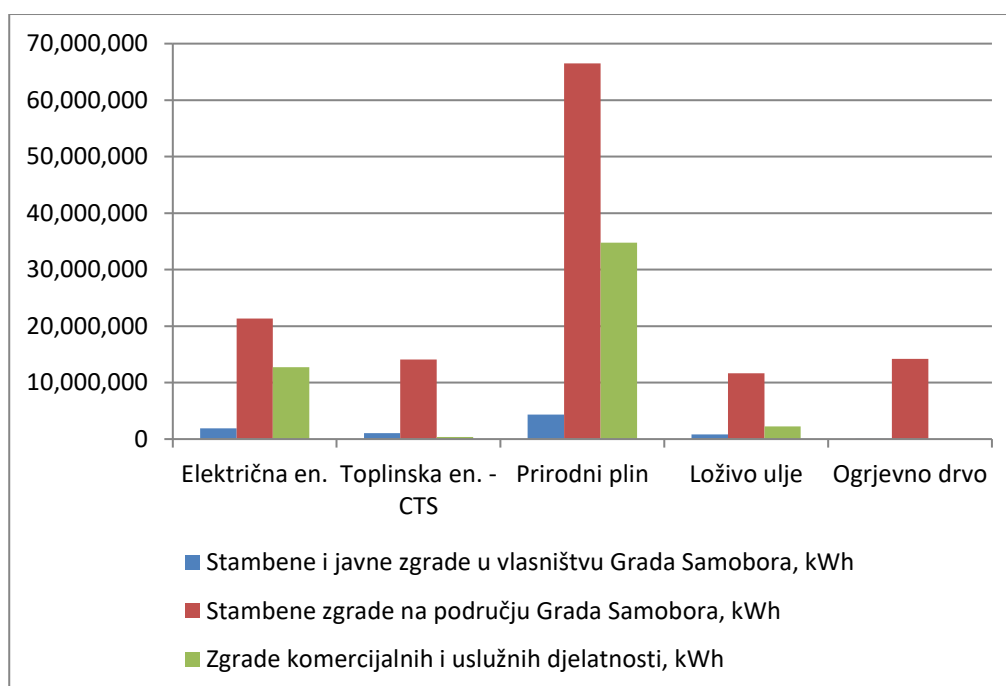


**Tablica 4-3.** Struktura potrošnje energije u kategoriji komercijalnih i uslužnih djelatnosti (Grad Samobor, 2012)

Energent	Potrošnja energije (kWh)
Električna energije	12.706.470,45
Prirodni plin	34.762.882,66
CTS	389.982,80
Loživo ulje	2.225.262,00
Ogrjevno drvo	-
<b>UKUPNO:</b>	<b>50.084.597,91</b>

#### 4.1.1.4. Ukupna potrošnja energenata u sektoru zgradarstva

U sektoru zgradarstva najviše godišnje potrošnje energije odnosi se na prirodni plin te iznosi 106.314.261,87 kWh. Nakon prirodnog plina najveća je potrošnja električne energije koja iznosi 35.631.686,25 kWh. Od ostalih energenata veliku potrošnju ima CTS s 15.148.352,08 kWh, loživo ulje s 13.905.418,58 kWh te drvo s 7.633.220,00 kWh. Sve prethodno spomenute potrošnje daju kumulativnu potrošnju energije od 178.632.938,78 kWh. Potrošnja pojedinih oblika energije po podsektorima prikazana je na slici 4-1.



**Slika 4-1.** Potrošnja pojedinih oblika energije po podsektorima (Grad Samobor, 2012)

#### 4.1.2. Analiza energetske potrošnje u sektoru prometa

Za potrebe analize energetske potrošnje sektor prometa Grada Samobora podijeljen je na sljedeće podsektore (Grad Samobor, 2012):

- Vozni park u vlasništvu Grada;
- Javni prijevoz u Gradu Samoboru;
- Osobna i komercijalna vozila.

##### 4.1.2.1. Vozila u vlasništvu i korištenju Grada Samobora

Podsektor vozila u vlasništvu i korištenju Grada obuhvaćaju vozila u vlasništvu i korištenju Grada Samobora, gradskih tvrtki i gradskih ustanova. Vozni park u vlasništvu Grada se sastoji od 37 vozila, 25 osobnih i 12 kombiniranih, od kojih 26 vozila kao gorivo koristi benzin, a 11 dizel (Grad Samobor, 2012). Ukupna potrošnja navedenih vozila prikazana je u tablici 4.4.

**Tablica 4-4.** Potrošnja goriva kod vozila u vlasništvu Grada Samobora (Grad Samobor, 2012)

VOZILA U VLASNIŠTVU GRADA					
Osobna vozila	Teretna i radna vozila	Potrošnja motornog benzina (l)	Potrošnja dizelskog goriva (l)	Potrošnja motornog benzina (kWh)	Potrošnja dizelskog goriva (kWh)
25	12	42.378	36.900	392.361,98	364.450,01

##### 4.1.2.2. Javni prijevoz u Gradu Samoboru

Javni prijevoz u Gradu Samoboru odvija se putem autobusnog prometa. Na području Grada Samobora javni prijevoz temeljem koncesionarskog ugovora obavljaju dva poduzeća, Samoborček d.o.o i Autoturist Samobor d.o.o. Linije javnog gradskog prijevoza povezuju naselja na cijelom području Grada Samobora, kako međusobno tako i s Gradom Zagrebom. Podaci o javnom prijevozu Grada Samobora prikazani su u tablici 4.5., a iskazani su za oba prijevoznika – koncesionara zajedno.

**Tablica 4-5.** Potrošnja u kategoriji javnog prijevoza Grada Samobora (Grad Samobor, 2012)

<b>JAVNI PRIJEVOZ NA PODRUČJU GRADA SAMOBORA</b>				
Broj vozila (radnim danom)	Broj dizelskih vozila	Godišnja potrošnja dizelskog goriva (l)	Godišnje prijeđeni kilometri (km)	Potrošnja dizelskog goriva (kWh)
40	40	1.176.000	3.355.200	3.858.480,00

#### *4.1.2.3. Osobna i komercijalna vozila*

Prema akcijskom planu energetske održivosti razvoja Grada Samobora, u Samoboru je registrirano 19.269 vozila. U ukupnom broju vozila podsektora osobnih i komercijalnih vozila Grada Samobora najzastupljenija su osobna vozila koji čine 76,32% ukupnog broja vozila. Od ostalih vrsta vozila podsektora značajno su zastupljena teretna i radna vozila (14,87%), mopedi (4,81%), motocikli (3,36%) dok preostali udio otpada na kombinirana vozila te autobuse. Na području Grada Samobora pretpostavljena je struktura voznog (prema vrsti goriva, obujmu motora i starosti vozila) identična prosječnoj strukturi na području cijele Republike Hrvatske (iz baze podataka MUP-a RH) (Grad Samobor, 2012). Na tablicama 4.6, 4.7 i 4.8 prikazane su strukture voznog parka na području Samobora.

**Tablica 4-6.** Struktura gradskog parka na području Samobora – teretna vozila (Grad Samobor, 2012)

SEKTOR	PODSEKTOR	TEHNOLOGIJA	UDIO	BROJ VOZILA
Laka teretna vozila	Benzin <3,5t	Conventional	4,31%	5
		Euro I	1,72%	2
		Euro II	0,00%	0
		Euro III	0,00%	0
		Euro IV	0,00%	0
	Dizel <3,5 t	Conventional	29,31%	34
		Euro I	10,34%	12
		Euro II	18,97%	22
		Euro III	20,69%	24
		Euro IV	14,66%	17
Teška teretna vozila	Benzin >3,5 t	Conventional	0,25%	7
	Dizel 3,5 - 7,5 t	Conventional	0,07%	2
		Euro I	0,00%	0
		Euro III	0,00%	0
	Dizel 7,5 - 16 t	Conventional	4,77%	136
		Euro I	1,44%	41
		Euro II	4,63%	132
		Euro III	2,77%	79
		Euro IV	2,17%	62
	Dizel 16 - 32 t	Conventional	4,70%	134
		Euro I	1,44%	41
		Euro II	4,63%	132
		Euro III	2,70%	77
		Euro IV	2,17%	62
	Dizel >32t	Conventional	18,61%	531
		Euro I	7,29%	208
		Euro II	20,93%	597
		Euro III	13,99%	399
			Euro IV	7,47%
<b>UKUPNO BENZIN</b>			<b>0,47%</b>	<b>14</b>
<b>UKUPNO DIZEL</b>			<b>99,53%</b>	<b>2.955</b>
<b>UKUPNO</b>				<b>2.969</b>

**Tablica 4-7.** Struktura voznog parka na području Samobora – osobna i komercijalna vozila  
(Grad Samobor, 2012)

SEKTOR	PODSEKTOR	TEHNOLOGIJA	UDIO	BROJ VOZILA
Osobna vozila	Benzin <1,4 l	PRE ECE	0,17%	25
		ECE 15/00-01	0,67%	99
		ECE 15/02	0,85%	125
		ECE 15/03	2,23%	326
		ECE 15/04	9,73%	1.424
		Euro I	4,26%	624
		Euro II	11,46%	1.679
		Euro III	9,43%	1.380
		Euro IV	6,03%	883
	Benzin 1,4 - 2,0 l	PRE ECE	0,06%	9
		ECE 15/00-01	0,14%	20
		ECE 15/02	0,21%	31
		ECE 15/03	0,60%	88
		ECE 15/04	5,25%	769
		Euro I	3,93%	576
		Euro II	4,53%	664
		Euro III	2,43%	356
		Euro IV	1,93%	283
	Benzin >2,0 l	PRE ECE	0,01%	2
		ECE 15/00-01	0,02%	3
		ECE 15/02	0,04%	6
		ECE 15/03	0,07%	10
		ECE 15/04	0,40%	58
		Euro I	0,29%	42
		Euro II	0,31%	46
		Euro III	0,31%	46
		Euro IV	0,19%	29
	Dizel <2,0 l	Conventional	7,57%	1.109
		Euro I	4,03%	591
		Euro II	4,68%	686
		Euro III	7,06%	1.034
		Euro IV	5,26%	770
	Dizel >2,0 l	Conventional	0,98%	143
		Euro I	0,56%	83
		Euro II	0,79%	115
		Euro III	1,03%	151
		Euro IV	0,89%	130
	LPG	Conventional	0,29%	42
		Euro I	0,31%	45
		Euro II	0,42%	62
		Euro III	0,25%	36
Euro IV		0,21%	31	
2-taktni	Conventional	0,10%	15	
	UKUPNO BENZIN		65,67%	9.618
	UKUPNO DIZEL		32,86%	4.812
	UKUPNO LPG		1,47%	216
<b>UKUPNO</b>			<b>100,00%</b>	<b>14.646</b>

**Tablica 4-8.** Struktura voznog parka na području Samobora – Motocikli i mopedi (Grad Samobor, 2012)

SEKTOR	PODSEKTOR	TEHNOLOGIJA	UDIO	BROJ VOZILA
Mopedi	<50 cm <sup>3</sup>	Conventional	26,46%	244
	<50 cm <sup>3</sup>	97/24/EC St. I	8,87%	82
	<50 cm <sup>3</sup>	97/24/EC St. II	64,67%	597
Motocikli	2-taktni >50 cm <sup>3</sup>	Conventional	14,60%	94
	2-taktni >50 cm <sup>3</sup>	97/24/EC	5,92%	38
	4-taktni <250 cm <sup>3</sup>	Conventional	3,95%	26
	4-taktni <250 cm <sup>3</sup>	97/24/EC	37,59%	242
	4-taktni 250 - 750 cm <sup>3</sup>	Conventional	6,78%	44
	4-taktni 250 - 750 cm <sup>3</sup>	97/24/EC	19,89%	128
	4-taktni >750 cm <sup>3</sup>	Conventional	2,50%	16
	4-taktni >750 cm <sup>3</sup>	97/24/EC	8,77%	57
<b>UKUPNO</b>				<b>1.568</b>

Iz navedenih tabličnih podataka možemo dobiti podatke o potrošnji energije pojedinih energenata i pojedinih vrsta vozila (tablica 4.9.)

**Tablica 4-9.** Ukupna potrošnja energije iz goriva u kategoriji osobnih i komercijalnih vozila (Grad Samobor, 2012)

Osobna i komercijalna vozila				
Potrošnja goriva, kWh	Benzin	Dizel	UNP	Ukupno, kWh
Osobna vozila	39,881,840.24	18,212,300.68	860,359.02	58,954,497.16
Teretna i radna vozila	902,517.39	52,917,809.00	0.00	53,820,326.39
Kombinirana vozila	71,977.84	845,945.12	0.00	917,920.18
Mopedi	450,289.25	0.00	0.00	450,289.25
Motocikli	878,356.26	0.00	0.00	878,356.26
Autobusi	96,288.97	0.00	0.00	96,288.97
<b>UKUPNO</b>	<b>42,281,267.16</b>	<b>71,976,052.03</b>	<b>860,359.02</b>	<b>115,117,678.21</b>

Od ukupne potrošnje energije podsektora osobna i komercijalna vozila, 51,21% potrošnje otpada na osobna vozila, 46,75% teretna i radna vozila dok preostali udio otpada na motocikle i mopede, kombinirana vozila te autobuse u vlasništvu privatnih i pravnih osoba (potrošnja autobusa javnog prijevoza iskazana je zasebno u kategoriji javni prijevoz) (Grad Samobor, 2012).

U podsektoru osobnih i komercijalnih vozila dizel je najzastupljenije gorivo čiji udio u ukupnoj potrošnji goriva ovog podsektora iznosi 62,52%. Udio potrošnje benzinskih goriva iznosi 36,73%, a UNP-a 0,75% ukupne potrošnje (Grad Samobor, 2012).

#### 4.1.2.4. Ukupna potrošnja energenata u sektoru prometa

Provedena analiza potrošnje goriva sektora prometa Grada Samobora pokazuje da daleko najveći udio potrošnje otpada na podsektor osobnih i komercijalnih vozila.

**Tablica 4-10.** Struktura ukupne potrošnje goriva po podsektorima prometa i vrsti goriva (Grad Samobor, 2012)

Potrošnja goriva, kWh	Benzin	Dizel	LPG
<u>Vozni park u vlasništvu Grada</u>	392,361.98	364,450.01	
<u>Javni prijevoz u Gradu Samoboru</u>		3,858,480.00	
<u>Osobna i komercijalna vozila</u>	42,281,267.16	71,976,052.03	860,359.02
<b>UKUPNO:</b>	<b>42,673,629.14</b>	<b>76,198,982.04</b>	<b>860,359.02</b>

Ukupna potrošnja energije sektora prometa Grada Samobora iznosi 119.732.970,20 kWh, od čega najveći dio otpada na podsektor osobnih i komercijalnih vozila, a manji dio na podsektore javnog prijevoza i vozila u vlasništvu Grada. Iz provedene analize vidljivo je da je podsektor osobnih i komercijalnih daleko najznačajniji, kako s aspekta energetske potrošnje tako i s aspekta potencijala energetske uštede (Grad Samobor, 2012).

#### 4.1.3. Analiza energetske potrošnje u sektoru javne rasvjete

Mrežu javne rasvjete Grada Samobora čine uređaji za napajanje, kabeli i vodovi, stupovi, nosači svjetiljki, svjetiljke, izvori svjetlosti (žarulje) te uređaji za upravljanje i regulaciju, a vezana je na distribucijsku mrežu HEP-a. Električna javna rasvjeta Grada Samobora obuhvaća 6 460 izvora svjetlosti napajanih iz 206 trafostanica. Broj rasvjetnih tijela u sustavu javne rasvjete Grada Samobora se iz godine u godinu povećava, stoga i pripadajuća potrošnja električne energije ima trend porasta.

Za napajanje sustava električne javne rasvjete Grada u godini potrošeno je 4.705.800 kWh električne energije.

#### 4.1.4. Ukupna potrošnja električne energije

Uz potrošnju električne energije u sektoru zgradarstva moramo pribrojiti i potrošnju električne energije potrebne za javnu rasvjetu. Ukupna potrošnja električne energije navedena je u tablici 4-11.

**Tablica 4-11.** Ukupna potrošnja električne energije za Grad Samobor

[kWh]	Električna energija
<b>ZGRADARSTVO</b>	
<u>Zgrade opće i društvene namjene u Gradu Samoboru</u>	1,559,970.80
<u>Stambene zgrade</u>	21,365,245.00
<u>Zgrade komercijalnih i uslužnih djelatnosti.</u>	12,706,470.45
<b>JAVNA RASVJETA</b>	
<u>Električne energije sektora javne rasvjete</u>	4,705,800.00
<b>UKUPNO:</b>	<b>40,337,486.25</b>

#### 4.1.5. Postojeća proizvodnja iz OIE u Gradu Samoboru

Kao što je spomenuto u prijašnjim poglavljima, na stranici Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja preuzeti su podaci iz Registra OIEKPP o proizvođačima OIE na području Samobora. U cijelosti su to uglavnom proizvođači električne energije iz fotonaponskih panela, a ukupna instalirana snaga iznosi 179 kW (tablica 4-12.).



**Tablica 4-12.** Trenutna instalirana snaga fotonaponskih elektrana u Gradu Samoboru (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2022)

Zdenka			0.01	
"FOTONAPONSKA ELEKTRANA "SE Tatjana 10kWp"	AMIR TADŽIĆ	Samobor	0.01	
Fotonaponski sustav Eting	Eting doo	Samobor	0.03	
SUNČANA ELEKTRANA JURJEVIĆ	QUADRIFOLIUM NEKRETNINE D.O.O.	Samobor	0.01	
FOTONAPONSKA ELEKTRANA VUGRINEC	MADAVERA J. D.O.O.	Samobor	0.0099	
Sunčana elektrana MISA 254	M.I.S.A. D.O.O.	Samobor	0.0098	
Sunčana elektrana Čačković prom 1	ČAČKOVIĆ PROM D.O.O.	Samobor	0.01	
Sunčana elektrana Čačković prom 2	ČAČKOVIĆ PROM D.O.O.	Samobor	0.01	
		Σ=	<b>0.179</b>	MW
			<b>179</b>	kW

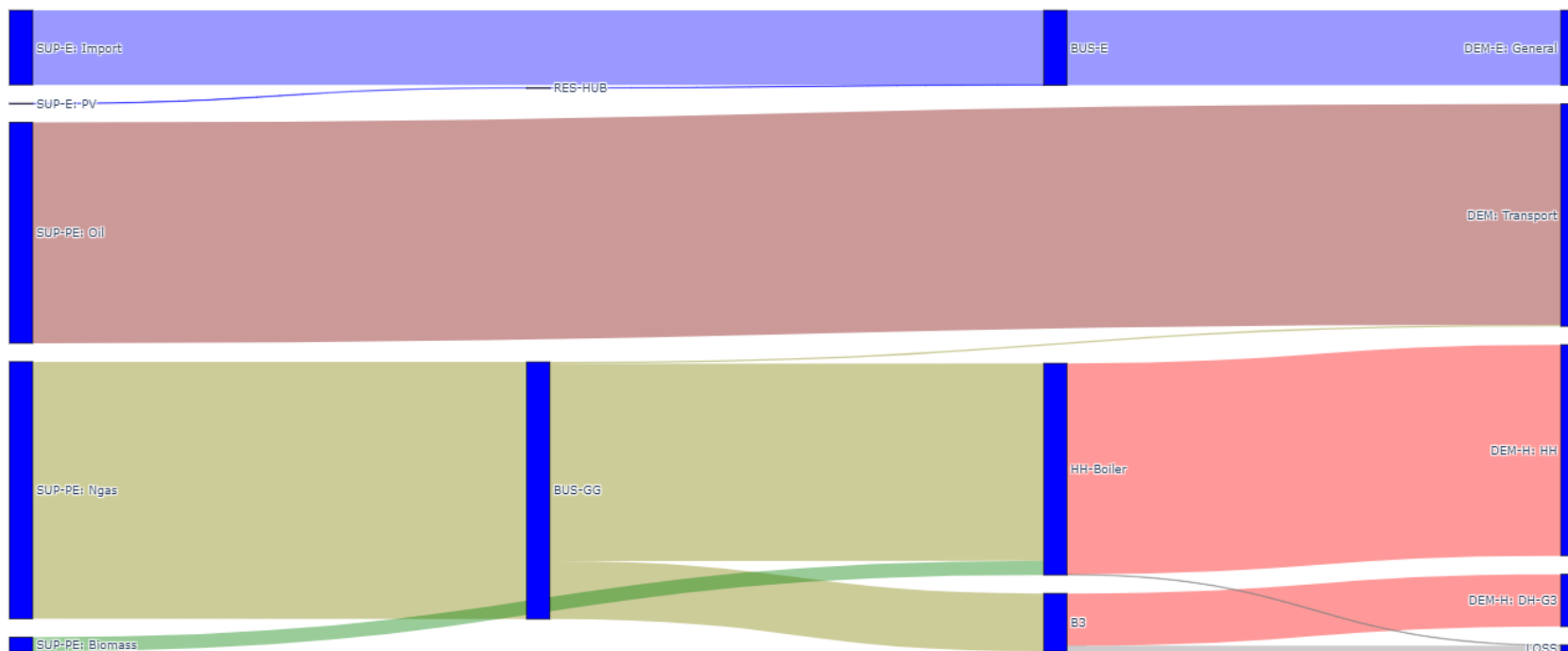
#### 4.1.6. Ukupni podaci za bazni scenarij Grada Samobora

Od svih navedenih podataka u donjoj tablici biti će navedeni podaci na koji će ulaziti u proračun i biti razmatrani u daljnjim scenarijima dekarbonizacije. U elektroenergetskom sektoru dobivena je potražnja za električnom energijom od 40.34 GWh. U toplinskom sektoru, potražnja za plinom u individualnom sektoru i centralnom toplinskom sustavu iznosi ukupno 137.54 GWh. Potražnja u bojlerima na loživo ulje iznosi 13.91 GWh, a za biomasom 7.63 GWh. U sektoru prometa, potražnja za dizelom iznosi 76.2 GWh, benzinom 42.67 GWh, a za UNP-om 0.86 GWh. Postojeća PV proizvodnja iznosi 179 kW. Kao rezultat dekarbonizirane uvozne električne energije udio OIE u baznom scenariju iznosi 2.8% (tablica 4-12.)

**Tablica 4-13.** Podaci za bazni scenarij

		Mjerna jedinica	Iznos
Potrošnja goriva	Dizel	GWh	76.2
	Benzin	GWh	42.67
	Loživo ulje	GWh	13.91
	LPG	GWh	0.86
	Prirodni plin	GWh	137.54
	Biomasa	GWh	7.63
Proizvodnja PV	Električna energija	GWh	0.25
Udio OIE	Ukupna energija	%	2.8
Izvoz	Električna energija	GWh	0
Uvoz	Električna energija	GWh	40.09
Razlika uvoz-izvoz	Električna energija	GWh	40.09

Zone Bazni\_scenarij: #



Slika 4.2. Sankeyev dijagram za bazni scenarij

## 4.2. Ulazni podaci za PVGIS za Grad Samobor

Na području Grada Samobora nalazi se 5087 objekata za koje je potrebno izračunati potencijalnu proizvodnju solarne energije. Međutim, kao što je i opisano u drugom poglavlju, ovaj broj ne predstavlja točan broj objekata, jer je zbog praktičnih razloga pri izračunavanju orijentacije krovišta neke objekte bilo potrebno spojiti ili rastaviti na pravokutne oblike (poglavlje 2.14.). Kao što je i prethodno navedeno, kako bi dobili ukupnu snagu iz fotonaponskih elektrana, potrebno su nam podaci o orijentaciji krovišta te geografska dužina i širina. Uz navedene podataka, u PVGIS upisuju se i podaci o bazi podataka solarne radijacije, tipu PV tehnologije, položaju ugradnje itd.

### 4.2.1. Fiksni ulazni podaci za PVGIS

Kao referentna baza podataka solarne radijacije odabrana je PVGIS-SARAH2, jer se radi o novijoj bazi podataka. Budući da je 2015. godina zadnja koja je moguće odabrati za simulaciju proizvodnje električne energije na području Samobora, ona će vrijediti za sve lokacije fotonaponskih elektrana. Uz fiksnu ugradnju panela, odabran je nagib panela od 30%, što je prosječan nagib krovova. Odabrana PV tehnologija su kristalne silicijske ćelije s učinkovitosti od maksimalno 22% te s vijekom trajanja od otprilike 25 godina, dok će gubici u sustavu biti fiksirani na 14%. Kod maksimalne instalirane snage uzima se 1 kW za sve objekte odnosno lokacije, što će biti jedinična snaga za svaku te će se u nastavku proračuna povećavati ovisno o raspoloživoj kvadraturi svakog objekta. Svi navedeni podaci fiksni podaci vidljivi su na slici 4-3.

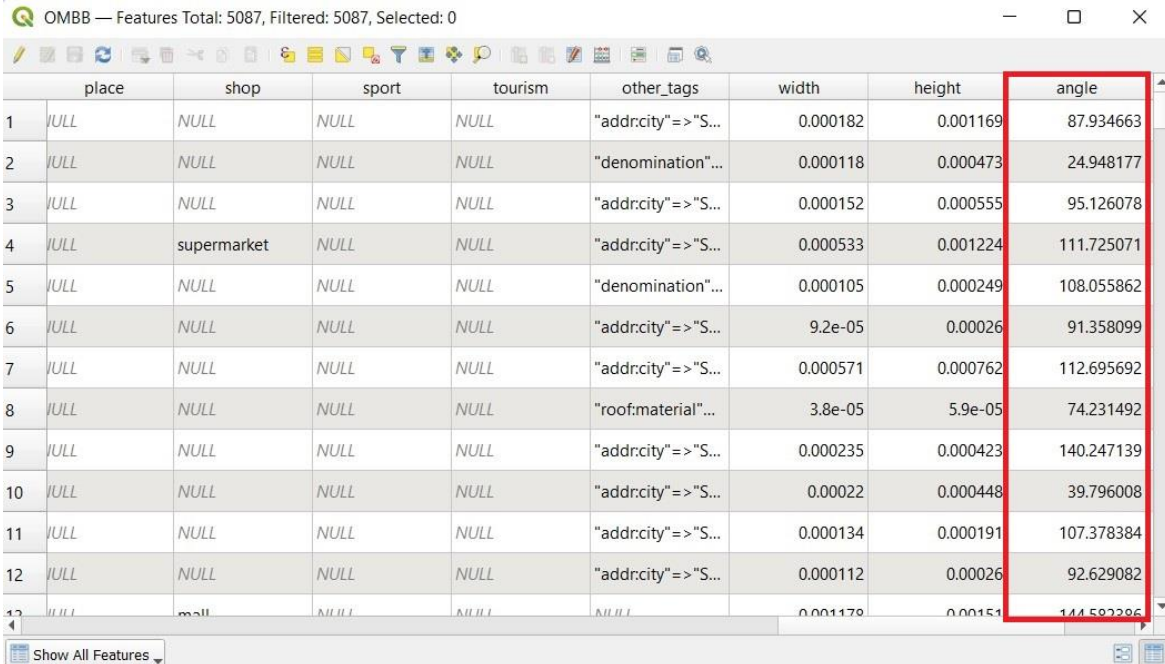
The screenshot shows the 'HOURLY RADIATION DATA' configuration interface in PVGIS. On the left, a sidebar lists various data types: GRID CONNECTED, TRACKING PV, OFF-GRID, MONTHLY DATA, DAILY DATA, HOURLY DATA (highlighted in green), and TMY. The main panel is titled 'HOURLY RADIATION DATA' and contains the following settings:

- Solar radiation database\*: PVGIS-SARAH2
- Start year\*: 2015
- End year\*: 2015
- Mounting type\*: Fixed (selected), Vertical axis, Inclined axis, Two axis
- Slope [°]: 30
- Azimuth [°]: (-180-180)
- PV power:  (checked)
- PV technology\*: Crystalline silicon
- Installed peak PV power [kWp]\*: 1
- System loss [%]\*: 14
- Radiation components:  (unchecked)

Slika 4-3. PVGIS početni zaslon s fiksnim podacima

#### 4.2.2. Dobivanje podataka o orijentaciji krovišta

Kao što je i opisano u prethodnim poglavljima 2.1.3., 2.1.4. i 2.1.5. Kako bi dobili orijentaciju krovišta potrebno je koristiti funkciju QGIS "OMBB" kako je navedeno u prethodnim poglavljima. Dobivene podatke potrebno je spremiti iz QGIS datoteke kao excel podatke te izolirati stupac u kojoj su navedeni podaci o azimutu (slika 4-4.).



OMBB — Features Total: 5087, Filtered: 5087, Selected: 0

	place	shop	sport	tourism	other_tags	width	height	angle
1	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	0.000182	0.001169	87.934663
2	NULL	NULL	NULL	NULL	"denomination"...	0.000118	0.000473	24.948177
3	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	0.000152	0.000555	95.126078
4	NULL	supermarket	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	0.000533	0.001224	111.725071
5	NULL	NULL	NULL	NULL	"denomination"...	0.000105	0.000249	108.055862
6	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	9.2e-05	0.00026	91.358099
7	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	0.000571	0.000762	112.695692
8	NULL	NULL	NULL	NULL	"roof:material"...	3.8e-05	5.9e-05	74.231492
9	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	0.000235	0.000423	140.247139
10	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	0.00022	0.000448	39.796008
11	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	0.000134	0.000191	107.378384
12	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	0.000112	0.00026	92.629082
13	NULL	mall	NULL	NULL	NULL	0.001179	0.00151	144.582296

Show All Features

**Slika 4-4.** Izdvajanje podataka o orijentaciji krovišta iz QGIS

Budući da se dobiveni kutovi o orijentaciji krovišta računaju od sjevera kao nulte točke, potrebno je u excel-u postaviti jug kao nultu točku. Također, QGIS kod orijentacije krovišta gleda dulju os objekta (slika 2-10.) te je potrebno dobiti kut kraće osi okrenute prema jugu. Spomenuto se dobiva jednostavnim oduzimanjem svih vrijednosti za 90°.

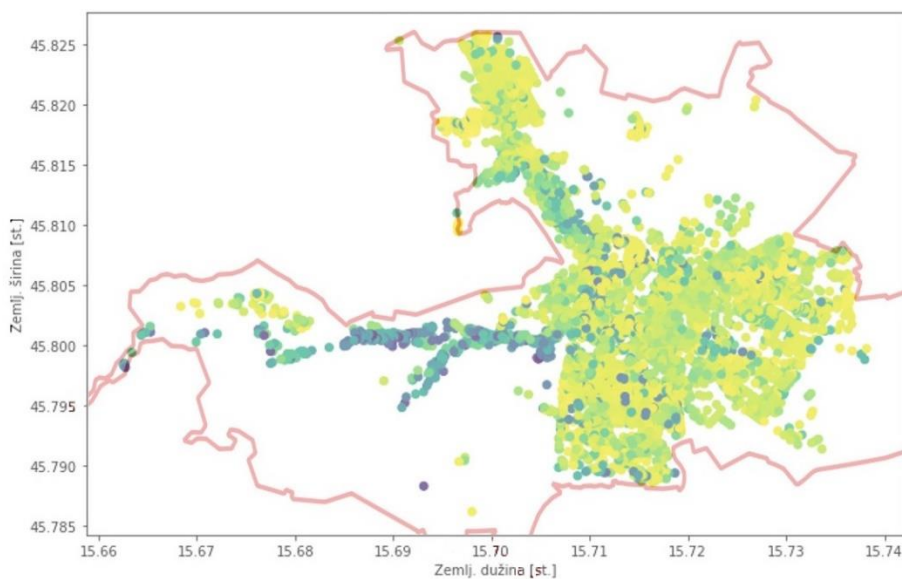
#### 4.2.3. Preuzimanje podataka za svaki objekt iz PVGIS-a

Prethodno poglavlje objašnjeno je kako dobiti kutove orijentacije krovišta. Dobivanje geografske širine i dužine objašnjeno je u poglavlju 2.1.6. Prije preuzimanja podataka potrebno je prvo podatke zajedno spremiti u .txt datoteku kao na slici 4-5.

File	Edit	View		
			fid	x y angle
1	15.71286406	45.80829506	-2.065337	
2	15.7131078	45.79977865	-65.051823	
3	15.71355225	45.80604548	5.126078	
4	15.72589507	45.8006678	21.725071	
5	15.69862883	45.80001254	18.055862	
6	15.7037729	45.79592425	1.358099	
7	15.71520064	45.80488143	22.695692	
8	15.7140405	45.80315045	-15.768508	
9	15.71287245	45.8027961	50.247139	
10	15.71458773	45.80378496	-50.203992	
11	15.70206228	45.79980621	17.378384	
12	15.72583237	45.79924127	2.629082	
13	15.71173595	45.81157238	54.582386	
14	15.71065421	45.80131089	0.201194	
15	15.70779603	45.8037078	-23.686528	
16	15.7088908	45.81092725	59.286845	
17	15.71070858	45.81051569	-13.543904	
18	15.70563811	45.79673438	-88.814739	
19	15.71505382	45.80982552	-20.197175	
20	15.71671955	45.80904223	39.613858	
21	15.71006554	45.80141442	59.067664	
22	15.70933095	45.80275681	49.162521	
23	15.71606617	45.79377171	0.577804	
24	15.72661472	45.79873727	22.94796	
25	15.71284463	45.79606151	-1.528451	
26	15.71227605	45.7960760	1.106150	

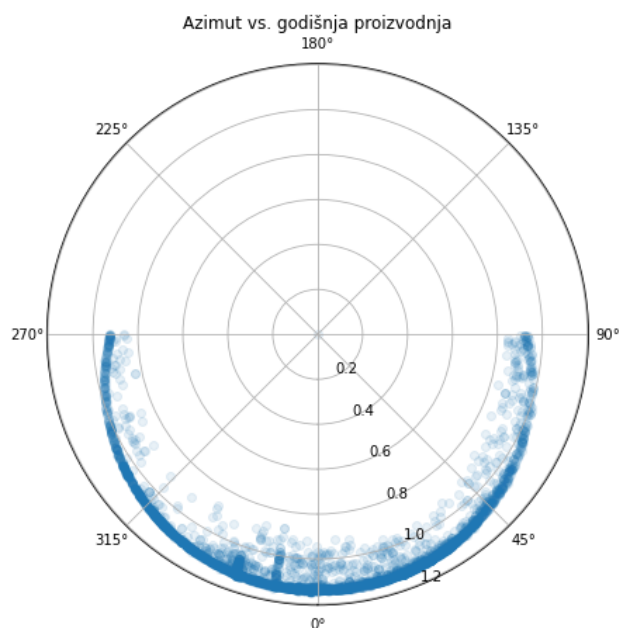
**Slika 4-5.** Geografska širina, dužina i azimut u .txt obliku

Nakon toga, potrebno je učitati podatke u python skriptu koja redom učitava po rednim brojevima te skida podatke o satnoj snazi i energiji solarnih panela za svaki pojedini objekt kroz cijelu godinu. Na slici 4-6. grafički je prikazana količina energije koju svaki objekt dobiva, gdje su tamnijom bojom prikazana područja s manjom godišnjom proizvodnjom energije, a područja s većom proizvodnjom prikazani su svjetlijom bojom.



**Slika 4-6.** Geografska raspodjela godišnje proizvodnje energije objekata Grada Samobora

Nadalje, na slici 4-7. prikazana je godišnja proizvodnja energije ovisno o azimutu solarnih panela na objektima. Na slici je vidljivo da je godišnja proizvodnja veća što su paneli bliže postavljeni jugu.



**Slika 4-7.** Proizvodnja godišnje energije ovisno o postavljenom azimutu panela

Jedna od varijabli koju skripta izračunava je ukupna godišnja satna snaga za svaki objekt u obliku 1D matrice. Prebacivanje spomenutih podataka u .txt oblik dobiva se satna distribucija snage za solarnu panele (slika 4-8.).

```

0
0
0
0
0
0
90.0067
478.221
373.205
299.581
330.008
570.314
382.872
121.908
0
0
0

```

**Slika 4-8.** Primjer distribucije snage solarnih panela na objektima s instaliranih 1 kW snage

#### 4.2.4. Maksimalna potencijalna snaga solarnih panela na objektima

Nakon što smo pronašli potencijalnu proizvodnju energije po 1 kW instalirane snage, možemo izračunati maksimalnu potencijalnu energiju. Za taj podatak potrebno je opet koristiti preuzeti podatke iz QGIS-a, točnije podatke o površini svakog objekta (slika 4-9.).

natural	office	place	shop	sport	tourism	other_tags	Površina
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	1532
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"denomination"...	370
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	597
NULL	NULL	NULL	supermarket	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	4767
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"denomination"...	180
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	204
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	2795
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"roof:material"...	16
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	708
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	699
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	178
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	"addr:city"=>"S...	247
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	10096

**Slika 4-9.** Primjer ukupne raspoložive površine za svaki objekt

Sad kad imamo površinu svakog objekta vrlo lako možemo dobiti površinu na koju možemo instalirati solarne panele. Za svaki objekt gledamo samo jednu površinu krovništva tj, onu okrenutu prema jugu, zatim od te podijeljene uzimamo 50% preostale površine te je preostala površina ona na koju stavljamo solarne panele. Vođeni pretpostavkom da pod



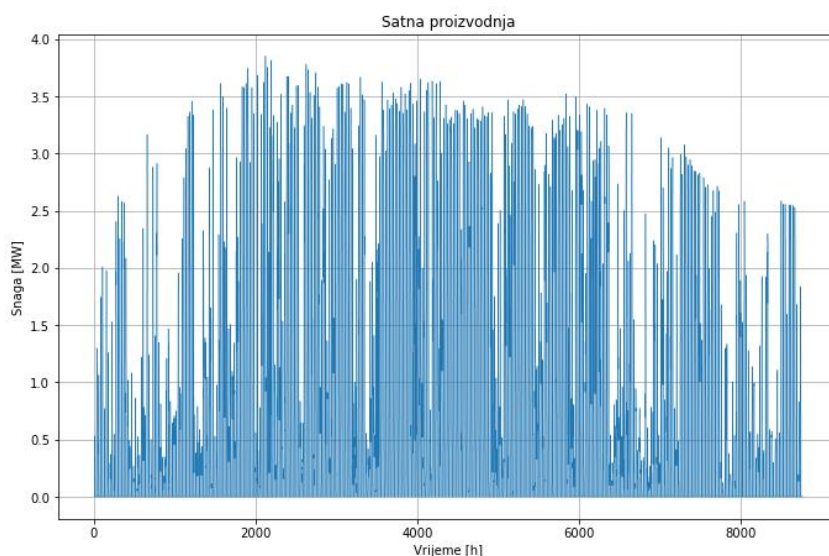
optimalnim uvjetima možemo dobiti 1 kW/m<sup>2</sup> solarne snage (Rajković, 2011), uz učinkovitost od otprilike 16% panela, dobivamo 160 W/m<sup>2</sup>. Time rečeno, za 1 kW potrebno nam je otprilike 6 m<sup>2</sup>. Dijeljenjem navedenih postataka i brojeva dobivamo raspoloživu snagu (zadnji stupac tablica 4-14.).

**Tablica 4-14.** Primjer površine raspoložive za instalaciju solarnih panela

Površina	Polovica krovišta	50%	Dostupno kW (/6)	
1532	766	383	<b>63.83</b>	
370	185	92.5	<b>15.42</b>	
597	298.5	149.25	<b>24.88</b>	
4767	2383.5	1191.75	<b>198.63</b>	
180	90	45	<b>7.50</b>	
204	102	51	<b>8.50</b>	
2795	1397.5	698.75	<b>116.46</b>	
16	8	4	<b>0.67</b>	
708	354	177	<b>29.50</b>	
699	349.5	174.75	<b>29.13</b>	
178	89	44.5	<b>7.42</b>	
247	123.5	61.75	<b>10.29</b>	
10986	5493	2746.5	<b>457.75</b>	
615	307.5	153.75	<b>25.63</b>	
682	341	170.5	<b>28.42</b>	
1736	868	434	<b>72.33</b>	
587	293.5	146.75	<b>24.46</b>	
114	57	28.5	<b>4.75</b>	
1801	900.5	450.25	<b>75.04</b>	

**Ukupna raspoloživa snaga= 38783.29 kW**

Kad smo dobili ukupnu moguću instaliranu snagu potrebno je samo zbrojiti raspoloživu površinu za instalaciju. Time dobivamo maksimalnu snagu solarnih panela koja iznosi 38783.29 kW. Na slici 4-10. vidimo satnu raspodjelu dobivenih snaga.



**Slika 4-10.** Ukupna satna proizvodnja

### 4.3. Dekarbonizirani scenariji

Kako bi iskoristili što više iskoristili instaliranu snagu fotonaponskih elektrana moramo iskoristiti viškove električne energije u drugim sektorima. U svaki scenarij biti će instalirana ukupna potencijalna snaga fotonaponskih elektrana od 38962 kW što je zbroj prethodno izračunate snage i već postojeće snage iz baznog scenarija u iznosu od 179 kW. Prioritetni će nam biti sektori zgradarstva i prometa, gdje će se viškovima električne energije nastojati zamijeniti goriva i prirodni plin te uvesti tehnologije koji nemaju ugljični otisak. U svim scenarijima biti će instalirano 3200 kW grijanja bojlera, 1000 kW potencijala kompresijskih toplinskih dizalica s COP-om od 4.5 i toplinskih spremnika od 40 MWh. U svim scenarijima koji se dotiču dekarbonizacije grijanja postavljena je zamjena bojlera s električnim grijanjem maksimalnog kapaciteta 2000 kW. Također, u svim scenarijima koji imaju elektrifikaciju prometa, stavljeno je 5 GWh potražnje za vodikom (H<sub>2</sub>) te elektrolizer od 5000 kW i skladišnog kapaciteta od 100 kWh. S tom mišlju napravljeni su sljedećih 5 scenarija dekarbonizacije Grada Samobora.

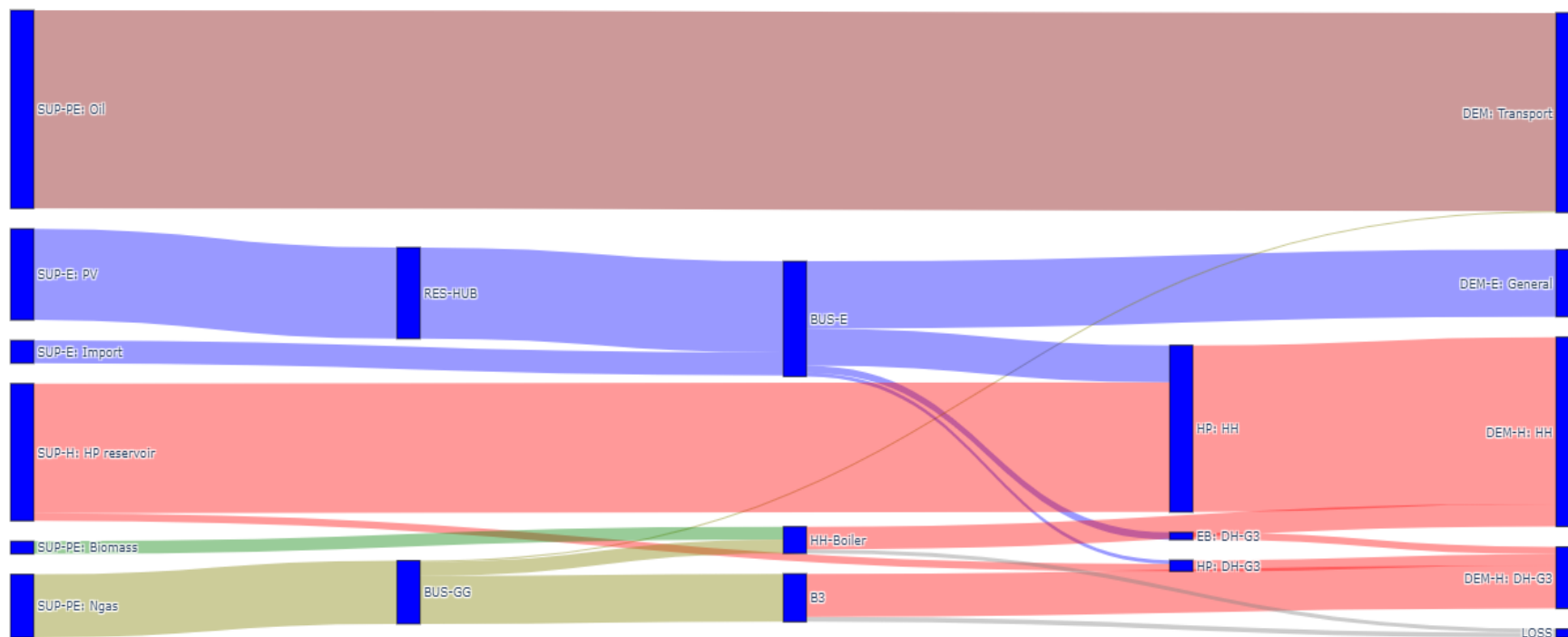
#### 4.3.1. Scenarij sa 100 GWh toplinskih dizalica

Prvi scenarij fokusiran je na dekarbonizaciju grijanja. Kako je i prethodno spomenuto upisana je ukupna snaga fotonaponskih elektrana. Kako bi smanjili potrošnju prirodnog plina i loživog ulja instalirano je 100 GWh potražnje u toplinskim pumpama (*engl. Heat pump – HP*).

**Tablica 4-15.** Prikaz rezultata scenarija sa 100 GWh toplinskih dizalica

		Mjerna jedinica	Iznos
Sustav	Instalirani PV	kW	38962
	Instalirani HP	GWh	100
	Emisije CO <sub>2</sub>	ktCO <sub>2</sub>	39.425
Potrošnja goriva	Dizel	GWh	76.2
	Benzin	GWh	42.67
	LPG	GWh	0.86
	Prirodni plin	GWh	37.1
	Biomasa	GWh	7.63
Proizvodnja PV	Električna energija	GWh	54.68
Udio OIE	Ukupna energija	%	28.4
Izvoz	Električna energija	GWh	26.99
Uvoz	Električna energija	GWh	40.67
Razlika uvoz-izvoz	Električna energija	GWh	13.68

Zone Grijanje(100HP): #



Slika 4-11. Sankeyev dijagram scenarija sa 100 GWh toplinskih dizalica

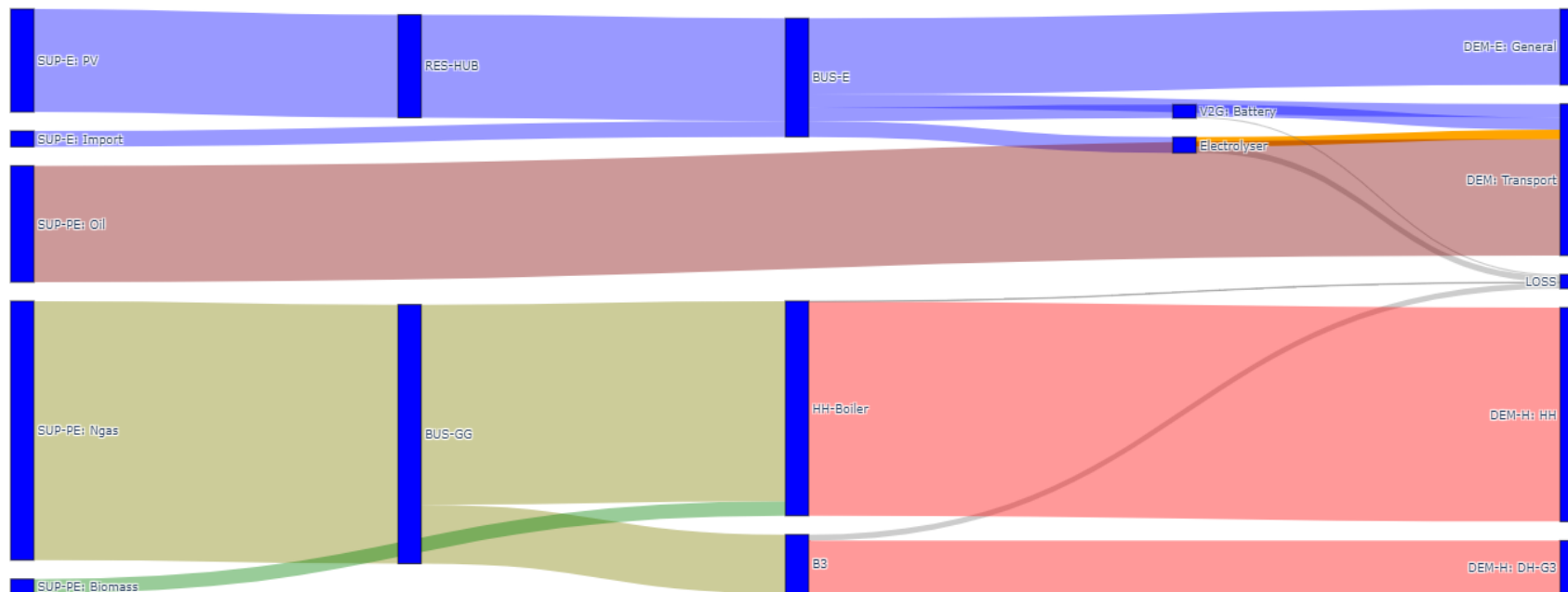
#### 4.3.2. Scenarij s 40% električnih vozila

Drugi scenarij orijentiran je na dekarbonizaciju transporta. U ovom scenariju 40% automobila na fosilna goriva zamijenjeno je vozilima na struju (engl. *Electric Vehicles – EV*).

**Tablica 4-16.** Prikaz rezultata scenarija s 40% električnih vozila

		Mjerna jedinica	Iznos
Sustav	Instalirani PV	kW	38962
	Instalirani EV	GWh	14.36
	Emisije CO <sub>2</sub>	ktCO <sub>2</sub>	48.244
Potrošnja goriva	Dizel	GWh	36.1
	Benzin	GWh	25.7
	Loživo ulje	GWh	13.91
	Prirodni plin	GWh	137.54
	Biomasa	GWh	7.63
Proizvodnja PV	Električna energija	GWh	54.68
Udio OIE	Ukupna energija	%	22.6
Izvoz	Električna energija	GWh	23.25
Uvoz	Električna energija	GWh	31.60
Razlika uvoz-izvoz	Električna energija	GWh	8.35

Zone Transport(40EV): #



Slika 4-12. Sankeyev dijagram scenarija s 40% električnih vozila

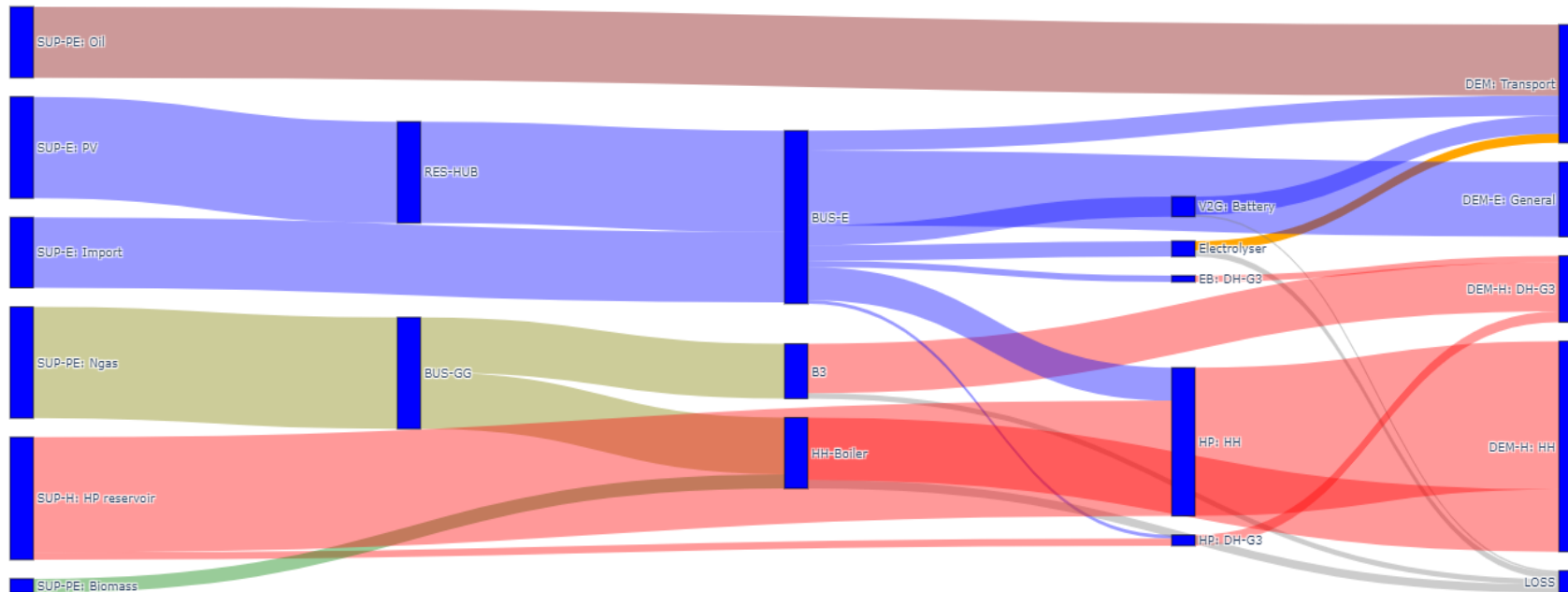
#### 4.3.3. Scenarij s 80 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila

Treći scenarij je kombinacija prethodna dva scenarija, odnosno dekarbonizacije grijanja i transporta s većim naglaskom na transport. Toplinska potražnja za toplinskim dizalicama smanjena je na 80 GWh, dok je udio EV-a povećan na 60% ukupnih vozila. Potražnja za vozilima na vodik je ostala ista. Svi ostali podaci koji su navedeni u prethodna dva scenarija su isti.

**Tablica 4-17.** Prikaz rezultata scenarija s 80 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila

		Mjerna jedinica	Iznos
Sustav	Instalirani PV	kW	38962
	Instalirani HP	GWh	80
	Instalirani EV	GWh	21.56
	Emisije CO <sub>2</sub>	ktCO <sub>2</sub>	22.465
Potrošnja goriva	Dizel	GWh	13.30
	Benzin	GWh	25
	Prirodni plin	GWh	60.07
	Biomasa	GWh	7.63
Proizvodnja PV	Električna energija	GWh	54.68
Udio OIE	Ukupna energija	%	38.8
Izvoz	Električna energija	GWh	12.8
Uvoz	Električna energija	GWh	50.84
Razlika uvoz-izvoz	Električna energija	GWh	38.04

Zone Grijanje(80HP)+transport(60EV): #



Slika 4-13. Sankeyev dijagram scenarija s 80 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila



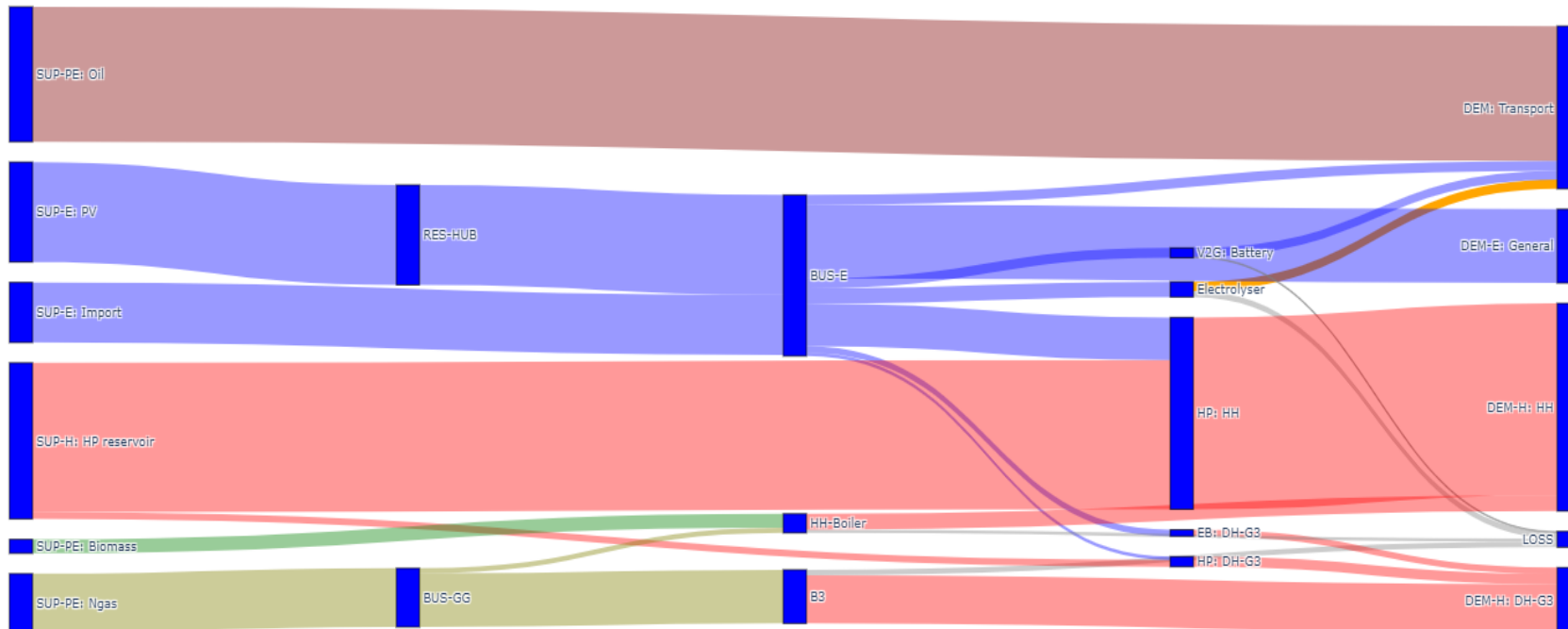
#### 4.3.4. Scenarij sa 105 GWh toplinskih dizalica i 30% električnih vozila

Slično kao i prethodni scenarij, ovaj scenarij je kombinacija dekarbonizacije grijanja i transporta s većim naglaskom na dekarbonizaciju grijanja, a manje transport. U scenariju je toplinska potražnja za dizalicom topline povećana na 105 GWh, dok je u sektoru transporta udio EV na 30% ukupnih vozila.

**Tablica 4-18.** Prikaz rezultata scenarija sa 105 GWh toplinskih dizalica i 30% električnih vozila

		Mjerna jedinica	Iznos
Sustav	Instalirani PV	kW	38962
	Instalirani HP	GWh	105
	Instalirani EV	GWh	10.78
	Emisije CO <sub>2</sub>	ktCO <sub>2</sub>	26.212
Potrošnja goriva	Dizel	GWh	40
	Benzin	GWh	33.80
	Prirodni plin	GWh	32.1
	Biomasa	GWh	7.63
Proizvodnja PV	Električna energija	GWh	54.68
Udio OIE	Ukupna energija	%	37
Izvoz	Električna energija	GWh	15.78
Uvoz	Električna energija	GWh	48.64
Razlika uvoz-izvoz	Električna energija	GWh	32.86

Zone Grijanje(105HP)+transport(30EV): #



**Slika 4-14.** Sankeyev dijagram scenarija sa 105 GWh toplinskih dizalica i 30% električnih vozila

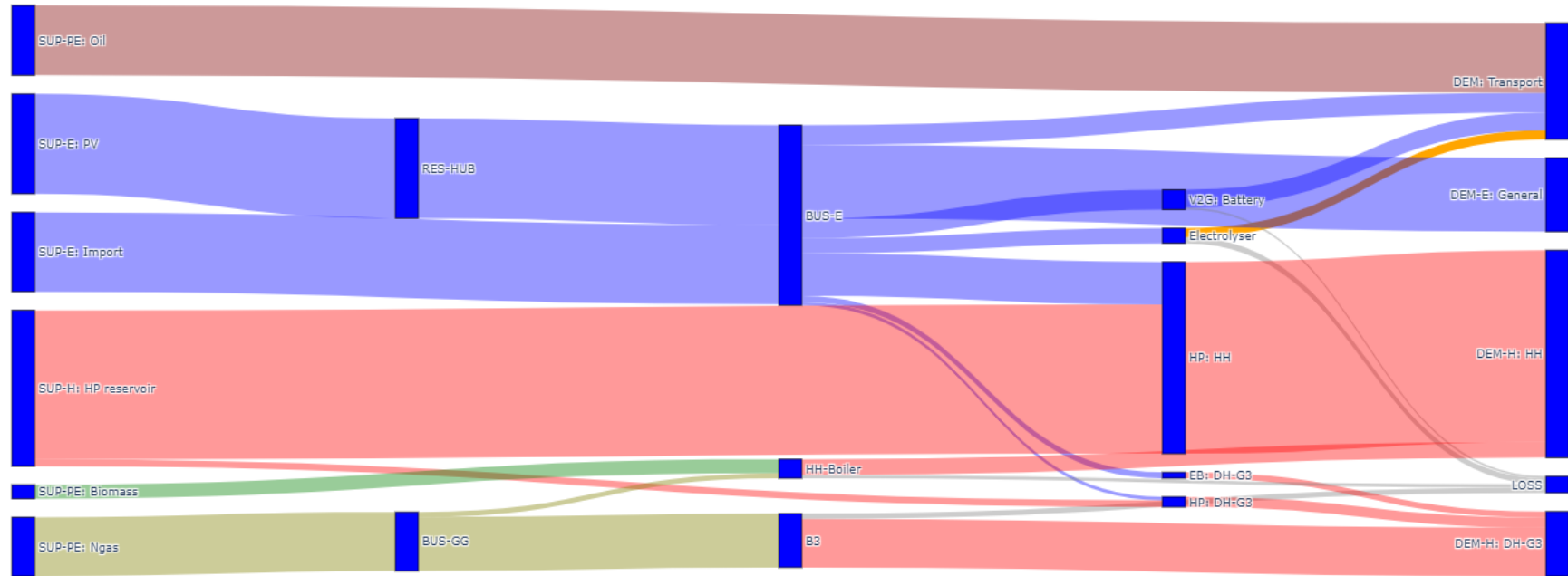
#### 4.3.5. Scenarij sa 105 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila

Posljednji scenarij je maksimiziranje dekarbonizacije i grijanja i transporta. Toplinska potražnja za toplinskom dizalicom je i dalje na 105 GWh, a transport je povećan na 60% kao u scenariju 3.

**Tablica 4-19.** Prikaz rezultata scenarija sa 105 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila

		Mjerna jedinica	Iznos
Sustav	Instalirani PV	kW	38962
	Instalirani HP	GWh	105
	Instalirani EV	GWh	21.55
	Emisije CO <sub>2</sub>	ktCO <sub>2</sub>	16.807
Potrošnja goriva	Dizel	GWh	13.3
	Benzin	GWh	25
	Prirodni plin	GWh	32.35
	Biomasa	GWh	7.63
Proizvodnja PV	Električna energija	GWh	54.68
Udio OIE	Ukupna energija	%	46.9
Izvoz	Električna energija	GWh	12.08
Uvoz	Električna energija	GWh	55.51
Razlika uvoz-izvoz	Električna energija	GWh	43.43

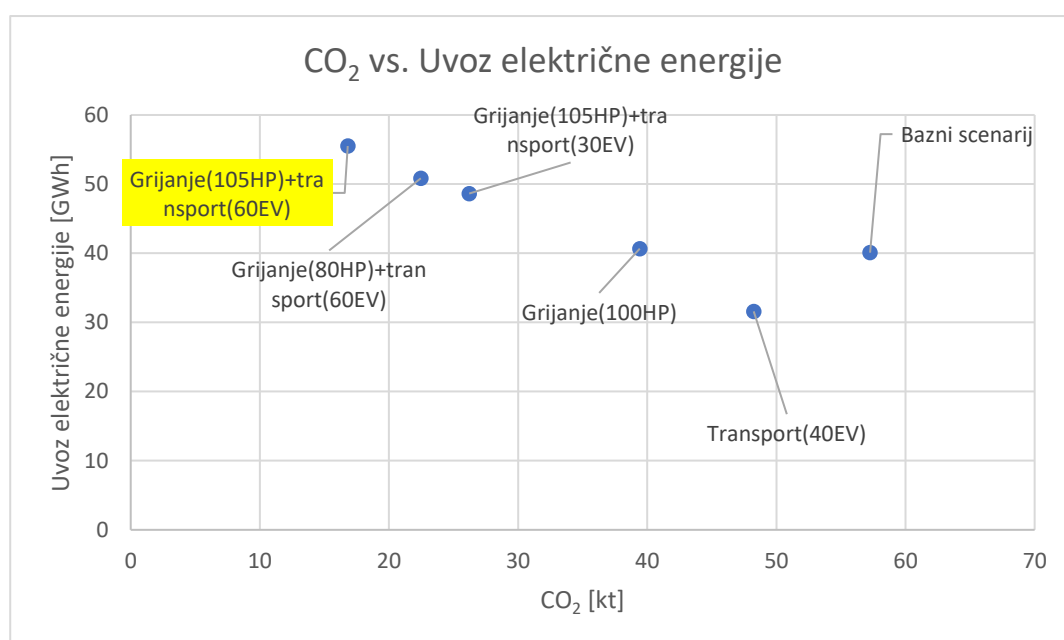
Zone Grijanje(105HP)+transport(60EV): #



Slika 4-15. Sankeyev dijagram scenarija sa 105 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila

#### 4.4. Analiza rezultata

Iz priloženih rezultata vidljivo je da kombinirana dekarbonizacija prometa i grijanja daje najbolje rezultate u pogledu smanjenja emisije CO<sub>2</sub>. To dokazuje da, kako bi se smanjio ugljični otisak gradova, potrebno elektrificirati i sektor prometa i sektor zgradarstva. S druge strane, potrebno je sagledati i povećanje uvoza energije. U svim scenarijima, osim scenarija s 40% električnih vozila dolazi do povećanja uvoza, što je rezultat stavljanja polovice električnih vozila na pametno punjenje koje poravnava krivulju potrošnje energije tijekom velikih skokova u potražnji. Na slici 4-16. prikazani su omjeri emisije CO<sub>2</sub> i uvoza energije.

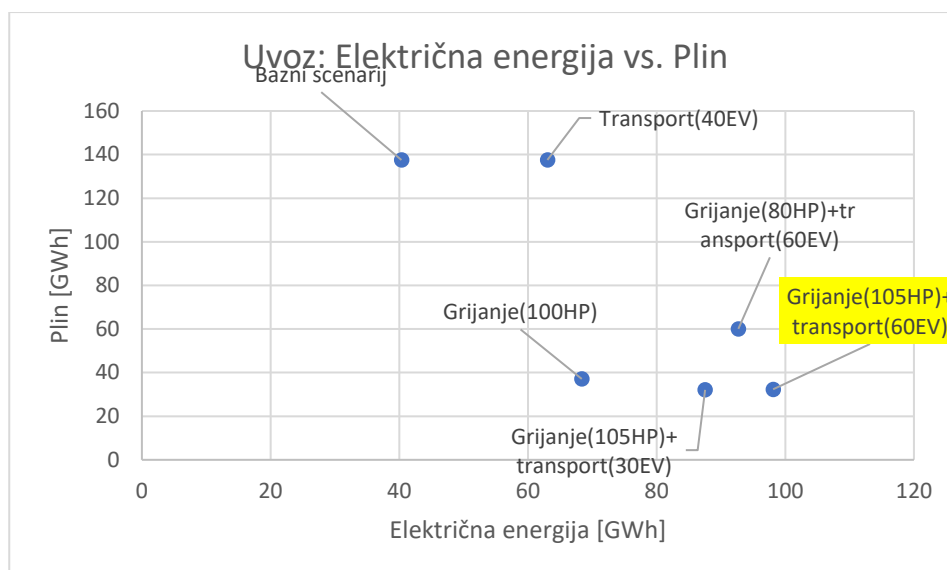


**Slika 4-16.** Omjer emisije CO<sub>2</sub> i uvoza električne energije

Najbolje rezultate kod smanjenja emisija CO<sub>2</sub> daje scenarij sa 105 GWh toplinskih dizalica i 60% električnih vozila što je i očekivano. Međutim taj scenarij iziskuje i najviše dodatnog uvoza električne energije. S druge strane, scenarij s 40% električnih vozila ima manji uvoz električne energije nego bazni scenarij, ali i višestruko manje smanjenje emisija CO<sub>2</sub> zbog nedostatka dekarbonizacije grijanja.

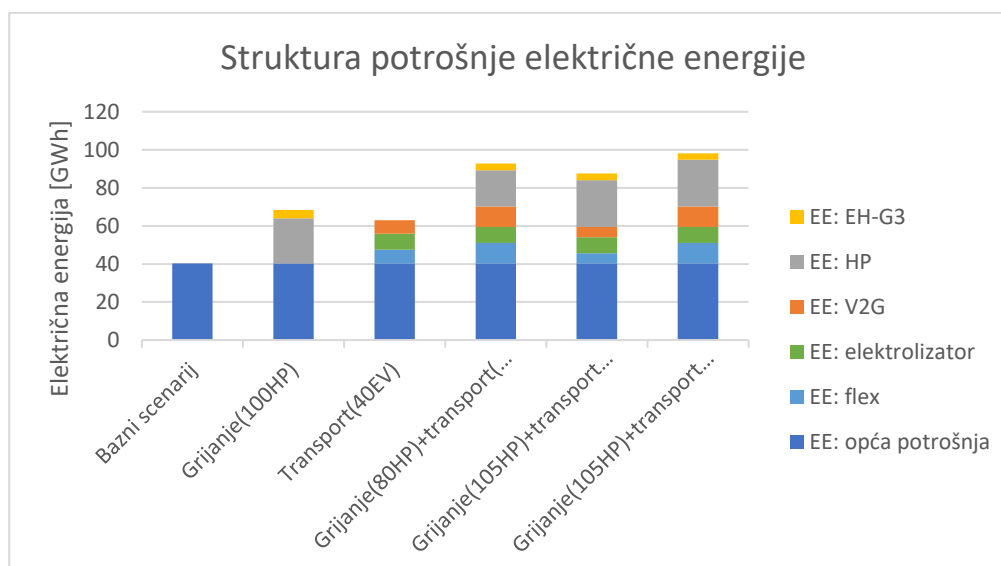
Nadalje, drugi važan čimbenik je smanjenje uvoza prirodnog plina za potrebe grijanja. Najbolje rezultate opet daju scenariji sa 105 GWh toplinskih dizalica, iako to smanjenje uvoza plina dolazi pod cijenu povećanja potrošnje električne energije. Scenarij s 40% električnih vozila prividno ima veću potražnju za plinom, ali razlog tome je prebacivanje

produkcije topline iz CTS-a na individualne bojlere. Tim prebacivanjem u kasnijim scenarijima možemo zamijeniti proizvodnju topline bojlera iz prirodnog plina na električnu energiju tijekom razdoblja visoke dobave solarne energije.



**Slika 4-17.** Omjer potrošnje plina i električne energije

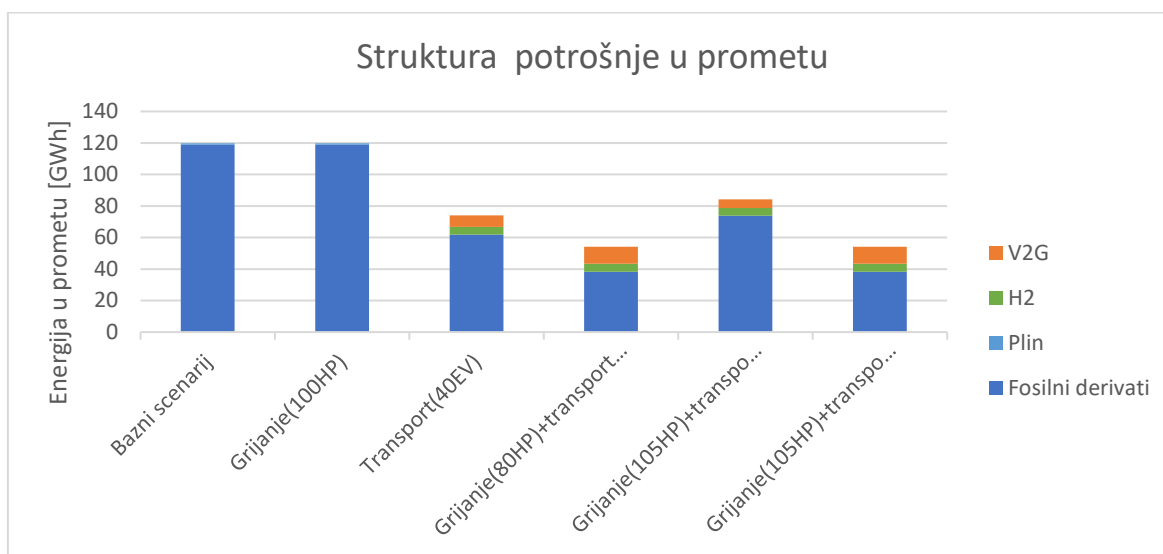
Struktura potrošnje električne energije u svim scenarijima je veća nego u baznom. Najveću potražnju imaju scenariji s visokim udjelom električnih vozila. U svim scenarijima najveći udio dodatne potrošnje električne energije čine instalirani kapaciteti toplinske dizalice (slika 4-18.).



**Slika 4-18.** Struktura potrošnje električne energije po scenarijima

Označeno žutom bojom predstavlja potrošnju električne energije u bojlerima tijekom razdoblja suviška električne energije. V2G (engl. *Vehicle To Grid*) predstavlja dio električnih vozila koji ovisno o potražnji električne energije, ili se pune kad je vrhunac potrošnje nizak ili se dio električne energije vraća u mrežu te tako uravnotežuje mrežu.

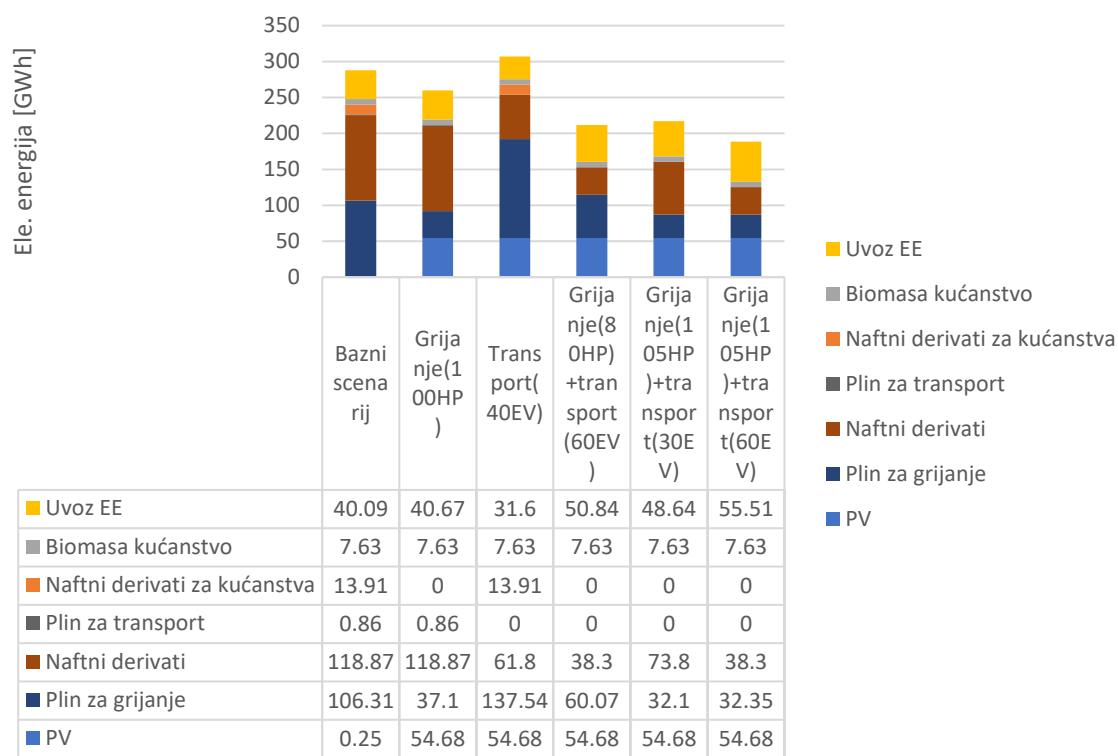
U sektoru prometa, scenariji koji uključuju zamjenu automobila na fosilna goriva s onim električnim pokazuju znatno smanjenje potrebne energije. Razlog tome je što električna vozila imaju otprilike 3 puta veću učinkovitost i iskoristivost energije, dok vozila na fosilna goriva izgube veliku količinu energije kroz toplinu.



**Slika 4-19.** Struktura potrošnje energije u prometu

Iz grafikona koji pokazuje ukupnu potrošnju finalne energije i uvoza vidimo da većina energije prije dekarbonizacije otpada na prirodni plin za grijanje i fosilna goriva. U završnim scenarijima najviše energije otpada na energiju iz solarnih panela i uvoza.

### Struktura potrošnje finalne energije i uvoz električne energije



Slika 4-20. Struktura potrošnje finalne energije i uvoz električne energije



## 5. ZAKLJUČAK

Integracija samo solarne energije u mikroenergetski sustav gradova ima mnogo mana. Ukupna proizvodnja iz fotonaponskih sustava kako je opisana u radu, ne može pokriti svu potražnju Grada Samobora, ako se u obzir uzme i dodatna potražnja za energijom kod toplinskih dizalica i električnih vozila. Stoga, čak i kad bi nekako uskladištili svu energiju u nekom obliku bez gubitaka tijekom transformacija, proizvodnja bi bila nedostatna. Najveći problem je što se potražnja za energijom najčešće ne poklapa s razdobljima najveće proizvodnje energije. U energetske sustavima koji dobivaju energiju iz drugih OIE (kao što je npr. vjetroenergija), nedostaci energije iz jednog izvora pokrivaju se proizvodnjom iz drugih izvora. Međutim, kod Grada Samobora koji nema potencijala za vjetroenergiju to nije izvedivo. Kod solarne energije najveća proizvodnja je tijekom dana, dok se predvečer i preko noći, kada ljudi dolaze iz posla, potrošači snabdijevaju iz uvoza. Kako bi ugljični otisak gradova bio što manji, potrebno je simultana dekarbonizacija grijanja i transporta. U sektoru grijanja najviše obećava tehnologija dizalica topline. Tijekom izgradnje novih stambenih objekata toplinske dizalice često su prioritetna tehnologija te su predviđanja da će se njihova upotreba povećati u godinama koje slijede. U sektoru prometa, električna vozila su nezaobilazna tema. Kapaciteti litij-ionskih baterija svake godine su sve veći, a učinkovitost sve bolja. Važan čimbenik je i broj punionica i brzina punjenja baterija. Zadnjih godina na području Zagreba i okolici (što uključuje i Samobor), broj punionica se udvostručio, a broj prodanih električnih vozila eksponencijalno se povećao. Dekarbonizacijom u navedenim sektorima ukupni udio OIE u proizvodnji energije popeo se na skoro 50%, a ugljični otisak je smanjen za približno 70%. Pošto Grad Samobor ne može podmiriti svu potrebu iz svojih izvora, potrebno je uvesti nedostatak energije. Stoga, daljnja dekarbonizacija sustava uvelike ovisi i o dekarbonizacije svih izvora energije u RH.

## 6. LITERATURA

1. GRAD SAMOBOR, 2012. Akcijski plan energetske održivosti razvoja Grada Samobora. Gradsko vijeće Grada Samobora
2. KVATERNIK, B., 2019. Proizvodnja električne energije velikim fotonaponskim sustavima. Završni rad. Varaždin: Geotehnički fakultet
3. LUND, H., THELLUFSEN, J.Z., 2022. *EnergyPLAN: Advanced Energy Systems Analysis Computer Model*
4. NOVAK MAVAR, K., 2021. Skripta iz kolegija: Proizvodnja i pretvorba energije. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
5. NWAIGWE, K.N., MUTABILWA, P., DINTWA, E., 2019. *An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids*. Materials Science for Energy Technologies 2, 629. – 633.
6. RAJKOVIĆ, D., 2011. Skripta iz kolegija: Proizvodnja i pretvorba energije. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
7. ŽIHER, A., 2014. Analiza utjecaja izgradnje fotonaponskih sustava na opterećenje elektromagnetskog sustava i cijenu električne energije na otoku Korčuli. Završni rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje

Web izvori:

8. C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP, C40 KNOWLEDGE HUB, 2021. How to create a roadmap for your city's renewable energy transition

URL: [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-create-a-roadmap-for-your-city-s-renewable-energy-transition?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-create-a-roadmap-for-your-city-s-renewable-energy-transition?language=en_US) (05.08.2022.)

9. DANYLENKO, M., 2018. Photovoltaics: Materials used and how their efficiency and cost can be improved

URL: <https://matmatch.com/resources/blog/solar-panels-materials-efficiency-cost/> (05.08.2022.)

10. ENERGIG, 2017. The difference between CIGS and crystalline solar

URL: <https://energig.com/guides/why-are-cigs-solar-cells-better-than-crystalline/> (05.08.2022.)

11. GRAD ZAGREB, 2022. Fotonaponske ćelije

URL: <https://eko.zagreb.hr/fotonaponske-celije/87> (05.08.2022.)

12. MINISTARSTVO GOSPODARSTVA I ODRŽIVOG RAZVOJA, 2022. Registar proizvođača obnovljivih izvora energije, kogeneracije i povlaštenih proizvođača

URL: <https://oie-aplikacije.mzoe.hr/Pregledi/> (05.08.2022.)

13. SVEASOLAR, 2019. How much electricity does solar panels produce?

URL: <https://sveasolar.com/blog/how-much-electricity-does-solar-panels-produce/>  
(05.08.2022.)

14. UNIVERSITY OF CALGARY, 2015. Solar panel orientation.

URL: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar\\_panel\\_orientation](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_panel_orientation) (05.08.2022.)

## IZJAVA

*Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod naslovom „Procjena mogućih scenarija dekarbonizacije Grada Samobora korištenjem računalnih aplikacija EnergyPLAN i PVGIS“ izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko – geološko – naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*

*Mislav Rendulić*

---

Mislav Rendulić



KLASA: 602-01/22-01/176  
URBROJ: 251-70-12-22-2  
U Zagrebu, 12.09.2022.

**Mislav Rendulić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/176, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 30.08.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### PROCJENA MOGUĆIH SCENARIJA DEKARBONIZACIJE GRADA SAMOBORA KORIŠTENJEM RAČUNALNIH APLIKACIJA ENERGYPLAN I PVGIS

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv.prof.dr.sc. Luka Perković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)



Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)