

Optimizacija energetske obnove zgrade s GVIK sustavom

Vonić, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:113199>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-20**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**OPTIMIZACIJA ENERGETSKE OBNOVE ZGRADE S GVIK
SUSTAVOM**

Rijeka, ožujak 2023.

Iva Vonić
0035207560

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**OPTIMIZACIJA ENERGETSKE OBNOVE ZGRADE S GVIK
SUSTAVOM**

Mentor: Doc. dr. sc. Boris Delač

Komentor: Prof.dr.sc. Branimir Pavković

Rijeka, ožujak 2023.

Iva Vonić
0035207560

Rijeka, 10. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**
Predmet: **Računalno modeliranje sustava u termoenergetici i termotehnici**
Grana: **2.11.02 procesno energetska strojarstvo**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Iva Vonić (0035207560)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**
Modul: **Termotehnika**

Zadatak: **Optimizacija energetske obnove zgrade s GVIK sustavom / Optimization of building and HVAC system refurbishment**

Opis zadatka:

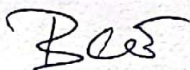
Za postojeću obiteljsku kuću smještenu na području Sjevernog Jadrana potrebno je utvrditi optimalne parametre energetske obnove vanjske ovojnice kao i pogonske parametre sustava grijanja, hlađenja, ventilacije i pripreme potrošne tople vode. Simulacije provesti dinamičkim energetske modelom simulacijskog sučelja TRNSYS. Koncept tehničkog sustava treba sadržavati mehaničku ventilaciju s povratom topline, solarne toplinske ili fotonaponske kolektore i dizalicu topline zrak - zrak. Proračune je potrebno izraditi u skladu s trenutno važećom regulativom u Republici Hrvatskoj. Arhitektonske podloge su sastavni dio zadatka. Svi potrebni ulazni podaci bit će dogovoreni s mentorom.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

1. V. E.

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Doc. dr. sc. Boris Delač



Prof. dr. sc. Branimir Pavković (komentor)

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad : „Optimizacija energetske obnove zgrade s GVIK sustavom“, pod stručnim vodstvom mentora doc. dr. sc. Borisa Delača i komentora prof. dr. sc. Branimira Pavkovića koristeći znanja stečena na fakultetu te navedenu literaturu.

Rijeka, ožujak 2023.

Iva Vonić

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Borisu Delaču na odvojenom vremenu, prenesenom znanju i pruženoj pomoći tijekom izrade ovog rada te tijekom studija.

Zahvaljujem svim prijateljima i kolegama na potpori i prijateljstvu tijekom studiranja. Hvala vam na svim lijepim trenucima, pomoći te beskrajnoj vjeri u mene.

Posebno hvala mojoj obitelji, ponajviše roditeljima, na podršci, pomoći i strpljenju tijekom cijelog studija.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. DEFINIRANJE TOPLINSKOG MODELA	2
2.1. 3D model kuće	2
2.2. Definiranje građevnih elemenata kuće	3
2.3. Prozori i vrata	5
2.4. Infiltracija zraka	6
2.5. Grijanje i hlađenje	6
3. PRORAČUN POTREBNE ENERGIJE ZA GRIJANJE I HLAĐENJE	9
3.1. Rezultati proračuna	9
4. PROJEKTNI UČINCI ZA GRIJANJE I HLAĐENJE	11
5. ANALIZA OBNOVE VANJSKE OVOJNICE	13
5.1. Godišnja potrošnja energije za različita stanja vanjske ovojnice	14
5.2. Projektni učinci za različita stanja vanjske ovojnice	15
5.3. Određivanje optimalnih parametara obnove vanjske ovojnice	16
5.4. Potrošnja energije i projektni učinci za obnovljeno stanje	22
5.5. Mehanička ventilacija za pokrivanje minimalnog provjetravanja	24
6. KONCEPT TEHNIČKOG SUSTAVA	30
6.1. Sustav grijanja, hlađenja i pripreme potrošne tople vode	30
6.2. Dizalice topline	30
6.3. Princip rada dizalice topline zrak-zrak	31
6.4. Odabir dizalice topline i kalibracija modela	32
6.5. Rezultati simulacije sustava s dizalicom topline	36
6.6. Sustav za pripremu potrošne tople vode	38
6.6.1. Proračun potrošne tople vode	38
6.6.2. Solarni sustav za pripremu PTV-a	42
6.7. Fotonaponski sustav	51
7. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA SIMULACIJA	55

8. ODREĐIVANJE OPTIMALNIH PARAMETARA GVIK SUSTAVA.....	58
8.1. Podsustav pripreme PTV-a.....	58
8.2. Podsustav GVIK-a.....	65
9. ZAKLJUČAK.....	71
10. LITERATURA.....	73
11. SAŽETAK.....	75
12. ABSTRACT.....	76
13. POPIS TABLICA.....	77
14. POPIS SLIKA.....	79

1. UVOD

Zadatak ovog rada je bio odrediti optimalne parametre energetske obnove vanjske ovojnice postojeće obiteljske kuće smještene na području Sjevernog Jadrana te pogonske parametre sustava grijanja, hlađenja, ventilacije i pripreme potrošne tople vode. Korištenjem detaljnog dinamičkog energetskog modela u sklopu računalnog programa TRNSYS provedene su cjelogodišnje simulacije potrošnje korisne energije za grijanje i hlađenje.

Na temelju izrađenog toplinskog modela postojeće kuće provedene su simulacije za različita stanja vanjske ovojnice. Varirana je debljina izolacije vanjskih zidova te karakteristike prozirnih elemenata ovojnice u svrhu smanjenja potrošnje energije za grijanje i hlađenje. Optimalno stanje određeno je na temelju minimalnih ukupnih troškova koji uz investicijske troškove uključuju i pogonske troškove odnosno troškove potrošnje korisne energije za grijanje i hlađenje objekta za razmatrani period od 20 godina.

Obnova kuće uključivala je i zamjenu postojećeg sustava grijanja uz pomoć kotla na loživo ulje s energetski efikasnijim sustavom. Predviđen je novi tehničkog sustav koji sadrži mehaničku ventilaciju s povratom topline, dizalicu topline zrak-zrak, solarne toplinske kolektore i fotonaponske module. Za predviđeni tehnički sustav određeni su optimalni pogonski parametri. Glavni cilj je povećanje energetske učinkovitosti i smanjenje potrošnje primarne energije u skladu s važećom regulativom u Republici Hrvatskoj. Osim aspekta smanjenja potrošnje energije za optimalni odabir sustava od presudne važnosti je ekonomska isplativost.

2. DEFINIRANJE TOPLINSKOG MODELA

2.1. 3D model kuće

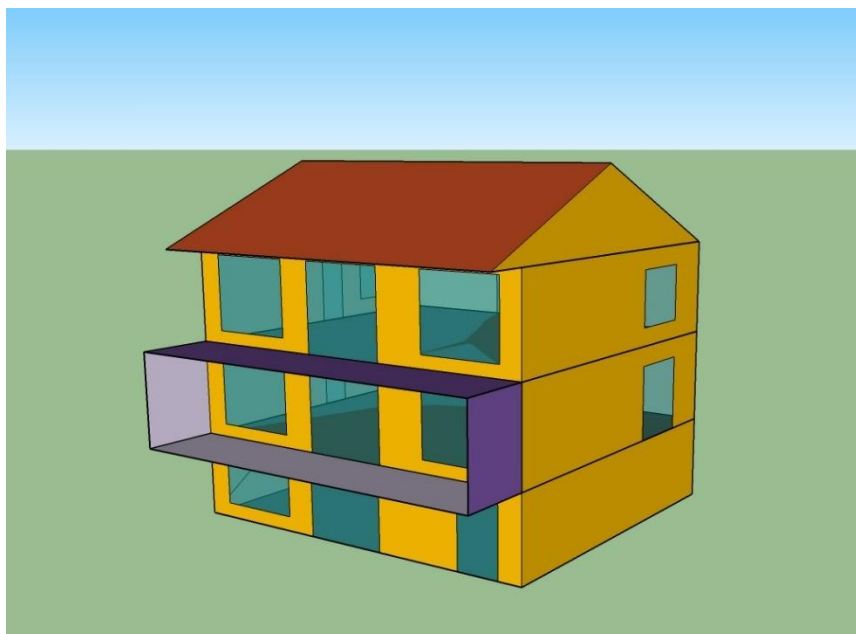
Za provedbu simulacija korišten je višezonski toplinski model zgrade Type 56 koji podrazumijeva dinamičko provođenje topline kroz građevinske elemente. Pri izradi modela korišten je Trnsys3D dodatak za Google Sketchup. Na temelju danih arhitektonskih podloga izrađena je 3D geometrija postojeće kuće uz definiranje toplinskih zona. Kuća se sastoji od tri grijane etaže (stana) i jednog negrijanog tavana te su shodno tome odabrane toplinske zone. Ukupna korisna površina kuće iznosi 284 m².

Izrađeni model sastoji se od sljedećih toplinskih zona:

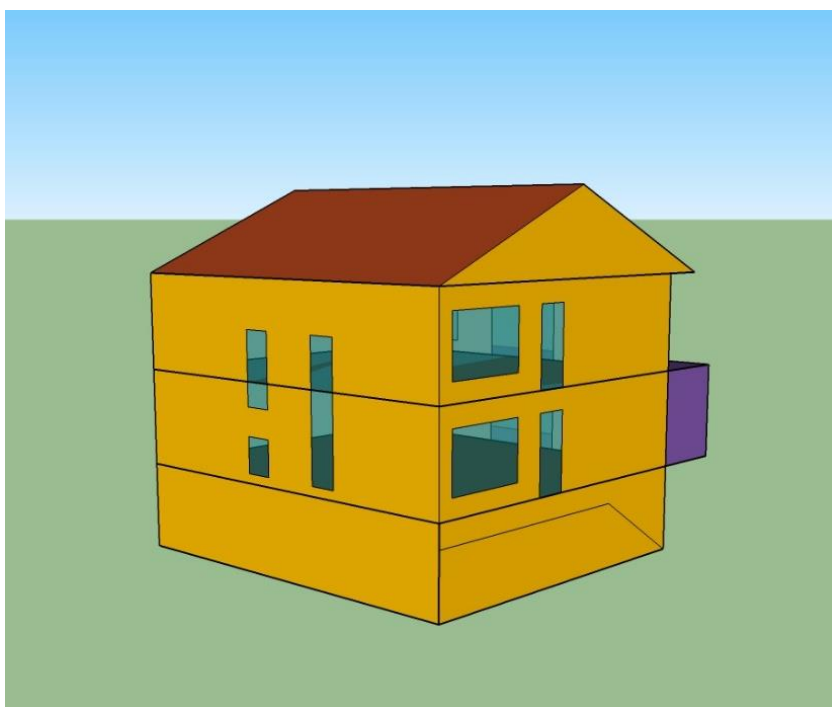
- Toplinska zona 1 – prizemlje
- Toplinska zona 2 – 1. kat
- Toplinska zona 3 – 2. kat
- Toplinska zona 4 – negrijani tavan

Pri izradi modela definiraju se i ostakljenja odnosno prozori i vrata te zasjenjenja. Uz definiranje zona potrebno je i odrediti za pojedine plohe zona njihove karakteristike: tip, konstrukciju, rubni uvjet te graničnu zonu.

Na sljedećoj slici prikazan je izrađeni model s pripadajuće 4 toplinske zone.



Slika 2.1 Model kuće - jugoistočno pročelje



Slika 2.2 Model kuće - sjeverozapadno pročelje

2.2. Definiranje građevnih elemenata kuće

Izrađena 3D geometrija kuće učitava se u programu Simulation Studio. Potrebno je definirati orijentaciju objekta te lokaciju što je za slučaj ove kuće grad Rijeka. U dijelu programa Building definiraju se debljine i sastav slojeva građevnih elemenata odnosno karakteristike svih neprozirnih i prozirnih elemenata ovojnice uključujući i zasjenjenja. U nastavku su prikazane tablice s pojedinim slojevima i njihovim karakteristikama za građevne elemente postojeće kuće koji su određeni na temelju danih arhitektonskih podloga.

Tablica 2.1. Pod na tlu

Pod na tlu				
Slojevi	Debljina sloja [m]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet c [J/kgK]
keramičke pločice	0,01	2300	1,3	840
betonska podloga	0,05	2400	2	1000
ekspandirani polistiren (EPS)	0,06	12	0,032	1260
bitumenska traka s uloškom staklenog voala	0,008	1100	0,23	1000
betonska podloga	0,1	2400	2	1000
pijesak, šljunak	0,33	1700	0,81	1000

Tablica 2.2. Međukatna konstrukcija

Međukatna konstrukcija				
Slojevi	Debljina sloja [m]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet c [J/kgK]
drvo – tvrdo – bjelogorica	0,02	700	0,18	1600
cementni estrih	0,05	2000	1,6	1100
PE folija, preklopljena	0,001	1000	0,19	1250
ekspandirani polistiren	0,04	12	0,032	1260
armirani beton	0,16	2500	2	1000
vapneno-cementna žbuka	0,01	1800	1	1000

Tablica 2.3. Kosi krov

Kosi krov				
Slojevi	Debljina sloja [m]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet c [J/kgK]
drvo – tvrdo – bjelogorica	0,02	700	0,18	1600
krovnna ljepljenka	0,001	1100	0,23	1000
crijep	0,012	2300	1,3	840

Tablica 2.4. Strop prema negrijanom tavanu

Strop – negrijani tavan				
Slojevi	Debljina sloja [m]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet c [J/kgK]
drvene ploče od usmjerenog iverja (OSB)	0,03	650	0,13	1700
paropropusna folija	0,001	1100	0,23	1000
mineralna vuna (MW)	0,08	120	0,035	1030
armirani beton	0,16	2500	2,6	1000
vapneno-cementna žbuka	0,01	1800	1	1000

Tablica 2.5. Vanjski zid

Vanjski zid				
Slojevi	Debljina sloja [m]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet c [J/kgK]
vapneno-cementna žbuka	0,025	1800	1	1000
šuplji blokovi od gline	0,25	900	0,42	900
toplinsko-izolacijska žbuka	0,01	400	0,11	1000

Tablica 2.6. Vanjski zid prema tlu

Vanjski zid prema tlu				
Slojevi	Debljina sloja [m]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet c [J/kgK]
vapneno-cementna žbuka	0,025	1800	1	1000
šuplji blokovi od gline	0,25	900	0,42	900
toplinsko-izolacijska žbuka	0,01	400	0,11	1000

U sljedećoj tablici dan je prikaz koeficijenata apsorpcije sunčevog zračenja i koeficijenata konvektivnog prijelaza topline za navedene građevne elemente.

Tablica 2.7. Koeficijenti apsorpcije zračenja i prijelaza topline

Konstrukcijski element	Koeficijent apsorpcije sunčeva zračenja, ϵ		Koeficijent konvektivnog prijelaza topline, α [W/m ² K]	
	Prednja strana	Stražnja strana	Prednja strana	Stražnja strana
Pod na tlu	0,4	0,6	3,056	0,0003
Međukatna konstrukcija	0,25	0,4	3,056	3,056
Kosi krov	0,6	0,4	3,056	17,778
Strop prema negrijanom tavanu	0,3	0,4	3,056	17,778
Vanjski zid	0,25	0,3	3,056	17,778
Vanjski zid prema tlu	0,25	0,3	3,056	17,778

2.3. Prozori i vrata

Potrebno je definirati karakteristike prozirnih građevnih elemenata.

Za sve prozore izabran je tip prozora iz baze podataka kojeg čini dvostruko ostakljenje debljine 4 mm sa slojem zraka debljine 16 mm između stakala. Koeficijent prolaska topline za postojeće prozore iznosi $U = 2,83$ W/m²K, a stupanj propuštanja ukupne sunčeve energije kroz ostakljenje iznosi $g = 0,755$. Površina okvira u ukupnoj površini prozora čini 20 %.

Za prozore se također definira unutarnji tip zasjenjenja pri čemu faktor nepropusnosti na sunčevo zračenje iznosi 0,1 te je izabrana vanjska regulacija zasjenjenja.

Za sva vanjska vrata izabran je tip prozora kojeg čini staklo debljine 4 mm. Udio okvira u ukupnoj površini iznosi 80 %. Koeficijent prolaska topline te faktor g jednaki su kao i u slučaju prozora.

2.4. Infiltracija zraka

Za sve toplinske zone definirana je prirodna ventilacija (infiltracija). Minimalni potrebni broj izmjena vanjskog zraka određen je prema normi DIN V 18599-2. Za objekt je predviđena mehanička ventilacija s povratom topline koja će biti obrađena naknadno. [5]

Ukupna izmjena zraka računa se prema izrazu:

$$n = n_{\text{inf}} + n_{\text{min}} \quad (2.1) [4]$$

gdje je:

n_{inf} – broj izmjena zraka uslijed infiltracije [h^{-1}]

n_{min} – minimalni broj izmjena zraka [h^{-1}]

usvojeno je $n_{\text{min}} = 0,5 \text{ h}^{-1}$ [4]

Broj izmjena zraka uslijed infiltracije računa se prema izrazu:

$$n_{\text{inf}} = e_{\text{wind}} \cdot n_{50} \quad (2.2)$$

gdje je:

n_{50} – broj izmjena zraka pri narinutoj razlici tlaka od 50 Pa [h^{-1}]

$n_{50} = 4 \text{ h}^{-1}$ za kategoriju II zrakonepropusnosti zgrade (DIN V 18599-2)

e_{wind} – koeficijent zaštićenosti zgrade od vjetra

$e_{\text{wind}} = 0,07$ za srednje zaklonjene zgrade i izloženost više od jedne fasade (HRN EN ISO 13789)

slijedi:

$$n_{\text{inf}} = 4 \cdot 0,07 = 0,28$$

te ukupna izmjena zraka iznosi:

$$n = 0,28 + 0,5 = 0,78 \text{ h}^{-1}$$

2.5. Grijanje i hlađenje

Za toplinske zone u kojima borave ljudi (prizemlje, 1. kat, 2. kat) definira se idealno grijanje i hlađenje u svrhu izračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje. Za navedene tri toplinske zone postavljeno je idealno grijanje s neograničenim učinkom pri čemu projektna temperatura u prostorijama iznosi 20 °C. Grijanje je aktivno u zimskim mjesecima kada nema hlađenja, a sezona grijanja traje od 10. do 4. mjeseca (*Tablica 2.8.*).

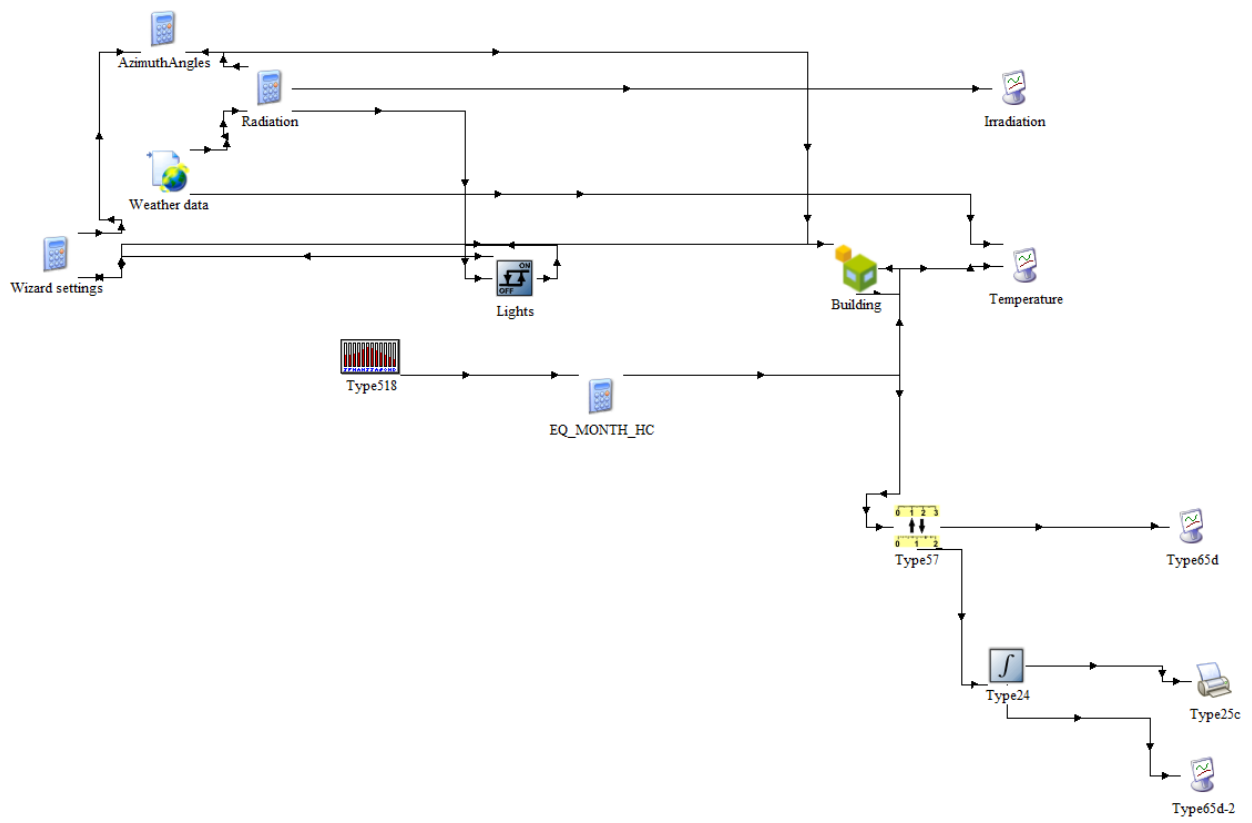
Hlađenje je aktivno u ljetnim mjesecima kada nije prisutno grijanja te sezona hlađenja traje od 5. do 9. mjeseca. Projektna temperatura u prostorijama iznosi 24 °C. Uključeno je i razvlaživanje zraka pri čemu projektna relativna vlažnost zraka iznosi 50 %.

Tablica 2.8. Sezona grijanja/hlađenja

Mjesec	Grijanje/hlađenje
Siječanj	grijanje
Veljača	grijanje
Ožujak	grijanje
Travanj	grijanje
Svibanj	hlađenje
Lipanj	hlađenje
Srpanj	hlađenje
Kolovoz	hlađenje
Rujan	hlađenje
Listopad	grijanje
Studeni	grijanje
Prosinac	grijanje

Pod unutarnjim dobitcima topline podrazumijevaju su dobiti topline zbog prisustva ljudi, zbog uređaja i rasvjete. Od unutarnjih dobitaka topline za pojedinu zonu definiraju se dobiti od rasvjete u iznosu od 5 W/m² površine toplinske zone. [4]

Na *Slici 2.3.* prikazano je korisničko sučelje programa Trnsys s osnovnim modelom kuće.



Slika 2.3. Korisničko sučelje - osnovni model

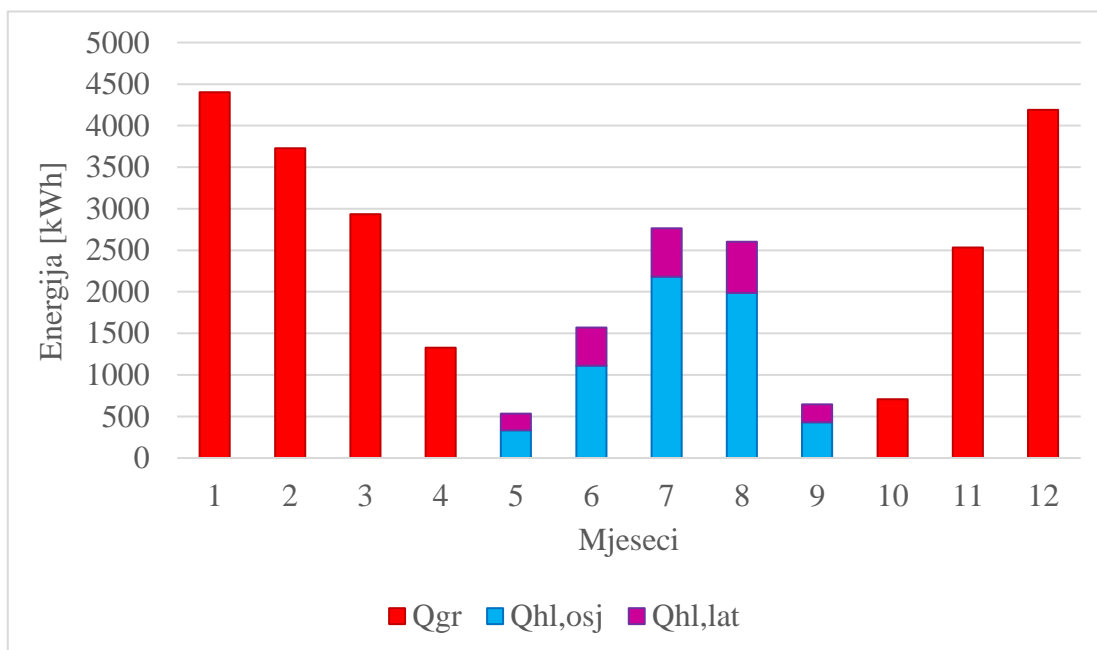
3. PRORAČUN POTREBNE ENERGIJE ZA GRIJANJE I HLAĐENJE

Za osnovni model izvršen je proračun godišnje potrošnje korisne energije za grijanje i hlađenje. Osnovni model poslužio je za preliminarnu analizu i odabir optimalnih parametara vanjske ovojnice kuće. Najprije je proračun proveden za postojeće stanje vanjske ovojnice, a potom za slučajeve s toplinskom izolacijom vanjske ovojnice pri čemu je varirana debljina izolacije vanjskih zidova te za slučajeve s različitim karakteristikama prozora i vrata odnosno ostakljenja.

Proračun se vrši u vremenskim koracima od 1 h za vremenski period od godine dana (ukupno 8760 h).

3.1. Rezultati proračuna

U sljedećem dijagramu prikazani su rezultati proračuna godišnje potrošnje energije za grijanje Q_{gr} i potrošnje energije za hlađenje Q_{hl} (osjetna toplina $Q_{hl,osj}$ + latentna toplina $Q_{hl,lat}$) po mjesecima za postojeće stanje vanjske ovojnice bez izolacije.



Slika 3.1. Potrošnja energije za grijanje i hlađenje po mjesecima

Ukupna godišnja potrošnja energija za grijanje iznosi 19819 kWh, a za hlađenje 8116 kWh pri čemu osjetna toplina iznosi 6043 kWh, a latentna 2073 kWh.

Specifična potrošnja korisne energije za grijanje za korisnu površinu zgrade $A_k = 284 \text{ m}^2$ iznosi 70 kWh/m^2 . Kako bi se ta vrijednost mogla usporediti s dopuštenom prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti potrebno je izračunati faktor oblika zgrade.

Faktor oblika zgrade određuje se prema izrazu:

$$f_0 = \frac{A}{V_e} \quad (3.1) [13]$$

gdje je:

f_0 – faktor oblika zgrade [m^{-1}]

A – oplošje grijanog dijela zgrade [m^2]

V_e – obujam grijanog dijela zgrade [m^3]

Faktor oblika za razmatranu zgradu iznosi:

$$f_0 = \frac{481}{708} = 0,68$$

Prema Tehničkom propisu najveća dopuštena vrijednost godišnje potrebne toplinske energije za grijanje po jedinici korisne površine $Q''_{\text{H,nd}}$ za rekonstrukciju postojeće obiteljske kuće na lokaciji primorske Hrvatske za faktor oblika $0,20 < f_0 < 1,05$ iznosi:

$$Q''_{\text{H,nd}} = 19,24 + 38,82 \cdot f_0 \quad (3.2) [13]$$

$$Q''_{\text{H,nd}} = 19,24 + 38,82 \cdot 0,68 = 45,64 \text{ kWh/m}^2$$

Dobivena specifična potrošnja korisne energije za grijanje za postojeću kuću ne zadovoljava vrijednost prema Tehničkom propisu.

4. PROJEKTNİ UČINCI ZA GRIJANJE I HLAĐENJE

Projektne učinci za grijanje i hlađenje računaju se za projektne uvjete te služe za dimenzioniranje opreme odnosno odabir ogrjevnih/rashladnih tijela.

Za izračun projektne učinka za grijanje potrebno je u modelu zgrade postaviti konstantnu temperaturu vanjskog zraka koja je jednaka projektnoj za zadanu lokaciju te konstantnu temperaturu tla za čiju vrijednost se uzima srednja godišnja temperatura vanjskog zraka. Za grad Rijeku vanjska projektna temperatura zraka iznosi $-7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok srednja godišnja temperatura iznosi $14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Također, potrebno je isključiti unutarnje dobitke topline i sunčevo zračenje. Postavlja se grijanje toplinskih zona na projektnu temperaturu od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ te ono radi bez prekida.

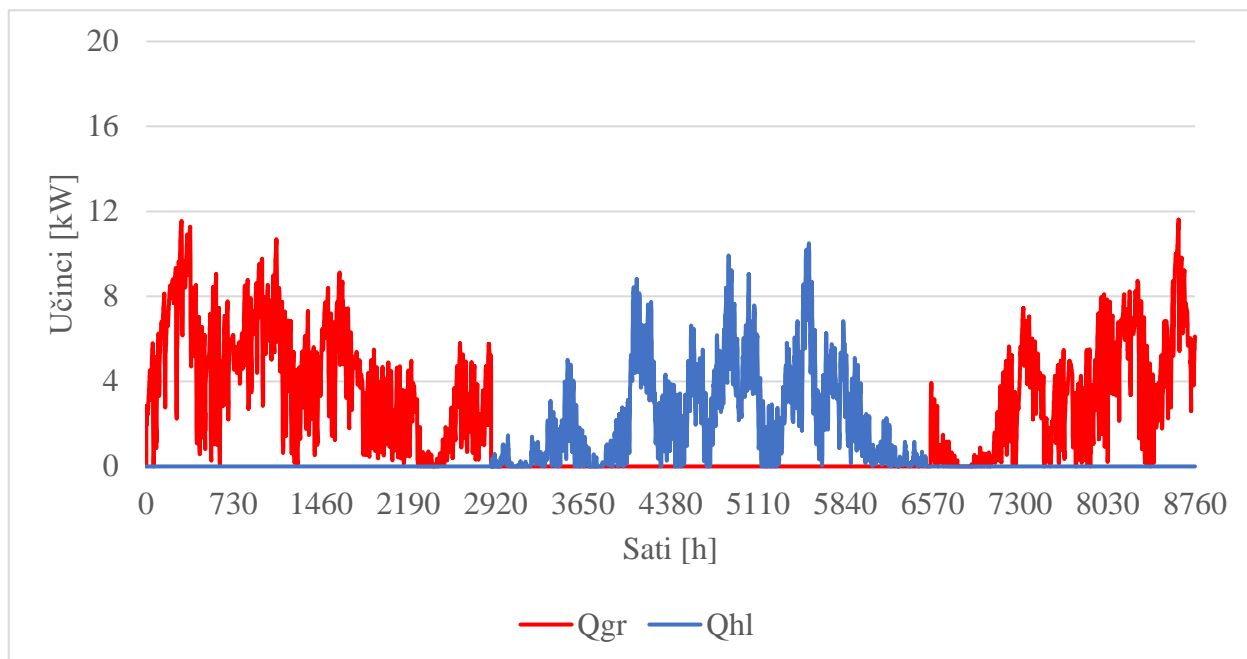
Za izračun projektne učinka za hlađenje postavlja se konstantna temperatura i relativna vlažnost vanjskog zraka koje su određene projektne uvjetima. Vanjska projektna temperatura iznosi $31,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, a relativna vlažnost zraka 97% . Unutarnji dobitci su uključeni kao i sunčevo zračenje pri čemu se periodički ponavlja najtopliji dan u godini odnosno simulacija se provodi u periodu ljeta. Toplinske zone se hlade na projektne temperaturu u iznosu od $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ te se također podrazumijeva rad bez prekida. [4, 6]

U sljedećoj tablici prikazani su izračunati projektne učinci za grijanje i hlađenje za postojeće stanje vanjske ovojnice bez izolacije.

Tablica 4.1. Projektne učinci – postojeće stanje

Projektne učinci	
Grijanje	Hlađenje
$\dot{Q}_{gr,proj}$ [kW]	$\dot{Q}_{hl,proj}$ [kW]
16,4	17,2

Na Slici 4.1. prikazani su satni učinci za grijanje i hlađenje za referentnu godinu u slučaju postojeće kuće. Maksimalni učinak za grijanje iznosi $11,6\text{ kW}$, dok maksimalni ukupni učinak u hlađenju iznosi $10,5\text{ kW}$. Dobiveni učinci su manji od projektne budući da su temperature u referentnoj godini više od projektne temperatura.



Slika 4.1. Satni učinci za grijanje i hlađenje u referentnoj godini

5. ANALIZA OBNOVE VANJSKE OVOJNICE

Energetska obnova vanjske ovojnice kuće uključivala je razmatranja različitih debljina izolacije vanjskih zidova te različite tipove ostakljenja.

Toplinska izolacija postavlja se s vanjske strane zidova prema okolišu. Za izolaciju vanjskih zidova izabran je izolacijski materijal mineralna vuna čija toplinska vodljivosti iznosi $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$. Debljina izolacije uzeta je u koracima počevši od minimalne debljine izolacije potrebne da koeficijent prolaska topline vanjskih zidova zadovoljava dopuštenu vrijednost prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama. Prema tehničkom propisu najveća dopuštena vrijednost koeficijenta prolaska topline za vanjske zidove za rekonstrukciju postojećih zgrada te za primorsku Hrvatsku iznosi $U = 0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$. [13]

Koeficijent prolaska topline postojećih neizoliranih vanjskih zidova iznosi $U = 1,135 \text{ W/m}^2\text{K}$. Minimalna potrebna debljina izolacije iznosi 5 cm uz koeficijent prolaska topline $U = 0,449 \text{ W/m}^2\text{K}$.

U sljedećoj tablici prikazani su koeficijenti prolaska topline vanjskih zidova za različite debljine izolacije pri čemu $d = 0 \text{ cm}$ označava postojeće stanje bez izolacije.

Tablica 5.1. Koeficijenti prolaska topline za različite debljine izolacije

Debljina izolacije d [cm]	Koeficijent prolaska topline U [$\text{W/m}^2\text{K}$]
0	1,135
5	0,449
6	0,398
8	0,324
10	0,273
12	0,236
14	0,208

Kako bi se smanjila potrebna energija za grijanje razmatrana je i ugradnja novih prozora i vrata. Simulacije su provedene za različite tipove ostakljenja koje karakterizira koeficijent prolaska topline U (staklo + okvir) te stupanj propuštanja ukupne sunčeve energije kroz ostakljenje g . Za postojeće prozore i vrata koeficijent prolaska topline iznosi $U = 2,83 \text{ W/m}^2\text{K}$, dok je $g = 0,755$.

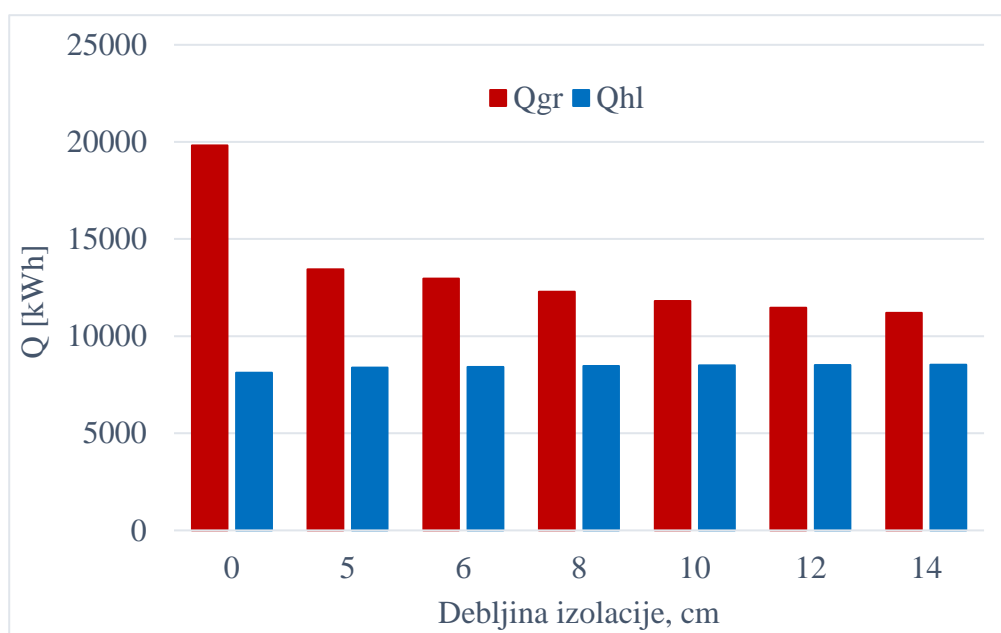
Prema tehničkom propisu najveća dopuštena vrijednost koeficijenta prolaska topline za prozore iznosi $U = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. [13] U *Tablici 5.2.* prikazani su razmatrani tipovi ostakljenja.

Tablica 5.2. Karakteristike različitih tipova ostakljenja

Tip ostakljenja	Koeficijent prolaska topline U [$\text{W/m}^2\text{K}$]	g
Postojeće	2,83	0,755
Tip 1	1,4	0,622
Tip 2	1,3	0,298
Tip 3	0,7	0,501
Tip 4	0,7	0,294

5.1. Godišnja potrošnja energije za različita stanja vanjske ovojnice

Na *Slici 5.1.* vidljiv je grafički prikaz rezultata ukupne godišnje potrošnje energije za grijanje i hlađenje za različite debljine izolacije.

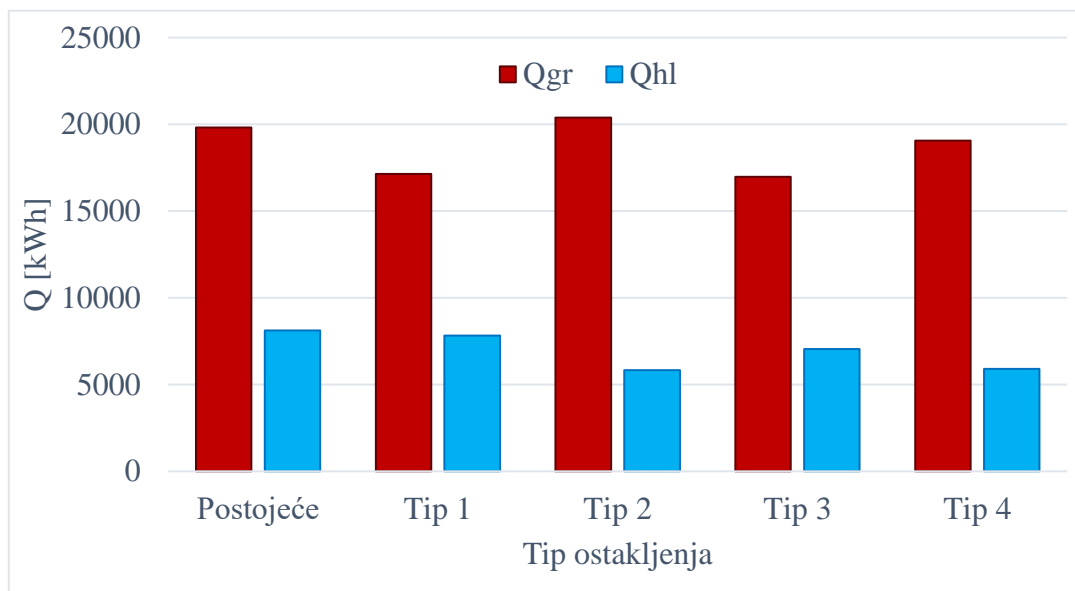


Slika 5.1. Godišnja potrošnja energije ovisno o debljini izolacije

Iz rezultata je vidljivo da prilikom izolacije vanjskih zidova dolazi do značajnog smanjenja potrošnje energije za grijanje, dok je potrošnja energija za hlađenje neznatno porasla. U slučaju izolacije zidova mineralnom vunom od 5 cm energija za grijanje se smanjila 32,2 % u odnosu na

postojeće neizolirano stanje, dok je energija za hlađenje porasla 3,3 %. Daljnjim povećanjem debljine sloja izolacije smanjenje se efekt pada energije za grijanje.

Sljedeći dijagram prikazuje rezultate ukupne godišnje potrošnje energije za grijanje i hlađenje za različite tipove ostakljenja.



Slika 5.2. Godišnja potrošnja energije ovisno o tipu ostakljenja

Kod zamjene postojećih prozora i vrata s tipom ostakljenja 1 godišnja potrošnja energije za grijanje smanjila se za 13,5 %, dok je energija za hlađenje porasla 3,6 %.

5.2. Projektni učinci za različita stanja vanjske ovojnice

U sljedećim tablicama prikazani su izračunati projektni učinci za grijanje i hlađenje za varijacije debljine izolacije i tipova ostakljenja.

Tablica 5.3. Projektni učinci za različite debljine izolacije

Debljina izolacije d , cm	Projektni učinci	
	Grijanje $\dot{Q}_{gr,proj}$ [kW]	Hlađenje $\dot{Q}_{hl,proj}$ [kW]
0	16,4	17,2
5	13,3	16,47
6	13	16,42
8	12,7	16,33
10	12,5	16,28
12	12,3	16,24
14	12,2	16,21

Iz rezultata je vidljivo da se projektni učinci za grijanje i hlađenje u slučaju izolacije vanjskih zidova smanjuju u odnosu na postojeće neizolirano stanje. U slučaju izolacije zidova mineralnom vunom od 5 cm projektni učinak za grijanje smanjio se za 19 %, a projektni učinak za hlađenje smanjio se za 4,5 %.

Tablica 5.4. Projektni učinci za različite tipove prozora i vrata

Tip ostakljenja	Projektni učinci	
	Grijanje $\dot{Q}_{gr,proj}$ [kW]	Hlađenje $\dot{Q}_{hl,proj}$ [kW]
Postojeće	16,4	17,2
Tip 1	14,99	16,5
Tip 2	14,91	14,5
Tip 3	14,14	15,6
Tip 4	14,11	14,4

U slučaju ostakljenja tipa 1 projektni učinak za grijanje smanjio se za 8,6 %, a projektni učinak za hlađenje smanjio se za 4,2 %.

5.3. Određivanje optimalnih parametara obnove vanjske ovojnice

Glavni cilj energetske obnove je smanjenje potrošnje energije za grijanje i hlađenje pri čemu se optimalno stanje određuje na temelju najnižih ukupnih troškova.

Optimalna debljina izolacije vanjskih zidova odabrana je na temelju minimalnih ukupnih troškova za grijanje tijekom razmatranog perioda od 20 godina. Ukupne troškove čine investicijski troškovi te pogonski troškovi energije za grijanje.

$$c_{\text{uk}} = c_i + c_p$$

gdje je:

c_{uk} – ukupni troškovi [€]

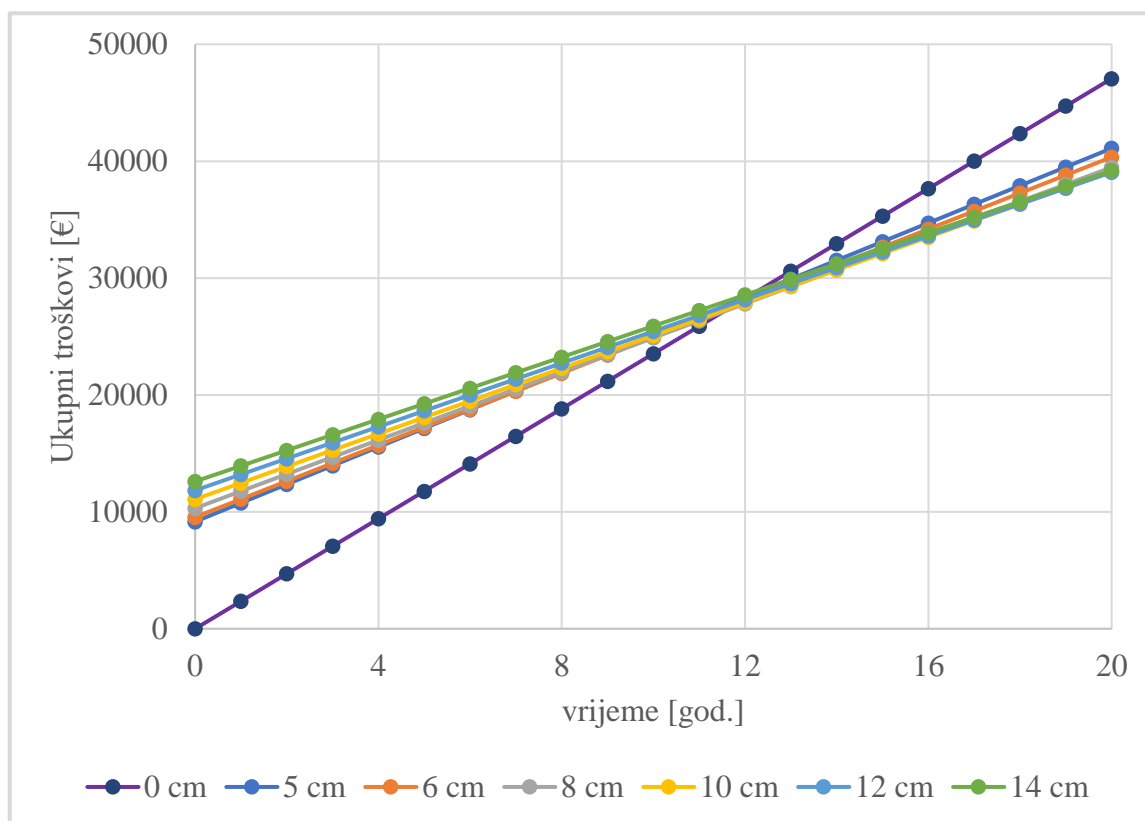
c_i – investicijski troškovi [€]

c_p – pogonski troškovi [€]

Debljina izolacije uzeta je u koracima između 0,05 m i 0,14 m pri čemu su investicijski troškovi varirali između 47,95 €/m² za sloj izolacije debljine 0,05 m i 65,94 €/m² za sloj debljine 0,14 m. Investicijski troškovi za nove prozore i vrata varirali su ovisno o tipu ostakljenja između 270 €/m² i 380 €/m² površine prozora.

Postojeća kuća grije se uz pomoć kotla na loživo ulje. Donja ogrjevna vrijednost loživog ulja uzeta je 11,67 kWh/kg, a gustoća 860 kg/m³. Uz cijenu loživog ulja 0,95 €/l dobiva se cijena 10 €/kWh. [8]

U sljedećem dijagramu prikazani su ukupni troškovi za grijanje u razmatranom periodu godina za različite debljine izolacije u slučaju postojećeg sustava s kotlom na loživo ulje pri čemu $d = 0$ cm označava troškove grijanja za postojeću kuću bez izolacije vanjskih zidova.

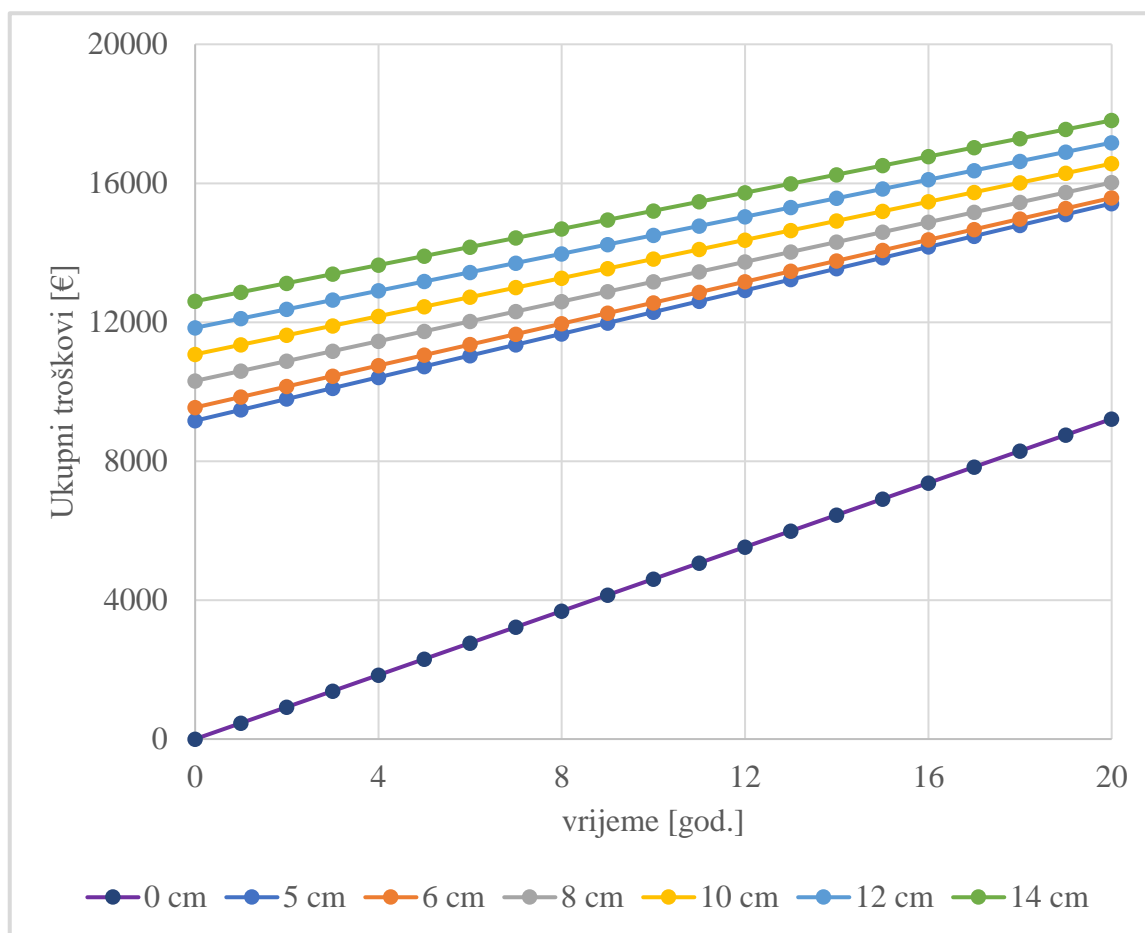


Slika 5.3. Ukupni troškovi grijanja za različite debljine izolacije – kotao

Iz dijagrama je vidljivo da su ukupni troškovi za grijanje najniži u slučaju izolacije od 12 cm iako je razlika u troškovima u odnosu na ostale debljine izolacije neznčajna. Period povrata investicije u ovom slučaju iznosio bi 12 godina.

Kao novi sustav grijanja predviđena je dizalica topline zrak-zrak. Za izračun pogonskih troškova, što u ovom slučaju podrazumijeva potrošnju električne energije za grijanje, korišten je sezonski faktori grijanja $SCOP = 4$. Cijena električne energije uzeta je u iznosu od 0,093 €/kWh. [7]

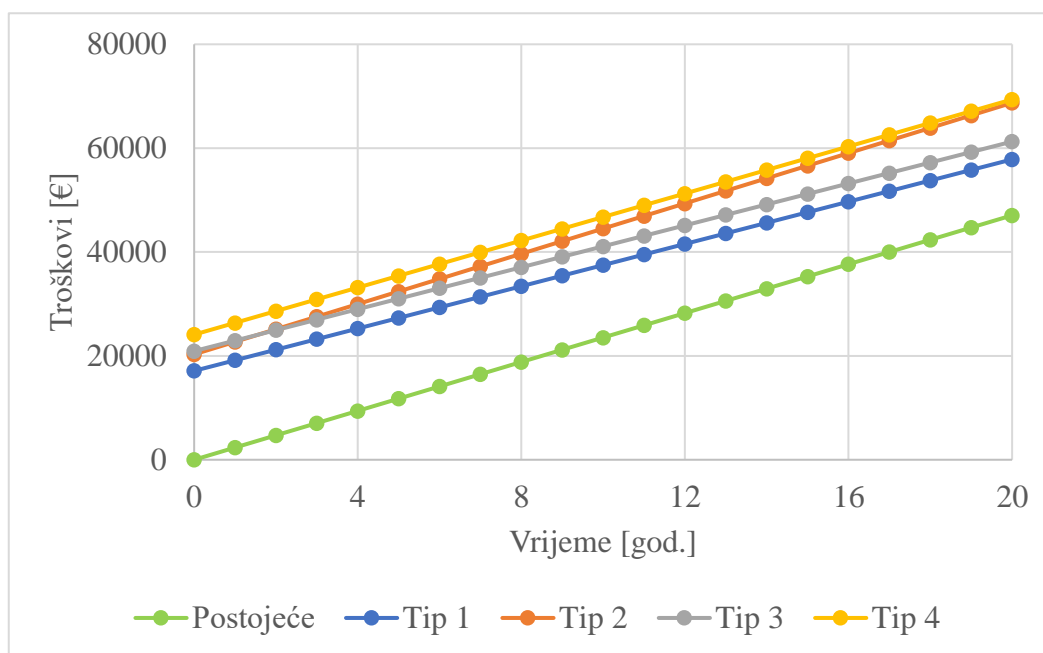
Ukupni troškovi za grijanje za različite debljine izolacije u razmatranom periodu godina za slučaj grijanja uz pomoć dizalice topline prikazani su u dijagramu na Slici 5.4. pri čemu $d = 0$ cm označava troškove grijanja za postojeću kuću bez izolacije vanjskih zidova.



Slika 5.4. Ukupni troškovi grijanja za različite debljine izolacije – dizalica topline

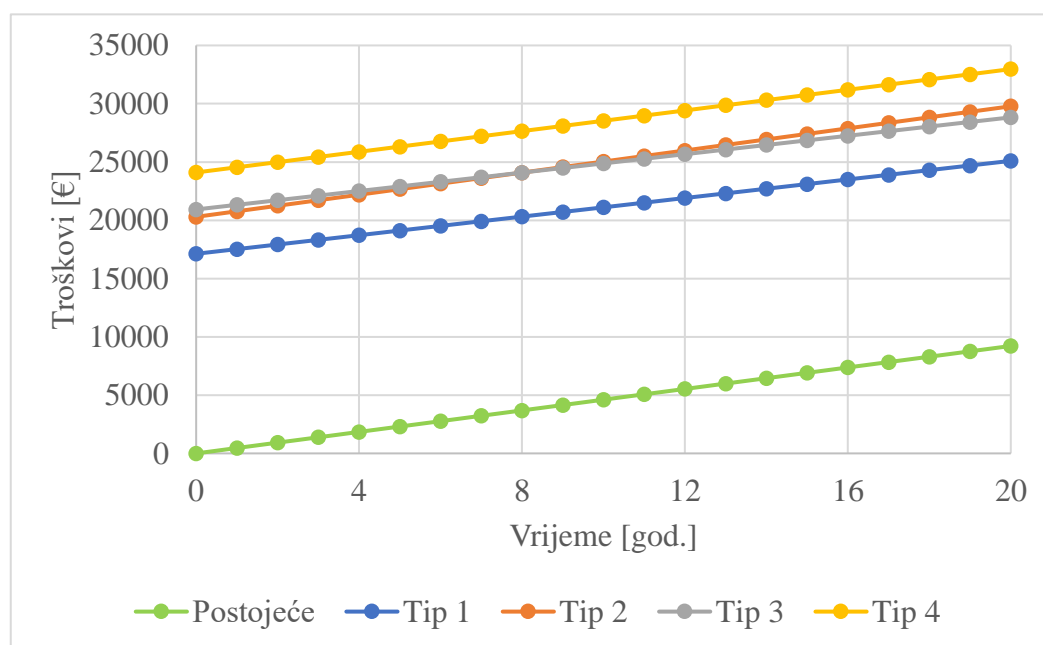
Vidljivo je da se u vremenskom periodu od 20 godina najniži troškovi ostvaruju u slučaju izolacije debljine 5 cm. Iz dobivenih dijagrama može se zaključiti da je u slučaju energetski učinkovitijih sustava period povrata investicije puno duži. Kao mjera obnove odabrana je izolacija u iznosu od 5 cm budući da su u tom slučaju najniži ukupni troškovi uz zadovoljavanje trenutno važećih propisa u Republici Hrvatskoj.

Ukupni troškovi grijanja za različite tipove ostakljenja u slučaju postojećeg sustava s kotlom na loživo ulje za promatrano razdoblje prikazani su dijagramom na Slici 5.5..



Slika 5.5. Ukupni troškovi grijanja za različite tipove ostakljenja – kotao

Ukupni troškovi za grijanje za različite tipove ostakljenja za slučaj grijanja uz pomoć dizalice topline prikazani su u sljedećem dijagramu.



Slika 5.6. Ukupni troškovi grijanja za različite tipove ostakljenja – dizalica topline

Iz dijagrama je vidljivo da se najniži ukupni troškovi postižu i u jednom i u drugom slučaju pri odabiru prozora i vrata s tipom ostakljenja 1 pri čemu je koeficijent prolaska topline $U = 1,4$ W/m^2K i faktor $g = 0,6$. Navedene karakteristike odgovaraju tipu prozora iz baze podataka kojeg

čini dvostruko ostakljenje debljine 4 mm između kojeg se nalazi sloj inertnog plina argona debljine 16 mm.

Potrebno je bilo i odrediti debljinu izolacije stropa prema negrijanom tavanu kako bi koeficijent prolaska topline zadovoljio dopuštenu vrijednost prema tehničkom propisu $U \leq 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. [13] Koeficijent prolaska topline za postojeći strop prema negrijanom tavanu iznosi $U = 0,383 \text{ W/m}^2\text{K}$ pri debljini izolacije od mineralne vune u iznosu od 8 cm. Minimalna potrebna debljina izolacije iznosi 10 cm pri čemu koeficijent prolaska topline iznosi $U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ stoga se na postojeću izolaciju dodaje 2 cm nove izolacije.

U sljedećim tablicama prikazani su slojevi konstrukcijskih elemenata nakon obnove.

Tablica 5.5. Vanjski zid – obnovljeno stanje

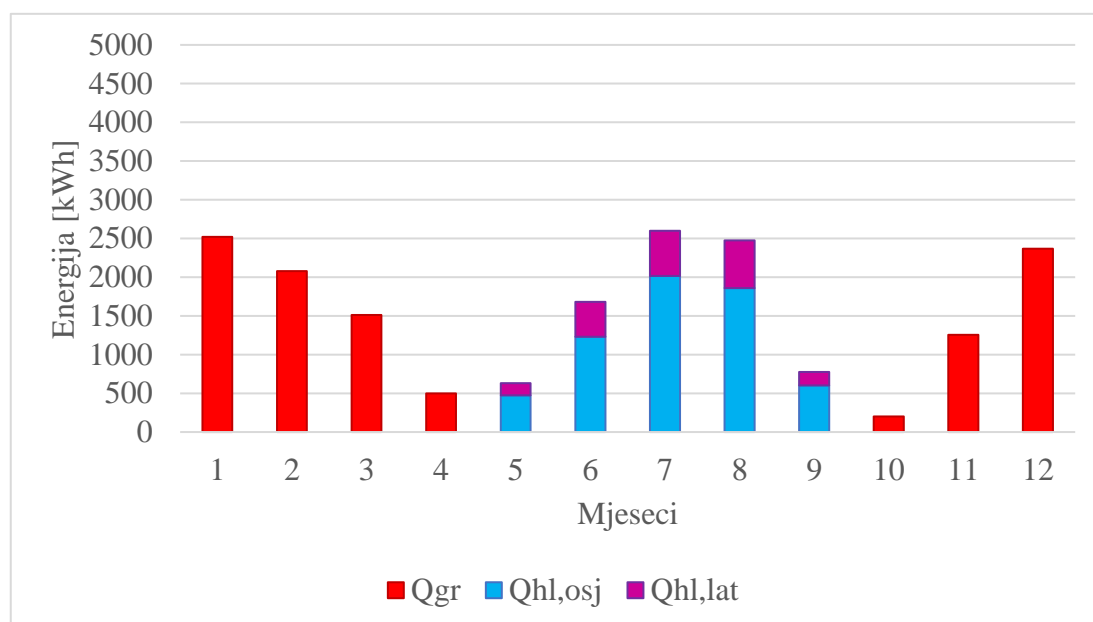
Vanjski zid				
Slojevi	Debljina sloja [m]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet c [J/kgK]
unutarnja strana				
vapneno-cementna žbuka	0,025	1800	1	1000
šuplji blokovi od gline	0,25	900	0,42	900
mineralna vuna (MW)	0,05	120	0,035	1030
polimerna žbuka	0,005	1100	0,7	1000
silikatna žbuka	0,003	1800	0,9	1000
vanjska strana				

Tablica 5.6. Strop prema negrijanom tavanu – obnovljeno stanje

Strop – negrijani tavan				
Slojevi	Debljina sloja [m]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet c [J/kgK]
vanjska strana				
drvene ploče od usmjerenog iverja (OSB)	0,03	650	0,13	1700
paropropusna folija	0,001	1100	0,23	1000
mineralna vuna (MW)	0,1	120	0,035	1030
armirani beton	0,16	2500	2,6	1000
vapneno-cementna žbuka	0,01	1800	1	1000
unutarnja strana				

5.4. Potrošnja energije i projektni učinci za obnovljeno stanje

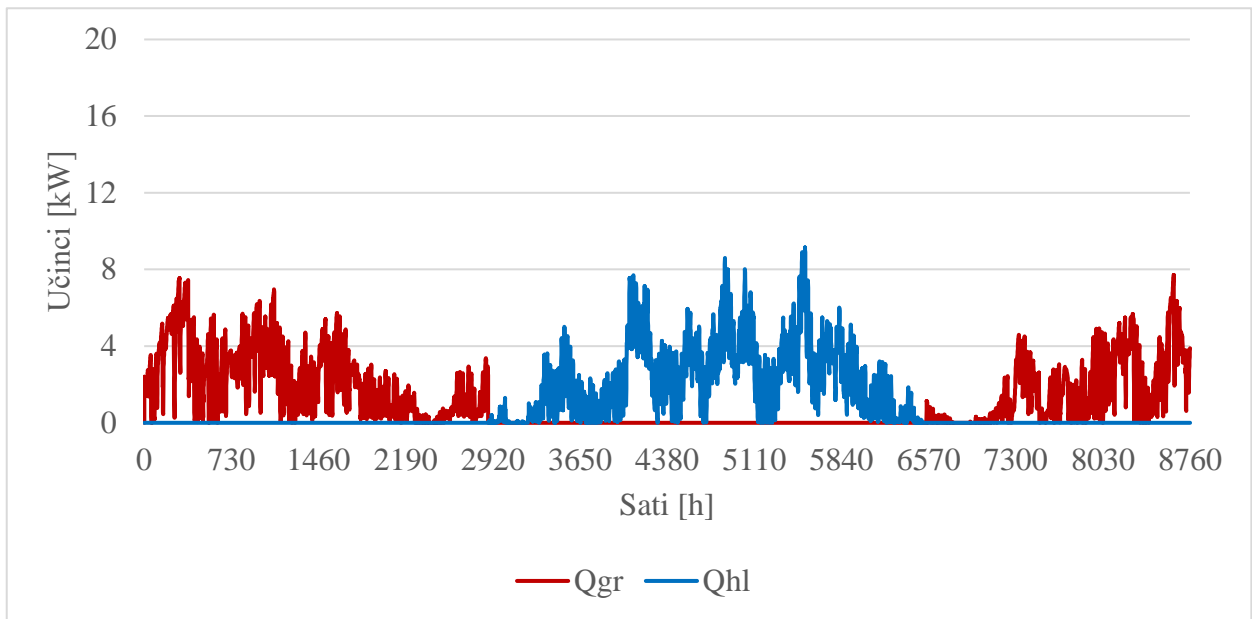
Izvršen je proračun godišnje potrošnje energije za grijanje i hlađenje za obnovljeno stanje kuće. U sljedećem dijagramu prikazani su rezultati proračuna godišnje potrošnje energije za grijanje i za hlađenje po mjesecima za obnovljeno stanje vanjske ovojnice.



Slika 5.7. Potrošnja energije za grijanje i hlađenje po mjesecima – obnovljeno stanje

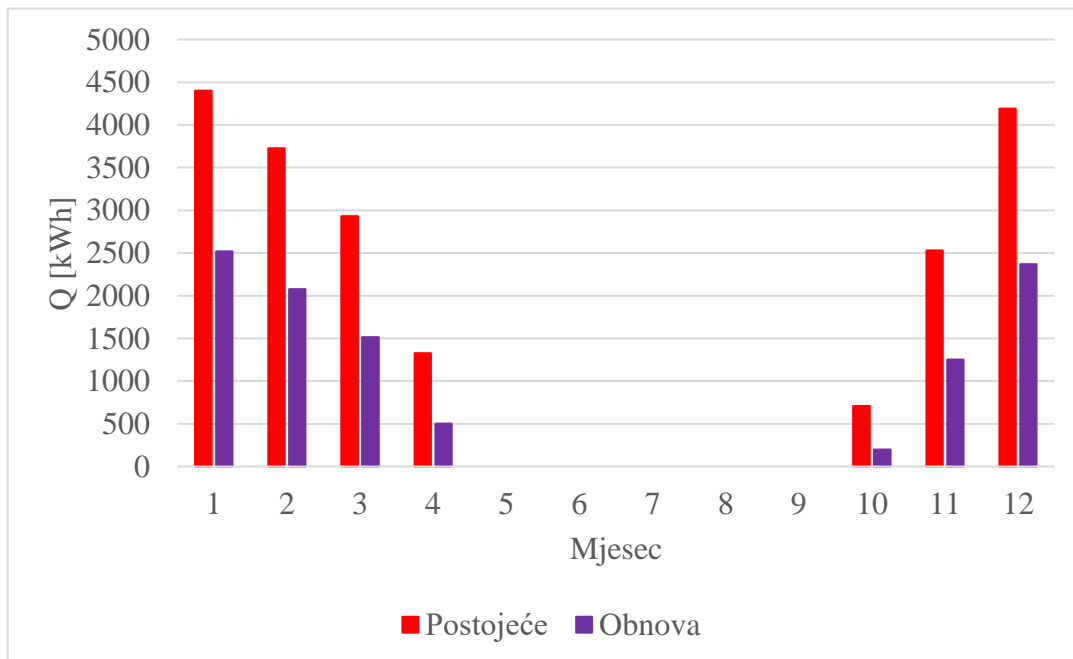
Ukupna godišnja potrošnja energija za grijanje iznosi 10433 kWh, a za hlađenje 8168 kWh pri čemu osjetna toplina iznosi 6182 kWh, a latentna 1985 kWh. U slučaju obnovljenog stanja vanjske ovojnice ukupna godišnja potrošnja energije za grijanje smanjila se za 47,4 % u odnosu na postojeće neobnovljeno stanje.

Na Slici 5.6. prikazani su satni učinci za grijanje i hlađenje za referentnu godinu za obnovljeno stanje.

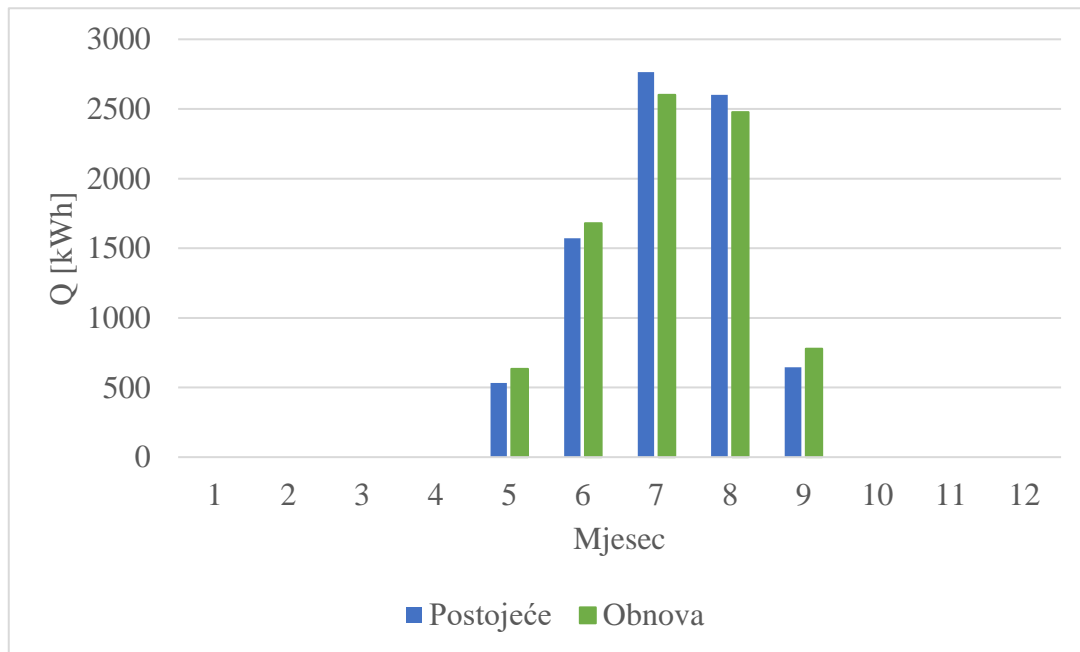


Slika 5.8. Satni učinci za grijanje i hlađenje – obnovljeno stanje

Na sljedećim slikama prikazana je usporedba mjesečne potrošnje energije za grijanje i hlađenje u slučaju obnovljene vanjske ovojnice i postojećeg stanja.



Slika 5.9. Usporedba potrošnje energije za grijanje – obnova i postojeće stanje



Slika 5.10. Usporedba potrošnje energije za hlađenje – obnova i postojeće stanje

U Tablici 5.7. prikazani su projektni učinci za grijanje i hlađenje za obnovljeno stanje vanjske ovojnice.

Tablica 5.7. Projektni učinci – obnovljeno stanje

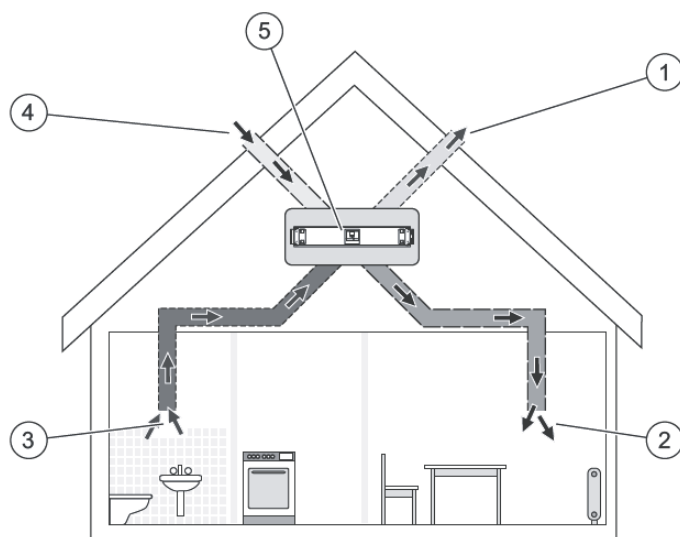
Projektni učinci	
Grijanje	Hlađenje
$\dot{Q}_{gr,proj}$ [kW]	$\dot{Q}_{hl,proj}$ [kW]
11,7	15,7

U slučaju obnovljenog stanja vanjske ovojnice projektni učinak za grijanje smanjio se za 28,7 % u odnosu na projektni učinak postojećeg stanja, a projektni učinak za hlađenje smanjio se za 8,7 %.

5.5. Mehanička ventilacija za pokrivanje minimalnog provjetravanja

Kao dio obnove kuće predviđen je i sustav mehaničke ventilacije s povratom topline. Uređaj se sastoji od pločastog izmjenjivača topline rekuperatora te ventilatora. Za svaku od etažu predviđena je zasebna rekuperacijska jedinica ugrađena u zračne kanale.

U rekuperatoru dolazi od izmjene osjetne topline između dovodnog, vanjskog zraka i otpadnog, prostornog zraka pri čemu se toplina otpadnog zraka koristi za zagrijavanje dovodnog zraka.



Slika 5.11. Mehanička ventilacija s povratom topline [15]

Na Slici 5.11. prikazan je način rada ventilacijskog uređaja (5) kojeg čini rekuperator s ventilatorom. Vanjski svjež zrak (4) se dovodi do rekuperatora gdje se vrši priprema zraka uz pomoć osjetne topline prostornog zraka te se distribuira kroz zračne kanale u prostorije (2). Ustajali zrak (3) se odsisava iz prostorija te se nakon prolaska kroz rekuperator putem odsisnih kanala (1) izbacuje u okolinu.

Za odabir rekuperacijske jedinice i provedbu simulacije, potrebno je izračunati protoke zraka za svaku od zona.

Maseni protok računa se prema izrazu:

$$\dot{m}_{zr,i} = \rho_{zr} \cdot V_i \cdot n_{min} \quad (6.1) [4]$$

gdje je:

$\dot{m}_{zr,i}$ – maseni protok zraka [kg/h]

ρ_{zr} – gustoća zraka [kg/m³]

V_i – volumen zone [m³]

n_{min} – minimalni broj izmjena zraka [h⁻¹]

Slijede izračunati protoci zraka po zonama:

Zona 1 – Prizemlje:

$$\dot{m}_{zr,1} = \rho_{zr} \cdot V_1 \cdot n_{min} = 1,2 \cdot 216,7 \cdot 0,5 = 130 \text{ kg/h}$$

Zona 2 – 1. kat:

$$\dot{m}_{zr,2} = \rho_{zr} \cdot V_2 \cdot n_{\min} = 1,2 \cdot 245 \cdot 0,5 = 147 \text{ kg/h}$$

Zona 3 – 2. kat:

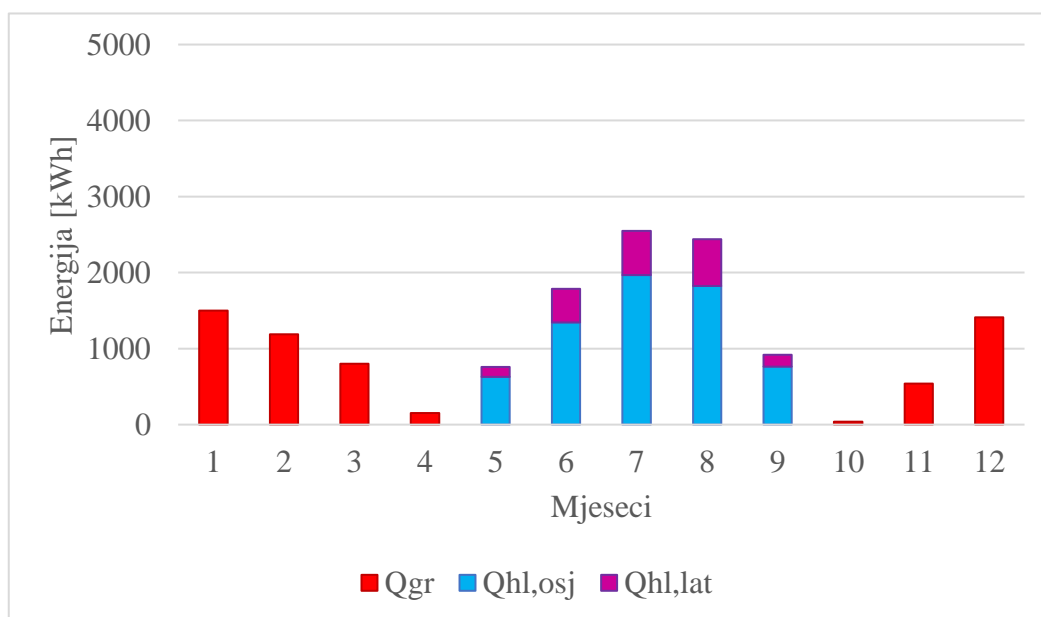
$$\dot{m}_{zr,3} = \rho_{zr} \cdot V_3 \cdot n_{\min} = 1,2 \cdot 245 \cdot 0,5 = 147 \text{ kg/h}$$

Na temelju izračunatih protoka zraka izabrani su ventilacijski uređaji proizvođača Vaillant tip VAR 150/4 L sljedećih tehničkih karakteristika:

Tablica 5.8. Tehničke karakteristike rekuperatora VAR 150/4 L [16]

recoVair	Jedinice	VAR 150/4 L
Maksimalni protok zraka	m ³ /h	150
Stupanj iskoristivosti	%	0,82
Razina zvučnog tlaka	dB	44
Dimenzije (VxŠxD)	mm	250x1420x600
Težina	kg	41
Promjer zračnih priključaka	mm	150
Snaga ventilatora	W	77
Napajanje	V	230

Rezultati simulacije prikazani su u nastavku.

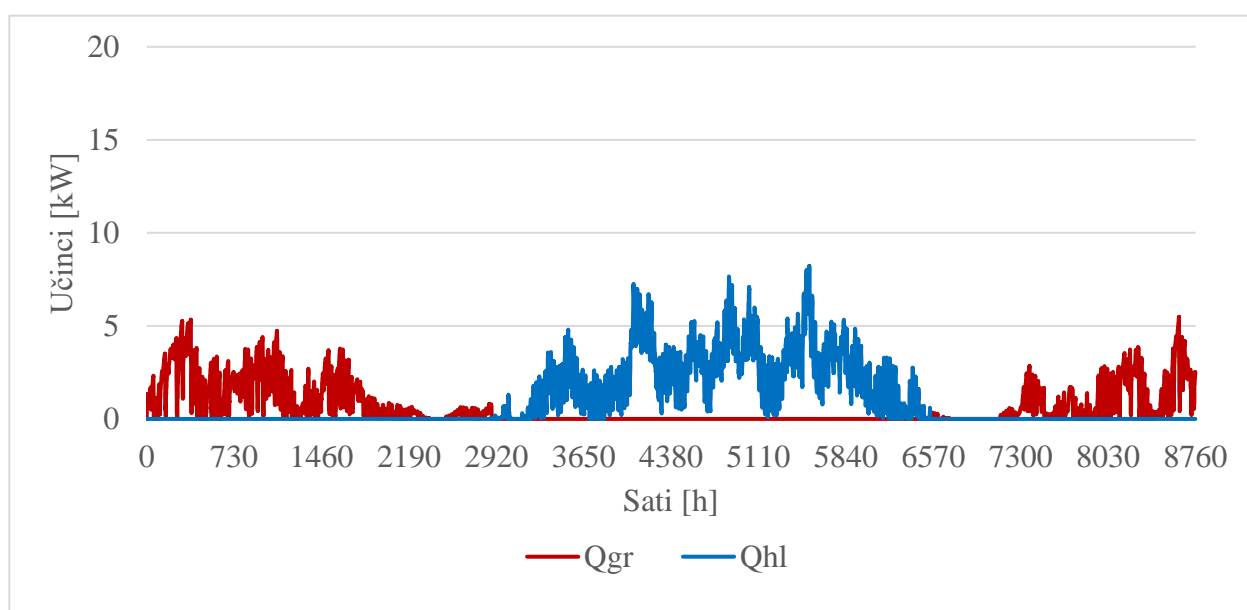


Slika 5.12. Potrošnja energije za grijanje i hlađenje po mjesecima – rekuperacija

Ukupna godišnja potrošnja energija za grijanje iznosi 5631 kWh, a za hlađenje 8449 kWh pri čemu osjetna toplota iznosi 6528 kWh, a latentna 1921 kWh. U slučaju obnovljenog stanja vanjske ovojnice uz primjenu mehaničke ventilacije s povratom topline ukupna godišnja potrošnja energije za grijanje smanjila se za 71,6 % u odnosu na postojeće neobnovljeno stanje.

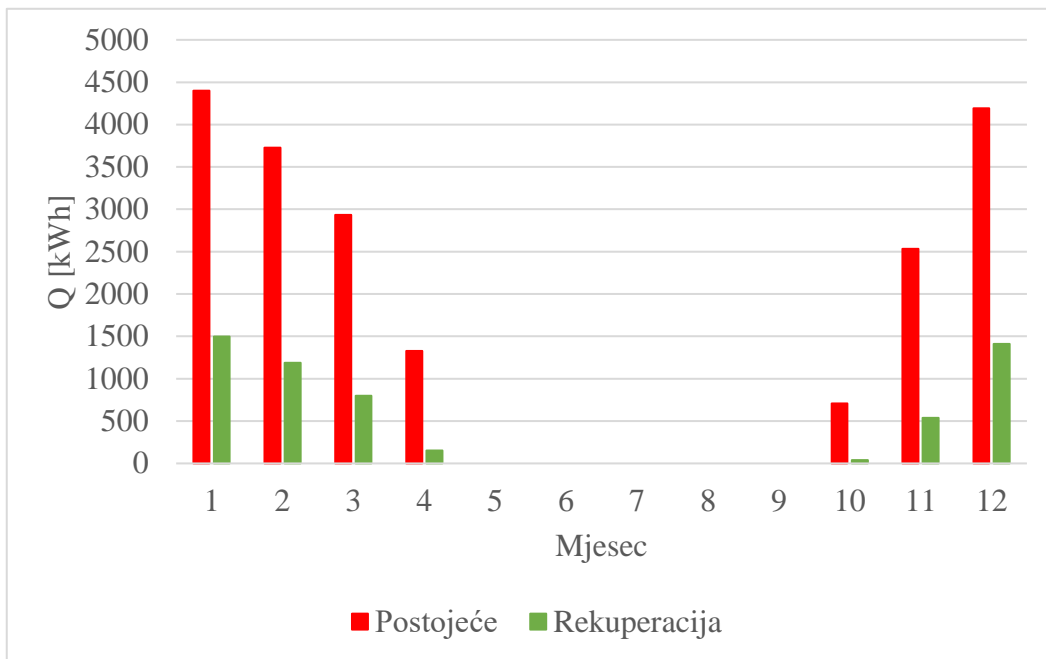
Specifična potrošnja korisne energije za grijanje u slučaju obnovljene kuće iznosi 20 kWh/m² te je taj iznos manji od dopuštene vrijednosti prema Tehničkom propisu.

Na *Slici 5.13.* prikazani su satni učinci za grijanje i hlađenje za referentnu godinu za obnovljeno stanje vanjske ovojnice i mehaničku ventilaciju s povratom topline.

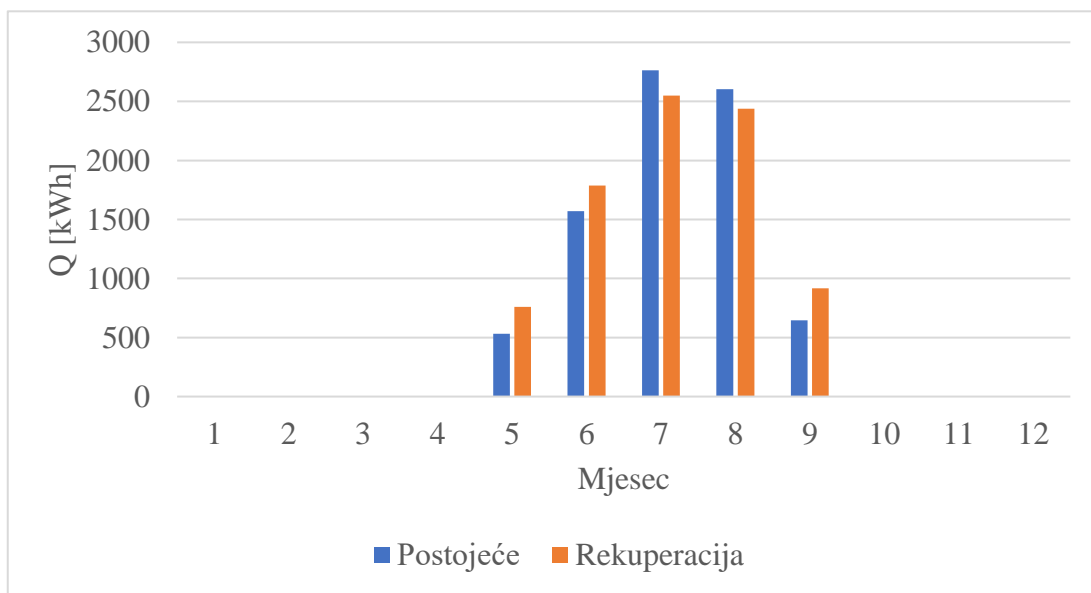


Slika 5.13. Satni učinci za grijanje i hlađenje – ventilacija s povratom topline

Na sljedećim slikama prikazana je usporedba mjesečne potrošnje energije za grijanje i hlađenje u slučaju mehaničke ventilacije s povratom topline i postojećeg osnovnog slučaja.



Slika 5.15. Usporedba potrošnje energije za grijanje – rekuperacija i postojeće stanje



Slika 5.14. Usporedba potrošnje energije za hlađenje – rekuperacija i postojeće stanje

Kako bi se mogla izabrati oprema za grijanje i hlađenje potrebno je odrediti projektne učinke po zonama odnosno ukupne potrebne učinke. U *Tablici 5.9.* prikazani su projektni učinci za grijanje i hlađenje za obnovljeno stanje s mehaničkom ventilacijom s povratom topline.

Tablica 5.9. Projektni učinci – obnovljeno stanje + rekuperacija

Projektni učinci		
	Grijanje	Hlađenje
	$\dot{Q}_{gr,proj}$ [kW]	$\dot{Q}_{hl,proj}$ [kW]
Zona 1	2,2	1,1
Zona 2	2,9	3,1
Zona 3	3,7	4,5
Ukupno	8,8	8,7

Za dimenzioniranje opreme za grijanje i hlađenje potrebno je zadovoljiti toplinski učinak u iznosu od 8,8 kW, dok potrebni rashladni učinak iznosi 8,7 kW.

U slučaju obnovljenog stanja vanjske ovojnice uz primjenu mehaničke ventilacije s povratom topline došlo je do značajnog smanjenja projektnih učinaka u odnosu na postojeće neobnovljeno stanje. Projektni učinak za grijanje smanjio se za 46,3 % u odnosu na postojeće stanja, a projektni učinak za hlađenje smanjio se za 49,4 %.

6. KONCEPT TEHNIČKOG SUSTAVA

6.1. Sustav grijanja, hlađenja i pripreme potrošne tople vode

Za sustav grijanja i hlađenja izabrana je dizalica topline zrak-zrak u razdvojenoj (split) izvedbi s unutarnjim kanalnim jedinicama. Vanjska jedinica ugrađuje se u okoliš kuće, a unutarnje jedinice se ugrađuju unutar prostora te se kondicionirani zrak od unutarnjih jedinica doprema zračnim kanalima do svih prostorija. Primjer koncept sustava prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 6.1. Koncept sustava grijanja i hlađenja dizalicom topline zrak-zrak [11]

Sustav pripreme potrošne tople vode (PTV) zamišljen je uz pomoć solarnih kolektora. Također, predviđena je proizvodnja vlastite električne energije uz pomoć fotonaponskih modula.

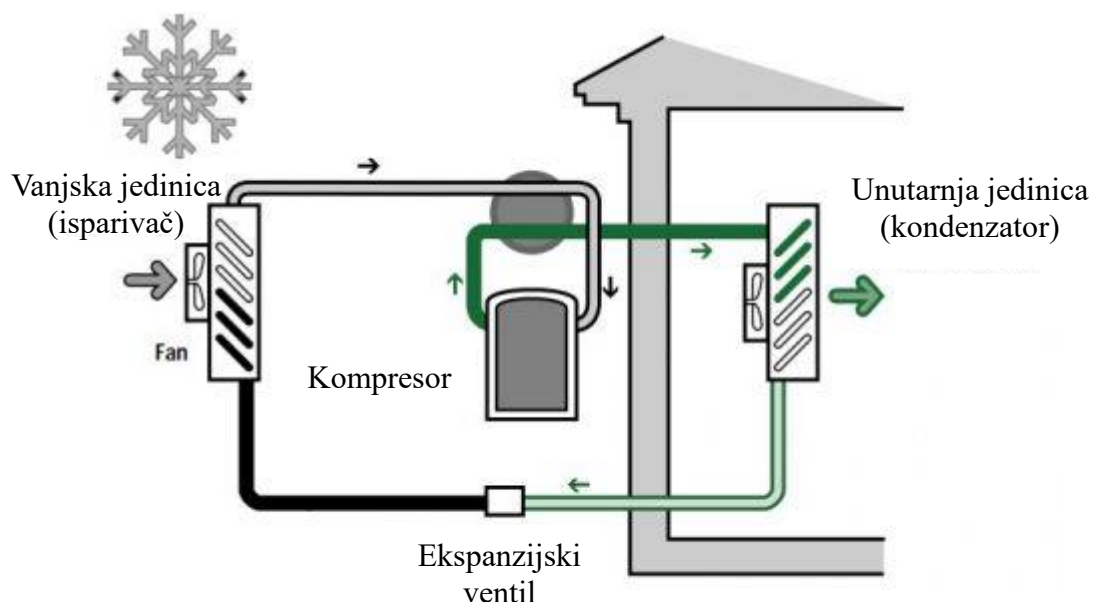
6.2. Dizalice topline

Prednosti upotrebe dizalica toplina je njihova visoka učinkovitost te se smatraju obnovljivim izvorom energije. Dizalice topline su uređaji koji prenose toplinu iz toplinskog spremnika niže temperature na toplinski spremnik više temperature uz uloženi rad. Kod ogrjevnog procesa toplina se prenosi s okolišne temperature na temperaturu prostora koja je viša od okolišne, dok se kod rashladnog procesa toplina prenosi iz prostora niže temperature na okoliš više temperature. Kompresijske dizalice topline za svoj pogon odnosno ostvarivanje lijevokretnog kružnog procesa koriste mehanički rad kompresora te one nalaze najčešću primjenu u praksi. Dizalice topline mogu

se podijeliti prema vrsti toplinskog izvora i ponora na dizalice topline zrak-zrak, zrak-voda, voda-voda, tlo-voda itd. pri čemu su za pravilno funkcioniranje uređaja od presudne važnosti svojstva toplinskog izvora. Važni zahtjevi koje mora ispuniti toplinski izvor su njegova raspoloživost odnosno mogućnost osiguravanja opskrbe toplinskom energijom u svako doba dana, što niži troškovi priključenja na toplinski izvor te što niži utrošak mehaničkog rada. Učinkovitost rashladnih procesa prikazuje se faktorom hlađenja koji predstavlja omjer rashladnog učina dizalice topline i iskorištene snage kompresora. Učinkovitost ogrjevnih procesa ocjenjuje se faktorom grijanja kao omjerom toplinskog učina dizalice topline i apsorbirane snage kompresora. Učinkovitost je veća što je temperatura kondenzacije niža, a temperatura isparivanja radne tvari viša odnosno što je manja razlika temperatura između temperature prostora i temperature okoliša. [4, 17]

6.3. Princip rada dizalice topline zrak-zrak

Kod dizalice topline zrak-zrak toplinski izvor je okolišni zrak (ili otpadni), dok je toplinski ponor zrak u grijanoj prostoriji. Okolišni zrak kao toplinski izvor ima nižu učinkovitost u odnosu na druge toplinske izvore, ali ima najveću raspoloživost. Sljedeća slika prikazuje dijelove dizalice topline zrak-zrak u razdvojenoj (split) izvedbi u režimu grijanja.



Slika 6.2. Dijelovi dizalice topline zrak-zrak (split izvedba) [9]

Kompresijske dizalice topline sastoje se od isparivača, kompresora, kondenzatora, prigušnog ventila i radne tvari.

U režimu grijanja izmjenjivač topline koji se nalazi u vanjskoj jedinici predstavlja isparivač, a izmjenjivač topline u unutarnjoj jedinici kondenzator, dok je u režimu hlađenja obrnuto. U režimu grijanja u isparivaču vanjske jedinice dizalice topline oduzimanjem topline vanjskom zraku dolazi do isparavanja radne tvari. Kompresor komprimira paru radne tvari na tlak kondenzacije. U kondenzatoru unutarnje jedinice predajom topline na prostorni zrak koji se pritom zagrijava dolazi do kondenzacije radne tvari. Kapljevita radna tvar iz kondenzatora dolazi na prigušni ventil gdje joj se prigušivanjem tlak smanjuje na tlak isparivanja te se opet vraća u isparivač čime završava jedan ciklus. [17]

6.4. Odabir dizalice topline i kalibracija modela

Za sustav grijanja i hlađenja predviđena je ugradnja dizalice topline zrak-zrak. Odabir veličine dizalice topline vrši se na temelju dobivenih projektnih učinaka te za projektne uvjete. Projektni učinak u hlađenju iznosi 8,7 kW, a u grijanju 8,8 kW. Izabrana je dizalica topline zrak-zrak u split izvedbi proizvođača Clivet. Izabrane su dvije vanjske jedinice tip MU2-Y 61M. Za temperaturu vanjskog zraka $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ i temperaturu u prostoru $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ učinak u grijanju iznosi 4,8 pa je ukupni toplinski učinak za dvije jedinice jednak 9,6 kW. Za temperaturu vanjskog zraka $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ i temperaturu u prostoru $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ učinak u hlađenju iznosi 6,1 kW pa je ukupni rashladni učinak jednak 12,2 kW. [3]

Za svaku od 3 etaža izabrana je unutarnja kanalna jedinica model Duct 2 tip ID-XY 35M s nominalnim učinkom u hlađenju 3,5 kW i u grijanju 3,8 kW. Vanjska jedinica multi split sustava namijenjana je za vanjsku montažu i za spajanje do 3 unutarnje jedinice. Opremljena je inverter kompresorom i zrakom hlađenim kondenzatorom. Unutarnja kanalna jedinica opremljena je izmjenjivačem topline s direktnom ekspanzijom freona i ventilatorom.

Na sljedećim su tablicama prikazane tehničke karakteristike izabranih uređaja.

Tablica 6.1. Tehničke karakteristike vanjske jedinice [2]

Vanjska jedinica	tip	MU2-Y	61M	
Rashladni učin	Nominalni ¹ (min.-maks.)	kW	6,2 (2-6,6)	
Toplinski učin	Nominalni ² (min.-maks.)	kW	6,4 (1,4-6,7)	
Dimenzije jedinice	($D \times \check{S} \times V$)	mm	890 x 342 x 673	
Radno područje	Hlađenje	Vanjska temperatura	°C	-15-50
	Grijanje	Vanjska temepratura	°C	-15-24
Radna tvar	-	-	R 32	
Napajnje	Napon/frekvencija/faza	V/Hz/n°	230/50/1	

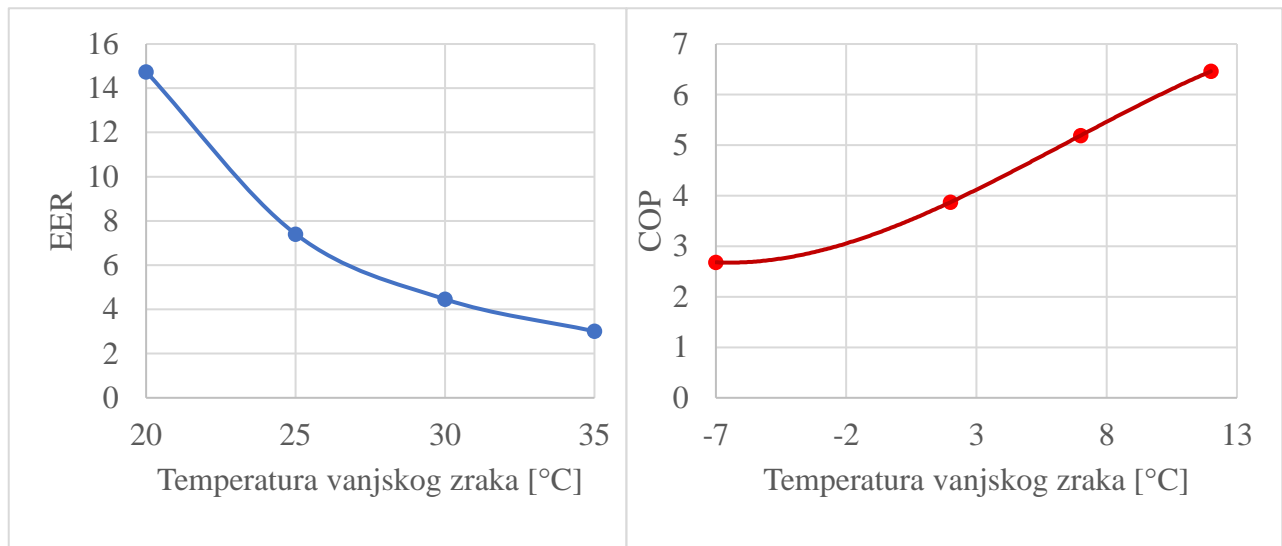
¹ unutarnja temperatura zraka 27 °C, vanjska temperatura zraka 35 °C

² unutarnja temperatura zraka 20 °C, vanjska temperatura zraka 7 °C

Tablica 6.2. Tehničke karakteristike unutarnje jedinice [2]

Unutarnja jedinica	tip	ID3-XY	35M	
Rashladni učin	Nominalni	kW	3,5	
Toplinski učin	Nominalni	kW	3,8	
Dimenzije jedinice	($D \times \check{S} \times V$)	mm	700 x 450 x 200	
Protok zraka	V/S/N	m ³ /h	600/480/300	
Radno područje	Hlađenje	Unutarnja temperatura	°C	17-32
	Grijanje	Vanjska temepratura	°C	0-30
Priključak radne tvari	Tekuća faza	mm	6,35	
	Plinovita faza		9,52	
Napajnje	Napon/frekvencija/faza	V/Hz/n°	230/50/1	

Na sljedećoj *Slici 6.3.* prikazana je ovisnost faktora hlađenja *EER* i faktora grijanja *COP* izabrane dizalice topline o temperaturi vanjskog zraka.



Slika 6.3. Ovisnost faktora grijanja i hlađenja o temperaturi vanjskog zraka

Za provedbu simulacije potrebno je model dizalice topline kalibrirati za podatke proizvođača. Potrebno je odrediti proizvedenu toplinsku energiju za grijanje i hlađenje te utrošenu električnu energiju. Potrošnja električne energije za grijanje i hlađenje mijenja se s promjenom faktora grijanja i hlađenja. U model su unesene vrijedosti faktora grijanja i hlađenja iz ranije navedenih tablica u ovisnosti o temperaturi okolišnog zraka. Također, potrebno je unijeti potrebne protoke dovodnog zraka po zonama kojima se pokrivaju toplinski gubici odnosno rashladno opterećenje.

Potrebni protok zraka računa se prema izrazu:

$$\dot{m}_{zr} = \frac{\dot{Q}_{proj}}{\Delta t \cdot c_{zr}} \quad (6.2) [14]$$

gdje je:

\dot{m}_{zr} – maseni protok zraka [kg/s]

\dot{Q}_{proj} – projektni učinak [kW]

Δt – razlika temperatura između dovodnog zraka i prostornog zraka [°C]

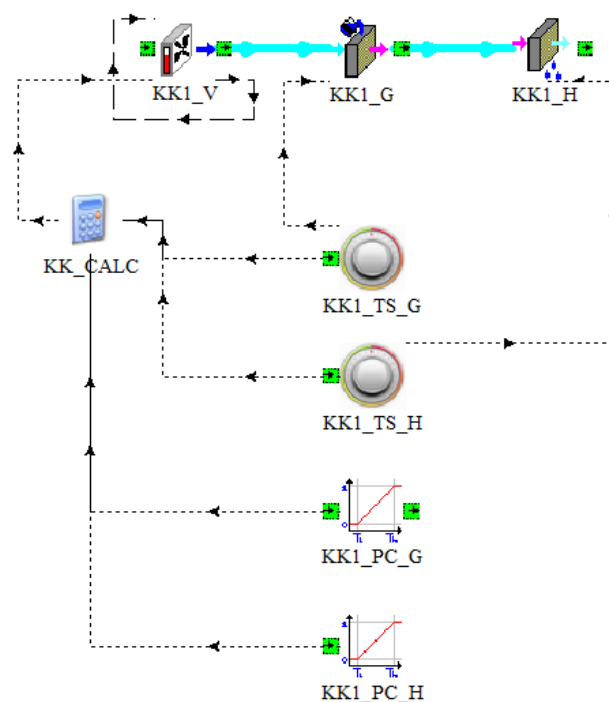
c_{zr} – specifični toplinski kapacitet zraka, $c_{zr} = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kgK})$

U sljedećoj tablici prikazani su izračunati potrebni protoci dovodnog zraka po zonama.

Tablica 6.3. Potrebni protoci zraka po zonama

		Zona 1	Zona 2	Zona 3	
Grijanje	$\dot{Q}_{gr,proj}$ [kW]	2,2	2,9	3,7	
	Δt_{gr} [°C]	15	15	15	
	$\dot{m}_{zr,gr}$	[kg/s]	0,146	0,196	0,245
		[kg/h]	525	705	883
Hlađenje	$\dot{Q}_{hl,proj}$ [kW]	1,1	3,1	4,9	
	Δt_{hl} [°C]	10	10	10	
	$\dot{m}_{zr,hl}$	[kg/s]	0,11	0,306	0,446
		[kg/h]	395	1101	1607

Na Slici 6.4. prikazan je model dizalice topline u simulacijskom sučelju.

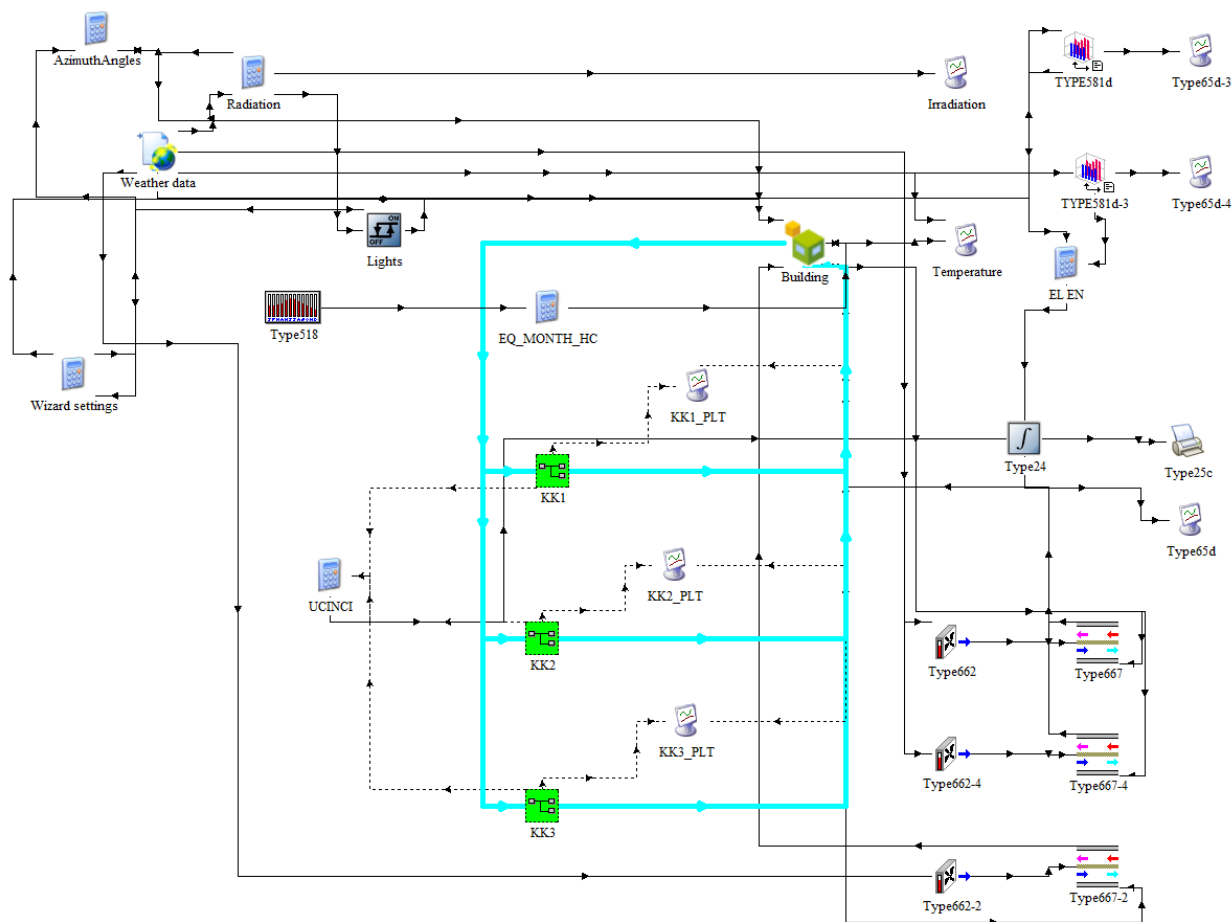


Slika 6.4. Model dizalice topline zrak-zrak

Svaka od tri zona ima zasebnu jedinicu koja je u simulacijskom sučelju predstavljene modelom klima-komore. Svaka jedinica sastoji se od ventilatora, grijača i hladnjaka. Zoni 1 dovodi se 525 kg/h, Zoni 2 1101 kg/h, a Zoni 3 1607 kg/h. U sezoni grijanja zrak iz grijača izlazi u prostor s temperaturom 35 °C, a u sezoni hlađenja izlazi iz hladnjaka u prostor s temperaturom 14 °C.

Održavanje vlažnosti zraka nije razmatrano pa model ne sadrži dogrijač. U svrhu regulacije u model su integrirani termostati grijanja i hlađenja te proporcionalni regulatori. Termostat grijanja održava temperaturu zraka u zoni na zadanoj vrijednosti od 20 °C, a termostat hlađenja održava zadanu temperaturu zraka u zoni u iznosu od 24 °C. Područje regulacije iznosi 2 °C. Proporcionalni regulator ima funkciju ventilatora s promjenjivom brzinom vrtnje te se pomoću njega regulira potrebna količina dovodnog zraka za zone. Udaljavanjem od zadanog temperaturnog stanja potreban je veći protok zraka pa se povećava brzina vrtnje ventilatora, dok se približavanjem zadanom stanju smanjuje brzina ventilatora.

Na *Slici 6.5.* prikazan je sustav grijanja i hlađenja dizalicom topline zrak-zrak u simulacijskom sučelju.



Slika 6.5. Sustav grijanja i hlađenja dizalicom topline zrak-zrak u simulacijskom sučelju

6.5. Rezultati simulacije sustava s dizalicom topline

Provedbom simulacije dobiveni su rezultati proizvedene toplinske i rashladne energije te utrošene električne energije po mjesecima koji su prikazani u *Tablici 6.4.*

Tablica 6.4. Rezultati simulacije

Mjesec	Proizvedena toplinska energija za grijanje [kWh]	Proizvedena toplinska energija za hlađenje [kWh]	Potrošnja električne energije za ventilator [kWh]	Potrošnja električne energije za dizalicu topline [kWh]
1	1849	0	14	419
2	1422	0	12	321
3	1044	0	10	210
4	336	0	5	57
5	0	884	7	79
6	0	1642	12	186
7	0	2219	16	311
8	0	2138	15	299
9	0	1002	8	90
10	150	0	2	25
11	853	0	8	161
12	1676	0	13	369
Σ	7329	7886	120	2526

U sljedećoj tablici su prikazane sumirane godišnje vrijednosti proizvedene i utrošene energije.

Tablica 6.5. Ukupna godišnja proizvedena i utrošena energije

Proizvedena toplinska energija za grijanje [kWh]	7329
Proizvedena toplinska energija za hlađenje [kWh]	7886
Potrošnja električne energije za pogon ventilatora [kWh]	120
Potrošnja električne energije za grijanje [kWh]	1561
Potrošnja električne energije za hlađenje [kWh]	966
Potrošnja električne energije za pogon dizalice topline [kWh]	2526
Ukupna potrošnja električne energije [kWh]	2647

Potrebna energija za grijanje iznosila je 5631 kWh, a za hlađenje 8449 kWh uz osjetnu toplinu u iznosu 6528 kWh.

Na temelju dobivenih rezultata mogu se izračunati sezonski faktor grijanja i hlađenja.

Sezonski faktor grijanja računa se kao omjer godišnje proizvedene toplinske energije za grijanje i utrošene električne energije za grijanje [4] te slijedi:

$$SCOP = \frac{7329}{1561} = 4,7$$

Sezonski faktor hlađenja računa se kao omjer godišnje proizvedene toplinske energije i utrošene električne energije za hlađenje [4] te slijedi:

$$SEER = \frac{7886}{966} = 8,17$$

6.6. Sustav za pripremu potrošne tople vode

6.6.1. Proračun potrošne tople vode

Za potrebe snabdjevenija kućanstva potrošnom toplom vodom predviđen je centralni sustav pripreme PTV-a s akumulacijskim spremnikom. Za projektiranje sustava za zagrijavanje potrošne tople vode najprije je potrebno odrediti ukupnu dnevnu potrošnju tople vode te dnevni profil potrošnje.

Određivanje potrošnje vode:

Potrebna toplinska energija za pripremu potrošne tople vode za stambene zgrade računa se prema izrazu:

$$Q_W = \frac{Q_{W,A,a}}{365} \cdot A_k \cdot d \quad (6.3) [4]$$

gdje je:

A_k – korisna površina zgrade [m^2]

d – broj dana u promatranom periodu [dan]

Q_W – toplinska energija potrebna za pripremu PTV-a u promatranom periodu [kWh]

$Q_{W,A,a}$ – specifična toplinska energija potrebna za pripremu PTV-a [kWh/ m^2a]

$Q_{W,A,a} = 12,5 \text{ kWh}/m^2a$ - za zgrade s 3 stambene jedinice (prema normi PECZ NN 36/10)

Potrebna toplinska energija za pripremu PTV-a iznosi:

$$Q_W = \frac{12,5}{365} \cdot 284,06 \cdot 365 = 3550,75 \text{ kWh godišnje}$$

odnosno:

$$Q_w = \frac{3550,75}{365} = 9,73 \text{ kWh dnevno}$$

Potrošnja vode računa se prema izrazu:

$$V_w = \frac{Q_w}{1,163 \cdot (\vartheta_{T_w} - \vartheta_{H_w})} \quad (6.4) [4]$$

gdje je:

V_w – volumen vode [m^3]

ϑ_{T_w} – temperatura tope vode [$^{\circ}\text{C}$]

ϑ_{H_w} – temperatura hladne vode [$^{\circ}\text{C}$]

slijedi:

$$V_w = \frac{9,73}{1,163 \cdot (40 - 10)} = 0,279 \text{ m}^3 = 279 \text{ l dnevno}$$

Projektiranje sustava:

U svrhu projektiranja sustava za grijanje PTV-a potrebno je odrediti učinak grijača. Za svaku od 3 etaža pretpostavljeno je 1 tuširanje s potrošnjom vode u iznosu od 50 litara u jednom satu.

Trenutni učinak jednak je:

$$\dot{Q} = V_h \cdot (\vartheta_{T_w} - \vartheta_{H_w}) \cdot \frac{c_{p,w}}{3600} \quad (6.5) [4]$$

gdje je:

\dot{Q} – trenutni učinak [kW]

V_h – potrošnja vode u 1 satu [kg/h]

$c_{p,w}$ – specifični toplinski kapacitet vode [kJ/kgK]

slijedi:

$$\dot{Q} = 150 \cdot (40 - 10) \cdot \frac{4,19}{3600} = 5,2 \text{ kW}$$

Ukupni učinak grijača određuje se prema izrazu:

$$\dot{Q}_g = \dot{Q} \cdot \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (6.6) [4]$$

gdje je:

\dot{Q}_g – ukupni učinak grijača [kW]

Z_A – vrijeme zagrijavanja spremnika [h]

Z_B – vrijeme pogona (vršne potrošnje) [h]

Potrebni učinak grijača iznosi:

$$\dot{Q}_g = 5,2 \cdot \frac{2}{1 + 2} = 3,47 \text{ kW}$$

Na temelju izračunatog učinka grijača određuje se potrebni volumen akumulacijskog spremnika.

Kapacitet spremnika (kWh) određuje se prema izrazu:

$$C = Z_A \cdot \dot{Q}_g \quad (6.7) [4]$$

$$C = 1 \cdot 3,47 = 3,47 \text{ kWh}$$

slijedi potrebni volumen spremnika:

$$V_S = C \cdot \frac{b}{c \cdot \Delta T} \quad (6.8) [4]$$

gdje je:

V_S – potrebni volumen spremnika [m³]

b – faktor dodatka zbog mrtvog prostora ispod grijača, $b \approx 1,1 \dots 1,2$

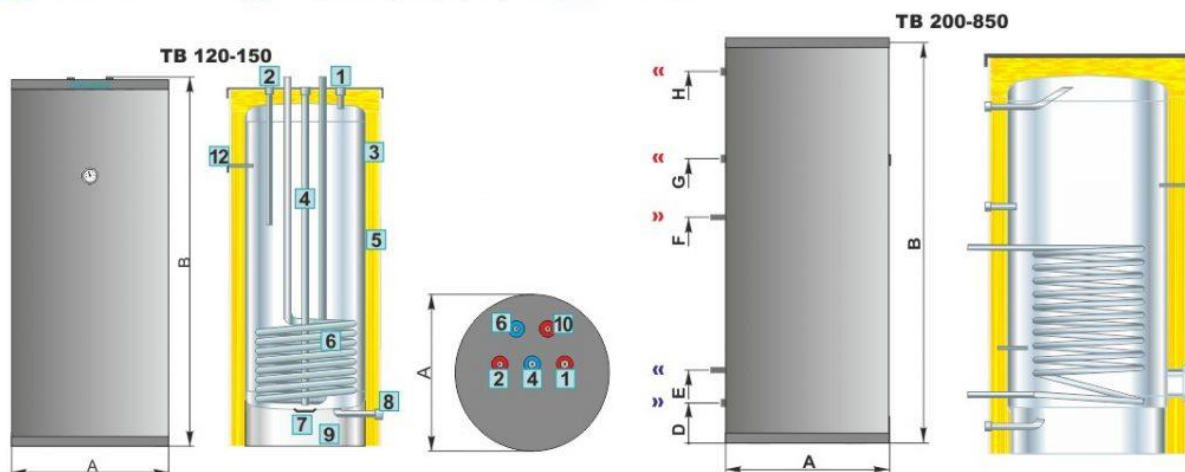
c – specifični toplinski kapacitet vode, $c = 1,163 \text{ kWh}/(\text{kgK})$

ΔT – razlika temperature vode u spremniku [K]

$$V_S = 3,47 \cdot \frac{1,1}{1,163 \cdot 15} = 0,219 \text{ m}^3 = 219 \text{ l}$$

Odabran je akumulacijski spremnik proizvođača opreme Centrometal tip TB 300 zapremnine 294 litara. Tehničke karakteristike odabranog spremnika prikazane su na sljedećoj slici.

- | | | | |
|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 - Priključak tople PTV | 5 - Toplinska izolacija | 9 - Postolja bojlera | 13 - Otvor za čišćenje (TB-200-850) |
| 2 - Recirkulacija | 6 - Cijevni izmjenjivač | 10 - Priključak kotlovske vode-polaz | |
| 3 - Mjesto za osjetnik temp. | 7 - Otvor za čišćenje (TB 120-150) | 11 - Priključak kotlovske vode-povrat | |
| 4 - Hladna PTV | 8 - Priključak za pražnjenje bojlera | 12 - Termometar | |

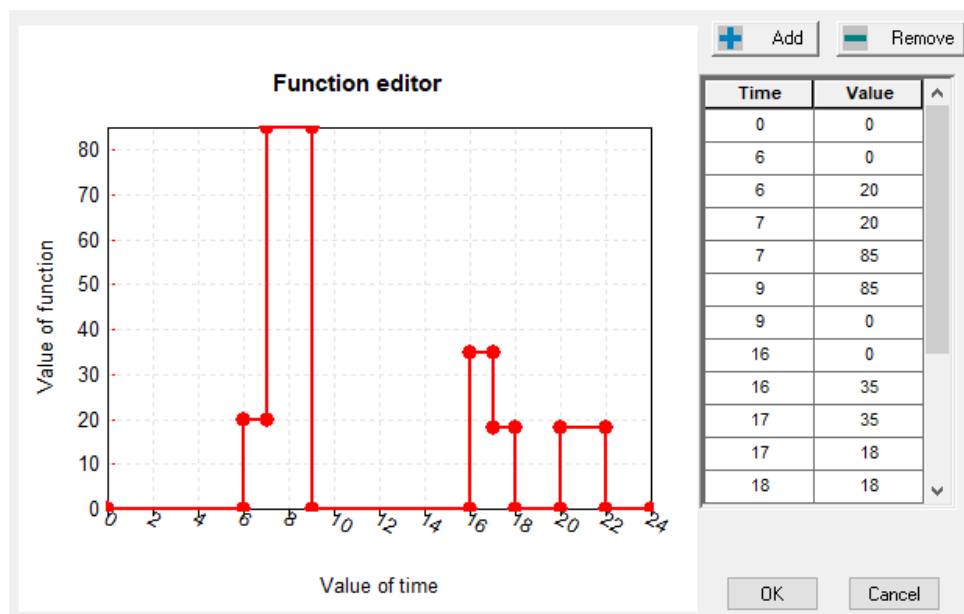


TB		120	150	200	300	600	850
Volumen	(l)	121	150	200	294	545	860
Trajni učin ⁽¹⁾ 80°C	(kW)	16,6	24,7	33,1	50,1	76,6	109,9
	(l/h)	408	605	814	1226	1876	2691
70°C	(kW)	13,3	20	26,7	37,8	58,7	84,8
	(l/h)	330	489	658	926	1437	2076
60°C	(kW)	8,3	12,4	16,5	23,7	36,9	53,8
	(l/h)	204	304	406	580	904	1319
Protok kotlovske vode	(m ³ /h)	1,5	1,5	1,5	3	3	3
Cijevni izmjenjivač	(m ²)	0,42	0,63	0,83	1,32	2,12	3,17
Volumen vode u cijevnom izmjenjivaču	(l)	1,9	2,8	3,8	7,24	11,8	17,7
Masa bojlera	(kg)	36	48	60	105	210	273
Vanjski promjer A	(mm)	640	640	640	640	810	960
Visina bojlera B	(mm)	970	1125	1420	1900	1995	1940
Visine D / E / F	(mm)	-	-	92/300/810	92/300/950	100/390/1100	72/325/1075
Visine G / H	(mm)	-	-	920/1150	1060/1650	1200/1710	1375/1640
Priključak hlad./topla voda	(R)	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	5/4"	5/4"
Max. radni pretlak PTV	(bar)	6	6	6	6	6	6
Max. radni pretl. ogr. vode	(bar)	6	6	6	6	6	6
Razred energetske učinkovitosti		B	C	C	C	C	C

(1) ulazna temp. ogrjevnog medija 80,70,60°C; PTV 10/45°C

Slika 6.6. Tehničke karakteristike akumulacijskog spremnika TB 300 [1]

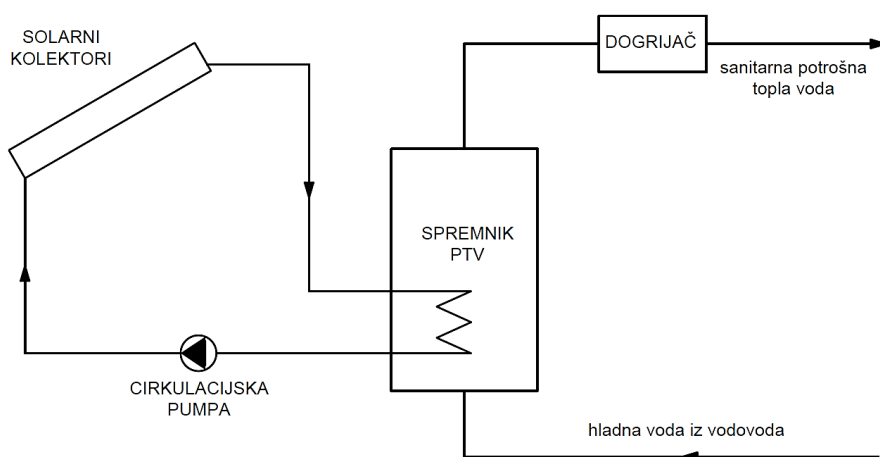
Dnevni profil potrošnje PTV-a definira se uz pomoć forcing funkcije Type 14b. Na Slici 6.7. prikazan je usvojeni profil potrošnje PTV-a koji je konstantan tijekom cijele godine.



Slika 6.7. Dnevni profil potrošnje PTV-a (kg)

6.6.2. Solarni sustav za pripremu PTV-a

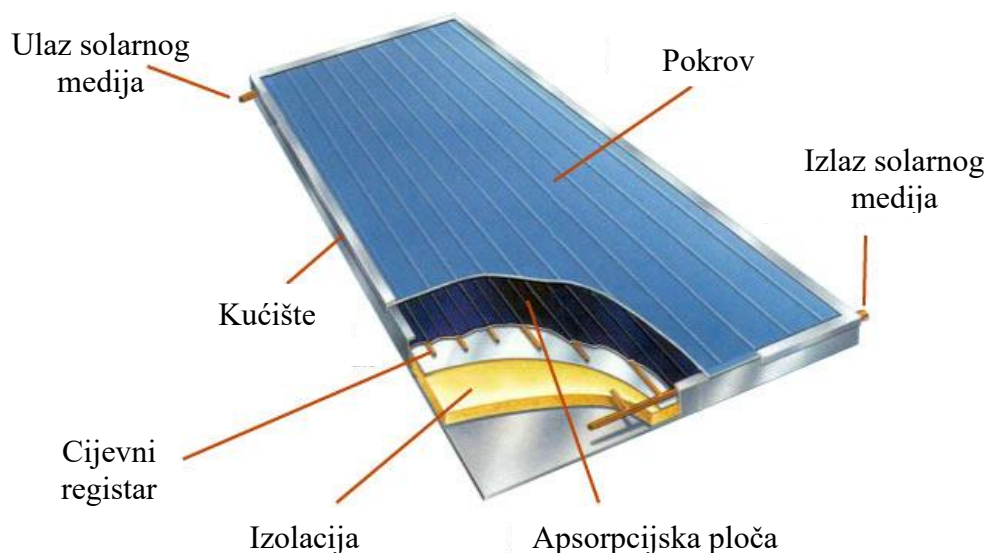
Predviđeno je grijanje potrošne tople vode uz pomoć solarnih kolektora. Shema solarnog sustava za pripremu PTV-a prikazana je na Slici 6.8.. Sustav se sastoji od solarnih kolektora, cirkulacijske pumpe, spremnika potrošne tople vode, protočnog grijača te sustava regulacije. Protočni grijač dogrijava PTV na 40 °C.



Slika 6.8. Shema solarnog sustava pripreme PTV-a

Grijanje spremnika potrošne tople vode predviđeno je uz pomoć ravnih pločastih solarnih kolektora. Kolektori su orijentirani prema jugu pod nagibom 30°. Cirkulacija radnog medija u solarnom krugu je prisilna uz pomoć cirkulacijske pumpe.

Ravni pločasti kolektori imaju čestu primjenu u sustavu zagrijavanja potrošne tople vode uz mogućnost podrške grijanja objekta. Ravni pločasti kolektori izabrani su budući da su u usporedbi s drugim vrstama kolektora najekonomičniji i najpogodniji za opskrbu toplinskom energijom na temperaturi do 100 °C. [4] Na sljedećoj slici je prikazan ravni pločasti solarni kolektor s osnovnim dijelovima.



Slika 6.9. Dijelovi ravnog pločastog kolektora [10]

Osnovni dijelovi koji čine pločasti kolektor su apsorber s cijevnim registrom, transparentni pokrov i toplinski izolirano kućište. Apsorber čija je uloga apsorpcija Sunčeva zračenja uobičajeno je premazan selektivnim premazom. Selektivni premaz ima visoki koeficijent apsorpcije kratkovalnog zračenja, a niski koeficijent emisivnosti dugovalnog infracrvenog zračenja što omogućuje povećanje apsorpcije Sunčeva zračenja, a smanjenje refleksije. Pod utjecajem Sunčeva zračenja dolazi do zagrijavanja apsorbera, a toplinska energija se prenosi s apsorbera na radni fluid koji cirkulira kroz cijevni registar. Metalno kućište apsorbera izolirano je sa stražnje strane, a s prednje strane se nalazi transparentni pokrov (staklo) čime se smanjuju gubici topline prema okolini. [4, 18]

U svrhu simulacije izabrani su solarni kolektori tip Tehnomont SKT 100 čije tehničke karakteristike su prikazane u *Tablici 6.6.*

Tablica 6.6. Tehničke karakteristike solarnog kolektora [4]

Tip	Tehnomont SKT 100
Bruto površina, m ²	2,031
Površina apsorbera, m ²	1,9
Površina svijetlog otvora, m ²	1,9
Optički stupanj djelovanja	0,79
Koeficijent gubitaka k_1	3,02
Koeficijent gubitaka k_2	0,0228
Toplinski kapacitet, kJ/m ² K	52
Težina, kg	37
Volumen tekućine, l	1,3
Dozvoljeni pogonski tlak, bar	6
Maksimalna temperatura u mirovanju, °C	200
Priključak, mm	18

Učinkovitost solarnih kolektora predstavlja omjer između iskorištene toplinske energije na kolektoru i dozračene Sunčeve energije. Stupanj iskorištenja solarnog kolektora računa se prema izrazu:

$$\eta = \eta_0 - \frac{k_1 \cdot \Delta T}{G} - \frac{k_2 \cdot \Delta T^2}{G} \quad (6.9) [4]$$

gdje je:

η_0 – optički stupanj djelovanja kolektora

ΔT – razlika temperature unutar kolektora i temperature okoliša [K]

- Temperatura solarnih kolektora: 60 °C

- Temperatura okoline: 15 °C

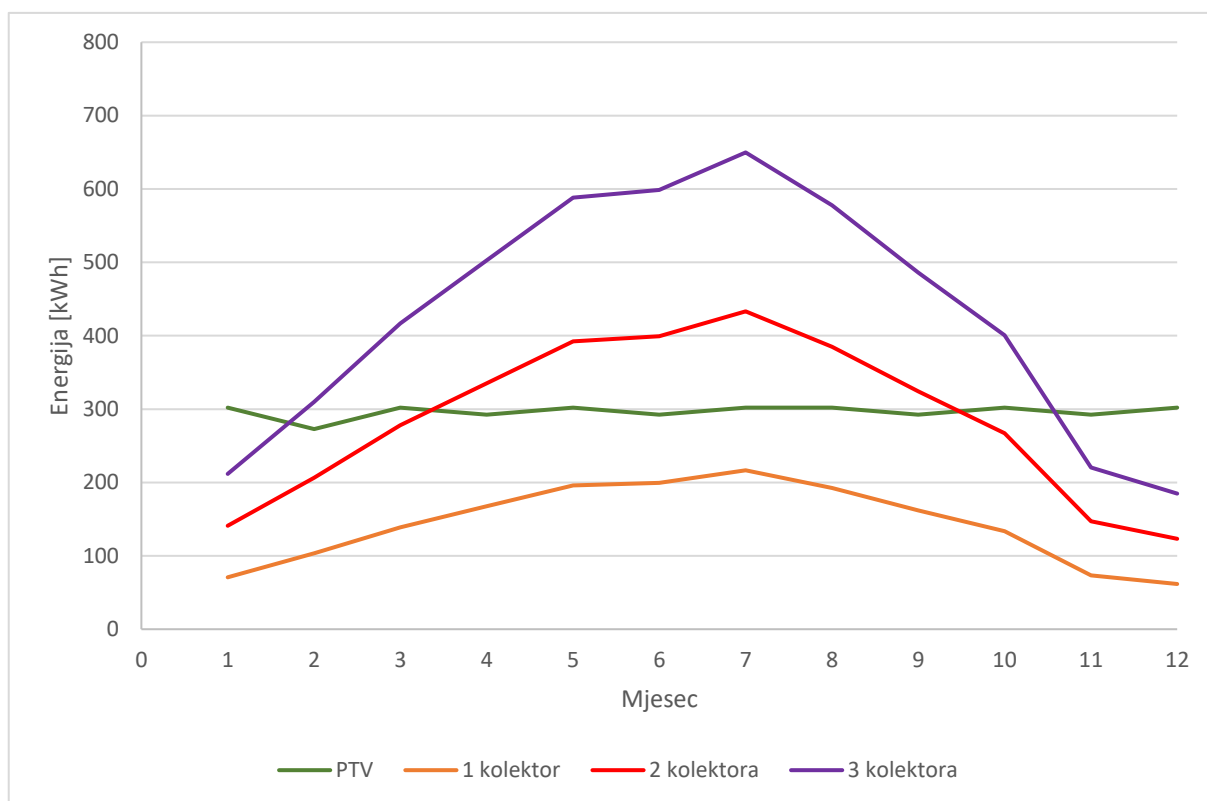
G – intenzitet Sunčeva zračenja [W/m²]

k_1, k_2 – koeficijenti toplinskih gubitaka [W/(m²K)]

$$\eta = 0,79 - \frac{3,02 \cdot 45}{1000} - \frac{0,0228 \cdot 45^2}{1000} = 60,8 \%$$

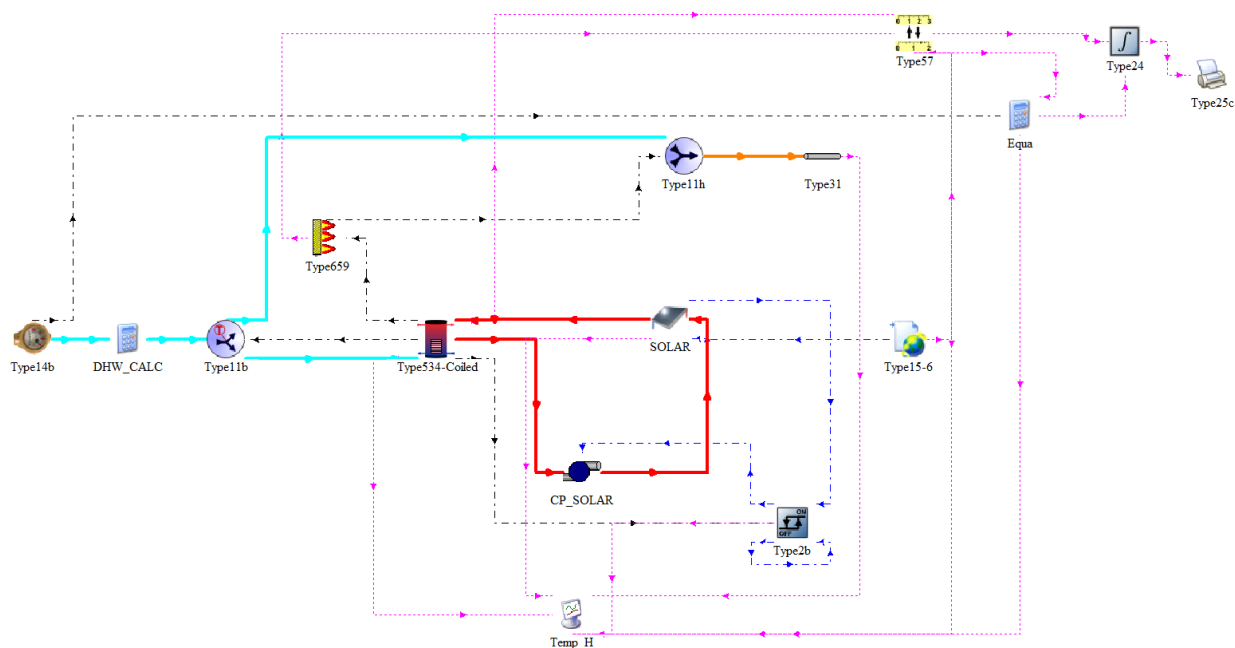
Potrebno je odrediti ukupan broj solarnih kolektora kojima bi se ostvario što viši stupanj pokrivanja potrebne toplinske energije za pripremu potrošne tople vode. Na sljedećem dijagramu prikazana je promjena potrebne toplinske energije za grijanje PTV-a te dozračene toplinske energije na kolektorima po mjesecima. Prikazana je slučaj za 1 kolektor te serijski spoj od više

kolektora. Dozračena energija dobiva se iz podataka za ukupno globalno zračenje iz meteoroloških podataka za Rijeku te površine apsorbera i prosječne iskoristivosti kolektora. [6]



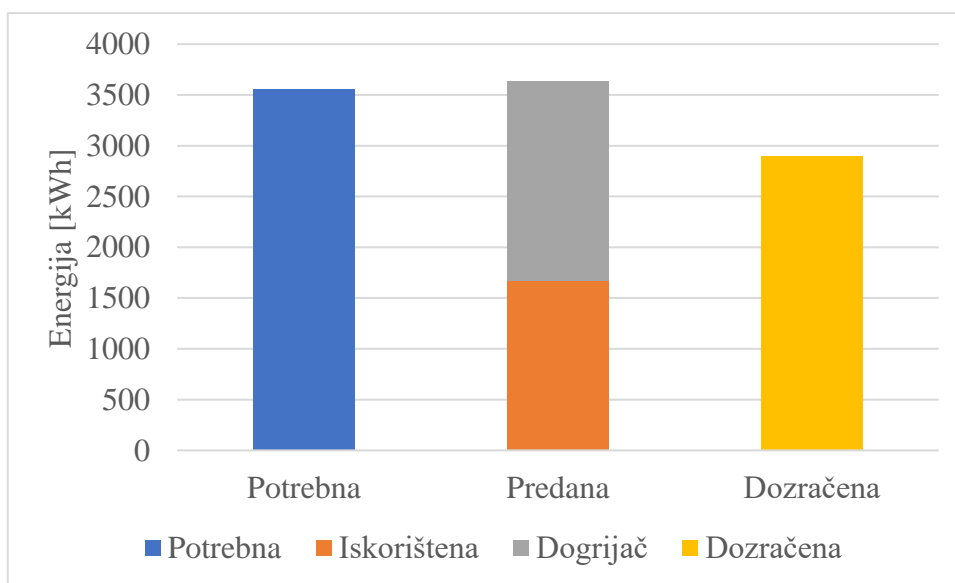
Slika 6.10. Raspodjela energije po mjesecima

Schema simulacijskog modela solarnog sustava za pripremu potrošne tople vode prikazana je na Slici 6.11..

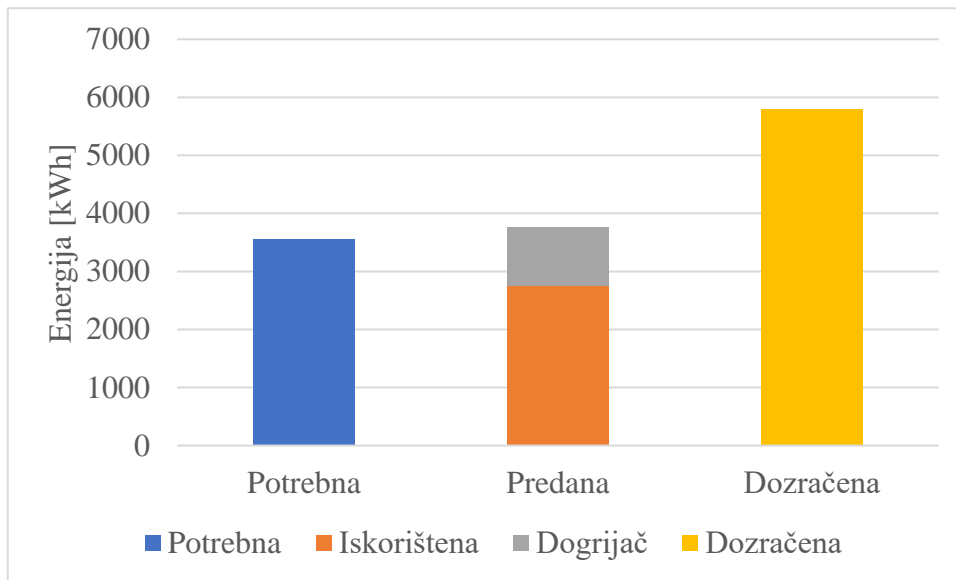


Slika 6.11. Solarni toplinski sustav za pripremu PTV-a

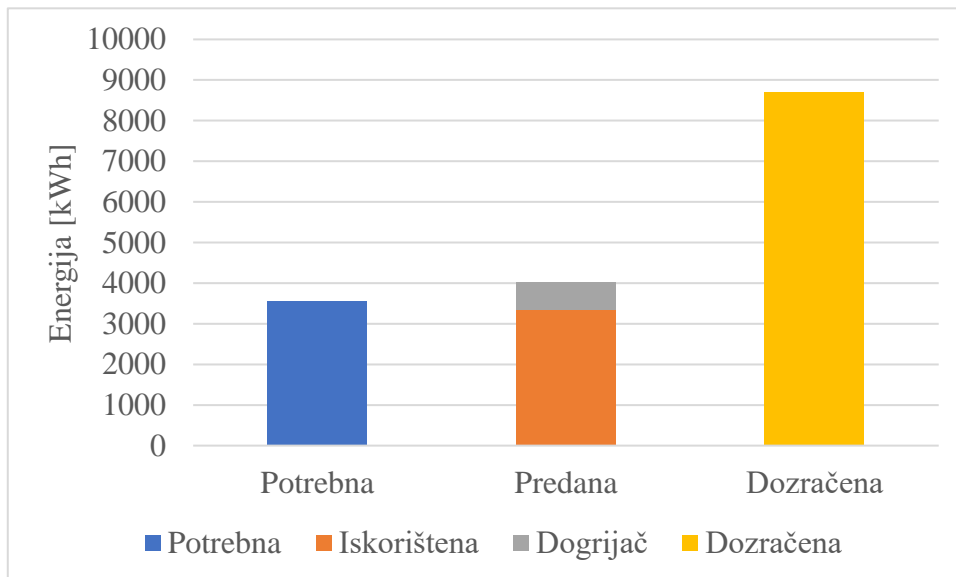
U sljedećim dijagramima su prikazani rezultati simulacije pripreme potrošne tople vode za izabrani spremnik od 300 l. Protok solarnog medija uzet je u iznosu od 50 kg/h po m² površine asporbera.



Slika 6.12. Bilanca energije – 1 kolektor



Slika 6.14. Bilanca energije – 2 kolektora



Slika 6.13. Bilanca energije – 3 kolektora

Učinkovitost solarnih kolektora predstavlja odnos iskorištene topline od Sunca i dozračene energije na površinu apsorbera:

$$\eta_s = \frac{Q_s}{G} \cdot 100 \quad (6.10) [4]$$

gdje je:

η_s – učinkovitost solarnih kolektora kolektora [%]

Q_s – dobivena toplina od Sunca [kWh]

G – dozračena energija [kWh]

Stupanj iskorištenja energije Sunca (solarni udio) predstavlja omjer dobivene topline u solarnom kolektoru i ukupno potrebne topline za grijanje PTV-a:

$$SF = \frac{Q_s}{(Q_s + Q_D)} \cdot 100 \quad (6.11) [4]$$

gdje je:

SF – solarni udio [%]

Q_D – dodatna potrebna topline [kWh]

U sljedećim tablicama prikazane su godišnje sume energija te izračunata učinkovitost kolektora i solarni udio.

Tablica 6.7. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – 1 kolektor

Dozračena energija na kolektore [kWh]	2899
Iskorištena topline na kolektorima [kWh]	1670
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	57,6
Protočni dogrijač [kWh]	1958
Solarni udio [%]	46
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3628
Potrebna topline za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	72

Tablica 6.8. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – 2 kolektora

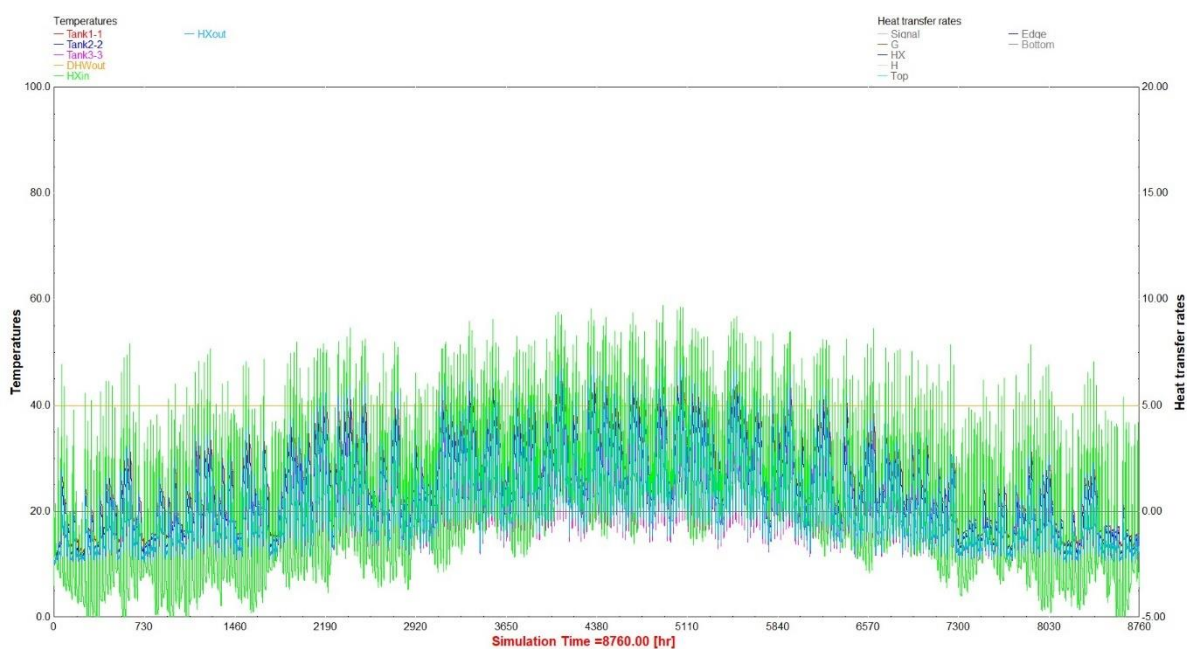
Dozračena energija na kolektore [kWh]	5798
Iskorištena topline na kolektorima [kWh]	2750
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	47,4
Protočni dogrijač [kWh]	1004
Solarni udio [%]	73,3
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3754
Potrebna topline za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	198

Tablica 6.9. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – 3 kolektora

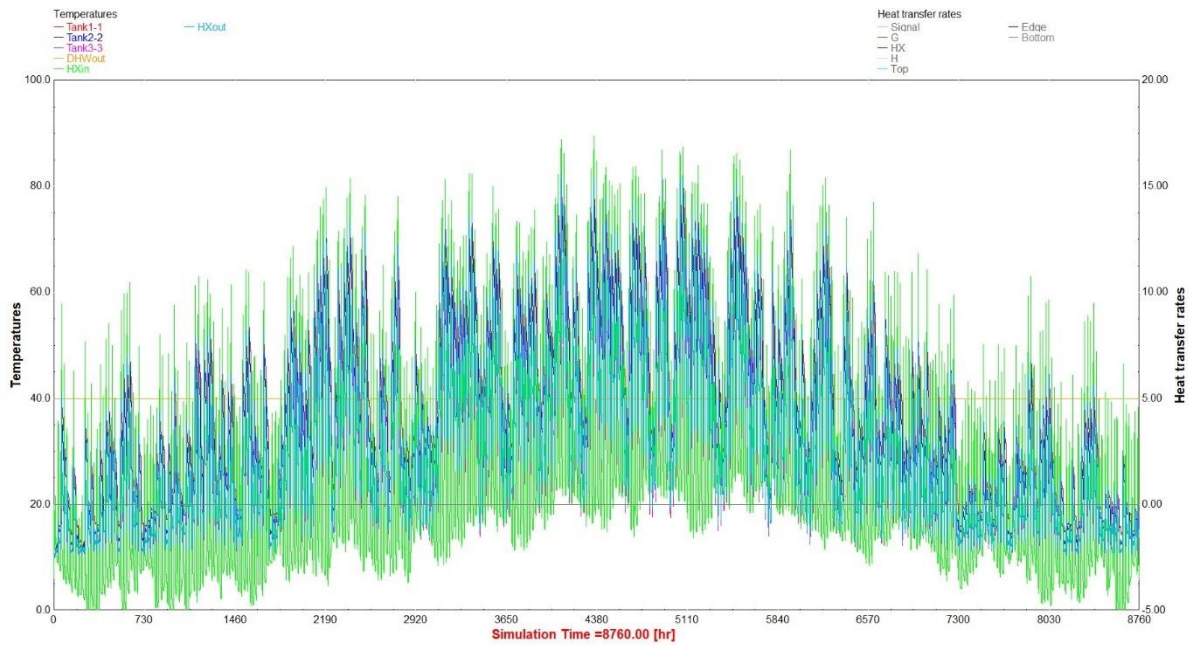
Dozračena energija na kolektore [kWh]	8697
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	3352
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	38,5
Protočni dogrijač [kWh]	681
Solarni udio [%]	83,1
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	4033
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	477

Iz rezultata je vidljivo da povećanjem površine kolektora raste solarni udio, a pritom se učinkovitost smanjuje.

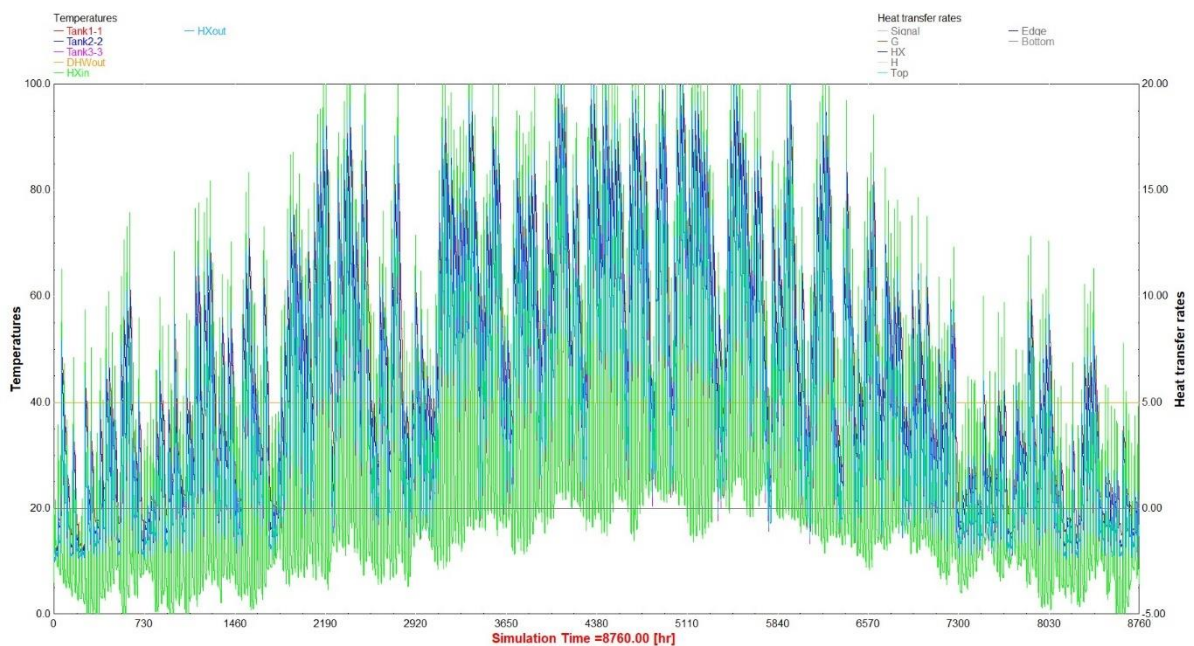
Potrebno je analizirati raspodjelu temperature potrošne tople vode u spremniku po mjesecima za svaki od slučajeva.



Slika 6.15. Raspodjela temperatura – 1 kolektor



Slika 6.17. Raspodjela temperatura – 2 kolektora



Slika 6.16. Raspodjela temperatura – 3 kolektora

Iz slika je vidljivo da u slučaju 1 i 2 kolektora temperatura PTV-a ne prelazi $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ odnosno nema pregrijavanja spremnika, dok u slučaju 3 kolektora u ljetnim mjesecima temperatura prelazi $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ te dolazi do pregrijavanja. Zbog navedenog odabir 3 kolektora se više neće razmatrati.

6.7. Fotonaponski sustav

Predviđena je proizvodnja vlastite električne energije uz pomoć fotonaponskog sustava kojeg čine fotonaponski moduli. Fotonaponski modul sastoji se od serijski ili paralelno spojenih fotonaponskih ćelija u kojima se vrši izravna pretvorba dozračene Sunčeve energije u električnu energiju. Princip pretvorbe energije temelji se na fotoelektričnom učinku. Od materijala izrade ćelija koriste se silicij (monokristalni polikristalni ili amorfni) te polikristalni i monokristalni tankoslojni materijali. Napon jedne ćelije obično se kreće između 0,5 i 0,6 V, dok je napon modula najčešće 12, 24 ili 48 V. Učinkovitost fotonaponske ćelije jednaka je omjeru izlaze električne snage i ukupnog intenziteta Sunčeva zračenja na površinu ćelije te iznosi između 15 i 20 %. [4, 18]

Fotonaponski sustavi se mogu podijeliti na samostalne i sustave priključene na mrežu. Proizvedena električna energije može se koristiti za vlastite potrebe i napajanje kućanskih trošila te se može predati u električnu mrežu. Uz fotonaponske module potrebno je ugraditi pretvarač koji služi za pretvorbu dobivene istosmjerne struje u izmjeničnu potrebnu za trošila. Prednost fotonaponskih modula je da nemaju emisiju štetnih tvari, imaju dugi životni vijek te se sustav može nadograditi i time povećati snaga, dok je glavni nedostatak i dalje cijena sustava. [4, 18]

Za potrebe razmatrane kuće predviđena je ugradnja fotonaponskih modula pri čemu bi se proizvedena električna energija koristila za pogon dizalice topline. Izabrani su fotonaponski moduli proizvođača Solvis model SV60 E (*Slika 6.18.*).



Slika 6.18. Fotonaponski modul Solvis [12]

U nastavku su prikazane tehničke karakteristike izabranih fotonaponskih modula.

Tablica 6.10. Tehnički podaci fotonaponskog modula SV60-290 E [12]

Vrijednosti parametara pri standardnim testnim vrijednostima (STC)		
MODEL		SV60-290 E
Vršna snaga P_{MPP}	[W]	290
Dozvoljeno odstupanje	[W]	-0/+4,9
Struja kratko spoja I_{SC}	[A]	9,69
Napon praznog hoda U_{OC}	[V]	38,94
Nazivna struja I_{MPP}	[A]	9,16
Nazivni napon U_{MPP}	[V]	32,03
Dozvoljeno odstupanje napona i struje	[%]	± 3
Učinkovitost modula	[%]	17,83
STC: 1000 W/m ² ozračenje, 25 °C temperatura ćelija, AM 1,5 g optička masa zraka prema normi EN 60904-3		
Prosječni pad učinkovitosti od 3,8 % pri insolaciji od 200 W/m ² prema normi EN 60904-1		
Vrijednosti parametara u točki NOCT		
MODEL		SV60-290 E
Vršna snaga P_{MPP}	[W]	213,5
Dozvoljeno odstupanje	[W]	-0/+4,9
Struja kratko spoja I_{SC}	[A]	7,78
Napon praznog hoda U_{OC}	[V]	35,8
Nazivna struja I_{MPP}	[A]	7,34
Nazivni napon U_{MPP}	[V]	29,1
NOCT: 800 W/m ² ozračenje, 20 °C ambijentalna temperatura, 1 m/s brzina vjetra		

MEHANIČKI PODACI		
Dimenzije (V x Š x D)	[mm]	1640 x 992 x 40
Masa	[kg]	18,3
Broj i vrsta ćelija		60 ćelije, monokristalični Si (PERC), 156 x 156 mm +/- 1mm
Enkapsulacija ćelija		Etilen-vinil acetat(EVA)
Staklo		3,2 mm kaljeno sunčano staklo
Pozadina		Višeslojna poliesterska folija
Okvir		Okvir od anodiziranog aluminija s dvostrukom stjenkom i otvorima za drenažu
Priključna kutija		IP67 s 3 Bypass diode
Priključni kablovi		Kabel 4mm ² , dužine 1000mm

Slika 6.19. Mehanički podaci fotonaponskog modula [12]

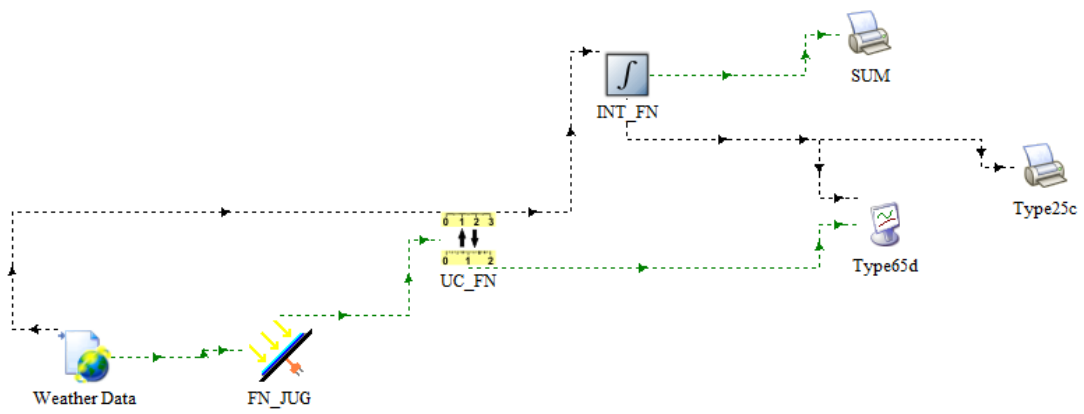
Kako bi se mogao dimenzionirati sustav najprije je potrebno odrediti raspoloživu površinu krova za ugradnju modula. Količina proizvedene električne energije ovisi i orijentaciji krova te kutu nagiba modula. Za naša područja pogodna je južna orijentacija te kut postavljanja od 45°.

Za razmatranu kuću predviđjela se ugradnja na južno orijentiranom dijelu krova čiji nagib iznosi 22°. Na temelju određene raspoložive površine krova te površine jednog modula dobiven je najveći mogući broj modula koji se može ugraditi, a rezultati su prikazani u sljedećoj tablici.

Tablica 6.11. Odabir količine modula za ugradnju

Površina 1 modula [m ²]	Ukupna površina modula [m ²]	Broj panela
1,63	26,08	16

Na *Slici 6.20.* prikazan je model fotonaponskog sustava u simulacijskom sučelju.



Slika 6.20. Simulacija fotonaponskog sustava

Provedbom simulacije dobivena je vrijednost ukupne godišnje proizvedene električne energije u iznosu od 1335 kWh.

7. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA SIMULACIJA

Na temelju rezultata povedenih simulacija za izabrani termotehnički sustav potrebno je analizirati potrošnju primarne energije, isporučenu energiju te udio obnovljivih izvora energije.

Primarna energija je energija sadržana u energentu te se općenito računa prema izrazu:

$$E_{\text{prim}} = \sum_i E_{\text{del},i} \cdot f_{P,i} \quad (7.1) [4]$$

Gdje je:

E_{prim} – godišnja primarna energija [kWh]

$E_{\text{del},i}$ – godišnja isporučena energija od i -tog izvora energije [kWh]

$f_{P,i}$ – faktor primarne energije za i -ti izvor energije

Za električnu energiju faktor primarne energije iznosi $f_{P,\text{el}} = 1,614$

Budući da je izvor energije električna energija slijedi:

$$E_{\text{prim}} = E_{\text{el,uk}} \cdot f_{P,\text{el}}$$

Isporučena energija je godišnja energija dovedena tehničkim sustavom za pokrivanje energetske potrebe za grijanje, hlađenje, ventilaciju, PTV, rasvjetu i pogon pomoćnih sustava umanjena za proizvedenu energiju na lokaciji zgrade.

Isporučena (finalna) energija računa se prema izrazu:

$$E_{\text{del}} = E_G + E_H + E_{\text{pom}} + E_{\text{ras}} - E_{\text{proizv}} \quad (7.2) [4]$$

Za predviđeni sustav uz zanemarivanje rasvjete:

$$E_{\text{del}} = E_{G,\text{el}} + E_{H,\text{el}} + E_{\text{pom},\text{el}} - E_{\text{sol},\text{el}}$$

Energija za pogon pomoćnih sustava uključuje električnu energiju za pogon ventilatora dizalice topline, za pogon ventilatora rekuperatora i za pogon cirkulacijske pumpe solarnih kolektora

Tablica 7.1. Potrošnja električne energije

Potrošnja električne energije za grijanje – dizalica topline [kWh]	1561
Potrošnja električne energije za hlađenje – dizalica topline [kWh]	966
Potrošnja električne energije za pogon ventilatora [kWh]	120
Potrošnja električne energije za pogon rekuperatora [kWh]	2024
Potrošnja električne energije za grijanje PTV-a (2 kolektora) [kWh]	1004
Potrošnja električne energije za pogon pumpe solarnih kolektora [kWh]	276
Ukupna potrošnja električne energije [kWh]	5950

Slijedi:

$$E_{\text{del}} = (2526 + 120 + 2024 + 1004 + 276 - 1335) = 4615 \text{ kWh}$$

Isporučena energija po jedinici korisne površine iznosi 16,3 kWh/m² što je manje od najveće dopuštene vrijednosti prema Tehničkom propisu koja iznosi 60 kWh/m². [13]

Potrošnja primarne energije iznosi:

$$E_{\text{prim}} = 4615 \cdot 1,614 = 7449 \text{ kWh}$$

Potrošnja primarne energije po jedinici korisne površine iznosi 26,2 kWh/m² što je manje od najveće dopuštene vrijednosti prema Tehničkom propisu koja iznosi 80 kWh/m².

Prema Tehničkom propisu za zgrade gotovo nulte potrošnje energije dozvoljena vrijednost primarne energije po jedinici korisne površine iznosi 35 kWh/m² te se iz dobivenih rezultata može zaključiti da je uz primjenu učinkovitih tehničkih sustava i obnovljivih izvora postignuta razina gotovo nulte potrošnje energije. [13]

Udio obnovljivih izvora energije odnosi se samo na grijanje te se računa prema formuli:

$$\gamma_{\text{ren}} = \frac{E_{\text{ren}}}{E_{\text{ren}} + E_{\text{del}}} \cdot 100 \quad (7.3) [4]$$

gdje je:

γ_{ren} – udio obnovljivih izvora energije

E_{ren} – obnovljiva energija proizvedena na lokaciji zgrade [kWh/m²]

E_{del} – isporučena energija [kWh/m²]

$$\gamma_{ren} = \frac{29,99}{29,99 + 12,6} \cdot 100 = 70,4 \%$$

Prema Tehničkom propisu zgrada ispunjava zahtjeve u pogledu primjene obnovljivih izvora energije ako je 50 % energetske potrebe podmireno iz obnovljivih izvora što je u ovom slučaju zadovoljeno. [13]

8. ODREĐIVANJE OPTIMALNIH PARAMETARA GVIK SUSTAVA

Prilikom odabira optimalnih pogonskih parametara GVIK sustava i sustava pripreme PTV-a razmatrane su sljedeće varijante:

Podsustav pripreme PTV-a:

- Veličina spremnika 200 i 300 l
- Površina kolektora: 1 i 2 kolektora
- Protok solarnog medija: 40, 50 i 60 kg/(hm²) površine apsorbera

Podsustav GVIK-a:

- Regulacija protoka zraka dizalice topline: proporcionalna regulacija brzine vrtnje ventilatora i on/off regulacija
- Regulacija temperature: konstantna postavna vrijednost temperature termostata i vrijednost prema dnevnom rasporedu

Provedene su cjelogodišnje simulacije proizvedene energije za grijanje i hlađenje i utrošene električne energije te su optimalni parametri određeni na temelju izračunatih specifičnih potrošnji primarne energije i investicijskih i pogonskih troškova.

Za izračun investicijskih troškova uzeta je cijena za 1 solarni kolektor u iznosu od 700 € pa je cijena 2 kolektora 1400 €. Cijena spremnika PTV-a od 200 l iznosi 5500 €, a cijena spremnika od 300 l iznosi 6000 €. Za izračun pogonskih troškova uzeta je srednja cijena električne energije u iznosu od 0,093 €/kWh. Kod sustava grijanja i hlađenja s dizalicom topline razmatrani su samo pogonski troškovi.

8.1. Podsustav pripreme PTV-a

Rezultati simulacija za varijacije sustava pripreme PTV-a dani su u nastavku.

Spremnik 200 l s 1 solarnim kolektorom:

- V1 protok solarnog medija 40 kg/(hm²)

Tablica 8.1. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V1

Dozračena energija na kolektore [kWh]	2899
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	1622
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	55,9
Protočni dogrijač [kWh]	1991
Solarni udio [%]	44,9
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3613
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	57

- V2 protok solarnog medija 50 kg/(hm²)

Tablica 8.2. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V2

Dozračena energija na kolektore [kWh]	2899
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	1635
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	56,4
Protočni dogrijač [kWh]	1975
Solarni udio [%]	45,3
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3610
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	54

- V3 protok solarnog medija 60 kg/(hm²)

Tablica 8.3. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V3

Dozračena energija na kolektore [kWh]	2899
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	1646
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	56,8
Protočni dogrijač [kWh]	1962
Solarni udio [%]	45,6
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3608
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	52

Spremnik 200 l s 2 solarna kolektora:

- V4 protok solarnog medija 40 kg/(hm²)

Tablica 8.4. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V4

Dozračena energija na kolektore [kWh]	5798
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	2625
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	45,3
Protočni dogrijač [kWh]	1126
Solarni udio [%]	70
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3751
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	196

- V5 protok solarnog medija 50 kg/(hm²)

Tablica 8.5. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V5

Dozračena energija na kolektore [kWh]	5798
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	2648
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	45,7
Protočni dogrijač [kWh]	1113
Solarni udio [%]	70,4
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3761
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	205

- V6 protok solarnog medija 60 kg/(hm²)

Tablica 8.6. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V6

Dozračena energija na kolektore [kWh]	5798
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	2669
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	46
Protočni dogrijač [kWh]	1100
Solarni udio [%]	70,8
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3769
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	213

Spremnik 300 l s 1 solarnim kolektorom:

- V7 protok solarnog medija 40 kg/(hm²)

Tablica 8.7. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V7

Dozračena energija na kolektore [kWh]	2899
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	1655
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	57,1
Protočni dogrijač [kWh]	1976
Solarni udio [%]	45,6
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3631
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	75

- V8 protok solarnog medija 50 kg/(hm²)

Tablica 8.8. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V8

Dozračena energija na kolektore [kWh]	2899
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	1670
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	57,6
Protočni dogrijač [kWh]	1958
Solarni udio [%]	46
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3628
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	72

- V9 protok solarnog medija 60 kg/(hm²)

Tablica 8.9. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V9

Dozračena energija na kolektore [kWh]	2899
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	1681
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	58
Protočni dogrijač [kWh]	1945
Solarni udio [%]	46,4
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3626
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	70

Spremnik 300 l s 2 solarna kolektora:

- V10 protok solarnog medija 40 kg/(hm²)

Tablica 8.10. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V10

Dozračena energija na kolektore [kWh]	5798
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	2727
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	47
Protočni dogrijač [kWh]	1018
Solarni udio [%]	72,8
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3744
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	189

- V11 protok solarnog medija 50 kg/(hm²)

Tablica 8.11. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V11

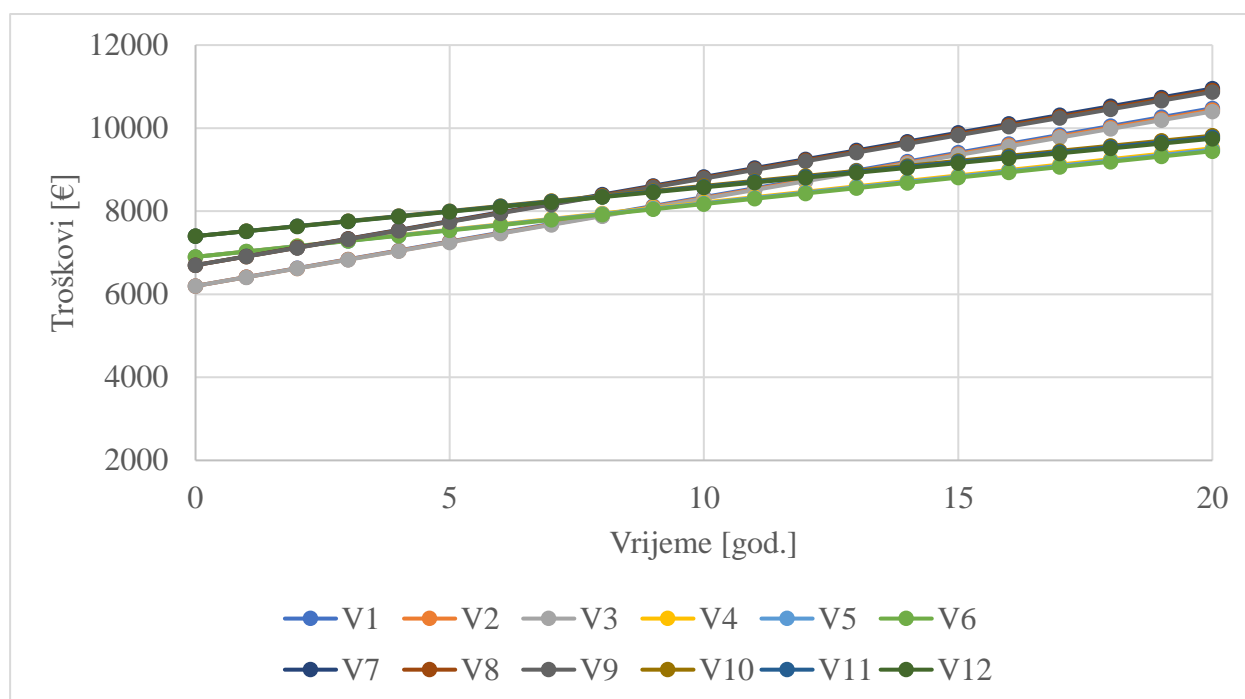
Dozračena energija na kolektore [kWh]	5798
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	2750
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	47,4
Protočni dogrijač [kWh]	1004
Solarni udio [%]	73,3
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3754
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	198

- V12 protok solarnog medija 60 kg/(hm²)

Tablica 8.12. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V12

Dozračena energija na kolektore [kWh]	5798
Iskorištena toplina na kolektorima [kWh]	2771
Učinkovitost solarnih kolektora [%]	47,8
Protočni dogrijač [kWh]	991
Solarni udio [%]	73,7
Energija predana za grijanje PTV-a [kWh]	3762
Potrebna toplina za zagrijavanje vode na 40 °C [kWh]	3556
Gubici spremnika [kWh]	206

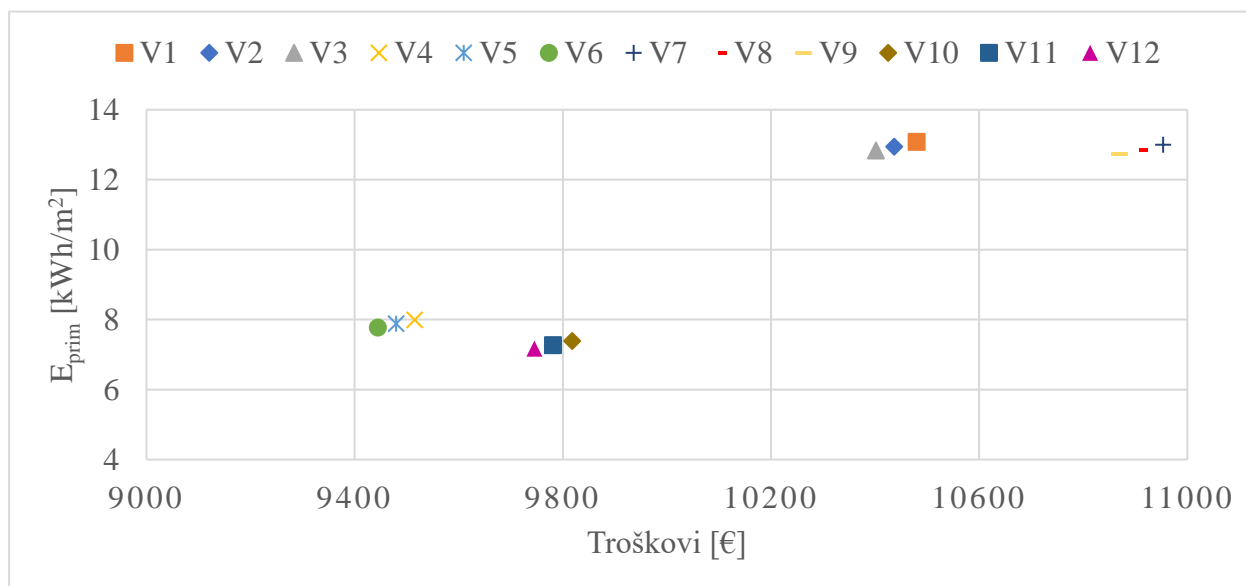
Na Slici 8.1. prikazani su ukupni troškovi različitih varijanti solarnog sustava pripreme PTV-a za promatrani period od 20 godina. Ukupne troškove čine investicijski troškovi koji uključuju cijenu spremnika i kolektora i pogonski troškovi koji podrazumijevaju troškove potrošnje električne energije za rad sustava.



Slika 8.1. Godišnji troškovi za različite varijante sustava PTV-a za promatrani period

Iz dijagrama je vidljivo da nakon 20 godina varijanta V6 postiže najniže ukupne troškove.

U sljedećem je dijagramu za navedene varijante sustava prikazana specifična potrošnja primarne energije samo za sustav PTV-a i ukupni troškovi pojedinačnog sustava tijekom 20 godina.



Slika 8.2. Specifična potrošnja primarne energije i ukupni troškovi – varijante sustava PTV

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da varijanta V12 postiže najmanju potrošnju primarne energije te bi to bilo optimalno rješenje s energetskeg stajališta. S druge strane varijanta V6 postiže najmanje ukupne troškove te bi to bilo optimalno rješenje s ekonomskog stajališta.

8.2. Podsustav GVIK-a

U nastavku su prikazani rezultati simulacija za varijacije sustava GVIK.

- S1: Proporcionalna regulacija protoka zraka
Regulacija temperature: konstantna zadana vrijednost termostata grijanja $t_g = 22$ °C
i hlađenja $t_h = 23$ °C

Tablica 8.13. Rezultati simulacije – S1

Mjesec	Proizvedena toplinska energija za grijanje [kWh]	Proizvedena toplinska energija za hlađenje [kWh]	Potrošnja električne energije za ventilator [kWh]	Potrošnja električne energije za dizalicu topline [kWh]
1	1849	0	14	419
2	1422	0	12	321
3	1044	0	10	210
4	336	0	5	57
5	0	884	7	79
6	0	1642	12	186
7	0	2219	16	311
8	0	2138	15	299
9	0	1002	8	90
10	150	0	2	25
11	853	0	8	161
12	1676	0	13	369
Σ	7329	7886	120	2526

U sljedećoj tablici su prikazane sumirane godišnje vrijednosti proizvedene i utrošene energije.

Tablica 8.14. Ukupna godišnja proizvedena i utrošena energije – S1

Proizvedena toplinska energija za grijanje [kWh]	7329
Proizvedena toplinska energija za hlađenje [kWh]	7886
Potrošnja električne energije za pogon ventilatora [kWh]	120
Potrošnja električne energije za grijanje [kWh]	1561
Potrošnja električne energije za hlađenje [kWh]	966
Potrošnja električne energije za pogon dizalice topline [kWh]	2526
Ukupna potrošnja električne energije [kWh]	2647

Sezonski faktor grijanja iznosi:

$$SCOP = \frac{7329}{1561} = 4,7$$

Sezonski faktor hlađenja iznosi:

$$SEER = \frac{7886}{966} = 8,17$$

- S2: On/off regulacija protoka zraka

Regulacija temperature: konstantna zadana vrijednost termostata grijanja $t_g = 22 \text{ }^\circ\text{C}$
i hlađenja $t_h = 23 \text{ }^\circ\text{C}$

Tablica 8.15. Rezultati simulacije – S2

Mjesec	Proizvedena toplinska energija za grijanje [kWh]	Proizvedena toplinska energija za hlađenje [kWh]	Potrošnja električne energije za ventilator [kWh]	Potrošnja električne energije za dizalicu topline [kWh]
1	1796	0	22	414
2	1361	0	20	311
3	979	0	22	199
4	262	0	22	46
5	0	808	22	82
6	0	1598	22	205
7	0	2249	22	358
8	0	2068	22	329
9	0	910	22	91
10	113	0	22	19
11	754	0	22	142
12	1638	0	22	363
Σ	6902	7634	263	2559

Iz rezultata je vidljivo da je u slučaju proporcionalne regulacije brzine vrtnje ventilatora godišnja potrošnja električne energije za pogon ventilatora manja za 54 % u odnosu na potrošnju električne energije ventilatora bez regulacije brzine.

Tablica 8.16. Ukupna godišnja proizvedena i utrošena energije -S2

Proizvedena toplinska energija za grijanje [kWh]	6902
Proizvedena toplinska energija za hlađenje [kWh]	7634
Potrošnja električne energije za pogon ventilatora [kWh]	263
Potrošnja električne energije za grijanje [kWh]	1495
Potrošnja električne energije za hlađenje [kWh]	1065
Potrošnja električne energije za pogon dizalice topline [kWh]	2559
Ukupna potrošnja električne energije [kWh]	2822

Sezonski faktor grijanja iznosi:

$$SCOP = \frac{6902}{1495} = 4,62$$

Sezonski faktor hlađenja iznosi:

$$SEER = \frac{7634}{1065} = 7,17$$

- S3: Proporcionalna regulacija protoka zraka
Regulacija temperature prostornog zraka prema dnevnom rasporedu

Tablica 8.17. Vrijednosti termostata prema dnevnom rasporedu

Vrijeme [h]	Termostat grijanja t_g [°C]	Termostat hlađenja t_h [°C]
22-6	18	26
6-22	21	24

Tablica 8.18. Rezultati simulacije – S3

Mjesec	Proizvedena toplinska energija za grijanje [kWh]	Proizvedena toplinska energija za hlađenje [kWh]	Potrošnja električne energije za ventilator [kWh]	Potrošnja električne energije za dizalicu topline [kWh]
1	1603	0	11	349
2	1206	0	9	260
3	889	0	7	172
4	268	0	4	44
5	0	768	5	73
6	0	1459	9	183
7	0	1959	11	317
8	0	1865	10	295
9	0	939	6	90
10	131	0	2	21
11	712	0	6	128
12	1481	0	10	311
Σ	6290	6991	90	2243

Tablica 8.19. Ukupna godišnja proizvedena i utrošena energije – S3

Proizvedena toplinska energija za grijanje [kWh]	6290
Proizvedena toplinska energija za hlađenje [kWh]	6991
Potrošnja električne energije za pogon ventilatora [kWh]	90
Potrošnja električne energije za grijanje [kWh]	1284
Potrošnja električne energije za hlađenje [kWh]	958
Potrošnja električne energije za pogon dizalice topline [kWh]	2243
Ukupna potrošnja električne energije [kWh]	2333

Sezonski faktor grijanja iznosi:

$$SCOP = \frac{6290}{1284} = 4,9$$

Sezonski faktor hlađenja iznosi:

$$SEER = \frac{6991}{958} = 7,29$$

- S4: On/off regulacija protoka zraka

Regulacija temperature prostornog zraka prema dnevnom rasporedu

Tablica 8.20. Rezultati simulacije – S4

Mjesec	Proizvedena toplinska energija za grijanje [kWh]	Proizvedena toplinska energija za hlađenje [kWh]	Potrošnja električne energije za ventilator [kWh]	Potrošnja električne energije za dizalicu topline [kWh]
1	1637	0	22	367
2	1247	0	20	277
3	900	0	22	178
4	231	0	22	39
5	0	801	22	82
6	0	1571	22	207
7	0	2189	22	362
8	0	2032	22	331
9	0	912	22	92
10	91	0	22	15
11	663	0	22	122
12	1518	0	22	328
Σ	6287	7505	263	2400

Tablica 8.21. Ukupna godišnja proizvedena i utrošena energije – S4

Proizvedena toplinska energija za grijanje [kWh]	6287
Proizvedena toplinska energija za hlađenje [kWh]	7505
Potrošnja električne energije za pogon ventilatora [kWh]	263
Potrošnja električne energije za grijanje [kWh]	1326
Potrošnja električne energije za hlađenje [kWh]	1074
Potrošnja električne energije za pogon dizalice topline [kWh]	2400
Ukupna potrošnja električne energije [kWh]	2663

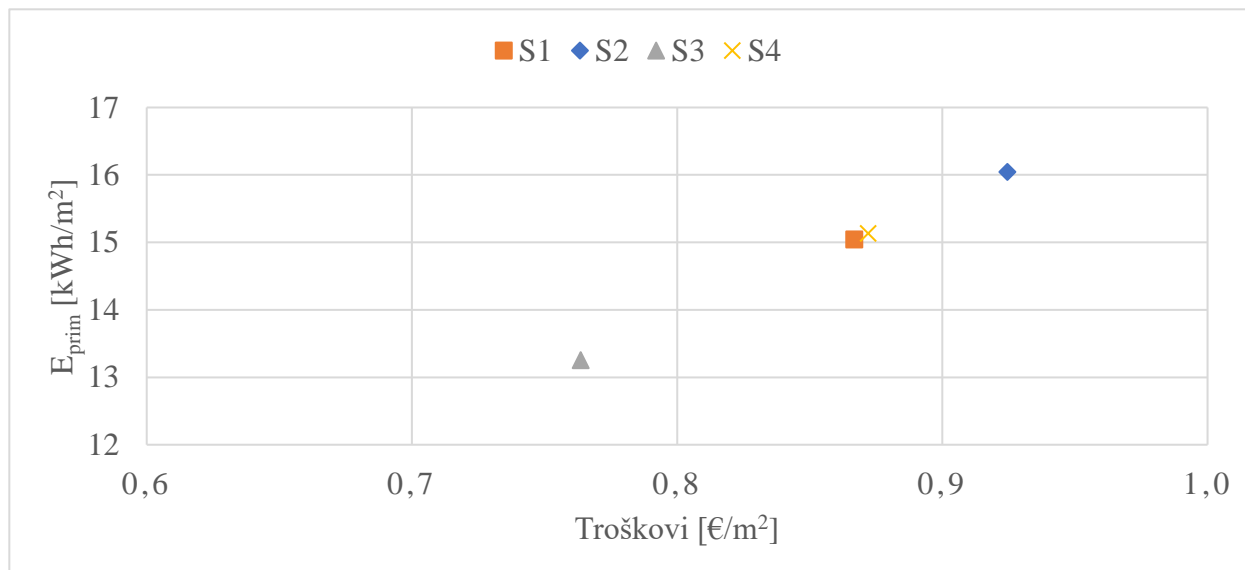
Sezonski faktor grijanja iznosi:

$$SCOP = \frac{6287}{1326} = 4,74$$

Sezonski faktor hlađenja iznosi:

$$SEER = \frac{7505}{1074} = 6,99$$

Na sljedećem dijagramu su prikazani rezultati proračuna specifične potrošnje primarne energije samo za sustav dizalice topline i pogonski troškovi za navedene varijante.



Slika 8.3. Potrošnja primarne energije i godišnji troškovi za sustav dizalice topline

Na temelju dobivenih rezultata zaključuje se da je optimalna varijanta S3 s proporcionalnom brzinom vrtnje ventilatora i dnevnim rasporedom temperature termostata budući da je u tom slučaju najmanja potrošnja primarne energije te su najniži godišnji pogonski troškovi.

9. ZAKLJUČAK

Provedena je analiza energetske obnove postojeće obiteljske kuće smještene na području Sjevernog Jadrana. Cilj je bio utvrditi optimalne parametre obnove kao i pogonske parametre za predviđeni koncept tehničkog sustava u svrhu smanjenja godišnje potrošnje energije za grijanje i hlađenje. Energetska obnova vanjske ovojnice uključivala je izolaciju vanjskih zidova i zamjenu postojećih prozora i vrata. Kao dio obnove predviđena je i zamjena postojećeg sustava grijanja na kotao s loživim uljem s energetski učinkovitijim termotehničkim sustavom uz primjenu obnovljivih izvora energije.

Najprije je provedena analiza godišnje potrošnje energije za grijanje i hlađenje u slučaju izolacije vanjskih zidova mineralnom vunom toplinske vodljivosti $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$. Debljina sloja izolacije uzeta je u koracima počevši od minimalne potrebne debljine kojom se postiže dopuštena vrijednost koeficijenta prolaska topline vanjskih zidova prema Tehničkom propisu. Određeno je da minimalna potrebna debljina izolacije iznosi 5 cm. Također, provedena je analiza godišnje potrošnje energije za različite tipove ostakljenja. Optimalno stanje određeno je na temelju minimalnih ukupnih troškova koje čine investicijski troškovi i pogonski troškovi odnosno troškovi potrošnje korisne energije za grijanje i hlađenje za razmatrani period od 20 godina. Iz rezultata godišnje potrošnje energije za različite debljine izolacije bilo je vidljivo da primjenom minimalne debljine izolacije dolazi do značajnog pada potrošnje energije za grijanje, a daljnjim povećanjem debljine potrošnja energije se smanjuje u puno manjem intenzitetu. Kao optimalno rješenje izabrana je debljina izolacije u iznosu od 5 cm. Dobiveni rezultati analize prikazuju da je u slučaju primjene energetski učinkovitijih sustava period povrata investicije puno duži.

Koeficijent prolaska topline postojećih neizoliranih vanjskih zidova iznosio je $U = 1,135 \text{ W/m}^2\text{K}$, dok je koeficijent prolaska topline za postojeće prozore i vrata iznosio $U = 2,83 \text{ W/m}^2\text{K}$ uz faktor $g = 0,755$. Koeficijent prolaska topline vanjskih zidova nakon energetske obnove iznosi $U = 0,449 \text{ W/m}^2\text{K}$, a koeficijent prolaska topline novih prozora i vrata iznosi $U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ uz faktor $g = 0,6$. Za dodatno smanjenje potrošnje energije previdjela se i ugradnja mehaničke ventilacije s povratom topline. U slučaju postojeće kuće ukupna godišnja potrošnja energija za grijanje iznosila je 19819 kWh, a za hlađenje 8116 kWh te je uz korisnu površinu od 284 m² specifična potrošnja korisne energije za grijanje iznosila 70 kWh/m². U slučaju obnovljenog stanja vanjske ovojnice uz primjenu mehaničke ventilacije s povratom topline ukupna godišnja potrošnja energije za grijanje iznosi 5631 kWh čime se potrošnja energije smanjila za 71,6 %, dok je ukupna godišnja potrošnja energije za hlađenje neznatno narasla te iznosi 8449 kWh. Specifična potrošnja korisne energije za grijanje u slučaju obnove iznosi 20 kWh/m² čime je zadovoljen zahtjev prema Tehničkom propisu.

U drugom dijelu rada analiziran je koncept predviđenog tehničkog sustava koji uključuje dizalicu topline zrak-zrak kao izvor energije za grijanje i hlađenje, solarne kolektore za proizvodnju potrošne tople vode te fotonaponske module za vlastitu proizvodnju električne energije. Provedene su simulacije za dobivanje iznosa godišnje proizvedene i utrošene energije. Na temelju rezultata provedenih simulacija za izabrani termotehnički sustav izračunate su vrijednosti isporučene godišnje energije, potrošnja primarne energije te udio obnovljivih izvora energije. Isporučena energija po jedinici korisne površine iznosi $16,3 \text{ kWh/m}^2$ što je manje od najveće dopuštene vrijednosti prema Tehničkom propisu za rekonstrukciju postojeće obiteljske kuće i za Primorsku Hrvatsku koja iznosi 60 kWh/m^2 . Dopuštena vrijednost specifične potrošnje primarne energije prema Tehničkom propisu iznosi 80 kWh/m^2 . Proračunom je dobivena specifična potrošnja primarne energije u iznosu od $26,2 \text{ kWh/m}^2$ čime je postignuta gotovo nulta potrošnja energije čiji je dopušteni iznos definiran Tehničkim propisom i iznosi 35 kWh/m^2 . Udio obnovljivih izvora energije za grijanje iznosi $70,4 \%$ čime je ispunjen zahtjev prema propisu u pogledu primjene obnovljivih izvora energije koji definira minimalnu granicu od 50% . Zatim je provedena analiza s ciljem utvrđivanja optimalnih parametara GVIK sustava i sustava pripreme potrošne tople vode. Za podsustav pripreme PTV-a varirana je veličina spremnika, broj odnosno površina kolektora te protok solarnog medija. Za podsustav GVIK-a razmatran je slučaj regulacije protoka zraka primjenom ventilatora dizalice topline s proporcionalnom regulacijom brzine vrtnje te on/off regulacije te je razmatran slučaj konstante postavne vrijednosti temperature termostata i vrijednost prema dnevnom rasporedu. Provedene su cjelogodišnje simulacije proizvedene energije za grijanje i hlađenje utrošene električne energije te su optimalni parametri određeni na temelju izračunatih specifičnih potrošnji primarne energije i investicijskih i pogonskih troškova.

Na temelju dobivenih rezultata podsustava pripreme PTV-a vidljivo je da varijanta V12 sa spremnikom od 300 l i 2 kolektora te protokom od $60 \text{ kg/(hm}^2)$ postiže najmanju potrošnju primarne energije te bi to bilo optimalno rješenje s energetskog stajališta, dok varijanta V6 sa spremnikom od 200 l i 2 kolektora te protokom od $60 \text{ kg/(hm}^2)$ postiže najmanje ukupne troškove nakon razmatranog perioda od 20 godina te bi to bilo optimalno rješenje s ekonomskog stajališta. Na temelju dobivenih rezultata podsustava GVIK-a zaključuje se da je optimalna varijanta sustava grijanja i hlađenja dizalicom topline S3 s proporcionalnom brzinom vrtnje ventilatora dizalice topline i dnevnim rasporedom temperature termostata budući da je u tom slučaju najmanja potrošnja primarne energije te su najniži godišnji pogonski troškovi.

10.LITERATURA

- [1] Centrometal: „Toplovodni bojleri“, s Interneta, https://www.centrometal.hr/portfolio/tb/?gclid=Cj0KCQiArsefBhCbARIsAP98hXSY7PrY0ANEpIUUm_zrFCIbFVUg_3KngEVSjKC6bQoeR8gjUr04-pH0aAi0YEALw_wcB#!/details, 18. veljače 2023.
- [2] Clivet: „Katalog Multisplit“, 2022.
- [3] Clivet: „Tehnički podaci: MU2-Y 61M“, 2022.
- [4] Delač, B.: „Predavanja iz kolegija Računalno modeliranje sustava u termoenergetici i termotehnici“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2022.
- [5] Dović D. i dr.: „Algoritam za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade“, https://mgipu.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/meteoroloski_podaci/Algoritam_HVAC_2017.pdf, Zagreb, 2017.
- [6] Državni hidrometeorološki zavod: “Meteorološki parametri u tablicama po postajama“, 2016.
- [7] HEP: „Tarifne stavke“, s Interneta, <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547>, 2. veljače 2023.
- [8] INA: „Pregled cijena“, s Interneta, <https://www.ina.hr/kupci/veleprodaja-i-narucivanje/privatni-korisnici/pregled-cijena/>, 25. veljače 2023.
- [9] Slika: „Dijelovi dizalice topline“, s Interneta, <http://www.reuk.co.uk/wordpress/geothermal/air-source-heat-pumps/>, 27. veljače 2023.
- [10] Slika: „Solarni kolektor“, s Interneta, <https://www.greenspec.co.uk/building-design/solar-collectors/>, 27. veljače 2023.
- [11] Slika: „Sustav grijanja i hlađenja dizalicom topline“, s Interneta, <https://firstchoiceheatingandcooling.com.au/air-conditioner-ducted-central-system>, 27. veljače 2023.
- [12] Solvis: „SV60 E“, s Interneta, <https://solvis.hr/proizvodi/monokristalni-moduli/sv60-e/>, 22. veljače 2023.
- [13] „Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama“, Narodne novine, 2020.
- [14] Trsnys mathematical reference, <http://web.mit.edu/TRNSYS/04-MathematicalReference>, 10.05.2022.
- [15] Vaillant: „recoVAIR: Uputa za uporabu“, s Interneta, <https://www.vaillant.hr/downloads/upute-rukovanje/rukovanje-recovair-150-4-159445.pdf>, 11. veljače 2023.

[16] Vaillant: „Specifikacije: recoVAIR VAR 150/4 L“, s Interneta, <https://www.vaillant.hr/krajnji-korisnici/proizvodi/recovair-4-2241.html>, 11. veljače 2023.

[17] Wolf, I.: „Predavanja iz kolegija Tehnika grijanja“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2017.

[18] Wolf, I.: „Predavanja iz kolegija Obnovljivi izvori energije“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2019.

11.SAŽETAK

Zadatak ovog rada bio je odrediti optimalne parametre energetske obnove vanjske ovojnice za postojeću obiteljsku kuću smještenu na području Sjevernog Jadrana te određivanje optimalnih pogonskih parametara sustava grijanja, hlađenja, ventilacije i pripreme potrošne tople vode. Glavni cilj je bio smanjenje potrošnje energije za grijanje i hlađenje te postizanje gotovo nulte potrošnje energije. Kako bi se to ostvarilo provedene su mjere energetske obnove vanjske ovojnice koje su uključivale postavljanje izolacije s vanjske strane zidova te zamjenu postojećih prozora i vrata. Također, zamijenjen je postojećih sustav grijanja na kotao s loživim uljem s energetski učinkovitijim termotehničkim sustavom uz primjenu obnovljivih izvora energije. Za provedbu simulacija korišten računalnog programa TRNSYS.

U prvom dijelu rada provedena je analiza energetske obnove vanjske ovojnice koja je uključivala izračun godišnje potrošnje energije za grijanje i hlađenje za različite debljine izolacije vanjskih zidova te za različite karakteristike ostakljenja. Optimalno stanje određeno je na temelju minimalnih ukupnih troškova koje čine investicijske troškovi i pogonski troškovi za razmatrani period od 20 godina. Kao optimalno stanje izabrana je izolacija vanjskih zidova mineralnom vunom debljine 5 cm kojom je postignuto stanje koje zadovoljava trenutno važeće propise.

U drugom dijelu provedena je analiza predviđenog koncepta tehničkog sustava. Predviđen je novi tehničkog sustav koji sadrži mehaničku ventilaciju s povratom topline, dizalicu topline zrak-zrak, solarne toplinske kolektore i fotonaponske module. Provedene su simulacije proizvedene energije za grijanje i hlađenje i utrošene električne energije te su optimalni parametri određeni na temelju izračunatih specifičnih potrošnji primarne energije i investicijskih i pogonskih troškova.

Uz energetske obnovu kuće i primjenu energetski učinkovitog tehničkog sustava uz primjenu obnovljivih izvora energije postignuta je gotovo nula potrošnja energije. Također, iz rezultata je vidljivo da je prilikom primjene energetski učinkovitih sustava dug period povrata investicije.

Ključne riječi: TRNSYS, numeričke simulacije, grijanje, hlađenje, ventilacija, priprema potrošne tople vode, dizalica topline, solarni sustav, obnovljivi izvori energije, primarna energija

12.ABSTRACT

The aim of this work was to determine the optimal parameters of the energy renovation of the building envelope for an existing family house located in the area of the Northern Adriatic and to determine the optimal operating parameters of the heating, cooling, ventilation and hot water preparation system. The main goal was to reduce energy consumption for heating and cooling and achieve nearly zero energy building. In order to achieve this, energy renovation measures were implemented for the building envelope, which included the installation of insulation on exterior walls and the replacement of existing windows and doors. Also, the existing heating system with a fuel oil boiler was replaced with a more energy-efficient thermo-technical system with the use of renewable energy sources. The computer program TRNSYS was used to carry out the simulations.

In the first part of the work, an analysis of the energy renovation of the building envelope was carried out, which included the calculation of the annual energy consumption for heating and cooling for different insulation thicknesses of exterior walls and for different glazing characteristics. The optimal solution is determined on the basis of the minimum total costs consisting of investment costs and operating costs for the considered period of 20 years. The insulation of the external walls with 5 cm thick mineral wool was chosen as the optimal measure which achieved a condition that meets the currently valid regulations.

In the second part, the analysis of the chosen concept of the thermo-technical system was carried out. A new technical system is planned, which includes mechanical ventilation with heat recovery, an air-to-air heat pump, solar thermal collectors and photovoltaic panels. Simulations of the produced energy for heating and cooling and the electricity consumption were carried out, and the optimal parameters were determined based on the calculated specific consumption of primary energy and investment and operating costs.

With the energy renovation of the house and the implementation of an energy-efficient thermo-technical system with the use of renewable energy sources, nearly zero energy consumption was achieved. Also, it is evident from the results that when applying energy-efficient systems, the investment return period is long.

Keywords: TRNSYS, numerical simulations, heating, cooling, ventilation, preparation of domestic hot water, heat pump, solar system, renewable energy sources, primary energy

13. POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Pod na tlu	3
Tablica 2.2. Međukatna konstrukcija	4
Tablica 2.3. Kosi krov	4
Tablica 2.4. Strop prema negrijanom tavanu.....	4
Tablica 2.5. Vanjski zid	4
Tablica 2.6. Vanjski zid prema tlu	5
Tablica 2.7. Koeficijenti apsorpcije zračenja i prijelaza topline	5
Tablica 2.8. Sezona grijanja/hlađenja.....	7
Tablica 4.1. Projektni učinci – postojeće stanje	11
Tablica 5.1. Koeficijenti prolaska topline za različite debljine izolacije.....	13
Tablica 5.2. Karakteristike različitih tipova ostakljenja	14
Tablica 5.3. Projektni učinci za različite debljine izolacije.....	16
Tablica 5.4. Projektni učinci za različite tipove prozora i vrata	16
Tablica 5.5. Vanjski zid – obnovljeno stanje	21
Tablica 5.6. Strop prema negrijanom tavanu – obnovljeno stanje	21
Tablica 5.7. Projektni učinci – obnovljeno stanje	24
Tablica 5.8. Tehničke karakteristike rekuperatora VAR 150/4 L [16].....	26
Tablica 5.9. Projektni učinci – obnovljeno stanje + rekuperacija	29
Tablica 6.1. Tehničke karakteristike vanjske jedinice [2]	33
Tablica 6.2. Tehničke karakteristike unutarnje jedinice [2]	33
Tablica 6.3. Potrebni protoci zraka po zonama	35
Tablica 6.4. Rezultati simulacije	37
Tablica 6.5. Ukupna godišnja proizvedena i utrošena energije	37
Tablica 6.6. Tehničke karakteristike solarnog kolektora [4]	44
Tablica 6.7. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – 1 kolektor	48
Tablica 6.8. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – 2 kolektora.....	48
Tablica 6.9. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – 3 kolektora.....	49
Tablica 6.10. Tehnički podaci fotonaponskog modula SV60-290 E [12]	52
Tablica 6.11. Odabir količine modula za ugradnju.....	53
Tablica 7.1. Potrošnja električne energije	56
Tablica 8.1. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V1	59
Tablica 8.2. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V2.....	59
Tablica 8.3. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V3.....	59

Tablica 8.4. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V4.....	60
Tablica 8.5. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V5.....	60
Tablica 8.6. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V6.....	61
Tablica 8.7. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V7.....	61
Tablica 8.8. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V8.....	62
Tablica 8.9. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V9.....	62
Tablica 8.10. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V10.....	63
Tablica 8.11. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V11.....	63
Tablica 8.12. Godišnje sume energija u sustavu pripreme PTV-a – V12.....	64
Tablica 8.13. Rezultati simulacije – S1.....	66
Tablica 8.14. Ukupna godišnja proizvedena i utrošena energije – S1.....	66
Tablica 8.15. Rezultati simulacije – S2.....	67
Tablica 8.16. Ukupna godišnja proizvedena i utrošena energije -S2.....	67
Tablica 8.17. Vrijednosti termostata prema dnevnom rasporedu.....	68
Tablica 8.18. Rezultati simulacije – S3.....	68
Tablica 8.19. Ukupna godišnja proizvedena i utrošena energije – S3.....	69
Tablica 8.20. Rezultati simulacije – S4.....	69
Tablica 8.21. Ukupna godišnja proizvedena i utrošena energije – S4.....	70

14. POPIS SLIKA

Slika 2.1 Model kuće - jugoistočno pročelje.....	2
Slika 2.2 Model kuće - sjeverozapadno pročelje.....	3
Slika 2.3. Korisničko sučelje - osnovni model.....	8
Slika 3.1. Potrošnja energije za grijanje i hlađenje po mjesecima	9
Slika 4.1. Satni učinci za grijanje i hlađenje u referentnoj godini	12
Slika 5.1. Godišnja potrošnja energije ovisno o debljini izolacije	14
Slika 5.2. Godišnja potrošnja energije ovisno o tipu ostakljenja	15
Slika 5.3. Ukupni troškovi grijanja za različite debljine izolacije – kotao.....	18
Slika 5.4. Ukupni troškovi grijanja za različite debljine izolacije – dizalica topline.....	19
Slika 5.5. Ukupni troškovi grijanja za različite tipove ostakljenja – kotao.....	20
Slika 5.6. Ukupni troškovi grijanja za različite tipove ostakljenja – dizalica topline.....	20
Slika 5.7. Potrošnja energije za grijanje i hlađenje po mjesecima – obnovljeno stanje.....	22
Slika 5.8. Satni učinci za grijanje i hlađenje – obnovljeno stanje.....	23
Slika 5.9. Usporedba potrošnje energije za grijanje – obnova i postojeće stanje.....	23
Slika 5.10. Usporedba potrošnje energije za hlađenje – obnova i postojeće stanje	24
Slika 5.11. Mehanička ventilacija s povratom topline [15].....	25
Slika 5.12. Potrošnja energije za grijanje i hlađenje po mjesecima – rekuperacija	26
Slika 5.13. Satni učinci za grijanje i hlađenje – ventilacija s povratom topline.....	27
Slika 5.14. Usporedba potrošnje energije za hlađenje – rekuperacija i postojeće stanje	28
Slika 5.15. Usporedba potrošnje energije za grijanje – rekuperacija i postojeće stanje.....	28
Slika 6.1. Koncept sustava grijanja i hlađenja dizalicom topline zrak-zrak [11].....	30
Slika 6.2. Dijelovi dizalice topline zrak-zrak (split izvedba) [9]	31
Slika 6.3. Ovisnost faktora grijanja i hlađenja o temperaturi vanjskog zraka.....	34
Slika 6.4. Model dizalice topline zrak-zrak.....	35
Slika 6.5. Sustav grijanja i hlađenja dizalicom topline zrak-zrak u simulacijskom sučelju	36
Slika 6.6. Tehničke karakteristike akumulacijskog spremnika TB 300 [1].....	41
Slika 6.7. Dnevni profil potrošnje PTV-a (kg)	42
Slika 6.8. Shema solarnog sustava pripreme PTV-a.....	42
Slika 6.9. Dijelovi ravnog pločastog kolektora [10]	43
Slika 6.10. Raspodjela energije po mjesecima	45
Slika 6.11. Solarni toplinski sustav za pripremu PTV-a.....	46
Slika 6.12. Bilanca energije – 1 kolektor	46
Slika 6.13. Bilanca energije – 2 kolektora.....	47

Slika 6.14. Bilanca energije – 3 kolektora.....	47
Slika 6.15. Raspodjela temperatura – 1 kolektor	49
Slika 6.16. Raspodjela temperatura – 2 kolektora.....	50
Slika 6.17. Raspodjela temperatura – 3 kolektora.....	50
Slika 6.18. Fotonaponski modul Solvis [12].....	51
Slika 6.19. Mehanički podaci fotonaponskog modula [12]	53
Slika 6.20. Simulacija fotonaponskog sustava	54
Slika 8.1. Godišnji troškovi za različite varijante sustava PTV-a za promatrani period	64
Slika 8.2. Specifična potrošnja primarne energije i ukupni troškovi – varijante sustava PTV	65
Slika 8.3. Potrošnja primarne energije i godišnji troškovi za sustav dizalice topline	Pogreška!
Knjižna oznaka nije definirana.	