

Primjena fotonaponskih sustava za napajanje toplinskih crpki.

Buzov, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:701544>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**PRIMJENA FOTONAPONSKIH SUSTAVA ZA
NAPAJANJE TOPLINSKIH CRPKI**

Diplomski rad

Dominik Buzov

Osijek, 2022.

Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Pregled literature..... | 2 |
| 3. Fotonaponski sustavi | 4 |
| 3.1. Elementi fotonaponskih sustava..... | 5 |
| 3.2. Autonomni fotonaponski sustavi..... | 6 |
| 3.3. Mrežni fotonaponski sustavi | 7 |
| 3.4. Zakonodavni i regulatorni okvir fotonaponskih sustava | 8 |
| 3.5. Trenutno stanje u obnovljivim izvorima energije u 2021. godini | 9 |
| 3.5.1. Stanje u svijetu..... | 10 |
| 3.5.2. Stanje u Europskoj uniji | 11 |
| 3.5.3. Stanje u Republici Hrvatskoj..... | 12 |
| 4. Toplinske crpke | 14 |
| 4.1. Princip rada | 15 |
| 4.2. Učinkovitost toplinskih crpki | 17 |
| 4.3. Izvori topline | 17 |
| 4.4. Zrak kao izvor topline | 18 |
| 5. Projektni zadatak primjene fotonaponskog sustava za napajanje toplinske crpke na primjeru obiteljske kuće | 21 |
| 5.1. Zatečeno stanje objekta | 21 |
| 5.2. Proračun energije potrebne za napajanje toplinske crpke | 22 |
| 5.3. Proračun fotonaponskog sustava..... | 27 |
| 5.4. Komparativna analiza promatranih sustava | 34 |
| 6. Zaključak | 39 |
| Literatura..... | 40 |
| Sažetak | 43 |
| Summary | 43 |
| Životopis | 44 |
| Prilozi..... | 45 |

1. Uvod

Konstantnim porastom svjetske populacije i povećanjem gospodarske aktivnosti povećava se i potreba za novim izvorima energije. Do sad su najčešće korišteni izvori energije neobnovljivi (ugljen, prirodni plin i nafta), a njihova upotreba je štetna za okoliš zbog ispuštanja velikih količina ugljičnog dioksida (CO₂), ispuštanja nafte u more i globalnog zatopljenja uzrokovanog efektom staklenika. Korištenje fosilnih goriva je predstavljalo najdominantniji izvor energije zbog duge tradicije upotrebe, relativno niske početne cijene te slabe podrške sektoru obnovljivih izvora energije. Do nedavno je potrebna za obnovljivim izvorima energije (OIE) bila relativno niska budući da nisu postojala sredstva usmjerena njihovom razvoju (u odnosu na sredstva usmjerena na npr. transport, rafiniranje i distribuciju fosilnih goriva), no od 2021. godine svijet se suočio s rapidnim rastom cijene energije kao dio gospodarskog oporavka nakon pandemije, a početkom 2022. godine ruska invazija na Ukrajinu dodatno je utjecala na energetska tržišta ponovno dižući cijene i ograničavajući sposobnost opskrbe energijom.

Na porast cijena utjecalo je nekoliko čimbenika; u 2021. godini uslijedilo je nezabilježeno povećanje cijene plina na globalnim tržištima za više od 170%, povećanje grijanja tijekom zimskog razdoblja te hlađenja u ljetnim mjesecima, povećanje potražnje za ukapljenim prirodnim plinom i posljedični rast njegove cijene, sve veće geopolitičke napetosti, s naglaskom na rat u Ukrajini koji je dodatno povećao pritisak na cijene (posebice plina i nafte).

Kao odgovor na visoke cijene i kako bi se osigurala opskrba energijom usvojene su nacionalne strategije u skladu s ciljevima i strategijama EU-a kako bi se smanjilo financijsko opterećenje za kućanstva i poduzeća te omogućila manja ovisnost o fosilnim gorivima i energetska ovisnost. Europski zeleni plan strategija je Europske unije za postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine kojom se predlaže uvođenje novih zakonodavnih inicijativa kako bi se uskladili propisi s klimatskim ciljevima. Strategijom se potiče revizija direktive o upotrebi energije iz obnovljivih izvora te o energetskej učinkovitosti kako bi se poteknulo zeleno poslovanje i tranzicija poduzeća na takav način poslovanja. Osim toga, Strategijom energetskeg razvoja RH do 2030. godine potiče se razvoj energetskeg postrojenja za električnu energiju i smanjenje udjela termoelektrana na fosilna goriva, a da uvoz električne energije bude rezultat slobodne tržišne utakmice i rezultat ekonomskog interesa.

2. Pregled literature

Budući da obnovljivi izvori energije postaju sve aktualniji, brojni autori navode prednosti grijanja kombinacijom toplinskih crpki i fotonaponskih sustava koje su zanimljive jer osim grijanja prostora omogućavaju i hlađenje istog uz smanjenje potrošnje električne energije iz elektroenergetskog sustava. Navedena problematika tema je mnogih znanstvenih istraživanja od kojih su neka predstavljena u ovom poglavlju.

O sustavu toplinskih crpki sa zrakom kao izvorom (ASHP, engl. *Air Source Heat Pump*) govori se u radu [1] koji predstavlja pregled i komparaciju sustava toplinskih crpki sa zrakom kao izvorom u kombinaciji sa solarnim kolektorima (ST, engl. *Solar Thermal*), fotonaponskim sustavima (PV, engl. *Photovoltaic*) te sustavima koji objedinjuju fotonaponske panele i solarne kolektore u jedno (PV/T, engl. *Photovoltaic/Thermal*). Rezultati usporedbe prikazuju kako navedene toplinske crpke u kombinaciji sa PV sustavima imaju najbolje tehničko-ekonomske performanse; umjereno vrijeme povrata investicije, ali najbolji koeficijent učinkovitosti (COP). Slična tematika obrađena je i u radu [2] u kojem je analiziran hibridni sustav grijanja za renovirane stambene zgrade u Grazu, Austrija. Uspoređeni su rezultati u ovisnosti o temperaturi polaznog voda grijanja (visokotemperaturni i niskotemperaturni sistemi grijanja, odnosno radijatorsko/staro i podno grijanje) i nekoliko načina upravljanja kompresora toplinske crpke. Rezultati su pokazali kako je moguće značajno smanjiti potrošenu električnu energiju iz mreže sa spomenutim sustavima čak i pri korištenju visokotemperaturnih sustava grijanja. Na istom području (Austrija) provedena je još jedna analiza [3] kojom je utvrđeno je kako bi zamjena plinskih sistema ASHP-om u stambenim zgradama dovela do značajnog smanjenja u emisiji CO₂, posebice ako se kombiniraju s fotonaponskim sustavima, a navedeno se postiže zamjenom konvencionalnih plinskih bojlera s toplinskim crpkama napajanim preko fotonaponskih sustava.

Na istu temu u studiji [4] provedena je simulacija u TRNSYS programu za dva tipa objekta u devet europskih klimatskih područja za grijanje i hlađenje, kao i simulacije modela sa skladištenjem energije (električne i toplinske). Prikazano je kako klimatski utjecaji, temperatura i sunčevo zračenje imaju velik utjecaj na rezultate simulacije. Slična simulacija u istom programu provedena je i u radu [5] na uredskom objektu u Napulju, Italija, također sa skladištenjem električne energije pri različitim veličinama: fotonaponskih sustava i spremišta električne energije. O primjeni toplinskih crpki i PV sustava u kućanstvu također se govori i u doktorskoj disertaciji [6] koja

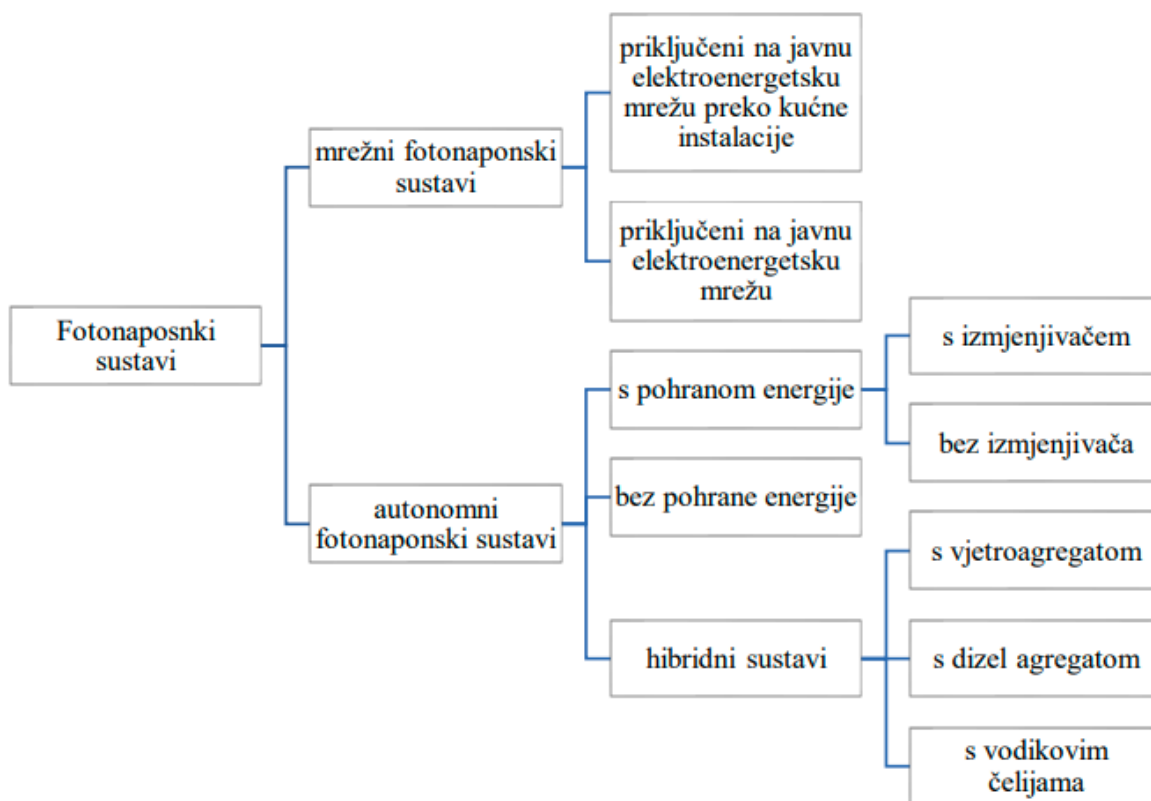
obrađuje modele sustava i njihova svojstva te analizira klimatske utjecaje i razne načine upravljanja. Radom je utvrđeno da bi strategija upravljanja toplinske crpke utemeljena na „pravilima“ i graničnim vrijednostima bila jeftina i efikasna, ali bi zahtijevala određene implementacije i adaptacije za masovnu proizvodnju.

Osim u kućanstvima, implementacija ovakvog sustava moguća je i u manjim stambenim zgradama o čemu se govori u članku [7]. Autori ističu konceptu „zgrade nulte energije“ (ZEB, engl. *Zero energy building*) te su konstruirali dinamički simulacijski model koji kombinira integrirani fotonaponsko-termalni sustav i sustav toplinske crpke zračnog izvora kako bi testirali realizaciju ZEB-a u postojećoj manjoj stambenoj zgradi. Rezultati analize simulacije prikazuju kako COP za sezonu grijanja iznosi 5,3, a za sezonu hlađenja 16,3, a fotonaponsko-termalni sustav je proizveo više električne energije od potrošnje energije sustava, što potvrđuje mogućnost implementacije ZEB-a. Povezano s tim, autori su u članku [8] procijenili tržište za ovakvu vrstu toplinskih crpki u Irskoj na temelju ekonomske analize. Rezultati njihovog istraživanja pokazuju mogućnost uštede kod 60% korisnika za 600 eura godišnje, a ističu i postojanje raznih kapitalnih potpora i bespovratnih sredstava za implementaciju ovakvog načina grijanja i hlađenja. Isto je moguće i kod poslovnih i uredskih zgrada te hotela [9] gdje se kao glavna prednost ističe kombinirano grijanje i hlađenje prostora uz gotovo isti energetske unos. Rezultati istraživanja ukazuju na godišnji porast učinka od 16,6 % upotrebom ASHP-a za kombinirano grijanje i hlađenje, a učinak je provjeren u tri načina rada: samo grijanje, samo hlađenje i kombinirano grijanje i hlađenje.

Članak [10] iznosi prijedloge i analizira nove strategije upravljanja radom modulirajuće toplinske crpke sa zrakom kao izvorom na temelju stvarne raspoloživosti fotonaponskog sustava. Višak sunčeve energije skladišti se u obliku toplinske energije u spremnike s vodom kao i korištenjem termalnog kapaciteta objekta. Analizira se učinak izolacije objekta, toplinske inercije, kao i klimatskih podataka na dobro izoliranom objektu u Bolzanu, Italija. Prikazano je kako strategija korištenja termalnog kapaciteta objekta dodatno smanjuje potrošnju električne energije u sezoni grijanja, odnosno hlađenja objekta.

3. Fotonaponski sustavi

Fotonaponski sustavi (engl. *Photovoltaic system*, PV) su sustavi koji na principu fotonaponske pretvorbe izravno pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju. Solarni fotonaponski sustavi mogu se podijeliti u dvije primarne skupine kao što je prikazano na slici 1: fotonaponski sustavi priključeni na elektroenergetsku mrežu (eng. *on-grid*) i fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na elektroenergetsku mrežu, tj. autonomni ili samostalni sustavi. (eng. *off-grid*) [11].



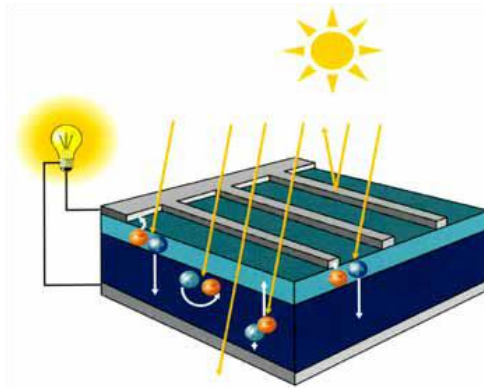
Slika 1: Podjela fotonaponskih sustava [1]

Fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu mogu biti priključeni direktno ili preko kućne instalacije. Samostalni sustavi, odnosno fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu mogu biti s ili bez pohrane energije, te hibridni sustavi u kojima postoji još jedan izvor električne energije (dizelski generator, vjetroagregat i sl.) [12].

3.1. Elementi fotonaponskih sustava

Osnova svakog fotonaponskog sustava je fotonaponska ćelija, tj. fotonaponski modul koji nastaje serijskim ili paralelnim spojem fotonaponskih ćelija.

Fotonaponske ćelije su poluvodički elementi koji na osnovu fotonaponskog efekta izravno pretvaraju svjetlost u električnu energiju. Apsorbirajući fotone iz sunčevog zračenja u fotonaponskoj ćeliji nastaju parovi elektron-šupljina. U slučaju da apsorpcija bude daleko od PN-spoja dolazi do rekombinacije nastalog para, ali ako do apsorpcije dođe u samom PN-spoju ili blizu njega unutarnje električno polje odvađa nastali par, elektron i šupljinu. Elektron teži N-strani, a šupljina P-strani, što dovodi do pojave elektromotorne sile na krajevima ćelije, kako je prikazano na slici 2 [12].



Slika 2: Nastajanje parova elektron-šupljina u fotonaponskoj ćeliji [4]

Napon jedne fotonaponske ćelije iznosi oko 0,5 V, pa se zbog toga koriste unaprijed gotovi fotonaponski moduli nastali međusobnim povezivanjem fotonaponskih ćelija u određenoj paralelno-serijskoj kombinaciji unutar kućišta otpornog na vremenske uvijete. Fotonaponski moduli spajaju se u paralelu ako se želi postići veća vrijednost struje ili u seriju ukoliko se želi postići veća vrijednost napona. Nizovi fotonaponskih modula najčešće se sastoje od kombinacije paralelno-serijskog spoja [11].

Ostali elementi fotonaponskih sustava su regulator punjenja, izmjenjivač te akumulator, a koriste se ovisno o vrsti fotonaponskog sustava i vrsti trošila koja napajaju [12].

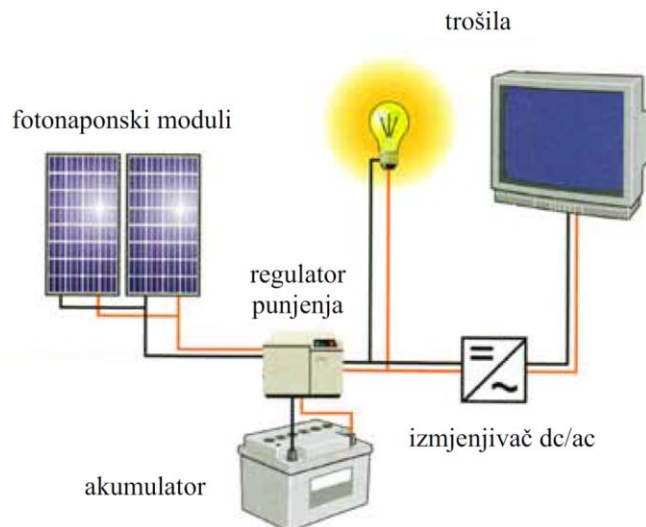
Izmjenjivači su sklopovi energetske elektronike koji spajaju istosmjerni i izmjenični sustav na način da pretvaraju istosmjerni napon u izmjenični napon točno određenog napona i frekvencije i valnog oblika (jednak naponu i frekvenciji javne elektroenergetske mreže: 230 V, 50 Hz). U praksi najčešće objedinjuju funkcije izmjenjivača i regulatora punjenja (ako je on potreban), a neki imaju i 2 režima rada; u jednom imaju klasičnu funkciju izmjenjivača, dok u drugom režimu rade kao ispravljači, odnosno pretvaraju izmjeničan napon u istosmjernan.

Za kontrolu punjenja akumulatora odgovoran je regulator punjenja, koji omogućava učinkovito upravljanje energijom te samim time duži vijek trajanja i optimalno korištenje akumulatora. U slučaju kada je akumulator napunjen, regulator punjenja prekida struju punjenja, isto tako regulator punjenja prekida pražnjenje akumulatora u slučaju da isti padne ispod dopuštene granice ispražnjenosti i ponovno ga uključuje u trenutku kada se akumulator napon iznad spomenute granice.

Akumulatori ili baterije su dijelovi fotonaponskih sustava koji omogućavaju skladištenje električne energije, odnosno reverzibilnu pretvorbu električne energije u kemijsku energiju. To znači da se u slučaju pražnjenja mogu ponovo napuniti uporabom izvora istosmjerne struje napona većeg od samog napona akumulatora. Cilj postavljanja akumulatora u fotonaponski sustav je napajanje trošila u uvjetima gdje je sunčevo zračenje preslabo u odnosu na potrošnju. Osim toga, akumulatori značajno poboljšavaju i ukupnu učinkovitost fotonaponskog sustava čak i kod aktivnog rada modula [12].

3.2. Autonomni fotonaponski sustavi

Autonomni fotonaponski sustavi, odnosno fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu mogu biti sa ili bez pohrane električne energije, te hibridni sustavi u kojima im je dodan još jedan izvor električne energije (vjetroatogregat, dizelski generator i sl.). Osnovni elementi fotonaponskih sustava koji nisu priključeni na mrežu su (slika 3) [11]: fotonaponski moduli, regulator punjenja, akumulator, trošila te izmjenjivač ako su napajana trošila izmjenična.



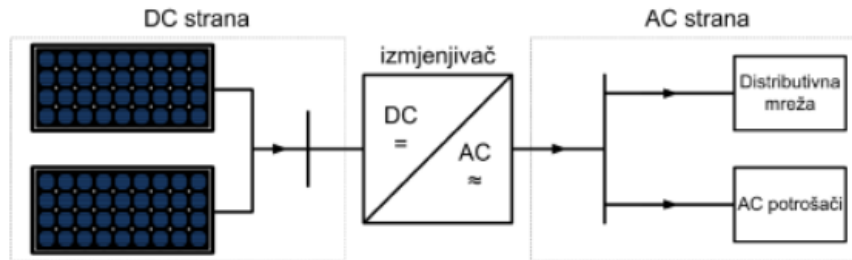
Slika 3: Autonomni fotonaponski sustav [14]

Za sustav koji se sastoji od navedenih elemenata specifična su dva osnovna procesa; transformacija solarne, tj. svjetlosne energije u električnu energiju te transformacija električne energije u kemijsku i suprotno. Fotonaponska transformacija solarne energije u električnu energiju odvija se u fotonaponskom modulu, dok se u akumulatoru odvija reverzibilni elektrokemijski proces transformacije u smislu punjenja i pražnjenja akumulatora.

U slučaju kada sunčeva energija nije dovoljna, akumulator je moguće napuniti dodatnim izvorom električne energije, npr. vjetroagregatom što dovodi do hibridnog rada fotonaponskog sustava.

3.3. Mrežni fotonaponski sustavi

Fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu dijele se na sustave koji su direktno priključeni (pretežno sustavi veće snage) i sustave koji su priključeni preko kućne instalacije [12]. Zbog samog spoja sa javnom elektroenergetskom mrežom ovoj skupini fotonaponskih sustava nisu potrebne baterije i regulatori punjenja (osim u pojedinim slučajevima za rad kritičnih potrošača kao što su računala ili razni upravljački sklopovi) budući da se proizvedena električna energija troši na lokaciji elektrane (u slučaju sustava koji su spojeni preko kućne instalacije) ili u potpunosti prosljeđuje u javnu elektroenergetsku mrežu (u slučaju direktno priključenih sustava) [11].



Slika 4: Pojednostavljena shema mrežnog fotonaponskog sustava [13]

Elementi mrežnih fotonaponskih sustava su fotonaponski moduli, izmjenjivač te trošila, kao što je prikazano na slici 4. Prema načinu povezivanja fotonaponskih modula, mrežni fotonaponski sustavi mogu se podijeliti na izvedbe s centralnim (jednim) izmjenjivačem, izvedbe s jednim izmjenjivačem za svaki fotonaponski niz te izvedbe s više izmjenjivača [11].

3.4. Zakonodavni i regulatorni okvir fotonaponskih sustava

Proizvodnja i upotreba obnovljivih izvora energije u Republici Hrvatskoj uređeni su sa nekoliko zakona i pravilnika. Kada je riječ o proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora od vrlo je velike važnosti pridržavati se mjera koje osiguravaju sigurnu i pouzdanu opskrbu energijom te osigurati učinkovitu proizvodnju i korištenje što je uređeno Zakonom o energiji (NN 120/12, 14/14, 95/15, 68/18) [15]. Proizvodnja električne energije (ili neke druge energije) znači sudjelovanje proizvođača na tržištu i, posljedično, usklađenost sa Zakonom o tržištu električne energije (NN 111/21) kojim su propisana pravila za proizvodnju, prijenos, distribuciju, skladištenje i opskrbu električnom energijom. Ovim zakonom se također nastoji osigurati fer tržišna utakmica unutar i izvan zemlje te suradnja s Europskom unijom [16].

Sva pitanja povezana s korištenjem električne energije uređena su Zakonom o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 138/21) koji određuje uvjete korištenja obnovljivih izvora energije i kogeneracijskih postrojenja, definira grupe postrojenja i uvjete za upis u Registar projekata i postrojenja za korištenje OIE i kogeneracije te povlaštenih proizvođača. Zakon definira točne korake koje je potrebno poduzeti od strane energetske subjekta za pribavljanje odobrenja za izgradnju novog postrojenja i druga povezana pitanja [17]. Registar obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (Registar OIEKPP) je jedinstvena javna evidencija projekata OIE i visokoučinkovite kogeneracije i proizvodnih

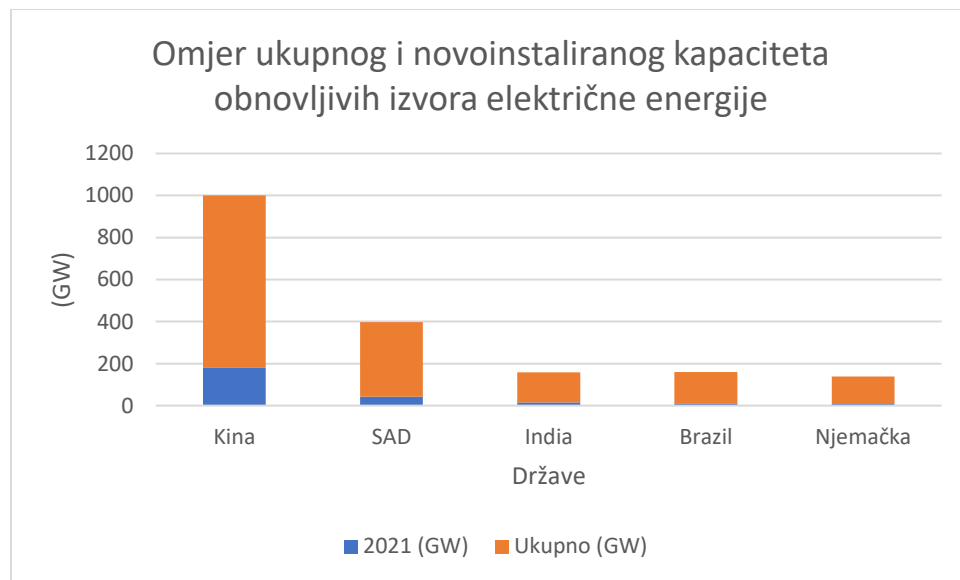
postrojenja koja koriste OIE koje je ustrojeno i vođeno od strane Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja. Osim toga, temeljem istog Zakona definirani su krajnji kupci s vlastitom proizvodnjom i korisnici postrojenja za samoopskrbu. Oba termina predstavljaju krajnje kupce električne energije koji na vlastitoj instalaciji imaju priključena postrojenja za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora ili visokoučinkovite kogeneracije za potrebe pokrivanja vlastite potrošnje s mogućnošću isporuke viška električne energije u elektroenergetsku mrežu. Korisnici postrojenja za samoopskrbu za razliku od krajnjih kupaca s vlastitom proizvodnjom u kalendarskoj godini moraju imati veću ili jednaku količinu preuzete energije iz elektroenergetske mreže od proizvede energije na vlastitom postrojenju, u protivnom gube status korisnika postrojenja za samoopskrbu i postaju krajnji kupci s vlastitom proizvodnjom (kategorija za pravne osobe; poduzetnici i obrtnici), što zbog načina obračuna nije pogodno za kućanstva. Naime, u statusu krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom plaća se sva preuzeta električna energija po punoj cijeni, te se poslije toga obračunava proizvedena energija po drastično nižoj cijeni.

3.5. Trenutno stanje u obnovljivim izvorima energije u 2021. godini

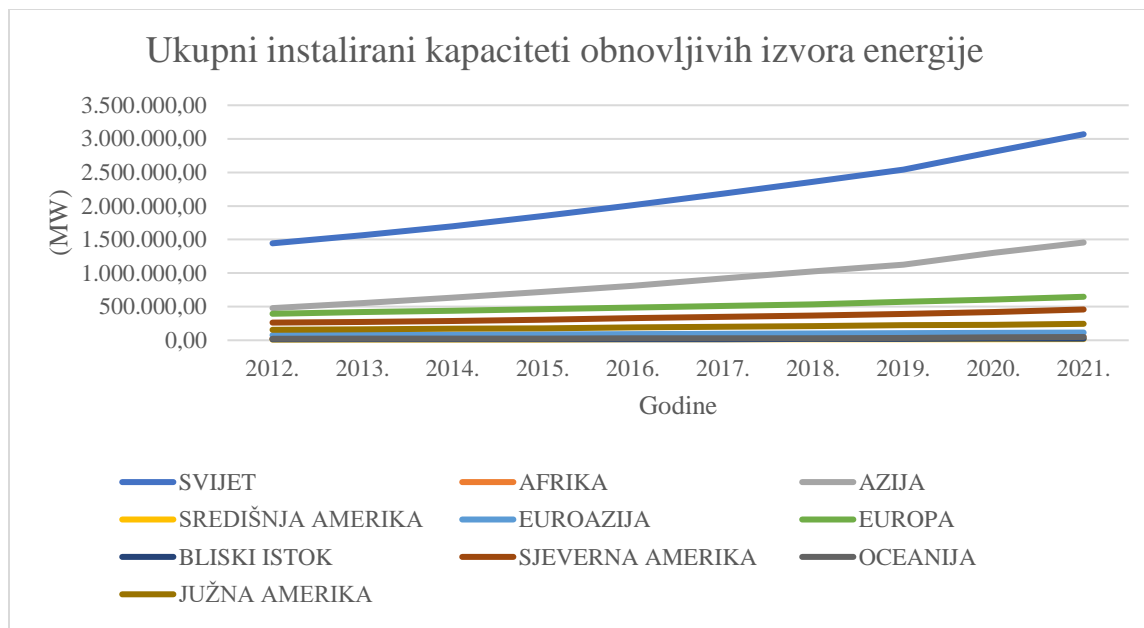
U razdoblju nakon pojave COVID-19 pandemije gospodarstvo se počelo oporavljati što je rezultiralo za otprilike 6% većom globalnom potrebom za energijom koja se u najvećoj mjeri pokrila fosilnim gorivom (više od pola iznosa novih potreba). Iznenadni rast cijena energije u zadnjoj polovici godine te invazija Ruske Federacije na teritorij Ukrajine početkom 2022. godine doprinjeo je globalnoj energetskej krizi. Trenutni energetskei sustavi se još uvijek baziraju na fosilnim gorivima, što ovu krizu čini alarmantnom, ali i sugerira kako bi se obnovljivi izvori energije trebali naći u fokusu političkog rješenja za istu. Potrebno je što prije prijeći na obnovljive izvore energije kako u gospodarskim aktivnostima, tako i u društvenim. Samo energetskei efikasno gospodarstvo utemeljeno na obnovljivim izvorima električne energije može mjenjati pravila igre za jeftiniji, održiviji i u konačnici sigurniji energetskei sustav [18].

3.5.1. Stanje u svijetu

Energetski sektor predstavlja najveći uspjeh u implementiranju obnovljivih izvora energije u 2021. godini. Dodano je rekordnih 315 GW novih izvora obnovljive energije čime je ukupna instalirana snaga istih porasla na 3146 GW. Više od pola novoinstaliranih izvora čine fotonaponski sustavi (oko 175 GW), dok su vjetroelektrane sa 102 GW na drugom mjestu. Sve više zemalja odlučuje se na proširivanje instaliranih kapaciteta obnovljivih izvora energije, pa je tako više od 40 zemalja u svijetu sa instaliranom snagom većom od 10 GW (za razliku od 2011. godine kad je tek 9 zemalja imalo instaliranu snagu obnovljivih izvora veću od 10 GW), dok je Kina prva zemlja koja je premašila 1 TW instaliranog kapaciteta obnovljivih izvora energije (136 GW novoinstaliranog kapaciteta u 2021. godini). Na slici 5 prikazan je omjer ukupnog i novoinstaliranog kapaciteta obnovljivih izvora električne energije za pet zemalja koje su vodeće po novoinstaliranoj snazi u 2021. godini [18].



Slika 5: Omjer ukupnog i novoinstaliranog kapaciteta obnovljivih izvora električne energije
Ukupni instalirani kapaciteti obnovljivih izvora električne energije od 2012. do 2021. godine bilježe rastući trend na globalnoj razini što je prikazano na slici 6.

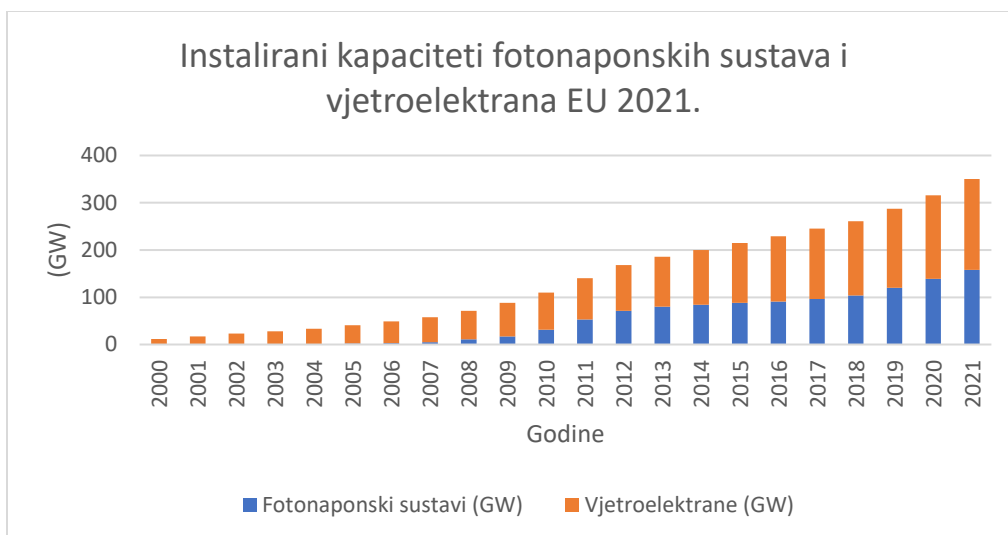


Slika 6: Ukupni instalirani kapaciteti obnovljivih izvora energije [18]

Kao što se može povezati s prethodnim grafikonom, Azija prednjači po ukupnim instaliranim kapacitetima obnovljivih izvora energije u promatranom razdoblju, a na globalnoj razini ti kapaciteti rastu po stopi između 8 i 10%.

3.5.2. Stanje u Europskoj uniji

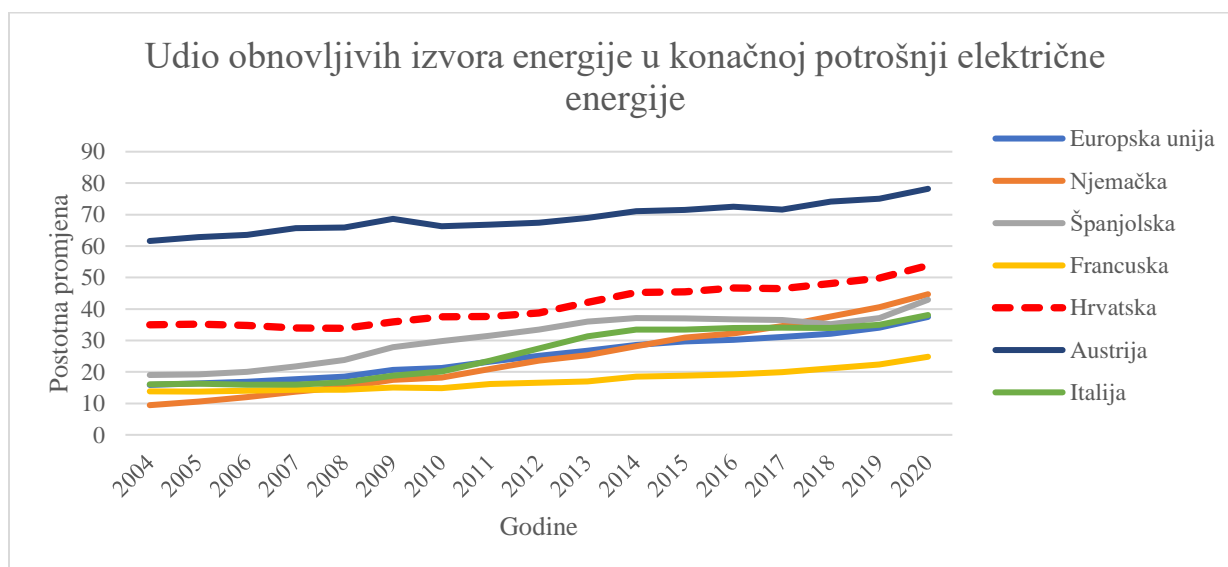
U godini 2021. postignut je rekord proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora u Europskoj uniji od 1068 TWh (povećanje od 1% u odnosu na prošlu 2020. godinu, odnosno 9% u odnosu na 2019 godinu). Obnovljivi izvori proizveli su 37% električne energije EU (za razliku od 34% iz 2019. godine). Prvi puta se dogodilo i da su fotonaponski sustavi zajedno sa vjetroelektranama proizveli više električne energije (547 TWh) od elektrana na fosilni plin (524 TWh), ukupnog udjela od 19% električne energije 2021. godine. Na slici 7 prikazani su instalirani kapaciteti fotonaponskih sustava Europske unije od 2005. do 2021. godine.



Slika 7: Instalirani kapaciteti fotonaponskih sustava Europske unije 2005-2021

3.5.3. Stanje u Republici Hrvatskoj

Prema izvještaju Republika Hrvatska trenutno proizvodi oko 69% električne energije putem obnovljivih izvora, uključujući hidroelektrane koje proizvode 46%, vjetroelektrane sa 15% proizvedene električne energije, biomasu sa 7%, fotonaponske sustave sa 1% te ostale oblike izvora električne energije.



Slika 8: Udio obnovljivih izvora energije u konačnoj potrošnji električne energije [18]

Na prikazanoj slici 8 uočava se pozicija Republike Hrvatske po udjelu obnovljivih izvora energije u konačnoj potrošnji u odnosu na Europsku uniju i izabrane zemlje. U promatranom periodu Hrvatska se s promjenom od 35 do 54% nalazi iznad Njemačke, Francuske, Španjolske i Italije te se nalazi iznad prosjeka Europske unije.

4. Toplinske crpke

Toplinske crpke su visokoučinkoviti sustavi za proizvodnju toplinske energije, odnosno sustavi koji prenose toplinu između dva toplinska spremnika; niskotemperaturnog toplinskog spremnika iz kojeg se apsorbira toplinska energija i visokotemperaturnog toplinskog spremnika kojem se predaje apsorbirana energija uvećana za energiju kompresije. Upotrebljavaju se u različitim veličinama; od najmanjih za zagrijavanje stambenih jedinica, pa do velikih sustava koji griju stambene komplekse ili naselja. U dostupnoj literaturi ih može se pronaći pod nazivima toplinske crpke, toplinske pumpe ili dizalice topline.

Sustav toplinske crpke sastoji se od tri kruga [19]:

- kruga izvora topline - medij ili prostor nižeg temperaturnog nivoa iz kojeg se apsorbira toplina (vanjski zrak, podzemne ili površinske vode, tlo i sl.),
- kruga radnog medija - medij koji se koristi kao posrednik za prijenos toplinske energije, najčešće jedan od halogenih ugljikovodika (CFC, HCFC ili HFC),
- kruga ponora topline - medij ili prostor višeg temperaturnog nivoa kojemu se apsorbirana energija predaje (unutarnji zrak u prostoriji, spremnik tople vode, niskotemperaturni sustav grijanja i sl.).

Uz grijanje, toplinske crpke se mogu prilagoditi kako bi radile u režimu hlađenja (ugradnjom četveroputnog ventila) što se postiže postupkom obrnutim od prethodno navedenog: ponor topline postaje tlo, podzemna voda ili zrak, a toplina se iz prostora odvodi na isparivaču crpke posredstvom zraka ili vode.

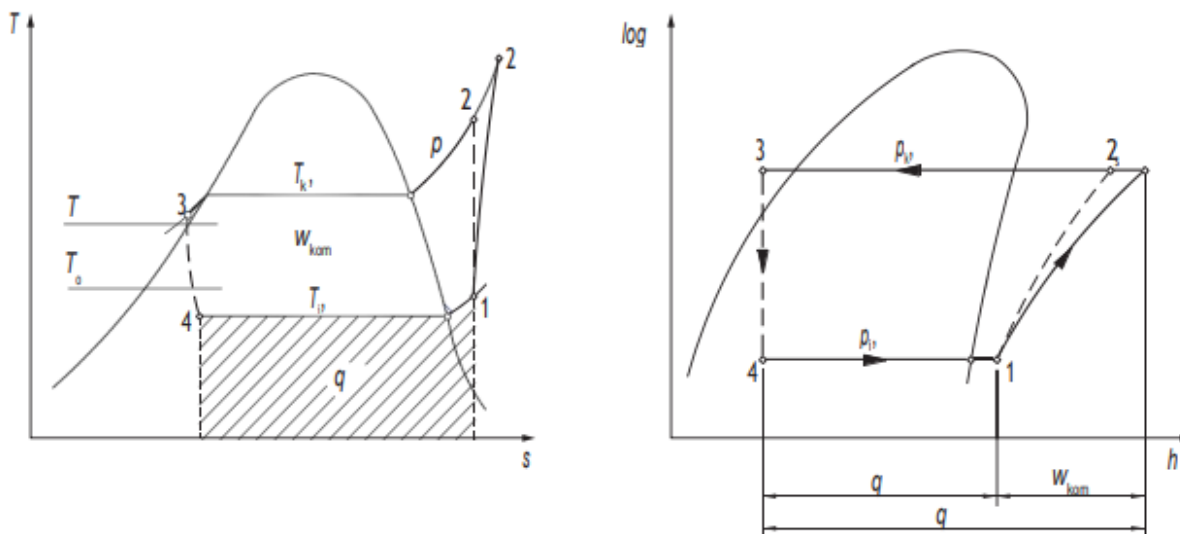
4.1. Princip rada

Toplinske crpke najčešće se dijele s obzirom na izvor dodatne energije za postizanje ljevokretnog kružnog procesa, odnosno prema vrsti kompenzacijske energije na [20]:

- Kompresijske toplinske crpke koje koriste mehanički rad za pogon uređaja.
- Sorpcijske toplinske crpke (apsorpcijske i adsorpcijske) koje koriste toplinsku energiju za pogon sustava.
- Vuilleumierove toplinske crpke koje se zbog složene konstrukcije i malog stupnja djelovanja u praksi najčešće ne koriste.

Kompresijske toplinske crpke sastavljene su od četiri osnovne komponente koje su povezane u zatvorenom krugu unutar kojeg cirkulira radni medij, isti kondenzira i isparava kao dio termodinamičkog procesa [21]:

1. Kompresor predstavlja element toplinske crpke koji omogućava prijenos toplinske energije s izvora topline na ponor topline uz dovedeni rad. Kako se toplina ne može prenijeti s tijela niže temperature na tijelo više temperature, kompresor usisavanjem pare radnom mediju snižava tlak i tako umjetnim putem postiže nižu temperaturu radnog medija od temperature medija čija se toplina preuzima i koji se na taj način hladi.
2. Kondenzator je izmjenjivač topline u kojem se radni medij kondenzira, odnosno oslobađanjem topline zagrijava prostor.
3. Ekspanzijski ventil koristi se za smanjenje tlaka i temperature radnog medija pri završetku procesa, smanjenje tlaka omogućuje ponovno isparavanje radnog medija pri dovođenju topline u isparivaču.
4. Isparivač radi na istom principu kao i kondenzator, on predstavlja izmjenjivač topline koji apsorbira toplinu iz okolnog medija, te uz pomoć apsorbirane topline dovodi do isparavanja radnog medija.



Slika 9: Prikaz ljevokretnog kružnog procesa na T-s dijagramu (lijevo) i log p-h dijagramu (desno) [22]

Rad toplinske crpke zasniva se na ljevokretnom kružnom procesu koji je predložen na slici 9. Pri ulasku u isparivač radna tvar je najvećim dijelom u kapljevitom stanju (stanje 4), gdje pri najčešće konstantnoj temperaturi apsorbirajući toplinsku energiju iz kruga izvora topline isparava pri tlaku isparavanja (promjena stanja 4-1: isparavanje). Pri izlasku iz isparivača radna tvar je u blago pregrijanom ili suho zasićenom stanju (stanje 1). Kompresor usisava paru u blago pregrijanom stanju s tlakom isparavanja i kompresira ju na tlak kondenzacije (promjena stanja 1-2: kompresija), pri čemu podiže temperaturu radnog medija za energiju kompresije. Radna tvar ulazi u kondenzator kao pregrijana para (stanje 2) gdje se zbog predaje topline krugu ponora hladi do temperature kondenzacije pri konstantnom visokom tlaku gdje prelazi u kapljevito stanje (stanje 3). Toplota kondenzacije (promjena stanja 2-3: kondenzacija) koju je neophodno predati grijanom mediju ekvivalentna je toplini apsorbiranoj u isparivaču uvećanoj za energiju dovedenu na kompresoru. Ukapljena radna tvar potom ulazi u ekspanzijski ventil koji reducira tlak radne tvari s tlaka kondenzacije na tlak isparavanja što kao posljedicu ima i smanjenje temperature radne tvari (promjena stanja 3-4: ekspanzija) [19].

4.2. Učinkovitost toplinskih crpki

Učinkovitost grijanja toplinske crpke iskazuje se koeficijentom učinkovitosti (eng. *Coefficient of Performance*, COP) koji predstavlja kvocijent izlazne energije toplinske crpke i električne energije potrebne za rad toplinske crpke na određenoj vanjskoj temperaturi. Koeficijent učinkovitosti za toplinske crpke pogonjene električnom energijom iznosi najmanje 3.5 pri projektiranim uvjetima, što znači da toplinske crpke sa takvim koeficijentom učinkovitosti za 1 kWh dovedene električne energije proizvedu 3.5 kWh toplinske energije. Što je koeficijent učinkovitosti veći, sustav je učinkovitiji [21].

Hlađenje toplinskom crpkom definirano je faktorom hlađenja (eng. *Energy efficiency ratio*, EER). Slično kao kod koeficijenta učinkovitosti, faktor hlađenja predstavlja kvocijent odvedene toplinske energije i električne energije potrebne za rad toplinske crpke na određenoj vanjskoj temperaturi.

Od 2013 godine osim koeficijenta učinkovitosti i faktora hlađenja primjenjuje se sezonski koeficijent učinkovitosti (eng. *Seasonal Coefficient of Performance*, SCOP), odnosno sezonski faktor hlađenja (eng. *Seasonal Energy efficiency ratio*, SEER). Isti definiraju koeficijent učinkovitosti tijekom zimskog razdoblja za potrebe grijanja i faktor hlađenja tijekom ljetnog razdoblja za potrebe hlađenja [23].

4.3. Izvori topline

Za učinkovitost sustava toplinske crpke od vrlo je velike važnosti izvor topline koji treba osigurati dovoljnu količinu topline u svako doba godine na što većoj temperaturi, dok u isto vrijeme troškovi priključenja na izvor trebaju biti što niži. Uz to energija potrebna za prijenos topline do isparivača toplinske crpke treba biti što manja. Kao niskotemperaturni toplinski spremnici mogu se koristiti zrak, sunčeva i otpadna toplina, ili se toplina isparivaču dovodi preko izmjenjivača koji se polaže u zemlju, te voda (riječna, jezerska, morska i podzemna) [19].

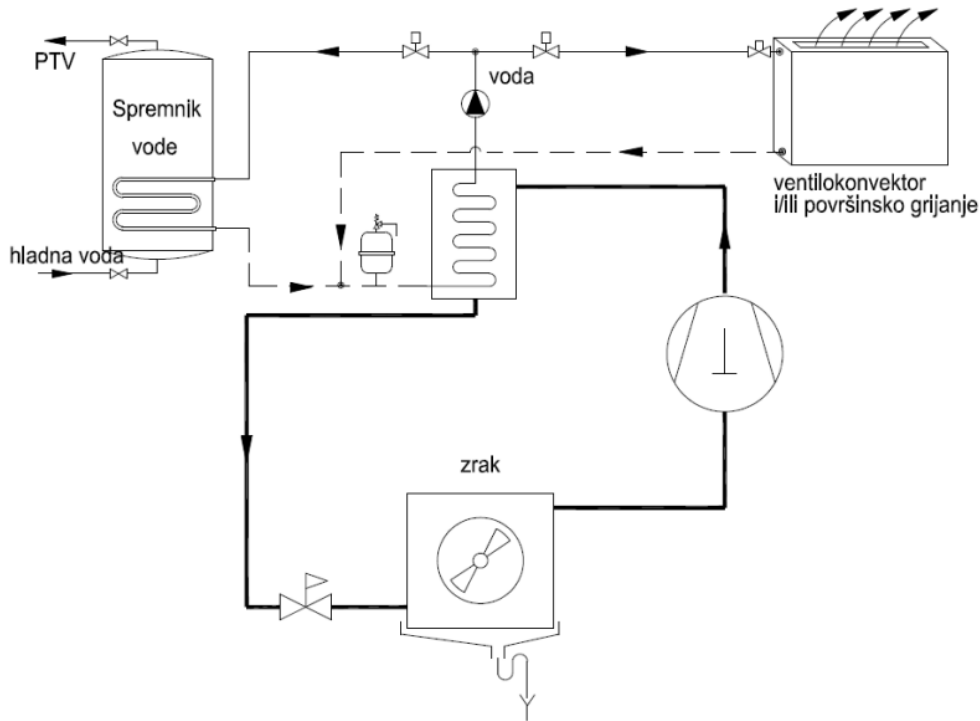
Prema EU Direktivi 2009/28/EC definirani su sljedeći izvori obnovljive energije; zrak (aerotermaalni izvori), voda (hidrotermalni izvori) i tlo (geotermaalni izvori), kako je prezentirano u tablici 1 [24].

Tablica 1: Prikaz izvora toplinske energije toplinskih crpki i pripadajućih distribucijskih sustava [24]

| | | |
|--|--|---|
| Izvor energije / sredstvo distribucije | Distribucijski sustav na bazi vode, obično se upotrebljava za grijanje, ograničene upotrebe kada je u pitanju hlađenje | Distribucija zraka (s kanalima ili bez njih), upotrebljava se za grijanje i hlađenje, kao i odvlaživanje prostora |
| Zrak | Zrak/voda - izvor energije je zrak, dok se za distribuciju koristi voda | Zrak/zrak - koriste zrak i kao izvor i kao sustav distribucije |
| Voda | Voda/voda - izvor energije je voda (jezera, podzemne ili površinske vode), distribucijski sistem je također na bazi vode | Voda/zrak - izvor toplinske energije je voda, distribucija energije preko zraka |
| Tlo | Tlo/voda – geotermalni izvor energije, distribucijski sustav na bazi vode | Tlo/zrak – geotermalni izvor toplinske energije, distribucija zrakom |

4.4. Zrak kao izvor topline

Okolišni zrak je najpristupačniji toplinski izvor za toplinske crpke, a uz okolišni moguće je upotrijebiti i otpadni ili onečišćeni zrak iz ventilacijskog sustava, kao i zrak iz brojnih drugih procesa [20]. Apsorpcija topline iz zraka omogućena je uz pomoć rebrastog izmjenjivača topline s prisilnom cirkulacijom zraka, gdje je razlika između izvora topline (zraka) i radnog medija koji isparava između 6 i 10 °C [19]. Moguće izvedbe toplinskih crpki koje koriste zrak kao izvor topline su zrak/zrak i zrak/voda.



Slika 10: Shematski prikaz toplinske crpke zrak/voda [19]

Toplinska crpka sa shematskog prikaza na slici 10 koristi zrak kao izvor toplinske energije, dok za distribuciju topline u prostor, kao i zagrijavanje spremnika sanitarne vode koristi vodu kao radni medij [19].

Verzija zrak/zrak najčešća je verzija toplinske crpke sa zrakom kao izvorom, te kao takva čini 51% prodanih toplinskih crpki u razdoblju od 2009.-2018. u zemljama Europske Unije [25]. Ovaj tip toplinskih crpki klasificira se prema načinu distribucije energije na:

- Kanalne – zrak se grije, odnosno hladi prolaskom preko izmjenjivača koji se nalazi u samom kanalu.
- Bez kanala – unutarnji izmjenjivač nalazi se u unutarnjoj jedinici toplinske crpke i direktno hladi odnosno grije unutarnji zrak (primjer ovog sustava je inverterski klimatizacijski uređaj).

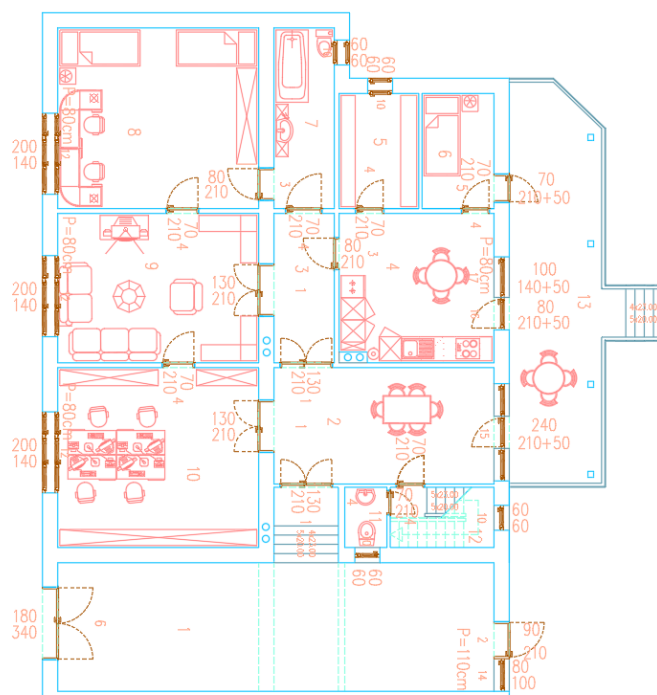
Negativan aspekt korištenja zraka kao izvora je svakako njegova promjenjiva temperatura koja znatno utječe na koeficijent učinkovitosti toplinske crpke, tj. s nižom temperaturom koeficijent učinkovitosti je niži i obratno. Potrebno je napomenuti i opasnost od stvaranja leda iinja na samom

isparivaču pri kritičnim temperaturama okolišnog zraka u slučaju kada je količina vlage najveća, od -3 do 2 °C. Pri spomenutim temperaturama dolazi do blokiranja otvora za zrak na isparivaču, što smanjuje apsorpciju topline [19]. Odleđivanje isparivača postiže se grijačima ili jednostavnije preokretanjem procesa hlađenja [20].

5. Projektni zadatak primjene fotonaponskog sustava za napajanje toplinske crpke na primjeru obiteljske kuće

5.1. Zatečeno stanje objekta

Objekt izvođenja projekta je prizemna kuća stambene namjene u Slavonskom Brodu, na adresi Ivana Gundulića 22 prikazana na slici 11. Bruto površina stambene kuće iznosi 217,24 m², dok neto iznosi 180,21 m². Kuća se sastoji od 12 prostorija: blagovaonice, hodnika, dnevnog boravka, kupaonice, ostave, dječje sobe, roditeljske sobe, vešeraja, kupaonice, toaleta, haustora i stubišta. Izolirana je polistirenom (stiroporom) debljine 10 cm, a vanjski zidovi su zidani ciglom debljine 38 cm što u znatnoj mjeri pridonosi energetskej učinkovitosti objekta. Prozori objekta su dupli, izrađeni od drveta, kao i vrata.



Slika 11: Tlocrt obiteljske kuće

Grijanje prostora izvedeno je preko nisko temperaturnog centralnog grijanja na plin. Kao generator topline koristi se kondenzacijski kombi bojler od 16 kW koji napaja 9 radijatora ukupne snage 30 kW.

5.2. Proračun energije potrebne za napajanje toplinske crpke

Kao što je spomenuto, obiteljska kuća trenutno se grije uz pomoć plinskog kondenzacijskog bojlera od 16 kW sa temperaturom polaznog voda od 35 °C . U tablici 2 prikazana je godišnja potrošnja plina u kWh za kućanstvo u 2021. godini.

Tablica 2: potrošnja u 2021. godini po mjesecima

| Mjesec | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. | 8. | 9. | 10. | 11. | 12. |
|-----------------------|------|------|------|------|-----|----|----|----|----|-----|-----|------|
| Potrošnja plina (kWh) | 4678 | 3590 | 3301 | 2104 | 931 | 0 | 0 | 0 | 0 | 618 | 845 | 5841 |

Za potrebe zagrijavanja prostora odabrana je toplinska crpka MHP12RP24P3CM proizvođača Centrometal. Radi se o monoblok verziji toplinske crpke nazivnog toplinskog učinka 12 kW. Tehničke specifikacije spomenute toplinske crpke prikazane su na tablicama 3 i 4.

Tablica 3: specifikacije toplinske crpke MHP12RP24P3CM

| | | |
|---|----------------------------------|----------------------------------|
| Naziv modela | MHP12RP25P3CM | |
| kW | 12 | |
| Napajanje (V/P/Hz) | 380-415/3/50 | |
| Grijanje (A7°C/W35) | Učin (kW) | 12,3 |
| | Ulazna snaga (kW) | 2,54 |
| | COP | 4,84 |
| Grijanje (A7°C/W45) | Učin (kW) | 12,4 |
| | Ulazna snaga (kW) | 3,45 |
| | COP | 3,59 |
| Grijanje (A7°C/W55) | Učin (kW) | 11,9 |
| | Ulazna snaga (kW) | 4,24 |
| | COP | 2,81 |
| Hlađenje (A35°C/W18) | Učin (kW) | 12,2 |
| | Ulazna snaga (kW) | 2,53 |
| | COP | 4,83 |
| Hlađenje (A35°C/W7) | Učin (kW) | 10,9 |
| | Ulazna snaga (kW) | 3,72 |
| | COP | 2,93 |
| Sezonska klasa energetske efikasnosti grijanja prostora | Polazni vod grijanja 35°C | A++ |
| | Polazni vod grijanja 55°C | A++ |
| SCOP | Polazni vod grijanja 35°C | 4,29 |
| | Polazni vod grijanja 55°C | 3,23 |
| SEER | Polazni vod hlađenja 7°C | 4,85 |
| | Polazni vod hlađenja 18°C | 7,5 |
| Kompresor | Tip | DC inverter s dvostrukim rotorom |
| Vanjski ventilator | Tip motora | DC motor bez četkica |
| | Broj ventilatora | 2 |
| | Protok zraka (m ³ /h) | 6150 |
| Izmjenjivač topline - zrak | Tip | Orebrena cijev |

Tablica 4: specifikacije toplinske crpke MHP12RP24P3CM [27]

| | | |
|---|--------------------|-----------------------------------|
| Naziv modela | | MHP12RP25P3CM |
| Maksimalna zaštita od nadstruje (A) | | 15 |
| Minimum ampera u krugu (A) | | 11 |
| Izmjenjivač topline na strani vode | | Pločasti tip |
| Cirkulacijska pumpa | Visina dobave (m) | 7,5 |
| Ekspanzijska posuda | Volumen (L) | 5 |
| Radni medij | Tip | R32 |
| | Punjenje (kg) | 2,8 |
| Vrsta ventila | | Elektronički epkspanzijski ventil |
| Pomoćni električni grijač | Standardni (kW) | - |
| | Opcijski (kW) | 2/4 |
| | Broj stupnjeva | 1 |
| | Napajanje (V/P/Hz) | 380-415/3/50 |
| Nivo zvučne snage (dB(A)) | | 68 |
| Neto dimenzije (ŠxVxD) (mm) | | 1404x1414x405 |
| Dimenzije pakiranja (ŠxVxD) (mm) | | 1430x1475x450 |
| Neto/bruto masa bez pomoćnog grijača (kg) | | 172/193 |
| Neto/bruto masa s pomoćnim grijačem (kg) | | 177/198 |
| Cijevni spojevi (mm) | | 1-1/4" Male BSP |
| Tlak sigurnosnog ventila (MPa) | | 0,3 |
| Ukupni volumen vode (L) | | 3,2 |
| Raspon radne temperature | Hlađenje (°C) | -5 do 46 |
| | Grijanje (°C) | -25 do 35 |
| | PTV (°C) | -25 do 43 |
| Raspon temperature polaza | Hlađenje (°C) | 5 do 25 |
| | Grijanje (°C) | 25 do 60 |
| | PTV (°C) | 40 do 60 |

Kako se radi o toplinskoj crpki zrak-voda, pri izračunu potrošnje električne energije potrebno je uzeti u obzir i vanjsku temperaturu zraka za Slavonski Brod koja je prikazan u tablici 5 [28].

Tablica 5: srednja temperatura zraka za Slavonski Brod u razdoblju od 1963. do 2021. godine

| Mjesec | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. | 8. | 9. | 10. | 11. | 12. |
|---------------------------------------|------|----|-----|------|----|------|------|------|----|------|-----|-----|
| Srednja temperatura zraka (°C) | -0,2 | 2 | 6,4 | 11,4 | 16 | 19,6 | 21,2 | 20,5 | 16 | 10,8 | 5,8 | 1,3 |

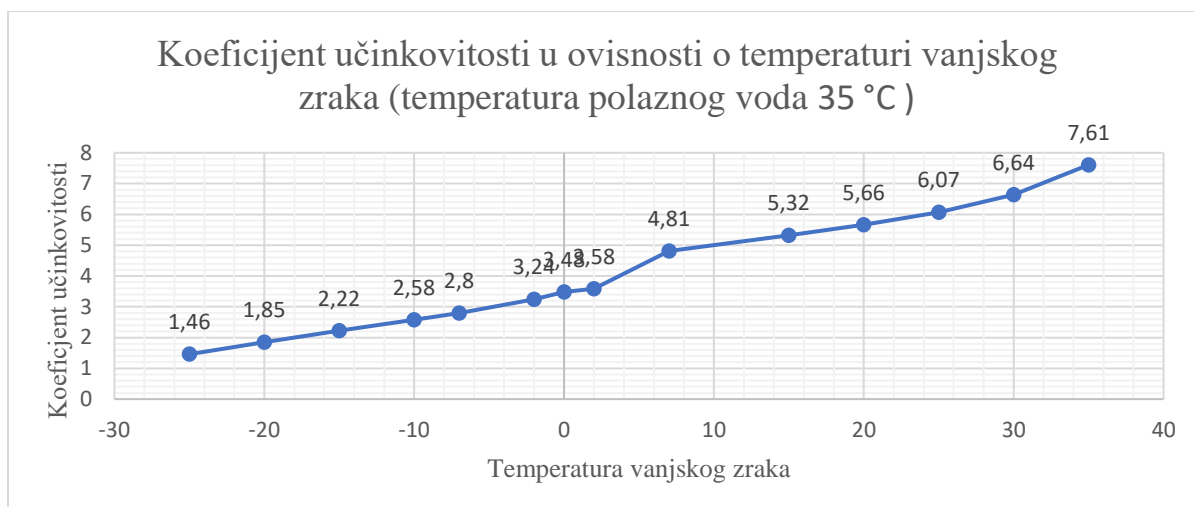
Koeficijenti učinkovitosti za pojedine vanjske temperature, kao i za različite temperature polaznog voda grijanja predočene su u tablici 6 iz koje je vidljivo kako učinkovitost toplinske crpke opada sa smanjenjem temperature, isto kao i sa povećanjem temperature polaznog voda. Oznake u tablici

su sljedeće: HC je ukupni učin grijanja, PI ulazna električna snaga, a COP koeficijent učinkovitosti.

Tablica 6: Učin grijanja MHP12RP24P3CM u ovisnosti o temperaturi zraka i temperaturi polaznog voda [27]

| Temperatura vanjskog zraka | | DB (°C) | -25 | -20 | -15 | -10 | -7 | -2 | 0 | 2 | 7 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
|---|----|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | WB (°C) | - | - | - | -11 | -8 | -3 | -1 | 1 | 6 | 12 | 15 | 18 | 22 | 24 |
| Temperatura polaznog voda grijanja (°C) | 30 | HC | 6,4 | 8,21 | 10 | 11,8 | 12,9 | 12,4 | 12,3 | 12,3 | 12,4 | 13,7 | 13,9 | 13,5 | 12,6 | 11,2 |
| | | PI | 3,96 | 4,02 | 4,08 | 4,14 | 4,17 | 3,49 | 3,2 | 3,01 | 2,13 | 2,12 | 2,02 | 1,83 | 1,56 | 1,21 |
| | | COP | 1,62 | 2,04 | 2,46 | 2,86 | 3,09 | 3,56 | 3,85 | 4,08 | 5,83 | 6,64 | 6,89 | 7,39 | 8,09 | 9,26 |
| | 35 | HC | 5,95 | 7,63 | 6,31 | 11 | 12 | 12,1 | 12,2 | 12,2 | 12,3 | 13,7 | 13,9 | 13,5 | 12,6 | 11,1 |
| | | PI | 4,07 | 4,13 | 4,19 | 1,25 | 4,29 | 3,74 | 3,5 | 3,41 | 2,56 | 2,57 | 2,45 | 2,22 | 1,89 | 1,46 |
| | | COP | 1,46 | 1,85 | 2,22 | 2,58 | 2,8 | 3,24 | 3,48 | 3,58 | 4,81 | 5,32 | 5,66 | 6,07 | 6,64 | 7,61 |
| | 40 | HC | | 7,05 | 8,6 | 10,2 | 11,1 | 11,8 | 12 | 12,1 | 12,2 | 13,7 | 13,8 | 13,5 | 12,5 | 11,1 |
| | | PI | | 4,24 | 4,31 | 4,37 | 4,41 | 3,99 | 3,8 | 3,8 | 2,99 | 3,03 | 2,88 | 2,62 | 2,23 | 1,72 |
| | | COP | | 1,66 | 2 | 2,32 | 2,52 | 2,96 | 3,16 | 3,19 | 4,08 | 4,51 | 4,8 | 5,14 | 5,63 | 6,44 |
| | 45 | HC | | | 7,9 | 9,33 | 10,2 | 11,5 | 11,8 | 12,1 | 12,1 | 13,6 | 13,8 | 13,4 | 12,5 | 11,1 |
| | | PI | | | 4,42 | 4,49 | 4,52 | 4,24 | 4,1 | 4,2 | 3,42 | 3,48 | 3,31 | 3,01 | 2,56 | 1,98 |
| | | COP | | | 1,79 | 2,08 | 2,25 | 2,71 | 2,89 | 2,87 | 3,54 | 3,19 | 4,16 | 4,46 | 4,88 | 5,59 |
| | 50 | HC | | | 7,19 | 8,49 | 9,27 | 11,2 | 11,7 | 12 | 12 | 13,6 | 13,7 | 13,4 | 12,5 | 11 |
| | | PI | | | 4,54 | 4,6 | 4,64 | 4,5 | 4,4 | 4,6 | 3,85 | 3,94 | 3,75 | 3,4 | 2,9 | 2,24 |
| | | COP | | | 1,59 | 1,84 | 2 | 2,49 | 2,66 | 2,6 | 3,12 | 3,45 | 3,66 | 3,93 | 4,3 | 4,93 |
| | 55 | HC | | | | 7,66 | 8,36 | 10,9 | 11,5 | 11,9 | 11,9 | 13,5 | 13,7 | 13,3 | 12,4 | 11 |
| | | PI | | | | 4,72 | 4,76 | 4,75 | 4,7 | 5 | 4,28 | 4,39 | 4,18 | 3,79 | 3,23 | 2,5 |
| | | COP | | | | 1,62 | 1,76 | 2,29 | 2,45 | 2,38 | 2,78 | 3,08 | 3,27 | 3,51 | 3,84 | 4,4 |
| | 60 | HC | | | | 4,59 | 5,02 | 6,54 | 6,91 | 7,14 | 7,14 | 8,11 | 8,21 | 7,99 | 7,45 | |
| | | PI | | | | 3,45 | 3,47 | 3,47 | 3,43 | 3,65 | 3,12 | 3,2 | 3,05 | 2,77 | 2,36 | |
| | | COP | | | | 1,33 | 1,44 | 1,89 | 2,02 | 1,96 | 2,28 | 2,53 | 2,69 | 2,89 | 3,16 | |

Kako je postojeća instalacija grijanja predviđena za rad sa temperaturom polaznog voda od 35 °C iz tablice 6 proizašao je graf na slici 14 koji slikovito predstavlja ovisnost koeficijenta učinkovitosti odabrane toplinske crpke i vanjsku temperaturu zraka.

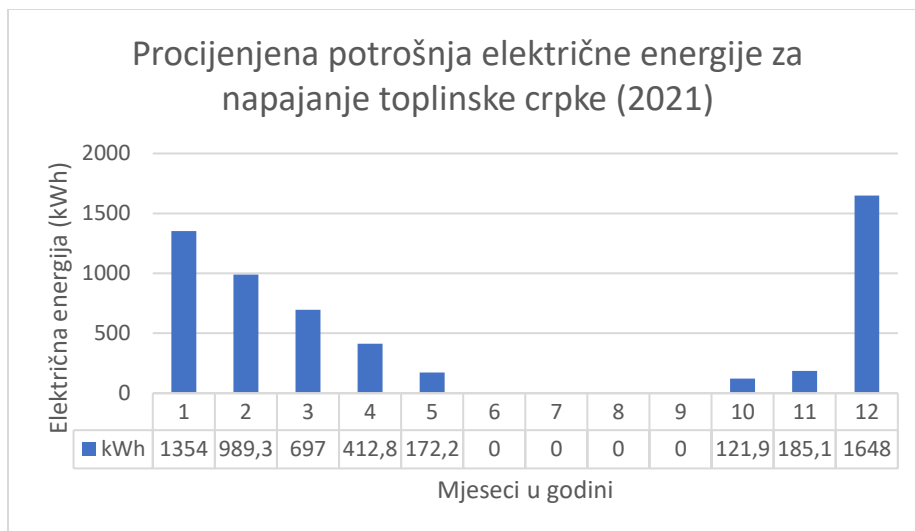


Slika 12: Koeficijent učinkovitosti u ovisnosti o temperaturi vanjskog zraka u režimu grijanja
 Uzimajući u obzir srednje temperature iz tablice 6 i ovisnost koeficijenta učinkovitosti sa slike 12, dobivena je tablica 7 koja prikazuje koeficijente učinkovitosti na temperaturama potrebnim za proračun.

Tablica 7: Koeficijent učinkovitosti (COP) u ovisnosti o srednjoj temperaturi za Slavonski Brod

| Mjesec | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. | 8. | 9. | 10. | 11. | 12. |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Srednja temperatura vanjskog zraka | -0,2 | 2,2 | 6,7 | 11,5 | 16,3 | 19,9 | 21,6 | 20,9 | 16,3 | 11,1 | 6 | 1,3 |
| Koeficijent učinkovitosti | 3,456 | 3,629 | 4,736 | 5,097 | 5,408 | 5,653 | 5,791 | 5,734 | 5,408 | 5,071 | 4,564 | 3,545 |

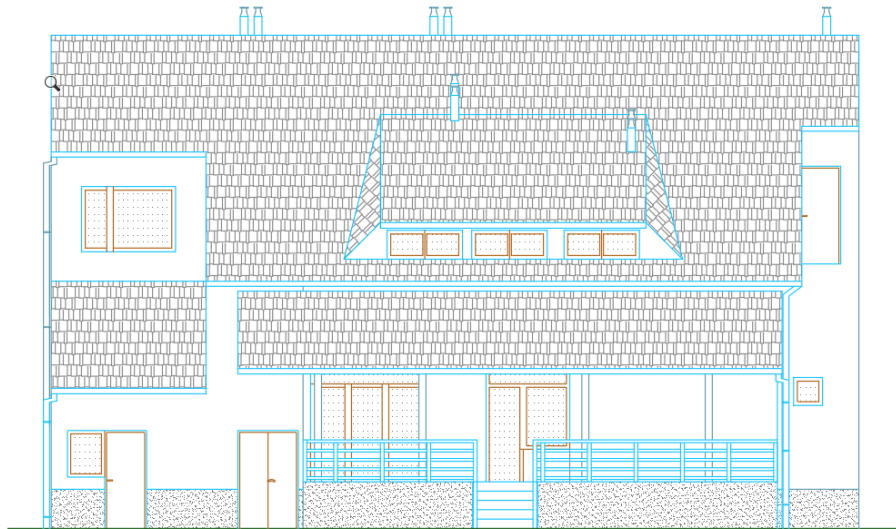
Podjelivši energiju potrošenog plina iz tablice 2 sa koeficijentom učinkovitosti iz tablice 7, dobivena je približna mjesečna potrošnja električne energije potrebne za napajanje odabrane toplinske crpke koja je prikazana na slici 13.



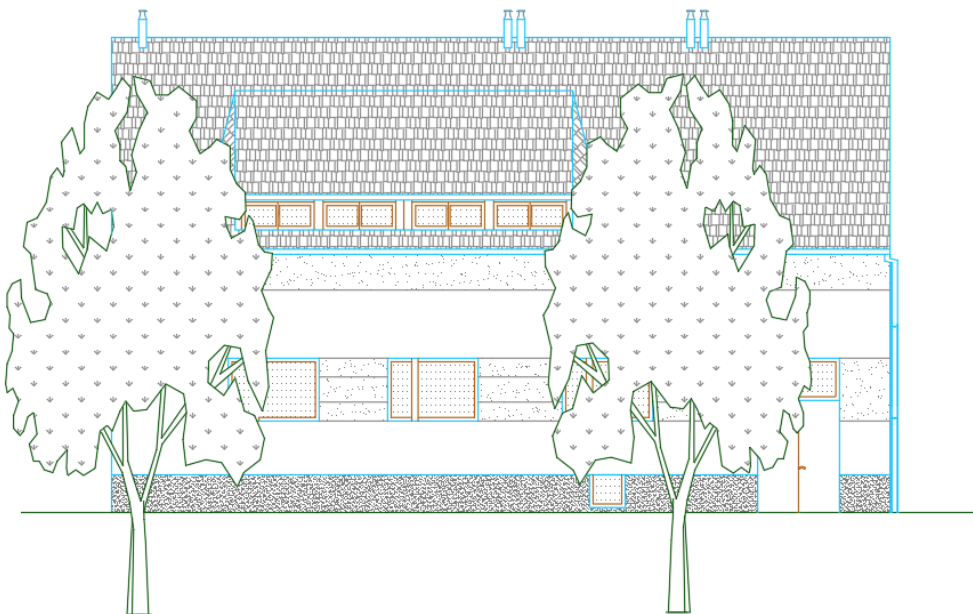
Slika 13: Procijenjena potrošnja električne energije za napajanje toplinske crpke MHP12RP24P3CM na temelju potrošene energije za zagrijavanje objekta u godini 2021.

5.3. Proračun fotonaponskog sustava

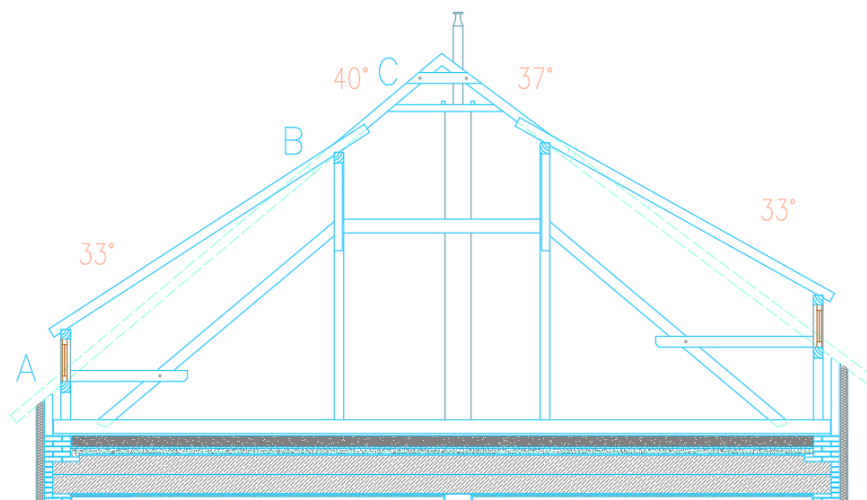
Krov objekta je dvostrešan, tj, krovna konstrukcija je izvedena sa dvije kose plohe. Orijentacija krova je istok – zapad sa po jednim krovčićem na svakoj strani. Istočna strana krova (prikaz krovišta na slici 14) je pod nagibom od 37° , sa krovčićem nagiba 33° , dok zapadna strana (prikaz krovišta na slici 15) krova ima nagib od 40° i krovčić od 33° kako je prikazano na slici 16.



Slika 14: Prikaz istočnog dijela krova



Slika 15: Prikaz zapadnog dijela krova



Slika 16: Presjek krovišta

Za potrebe rada koristi se fotonaponski modul domaćeg proizvođača SOLVIS d.o.o. SV60-330 E čije karakteristike su opisane u tablici 8, tablici 9 i tablici 10.

Tablica 8: STC i NOCT karakteristike modula SV60-330 E [26]

| Model – SV60-330 E | | STC | NOCT |
|---------------------------------------|---|---------|---------|
| Vršna snaga P_{MPP} | W | 330 | 240,1 |
| Dozvoljeno odstupanje | W | -0/+4,9 | -0/+4,9 |
| Struja kratkog spoja I_{SC} | A | 10,3 | 8,27 |
| Napon praznog hoda U_{OC} | V | 40,5 | 37,2 |
| Nazivna struja I_{MPP} | A | 9,74 | 7,8 |
| Nazivni napon U_{MPP} | V | 33,88 | 30,8 |
| Dozvoljeno odstupanje napona i struje | % | ± 3 | |
| Učinkovitost modula | % | 19,88 | |

STC (engl. *Standard Test Conditions*) predstavlja parametre pri standardnim testnim uvjetima (1000 W/m² ozračenje, 25 °C temperatura ćelije, optička masa zraka 1,5 g), dok je NOCT (engl. *Nominal Operating Cell Temperature*) nominalna radna temperatura modula (800 W/m² ozračenje, 25 °C temperatura ćelije i brzina vjetra od 1 m/s).

Tablica 9: Mehaničke karakteristike modula SV60-330 E [26]

| | | |
|-----------------------|----|--|
| Dimenzije (V x Š x D) | mm | 1660 x 1000 x 35 |
| Masa | kg | 18,9 |
| Broj i vrsta ćelija | | 60 ćelija, monokristalični Si (PERC) 157 x 157 mm ± 2 mm |
| Enkapsulacija ćelija | | Etilen-vinil acetat (EVA) |
| Staklo | | 3,2 mm kaljeno sunčano staklo |
| Pozadina | | Višeslojna poliesterska folija |
| Okvir | | Okvir od anodiziranog aluminijskog s dvostrukom stjenkom i otvorima za drenažu |
| Priključna kutija | | IP67 s 3 Bypass diode |
| Priključni kabeli | | Kabel 4mm ² , dužine 1200 mm |

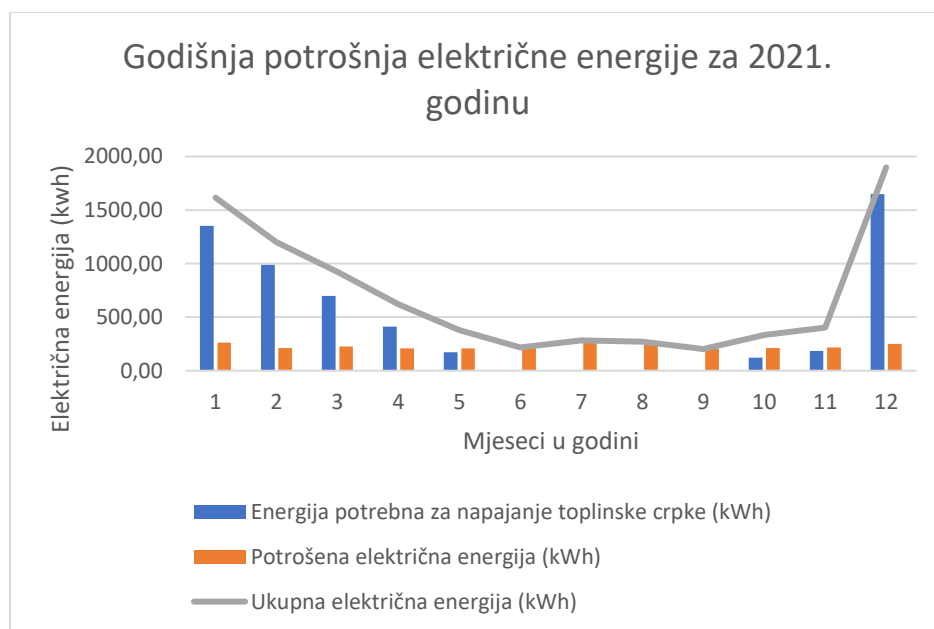
Tablica 10: Radni uvjeti i temperaturne karakteristike modula SV60-330 E [26]

| Radni uvjeti | | |
|--|-----|---|
| Temperaturno područje | °C | -40 do +85 |
| Maksimalni napon sustava | V | 1000 |
| Najveća dopuštena prekidna struja osigurača po nizu fotonaponskih modula | | 15A |
| Najveća dopuštena reverzna struja | | 15A |
| Maksimalno opterećenje | | Prednja strana 5400 Pa, stražnja strana 2400 Pa |
| Otpornost na udar | | Tuča promjera 25 mm pri brzini 23 m/s |
| Temperaturne karakteristike | | |
| Temperaturni koeficijent snage P _{MPP} | %/K | -0,42 |
| Temperaturni koeficijent struje I _{SC} | %/K | 0,05 |
| Temperaturni koeficijent napona U _{OC} | %/K | -0,33 |

Na tablici 11 vidljiva je procijenjena potrošnja električne energije potrebne za zagrijavanje objekta, kao i električne energije koju je kućanstvo potrošilo u 2021. godini, grafički prikaz tablice vidljiv je na slici 17.

Tablica 11: Električna energija potrebna za kućanstvo za godinu 2021.

| Mjesec | Energija potrebna za napajanje toplinske crpke (kWh) | Potrošena električna energija (kWh) | Ukupna električna energija (kWh) |
|---------------|--|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1. | 1353,59 | 263,00 | 1616,59 |
| 2. | 989,25 | 210,00 | 1199,25 |
| 3. | 697,00 | 227 | 924,00 |
| 4. | 412,79 | 207 | 619,79 |
| 5. | 172,15 | 206,96 | 379,11 |
| 6. | 0,00 | 217,14 | 217,14 |
| 7. | 0,00 | 281,63 | 281,63 |
| 8. | 0,00 | 272,19 | 272,19 |
| 9. | 0,00 | 202,02 | 202,02 |
| 10. | 121,87 | 212,62 | 334,49 |
| 11. | 185,14 | 217,21 | 402,35 |
| 12. | 1647,67 | 250,62 | 1898,29 |
| Ukupno | 5579,47 | 2767,39 | 8346,86 |



Slika 17: Potrošena električna energija za 2021. godinu

Promatrajući godišnju potrošnju električne energije zaključeno je da bi fotonaponski sustav od 8,5 kWp pokrio potrošnju električne energije, ali i ostavio malu rezervu kako korisnik nebi prešao u status krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom. Na tablici 12 prikazani su ulazni i izlazni podatci za instaliranu snagu od 8,5 kWp za dvije verzije postavljanja (zapadni krov sa nagibom od 40° i istočni krov sa nagibom od 37°) iz alata PVGIS.

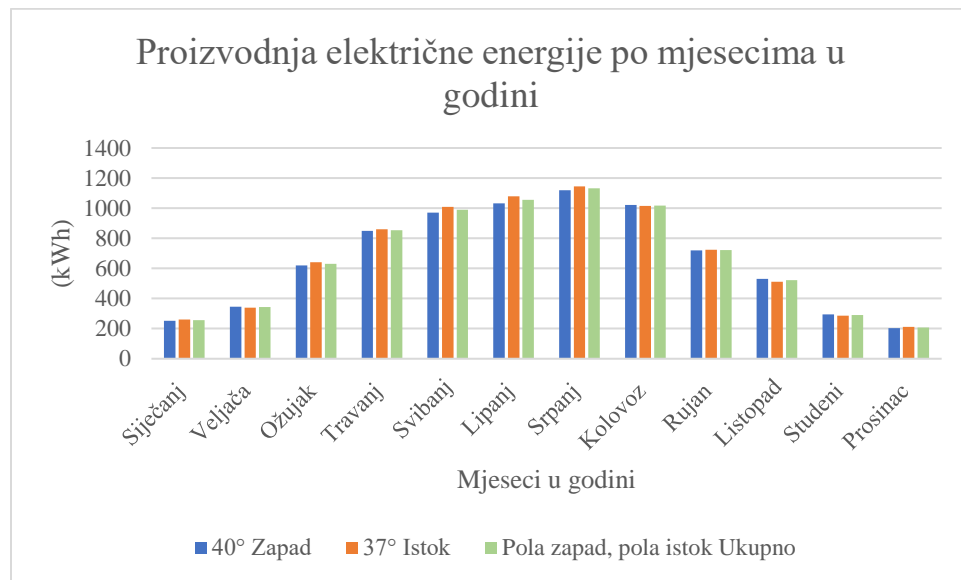
Tablica 12: Ulazni i izlazni podatci za instaliranu snagu 8.5 kWp

| Ulazni podatci | Zapad 40° | Istok 37° |
|--|----------------------|----------------------|
| Lokacija: | 45.156,18.022 | 45.156,18.022 |
| Horizont | Izračunat | Izračunat |
| Korištena baza podataka | PVGIS-SARAH2 | PVGIS-SARAH2 |
| Tehnologija FN | Crystalline silicone | Crystalline silicone |
| Instalirana snaga [kWp] | 8,5 | 8,5 |
| Gubitci sustava | 14 | 14 |
| Izlazni podatci simulacije | | |
| Kut modula | 40 | 37 |
| Kut azimuta | 90 | -90 |
| Godišnja proizvodnja energije [kWh] | 7959,84 | 8079,99 |
| Godišnje zračenje u ravnini [kWh] | 1227,37 | 1237,34 |
| Varijabilnost iz godine u godinu [kWh] | 299,68 | 422,04 |
| Promjene u izlazu zbog: | | |
| Upadni kut [%] | -3,58 | -3,58 |
| Spektralni efekti [%] | 1,04 | 1,03 |
| Temperatura i nisko zračenje [%] | -8,94 | -8,3 |
| Ukupni gubitci [%] | -23,7 | -23,17 |

Mjesečna proizvodnja električne energije po grupama modula, kao i ukupna proizvedena električna energija dobivena je kao rezultat unosa podataka u PVGIS, a predstavljena je tablicom 13, te grafički slikom 18.

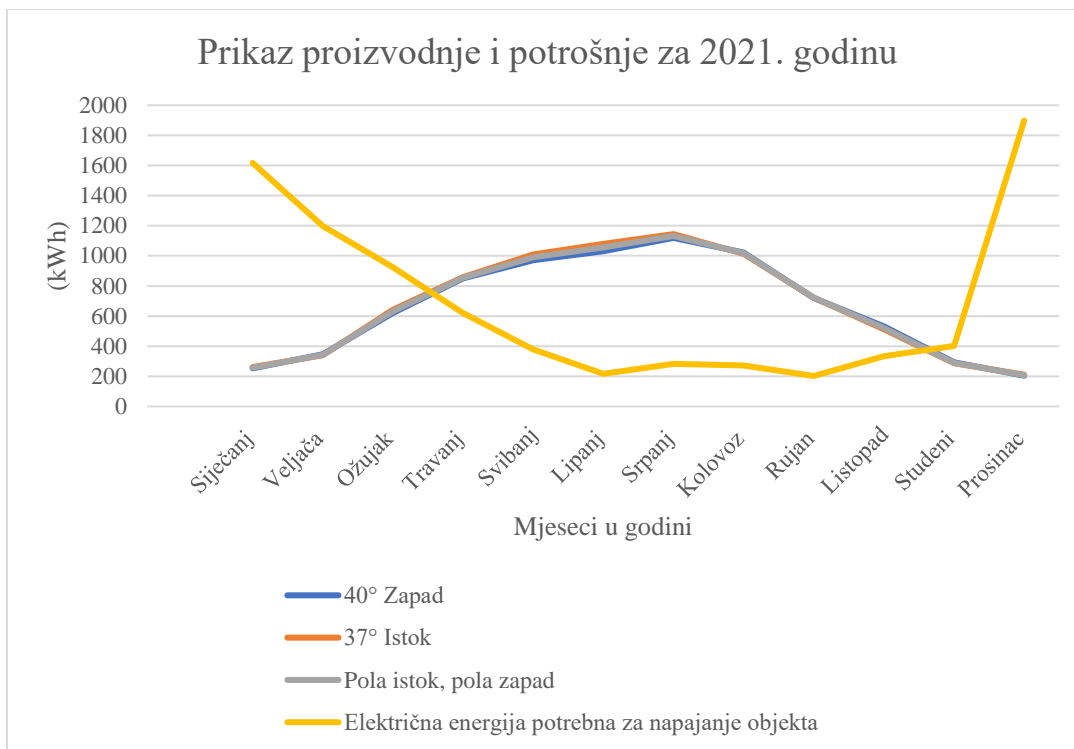
Tablica 13: Mjesečna proizvodnja za različite orijentacije i nagibe krova

| | 40° Zapad | 37° Istok | Kombinacija | | |
|-----------------------|--------------|--------------|-------------|-----------|---------|
| | | | 40° Zapad | 37° Istok | Ukupno |
| Siječanj (kWh) | 251,87 | 261,08 | 125,94 | 130,54 | 256,48 |
| Veljača (kWh) | 346,06 | 339,91 | 173,03 | 169,96 | 342,99 |
| Ožujak (kWh) | 620,05 | 641,13 | 310,03 | 320,56 | 630,59 |
| Travanj (kWh) | 849,26 | 859,46 | 424,63 | 429,73 | 854,36 |
| Svibanj (kWh) | 971,19 | 1008,4 | 485,6 | 504,2 | 989,8 |
| Lipanj (kWh) | 1031,14 | 1079,36 | 515,7 | 539,68 | 1055,38 |
| Srpanj (kWh) | 1119,14 | 1144,3 | 559,57 | 572,15 | 1131,72 |
| Kolovoz (kWh) | 1021,31 | 1014,38 | 510,66 | 507,19 | 1017,85 |
| Rujan (kWh) | 720,65 | 723,53 | 360,32 | 361,77 | 722,09 |
| Listopad (kWh) | 530,95 | 511,63 | 265,47 | 255,81 | 521,28 |
| Studeni (kWh) | 293,84 | 286,17 | 146,92 | 143,09 | 290,01 |
| Prosinac (kWh) | 204,11 | 210,64 | 102,05 | 105,32 | 207,37 |
| Ukupno godišnje (kWh) | 7959,84 | 8079,99 | 3979,92 | 4040 | 8019,92 |



Slika 18: Grafički prikaz mjesečne proizvodnje električne energije za različite orijentacije i nagibe

Graf procjenjene potrošnje za 2021. godinu i proizvodnje za istu godinu prikazan je na slici 19.



Slika 19: Prikaz proizvodnje i potrošnje električne energije za 2021. godinu

Fotonaponski sustav promatranog objekta sastojao bi se od fotonaponskih modula (26 modula raspoređenih u 2 niza), trofaznog izmjenjivača (FUJI FU-SUN-10K-G05 10kW 3P) konstrukcije za pričvršćivanje panela (šine i nosači), spojnih kabela MC4 sa pripadajućim konektorima, zaštitnih ormara kako istosmjerne tako i izmjenične strane sa pripadajućom opremom, te kabela za povezivanje invertera i postojećeg glavnog razvodnog ormara.

5.4. Komparativna analiza promatranih sustava

Kako bi mogli usporediti promatrane sustave objekta potrebno je odrediti cijene nabave, montaže i spajanja kako fotonaponskog sustava, tako i toplinske crpke. Na tablici 14 prikazane su cijene nabave, montaže i spajanja fotonaponskog sustava.

Tablica 14: cijene nabave, montaže i spajanja fotonaponskog sustava od 8,5 kW

| Redni broj | Proizvod | Jedinica mjere | Količina | Jedinična cijena (kn) | Iznos (kn) |
|------------|---|----------------|----------|-----------------------|------------|
| 1. | Fotonaponski moduli SV60-330 E | kom | 26 | 1480 | 38480 |
| 2. | Izmjenjivač FUJI FU-SUN-10K-G05 10kW | kom | 1 | 13200 | 13200 |
| 3. | Konstrukcija za pričvršćivanje panela | komplet | 1 | 2600 | 2600 |
| 4. | Solarni kabeli 6mm MC4 | m | 90 | 12 | 1080 |
| 5. | konektor | kom | 2 | 22 | 44 |
| 6. | Zaštitni ormar AC | komplet | 1 | 3000 | 3000 |
| 7. | Zaštitni ormar DC | komplet | 1 | 2500 | 2500 |
| 8. | Usluga izrade elektrotehničkog projekta | komplet | 1 | 1250 | 1250 |
| 9. | Elektromontažni radovi | komplet | 1 | 10000 | 10000 |
| | UKUPNO | | | | 72154 |

Kako objekt posjeduje niskotemperaturni sustav grijanja na koji je moguće spojiti toplinsku crpku, u obzir će se uzeti samo nabava, montaža i spajanje toplinske crpke bez instalacije cijelog sustava grijanja, kako je prikazano na tablici 15.

Tablica 15: cijena nabave, montaže i spajanja toplinske crpke MHP12RP24P3CM

| Redni broj | Proizvod | Jedinica mjere | Količina | Jedinična cijena (kn) | Iznos (kn) |
|------------|--|----------------|----------|-----------------------|------------|
| 1. | Toplinska crpka MHP12RP24P3CM | kom | 1 | 32475 | 32475 |
| 2. | Instalaterski radovi (uključen sitni materijal potreban za spajanje) | komplet | 1 | 7500 | 7500 |
| | UKUPNO | | | | 39975 |

Preko tablica 15 i 16 utvrđeno je kako konačna cijena nabave, montaže i spajanja fotonaponskog sustava od 8,5 kW iznosi 72.154,00 kn, dok je cijena nabave, montaže i spajanja toplinske crpke 39.975,00 kn, što implicira zajedničku cijenu od 112.129,00 kn

Račun za plin na temelju potrošnje iz 2021. godine po trenutnim cijenama iznosio bi 10.620,85 kn (konačna cijena u koju ulazi troškovi nabave, distribucije i opskrbe iznosi 0,4219 kn/kWh, te cijena fiksne mjesečne naknade od 13 kn, obje cijene su izražene bez PDV), dok bi potrošnja električne energije za istu godinu (bez toplinske crpke) iznosila 4.039,30 kn (jedinične cijene prikazane su na tablici 7). Porez na dodanu vrijednost (PDV) iznosi 13% kako za električnu energiju, tako i za plin.

Tablica 17: Jedinične cijene električne energije (važeće od 1.10.2022.)

| Cijene od 1.10.2022. za korisnike s preko 2500 kWh šestomjesečne potrošnje | BEZ PDV-a |
|--|------------------|
| Cijena bez naknada (kn/kWh) | 0,7943 |
| Cijen s naknadom (kn/kWh) | 1,1043 |
| Naknada za obračunsko mm + naknada za opskrbu (kn) | 19 |
| Naknada za obračunsko mm (kn) | 11,6 |
| Naknada za obnovljive izvore i visokoučinkovitu kogeneraciju (kn/kWh) | 0,105 |
| Cijena otkupa električne energije (kn/kWh) | 0,63544 |

U radu su promatrana tri slučaja FN sa razlikom u kutu i orijentaciji postavljanja fotonaponskih panela; zapadni krov s nagibom od 40°, istočni krov sa nagibom od 37° te kombinirani slučaj u kojem je pola panela postavljeno na zapad pod 40° i pola na istok pod kutem od 37°. Električna energija dobivena fotonaponskim sustavima u svim slučajevima manja je od godišnje potrošnje električne energije kako bi vlasnik ostao u statusu kupca s samoopskrbom, što znači da je razliku električne energije morao preuzeti iz elektroenergetske mreže. U tablicama 18, 19, 20 prikazani su računi za električnu energiju koju je potrebno platiti godišnje (podjeljene po mjesecima).

Tablica 18: Prikaz cijena za električnu energiju, slučaj Zapad

| 40° Zapad (kWh) | Proizvodnja (kWh) | Električna energija potrebna za napajanje objekta (kWh) | Razlika (kWh) | Iznos računa (kn) | Stanje računa nakon odbijanja proizvodnje (kn) |
|------------------------|-------------------|---|---------------|-------------------|--|
| Siječanj | 251,87 | 1616,59 | 1364,72 | 1.886,37 kn | 1.886,37 kn |
| Veljača | 346,06 | 1199,25 | 853,19 | 1.187,37 kn | 1.187,37 kn |
| Ožujak | 620,05 | 924,00 | 303,95 | 436,82 kn | 436,82 kn |
| Travanj | 849,26 | 619,79 | -229,47 | -134,21 kn | -134,21 kn |
| Svibanj | 971,19 | 379,11 | -592,08 | -364,63 kn | -498,84 kn |
| Lipanj | 1031,14 | 217,14 | -814,00 | -505,65 kn | -1.004,49 kn |
| Srpanj | 1119,14 | 281,63 | -837,51 | -520,59 kn | -1.525,08 kn |
| Kolovoz | 1021,31 | 272,19 | -749,12 | -464,42 kn | -1.989,50 kn |
| Rujan | 720,65 | 202,02 | -518,63 | -317,96 kn | -2.307,46 kn |
| Listopad | 530,95 | 334,49 | -196,46 | -113,24 kn | -2.420,70 kn |
| Studeni | 293,84 | 402,35 | 108,51 | 169,76 kn | -2.250,94 kn |
| Prosinac | 204,11 | 1898,29 | 1694,18 | 2.336,59 kn | 85,65 kn |
| Ukupno godišnje | 7959,84 | 8346,86 | | | 3.596,20 kn |

Tablica 19: Prikaz cijena za električnu energiju, slučaj Istok

| 37° Istok (kWh) | Proizvodnja (kWh) | Električna energija potrebna za napajanje objekta (kWh) | Razlika (kWh) | Iznos računa (kn) | Stanje računa nakon odbijanja proizvodnje (kn) |
|------------------------|-------------------|---|---------------|-------------------|--|
| Siječanj | 261,08 | 1616,59 | 1355,51 | 1.873,78 kn | 1.873,78 kn |
| Veljača | 339,91 | 1199,25 | 859,34 | 1.195,77 kn | 1.195,77 kn |
| Ožujak | 641,13 | 924,00 | 282,87 | 408,02 kn | 408,02 kn |
| Travanj | 859,46 | 619,79 | -239,67 | -140,69 kn | -134,21 kn |
| Svibanj | 1008,4 | 379,11 | -629,29 | -388,27 kn | -522,49 kn |
| Lipanj | 1079,36 | 217,14 | -862,22 | -536,29 kn | -1.058,78 kn |
| Srpanj | 1144,3 | 281,63 | -862,67 | -536,58 kn | -1.595,35 kn |
| Kolovoz | 1014,38 | 272,19 | -742,19 | -460,02 kn | -2.055,37 kn |
| Rujan | 723,53 | 202,02 | -521,51 | -319,79 kn | -2.375,16 kn |
| Listopad | 511,63 | 334,49 | -177,14 | -100,96 kn | -2.476,12 kn |
| Studeni | 286,17 | 402,35 | 116,18 | 180,24 kn | -2.295,88 kn |
| Prosinac | 210,64 | 1898,29 | 1687,65 | 2.327,66 kn | 31,78 kn |
| Ukupno godišnje | 8079,99 | 8346,86 | | | 3.509,35 kn |

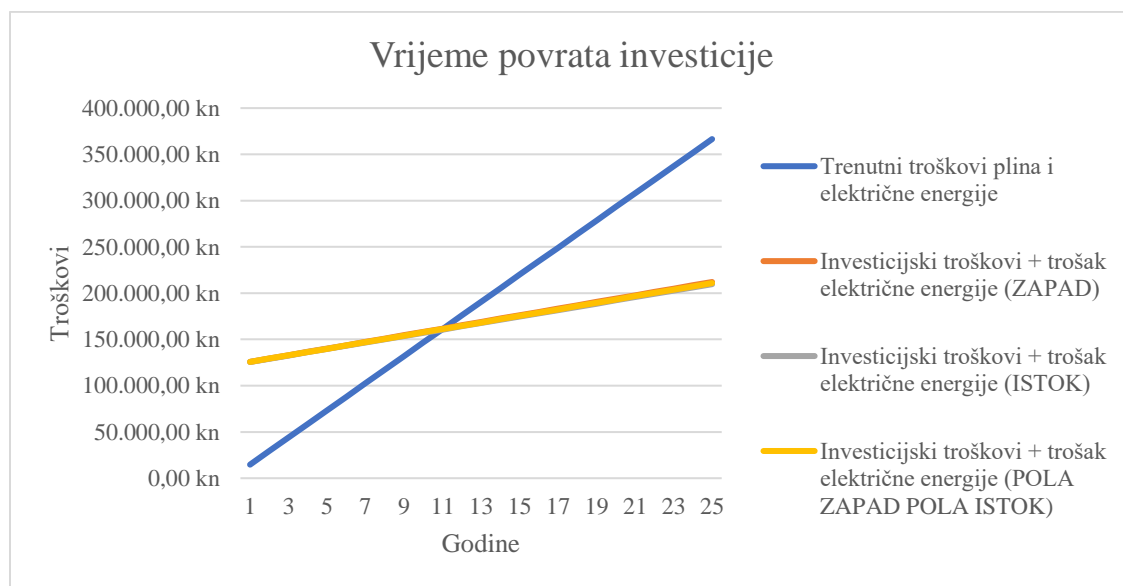
Tablica 20: Prikaz cijena za električnu energiju, slučaj kombinacije

| 40° Zapad (kWh) | Proizvodnja (kWh) | Električna energija potrebna za napajanje objekta (kWh) | Razlika (kWh) | Iznos računa (kn) | Stanje računa nakon odbijanja proizvodnje (kn) |
|------------------------|-------------------|---|---------------|-------------------|--|
| Siječanj | 256,48 | 1616,59 | 1360,11 | 1.880,07 kn | 1.880,07 kn |
| Veljača | 342,99 | 1199,25 | 856,26 | 1.191,56 kn | 1.191,56 kn |
| Ožujak | 630,59 | 924,00 | 293,41 | 422,42 kn | 422,42 kn |
| Travanj | 854,36 | 619,79 | -234,57 | -137,45 kn | -134,21 kn |
| Svibanj | 989,8 | 379,11 | -610,69 | -376,46 kn | -510,67 kn |
| Lipanj | 1055,38 | 217,14 | -838,24 | -521,05 kn | -1.031,72 kn |
| Srpanj | 1131,72 | 281,63 | -850,09 | -528,58 kn | -1.560,30 kn |
| Kolovoz | 1017,85 | 272,19 | -745,66 | -462,22 kn | -2.022,52 kn |
| Rujan | 722,09 | 202,02 | -520,07 | -318,87 kn | -2.341,40 kn |
| Listopad | 521,28 | 334,49 | -186,79 | -107,09 kn | -2.448,49 kn |
| Studeni | 290,01 | 402,35 | 112,34 | 174,99 kn | -2.273,50 kn |
| Prosinac | 207,37 | 1898,29 | 1690,92 | 2.332,13 kn | 58,63 kn |
| Ukupno godišnje | 8019,92 | 8346,86 | | | 3.552,68 kn |

Iz tablica 18, 19, 20 vidljivo je kako je slučaj sa fotonaponskim panelima na istočnom krovu najpovoljniji, u smislu cijene koja se plaća za električnu energiju. Uzimajući u obzir cijenu plina s kojim se kućanstvo trenutno grije (10.620,85 kn) te cijenu električne energije koju trenutno troši (4.039,30 kn) dolazi se do ukupne cijene koju kućanstvo trenutno plaća (14.660,16 kn). Ako se od ukupne cijene oduze cijena električne energije koju bi kućanstvo platilo kada bi se ugradio fotonaponski sustav zajedno sa toplinskom crpkom (uzimajući u obzir najpovoljniji slučaj sa fotonaponskim panelima na istoku koji iznosi 3.509,35 kn) dolazi se do godišnje uštede od 11.157,29 kn. Ukoliko se podijeli cijena investicije oba sustava (112.129,00) kojoj se dodaje cijena promjene priključne snage kupca (10.000 kn) sa cijenom godišnje uštede, dobiva se vrijeme povrata investicije od 11 godina (10.95). Vrijeme povrata investicije po godinama, prikazano je na tablici 21, te grafički na slici 20 za sva tri slučaja.

Tablica 20: Vrijeme povrata investicije sva tri razmatrana slučaja

| Broj godina | Trenutni troškovi plina i električne energije | Investicijski troškovi + trošak električne energije (ZAPAD) | Investicijski troškovi + trošak električne energije (ISTOK) | Investicijski troškovi + trošak električne energije (KOMBINACIJA) |
|-------------|---|---|---|---|
| 1 | 14.660,16 kn | 125.725,20 kn | 125.631,87 kn | 125.678,44 kn |
| 2 | 29.320,31 kn | 129.321,41 kn | 129.134,74 kn | 129.227,88 kn |
| 3 | 43.980,47 kn | 132.917,61 kn | 132.637,61 kn | 132.777,32 kn |
| 4 | 58.640,63 kn | 136.513,82 kn | 136.140,48 kn | 136.326,76 kn |
| 5 | 73.300,78 kn | 140.110,02 kn | 139.643,35 kn | 139.876,20 kn |
| 6 | 87.960,94 kn | 143.706,22 kn | 143.146,22 kn | 143.425,64 kn |
| 7 | 102.621,10 kn | 147.302,43 kn | 146.649,09 kn | 146.975,08 kn |
| 8 | 117.281,25 kn | 150.898,63 kn | 150.151,96 kn | 150.524,52 kn |
| 9 | 131.941,41 kn | 154.494,84 kn | 153.654,83 kn | 154.073,97 kn |
| 10 | 146.601,57 kn | 158.091,04 kn | 157.157,70 kn | 157.623,41 kn |
| 11 | 161.261,72 kn | 161.687,24 kn | 160.660,57 kn | 161.172,85 kn |
| 12 | 175.921,88 kn | 165.283,45 kn | 164.163,44 kn | 164.722,29 kn |
| 13 | 190.582,04 kn | 168.879,65 kn | 167.666,31 kn | 168.271,73 kn |
| 14 | 205.242,19 kn | 172.475,86 kn | 171.169,18 kn | 171.821,17 kn |
| 15 | 219.902,35 kn | 176.072,06 kn | 174.672,05 kn | 175.370,61 kn |



Slika 20: Vrijeme povrata investicije za sva tri razmatrana slučaja

Vremena povrata investicije za pojedinu orijentaciju tj. nagib fotonaponskih modula su 11,04 godina za zapad, 10,95 godina za istok, te 10,99 godina za kombinirani sustav

6. Zaključak

Važnost obnovljivih izvora energije je nedvojbeno, kako zbog ekologije i smanjenja ugljičnog otiska, tako i financijski zbog enormnog rasta cijena fosilnih goriva. Situacija u svijetu posljednjih godina ide na bolje, jer većina zemalja na neki način potiče obnovljive izvore energije. Iako je svake godine sve više instaliranih kapaciteta, to nije dovoljno za postizanje globalnog cilja o ugljičnoj neutralnosti.

Prethodne 2021. godine u svijetu je instalirano 315 GW novih obnovljivih izvora električne energije, od tog iznosa više od polovice čine fotonaponski sustavi, čak 175 GW. Azija dominira na području obnovljivih izvora energije sa instaliranim kapacitetima većim od Europe, Južne i Sjeverne Amerike zajedno, a Kina kao njen reprezentativni predstavnik postaje prva zemlja sa ukupnim instaliranim kapacitetom većim od 1 TW. Republika Hrvatska je po udjelu obnovljivih izvora energije u konačnoj potrošnji električne energije bolja od prosjeka Europske unije, te zemalja kao što su Italija, Španjolska, Njemačka i Francuska.

U praktičnom dijelu rada izvršena je komparativna analiza dvaju sustava grijanja; trenutnog sustava grijanja na kondenzacijski plinski bojler i grijanja na toplinsku crpku koja kao izvor topline koristi okolni zrak. Prema potrošnji plina plinskog bojlera procijenjena je potrošnja električne energije koju bi toplinska crpka potrošila za zagrijavanje istog objekta, obiteljske kuće. Na temelju proračunate potrošnje toplinske crpke i izmjerene električne energije koju četveročlana obitelj potroši godišnjoj razini, proračunat je fotonaponski sustav koji bi napajao oboje. Usporedbom dvaju sustava moguće je zaključiti kako je sama potrošnja energije potrebne za napajanje toplinske crpke manja od energije koju troši plinski kondenzacijski bojler, ali zbog velike cijene investicije toplinske crpke, vrijeme povrata investicije je nešto duže nego vrijeme povrata investicije u slučaju fotonaponskog sustava koji napaja toplinsku crpku i ostatak objekta. Po trenutnim tržišnim cijenama električne energije i plina, investicija oba sustava zajedno od 112.126,00 kn isplatila bi se za 11 godina. U tom slučaju kućanstvo bi na godišnjoj bazi uštedjelo 11.063,95 kn na grijanju i električnoj energiji. Sukladno rapidnom rastu cijena i neizvjesnoj energetskej budućnosti ovakav način grijanja se uvelike isplati, a budući da se u kombinaciji sa fotonaponskim sustavom smanjuje i račun električne energije, ovakav sustav predstavlja dobru investiciju.

Literatura

1. Wang, X., Xia, L., Bales, C., Zhang, X., Coperataro, B., Pan, S., Wu, J. (2019), A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources, *Renewable Energy* 146 (2020) 2472-2487
2. Heinz, A., Gaber, C. (2019), Combinations of heat pump and photovoltaics for renovated buildings, *E3S Web of Conferences* 111, 01003, CLIMA 2019
3. Schreurs, T., Madani H., Zottl, A., Sommerfeldt, N., Zucker, G. (2021), Techno-economic analysis of combined heat pump and solar PV system for multi-family houses: An Austrian case study, *Energy Strategy Reviews* 36 (2021) 100666
4. Bee, E., Prada, A., Baggio, P., Psimopoulos, E. (2019), Air-source heat pump and photovoltaic systems for residential heating and cooling: Potential of self-consumption in different European climates, *Bulding Simulation* 12, 453-463
5. Roselli, C., Tariello, F., Sasso, M. (2019), Integration of a Photovoltaic System with an Electric Heat Pump and Electrical Energy Storage Serving an Office Building, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Volume 7, Issue 2, pp 213-228
6. Bee, E. (2019), Heat pump and photovoltaic systems in residential applications, University of Trento, Italy, Doctoral Thesis
7. Bae, S., Chae S., Nam, Y. (2022) Performance Analysis of Integrated Photovoltaic-Thermal and Air Source Heat Pump System through Energy Simulation, *Energies* 2022, 15, 528
8. Kelly, J. A., Miao, F., Clinch, J.P. (2016), Residential home heating: The potential for air source heat pump technologies as an alternative to solid and liquid fuels, *Energy Policy*, Volume 98, Pages 431-442, ISSN 0301-4215
9. Yanjun, D., Qinhu, C., Guoyuan, M., Yi, J. (2004), Experimental study of an improved air source heat pump, *Energy Conversion and Management*, Volume 45, Issues 15–16, Pages 2393-2403, ISSN 0196-8904
10. Pinamonti, M., Prada, A., Baggio, P. (2020), Rule-Based Control Strategy to Increase Photovoltaic Self-Consumption of a Modulating Heat Pump Using Water Storages and Building Mass Activation, *Energies* 2020, 13(23), 6282

11. Šljivac, D., Topić, D. (2018), *Obnovljivi izvori električne energije*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
12. Majdandžić, Lj. (2010), *Solarni sustavi*, Graphis, Zagreb
13. Šljivac D., Topić D., (2013), *Obnovljivi izvori energije*, Elektrotehnička i prometna škola Osijek, Osijek
14. Ekosustav: preuzeto s eko-sustav.hr [12.05.2022.]
15. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, dostupno na: <https://mingor.gov.hr> [pristupljeno 10.5.2022.]
16. Zakon o tržištu električne energije (NN 52/19), dostupno na: <https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug/uprava-za-energetiku-1999/zakoni-i-propisi-2015/elektricna-energija-2017/2017> [10.5.2022.]
17. Čotar, A., Filčić, A.(2012.), *Fotonaponski sustavi*, Istarska Regionalna Energetska Agencija, Rijeka
18. Renewables 2021, Global Status Report, dostupno na: www.ren21.net [10.5.2022.]
19. Mustapić, N., Guzović, Z., Staniša, B. (2013), *Energetski strojevi i sustavi*, Veleučilište u Karlovcu
20. Pandžić, H., Rajšl, I., Capuder, T., Kuzle, I. (2016), *Obnovljivi izvori energije*, Priručnik za nastavnike, Slavonski Brod
21. Bhatia, A. (2017), *Heat Pumps for Heating and Cooling*, Continuing Education and Development, Inc., New Jersey
22. Ljubičić, M. (2021), *Dizalica topline kao alternativni izvor energije za pripremu potrošne tople vode i grijanja obiteljske kuće*, Diplomski rad
23. Learn metrics: preuzeto s learnmetrics.com [09.5.2022.]
24. Nowak, T. (2018), *Heat Pumps, Integrating technologies to decarbonise heating and cooling*, European Copper Institute
25. Witkowska, A., Krawczyk, D. A., Rodero, A., (2021), *Analysis of the Heat Pump Market in Europe with a Special Regard to France, Spain, Poland and Lithuania*, Environmental and Climate Technologies, vol. 25, no. 1, pp. 840–852
26. SOLVIS, dostupno na www.solvis.hr
27. CENTROMETAL, dostupno na www.centrometal.hr

28. Državni hidrometeorološki zavod, dostupno na www.meteo.hr

Sažetak

Svijet sve više prepoznaje važnost obnovljivih izvora energije, što je vidljivo po porastu novoinstaliranih kapaciteta iz godine u godinu. Prethodne 2021. godine instalirano je čak 315 GW novih obnovljivih izvora energije, a tu važnost uočava i Republika Hrvatska, koja po udjelu obnovljivih izvora energije u konačnoj potrošnji električne energije premašuje prosjek Europske unije. Ovim radom nastoji se utvrditi isplativost fotonaponskih sustava za napajanje toplinskih crpki, na način da se postojeće grijanje na plin objekta u Slavonskom Brod zamjenilo toplinskom crpkom (zrak-voda) napajanom fotonaponskim sustavom. Postojeći sustav grijanja predstavlja stvarno stanje potrošnje, preračunato po trenutnim tržišnim cijenama, dok je potrošnja toplinske crpke procijenjena na temelju energije potrošene u prvom slučaju. Radom se zaključilo kako je za povrat investicije potrebno 11 godina po trenutnim tržišnim cijenama, kako energenata tako i samih sustava. Utvrđeno je da je kombinacija fotonaponskih sustava i toplinskih crpki ekonomična i profitabilna investicija.

Summary

The world is recognizing the importance of renewable energy sources, which is evident from the increase in newly installed capacities from year to year. In the previous year 2021, as many as 315 GW of new renewable energy sources were installed, and this importance is also noticed by Republic of Croatia, which exceeds the average of the European Union in terms of the share of renewable energy sources in the final consumption of electricity. This work aims to determine the profitability of photovoltaic systems for powering heat pumps, in such a way that the existing gas heating of an object in the city of Slavonski Brod is replaced by a heat pump (air-water) powered by a photovoltaic system. The existing heating system represents the actual state of consumption, recalculated at current market prices, while the consumption of the heat pump is estimated based on the energy consumed in the first case. The work concluded that it takes 11 years to pay back the investment at current market prices, both for energy sources and for the systems themselves. It was found that the combination of photovoltaic systems and heat pumps is an economical and profitable investment.

Životopis

Dominik Buzov rođen je 3.3.1995. godine u Slavonskom Brodu u Republici Hrvatskoj, gdje završava osnovnu školu Ivan Goran Kovačić te nakon nje i Tehničku školu Slavonski Brod, smjer tehničar za elektrotehniku. Nakon srednje škole polaže državnu maturu i upisuje Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu koji pohađa dvije godine. 2015. godine prebacuje se na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku (u ono vrijeme Elektrotehnički fakultet u Osijeku) na smjer Elektrotehnika. Na drugoj godini studija izabire izborni blok elektroenergetike te 2020. godine završava preddiplomski sveučilišni studij. Iste godine na FERIT-u upisuje diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika, izborni blok (DEA) Elektroenergetski sustavi

U Osijeku, rujan 2022.

Dominik Buzov

(vlastoručni potpis)

Prilozi