

Tehnoekonomska analiza kompresionog i apsorpcionog sistema za solarno hlađenje

Marija VASILEV, Branislav PETROVIĆ, Miloš BANJAC

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Rezime - U radu je prikazana tehnoekonomska analiza rada i sprovedeno poređenje dva rashladna postrojenja kojima je moguće ostvariti tzv. solarno hlađenje: kompresionog rashladnog postrojenja i apsorpcionog rashladnog postrojenja. Energija sunčevog zračenja predstavlja primarni energetska izvor za oba postrojenja. Razlike između sistema odnose se na način konverzije energije i princip ostvarivanja rashladnog procesa. Kod kompresionog rashladnog postrojenja solarna energija se konvertuje u električnu energiju primenom fotonaponskih prijemnika sunčeve energije, koja se zatim koristi za pogon kompresora. Kod apsorpcionog rashladnog postrojenja rashladni proces se ostvaruje korišćenjem toplote, koja se obezbeđuje pomoću termičkih prijemnika sunčeve energije. Radi obezbeđivanja uporedivosti rezultata, oba rashladna sistema analizirana su za istu nominalnu rashladnu snagu od 15 kW.

Ključne reči - solarno hlađenje, kompresioni rashladni sistem, apsorpcioni rashladni sistem, tehnoekonomska analiza

I UVOD

Potražnja za energijom za hlađenje prostora predstavlja jedan od najbrže rastućih segmenata finalne potrošnje energije u sektoru zgradarstva. Prema podacima International Energy Agency (IEA) [1], globalni broj klimatizacionih uređaja porastao je sa približno 1,6 milijardi u 2018. godini, uz projekciju da bi do 2050. godine mogao premašiti 5 milijardi jedinica. Istovremeno, potrošnja električne energije za hlađenje već danas prelazi 2000 TWh godišnje i mogla bi se utrostručiti do sredine veka ukoliko se ne uvedu efikasnije tehnologije i sistemi zasnovani na obnovljivim izvorima energije. Rashladni sistemi već sada učestvuju sa približno 10% u ukupnoj globalnoj potrošnji električne energije, dok u pojedinim toplim klimatskim zonama njihov udeo u vršnom opterećenju elektroenergetskog sistema prelazi 40%.

Paralelno sa rastom potreba za hlađenjem, klimatske promene i obaveze dekarbonizacije energetskog sektora, definisane kroz međunarodne sporazume i strategije energetske tranzicije, nameću ograničenja u pogledu emisija CO₂ i povećanja energetske efikasnosti. U tom kontekstu, sektor zgradarstva ima ključnu ulogu, jer prema procenama International Energy Agency učestvuje sa oko 30% u ukupnoj finalnoj potrošnji energije i približno 28% u globalnim emisijama CO₂ povezanim sa energijom.

Solarno hlađenje predstavlja koncept koji direktno povezuje dva trenda: rast potrebe za hlađenjem i povećanu dostupnost solarnog

zračenja u periodima najvećih rashladnih opterećenja. Vremenska korelacija između vršnog solarnog zračenja i maksimalnog rashladnog opterećenja čini ovu tehnologiju posebno pogodnom za smanjenje vršnih opterećenja elektroenergetskog sistema, povećanje energetske autonomije objekata i smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte.

Tehnološki posmatrano, solarno hlađenje može se realizovati na dva načina:

- 1) parno-kompresionim rashladnim sistemom pogonjen električnom energijom proizvedenom putem fotonaponskih (PV) panela;
- 2) parno-apsorpcioni rashladni sistem pogonjen toplotom proizvedenom u solarnim termičkim kolektorima.

Iako oba sistema koriste istu primarnu energiju – energiju sunčevog zračenja – razlikuju se u konverzionom lancu i termodinamičkom principu rada. Kod kompresionog sistema solarna energija se konvertuje u električnu energiju primenom fotonaponskih sistema, nakon čega se električna energija koristi za pogon kompresora. Kod apsorpcionog sistema solarna energija se konvertuje u toplotnu energiju, koja predstavlja pogonski izvor za apsorpcioni ciklus, najčešće zasnovan na radnom paru LiBr–H₂O.

U literaturi su detaljno analizirane performanse pojedinačnih sistema za solarno hlađenje, kako sistema zasnovanih na fotonaponskoj proizvodnji električne energije, tako i sistema pogonjenih solarnom toplotom. Međutim, komparativne tehnoekonomske analize koje oba koncepta razmatraju pod istim klimatskim, operativnim i kapacitivnim uslovima, naročito u opsegu manjih i srednjih rashladnih snaga, i dalje su ograničene.

Zbog toga je u ovom radu prikazano energetska i ekonomsko poređenje dva koncepta solarnog hlađenja za isti referentni rashladni kapacitet. Analiza obuhvata dimenzionisanje sistema, procenu energetska performansi i evaluaciju osnovnih ekonomskih pokazatelja, čime se omogućava identifikacija tehnički i ekonomski povoljnijeg rešenja u datim uslovima.

2. METODOLOGIJA

Analiza je sprovedena na osnovu jedinstvenog projektantskog kriterijuma: oba sistema su dimenzionisana tako da obezbede nominalnu rashladnu snagu, pri identičnim klimatskim i operativnim uslovima. Time je obezbeđena metodološka konzistentnost i direktna uporedivost rezultata.

Kao referentni objekat korišćena je prostorija površine 140 m²,

čije rashladno opterećenje je reprezentovano nominalnom snagom od 15 kW. Time je obezbeđena jasna fizička interpretacija rezultata i njihova primenljivost na tipične komercijalne ili veće stambene prostore.

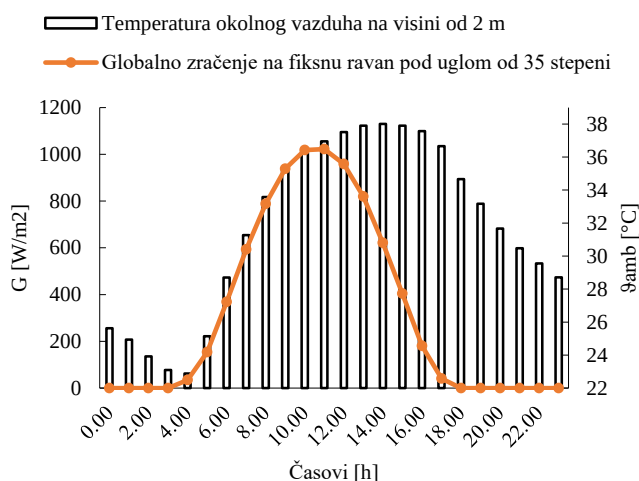
Analizirana su dva koncepta: fotonaponski sistem sa baterijskim skladištenjem energije koji napaja parno-kompresiono rashladno postrojenje i solarni termički sistem sa vakuumskim cevnim kolektorima i akumulacionim rezervoarom toplote koji pogoni parno-apsorpciono rashladno postrojenje. U oba slučaja, dimenzionisanje solarnih podsistema vršeno je polazeći od potrebne pogonske energije rashladnog ciklusa, a ne obrnuto, čime je obezbeđen jedinstven kriterijum projektovanja.

Analiza energetske performansi sistema sprovedena je za jedan reprezentativni letnji dan, odabran kao karakterističan za period maksimalnih rashladnih potreba. Spoljašnja temperatura vazduha i solarno zračenje posmatrani su u jednočasovnim intervalima tokom dana, čime je omogućena dinamička procena raspoložive solarne energije i vremenskog poklapanja sa rashladnim opterećenjem.

Kao referentni dan usvojen je 4. avgust 2017. godine za lokaciju Beograd, pri čemu su meteorološki podaci preuzeti iz baze PVGIS. Na Slici 1 prikazane su vrednosti globalnog sunčevog zračenja na južno orijentisanoj kosoj površini i temperature spoljašnjeg vazduha.

Maksimalna spoljašnja temperatura od 38,01 °C zabeležena je u 14:00 časova, dok je maksimalna vrednost globalnog sunčevog zračenja od 1021,97 W/m² registrovana u 11:00 časova. Ovaj dan je odabran kao reprezentativan scenario visokog rashladnog opterećenja, čime je omogućena analiza sistema u uslovima bliskim projektnom maksimumu.

Treba naglasiti da je analiza ograničena na jednodnevni vremenski interval i da rezultati predstavljaju ilustraciju ponašanja sistema u uslovima maksimalne letnje opterećenosti, a ne godišnji energetski bilans.



Slika 1. Časovne vrednosti temperature okolnog vazduha i globalnog sunčevog zračenja na nagnutu ravan pod uglom 35°, orijentisanu ka južnoj strani sveta za dan 4. avgust 2017. godine za lokaciju grada Beograda [2].

U operativnom smislu, pretpostavljeno je da sistem za hlađenje radi osam sati dnevno, dok se solarna energija prikuplja tokom celog dana. Na taj način omogućena je analiza uloge skladištenja energije – baterijskog u slučaju PV sistema i toplotnog akumulacionog rezervoara u slučaju apsorpcionog sistema. Kapacitet sistema za skladištenje određivan je tako da obezbedi stabilan rad rashladnog uređaja tokom predviđenog perioda korišćenja, uz uvažavanje preporuka proizvođača opreme.

Dimenzionisanje fotonaponskog sistema vršeno je tako da obezbedi potrebnu količinu električne energije za pogon kompresionog rashladnog postrojenja, uz uključeno baterijsko skladištenje radi izravnivanja dnevnih fluktuacija. U slučaju apsorpcionog sistema, površina vakuumskih cevnih kolektora određivana je na osnovu potrebne pogonske toplote, dok je zapremina akumulacionog rezervoara definisana u skladu sa tehničkim preporukama proizvođača apsorpcionog uređaja i zahtevima za stabilan rad sistema.

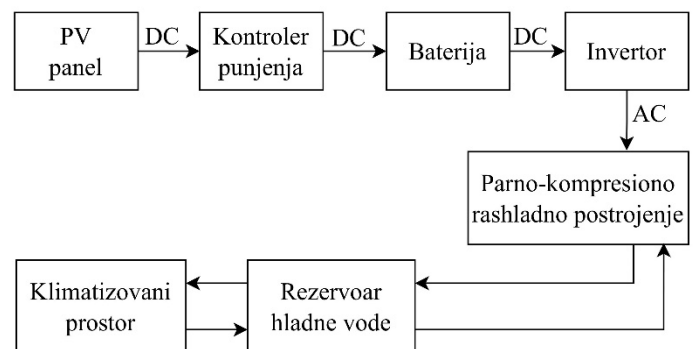
Investicioni i eksploatacioni troškovi procenjavani su primenom jedinstvene metodologije obračuna, čime je omogućena direktna energetska i ekonomska komparacija dva koncepta.

U oba analizirana koncepta pretpostavljeno je da se osnovna pogonska energija obezbeđuje iz sopstvenog solarnog sistema, odnosno iz fotonaponskog sistema u slučaju kompresionog rashladnog postrojenja i iz solarnih termičkih kolektora u slučaju apsorpcionog postrojenja. Time su oba sistema modelovana kao energetski samostalna u pogledu primarne energije za realizaciju rashladnog procesa.

Izuzetak predstavlja električna energija potrebna za pogon pomoćnih komponenti apsorpcionog sistema (cirkulacione pumpe i upravljački sistemi), koja se obezbeđuje iz distributivne mreže. Udeo ove energije u ukupnom energetskom bilansu sistema je relativno mali u odnosu na pogonsku toplotu, ali je uključen u ekonomsku analizu radi potpune realnosti modela.

III MODEL KOMPRESIONOG SISTEMA NAPAJANOG PV SISTEMOM

Prvi analizirani koncept solarnog hlađenja zasniva se na primeni parno-kompresionog rashladnog ciklusa napajanog električnom energijom proizvedenom u fotonaponskom sistemu. Ovakav pristup predstavlja tehnološki najrasprostranjenije rešenje u savremenoj klimatizaciji, pri čemu se solarna energija najpre konvertuje u električnu energiju, a zatim koristi za pogon kompresora rashladnog uređaja.



Slika 2. Komponente kompresionog sistema napajanog samostalnim fotonaponskim sistemom

S obzirom na to da analizirani sistem nije priključen na distributivnu mrežu, razmatran je samostalni (off-grid) fotonaponski sistem sa baterijskim skladištenjem energije. Prisustvo baterija omogućava premošćavanje vremenskog neslaganja između proizvodnje električne energije i potreba rashladnog sistema.

Osnovne komponente samostalnog fotonaponskog sistema naizmjenične struje su: fotonaponski moduli, kontroler punjenja baterije, akumulatorske baterije, inverter i potrošači naizmjenične struje (Slika 2).

Nakon definisanja strukture sistema, u nastavku je prikazan postupak njegovog dimenzionisanja u skladu sa zahtevom za obezbeđenje nominalne rashladne snage od 15 kW.

III.1 Dimenzionisanje fotonaponskog sistema

Dimenzionisanje fotonaponskog sistema sprovedeno je polazeći od dnevne energetske potrebe kompresionog rashladnog postrojenja.

Snaga kompresora odabranog kompresionog rashladnog postrojenja (čiler PICO-A R/H) nominalnog kapaciteta 15 kW iznosi 5,1 kW [3]. Dodatno, sistem obuhvata dve cirkulacione pumpe pojedinačne snage 0,46 kW, što daje ukupnu snagu pumpi od 0,92 kW. Ukupna potrebna snaga potrošača naizmjenične struje tako iznosi $P_{AC} = 6,02 \text{ kW}$.

Međutim, ova vrednost ne predstavlja konačnu projektantsku osnovu, jer je u energetske ravnoteži potrebno uključiti i gubitke u konverzionim i skladišnim elementima sistema. Zbog toga su u proračun uključeni gubici u invertoru, gubici u baterijskom sistemu (punjenje/praznjenje), gubici usled zaprljanja i starenja modula i varijabilnost raspoloživog sunčevog zračenja tokom dana.

S obzirom na to da fotonaponski moduli proizvode jednosmernu struju, sistem zahteva prisustvo invertora koji jednosmernu struju pretvara u naizmjeničnu. Efikasnost invertora se definiše kao odnos izlazne AC snage i ulazne DC snage invertora [4]:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (1)$$

odakle sledi da je ulazna snaga invertora:

$$P_{DC} = \frac{P_{AC}}{\eta_{inv}} = \frac{6,02}{0,98} = 6,143 \text{ kW} \quad (2)$$

pri čemu efikasnost odabranog invertora (Huawei SUN2000 10KTL M1) iznosi 0,98 [5].

Polazeći od pretpostavke da rashladni sistem radi osam sati dnevno, određena je dnevna potrošnja električne energije:

$$W_{DC} = 6,143 \text{ kW} \times 8 \text{ h} = 49,144 \text{ Wh} = 49,14 \text{ kWh} \quad (3)$$

Snaga samostalnog fotonaponskog sistema sa akumulatorskim baterijama iznosi [4]:

$$P_{DC} = N \cdot P_{DC(STC)1} \cdot \eta_Q \cdot \eta_U \cdot \eta \cdot \left(\frac{G}{1000 \text{ W/m}^2} \right) [\text{W}] \quad (4)$$

gde su:

N – broj fotonaponskih modula [-],

$P_{DC(STC)1}$ – naznačena snaga fotonaponskog modula koju daje proizvođač [W],

η_Q – kulonova efikasnost baterije [-],

η_U – naponska efikasnost baterije [-],

η – koeficijent koji uzima u obzir gubitke usled zaprljanja i starenja modula [-] i

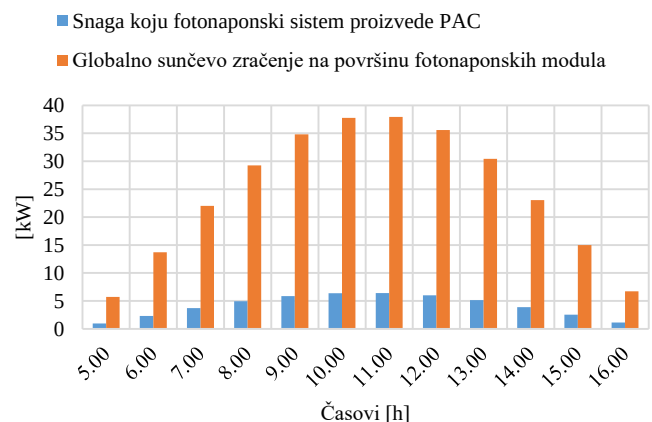
G – globalno sunčevo zračenje dozračeno na površ panela [W/m^2].

Kao vrednost efikasnosti litijum-gvožđe fosfatne baterije, odnosno proizvod kulonove i naponske efikasnosti, uzeta je vrednost 0,9 [6]. Odabrana baterija je marke Huawei, tip LUNA2000-10-SO.

Za potrebe analize odabrani su monokristalni fotonaponski moduli nominalne snage 415 Wp proizvođača Canadian Solar [7]. Na osnovu sprovedenog proračuna utvrđeno je da je za pokrivanje potreba rashladnog sistema potrebno 19 modula, ukupne instalirane snage 7,89 kWp i površine približno 38 m².

Tabela 1. Tehničke karakteristike Canadian Solar 415Wp fotonaponskog modula [7]

Canadian Solar – CS6R – 415MS HiKu Mono PERC BFR 415Wp	
Dimenzije (DxŠxV)	1722x1134x30 mm
Nominalna snaga	415 W
Struja u MPP tački	13,23 A
Napon u MPP tački	31,4 V
Struja kratkog spoja	14,09 A
Napon otvorenog kola	37,4 V
Maksimalni napon sistema	1.000 V
Masa	21,3 kg



Slika 3. Časovne vrednosti snage koju proizvede fotonaponski sistem i globalno sunčevo zračenje na površini fotonaponskih modula za dan 4. avgust 2017. godine

Na Slici 3 prikazan je dijagram časovne proizvedene snage fotonaponskog sistema i odgovarajuće vrednosti globalnog sunčevog zračenja za reprezentativni letnji dan (4. avgust 2017. godine), pri čemu su meteorološki podaci preuzeti iz baze PVGIS.

Dijagram pokazuje karakterističnu dnevnu varijaciju proizvodnje električne energije i potvrđuje potrebu za baterijskim skladištenjem, naročito u jutarnjim i večernjim satima kada proizvodnja nije dovoljna da direktno pokrije trenutne potrebe rashladnog sistema.

Proticanjem rashladnog fluida kroz isparivač kompresionog rashladnog postrojenja dolazi do isparavanja fluida i preuzimanja toplote od rashladne vode. Temperatura vode na ulazu u isparivač iznosi 12 °C, dok je temperatura na izlazu 7 °C [3]. Usvojena zapremina rezervoara ohlađene vode iznosi 200 l.

Uzimajući u obzir procenjeno smanjenje efektivnog rashladnog opterećenja od približno 1% usled toplotnih dobitaka u rezervoaru, efektivni toplotni tok koji se odvodi iz klimatizovanog prostora iznosi 14,85 kW. Na osnovu tog podatka može se zaključiti da dimenzionisani fotonaponski i kompresioni sistem zadovoljava potrebe prostorijske površine približno 140 m².

IV TEHNOEKONOMSKA ANALIZA PV–KOMPRESIONOG RASHLADNOG SISTEMA

Tehnoekonomska analiza prvog koncepta obuhvata procenu ukupnih investicionih troškova (CAPEX) i eksploatacionih troškova (OPEX) tokom projektovanog perioda rada od 20 godina.

IV.1. Investicioni troškovi

Ukupni investicioni troškovi sistema obuhvataju nabavku i ugradnju svih ključnih komponenti: fotonaponskih modula, baterijskog sistema, invertora, kompresionog rashladnog uređaja, cirkulacionih pumpi, rezervoara ohlađene vode, kao i pripadajuće instalacione opreme (cevi, ventili, sistem upravljanja). Struktura investicije prikazana je u Tabeli 2.

Tabela 2. Ukupni investicioni troškovi kompresionog rashladnog sistema koji se električnom energijom napaja iz fotonaponskog sistema

Proizvod	Broj komada	Cena €/kom	Ukupno €
Solarni panel	19	75	1.425
Baterija	1	4.800	4.800
Invertor	1	2.000	2.000
Parno-kompresiono rashladno postrojenje	1	6.000	6.000
Pumpe	2	100	200
Rezervoar	1	450	450
Cevi, ventili, sistem upravljanja		1.300	1.300
Ugradnja		1.600	1.600
Ukupni investicioni troškovi			17.775

Ukupna vrednost investicije iznosi 17.775 €, pri čemu najveći udeo u ukupnim troškovima imaju rashladni uređaj (33,8%), baterijski sistem (27,0%) i invertor (11,3%). Fotonaponski moduli učestvuju sa približno 8,0% u ukupnoj investiciji.

Ovakva struktura troškova ukazuje da skladištenje energije predstavlja jedan od dominantnih investicionih elemenata u off-grid konfiguraciji sistema.

IV.2. Eksploatacioni troškovi

S obzirom na to da je fotonaponski sistem dimenzionisan tako da u potpunosti pokriva potrebe rashladnog sistema za električnom energijom, troškovi nabavke električne energije iz distributivne mreže nisu prisutni. Time su direktni energetski eksploatacioni troškovi u smislu potrošnje električne energije jednaki nuli.

Međutim, u dugoročnom periodu rada potrebno je uzeti u obzir potencijalne troškove održavanja i eventualne zamene pojedinih komponenti, pre svega baterijskog sistema, čiji je radni vek kraći od radnog veka fotonaponskih modula. U ovoj analizi pretpostavljeno je da se osnovni troškovi održavanja uklapaju u ukupni vremenski horizont sistema i da ne menjaju značajno ukupnu ekonomsku sliku u odnosu na inicijalnu investiciju.

IV.3. Ukupni troškovi tokom perioda eksploatacije

Ukupni troškovi PV–kompresionog rashladnog sistema tokom perioda eksploatacije dominantno su određeni visinom početne investicije, dok su operativni troškovi relativno mali. Ovakva struktura troškova karakteristična je za sisteme zasnovane na obnovljivim izvorima energije, kod kojih se najveći deo troškova javlja u fazi instalacije, dok su varijabilni troškovi rada minimalni.

S obzirom na to da je fotonaponski sistem dimenzionisan tako da u potpunosti pokriva potrebe rashladnog postrojenja za električnom energijom, troškovi nabavke električne energije iz distributivne mreže ne postoje. Tokom eksploatacije javljaju se uglavnom troškovi redovnog održavanja, kao i eventualni troškovi zamene pojedinih komponenti sistema, pre svega baterijskog skladišta električne energije.

Radi potpunijeg sagledavanja ekonomskih performansi sistema, ukupni troškovi tokom radnog veka od 20 godina analizirani su kroz pokazatelj prosečne cene proizvedene rashladne energije, izražene u €/kWh.

IV.4 Specifični ekonomski pokazatelji

Radi potpunije tehnoekonomske evaluacije analiziranog koncepta, ukupna investicija izražena je kroz tri komplementarna pokazatelja: specifični investicioni trošak po jedinici rashladne snage, specifični trošak po jedinici klimatizovanog prostora i prosečna cena proizvedene rashladne energije tokom projektog perioda rada.

1) Specifični investicioni trošak po kW rashladne snage (€/kW)

$$c_{\text{inv,kW}} = \frac{\text{CAPEX}}{Q_{\text{nom}}} = \frac{17\,775}{15} = 1185 \text{ €/kW} \quad (5)$$

2) Specifični trošak po m² klimatizovanog prostora (€/m²)

$$c_{\text{inv,m}^2} = \frac{\text{CAPEX}}{A} = \frac{17\,775}{140} = 126,96 \text{ €/m}^2 \quad (6)$$

3) Cena proizvedene rashladne energije (€/kWh) za 20 godina

Za procenu prosečne cene proizvedene rashladne energije usvojen je projektovani radni vek sistema od 20 godina i referentni godišnji fond rada od 1500 sati, što odgovara tipičnom letnjem režimu rada od približno osam sati dnevno tokom perioda intenzivnog hlađenja. Na osnovu toga ukupno proizvedena rashladna energija tokom 20 godina iznosi 450.000 kWh.

Odnos ukupne investicije i ukupno proizvedene rashladne energije daje prosečnu cenu rashladne energije:

(a) Samo CAPEX (bez OPEX)

$$c_{\text{cool}} = \frac{\text{CAPEX}}{E_{\text{cool},20}} = \frac{17\,775}{450\,000} = 0,0395 \text{ €/kWh} \quad (7)$$

Pri tome je pretpostavljeno da sistem ne koristi električnu energiju iz mreže i da varijabilni energetske troškovi ne postoje, dok diskontovanje i eventualna zamena baterijskog sistema nisu uključeni u osnovni scenario.

(b) CAPEX + OPEX (održavanje - 1% godišnje)

$$c_{\text{cool}} = \frac{\text{CAPEX}}{E_{\text{cool},20}} = \frac{21\,240}{450\,000} = 0,0472 \text{ €/kWh} \quad (8)$$

(c) CAPEX + OPEX (održavanje + zamena baterije (1× u 10. godini 4.800 €))

$$c_{\text{cool}} = \frac{\text{CAPEX}}{E_{\text{cool},20}} = \frac{26\,040}{450\,000} = 0,0579 \text{ €/kWh} \quad (9)$$

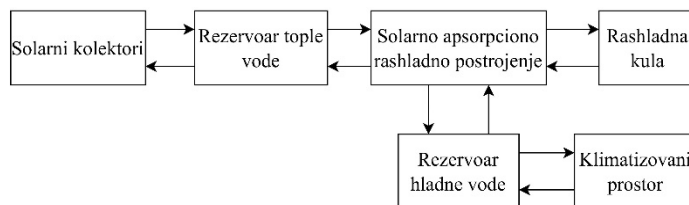
Dobijene vrednosti ukazuju na karakterističnu ekonomsku strukturu sistema zasnovanog na obnovljivim izvorima energije – visoku početnu investiciju i veoma niske operativne troškove, pri čemu dugoročna cena rashladne energije dominantno zavisi od trajnosti ključnih komponenti i vremenskog horizonta analize.

V SOLARNO APSORPCIONO RASHLADNO POSTROJENJE

Solarno apsorpciono hlađenje predstavlja tehnologiju koja omogućava korišćenje solarne toplotne energije za potrebe klimatizacije prostora. Za razliku od parno-kompresionog sistema, kod kog se kompresija rashladnog fluida ostvaruje mehaničkim radom kompresora, kod apsorpcionog sistema mehanička kompresija zamenjena je termički pogonjenim procesom. Na taj način solarna energija se direktno koristi kao pogonski izvor rashladnog ciklusa.

U poređenju sa drugim tehnologijama solarnog hlađenja (adsorpcioni, desikantni ili ejektorski sistemi), apsorpcioni rashladni uređaji postižu viši koeficijent hlađenja (COP), dok je njihovo glavno ograničenje potreba za relativno velikom površinom solarnih termičkih kolektora. Najčešće primenjivani radni par u klimatizacionim aplikacijama jeste voda/litijum-bromid (H₂O–LiBr), dok se par amonijak/voda (NH₃–H₂O) dominantno koristi u rashladnim sistemima nižih temperatura [8, 9].

U ovom radu analiziran je jednostepeni (single-effect) apsorpcioni rashladni sistem sa radnim parom H₂O–LiBr, u kombinaciji sa vakuumskim cevnom solarnim kolektorima.



Slika 4. Komponente solarnog apsorpcionog rashladnog sistema

V.1. Solarni termički kolektori

Kao izvor toplotne energije za generator apsorpcionog ciklusa korišćen je vakuumski cevni kolektor tipa ETC-30 proizvođača Apricus Solar. Osnovne tehničke karakteristike kolektora prikazane su u Tabeli 3.

Tabela 3. Tehnička karakteristike vakuumskog cevnog solarnog kolektora Apricus ETC-30 [10]

ETC-30 Vakuumski cevni solarni kolektor	
Dimenzije (DxŠxV)	2005x2196x136 mm
Maksimalna izlazna snaga	2014 W
Površina solarnog kolektora	2,40 m ²
Stepen korisnosti η_0	0,845
Linearni koeficijent toplotnih gubitaka a_1	1,47 W/m ² K
Kvadratni koeficijent toplotnih gubitaka a_2	0,01 W/m ² K
Protok	2 l/min (maks. 15 L/min)

Vakuumski cevni kolektori izabrani su zbog svoje visoke optičke efikasnosti, malih toplotnih gubitaka i sposobnosti da obezbede temperaturu tople vode u opsegu 70–95°C, a što odgovara zahtevima generatora apsorpcionog rashladnog uređaja.

Na osnovu časovnih vrednosti globalnog sunčevog zračenja G za referentni dan (4. avgust 2017. godine, Beograd, podaci iz PVGIS), određuje se toplotni protok koji apsorbuje jedan solarni kolektor u vremenskom intervalu od jednog časa [11]:

$$\Phi_{\text{doz}} = A_{\text{ETC}} G \eta_{\text{ETC}} \quad (10)$$

gde su:

A_{ETC} [m²] – površina jednog solarnog kolektora;

G [W/m²] – globalno sunčevo zračenje dozračeno na površinu kolektora;

η_{ETC} – stepen korisnosti solarnog kolektora, koji se najčešće određuje prema ISO test metodi [12, 13], odnosno pomoću sledećeg izraza:

$$\eta_{\text{ETC}} = \eta_0 - a_1 \frac{q_{\text{sr}} - q_{\text{amb}}}{G} - a_2 G \left(\frac{q_{\text{sr}} - q_{\text{amb}}}{G} \right)^2 \quad (11)$$

gde su:

η_0 – stepen korisnosti vakuumskog kolektora bez gubitaka toplote;

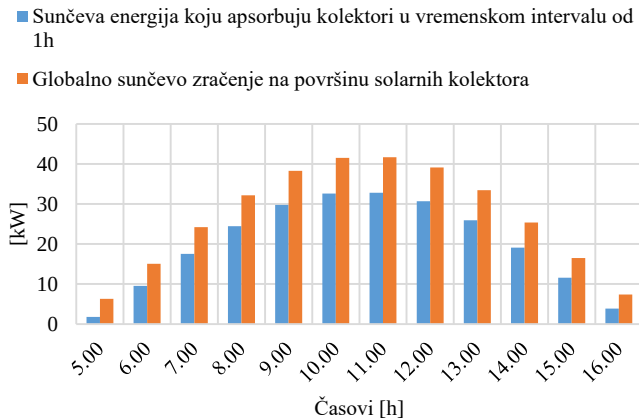
a_1 – linearni koeficijent toplotnih gubitaka;

a_2 – kvadratni koeficijent toplotnih gubitaka;

ϑ_{sr} – srednja temperatura radnog fluida na ulazu i izlazu iz kolektora;

ϑ_{amb} – temperatura okolnog vazduha.

određena je dnevna količina korisne apsorbovane toplote jednog kolektora, a koja iznosi 14,07 kWh (Slika 5).



Slika 5. Časovne vrednosti apsorbovane iskorišćene količine toplote 17 solarnih kolektora sa vakuumskim cevima

U proračunu je pretpostavljeno da je srednja temperatura vode na ulazu i izlazu iz kolektora konstantna i iznosi 70 °C, zahvaljujući prisustvu akumulacionog rezervoara tople vode.

V.2. Apsorpcioni rashladni uređaj

Analiza je sprovedena za apsorpcioni rashladni uređaj WEGRACAL® model Maral 1, nominalne rashladne snage od 15 kW i koeficijenta hlađenja $COP = 0,75$. Za odvođenje otpadne toplote potrebna je rashladna snaga recirkulacionog sistema od približno 35 kW [14]. Osnovne tehničke karakteristike ovog rashladnog uređaja prikazani su u Tabeli 4.

Tabela 4. Osnovne tehničke karakteristike apsorpcionog rashladnog uređaja WEGRACAL® model Maral 1

		Jedinica	WEGRACAL® model Maral 1
Topla voda	Temperatura na ulazu	°C	85
	Temperatura na izlazu	°C	70
	Protok	m ³ /h	1,2
Voda za odvođenje toplote iz kondenzatora i apsorbera	Temperatura na ulazu	°C	35
	Temperatura na izlazu	°C	27
	Protok	m ³ /h	6,8
Hladna voda	Temperatura na ulazu	°C	9
	Temperatura na izlazu	°C	15
	Protok	m ³ /h	2,2
	Potrošnja el. energije	kW	0,15
	COP	-	0,75

Prema podacima proizvođača, za ostvarivanje rashladnog kapaciteta od 15 kW potrebno je obezbediti toplotno opterećenje generatora od 20 kW [14]. Uzimajući u obzir dodatne gubitke od približno 2% u akumulacionom rezervoaru i cevnoj mreži, kao i faktor konverzije vakuumskog kolektora od 0,717, ukupno potrebna toplotna snaga solarnih kolektora iznosi 28,57 kW.

V.3. Određivanje broja kolektora

Pretpostavljajući da apsorpcioni rashladni uređaj radi osam sati dnevno, generator zahteva približno 228,57 kWh toplotne energije dnevno.

S obzirom na to da jedan kolektor sa vakuumskim cevima obezbeđuje 14,07 kWh korisne toplote tokom analiziranog dana, na osnovu energetske ravnoteže određeno je da je za podmirivanje potreba apsorpcionog rashladnog uređaja potrebno 17 kolektora, svaki sa 30 vakuumskih cevi.

Time je definisana ukupna površina i instalisana toplotna snaga solarnog podsistema.

V.4. Akumulacija i pomoćni sistemi

U skladu sa preporukama proizvođača apsorpcionog uređaja, usvojen je rezervoar ohlađene vode zapremine 1000 litara (preporučeni opseg 800–1000 l) [14].

Zapremina rezervoara tople vode određena je na osnovu odnosa zapremine rezervoara i apsorberske površine kolektora od 0,04 m³/m² [15], pri čemu je usvojen solarni rezervoar zapremine 1500 litara.

U analizi nije razmatran pomoćni grejač, uz pretpostavku da vakuumski cevni kolektori kontinuirano obezbeđuju potrebnu temperaturu tople vode od 85–90 °C. Takođe, trošak ventilokonvektora nije uključen u investicionu analizu, budući da predstavlja zajedničku komponentu i kod kompresionog i kod apsorpcionog sistema.

VI TEHNOEKONOMSKA ANALIZA APSORPCIONOG RASHLADNOG SISTEMA

Ekonomska analiza solarnog apsorpcionog rashladnog sistema obuhvata procenu ukupnih investicionih troškova, godišnjih troškova eksploatacije i troškova održavanja tokom projektovanog radnog veka sistema.

$$C_{\text{ukupno}} = C_{\text{investicioni}} + C_{\text{operativni}} + C_{\text{održavanje}} \quad (12)$$

Ukupni godišnji trošak sistema definiše se kao zbir amortizovanog investicionog troška, godišnjih troškova održavanja i troškova električne energije potrebne za rad pomoćnih komponenti sistema.

$$C_{\text{investicioni}} = A \cdot \frac{(1+i)^m \cdot i}{(1+i)^m - 1} \quad (13)$$

VI.1. Investicioni troškovi sistema

Ukupni investicioni troškovi obuhvataju nabavku apsorpcionog rashladnog uređaja, rashladnog tornja, solarnih termičkih kolektora, rezervoara tople i hladne vode, cirkulacionih pumpi, kao i troškove instalacije i prateće opreme (cevi, ventili i sistem upravljanja). Struktura investicije prikazana je u Tabeli 5.

Ukupna vrednost investicije iznosi 43275 €, pri čemu najveći deo investicije otpada na apsorpcioni rashladni uređaj i solarne termičke kolektore. Značajan udeo u ukupnim troškovima ima i rashladni toranj, koji je neophodan za odvođenje otpadne toplote iz kondenzatora i apsorbera rashladnog uređaja.

Radi procene godišnjeg investicionog troška, ukupna investicija

amortizovana je tokom projektovanog radnog veka sistema od 20 godina, uz pretpostavljenu diskontnu (kamatnu) stopu od 2,75%.

Tabela 5. Investicioni troškovi za solarni apsorpcioni rashladni sistemi

Ukupni investicioni trošak solarnog apsorpcionog sistema za hlađenje	
Rashladna snaga	15 kW
Apsorpciono rashladno postrojenje (1165 €/kW)	17.475 €
Rashladna kula	5.500 €
Vakuumski cevni solarni kolektori (17 komada)	13.600 €
Rezervoar tople vode (1500 litara)	1.400 €
Rezervoar hladne vode (1000 litara)	880 €
Cirkulacione pumpe	920 €
1. Cirkulaciona pumpa tople vode	
2. Cirkulaciona pumpa vode za hlađenje kondenzatora i apsorbera	
3. Cirkulaciona pumpa hladne vode	
Međuzbir	39.775 €
Cevi, ventili i upravljački sistem	2.000 €
Ugradnja	1.500 €
Ukupni investicioni trošak	43.275 €

VI.2. Operativni troškovi sistema

Za razliku od kompresionog sistema napajanog fotonaponskom energijom, kod apsorpcionog rashladnog sistema određena količina električne energije neophodna je za rad pomoćnih komponenti sistema. Električna energija koristi se za pogon ventilatora rashladnog tornja i cirkulacionih pumpi u solarnom i rashladnom krugu.

Ukupna električna snaga ovih potrošača procenjena je na 1,44 kW. Uz pretpostavljeni godišnji rad sistema od 1500 sati, ukupna godišnja potrošnja električne energije iznosi 2160 kWh godišnje.

Prema podacima iz godišnjeg izveštaja Agencije za energetiku za 2023. godinu, prosečna cena električne energije za domaćinstva u drugoj polovini godine iznosila je 10,46 €cent/kWh. Na osnovu toga godišnji trošak električne energije za rad pomoćnih komponenti apsorpcionog sistema iznosi približno 226 €

godišnje.

VI.3. Troškovi održavanja

Procena godišnjih troškova održavanja solarnih rashladnih sistema zavisi od više faktora, uključujući vrstu radnog fluida, intenzitet rada sistema i učestalost servisiranja. U literaturi se često kao aproksimacija koristi pretpostavka da troškovi održavanja iznose oko 1% inicijalne investicije, pri čemu se iz obračuna najčešće isključuju troškovi rezervoara vode.

U skladu sa ovom pretpostavkom, godišnji trošak održavanja analiziranog sistema procenjen je na približno 1% vrednosti osnovne opreme sistema, što predstavlja realističnu procenu za dugoročnu eksploataciju solarnih apsorpcionih sistema.

VI.4 Specifični investicioni pokazatelji

U cilju jasnijeg sagledavanja investicione efikasnosti analiziranih sistema, ukupna investicija prikazana je kroz specifične ekonomske pokazatelje izražene po jedinici rashladne snage, po jedinici klimatizovane površine i po jedinici proizvedene rashladne energije.

- 1) Specifični investicioni trošak po kW rashladne snage (€/kW)

$$c_{\text{inv,kW}} = \frac{\text{CAPEX}}{Q_{\text{nom}}} = \frac{43\,275}{15} = 2\,885 \text{ €/kW} \quad (14)$$

- 2) Specifični trošak po m² klimatizovanog prostora (€/m²)

$$c_{\text{inv,m}^2} = \frac{\text{CAPEX}}{A} = \frac{43\,275}{140} = 309,1 \text{ €/m}^2 \quad (15)$$

- 3) Cena proizvedene rashladne energije (€/kWh) za 20 godina

- (a) Samo CAPEX (bez OPEX)

$$c_{\text{cool}} = \frac{\text{CAPEX}}{E_{\text{cool},20}} = \frac{43\,275}{450\,000} = 0,0962 \text{ €/kWh} \quad (16)$$

- (b) CAPEX + OPEX (električna energija (226 €/god) + održavanje (410 €/god))

$$c_{\text{cool}} = \frac{\text{CAPEX} + \text{OPEX}}{E_{\text{cool},20}} = \frac{55\,995}{450\,000} = 0,1244 \text{ €/kWh} \quad (17)$$

Radi preglednijeg sagledavanja dobijenih rezultata i lakšeg poređenja analiziranih sistema, ključni ekonomski pokazatelji prikazani su u tabelarnom obliku u Tabeli 6.

Tabela 6. Poređenje specifičnih ekonomskih pokazatelja PV–kompresionog i solarnog apsorpcionog sistema

Pokazatelj	PV–kompresioni	Solarno–apsorpcioni
CAPEX (ukupno)	17.775 €	43.275 €
€/kW	1.185 €/kW	2.885 €/kW
€/m ²	≈ 127 €/m ²	≈ 309 €/m ²
€/kWh (CAPEX only)	0,0395 €/kWh	0,096 €/kWh
€/kWh (CAPEX+OPEX)	0,047 €/kWh (bez zamene baterije) / 0,058 €/kWh (sa zamenom)	0,124 €/kWh (el. energija + održavanje)

VII ZAKLJUČAK

U radu je izvršena tehnookonomska analiza i poređenje dva sistema solarnog hlađenja nominalne rashladne snage 15 kW: parno-kompresionog sistema napajanog električnom energijom iz fotonaponskog sistema sa baterijskim skladištenjem i parno-

apsorpcionog sistema pogonjenog toplotom iz vakuumskih cevnih solarnih kolektora.

Na osnovu sprovedenog dimenzionisanja utvrđeno je da PV–kompresioni sistem zahteva 19 fotonaponskih modula ukupne površine oko 38 m², dok apsorpcioni sistem zahteva 17 vakuumskih cevnih kolektora, kao i dodatnu opremu za

odvođenje otpadne toplote. Ukupna investicija PV–kompresionog sistema iznosi 17.775 €, dok investicija apsorpcionog sistema iznosi 43.275 €.

Specifični investicioni trošak PV–kompresionog sistema iznosi oko 1.185 €/kW rashladne snage ($\approx 127 \text{ €/m}^2$), dok za apsorpcioni sistem iznosi oko 2.885 €/kW ($\approx 309 \text{ €/m}^2$). Prosečna cena proizvedene rashladne energije tokom 20 godina procenjena je na približno 0,04–0,06 €/kWh za PV–kompresioni sistem i oko 0,12 €/kWh za solarno-apsorpcioni sistem.

Dobijeni rezultati pokazuju da je u analiziranim uslovima PV–kompresioni sistem tehnoeekonomski povoljnije rešenje za sisteme solarnog hlađenja manjih kapaciteta, prvenstveno zbog niže početne investicije i manjih ukupnih troškova tokom eksploatacije. Solarno-apsorpcioni sistemi ostaju interesantna alternativa u slučajevima kada postoji raspoloživa solarna toplotna energija ili drugi izvori niskotemperaturne toplote koji mogu da pokreću rashladni ciklus.

ZAHVALNICA

Ovde prikazani rezultati su rezultat istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru 451-03-34/2026-03/200105 od 05.02.2026. godine.

LITERATURA

- [1] Tracking Clean Energy Progress 2023, <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023> [pristupljeno 7.02.2026]
- [2] Photovoltaic geographical information system: Performance of grid-connected PV, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html [pristupljeno 7.02.2026]
- [3] SMGS Čileri i toplotne pumpe, https://www.smgs.rs/pdf/SMGS_CILERI_I_TOPLITNE_PUMPE.pdf
- [4] Mikulović, J., Đurišić Ž. *Solarna energetika*, Akademski misao, Beograd, 2019
- [5] HUAWEI SUN2000-10KTL-M1 HC Wechselrichter, https://minimipower.com/products/huawei-sun2000-10ktl-m1-wechselrichter?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwreW2BhBhEiwAavLwfBwDgge9o4s_khRD1t3tzLIdyKMj9MhmUMmsW7yWh0h5E0DXJZEzoxoC6VAQAyD_BwE [pristupljeno 7.02.2026]

- [6] What is a Lithium Iron Phosphate (LiFePO4) Battery: Properties, Advantages & Alternatives, <https://ecotreelithium.co.uk/news/what-are-lifepo4-batteries/> [pristupljeno 7.02.2026]
- [7] Canadian HiKu6 CS6R-415MS 1500V Silver Frame Solar Panel Monofacial, <https://sun.store/en/offer/9sZzybMg> [pristupljeno 7.02.2026]
- [8] Florides, G.A., Kalogirou, S.A., Tassou, S.A., Wrobel, L.C. Modelling and simulation of an absorption solar cooling system for Cyprus, *Solar Energy*, Vol. 72, No. 1, pp. 43–51, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00081-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00081-0)
- [9] Li, Z.F., Sumathy, K. Simulation of a solar absorption air conditioning system, *Energy Conversion & Management*, Vol. 42, No. 3, pp. 313–327, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00057-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00057-1)
- [10] Apricus ETC-30 solar collector, <https://www.apricus.com/ETC-30-Solar-Collector-pd43215927.html> [pristupljeno 7.02.2026]
- [11] Duffie, J.A., Beckman, W.A., Blair, N. *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*, John Wiley & Sons, Inc., 2020. <https://ndl.ethernet.edu.et/server/api/core/bitstreams/51194894-4622-4a2a-af57-4901a099abcb/content> [pristupljeno 7.02.2026]
- [12] Allan, J., Dehouche, Z., Stankovic, S., Mauricette, L. Performance testing of thermal and photovoltaic thermal solar collectors, *Energy Science & Engineering*, Vol. 3, pp. 310–326, 2015. <https://doi.org/10.1002/ese3.75>
- [13] Buonomano, A., Calise, F., d'Accadia, D.M., Ferruzzi, G., Frascogna, S., Palombo, A., Russo, R., Scarpellino, M. Experimental analysis and dynamic simulation of a novel high-temperature solar cooling system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 109, pp. 19–39, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.047>
- [14] Absorber Wegracal Maral, <https://www.eaw-energieanlagenbau.de/absorber-akm.html> [pristupljeno 7.02.2026]
- [15] Hang, Y., Qu, M., Zhao, F. Economical and environmental assessment of an optimized solar cooling system for a medium-sized benchmark office building in Los Angeles, California, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 2, pp. 648–658, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.005>

AUTORI

Marija Vasilev – asistent, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mvasilev@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6156-2451](https://orcid.org/0000-0001-6156-2451)
Branislav Petrović – asistent, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, bpetrovic@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-2429-0642](https://orcid.org/0000-0002-2429-0642)
Miloš Banjac – prof. dr, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mbanjac@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-8659-8581](https://orcid.org/0000-0001-8659-8581)

Techno-Economic Assessment of Compression and Absorption Systems for Solar-Driven Cooling

Abstract – This paper presents a techno-economic performance analysis and a comparison of two refrigeration systems capable of providing so-called solar cooling: a compression refrigeration system and an absorption refrigeration system. Solar radiation is considered the primary energy source for both systems. The differences between the systems arise from the energy conversion pathway and the principle by which the cooling process is achieved. In the compression refrigeration system, solar energy is converted into electrical energy using photovoltaic devices, which is subsequently used to drive the compressor. In the absorption refrigeration system, the cooling process is achieved using thermal energy supplied by solar thermal collectors. To ensure comparability of the results, both refrigeration systems are analysed for the same nominal cooling capacity of 15 kW.

Index Terms – Solar-driven cooling, Vapour compression Refrigeration system, Absorption refrigeration system, Techno-economic analysis