

Grijanje i hlađenje obiteljske kuće nulte emisije

Simić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:301687>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-31**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Simić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo, dipl. ing.

Student:

Luka Simić

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Vladimiru Soldi na strpljenju i uloženom vremenu te pomoći koju mi je pružio prilikom samog studija i izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se i svim prijateljima i kolegama koji su me pratili kroz ovaj studij i učinili ga bogatijim.

Na kraju, želim izraziti neizmjernu zahvalnost svojoj obitelji, posebno sestri Ani, majci Davorki i ocu Borisu, na bezuvjetnoj podršci kroz moje akademske uspone i padove. Njihova ljubav, strpljenje i vjera u mene imali su velik značaj na mom putu te su mi omogućili uspješno i sretno studiranje.

Luka Simić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Simić** JMBAG: 0035214637

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Grijanje i hlađenje obiteljske kuće nulte emisije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Heating and cooling of a zero-emission family house**

Opis zadatka:

Novi prijedlog Europske direktive o energetske svojstvima zgrada (EPBD direktiva) uvodi cijeli niz novosti, s glavnim ciljem postizanja nulte emisije u sektoru zgradarstva do 2050. godine. Prema navedenom prijedlogu direktive, sve nove zgrade će morati biti zgrade nulte emisije od 1. siječnja 2030. Zgrade nulte emisije su zgrade koje imaju visoka energetska svojstva, kod kojih se vrlo mala potrebna energija mora namiriti iz obnovljivih izvora energije.

U radu je potrebno proračunati dizalicu topline zrak-voda za obiteljsku kuću nulte emisije na području grada Zadra, korisne površine 445 m².

Rad treba sadržavati:

1. Izračun toplinskog i rashladnog opterećenja kuće (HRN EN 12831, VDI 2078).
2. Izračun godišnje potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje (HRN EN 13790).
3. Izračun primarne energije.
4. Proračun i dimenzioniranje komponenti dizalice topline, cirkulacijskih pumpi, pomoćne armature.
5. Odabir fotonaponske elektrane za samoopskrbu električnom energijom.
6. Hidrauličku shemu spajanja sustava.
7. Dispozicijski crtež dizalice topline.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

28. rujna 2023.

30. studenoga 2023.

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.  Soldo

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc.  Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD	1
2. PRORAČUN FIZIKE ZGRADE	3
2.1. Osnovne značajke zgrade	3
2.2. Građevinski elementi	6
3. PRORAČUN TOPLINSKOG OPTEREĆENJA OBITELJSKE KUĆE PREMA NORMI HRN EN 12831	10
3.1. Pregled proračuna toplinskog opterećenja prema HRN EN 12831	10
3.1.1. Projektni transmisijski gubici prostorije	11
3.1.1.1. Transmisijski gubici prema vanjskom okolišu	11
3.1.1.2. Transmisijski gubici kroz negrijane prostore	12
3.1.1.3. Transmisijski gubici prema tlu	12
3.1.1.4. Transmisijski gubici prema susjednim prostorijama različitih temperatura	13
3.1.2. Projektni ventilacijski gubici	13
3.1.3. Projektni toplinski gubici uslijed prekida grijanja	14
3.2. Rezultati proračuna toplinskog opterećenja obiteljske kuće prema HRN EN 12831	15
3.2.1. Projektni toplinski gubici Spavaće sobe I	17
4. PRORAČUN RASHLADNOG OPTEREĆENJA OBITELJSKE KUĆE PREMA NORMI VDI 2078	18
4.1. Pregled proračuna rashladnog opterećenja prema VDI 2078	18
4.1.1. Unutarnji projektni toplinski dobici	18
4.1.2. Vanjski projektni toplinski dobici	19
4.2. Rezultati proračuna rashladnog opterećenja obiteljske kuće prema VDI 2078	21
5. PRORAČUN GODIŠNJE POTREBNE TOPLINSKE ENERGIJE ZA GRIJANJE I HLADENJE PREMA NORMI HRN EN 13790	23
5.1. Pregled proračuna potrebne toplinske energije za grijanje prema HRN EN 13790	23
5.1.1. Izmijenjena toplina transmisijom	24
5.1.1.1. Izmjena topline prema vanjskom okolišu	24

5.1.1.2.	Izmjena topline kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu.....	25
5.1.1.3.	Izmjena topline između susjednih zona.....	25
5.1.1.4.	Izmjena topline prema tlu	25
5.1.2.	Potrebna toplinska energija za ventilaciju.....	26
5.1.2.1.	Izmjena topline uslijed infiltracije vanjskog zraka	27
5.1.2.2.	Izmjena topline uslijed prozračivanja	28
5.1.3.	Ukupni toplinski dobici.....	29
5.1.3.1.	Unutarnji toplinski dobici.....	29
5.1.3.2.	Toplinski dobici od Sunčeva zračenja.....	29
5.1.3.3.	Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje	30
5.2.	Pregled proračuna potrebne toplinske energije za hlađenje prema HRN EN 13790..	31
5.2.1.	Ukupni toplinski dobici.....	31
5.2.2.	Izmijenjena toplina proračunske zone.....	31
5.2.2.1.	Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje	32
5.3.	Rezultati proračuna potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje prema HRN EN 13790	32
6.	PRORAČUN PRIMARNE ENERGIJE.....	36
6.1.	Odabir fotonaponske elektrane.....	38
7.	DIMENZIONIRANJE DIZALICE TOPLINE.....	40
7.1.	Proračun procesa dizalice topline zrak – voda u režimu grijanja.....	40
7.2.	Proračun procesa dizalice topline zrak – voda u režimu hlađenja.....	44
7.3.	Proračun pločastog izmjenjivača topline	47
7.3.1.	Geometrijske karakteristike pločastih izmjenjivača topline.....	47
7.3.2.	Odabir pločastog izmjenjivača topline.....	49
7.3.3.	Postupak proračuna pločastog izmjenjivača topline	50
7.4.	Proračun pločastog rekuperatora topline za pripremu PTV-a.....	54
7.5.	Proračun cjevovoda	58
7.5.1.	Uisni vod.....	58
7.5.2.	Tlačni vod.....	58
7.5.3.	Kapljevinski vod.....	59
7.5.4.	Vod polaza i povrata rashladne vode	59
7.6.	Proračun pada tlaka	61
7.6.1.	Pad tlaka u cjevovodu	61
7.6.2.	Proračun pada tlaka na isparivaču na strani vode	63
7.6.3.	Potrebna snaga pumpe.....	64
8.	ODABIR OSNOVNIH KOMPONENTI DIZALICE TOPLINE.....	65
9.	ZAKLJUČAK.....	69
	LITERATURA.....	70
	PRILOZI	72

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer „zgrade približno nulte energije“	2
Slika 2. Tlocrtni prikaz drugog i trećeg kata obiteljske kuće	3
Slika 3. Tlocrtni prikaz suterena i prvog kata obiteljske kuće	4
Slika 4. Krivulje rashladnog opterećenja najznačajnijih prostorija.....	22
Slika 5. 24-satna krivulja rashladnog opterećenja obiteljske kuće.....	22
Slika 6. Potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje	35
Slika 7. Zahtjevi Tehničkog propisa za nove zgrade i zgrade gotovo nulte energije.....	36
Slika 8. Izvadak iz energetske certifikata obiteljske kuće	37
Slika 9. Godišnja proizvodnja električne energije fotonaponskom elektranom	39
Slika 10. Shema rada dizalice topline u režimu grijanja	42
Slika 11. Ogrjevni proces dizalice topline u T – s dijagramu.....	43
Slika 12. Ogrjevni proces dizalice topline u log p – h dijagramu	43
Slika 13. Shema rada dizalice topline u režimu hlađenja	45
Slika 14. Rashladni proces dizalice topline u T – s dijagramu	46
Slika 15. Rashladni proces dizalice topline u log p – h dijagramu	46
Slika 16. Geometrijske karakteristike Chevron ploče	47
Slika 17. ALFA LAVAL AC40 pločasti izmjenjivač topline.....	65
Slika 18. CAREL elektronički ekspanzijski ventil.....	66
Slika 19. Frigo Plus kondenzacijska jedinica	67
Slika 20. Danfoss spiralni kompresor.....	67
Slika 21. Radne točke odabranog kompresora.....	68

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled prostorija i njihovih površina obiteljske kuće	5
Tablica 2. Unutarnji i vanjski plošni otpori prelaska topline.....	7
Tablica 3. Koeficijent prolaza topline vanjskog zida od opeke	7
Tablica 4. Koeficijent prolaza topline podnih konstrukcija.....	8
Tablica 5. Koeficijent prolaza topline kosog krova na drvenoj konstrukciji.....	8
Tablica 6. Koeficijenti prolaza topline građevnih elemenata	9
Tablica 7. Projektne temperature	15
Tablica 8. Rezultati proračuna toplinskog opterećenja obiteljske kuće	16
Tablica 9. Toplinski dobici prostorija u tijekom kritičnog dijela dana	21
Tablica 10. Proračunske vrijednosti n_{50}	28
Tablica 11. Vrijednosti faktora zaštićenosti zgrade	28
Tablica 12. Dimenzijske karakteristike obiteljske kuće	32
Tablica 13. Koeficijenti izmjene topline za izračun potrebne topline za grijanje $Q_{H,nd}$	33
Tablica 14. Potrebna toplinska energija za grijanje $Q_{H,nd}$	33
Tablica 15. Koeficijenti izmjene topline za izračun potrebne topline za hlađenje $Q_{C,nd}$	34
Tablica 16. Potrebna toplinska energija za hlađenje $Q_{C,nd}$	34
Tablica 17. Ulazni podaci ogrjevnog procesa dizalice topline	40
Tablica 18. Vrijednosti radne tvari R410A u određenim točkama ogrjevnog procesa	41
Tablica 19. Ulazni podaci rashladnog procesa dizalice topline	44
Tablica 20. Vrijednosti dizalice topline u određenim točkama procesa.....	44
Tablica 21. Tehnički podaci Alfa Laval AC40 pločastog izmjenjivača topline	49
Tablica 22. Pomoćne veličine Alfa Laval AC40 pločastog izmjenjivača	49
Tablica 23. Svojstva vode za proračun isparivača	51
Tablica 24. Svojstva radne tvari R410A za proračun isparivača	51
Tablica 25. Tehnički podaci Alfa Laval AC40 pločastog izmjenjivača topline	54
Tablica 26. Pomoćne veličine Alfa Laval AC40 pločastog izmjenjivača	55
Tablica 27. Svojstva potrošne tople vode za proračun rekuperatora topline	55
Tablica 28. Svojstva radne tvari R410A za proračun rekuperatora topline.....	55
Tablica 29. Dimenzije cjevovoda.....	60
Tablica 30. Proračun pada tlaka za dnevni boravak.....	62
Tablica 31. Proračun pada tlaka za konobu.....	63
Tablica 32. Specifikacije isparivača Alfa Laval AC40	65
Tablica 33. Specifikacije rekuperatora topline Alfa Laval AC40.....	66

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

23 – HSS – 001 Hidraulička shema spajanja sustava – režim hlađenja
Dispozicijski crtež dizalice topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
U_i	[W/m ² K]	koeficijent prolaza topline građevnog elementa
$R_{s,u}$	[m ² K/W]	unutarnji plošni otpor prelaska topline
$R_{s,v}$	[m ² K/W]	vanjski plošni otpor prelaska topline
δ_i	[m]	debljina pojedinog sloja građevnog elementa
λ_i	[W/mK]	projektna vrijednost toplinske vodljivosti sloja građevnog elementa
Φ_i	[W]	projektni toplinski gubici prostorije
$\Phi_{T,i}$	[W]	projektni transmisivski gubici prostorije
$\Phi_{V,i}$	[W]	projektni ventilacijski gubici prostorije
$\Phi_{RH,i}$	[W]	projektni toplinski gubici uslijed prekida grijanja
Φ	[W]	projektni toplinski gubici zgrade
$H_{T,ie}$	[W/K]	koeficijent transmisivskog gubitka od grijanog prostora prema vanjskom okolišu
$H_{T,iue}$	[W/K]	koeficijent transmisivskog gubitka od grijanog prostora kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu
$H_{T,ig}$	[W/K]	koeficijent transmisivskog gubitka od grijanog prostora prema tlu
$H_{T,ij}$	[W/K]	koeficijent transmisivskog gubitka od grijanog prostora prema susjednom grijanom prostoru različite temperature
$\vartheta_{int,i}$	[°C]	unutarnja projektna temperatura grijanog prostora
ϑ_e	[°C]	vanjska projektna temperatura
A_k	[m ²]	površina plohe „k“ kroz koju prolazi toplina
U_k	[W/m ² K]	koeficijent prolaza topline građevnog elementa
ΔU_{TM}	[W/m ² K]	povećanje koeficijenta prolaza topline zbog utjecaja toplinskih mostova
e_k	[-]	korekcijski faktor izloženosti određen na nacionalnoj razini
b_u	[-]	faktor smanjenja temperaturne razlike koji uzima u obzir temperaturu negrijanog prostora i vanjsku projektnu temperaturu
f_{g1}	[-]	korekcijski faktor za utjecaj godišnje oscilacije vanjske temperature
f_{g2}	[-]	faktor smanjenja temperaturne razlike
G_W	[-]	korekcijski faktor utjecaja podzemnih voda
f_{ij}	[-]	faktor smanjenja temperaturne razlike koji uzima u obzir razliku temperature susjednog prostora i vanjske projektne temperature
$H_{V,i}$	[W/K]	koeficijent ventilacijskih toplinskih gubitaka
\dot{V}_i	[m ³ /h]	protok zraka u grijani prostor
$V_{min,i}$	[m ³ /h]	minimalni higijenski protok zraka
n_{min}	[h ⁻¹]	minimalni broj izmjena zraka, određen na nacionalnoj razini
V_i	[m ³]	volumen prostorije izračunat prema unutarnjim dimenzijama

$V_{inf,i}$	[m ³ /h]	maksimalni protok zraka uslijed infiltracije kroz zazore
n_{50}	[h ⁻¹]	broj izmjena zraka u prostoriji pri razlici tlaka 50 Pa između prostorije i vanjskog okoliša
e_i	[-]	koeficijent zaštićenosti zgrade koji uzima u obzir utjecaj vjetrova i broj otvora prema okolišu
ε_i	[-]	korekcijski faktor koji uzima u obzir odnos tlakova s povećanjem visine iznad tla
A_i	[m ²]	površina poda grijanog prostora s polovicom debljine zidova
f_{RH}	[W/m ²]	korekcijski faktor ovisan o vremenu zagrijavanja i pretpostavljenom padu temperature za vrijeme prekida grijanja
\dot{Q}_I	[W]	ukupni projektni toplinski dobici
\dot{Q}_P	[W]	toplinski dobici od osoba unutar prostorije
\dot{Q}_E	[W]	toplinski dobici rasvjete
\dot{Q}_M	[W]	toplinski dobici od uređaja u prostoriji
\dot{Q}_R	[W]	toplinski dobici od susjednih prostorija različite temperature
n	[-]	broj osoba unutar prostorije
q_p	[W]	specifični toplinski dobitak osobe
S_i	[-]	koeficijent toplinskog opterećenja
P_E	[W]	instalirana snaga rasvjete
μ_B	[-]	faktor opterećenja rasvjete
l	[-]	faktor istovremenosti
P	[W]	snaga uređaja
μ_a	[-]	faktor opterećenja uređaja
η	[-]	učinkovitost uređaja
k	[W/m ² K]	koeficijent prolaza topline
A	[m ²]	površina plohe koja razdvaja prostorije
$\Delta\vartheta$	[°C]	temperaturna razlika između prostorija
\dot{Q}_A	[W]	projektni vanjski toplinski dobici
\dot{Q}_W	[W]	toplinski dobici transmisijom kroz vanjske zidove i krov
\dot{Q}_T	[W]	toplinski dobici transmisijom kroz ostakljene površine
\dot{Q}_S	[W]	toplinski dobici zračenjem kroz ostakljene površine
U_T	[W/m ² K]	koeficijent prolaza topline ostakljenja
A_T	[m ²]	površina ostakljenja
A_1	[m ²]	osunčana površina ostakljenja
A_S	[m ²]	ukupna površina ostakljenja
I_{max}	[W/m ²]	maksimalna vrijednost ukupnog Sunčevog zračenja
$I_{diff,max}$	[W/m ²]	maksimalna vrijednost difuznog Sunčevog zračenja
b	[-]	faktor propusnosti stakla
s_a	[-]	koeficijent toplinskog opterećenja
$Q_{H,nd}$	[kWh]	godišnja potrebna toplinska energija za grijanje
Q_{Tr}	[kWh]	izmijenjena toplinska energija transmisijom kroz proračunsku zonu

Q_{Ve}	[kWh]	toplinska energija potrebna za ventilaciju proračunske zone
$\eta_{H,gn}$	[-]	faktor iskorištenja toplinskih dobitaka
Q_{int}	[kWh]	unutarnji toplinski dobitci zgrade
Q_{sol}	[kWh]	toplinski dobitci od Sunčeva zračenja
H_{Tr}	[W/K]	koeficijent transmisijske izmjene topline proračunske zone
H_{Ve}	[W/K]	koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone
t	[h]	trajanje proračunskog razdoblja
b_A	[-]	faktor smanjenja temperaturne razlike koji se računa kao omjer razlike temperature prostorije i temperature susjednog prostora te razlike temperature prostorije i vanjske projektne temperature
Φ_m	[W]	toplinski tok izmjene topline s tlom za proračunski mjesec
H_g	[W/K]	stacionarni koeficijent transmisijske izmjene prema tlu
H_{pi}	[W/K]	unutarnji periodički koeficijent transmisijske izmjene topline
H_{pe}	[W/K]	vanjski periodički koeficijent transmisijske izmjene topline
$\overline{\vartheta}_{int}$	[°C]	srednja godišnja unutarnja temperatura
$\overline{\vartheta}_e$	[°C]	srednja godišnja vanjska temperatura
$Q_{Ve,inf}$	[kWh]	potrebna toplinska energija uslijed infiltracije vanjskog zraka
$Q_{Ve,wind}$	[kWh]	potrebna toplinska energija uslijed prozračivanja
$Q_{Ve,mech}$	[kWh]	potrebna toplinska energija u mehaničkom sustavu
$H_{Ve,inf}$	[W/K]	koeficijent izmjene topline uslijed infiltracije vanjskog zraka
$H_{Ve,wind}$	[W/K]	koeficijent izmjene topline uslijed prozračivanja
n_{inf}	[h ⁻¹]	broj izmjena zraka uslijed infiltracije
V	[m ³]	volumen zraka u zoni
ρ_a	[kg/m ³]	gustoća zraka
$c_{p,a}$	[J/kgK]	specifični toplinski kapacitet zraka
n_{wind}	[h ⁻¹]	broj izmjena zraka uslijed prozračivanja
q_{spec}	[W/m ²]	specifični unutarnji dobitak po jedinici površine
$Q_{sol,k}$	[kWh]	srednja dozračena energija Sunčevog zračenja kroz građevni dio u grijani prostor
$b_{tr,l}$	[-]	faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s toplinskim izvorom
$Q_{sol,u,l}$	[kWh]	srednja dozračena energija Sunčevog zračenja kroz građevni dio u susjedni negrijani prostor
y_H	[-]	parametar za izračun faktora iskorištenja
a_H	[-]	bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade
a_0	[-]	referentna vrijednost bezdimenzijskog parametra
$\tau_{H,0}$	[h]	referentna vremenska konstanta
τ	[h]	vremenska konstanta zgrade
C_m	[J/K]	efektivni toplinski kapacitet grijanog dijela zone
$Q_{C,nd}$	[kWh]	godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje
$\eta_{C,ls}$	[-]	faktor iskorištenja toplinskih dobitaka kod hlađenja

A_k	[m ²]	ploština korisne površine zgrade
A_f	[m ²]	bruto podna površina
h	[m]	prosječna visina etaže
V_e	[m ³]	obujam grijanog dijela zgrade
V	[m ³]	neto obujam grijanog zraka
A_0	[m ²]	oplošje grijanog dijela zgrade
f_0	[m ⁻¹]	faktor oblika zgrade
E_{del}	[kWh]	godišnja potrebna isporučena energija
E_{prim}	[kWh]	godišnja potrebna primarna energija
f_{el}	[-]	faktor primarne energije za električnu energiju
P_{FN}	[kW]	potrebna snaga fotonaponske elektrane
$E_{prosijek}$	[kWh/kW]	prosječna specifična godišnja proizvedena električna energija
A_{FN}	[m ²]	potrebna površina krova za fotonaponsku elektranu
ϑ_i	[°C]	temperatura isparavanja
p_i	[bar]	tlak isparavanja
$\Delta\vartheta_{preg.}$	[°C]	iznos pregrijavanja
ϑ_k	[°C]	temperatura kondenzacije
p_k	[bar]	tlak kondenzacije
$\Delta\vartheta_{pot.}$	[°C]	iznos pothlađivanja
Φ_k	[kW]	ogrjevni učinak kondenzatora
Φ_i	[kW]	rashladni učinak isparivača
η	[-]	stupanj izentropske kompresije
h	[kJ/kg]	specifična entalpija radne tvari
$q_{m,RT}$	[kg/s]	maseni protok radne tvari
P_k	[kW]	potrebna snaga kompresora
Φ_{DES}	[kW]	učinak međuizmjenjivača
$\varepsilon_{gr}(COP)$	[-]	faktor grijanja
$\varepsilon_{hl}(EER)$	[-]	faktor hlađenja
D_p	[m]	promjer priključka
L_p	[m]	efektivna visina ploče
L_v	[m]	vertikalna udaljenost priključaka
L_w	[m]	efektivna širina ploče
L_h	[m]	horizontalna udaljenost priključaka
β	[°]	Chevron kut nabora ploče
ϕ	[-]	faktor povećanja efektivne površine ploče uslijed nabora
A_1	[m ²]	efektivna površina izmjenjivača
A_{kanal}	[m ²]	poprečni presjek kanala
b	[m]	razmak između ploča izmjenjivača
D_h	[m]	hidraulički promjer
N_{pr}	[-]	broj kanala izmjenjivača

N_{uk}	[-]	ukupni broj ploča izmjenjivača
t	[m]	debljina ploče izmjenjivača
$\alpha_{RT,isp}$	[W/m ² K]	koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari
$\alpha_{RT,liq}$	[W/m ² K]	koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari za kapljevину
Bo	[-]	Boilingov broj
Re	[-]	Reynoldsov broj
Pr	[-]	Prandtlov broj
λ	[W/mK]	toplinska provodnost radnog medija
μ	[Pa s]	dinamička viskoznost radnog medija
q	[kW/m ²]	specifični toplinski tok
G	[kg/sm ²]	gustoća masenog toka
ρ_w	[kg/m ³]	gustoća vode
$c_{p,w}$	[kJ/kgK]	specifični toplinski kapacitet vode
$\Delta\theta_m$	[°C]	srednja logaritamska temperatura
Nu	[-]	Nusseltov broj
k_{isp}	[W/m ² K]	koeficijent prolaza topline isparivača
A_{potr}	[m ²]	potrebna površina izmjenjivača
A_{stvr}	[m ²]	stvarna površina izmjenjivača
q_V	[m ³ /s]	volumenski protok medija
d_u	[m]	unutarnji promjer cijevi voda
w	[m/s]	brzina strujanja medija
Δp_{tr}	[Pa]	linijski pad tlaka
λ	[-]	faktor trenja ovisan o vrsti strujanja
L	[m]	duljina cjevovoda
D_u	[m]	unutarnji promjer cjevovoda
ρ_w	[kg/m ³]	gustoća vode
Δp_{lok}	[Pa]	lokalni pad tlaka
ξ	[-]	koeficijent lokalnog otpora strujanja
Δp_i	[Pa]	pad tlaka u isparivaču
Δp_{kanal}	[Pa]	pad tlaka u kanalima
Δp_{ulaz}	[Pa]	pad tlaka na ulazu
K_p	[-]	faktor određen iz tablica ovisan o kutu nabora i Reynoldsovom broju
m	[-]	faktor određen iz tablica ovisan o kutu nabora i Reynoldsovom broju
Δp_{uk}	[Pa]	ukupni pad tlaka
Δp_{vod}	[Pa]	pad tlaka u cjevovoda
P_p	[W]	pad tlaka u kanalima
η_p	[-]	učinkovitost pumpe

SAŽETAK

Diplomski rad izrađen je na temu grijanja i hlađenja obiteljske kuće nulte emisije korisne površine 382 m² koja se nalazi na području Dalmacije. Na početku rada analizirana je fizika zgrade, proračunato je toplinsko i rashladno opterećenje obiteljske kuće prema normama HRN EN 12831 i VDI 2078 te izračunata godišnja potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje prema normi HRN EN 13790.

Standard nulte emisije obiteljske kuće, ostvaren je ugradnjom fotonaponskog sustava za proizvodnju električne energije te dizalice topline zrak – voda kao sustava za potrebe toplinske energije. U drugom dijelu rada dimenzionirana je dizalica topline. Dimenzioniranje dizalice topline uključuje određivanje i izračun procesa u režimima grijanja i hlađenja te prema izračunatim vrijednostima se proračunavaju izmjenjivači topline, cjevovod i cirkulacijska pumpa. Na kraju je izrađena shema spajanja termotehničkih sustava i izometrijski prikaz dispozicije elemenata dizalice topline pomoću CAD softverskih alata.

Ključne riječi: zgrada nulte emisije, dizalica topline zrak – voda, grijanje, hlađenje, dimenzioniranje sustava

SUMMARY

The master's thesis analyses heating and cooling of a zero-emission family house with a useful area of 382 m² located in the Dalmatia region. In the first part of the thesis the building physics is analysed, and the thermal and cooling loads of the family house are calculated according to the HRN EN 12831 and VDI 2078 standards. Additionally, the annual required thermal energy for heating and cooling is computed in accordance with the HRN EN 13790 standard.

The zero-emission standard for the family house is achieved through the installation of a photovoltaic system for electricity production and an air-to-water heat pump as a system for thermal energy needs. The second part of the thesis is focused on the heat pump sizing. The sizing process involves determining and calculating the processes in heating and cooling modes. Based on the calculated values, heat exchangers, pipelines, and circulation pump are calculated and sized. Finally, a scheme connecting the thermo-technical systems and an isometric representation of the disposition of heat pump elements are designed through CAD software tools.

Key words: zero emission building, air-to-water heat pump, heating, cooling, system sizing

1. UVOD

Ideja energetske učinkovitosti proizašla je iz povijesnih događaja prošlog stoljeća. Naftna kriza tijekom 1970-ih godina rezultirala je porastom cijena energenata, što je dovelo do novih ideja i razvoja inovacija u energetskom sektoru. Među tim idejama, već tada su se pojavile ideje o „energetski učinkovitim zgradama“ i „zgradama s vlastitim energetskim sustavom“. Razmišljanja su se nastavila u tom smjeru te dovela do razvoja koncepta „zgrade približno nulte energije“ (eng. *nearly Zero Energy Building – nZEB*) koji je prvi puta ušao u praksu 2010. godine kroz Direktivu 2010/31/EU Europskog parlamenta i vijeća o energetskoj učinkovitosti zgrada (eng. *Energy Performance of Buildings Directive – EPBD*) [1]. Prema Europskoj direktivi pojam „zgrade približno nulte energije“ odnosi se na zgradu koja ima vrlo visoka energetska svojstva. Nulta, odnosno vrlo niska količina potrebne energije treba se u značajnoj mjeri pokrivati iz obnovljivih izvora energije, odnosno s energijom proizvedenom iz obnovljivih izvora u neposrednoj blizini ili na samoj lokaciji zgrade. S ciljem da se postigne klimatski neutralna Europa, direktivom je propisano da od kraja 2020. godine sve nove zgrade moraju biti izgrađene po konceptu „zgrade gotovo nulte energije“ te je taj koncept postao ključno rješenje za borbu s klimatskim promjenama jer je procijenjeno da sektor zgradarstva u Europskoj uniji odnosi 40 % potrošene energije i odgovoran je za 36 % emisija stakleničkih plinova.

„Zgrade približno nulte energije“ projektirane su kao visoko učinkovite zgrade koje osiguravaju energetska sigurnost kroz implementaciju tehnologija na obnovljive izvore energije. Time se smanjuje korištenje fosilnih goriva i pridonosi očuvanju klime. Zbog kvalitetne izvedbe i korištenja energetski učinkovitih potrošača energije, potrošnja električne i toplinske energije je niska. Koriste se pametne tehnologije upravljanja i automatizacije tehničkim sustavima kako bi se potrošnja energije što kvalitetnije optimizirala. Za potrebe toplinske energije za grijanje i hlađenje najčešće se primjenjuju dizalice topline različitih izvedbi. Sunčeva energija iskorištava se za pripremu potrošne tople vode pomoću solarnih kolektora, a fotonaponskim panelima proizvodi se električna energija na lokaciji zgrade. Korištenjem ovih sustava potrošnja primarne energije je niska, a udio obnovljive energije zadovoljava postavljene zahtjeve. Za gradnju „zgrada približno nulte energije“ koriste se optimalni građevinski materijali. Ovojnica zgrade je termički izolirana, a ostakljene površine su izrađene od kvalitetnih materijala i optimalno orijentirane kako bi se iskoristili solarni dobici. Grafički prikaz primjera „zgrade približno nulte energije“ prikazan je na sljedećoj slici [2].



Slika 1. Primjer „zgrade približno nulte energije“

Krajem 2021. godine, Europska komisija predstavila je reviziju Direktive o energetske učinkovitosti zgrada. Revizija nadograđuje postojeći regulatorni okvir i stavlja imperativ na ispunjavanjem hitnih potreba na području energetike. Njome se utvrđuje plan kojim Europa do 2050. godine može ostvariti potpuno dekarbonizirani fond zgrada. Predložene mjere će ubrzati proces obnove zgrada, modernizirati sustave u zgradarstvu i stvoriti otporniji i pristupačniji fond zgrada [3].

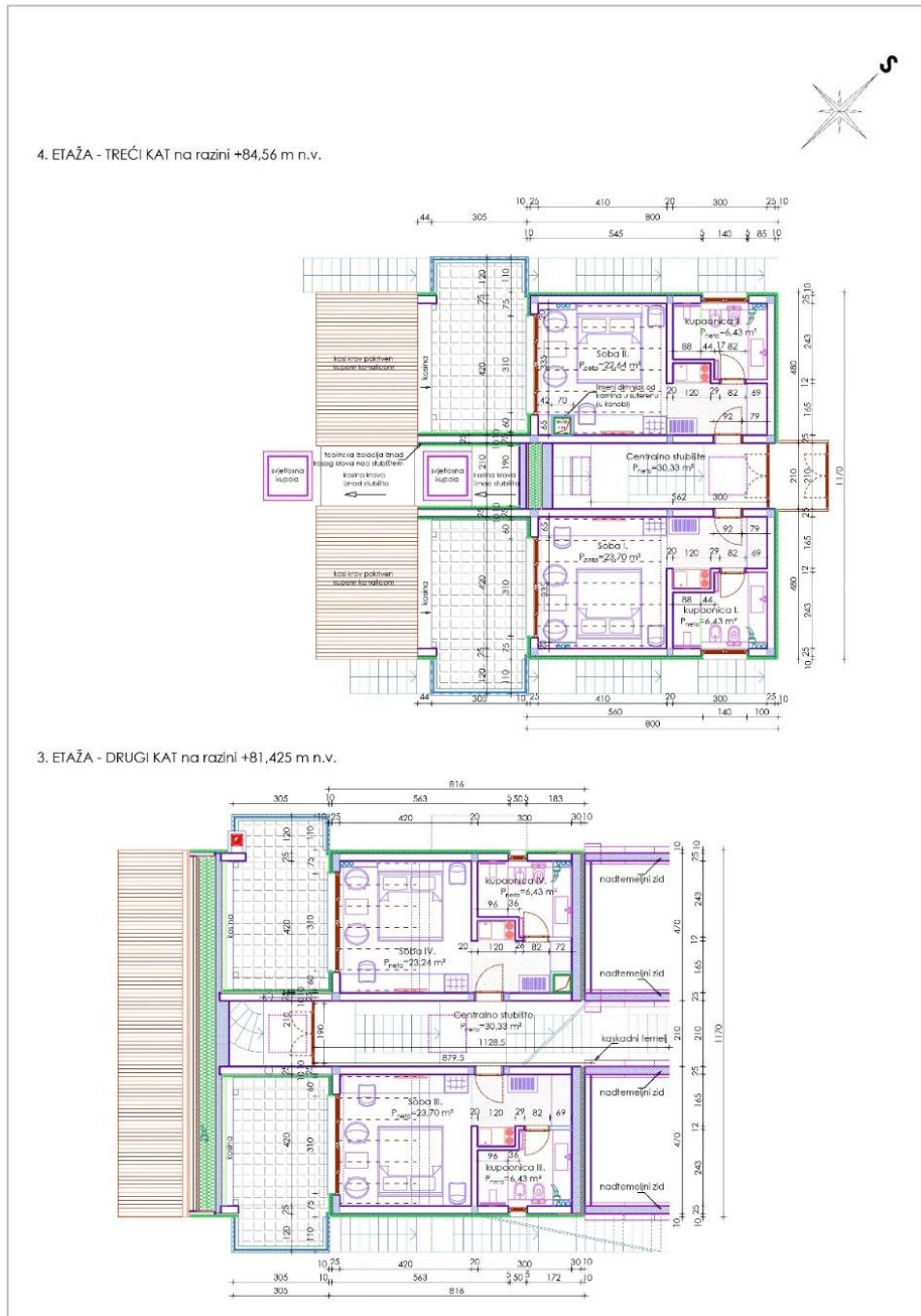
Revizijom je uveden novi pojam „zgrade nulte emisije“ kao zgrade s izrazito visokim energetske svojstvima, gdje se mala količina potrebne energije u potpunosti dobiva iz obnovljivih izvora energije. Energija se proizvodi na lokaciji same zgrade ili unutar četvrti, na razini energetske zajednice također iz obnovljivih izvora ili otpadne topline. „Zgrade nulte emisije“ vizija su sektora zgradarstva za 2050. godinu za postizanje klimatske neutralnosti. Revizija direktive zadržava pojam „zgrade približno nulte energije“ kao temelj za razvoj „zgrade nulte emisije“ te definira nove vremenske okvire. Navodi se da od 2030. godine sve nove zgrade moraju biti „zgrade s nultim emisijama“, a do 2050. godine sve se zgrade trebaju obnoviti do standarda „zgrade nulte emisije“ [4].

Kroz ovaj rad proveden je proračun tehničkih i termotehničkih sustava na primjeru visoko učinkovite i optimalno projektirane obiteljske kuće s ciljem da analizirana obiteljska kuća postigne standard „zgrade nulte emisije“.

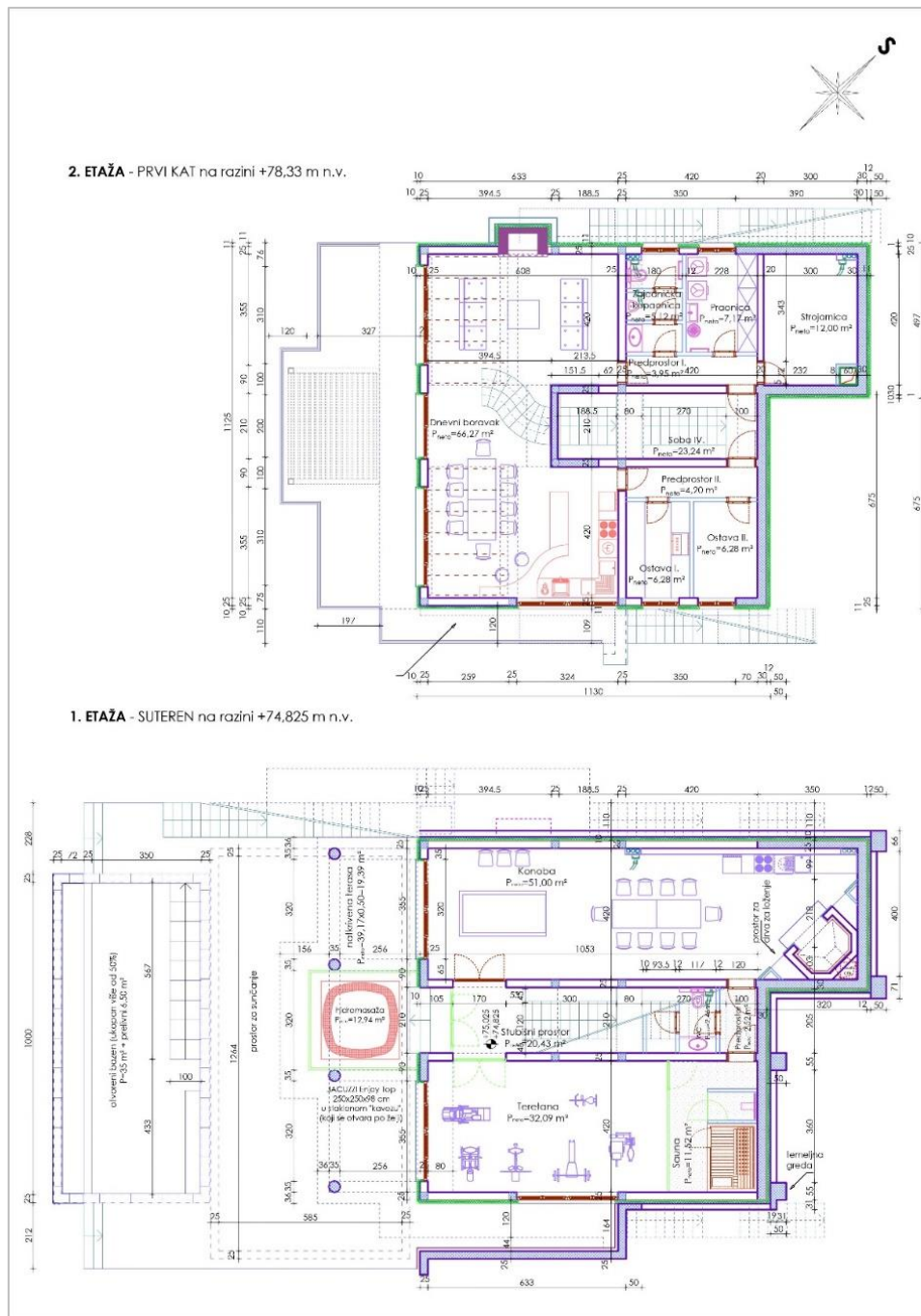
2. PRORAČUN FIZIKE ZGRADE

2.1. Osnovne značajke zgrade

Odabrani objekt za analizu je obiteljska kuća koja zadovoljava uvjete zgrade nulte emisije, a nalazi se u naselju Starigrad Paklenica, u Zadarskoj županiji. Obiteljska kuća projektirana je kaskadno u četiri osnovne etaže u smjeru sjeveroistok – jugozapad. Tlocrtni prikazi etaža nalaze se na Slici 2. i Slici 3.



Slika 2. Tlocrtni prikaz drugog i trećeg kata obiteljske kuće



Slika 3. Tlocrtni prikaz suterega i prvog kata obiteljske kuće

Na gornje dvije razine nalaze se četiri sobe s pripadajućim kupaonicama. Treća razina sastoji se od dnevnog boravka i kuhinje s pomoćnim prostorijama. Tri gornje etaže povezane su uzdužnim centralnim hodnikom. Najniža, četvrta etaža, se pruža ispod dnevnog boravka i na njoj se nalaze rekreativno-zabavni sadržaji.

Ukupna neto podna površina objekta iznosi $455,51 \text{ m}^2$, a od toga je $381,62 \text{ m}^2$ korisna površina kondicioniranog, odnosno grijanog i hlađenog dijela zgrade. Korisne površine pojedinih grijanih i hlađenih prostorija prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Pregled prostorija i njihovih površina obiteljske kuće

Redni broj	Naziv prostorije	Etaža prostorije	Korisna površina [m ²]
1.	Centralno stubište (hodnik)	-	30,33
2.	Spavaća soba I	treći kat	23,70
3.	Kupaonica I	treći kat	6,43
4.	Spavaća soba II	treći kat	22,64
5.	Kupaonica II	treći kat	6,43
6.	Spavaća soba III	drugi kat	23,70
7.	Kupaonica III	drugi kat	6,43
8.	Spavaća soba IV	drugi kat	23,24
9.	Kupaonica IV	drugi kat	6,43
10.	Dnevni boravak	prvi kat	67,27
11.	Predprostor I	prvi kat	3,95
12.	Predprostor II	prvi kat	4,20
13.	Ostava I	prvi kat	6,28
14.	Ostava II	prvi kat	6,28
15.	Zajednička kupaonica	prvi kat	5,12
16.	Praonica	prvi kat	7,17
17.	Strojarnica	prvi kat	12,00
18.	Stubišni prostor	suteren	20,43
19.	Konoba	suteren	51,00
20.	Teretana	suteren	32,09
21.	Sauna	suteren	11,52
22.	Predprostor III	suteren	2,52
23.	Zahod	suteren	2,46
Ukupna korisna površina grijanog dijela zgrade			381,62

2.2. Građevinski elementi

Obiteljska kuća projektirana je s ciljem da se postigne visok standard energetske učinkovitosti. Svaki građevni element sastoji se od pažljivo biranih slojeva kako bi se osigurala visoka konstrukcijska funkcionalnost i ostvarila maksimalna energetska učinkovitost. Nosivi zidovi izvedeni su od blokova opeke s poboljšanim toplinskim i protuseizmičkim karakteristikama, a na ovojnici objekta se nalazi sloj termoizolacijske fasade od mineralne vune. Svi elementi građevinske stolarije bit će izrađeni kao drveno-aluminijska kombinacija s trostrukim slojem stakla. Krovne kupole izrađene su od metalnog okvira s dvostrukim slojem stakla.

Koeficijenti prolaza topline za svaki građevni element izračunati su prema projektnim vrijednostima toplinske vodljivosti iz članka 47. Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (u daljnjem tekstu: Tehnički propis) [5]. Za neke građevne materijale projektne vrijednosti toplinske vodljivosti nisu definirane pa se određuju prema tehničkoj specifikaciji proizvođača.

Koeficijenti prolaza topline svakog građevnog elementa računaju se prema sljedećoj jednadžbi:

$$U_i = \frac{1}{R_{s,u} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{s,v}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (1)$$

Gdje je:

$R_{s,u}$ – unutarnji plošni otpor prelaska topline [$\text{m}^2\text{K/W}$]

$R_{s,v}$ – vanjski plošni otpor prelaska topline [$\text{m}^2\text{K/W}$]

δ_i – debljina pojedinog sloja građevnog elementa [m]

λ_i – projektna vrijednost toplinske vodljivosti sloja građevnog elementa [W/mK]

Unutarnji i vanjski plošni otpori prelaska topline ovise o smjeru toplinskog toka i građevnog elementa pa su prema tome određene vrijednosti prikazane u Tablici 2.

Tablica 2. Unutarnji i vanjski plošni otpori prelaska topline

Smjer toplinskog toka	Građevni element	$R_{s,u}$ [m ² K/W]	$R_{s,v}$ [m ² K/W]
Prema gore	Ravni i kosi krovovi	0,10	0,04
Vodoravan	Vanjski zidovi	0,13	0,04
	Unutarnji zidovi	0,13	0,13
Prema dolje	Podovi na tlu	0,17	0,00
	Stropovi između prostorija	0,17	0,10

Tablica 3. sadrži sve podatke slojeva vanjskog zida od opeke kojim je građena obiteljska kuća. U Tablici 4. prikazani su podaci za podnu konstrukciju svih etaža obiteljske kuće, dok je u Tablici 5. prikazan sastav kosog krova na drvenoj konstrukciji koji prevladava kao krovna površina u obiteljskoj kući.

Izraz $\frac{\delta_i}{\lambda_i}$ iz jednadžbe (1) označava toplinski otpor određenog sloja građevnog elementa te će tako izračunate vrijednosti biti prikazane u tablici.

Tablica 3. Koeficijent prolaza topline vanjskog zida od opeke

Sloj građevnog elementa	Debljina sloja [m]	koeficijent toplinske provodljivosti [W/mK]	Toplinski otpor sloja [m ² K/W]
vapneno-cementna žbuka	0,02	1	0,020
Porotherm 25 PROFI opeka	0,25	0,141	1,773
polimerna žbuka	0,002	0,7	0,003
tvrd mineralna vuna	0,1	0,035	2,857
polimerna žbuka	0,005	0,7	0,007
žbuka na bazi akrilata	0,003	0,9	0,003
koeficijent prolaza topline građevinskog elementa [W/m²K]			0,21

Tablica 4. Koeficijent prolaza topline podnih konstrukcija

Sloj građevnog elementa	Debljina sloja [m]	koeficijent toplinske provodljivosti [W/mK]	Toplinski otpor sloja [m ² K/W]
keramičke pločice	0,015	1,3	0,012
cementni estrih	0,075	1,6	0,047
PE folija	0,00025	0,19	0,001
ekstrudirana polistirenska pjena XPS	0,1	0,036	2,778
stiropor EPS	0,02	0,042	0,476
armirani beton	0,16	2,6	0,062
geotekstil	0,003	0,04	0,075
polimerna hidroizolacijska traka na bazi PVC-P	0,0015	0,14	0,011
koeficijent prolaza topline građevinskog elementa [W/m²K]			0,28

Tablica 5. Koeficijent prolaza topline kosog krova na drvenoj konstrukciji

Sloj građevnog elementa	Debljina sloja [m]	koeficijent toplinske provodljivosti [W/mK]	Toplinski otpor sloja [m ² K/W]
krovni pokrov – glineni crijep	-	-	-
kišna brana – vodoodbojna folija	0,001	0,04	0,025
Ploče od usmjerenih vlakana OSB	0,02	0,13	0,154
tvrda mineralna vuna	0,2	0,035	5,714
PE folija	0,00025	0,19	0,001
Ploče od usmjerenih vlakana OSB	0,02	0,13	0,154
drvena krovna konstrukcija	-	-	-
koeficijent prolaza topline građevinskog elementa [W/m²K]			0,16

Svi građevni elementi zadovoljavaju zahtjeve iz članka 32. Tehničkog propisa o maksimalnim dopuštenim vrijednostima koeficijenta prolaza topline [5]. Koeficijenti prolaza topline svakog građevnog elementa prikazani su u Tablici 6.

Tablica 6. Koeficijenti prolaza topline građevnih elemenata

Naziv građevnog elementa	Oznaka	Koeficijent prolaza topline [W/m ² K]	U _{dop} [W/m ² K]
Vanjski nosivi zid od opeke	Z1	0,21	0,45
Ukopani nosivi zid od opeke	Z2	0,20	0,50
Vanjski kosi zid nagiba 67°	Z3	0,17	0,45
Podovi objekta na tlu	P1	0,28	0,50
Pod duž glavnog stubišta	P2	0,47	0,50
Prohodna terasa	T1	0,16	0,30
Krov iznad središnjeg stubišta	K1	0,16	0,30
Kosi krov na drvenoj konstrukciji	K2	0,16	0,30
Kosi krov na armirano betonskoj ploči	K3	0,16	0,30
Prozori i staklene stijene	O1	0,90	1,80
Krovne kupole	O2	1,70	2,50

3. PRORAČUN TOPLINSKOG OPTEREĆENJA OBITELJSKE KUĆE PREMA NORMI HRN EN 12831

Proračun toplinskog opterećenja obiteljske kuće rađen je u računalnom programu Excel prema normi HRN EN 12831 [6]. U nastavku je dan pregled norme te rezultati proračuna za analizirani objekt.

3.1. Pregled proračuna toplinskog opterećenja prema HRN EN 12831

Projektni toplinski gubici mogu se proračunavati za pojedinačne prostorije ili za odabranu zgradu, promatranu kao jednu cjelinu. Projektni toplinski gubici sastoje se od transmisijskih gubitaka topline i ventilacijskih gubitaka topline, a računaju se prema jednadžbama:

Za prostoriju:

$$\Phi_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} + \Phi_{RH,i} \quad [\text{W}] \quad (2)$$

Gdje je:

$\Phi_{T,i}$ – projektni transmisijski gubici prostorije [W]

$\Phi_{V,i}$ – projektni ventilacijski gubici prostorije [W]

$\Phi_{RH,i}$ – projektni toplinski gubici uslijed prekida grijanja [W]

Za zgradu:

$$\Phi = \sum \Phi_{T,i} + \sum \Phi_{V,i} + \sum \Phi_{RH,i} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Gdje je:

$\sum \Phi_{T,i}$ – suma projektnih transmisijskih gubitaka svih prostorija izuzet izmijenjene topline između prostorija zgrade [W]

$\sum \Phi_{V,i}$ – suma projektnih ventilacijskih gubitaka svih prostorija izuzet izmijenjene topline između prostorija zgrade [W]

$\sum \Phi_{RH,i}$ – suma projektnih toplinskih gubitaka svih prostorija uslijed prekida grijanja [W]

3.1.1. Projektni transmisijski gubici prostorije

Projektni transmisijski gubici računaju se prema sljedećoj jednadžbi:

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) * (\vartheta_{int,i} - \vartheta_e) \quad [W] \quad (4)$$

Gdje je:

$H_{T,ie}$ – koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema vanjskom okolišu [W/K]

$H_{T,iue}$ – koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu [W/K]

$H_{T,ig}$ – koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema tlu [W/K]

$H_{T,ij}$ – koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema susjednom grijanom prostoru različite temperature [W/K]

$\vartheta_{int,i}$ – unutarnja projektna temperatura grijanog prostora [°C]

ϑ_e – vanjska projektna temperatura [°C]

3.1.1.1. Transmisijski gubici prema vanjskom okolišu

$$H_{T,ie} = \sum_k A_k * (U_k + \Delta U_{TM}) * e_k \quad [W/K] \quad (5)$$

Gdje je:

A_k – površina plohe „k“ kroz koju prolazi toplina [m²]

U_k – koeficijent prolaza topline građevnog elementa [W/m²K]

ΔU_{TM} – povećanje koeficijenta prolaza topline zbog utjecaja toplinskih mostova [W/m²K]

e_k – korekcijski faktor izloženosti određen na nacionalnoj razini, ako nije određeno uzeti =1

Ukoliko su potencijalni toplinski mostovi na zgradi projektirani u skladu s katalogom dobrih rješenja toplinskih mostova iz članka 33. Tehničkog propisa, povećanje koeficijenta prolaza topline zbog utjecaja toplinskih mostova na svim građevnim elementima, osim kod otvora, iznosi $\Delta U_{TM} = 0,05$ W/m²K. Ako rješenje potencijalnog toplinskog mosta nije prema katalogu, onda se uzima povećanje od $\Delta U_{TM} = 0,10$ W/m²K [5].

3.1.1.2. Transmisijski gubici kroz negrijane prostore

$$H_{T,iue} = \sum_k A_k * (U_k + \Delta U_{TM}) * b_u \quad [\text{W/K}] \quad (6)$$

Gdje je:

A_k – površina plohe „k“ kroz koju prolazi toplina [m^2]

U_k – koeficijent prolaza topline građevnog elementa [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

ΔU_{TM} – povećanje koeficijenta prolaza topline zbog utjecaja toplinskih mostova [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

b_u – faktor smanjenja temperaturne razlike koji uzima u obzir temperaturu negrijanog prostora i vanjsku projektnu temperaturu, određuje se prema preporučenim vrijednostima prema vrsti prostorije

3.1.1.3. Transmisijski gubici prema tlu

$$H_{T,ig} = f_{g1} * f_{g2} * \left(\sum_k A_k * U_{equiv,k} \right) * G_W \quad [\text{W/K}] \quad (7)$$

Gdje je:

f_{g1} – korekcijski faktor za utjecaj godišnje oscilacije vanjske temperature, predloženo =1,45

f_{g2} – faktor smanjenja temperaturne razlike koji se računa kao omjer razlike temperature prostorije i godišnje srednje vanjske temperature te razlike temperature prostorije i vanjske projektne temperature

A_k – površina plohe „k“ kroz koju prolazi toplina [m^2]

U_k – ekvivalentni koeficijent prolaza određen prema tipologiji tla iz tablica prema normi [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

G_W – korekcijski faktor utjecaja podzemnih voda, ako nema podzemnih voda uzeti =1

3.1.1.4. Transmisijski gubici prema susjednim prostorijama različitih temperatura

$$H_{T,ij} = \sum_k f_{ij} * A_k * U_k \quad [\text{W/K}] \quad (8)$$

Gdje je:

f_{ij} – faktor smanjenja temperaturne razlike koji uzima u obzir razliku između temperature susjednog prostora i vanjske projektne temperature

A_k – površina plohe „k“ kroz koju prolazi toplina [m^2]

U_k – koeficijent prolaza topline građevnog elementa [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

3.1.2. Projektni ventilacijski gubici

Projektni ventilacijski gubici računaju se prema sljedećoj jednadžbi:

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} * (\vartheta_{\text{int},i} - \vartheta_e) \quad [\text{W}] \quad (9)$$

Gdje je:

$H_{V,i}$ – koeficijent ventilacijskih toplinskih gubitaka [W/K]

$$H_{V,i} = \dot{V}_i * 0,34 \quad [\text{W/K}] \quad (10)$$

\dot{V}_i – protok zraka u grijani prostor [m^3/h]

$\vartheta_{\text{int},i}$ – unutarnja projektna temperatura grijanog prostora [$^{\circ}\text{C}$]

ϑ_e – vanjska projektna temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

Koeficijent ventilacijskih gubitaka ovisi o protoku zraka u grijani prostor koji se određuje prema postojanju ventilacijskog sustava. Ukoliko ne postoji ventilacijski sustav, protok zraka se određuje na način da se uzme veća vrijednost između minimalnog higijenskog protoka zraka i maksimalnog protoka zraka uslijed infiltracije kroz zazor.

Minimalni higijenski protok računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$V_{\text{min},i} = n_{\text{min}} * V_i \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (11)$$

Gdje je:

n_{min} – minimalni broj izmjena zraka, određen na nacionalnoj razini [h^{-1}]

V_i – volumen prostorije izračunat prema unutarnjim dimenzijama [m^3]

Minimalni higijenski protok zraka ovisi o minimalnom broju izmjena zraka koji je određen člankom 27. Tehničkom propisa te on, za stambene zgrade, iznosi $0,5 \text{ h}^{-1}$. U određenim prostorijama vrijednost mora biti i veća zbog higijenskih uvjeta ili korištenja uređaja za grijanje ili kuhanje s otvorenim plamenom [5]

Maksimalnog protok zraka uslijed infiltracije kroz zazor računa se prema jednadžbi:

$$V_{\text{inf},i} = 2 * V_i * n_{50} * e_i * \varepsilon_i \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (12)$$

Gdje je:

V_i – volumen prostorije izračunat prema unutarnjim dimenzijama [m^3]

n_{50} – broj izmjena zraka u prostoriji pri razlici tlaka 50 Pa između prostorije i okoliša [h^{-1}]

e_i – koeficijent zaštićenosti zgrade koji uzima u obzir utjecaj vjetera i broj otvora prema okolišu

ε_i – korekcijski faktor koji uzima u obzir odnos tlakova sa povećanjem visine iznad tla

Broj izmjena zraka u prostoriji pri razlici tlaka 50 Pa, koeficijent zaštićenosti zgrade i korekcijski faktor visine određuju se prema iskustvenim podacima iz tablica, a ovise o tipu zgrade, njezinoj konstrukciji te njezinoj lokaciji.

3.1.3. *Projektni toplinski gubici uslijed prekida grijanja*

Prostorijama koje imaju prekid grijanja potrebna je dodatna toplina za zagrijavanje do unutarnje projektne temperature nakon što se ona snizi u periodu kada prekida rada, najčešće tokom noći. Dodatna toplina za zagrijavanje ovisi o toplinskim kapacitetima građevnih elemenata, vremenu zagrijavanja, temperaturnom padu i sustavu regulacije.

$$\Phi_{\text{RH},i} = A_i * f_{\text{RH}} \quad [\text{W}] \quad (13)$$

Gdje je:

A_i – površina poda grijanog prostora s polovicom debljine zidova [m^2]

f_{RH} – korekcijski faktor ovisan o vremenu zagrijavanja i pretpostavljenom padu temperature za vrijeme prekida grijanja [W/m^2]

3.2. Rezultati proračuna toplinskog opterećenja obiteljske kuće prema HRN EN 12831

Obiteljska kuća promatrana je kao jedinstvena cjelina pa shodno tome ne uzima se u obzir toplina izmijenjena između prostorija. Također, sve prostorije unutar obiteljske kuće grijane su na određenu projektnu unutarnju temperaturu. Zbog toga su iz proračuna izostavljeni koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora kroz negrijani prostor te koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema susjednom grijanom prostoru različite temperature. Projektne unutarnje temperature te projektne vanjske i srednja godišnja vanjska temperatura prikazane su u sljedećoj tablici [7].

Tablica 7. Projektne temperature

Unutarnja projektna temperatura za hodnike i pomoćne prostorije	16 °C
Unutarnja projektna temperatura za dnevni boravak, sobe i kuhinju	20 °C
Unutarnja projektna temperatura za kupaonice	24 °C
Vanjska projektna temperatura – grad Zadar	- 4,6 °C
Godišnja srednja vanjska temperatura – grad Zadar	15,5 °C

Svi toplinski mostovi izvedeni su u skladu s katalogom dobrih rješenja Tehničkog propisa pa se za povećanje koeficijenta prolaza topline na svim neprozirnim građevnim elementima uzima vrijednost $\Delta U_{TM} = 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Obiteljska kuća ne sadrži ventilacijski sustav pa se ventilacijski toplinski gubici shodno tome računaju prema normi. Minimalni broj izmjena zraka unutar prostorija uzet je kao $0,5 \text{ h}^{-1}$ osim za kupaonice, kuhinju i konobu gdje je zbog higijenskih razloga uzeta vrijednost $1,5 \text{ h}^{-1}$.

Projektne vrijednosti broja izmjena zraka u prostoriji pri razlici tlaka 50 Pa uzeta je za obiteljske kuće s visokim stupnjem zabrtvljenosti te iznosi 2 h^{-1} . Za koeficijent zaštićenosti za nezaklonjene objekte, kakva je i sama obiteljska kuća, uzima se vrijednost 0,03, dok se za korekcijski faktor za visinu grijanih prostorija manju od 10 m uzima vrijednost 1.

Obiteljska kuća ima noćni prekid rada grijanja pa je potrebno izračunati toplinske gubitke uslijed prekida grijanja. Obiteljska kuća je visoko učinkovita pa se pretpostavlja temperaturni pad od 1 °C . Korekcijski faktor zagrijavanja prema tome iznosi 6.

Proračun će biti prikazan na primjeru jedne prostorije kako bi se dobio uvid u sam način provođenja proračuna. Odabrana je prostorija Spavaća soba I. Rezultati za sve prostorije prikazani su tablično u Tablici 8.

Tablica 8. Rezultati proračuna toplinskog opterećenja obiteljske kuće

Naziv prostorije	$H_{T,ie}$ [W/K]	$H_{T,ig}$ [W/K]	$\Phi_{T,i}$ [W]	$H_{V,i}$ [W/K]	$\Phi_{V,i}$ [W/K]	$\Phi_{RH,i}$ [W/K]
Centralno stubište	16,38	0,18	341	13,64	281	200
Spavaća soba I	20,14	1,01	520	12,36	304	150
Kupaonica I	7,16	0,47	218	10,30	295	43
Spavaća soba II	20,14	1,01	520	12,36	304	148
Kupaonica II	6,93	0,47	212	10,30	295	43
Spavaća soba III	18,51	0,25	462	11,95	294	150
Kupaonica III	3,83	0,97	137	9,80	280	43
Spavaća soba IV	18,51	0,08	457	11,75	289	148
Kupaonica IV	3,83	0,58	126	9,80	280	43
Dnevni boravak	53,62	0,00	1393	112,30	2763	422
Ostava I	2,13	0,00	44	3,17	65	43
Ostava II	2,13	0,06	45	3,17	65	43
Zajednička kupaonica	2,12	0,00	61	9,74	279	39
Praonica	2,50	0,00	52	3,60	74	48
Strojarnica	0,00	0,19	4	6,36	131	84
Stubišni prostor	4,76	0,09	100	9,41	194	140
Konoba	9,23	6,71	392	93,26	2294	368
Teretana	18,99	1,85	513	17,30	426	204
Sauna	0,00	2,07	59	19,15	548	77
			Σ 5655		Σ 9460	2438

Ukupni projektni transmisijski gubici obiteljske kuće iznose 5,655 kW, dok ukupni projektni ventilacijski gubici iznose 9,460 kW. Ukupna dodatna potrebna toplina za zagrijavanje obiteljske kuće iznosi 2,438 kW. Izračunati ukupni toplinski gubici za obiteljsku kuću iznose 17,553 kW.

3.2.1. Projektni toplinski gubici Spavaće sobe I

Projektni transmisivski gubici Spavaće sobe I sastoje se od transmisivskih gubitaka prema vanjskom okolišu te od transmisivskih gubitaka prema tlu. Spavaću sobu I od okoliša odvajaju vanjski zidovi od opeke orijentirani na četiri različite strane svijeta, krov na drvenoj konstrukciji orijentiran prema jugozapadu te krov na armiranobetonskoj ploči orijentiran prema sjeveroistoku. Staklena stijena prema terasi nalazi se na jugozapadnoj strani.

$$H_{T,ie} = \sum_k A_k * (U_k + \Delta U_{TM}) * e_k$$

$$\begin{aligned} H_{T,ie} &= (4,90 * (0,21 + 0,05) * 1) + (15,13 * (0,21 + 0,05) * 1) \\ &+ (9,23 * (0,21 + 0,05) * 1) + (3,32 * (0,21 + 0,05) * 1) \\ &+ (19,34 * (0,16 + 0,05) * 1) + (5,76 * (0,16 + 0,05) * 1) \\ &+ (7,16 * 0,90 * 1) = 20,14 \text{ W/K} \end{aligned}$$

Ukupna površina Spavaće sobe I iznad tla manja je od ukupne površine sobe jer se dio sobe nalazi iznad niže etaže pa se taj dio ne uzima u obzir. Za izračun transmisivskih gubitaka prema tlu potrebno je odrediti faktor smanjenja temperaturne razlike f_{g2} .

$$f_{g2} = \frac{\vartheta_{int,i} - \vartheta_{m,e}}{\vartheta_{int,i} - \vartheta_e} = \frac{20 - 15,5}{20 - (-4,6)} = 0,183$$

$$H_{T,ig} = f_{g1} * f_{g2} * \left(\sum_k A_k * U_{equiv,k} \right) * G_W$$

$$H_{T,ig} = 1,45 * 0,183 * (22,34 * 0,17) * 1 = 1,01 \text{ W/K}$$

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,ig}) * (\vartheta_{int,i} - \vartheta_e) = (20,14 + 1,01) * (20 - (-4,6)) = 520 \text{ W}$$

Volumen Spavaće sobe I iznosi $71,75 \text{ m}^3$. Iznos protoka zraka je maksimalna vrijednost između minimalnog higijenskog protoka zraka i maksimalnog protoka zraka uslijed infiltracije.

$$V_{min,i} = n_{min} * V_i = 0,5 * 71,75 = 35,875 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{inf,i} = 2 * V_i * n_{50} * e_i * \varepsilon_i = 2 * 71,75 * 20 * 0,03 * 1 = 8,610 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_1 = \max(V_{min,i}; V_{inf,i}) = V_{min,i} = 35,875 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_{V,i} = \dot{V}_1 * 0,34 = 35,875 * 0,34 = 12,36 \text{ W/K}$$

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} * (\vartheta_{int,i} - \vartheta_e) = 12,357 * (20 - (-4,6)) = 304 \text{ W}$$

Toplinski gubici uslijed prekida rada grijanja potrebni za zagrijavanje iznose:

$$\Phi_{RH,i} = A_i * f_{RH} = 25,025 * 6 = 150 \text{ W}$$

4. PRORAČUN RASHLADNOG OPTEREĆENJA OBITELJSKE KUĆE PREMA NORMI VDI 2078

Proračun rashladnog opterećenja obiteljske kuće rađen je u računalnom programu IntegraCAD koji proračun provodi u skladu s normom VDI 2078. U nastavku je dan pregled norme kako bi se dao uvid u parametre koje računalni program uzima u obzir te rezultati proračuna za analizirani objekt [8].

4.1. Pregled proračuna rashladnog opterećenja prema VDI 2078

Rashladno opterećenje je toplina koja se mora odvoditi iz prostorije ili zgrade kako bi se održala konstantna tražena temperatura unutar prostorija. Može se izraziti kao zbroj unutarnjih toplinskih i vanjskih toplinskih dobitaka.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_I + \dot{Q}_A \quad [\text{W}] \quad (14)$$

Gdje je:

\dot{Q}_P – unutarnji projektni toplinski dobitci [W]

\dot{Q}_P – vanjski projektni toplinski dobitci [W]

4.1.1. Unutarnji projektni toplinski dobitci

Unutarnji projektni dobitci posljedica su odavanja latentne i osjetne topline od toplinskih izvora koji se nalaze unutar prostorija koji se hlade. Toplinski izvori su razni pa ih se podijelilo u nekoliko kategorija. Toplinski izvori su osobe koje borave unutar prostorije, rasvjeta te uređaji i oprema koja se koristi u prostoriji. Također se za toplinske unutarnje dobitke u prostorijama uzima i predana toplina od susjednih prostorija različite temperature. Kod proračuna zgrade kao cjeline ovi se toplinski dobitci izostavljaju iz proračuna. Prema tome ukupni projektni toplinski dobitci mogu se izraziti jednadžbom:

$$\dot{Q}_I = \dot{Q}_P + \dot{Q}_E + \dot{Q}_M + \dot{Q}_R \quad [\text{W}] \quad (15)$$

Gdje je:

\dot{Q}_P – toplinski dobitci od osoba unutar prostorije [W]

$$\dot{Q}_P = n * q_p * S_i \quad [\text{W}] \quad (16)$$

n – broj osoba unutar prostorije

q_p – specifični toplinski dobitak osobe [W]

S_i – koeficijent toplinskog opterećenja

\dot{Q}_E – toplinski dobitci rasvjete [W]

$$\dot{Q}_E = P_E * \mu_B * l * S_i \quad [\text{W}] \quad (17)$$

P_E – instalirana snaga rasvjete [W]

μ_B – faktor opterećenja rasvjete

l – faktor istovremenosti

\dot{Q}_M – toplinski dobitci od uređaja u prostoru [W]

$$\dot{Q}_M = l * S_i * \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_j}{\eta} * \mu_{aj} \right) \quad [\text{W}] \quad (18)$$

P – snaga uređaja [W]

μ_a – faktor opterećenja uređaja

η – učinkovitost uređaja

\dot{Q}_R – toplinski dobitci od susjednih prostorija različite temperature [W]

$$\dot{Q}_R = k * A * \Delta\vartheta \quad [\text{W}] \quad (19)$$

k – koeficijent prolaza topline [W/m²K]

A – površina plohe koja razdvaja prostorije [m²]

$\Delta\vartheta$ – temperaturna razlika između prostorija [°C]

4.1.2. Vanjski projektni toplinski dobitci

Vanjski projektni toplinski dobitci su toplinski dobitci koje prostorija dobiva iz vanjskih izvora, najvećim dijelom zbog Sunčevog zračenja. Mogu se podijeliti na toplinske dobitke kroz neprozirne površine, kao što su vanjski zidovi i krov te na toplinske dobitke kroz ostakljene površine zgrade. Toplinski dobitci kroz vanjske zidove i krov su dobitci transmisijom, dok su toplinski dobitci kroz ostakljenja dobitci i transmisijom i zračenjem.

Vanjski projektni toplinski dobici mogu se izraziti sljedećom jednadžbom:

$$\dot{Q}_A = \dot{Q}_W + \dot{Q}_T + \dot{Q}_S \quad [\text{W}] \quad (20)$$

Gdje je:

\dot{Q}_W – toplinski dobici transmisijom kroz vanjske zidove i krov [W]

$$\dot{Q}_W = U * A * (\vartheta_{\text{int}} - \vartheta_e) \quad [\text{W}] \quad (21)$$

U – koeficijent prolaza topline građevnog elementa [W/m²K]

A – površina plohe koja razdvaja prostoriju od vanjskog okoliša [m²]

ϑ_{int} – projektna temperatura hladene prostorije [°C]

ϑ_e – temperatura vanjskog okoliša [°C]

\dot{Q}_T – toplinski dobici transmisijom kroz ostakljene površine [W]

$$\dot{Q}_T = U_T * A_T * (\vartheta_{\text{int}} - \vartheta_e) \quad [\text{W}] \quad (22)$$

U_T – koeficijent prolaza topline ostakljenja [W/m²K]

A_T – površina ostakljenja [m²]

ϑ_{int} – projektna temperatura hladene prostorije [°C]

ϑ_e – temperatura vanjskog okoliša [°C]

\dot{Q}_S – toplinski dobici zračenjem kroz ostakljene površine [W]

$$\dot{Q}_S = [A_1 * I_{\text{max}} + (A_S - A_1) * I_{\text{diff,max}}] * b * s_a \quad [\text{W}] \quad (23)$$

A_1 – osunčana površina ostakljenja [m²]

A_S – ukupna površina ostakljenja [m²]

I_{max} – maksimalna vrijednost ukupnog Sunčevog zračenja [W/m²]

$I_{\text{diff,max}}$ – maksimalna vrijednost difuznog Sunčevog zračenja [W/m²]

b – faktor propusnosti stakla

s_a – koeficijent toplinskog opterećenja

4.2. Rezultati proračuna rashladnog opterećenja obiteljske kuće prema VDI 2078

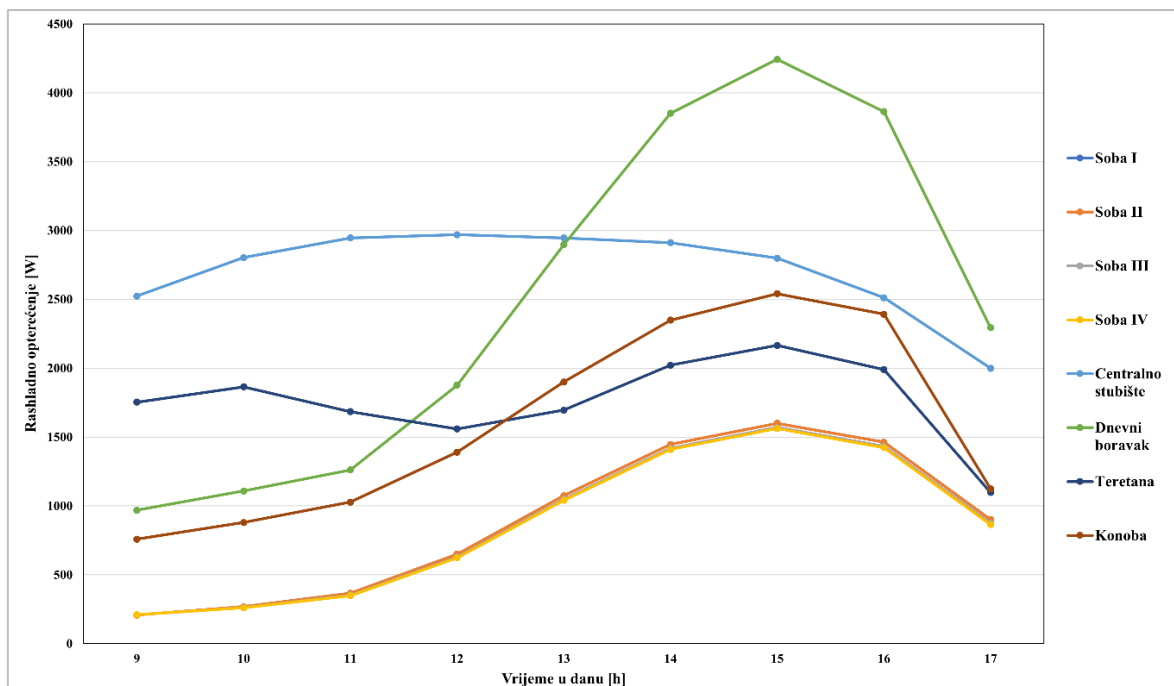
U obiteljskoj kući, za svaku prostoriju, predviđen je broj osoba koje bi mogle boraviti u određenoj prostoriji. Prema razini fizičke aktivnosti u svim prostorijama je predviđeno da osobe vrše lagani rad. Za potrebe rasvjete unutar obiteljske kuće pretpostavlja se da su ugrađene štedne LED žarulje koje su energetske učinkovite. Proračunska temperatura hlađenja obiteljske kuće iznosi 26 °C.

Izračunati su toplinski dobiti za svaku prostoriju tijekom 24 sata jednog od kritičnih dana. Odabrani dan je 23. srpnja kao najtopliji dan u godini. Toplinski dobiti za svaku prostoriju za najkritičnije sate u danu, od 9⁰⁰ do 17⁰⁰, prikazani su tablično u Tablici 9.

Tablica 9. Toplinski dobiti prostorija u tijekom kritičnog dijela dana

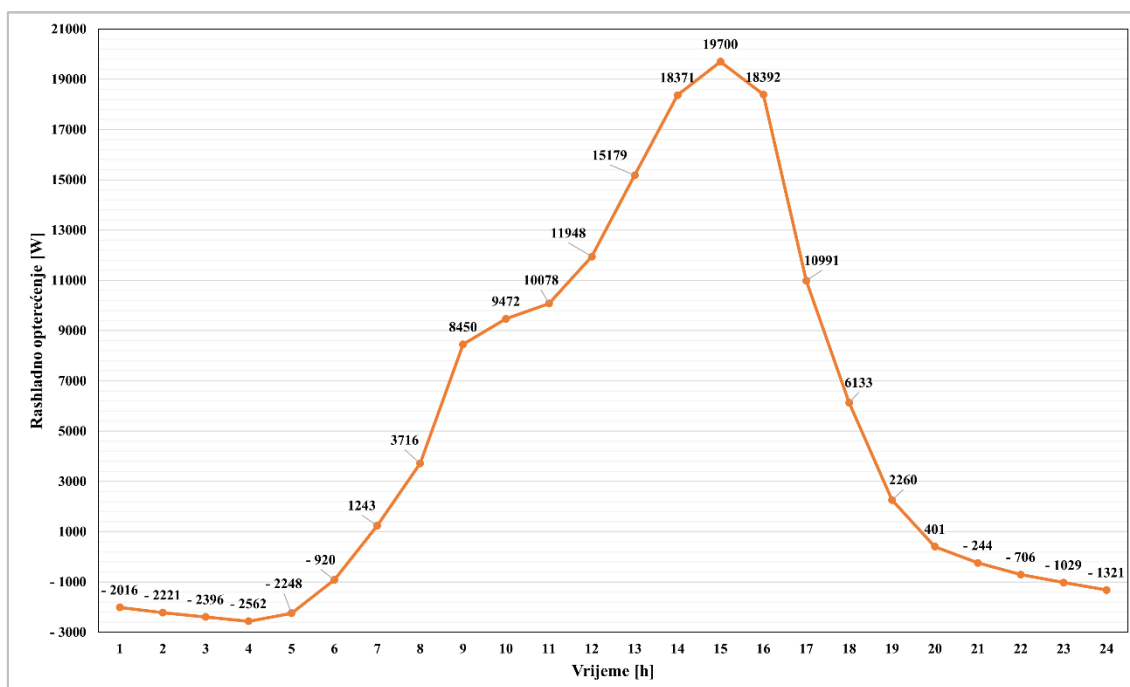
Prostorija	9 ⁰⁰	10 ⁰⁰	11 ⁰⁰	12 ⁰⁰	13 ⁰⁰	14 ⁰⁰	15 ⁰⁰	16 ⁰⁰	17 ⁰⁰
Centralno stubište	2524	2804	2946	2970	2946	2912	2800	2512	2000
Spavaća soba I	208	269	366	650	1074	1447	1600	1463	901
Kupaonica I	301	320	293	237	198	189	190	190	59
Spavaća soba II	208	269	366	650	1074	1447	1600	1463	901
Kupaonica II	114	130	150	163	177	184	214	276	199
Spavaća soba III	210	262	353	630	1049	1420	1571	1433	874
Kupaonica III	294	311	282	230	189	182	183	181	52
Spavaća soba IV	210	260	349	624	1041	1411	1562	1424	865
Kupaonica IV	113	126	138	151	159	167	193	253	176
Dnevni boravak	969	1109	1262	1877	2898	3851	4243	3864	2294
Ostava I	183	191	159	109	70	60	56	56	19
Ostava II	183	194	165	118	81	73	70	70	32
Zajednička kupaonica	112	119	127	134	140	143	164	215	131
Praonica	30	36	41	46	50	54	73	124	133
Strojarnica	37	51	63	75	83	89	93	96	43
Stubišni prostor	64	77	86	99	104	110	114	116	33
Konoba	759	880	1028	1390	1900	2349	2541	2393	1125
Teretana	1754	1865	1685	1559	1696	2022	2166	1991	1098
Sauna	177	199	219	236	250	261	267	272	56
Σ	8450	9472	10078	11948	15179	18371	19700	18392	10991

Za svaku prostoriju određeno je projektno rashladno opterećenje kroz 24 sata. Krivulje rashladnog opterećenja najznačajnijih prostorija u obiteljskoj kući prikazane su na Slici 4.



Slika 4. Krivulje rashladnog opterećenja najznačajnijih prostorija

Projektno rashladno opterećenje obiteljske kuće kao cjeline izračunato je kao maksimalna vrijednosti zbroja 24-satnih krivulja rashladnih opterećenja svih prostorija u zgradi. 24-satna krivulja rashladnog opterećenja obiteljske kuće prikazana je na Slici 5.



Slika 5. 24-satna krivulja rashladnog opterećenja obiteljske kuće

Maksimalni iznos ukupnih toplinskih dobitaka obiteljske kuće je u 16⁰⁰ sati 23. srpnja. Prema tome rashladno opterećenje obiteljske kuće je 19,700 kW.

5. PRORAČUN GODIŠNJE POTREBNE TOPLINSKE ENERGIJE ZA GRIJANJE I HLAĐENJE PREMA NORMI HRN EN 13790

Proračun potrebne toplinske energija za grijanje i hlađenje izrađen je pomoću računalnog programa MGIPU energetskeg certifikatora, preuzetog od strane Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja Republike Hrvatske [9]. MGIPU energetske certifikator računalni je program koji se koristi pri izračunu energetske svojstava zgrada i pri izradi energetske certifikata. Korisniku omogućava definiranje karakteristika zgrade, toplinskih gubitaka i dobitaka te termotehničkih sustava. Za proračun potrebne toplinske energije program koristi dinamički satni proračun koji je u skladu s Algoritmom za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prema HRN EN ISO 13790 [10].

U nastavku je prvo dan pregled algoritma kako bi se dobio uvid kako računalni program provodi proračun za potrebnu toplinsku energije za grijanje $Q_{H,nd}$ te za hlađenje $Q_{C,nd}$. Nakon pregleda, prikazani su rezultati proračuna dobiveni pomoću računalnog programa.

5.1. Pregled proračuna potrebne toplinske energije za grijanje prema HRN EN 13790

Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje je izračunata količina topline koju sustav grijanja treba osigurati u zgradi tijekom jedne godine za održavanje tražene temperature unutar zgrade. Potrebna toplinska energija za grijanje računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$Q_{H,nd} = Q_{Tr} + Q_{Ve} - \eta_{H,gn} * (Q_{int} + Q_{sol}) \quad [\text{kWh}] \quad (24)$$

Gdje je:

Q_{Tr} – izmijenjena toplinska energija transmisijom kroz proračunsku zonu [kWh]

Q_{Ve} – toplinska energija potrebna za ventilaciju proračunske zone [kWh]

$\eta_{H,gn}$ – faktor iskorištenja toplinskih dobitaka

Q_{int} – unutarnji toplinski dobitci zgrade [kWh]

Q_{sol} – toplinski dobitci od Sunčeva zračenja [kWh]

Izmijenjena toplinska energija transmisijom i ventilacijom proračunske zone računa se preko koeficijena izmijenjene topline, prema sljedećim izrazima:

$$Q_{Tr} = \frac{H_{Tr}}{1000} * (\vartheta_{int,H} - \vartheta_e) * t \quad [\text{kWh}] \quad (25)$$

$$Q_{Ve} = \frac{H_{Ve}}{1000} * (\vartheta_{int,H} - \vartheta_e) * t \quad [\text{kWh}] \quad (26)$$

Gdje je:

H_{Tr} – koeficijent transmisije izmjene topline proračunske zone [W/K]

H_{Ve} – koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone [W/K]

$\vartheta_{int,i}$ – unutarnja projektna temperatura grijane zone [°C]

ϑ_e – vanjska srednja projektna temperatura [°C]

t – trajanje proračunskog razdoblja [h]

Trajanje proračunskog razdoblja ovisi o odabiru metode. Ukoliko se računa prema satnoj metodi, trajanje proračunskog razdoblja iznosi 1 h. Kod mjesečne metode taj period je jednak zbroju sati u određenom mjesecu.

5.1.1. Izmijenjena toplina transmisijom

Koeficijent transmisije izmjene topline proračunske zone računa se za proračunski interval, a može se podijeliti na četiri zasebna koeficijenta ovisno o tipu izmjene topline.

$$H_{Tr} = H_D + H_U + H_A + H_{g,m} \quad [\text{W/K}] \quad (27)$$

Gdje je:

H_D – koeficijent transmisije izmjene topline prema vanjskom okolišu [W/K]

H_U – koeficijent transmisije izmjene topline kroz negrijani prostor prema okolišu [W/K]

H_A – koeficijent transmisije izmjene topline prema susjednoj zoni [W/K]

$H_{g,m}$ – koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu [W/K]

5.1.1.1. Izmjena topline prema vanjskom okolišu

$$H_D = \sum_k A_k * (U_k + \Delta U_{TM}) \quad [\text{W/K}] \quad (28)$$

Gdje je:

A_k – površina plohe „k“ kroz koju prolazi toplina [m²]

U_k – koeficijent prolaza topline građevnog elementa [W/m²K]

ΔU_{TM} – povećanje koeficijenta prolaza topline zbog utjecaja toplinskih mostova [W/m²K]

5.1.1.2. *Izmjena topline kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu*

$$H_U = H_{iu} * b_u \quad [\text{W/K}] \quad (29)$$

Gdje je:

H_{iu} – koeficijent transmisijske i ventilacijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora [W/K]

b_u – faktor smanjenja temperaturne razlike koji uzima u obzir transmisijske i ventilacijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora te negrijanog prostora i okoliša

5.1.1.3. *Izmjena topline između susjednih zona*

$$H_A = b_A * \sum_k A_k * (U_k + \Delta U_{TM}) \quad [\text{W/K}] \quad (30)$$

Gdje je:

b_A – faktor smanjenja temperaturne razlike koji se računa kao omjer razlike temperature prostorije i temperature susjedne prostorije te razlike temperature prostorije i vanjske projektne temperature

A_k – površina plohe „k“ kroz koju prolazi topline [m²]

U_k – koeficijent prolaza topline građevnog elementa [W/m²K]

ΔU_{TM} – povećanje koeficijenta prolaza topline zbog utjecaja toplinskih mostova [W/m²K]

5.1.1.4. *Izmjena topline prema tlu*

$$H_{g,m} = \frac{\Phi_m}{\vartheta_{int,m} - \vartheta_{e,m}} \quad [\text{W/K}] \quad (31)$$

Gdje je:

Φ_m – toplinski tok izmjene topline s tlom za proračunski mjesec [W]

$\vartheta_{int,m}$ – unutarnja projektna temperatura grijane zone za određeni mjesec [°C]

$\vartheta_{e,m}$ – vanjska srednja projektna temperatura za određeni mjesec [°C]

Ukoliko su poznate srednje mjesečne temperature vanjskog zraka, za određeni mjesec toplinski tok izmjene topline s tlom računa se pojednostavljeno po sljedećem izrazu:

$$\Phi_m = H_g * (\overline{\vartheta}_{int} - \overline{\vartheta}_e) - H_{pi} * (\overline{\vartheta}_{int} - \vartheta_{int,m}) + H_{pe} * (\overline{\vartheta}_e - \vartheta_{e,m}) \quad [W] \quad (32)$$

Gdje je:

H_g – stacionarni koeficijent transmisivske izmjene topline prema tlu [W/K]

H_{pi} – unutarnji periodički koeficijent transmisivske izmjene topline [W/K]

H_{pe} – vanjski periodički koeficijent transmisivske izmjene topline [W/K]

$\overline{\vartheta}_{int}$ – srednja godišnja unutarnja temperatura [°C]

$\overline{\vartheta}_e$ – srednja godišnja vanjska temperatura [°C]

$\vartheta_{int,m}$ – unutarnja projektana temperatura za određeni mjesec [°C]

$\vartheta_{e,m}$ – vanjska projektana temperatura za određeni mjesec [°C]

5.1.2. *Potrebna toplinska energija za ventilaciju*

Potrebna toplinska energija za ventilaciju zgrade računa se za dva različita perioda, period grijanja i period hlađenja, prema sljedećim izrazima:

$$Q_{Ve} = Q_{Ve,inf} + Q_{Ve,wind} + Q_{H,Ve,mech} \quad [kWh] \quad (33)$$

$$Q_{Ve} = Q_{Ve,inf} + Q_{Ve,wind} + Q_{C,Ve,mech} \quad [kWh] \quad (34)$$

Gdje je:

$Q_{Ve,inf}$ – potrebna toplinska energija uslijed infiltracije vanjskog zraka [kWh]

$Q_{Ve,wind}$ – potrebna toplinska energija uslijed prozračivanja [kWh]

$Q_{H,Ve,mech}$ – potrebna toplinska energija u mehaničkom sustavu kod zagrijavanja zraka [kWh]

$Q_{C,Ve,mech}$ – potrebna toplinska energija u mehaničkom sustavu kod hlađenja zraka [kWh]

Ukoliko ne postoji mehanički ventilacijski sustav, potrebna toplinska energija za ventilaciju zgrade računa se prema sljedećoj jednadžbi za oba perioda rada:

$$Q_{Ve} = Q_{Ve,inf} + Q_{Ve,wind} = \frac{H_{Ve} * (\vartheta_{int} - \vartheta_e)}{1000} * t \quad [\text{kWh}] \quad (35)$$

Gdje je:

H_{Ve} – koeficijent ventilacijske izmjene topline [W/K]

$$H_{Ve} = H_{Ve,inf} + H_{Ve,wind} \quad [\text{W/K}] \quad (36)$$

$H_{Ve,inf}$ – koeficijent izmjene topline uslijed infiltracije vanjskog zraka [W/K]

$H_{Ve,wind}$ – koeficijent izmjene topline uslijed prozračivanja [W/K]

ϑ_{int} – unutarnja projektna temperatura grijane zone [°C]

ϑ_e – srednja vanjska temperatura za proračunski period [°C]

t – trajanje proračunskog razdoblja [h]

5.1.2.1. Izmjena topline uslijed infiltracije vanjskog zraka

$$H_{Ve,inf} = n_{inf} * V * \rho_a * c_{p,a} \quad [\text{W/K}] \quad (37)$$

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

$$n_{inf} = n_{50} * e_{wind} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (38)$$

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

e_{wind} – faktor zaštićenosti zgrade od vjetra

V – volumen zraka u zoni [m^3]

ρ_a – gustoća zraka = 1,2 [kg/m^3]

$c_{p,a}$ – specifični toplinski kapacitet zraka = 1005 [J/kgK]

Broj izmjena zraka uslijed infiltracije ovisi o broju izmjena zraka pri razlici tlaka u iznosu 50 Pa između proračunske zone i okoliša n_{50} koji se određuje prema kategorijama zrakonepropusnosti, a prikazane su u Tablici 10.

Tablica 10. Proračunske vrijednosti n_{50}

Kategorija zrakonepropusnosti	n_{50} [h^{-1}]
Zgrade kod kojih se testiranje provodi nakon izgradnje a) zgrade bez GViK sustava b) zgrade sa GViK sustavom	a) 2 b) 1
Zgrade koje će tek biti završene, a ne planira se raditi testiranje zrakonepropusnosti	4
Zgrade koje ne spadaju o ostale kategorije	6
Zgrade s otvorima kroz koje slobodno ulazi zrak	10

Faktor zaštićenosti zgrade od vjetra ovisan je o lokaciji gdje je zgrada smještena, a određuje se prema iskustvenim vrijednostima prikazane su u Tablici 11.

Tablica 11. Vrijednosti faktora zaštićenosti zgrade

Klasa zaklonjenosti	e_{wind}	
	Izloženo više fasada	Izložena jedna fasada
Nezaklonjene zgrade, zgrade na otvorenom, visoke zgrade	0,1	0,03
Srednje zaklonjene zgrade, zgrade okružene drvećem ili drugim zgradama	0,07	0,02
Jako zaklonjene zgrade, zgrade prosječnih visina u gradskim centrima, zgrade u šumama	0,04	0,01

5.1.2.2. Izmjena topline uslijed prozračivanja

$$H_{Ve,wind} = n_{wind} * V * \rho_a * c_{p,a} \quad [W/K] \quad (39)$$

n_{wind} – broj izmjena zraka uslijed prozračivanja [h^{-1}]

V – volumen zraka u zoni [m^3]

ρ_a – gustoća zraka = 1,2 [kg/m^3]

$c_{p,a}$ – specifični toplinski kapacitet zraka = 1005 [J/kgK]

5.1.3. Ukupni toplinski dobici

5.1.3.1. Unutarnji toplinski dobici

Unutarnji toplinski dobici odnose se na toplinske dobitke od osoba, rasvjete i kućanskih uređaja. Prema članku 16. Tehničkog propisa uzima se vrijednost od 5 W/m^2 za specifični unutarnji dobitak po jedinici površine stambene zgrade. Unutarnji toplinski dobici računaju se prema sljedećem izrazu:

$$Q_{\text{int}} = \frac{q_{\text{spec}} * A_k * t}{1000} \quad [\text{kWh}] \quad (40)$$

Gdje je:

q_{spec} – specifični unutarnji dobitak po jedinici površine [W/m^2]

A_k – korisna površina zgrade [m^2]

t – trajanje proračunskog razdoblja [h]

5.1.3.2. Toplinski dobici od Sunčeva zračenja

$$Q_{\text{sol}} = \sum_k Q_{\text{sol},k} + \sum_l (1 - b_{\text{tr},l}) * Q_{\text{sol},u,l} \quad [\text{kWh}] \quad (41)$$

Gdje je:

$Q_{\text{sol},k}$ – srednja dozračena energija Sunčevog zračenja kroz građevni dio u grijani prostor [kWh]

$b_{\text{tr},l}$ – faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s unutarnjim toplinskim izvorom

$Q_{\text{sol},u,l}$ – srednja dozračena energija Sunčevog zračenja kroz građevni dio u susjedni negrijani prostor [kWh]

Srednja dozračena energija Sunčevog zračenja kroz određeni građevni dio ovisi o površini, orijentaciji i nagibu građevnog dijela te ukoliko postoji, zasjenjenju vanjskih objekata. Ako je građevni dio otvor (prozirni element) potrebno je uzeti u obzir stupanj propuštanja i utjecaj pomičnog zasjenjenja, kao što su grilje ili rolete.

5.1.3.3. Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje

Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka ovisan je o iznosima ukupnih toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom. Omjer tih iznosa definira se kao sljedeći parametar:

$$y_H = \frac{Q_{\text{int}} + Q_{\text{sol}}}{Q_{\text{Tr}} + Q_{\text{Ve}}} \quad [-] \quad (42)$$

Ovisno o iznosu parametra, faktor iskorištenja računa se na različiti način, pa prema tome postoje tri slučaja. Izrazi za faktor iskorištenja prema tri različita slučaja prikazani su sljedećim jednadžbama:

$$\eta_{H,\text{gn}} = \frac{1 - y_H^{a_H}}{1 - y_H^{a_H+1}} \quad y_H > 0 \text{ i } y_H \neq 1 \quad [-] \quad (43)$$

$$\eta_{H,\text{gn}} = \frac{a_H}{a_H + 1} \quad y_H = 1 \quad [-] \quad (44)$$

$$\eta_{H,\text{gn}} = \frac{1}{y_H} \quad y_H < 0 \quad [-] \quad (45)$$

Gdje je:

a_H – bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade

$$a_H = a_0 + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} \quad [-] \quad (46)$$

a_0 – referentna vrijednost, za mjesečni proračun iznosi 1

$\tau_{H,0}$ – referentna vremenska konstanta, za mjesečni proračun iznosi 15 h

τ – vremenska konstanta zgrade [h]

$$\tau = \frac{C_m}{3600 * (H_{\text{Tr}} + H_{\text{Ve}})} \quad [\text{h}] \quad (47)$$

Gdje je:

C_m – efektivni toplinski kapacitet grijanog dijela zone [J/K]

H_{Tr} – koeficijent transmisijske izmjene topline proračunske zone [W/K]

H_{Ve} – koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone [W/K]

Efektivni toplinski kapacitet grijanog dijela zone određuje se prema pet klasa zgrade ovisnim o plošnoj masi zgrade.

5.2. Pregled proračuna potrebne toplinske energije za hlađenje prema HRN EN 13790

Potrebna toplinska energija za hlađenje računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$Q_{C,nd} = Q_{int} + Q_{sol} - \eta_{C,ls} * (Q_{Tr} + Q_{Ve}) \quad [\text{kWh}] \quad (48)$$

Gdje je:

Q_{int} – unutarnji toplinski dobiti zgrade [kWh]

Q_{sol} – toplinski dobiti od Sunčeva zračenja [kWh]

$\eta_{C,ls}$ – faktor iskorištenja toplinskih gubitaka kod hlađenja

Q_{Tr} – izmijenjena toplinska energija transmisijom kroz proračunsku zonu [kWh]

Q_{Ve} – toplinska energija potrebna za ventilaciju proračunske zone [kWh]

5.2.1. Ukupni toplinski dobiti

Ukupni toplinski dobiti sastoje se od unutarnjih toplinskih dobitaka i toplinskih dobitaka uslijed Sunčevog zračenja. Toplinski dobiti se računaju na isti način kao kod proračuna potrebne toplinske energije za grijanje pa se jednadžbe neće ponavljati.

5.2.2. Izmijenjena toplina proračunske zone

Izmijenjena toplinska energija transmisijom i ventilacijom proračunske zone računa se isto kao kod perioda grijanja, osim što se uzima unutarnja projektna temperatura koja se odnosi na hlađenje. Također se može izraziti preko koeficijenata izmijenjene topline.

$$Q_{Tr} = \frac{H_{Tr}}{1000} * (\vartheta_{int,C} - \vartheta_e) * t \quad [\text{kWh}] \quad (49)$$

$$Q_{Ve} = \frac{H_{Ve}}{1000} * (\vartheta_{int,C} - \vartheta_e) * t \quad [\text{kWh}] \quad (50)$$

Gdje je:

H_{Tr} – koeficijent transmisijske izmjene topline proračunske zone [W/K]

H_{Ve} – koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone [W/K]

$\vartheta_{int,C}$ – unutarnja projektna temperatura hlađene zone [°C]

ϑ_e – vanjska srednja projektna temperatura [°C]

t – trajanje proračunskog razdoblja [h]

5.2.2.1. Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje

Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka također je ovisan o iznosima ukupnih toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom i računa se istom jednadžbom kao faktor iskorištenja toplinskih dobitaka.

$$y_C = \frac{Q_{\text{int}} + Q_{\text{sol}}}{Q_{\text{Tr}} + Q_{\text{Ve}}} \quad [-] \quad (51)$$

Ovisno o iznosu parametra, tri slučaja ostaju s istim uvjetima. Izrazi za faktor iskorištenja prema tri različita slučaja prikazani su sljedećim jednadžbama:

$$\eta_{C,ls} = \frac{1 - y_C^{-a_c}}{1 - y_C^{-(a_c+1)}} \quad y_C > 0 \text{ i } y_C \neq 1 \quad [-] \quad (52)$$

$$\eta_{C,ls} = \frac{a_c}{a_c + 1} \quad y_C = 1 \quad [-] \quad (53)$$

$$\eta_{C,ls} = 1 \quad y_C < 0 \quad [-] \quad (54)$$

Gdje je a_c bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade koji se računa prema jednadžbi (45).

5.3. Rezultati proračuna potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje prema HRN EN 13790

Dimenzijske karakteristike obiteljske kuće prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 12. Dimenzijske karakteristike obiteljske kuće

ploština korisne površine zgrade; A_k [m ²]	381,62
bruto podna površina; A_f [m ²]	480,33
prosječna visina etaže; h [m]	3,00
obujam grijanog dijela zgrade; V_e [m ³]	1440,99
neto obujam grijanog zraka; $V=0,8*V_e$ [m ³]	1152,79
oplošje grijanog dijela zgrade; A [m ²]	1012,27
faktor oblika zgrade; f_0 [m ⁻¹]	0,7
efektivni toplinski kapacitet; C_m [MJ/K]	124,886

Unutarnja projektna temperatura u sezoni grijanja iznosi 20 °C, a unutarnja projektna temperatura u sezoni hlađenja je 24 °C. Srednja vanjska godišnja temperatura za meteorološku postaju Split Marjan iznosi 16,9 °C. Obiteljska kuća ima noćni prekid rada grijanja pa je dnevni broj radnih sati 17 h. Mehanički sustav ventilacije unutar obiteljske kuće ne postoji.

Konačni rezultati proračuna prikazani su sljedećim tablicama po mjesečnim razdobljima. Tablica 13. i Tablica 15. sadrže koeficijente izmjene topline za grijanje i hlađenje. U Tablici 14. i 16. nalaze se izračunate toplinske energije te finalno, potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje.

Tablica 13. Koeficijenti izmjene topline za izračun potrebne topline za grijanje $Q_{H,nd}$

Mjesec	H_D [W/K]	H_U [W/K]	H_A [W/K]	$H_{g,m}$ [W/K]	H_{Tr} [W/K]	$H_{Ve,inf}$ [W/K]	$H_{Ve,win}$ [W/K]	H_{Ve} [W/K]
Siječanj	220,8	0	0	63,7	284,5	78,4	88,2	166,6
Veljača	220,8	0	0	61,3	282,1	78,4	88,2	166,6
Ožujak	220,8	0	0	71,6	292,4	78,4	88,2	166,6
Travanj	220,8	0	0	120,9	341,7	78,4	88,2	166,6
Svibanj	220,8	0	0	-2178,6	-1957,8	78,4	88,2	166,6
Lipanj	220,8	0	0	-138,7	82,1	78,4	88,2	166,6
Srpanj	220,8	0	0	-101,4	119,4	78,4	88,2	166,6
Kolovoz	220,8	0	0	-91,7	129,1	78,4	88,2	166,6
Rujan	220,8	0	0	-279,2	-58,4	78,4	88,2	166,6
Listopad	220,8	0	0	132,8	353,6	78,4	88,2	166,6
Studeni	220,8	0	0	80,4	301,2	78,4	88,2	166,6
Prosinac	220,8	0	0	73,1	293,9	78,4	88,2	166,6

Tablica 14. Potrebna toplinska energija za grijanje $Q_{H,nd}$

Mjesec	$Q_{H,Tr}$ [kWh]	$Q_{H,Ve}$ [kWh]	$Q_{H,int}$ [kWh]	$Q_{H,sol}$ [kWh]	$Q_{H,nd}$ [kWh]
Siječanj	2428,3	1403,0	1419,6	681,0	1658,5
Veljača	2336,7	1360,4	1282,2	689,5	1651,6
Ožujak	2087,9	1155,6	1419,6	889,6	893,4
Travanj	1151,6	522,9	1373,8	1185,3	0,0
Svibanj	588,1	-93,1	1419,6	763,5	0,0
Lipanj	-323,4	-700,1	1373,8	764,4	0,0
Srpanj	-625,1	-921,4	1419,6	789,9	0,0
Kolovoz	-725,4	-987,0	1419,6	836,0	0,0
Rujan	120,0	-384,6	1373,8	671,4	0,0
Listopad	1112,5	498,1	1419,6	803,1	0,0
Studeni	1756,7	955,7	1373,8	662,9	649,5
Prosinac	2031,7	1135,5	1419,6	704,2	1002,6
Σ					5855,5

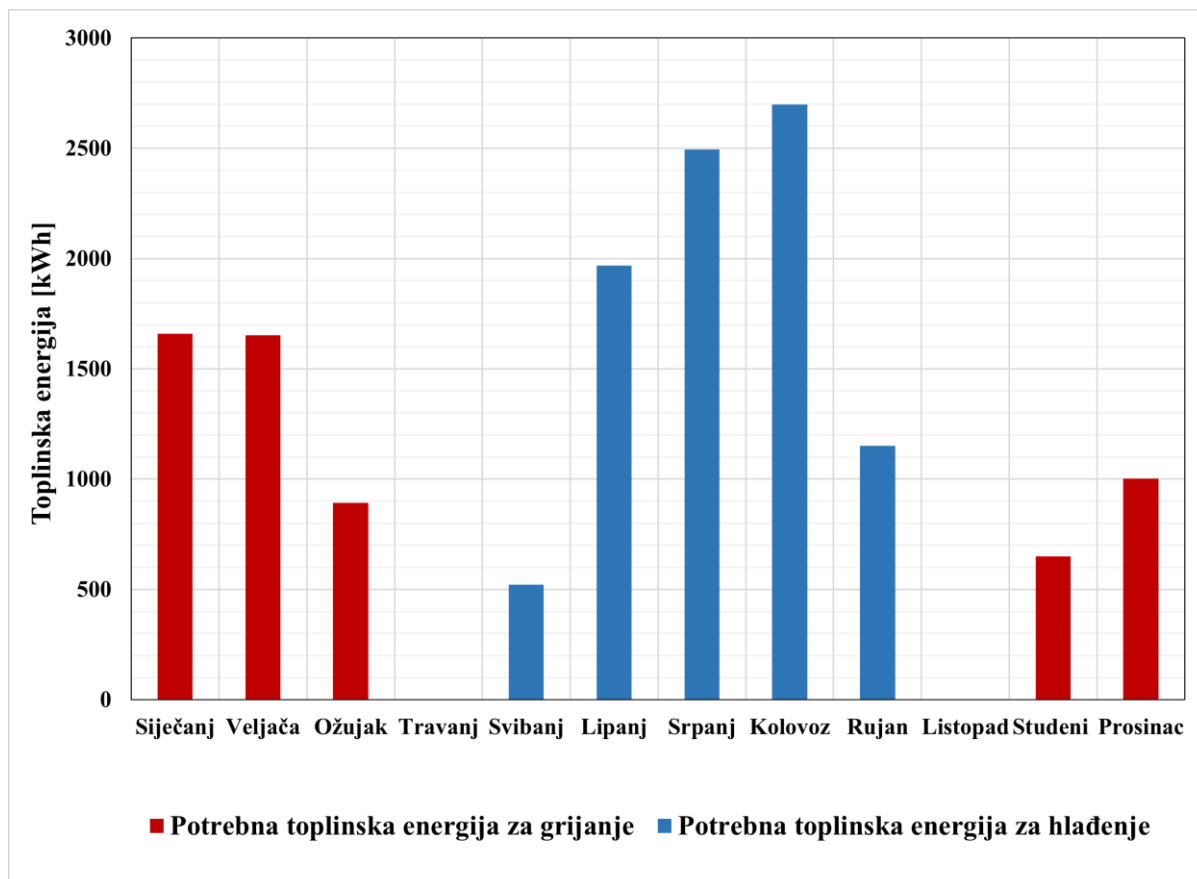
Tablica 15. Koeficijenti izmjene topline za izračun potrebne topline za hlađenje $Q_{C,nd}$

Mjesec	H_D [W/K]	H_U [W/K]	H_A [W/K]	$H_{g,m}$ [W/K]	H_{Tr} [W/K]	$H_{Ve,inf}$ [W/K]	$H_{Ve,win}$ [W/K]	H_{Ve} [W/K]
Siječanj	220,8	0	0	47,3	268,1	78,4	88,2	166,6
Veljača	220,8	0	0	46,3	267,1	78,4	88,2	166,6
Ožujak	220,8	0	0	50,6	271,4	78,4	88,2	166,6
Travanj	220,8	0	0	65,3	286,1	78,4	88,2	166,6
Svibanj	220,8	0	0	242,1	462,9	78,4	88,2	166,6
Lipanj	220,8	0	0	-534,9	-314,1	78,4	88,2	166,6
Srpanj	220,8	0	0	-236,7	-15,9	78,4	88,2	166,6
Kolovoz	220,8	0	0	-193,5	27,3	78,4	88,2	166,6
Rujan	220,8	0	0	736,1	956,9	78,4	88,2	166,6
Listopad	220,8	0	0	68,1	288,9	78,4	88,2	166,6
Studeni	220,8	0	0	53,8	274,6	78,4	88,2	166,6
Prosinac	220,8	0	0	51,1	271,9	78,4	88,2	166,6

Tablica 16. Potrebna toplinska energija za hlađenje $Q_{C,nd}$

Mjesec	$Q_{H,Tr}$ [kWh]	$Q_{H,Ve}$ [kWh]	$Q_{H,int}$ [kWh]	$Q_{H,sol}$ [kWh]	$Q_{C,nd}$ [kWh]
Siječanj	3085,4	1898,8	1419,6	681,0	0,0
Veljača	2930,2	1808,2	1282,2	689,5	0,0
Ožujak	2745,1	1651,4	1419,6	889,6	0,0
Travanj	1787,5	1002,7	1373,8	1185,3	0,0
Svibanj	1245,3	402,7	1419,6	763,5	520,3
Lipanj	312,58	-220,4	1373,8	764,4	1967,4
Srpanj	32,1	-425,6	1419,6	789,9	2494,9
Kolovoz	-68,23	-491,2	1419,6	836,0	2697,6
Rujan	755,9	95,1	1373,8	671,4	1149,9
Listopad	1769,6	993,8	1419,6	803,1	0,0
Studeni	2392,6	1435,5	1373,8	662,9	0,0
Prosinac	2688,9	1631,2	1419,6	704,2	0,0
Σ					8830,1

Ukupna potrebna toplinska energija za grijanje iznosi 5855,5 kWh godišnje. Specifična potrebna toplinska energija $Q'_{H,nd}$ iznosi 15,34 kWh/m² godišnje. Ukupna potrebna toplinska energija za hlađenje iznosi 8830,1 kWh godišnje dok je, specifična potrebna toplinska energija za hlađenje $Q'_{C,nd}$ 23,14 kWh/m² godišnje. Rezultati su prikazani dijagramom na sljedećoj slici.



Slika 6. Potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje

Prema rezultatima proračuna vidljivo je da u travnju i listopadu nema potrebe za grijanjem i hlađenjem na mjesečnoj razini. Razlog tome je satna metoda Algoritma za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prema HRN EN 13790 [10]. Ova metoda računa vrijednost ϑ_{air} , odnosno proračunski određenu temperatura zraka unutar proračunske zone.

Ovim parametrom određuje se da li je uopće potrebno grijati ili hladiti objekt u određenom satu. Ukoliko je temperatura zraka ϑ_{air} unutar proračunske zone manja od projektne temperature za grijanje $\vartheta_{\text{int,H}}$, onda se javlja potreba za grijanjem. Kada je temperatura zraka ϑ_{air} veća od projektne temperature za hlađenje $\vartheta_{\text{int,C}}$ javlja se potreba za hlađenjem.

Kada temperatura zraka ϑ_{air} poprimi vrijednost između projektnih temperatura za grijanje i hlađenje, algoritam smatra da nema potrebe za grijanjem i hlađenjem objekta u tom periodu. Kod analizirane obiteljske kuće to je slučaj u travnju i listopadu pa u tim mjesecima nema potrebe za grijanjem i hlađenjem obiteljske kuće.

6. PRORAČUN PRIMARNE ENERGIJE

Proračun primarne energije i udio obnovljivih izvora u isporučenoj energiji za rad termotehničkog sustava napravljen je također pomoću MGIPU energetske certifikatora.

Prema izračunatoj specifičnoj potrebnoj toplinskoj energiji koja iznosi 15,34 kWh/m² godišnje analizirana obiteljska kuća spada u A energetske razred. Obiteljska se kuća nalazi u u najvišem energetske razredu A+ prema specifičnoj godišnjoj primarnoj energiji koja prema proračunu iznosi 33,16 kWh/m². Ukupna primarna energija potrebna za grijanje i hlađenje obiteljske kuće iznosi 12 653,7 kWh.

Prema članku 9. Tehničkog propisa određeni su tehnički zahtjevi kojima se određuje način projektiranja i izgradnje novih zgrada. Ovisno o kategoriji zgrade i njenoj lokaciji propisane su maksimalne vrijednosti godišnje potrebne toplinske energije za grijanje, primarne i isporučene energije. Zahtjevi Tehničkog propisa prikazani su na sljedećoj slici [5].

ZAHTEVI ZA NOVE ZGRADE i G0EZ	Q _{H,nd} [kWh/(m ² ·a)]						E _{prim} [kWh/(m ² ·a)]				E _{del} [kWh/(m ² ·a)]	
	NOVA ZGRADA i G0EZ						NOVA		G0EZ		NOVA	
	kontinent, θ _{mm} ≤ 3 °C			primorje, θ _{mm} > 3 °C			kont θ _{mm} ≤ 3 °C	prim θ _{mm} > 3 °C	kont θ _{mm} ≤ 3 °C	prim θ _{mm} > 3 °C	kont θ _{mm} ≤ 3 °C	prim θ _{mm} > 3 °C
KATEGORIJA ZGRADE	f ₀ ≤ 0,20	0,20 < f ₀ < 1,05	f ₀ ≥ 1,05	f ₀ ≤ 0,20	0,20 < f ₀ < 1,05	f ₀ ≥ 1,05	≤ 3 °C	> 3 °C	≤ 3 °C	> 3 °C	≤ 3 °C	> 3 °C
Višestambena	40,50	32,39 + 40,58·f ₀	75,00	24,84	19,86 + 24,89·f ₀	45,99	120	90	80	50	80	60
Obiteljska kuća	40,50	32,39 + 40,58·f ₀	75,00	24,84	17,16 + 38,42·f ₀	57,50	115	70	45	35	80	50
Uredska	16,94	8,82 + 40,58·f ₀	51,43	16,19	11,21 + 24,89·f ₀	37,34	70	70	35	25	40	40
Obrazovna	11,98	3,86 + 40,58·f ₀	46,48	9,95	4,97 + 24,91·f ₀	31,13	65	60	55	55	60	60
Bolnica	18,72	10,61 + 40,58·f ₀	53,21	46,44	41,46 + 24,89·f ₀	67,60	300	300	250	250	220	220
Hotel i restoran	35,48	27,37 + 40,58·f ₀	69,98	11,50	6,52 + 24,89·f ₀	32,65	130	80	90	70	90	50
Sportska dvorana	96,39	88,28 + 40,58·f ₀	130,89	37,64	32,66 + 24,91·f ₀	58,82	400	170	210	150	290	110
Trgovina	48,91	40,79 + 40,58·f ₀	83,40	13,90	8,92 + 24,91·f ₀	35,08	450	280	170	150	290	170
Ostale nestambene	40,50	32,39 + 40,58·f ₀	75,00	24,84	19,86 + 24,89·f ₀	45,99	150	100	/	/	80	60

Slika 7. Zahtjevi Tehničkog propisa za nove zgrade i zgrade gotovo nulte energije

Za određivanje maksimalnih vrijednosti potrebne toplinske energije za grijanje potrebno je odrediti faktor oblika zgrade. Faktor oblika zgrade omjer je oplošja i obujma grijanog dijela zgrade i može se iskazati jednadžbom:

$$f_0 = \frac{A_0}{V_e} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (55)$$

Gdje je:

A₀ – Oplošje grijanog dijela zgrade (zone) [m²]

V_e – Obujam grijanog dijela zgrade (zone) [m³]

Oplošje grijanog dijela obiteljske kuće iznosi 1009,80 m², dok je obujam grijanog dijela 1440,99 m³. Prema gore navedenoj jednadžbi i vrijednostima izračunat je faktor oblika zgrade i iznosi 0,70 m⁻¹.

Izvadak iz energetske certifikata, s izračunatim energetske parametrima obiteljske kuće prikazan je na sljedećoj slici.

PODACI O ZGRADI		<input checked="" type="checkbox"/> nova	<input type="checkbox"/> postojeća	<input type="checkbox"/> rekonstrukcija
Vrsta zgrade (prema <i>Pravilniku</i>)	Obiteljske kuće			
Vrsta zgrade prema složenosti tehničkih sustava	zgrada s jednostavnim tehničkim sustavom			
Vlasnik / investitor				
k.č.br.	2975/35	k.o.	Starigrad	
Ploština korisne površine grijanog dijela zgrade A_K	381,62	Godina izgradnje / rekonstrukcije	2023	
Građevinska (bruto) površina zgrade [m^2]	629,35	Mjerodavna meterološka postaja	Split Marjan	
Faktor oblika f_0 [m^{-1}]	0,70	Referenta klima	Primorska	

ENERGETSKI RAZRED ZGRADE	Specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje $Q_{H,nd}$ [$kWh/(m^2a)$]	Specifična godišnja primarna energija E_{prim} [$kWh/(m^2a)$]
	15,34	33,16
	A	A+
Specifična godišnja isporučena energija E_{del} [$kWh/(m^2a)$]	20,54	
Specifična godišnja emisija CO_2 [$kg/(m^2a)$]	4,82	
Upisati „nZEB“ ako energetske svojstvo zgrade (E_{prim}) za dovoljava zahtjeve za zgrade gotovo nulte energije propisane važećim TPRUETZZ	nZEB	

ENERGETSKE POTREBE	REFERENTNI KLIMATSKI PODACI		ZAHTJEV	Ispunjeno	
	Ukupno [kWh/a]	Specifično [$kWh/(m^2a)$]	Dopušteno [$kWh/(m^2a)$]		
Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje $Q_{H,nd}$	5855,55	15,34	44,08	<input checked="" type="checkbox"/> DA	<input type="checkbox"/> NE
Godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje $Q_{C,nd}$	8830,07	23,14	50,00	<input checked="" type="checkbox"/> DA	<input type="checkbox"/> NE
Godišnja isporučena energija E_{del}	7839,97	20,54	50,00	<input checked="" type="checkbox"/> DA	<input type="checkbox"/> NE
Godišnja primarna energija E_{prim}	12653,71	33,16	35,00	<input checked="" type="checkbox"/> DA	<input type="checkbox"/> NE

KORIŠTENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE NA LOKACIJI ZGRADE	
Udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj isporučenoj energiji za rad tehničkih sustava [%]	46
Udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj isporučenoj energiji za rad termotehničkih sustava [%]	46

Slika 8. Izvadak iz energetske certifikata obiteljske kuće

6.1. Odabir fotonaponske elektrane

Prema trenutnim kriterijima Tehničkog propisa, obiteljska kuća spada u nZEB kategoriju, odnosno može se klasificirati kao „zgrada približno nulte energije“. Kako bi se kuća spadala u kategoriju „zgrade nulte emisije“ potrebno je svu energiju dobivati iz obnovljivih izvora energije. Kako je za dizalicu potrebna električna energija, ugraditi će se fotonaponska elektrana koja će se dimenzionirati prema potrebama za rad termotehničkog sustava.

Prema Ministarstvu prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine određeni su faktori primarne energije [11]. Prema tom dokumentu, faktor primarne energije za električnu energiju je 1,614. Kako je svu električnu energiju potrebno proizvesti fotonaponskom elektranom, ukupnu primarnu energiju izračunatu MGIPU energetske certifikatorom, podijelit će se s faktorom kako bi se dobila potrebna električna energija koju fotonaponska elektrana treba proizvesti tokom godine. Ta vrijednost se ujedno i naziva isporučena energija.

$$E_{\text{del}} = \frac{E_{\text{prim}}}{f_{\text{el}}} = \frac{12653,7}{1,614} = 7839,97 \quad [\text{kWh}] \quad (56)$$

Kako bi se izračunala prosječna specifična godišnja proizvodnja električne energije, koristio se javno dostupan PVGIS alat Europske komisije [12]. Pretpostavlja se da će svi paneli biti montirani na krovovima kuće koji su nagiba 30° te orijentirani na jugo-zapad što znači da je azimutni kut 45° . Uzeta je i preporučena vrijednost gubitaka sustava od 14 %. Za izračun prosjeka odabrane je stvarna lokacija obiteljske kuće te je izračunata godišnja proizvodnja po 1 kW instalirane snage. Dobiveni podatak iznosi 1243,06 kWh/(kW*god) po jedinici instalirane snage. Potrebna snaga fotonaponske elektrane izračunata je kao omjer isporučene energije i prosječne proizvodnje po kW instalirane snage te se može izraziti sljedećom jednadžbom:

$$P_{\text{FN}} = \frac{E_{\text{del}}}{E_{\text{prosjeck}}} = \frac{7839,97}{1243,06} = 6,31 \quad [\text{kW}] \quad (57)$$

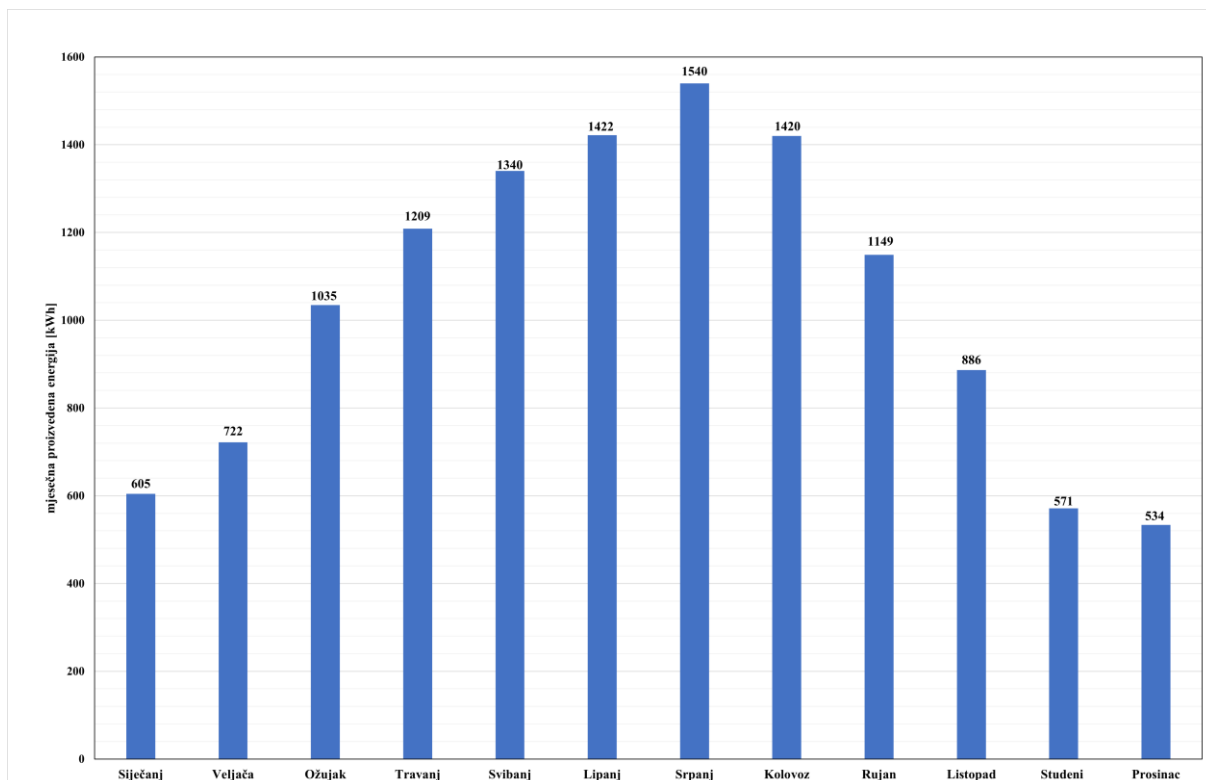
Suvremeni fotonaponski paneli sačinjeni od kristalnog silicija razlikuju se u veličini i snazi, ali je prosječno potrebno oko 6 m^2 za 1 kW instalirane snage fotonaponskog sustava. Prema tom podatku izračunata je ukupna površina koja je potrebna za fotonaponsku elektranu.

$$A_{\text{FN}} = P_{\text{FN}} * 6 = 6,31 * 6 = 37,84 \approx 38 \quad [\text{m}^2] \quad (58)$$

Ukupna površina krovova obiteljske kuće iznosi 134 m^2 , što omogućava i dimenzioniranje fotonaponske elektrane veće nazivne snage. Time je moguće ostvariti standard „zgrade nulte emisije“.

Odabrana je fotonaponska elektrana nazivne snage 10 kW. Za potrebu montaže potrebna je krovna površina od 60 m². Predimenzioniranje elektrane uzeto je kao sigurnost opskrbe za potencijalna povećanja potrošnje električne energije. Ukoliko nema povećanja potrošnje, smatra se da će se proizvedeni višak električne energije predati u distribucijsku mrežu.

Prema PVGIS alatu izračunata je prosječna godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane na obiteljskoj kući prema lokaciji objekta. Ukupni iznos proizvedene električne energije na razini godine iznosi 12432 kWh. Proizvodnja po mjesecima prikazana je na sljedećoj slici.



Slika 9. Godišnja proizvodnja električne energije fotonaponskom elektranom

7. DIMENZIONIRANJE DIZALICE TOPLINE

Sustav grijanja i hlađenja obiteljske kuće koristi dizalicu topline zrak – voda kao izvor toplinske energije te ventilokonvektore kao ogrjevna tijela. Odabrana radna tvar dizalice topline je R410A. Unutarnja jedinica dizalice topline sastoji se od dva pločasta izmjenjivača topline. Prvi izmjenjivač topline služi kao kondenzator u režimu grijanja, odnosno kao isparivač u režimu hlađenja. Drugi izmjenjivač topline, ugrađen je u krug radne tvari kao međuizmjenjivač za zagrijavanje PTV-a (eng. *Desuperheater*).

Proračunat će se proces dizalice topline u oba režima te prema većem potrebnom učinku u režimima grijanja ili hlađenja dimenzionirati pločasti izmjenjivač.

7.1. Proračun procesa dizalice topline zrak – voda u režimu grijanja

Prema toplinskom opterećenju odabran je toplinski učinak kondenzatora od 18 kW. Temperaturni režim u sustavu grijanja je 45 °C / 40 °C. Vanjska minimalna projektna temperatura za grad Zadar prema meteorološkim podacima iznosi -4,6 °C [7]. Odabrane temperature kondenzacije i isparavanja za radnu tvar iznose 48 °C i -12 °C. Osigurano je pregrijavanje radne tvari u isparivaču od 5 °C te pothlađivanje u kondenzatoru od 3 °C. Međuizmjenjivač za pripremu PTV-a koristi pregrijane pare radne tvari te ih ohladi do suhozasićenog stanja. Ulazni podaci ogrjevnog procesa prikazani su i tablično u Tablici 17.

Tablica 17. Ulazni podaci ogrjevnog procesa dizalice topline

Ulazni parametar	Oznaka	Iznos
temperatura isparavanja [°C]	ϑ_i	- 12
tlak isparavanja [bar]	p_i	5,34
iznos pregrijavanja [°C]	$\Delta\vartheta_{\text{preg.}}$	5
temperatura kondenzacije [°C]	ϑ_k	48
tlak kondenzacije [bar]	p_k	29,25
iznos pothlađivanja [°C]	$\Delta\vartheta_{\text{pot.}}$	3
ogrjevni učinak kondenzatora [kW]	ϕ_k	18
stupanj izentropske kompresije [-]	η	0,65

Termodinamičke vrijednosti radne tvari potrebne za izračun procesa dobivene su u računalnom programu Excel preko „CoolProp-a“, dodatka koji omogućava izračun toplinskih i termodinamičkih vrijednosti za različite radne tvari.

Tablica 18. sadrži vrijednosti temperatura, tlaka te specifičnih entalpija i entropija u određenim točkama ogrjevnog procesa dizalice topline za radnu tvar R410A.

Tablica 18. Vrijednosti radne tvari R410A u određenim točkama ogrjevnog procesa

korak procesa	temperatura [°C]	tlak [bar]	specifična entalpija [kJ/kg]	specifična entropija [kJ/kgK]
1	- 7	5,34	422,363	1,854
2 _{is}	80	29,25	471,952	1,854
2	101	29,25	498,653	1,927
3	48	29,25	422,897	1,707
4	45	29,25	275,848	1,250
5	- 12	5,34	275,848	1,293

Vrijednost specifične entalpije u točki 2 ogrjevnog procesa dobivena je preko stupnja izentropske kompresije prema jednadžbi:

$$h_2 = \frac{h_{2is} - h_1}{\eta} + h_1 = \frac{471,952 - 422,363}{0,65} + 422,363 = 498,653 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (59)$$

Gdje je:

h_{2is} – specifična entalpija u točki 2 pri izentropskoj kompresiji [kJ/kg]

h_1 – specifična entalpija u točki 1 [kJ/kg]

η – stupanj izentropske kompresije

Maseni protok radne tvari R410A dobiven je sljedećom jednadžbom:

$$q_{m,RT} = \frac{\phi_k}{h_2 - h_4} = \frac{18}{498,653 - 275,848} = 0,081 \quad [\text{kg/s}] \quad (60)$$

Gdje je:

ϕ_k – ogrjevni učinak kondenzatora [kW]

h – specifična entalpija u određenoj točki [kJ/kg]

Međuizmjenjivač radi samo kad je potreba za zagrijavanjem PTV-a. Iz tog razloga, iako radna tvar u kondenzator ulazi u suhozasićenom stanju kod pripreme PTV-a, proračunava se slučaj kada radna tvar u kondenzator ulazi kao pregrijana para.

Potrebna snaga kompresora izračunata je prema sljedećoj jednadžbi:

$$P_k = q_{m,RT} * (h_2 - h_1) = 0,081 * (498,653 - 422,363) = 6,2 \quad [\text{kW}] \quad (61)$$

Gdje je:

$q_{m,RT}$ – maseni protok radne tvari R410A [kg/s]

h – specifična entalpija u određenoj točki [kJ/kg]

Potrebni učinak isparivača izračunat je prema sljedećoj jednadžbi:

$$\Phi_i = q_{m,RT} * (h_1 - h_5) = 0,081 * (422,363 - 275,848) = 11,8 \quad [\text{kW}] \quad (62)$$

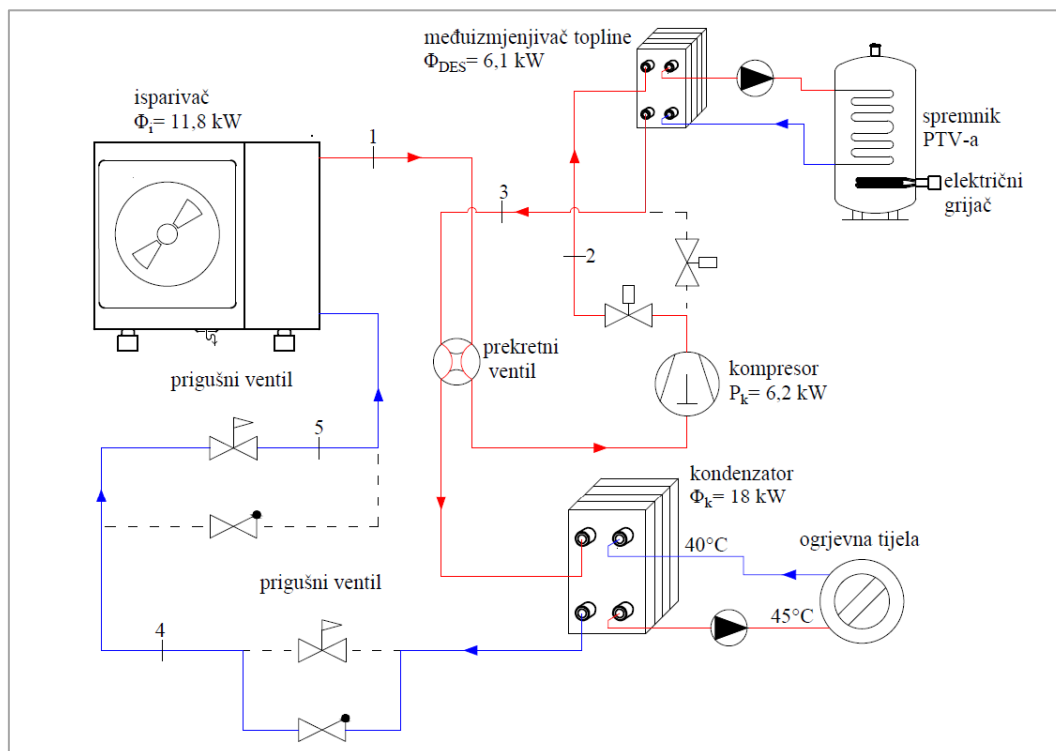
Učinak međuizmjenjivača, kada je uključen, dobije se iz izraza:

$$\Phi_{DES} = q_{m,RT} * (h_2 - h_3) = 0,081 * (498,653 - 422,897) = 6,1 \quad [\text{kW}] \quad (63)$$

Faktor grijanja, odnosno toplinski množitelj (eng. *coefficient of performance*) izračunat je omjerom ogrjevnog učinka kondenzatora i snage kompresora odnosno kroz jednadžbu:

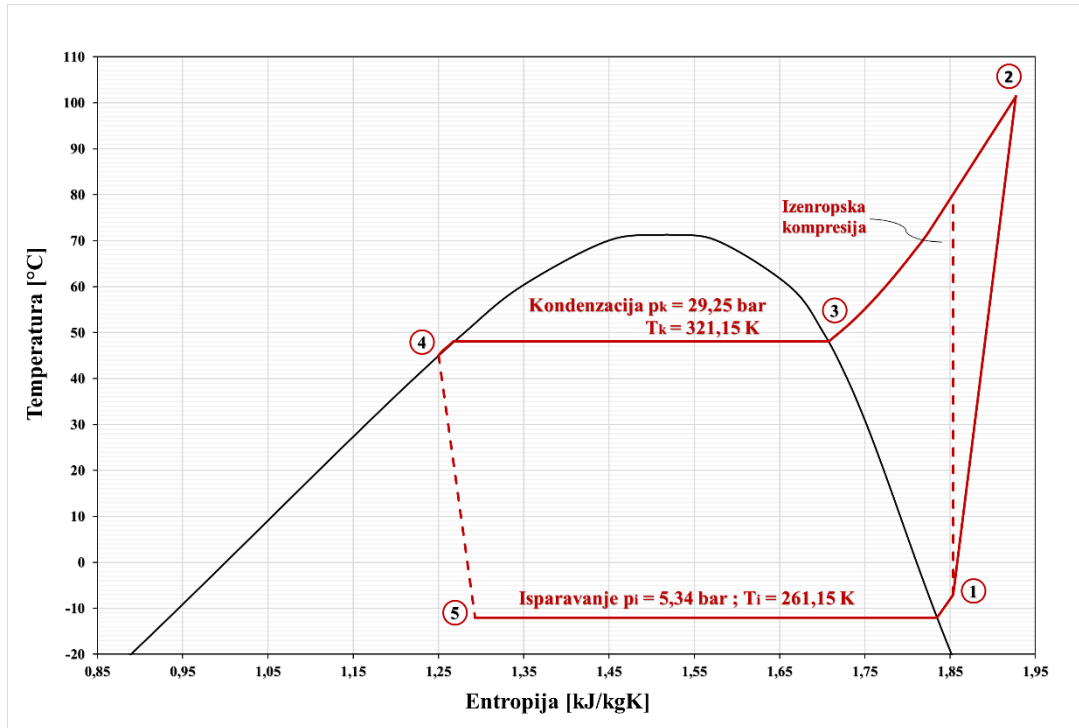
$$\varepsilon_{gr}(\text{COP}) = \frac{\Phi_k}{P_k} = \frac{18}{6,2} = 2,92 \quad (64)$$

Rad dizalice topline zrak – voda i njezine komponente u režimu grijanja prikazani su na shemi na Slici 10.

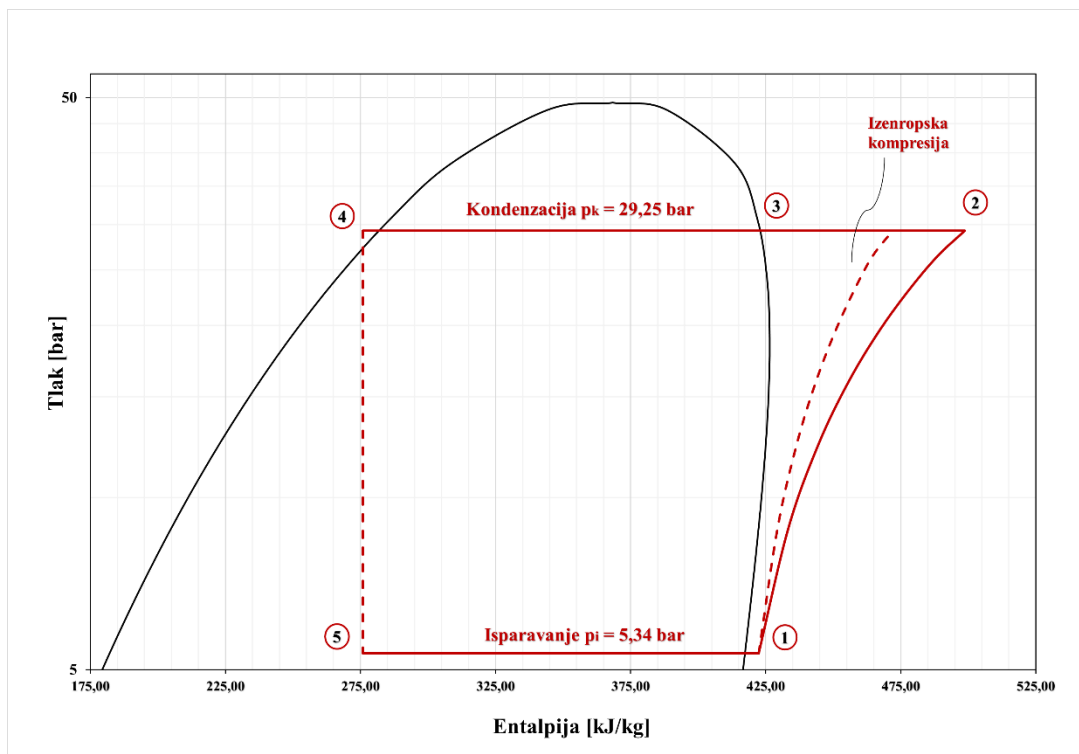


Slika 10. Shema rada dizalice topline u režimu grijanja

Slika 10. prikazuje ogrjevni proces u $T - s$ dijagramu, a Slika 11. ogrjevni proces u $\log p - h$ dijagramu. Oba dijagrama konstruirana su u računalnom programu Excel uz pomoć dodatka „CoolProp“.



Slika 11. Ogrjevni proces dizalice topline u $T - s$ dijagramu



Slika 12. Ogrjevni proces dizalice topline u $\log p - h$ dijagramu

7.2. Proračun procesa dizalice topline zrak – voda u režimu hlađenja

Za proračun režima hlađenja, prema rashladnom opterećenju odabran je rashladni učinak isparivača u iznosu 20 kW. Temperaturni režim u sustavu hlađenja je 9 °C / 14 °C. Maksimalna vanjska projektna temperatura za iznosi 30,7 °C [7]. Odabrane temperature kondenzacije i isparavanja za radnu tvar iznose 40 °C i 5 °C. Pregrijavanje i pothlađivanje radne tvari također iznose 5 °C, odnosno 3 °C, a međuizmjenjivač ponovo hladi pregrijanu paru za pripremu PTV-a. Ulazni podaci rashladnog procesa prikazani su i tablično u Tablici 19.

Tablica 19. Ulazni podaci rashladnog procesa dizalice topline

Ulazni parametar	Oznaka	Iznos
Temperatura isparavanja [°C]	ϑ_i	5
Tlak isparavanja [bar]	p_i	9,33
Iznos pregrijavanja [°C]	$\Delta\vartheta_{\text{preg.}}$	5
Temperatura kondenzacije [°C]	ϑ_k	40
Tlak kondenzacije [bar]	p_k	24,19
Iznos pothlađivanja [°C]	$\Delta\vartheta_{\text{pot.}}$	3
Rashladni učin isparivača [kW]	ϕ_i	20
Stupanj izentropske kompresije [-]	η	0,72

Tablica 20. sadrži vrijednosti temperatura, tlaka te specifičnih entalpija i entropija u određenim točkama rashladnog procesa dizalice topline.

Tablica 20. Vrijednosti dizalice topline u određenim točkama procesa

Korak procesa	Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Specifična entalpija [kJ/kg]	Specifična entropija [kJ/kgK]
1	10	9,33	428,538	1,821
2_{is}	60	24,19	455,183	1,821
2	68	24,19	465,545	1,852
3	40	24,19	425,447	1,729
4	37	24,19	260,804	1,204
5	5	9,33	260,804	1,218

Izračun vrijednosti procesa hlađenja koristi iste jednadžbe kao proces grijanja pa su prema jednadžbama od (59) do (64) dobivene vrijednosti:

Specifična entalpija pregrijane pare u točki 2 iznosi:

$$h_2 = \frac{h_{2is} - h_1}{\eta} + h_1 = \frac{455,183 - 428,538}{0,72} + 428,538 = 465,545 \quad [\text{kJ/kg}]$$

Maseni protok radne tvari R410A iznosi:

$$q_{m,RT} = \frac{\phi_i}{h_1 - h_5} = \frac{20}{428,538 - 260,804} = 0,119 \quad [\text{kg/s}]$$

Potrebna snaga kompresora iznosi :

$$P_k = q_{m,RT} * (h_2 - h_1) = 0,119 * (465,545 - 428,538) = 4,4 \quad [\text{kW}]$$

Učink kondenzatora iznosi:

$$\phi_k = q_{m,RT} * (h_2 - h_4) = 0,119 * (465,545 - 260,804) = 24,4 \quad [\text{kW}]$$

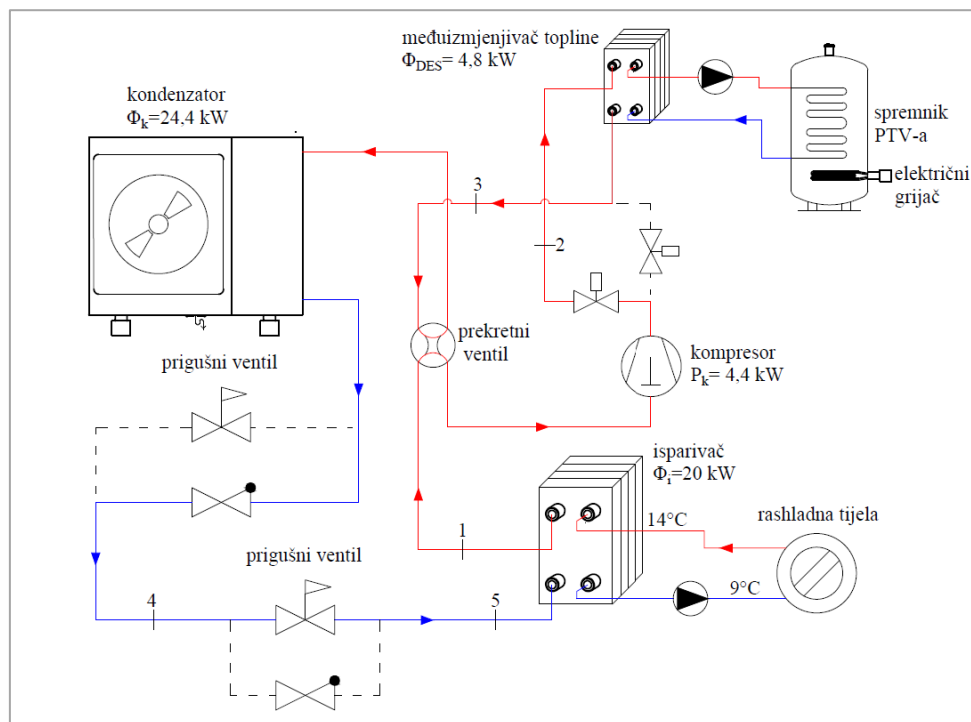
Učink međuizmjenjivača iznosi:

$$\phi_{DES} = q_{m,RT} * (h_2 - h_3) = 0,119 * (465,545 - 425,447) = 4,8 \quad [\text{kW}]$$

Faktor hlađenja (eng. *energy efficiency ratio*) iznosi:

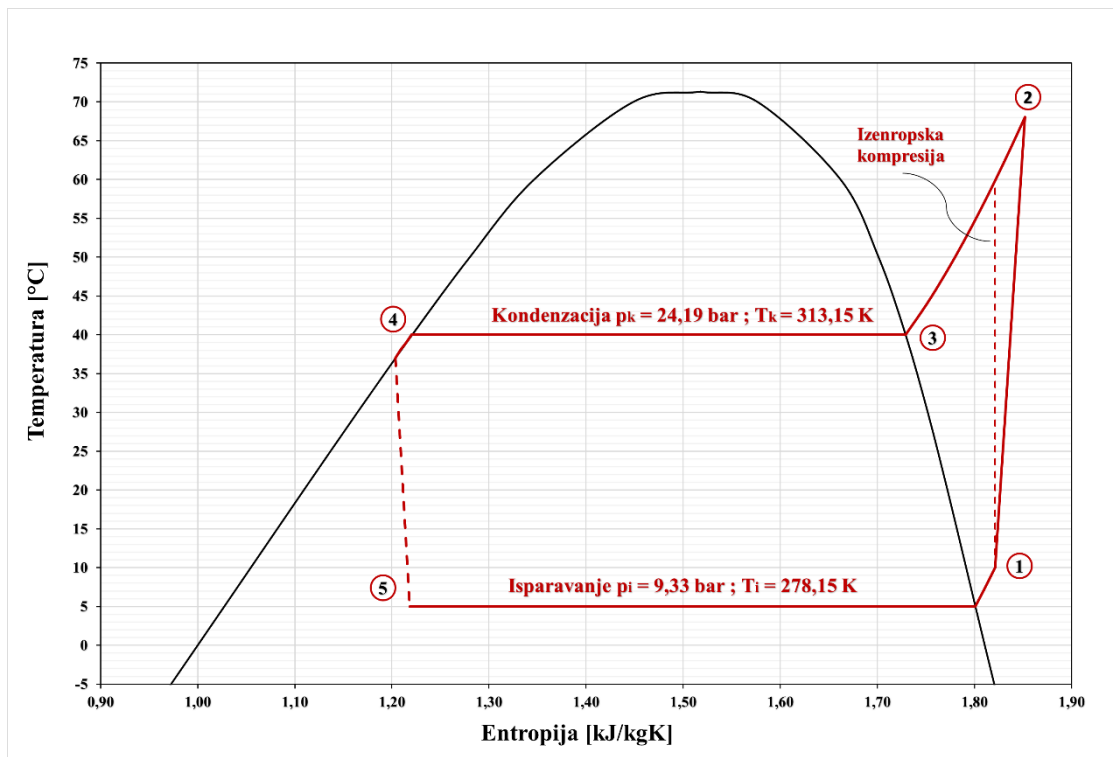
$$\varepsilon_{hl}(\text{EER}) = \frac{\phi_i}{P_k} = \frac{20}{4,4} = 4,5$$

Rad dizalice topline zrak – voda u režimu hlađenja prikazani su na shemi na Slici 12.

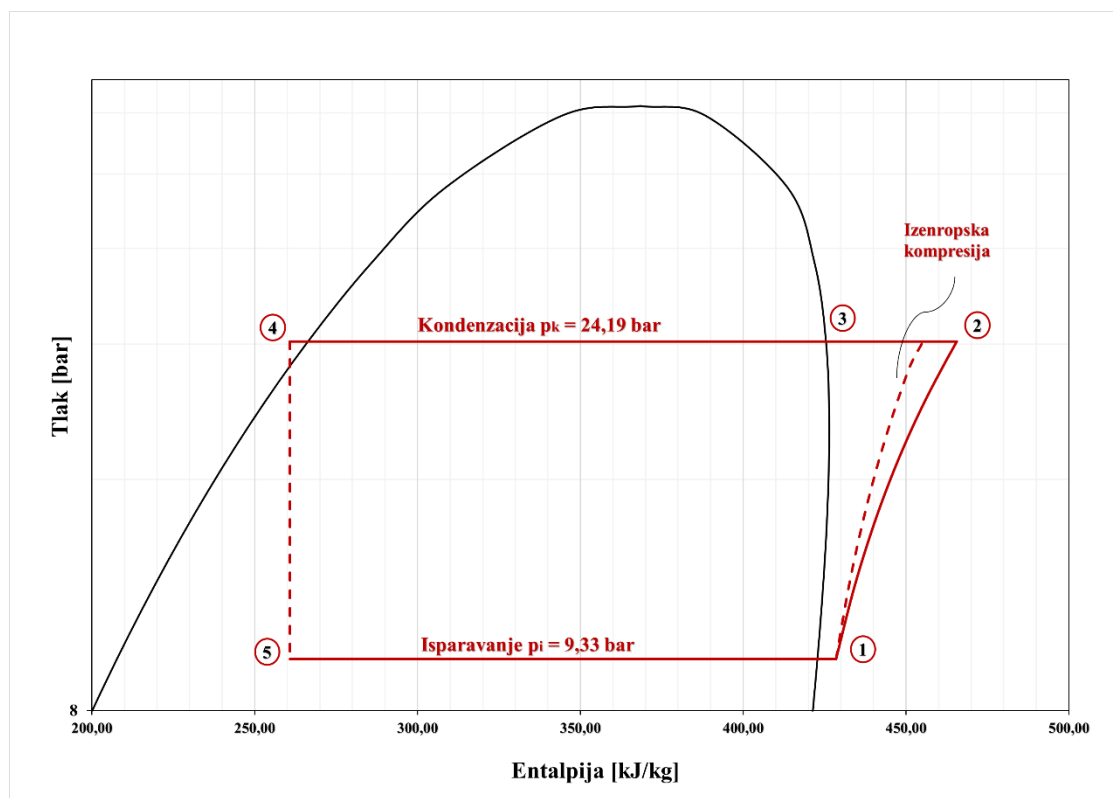


Slika 13. Shema rada dizalice topline u režimu hlađenja

Slika 13. prikazuje rashladni proces u T – s dijagramu, a Slika 14. rashladni proces u log p – h dijagramu.



Slika 14. Rashladni proces dizalice topline u T – s dijagramu



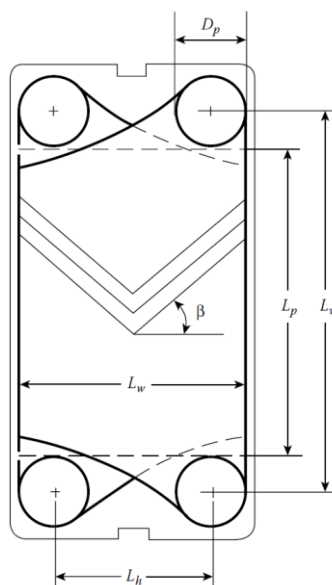
Slika 15. Rashladni proces dizalice topline u log p – h dijagramu

7.3. Proračun pločastog izmjenjivača topline

Proračun pločastog izmjenjivača topline proveden je prema podlogama iz literature „*Heat exchangers selection, rating, and thermal design*“ [13] te provedenom istraživanju za prijenos topline u pločastim izmjenjivačima [14].

7.3.1. Geometrijske karakteristike pločastih izmjenjivača topline

Pločasti izmjenjivači topline su sastavljeni od niza ploča, najčešće tipa Chevron, koje imaju valovit uzorak i nabore kako bi se osiguralo vrtložno gibanje radnih medija i povećala površina izmjene topline. Nabori su dimenzionirani pod kutom β , koji se naziva i Chevronov kut. Susjedne ploče imaju suprotne kutove kako bi se omogućilo više dodirnih mjesta između ploča. Time se omogućuje izrada ploča jako malih debljina, uglavnom 0,6 mm. Geometrijske karakteristike jedne Chevron ploče prikazane su na sljedećoj slici.



Slika 16. Geometrijske karakteristike Chevron ploče

Gdje je:

D_p – promjer priključka [m]

L_p – efektivna visina ploče [m]

L_v – vertikalna udaljenost priključaka [m]

L_w – efektivna širina ploče [m]

L_h – horizontalna udaljenost priključaka [m]

β – Chevron kut nabora ploče [°]

Iz geometrijskih karakteristika jedne ploče mogu se izvući pomoćne veličine koje će poslužiti u proračunu pločastog izmjenjivača topline. Efektivna površina izmjenjivača topline računa se jednadžbom:

$$A_1 = L_p * L_w * \phi \quad [m^2] \quad (65)$$

Gdje je:

ϕ – faktor povećanja efektivne površine ploče uslijed nabora; faktor varira između 1,15 i 1,25 s pretpostavljenom prosječnom vrijednošću od 1,17

L_p – efektivna visina ploče [m]

L_w – efektivna širina ploče [m]

Poprečni presjek kanala računa se kao umnožak efektivne širine ploče i razmaka između susjednih ploča. Može se izraziti jednadžbom:

$$A_{\text{kanal}} = b * L_w \quad [m^2] \quad (66)$$

Gdje je:

b – razmak između susjednih ploča [m]

L_w – efektivna širina ploče [m]

Hidraulički promjer računa se jednadžbom:

$$D_h = \frac{2 * b}{\phi} \quad [m] \quad (67)$$

Gdje je:

b – razmak između susjednih ploča [m]

ϕ – faktor povećanja efektivne površine ploče uslijed nabora; faktor varira između 1,15 i 1,25 s pretpostavljenom prosječnom vrijednošću od 1,17

Broj kanala ovisi o ukupnom broju ploča i broju prolaza a računa se prema jednadžbi:

$$N_{\text{pr}} = \frac{N_{\text{uk}} - 1}{2 * N_{\text{prolaz}}} \quad [-] \quad (68)$$

Gdje je:

N_{uk} – ukupni broj ploča

N_{prolaz} – broj prolaza

7.3.2. Odabir pločastog izmjenjivača topline

Pločasti izmjenjivač topline odabran je prema katalogu komercijalnog proizvođača Alfa Laval [15]. Odabran je Alfa Laval AC40, a tehnički podaci prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 21. Tehnički podaci Alfa Laval AC40 pločastog izmjenjivača topline

Tehnički podatak	Oznaka	Iznos
vertikalna udaljenost priključaka [mm]	L_v	279
horizontalna udaljenost priključaka [mm]	L_h	68
promjer priključka [mm]	D_{pr}	30
debljina ploče [mm]	t_{pl}	0,6
Kut nabora ploče [°]	β	60
Faktor povećanja površine [-]	ϕ	1,17
Ukupni broj ploča [-]	N_{uk}	45
Toplinska provodnost nehrđajućeg čelika [W/mK]	λ_{ξ}	16,5

Za odabrani pločasti izmjenjivač topline izračunate su pomoćne veličine te su prikazane u sljedećoj tablici:

Tablica 22. Pomoćne veličine Alfa Laval AC40 pločastog izmjenjivača

Pomoćna veličina	Oznaka	Iznos
efektivna površina izmjenjivača topline [m ²]	A_1	0,0286
poprečni presjek kanala [m ²]	A_{kanal}	0,00015
broj kanala [-]	N_{pr}	22
Hidraulički promjer [m]	D_h	0,0026

7.3.3. Postupak proračuna pločastog izmjenjivača topline

Prema izračunatim učincima u točkama 7.1. i 7.2. potrebno je proračunati pločasti izmjenjivač kao isparivač rashladnog učinka 20 kW. Toplinski tok potreban za pregrijavanje radne tvari izrazito je malen naspram ukupnom toplinskom toku ($\approx 3,4\%$) pa se zbog pojednostavljena promatra samo isparavanje.

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari R410A pločastog isparivača računa se prema jednadžbi koja je proizašla iz eksperimentalnog istraživanja [14]:

$$\alpha_{RT,isp} = \alpha_{RT,liq} * 88 * Bo^{0,5} \quad [W/m^2K] \quad (69)$$

Gdje je:

$\alpha_{RT,liq}$ – koeficijent prijelaza topline za kapljevinu radne tvari [W/m²K]

$$\alpha_{RT,liq} = 0,2092 * \frac{\lambda_{RT}}{D_h} * Re_{RT,liq}^{0,78} * Pr_{RT,liq}^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu_{RT}}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad [W/m^2K] \quad (70)$$

λ_{RT} – toplinska provodnost radne tvari [W/mK]

D_h – hidraulički promjer [m]

$Re_{RT,liq}$ – Reynoldsov broj kapljevine radne tvari

$Pr_{RT,liq}$ – Prandtlov broj kapljevine radne tvari

μ_{RT} – dinamička viskoznost radne tvari [Pa s]

μ_w – dinamička viskoznost vode [Pa s]

Bo – Boilingov broj

$$Bo = \frac{q}{G * (h_1 - h_5)} \quad [W/m^2K] \quad (71)$$

q – specifični toplinski tok [W/m²]

G – gustoća masenog toka [kg/sm²]

h_1 – specifična entalpija na izlazu iz isparivača [kJ/kg]

h_5 – specifična entalpija na ulazu u isparivač [kJ/kg]

Svojstva radne tvari R410A i vode izračunate su pomoću dodatka „CoolProp“ u računalnom programu Excel. Svojstva za vodu izračunata su za srednju temperaturu vode, a svojstva radne tvari R410A za temperaturu isparavanja. Svojstva su prikazana u sljedećim tablicama.

Tablica 23. Svojstva vode za proračun isparivača

Svojstvo	Oznaka	vrijednost
srednja temperatura vode [°C]	$\vartheta_{m,w}$	11,5
dinamička viskoznost vode [Pa s]	μ_w	0,00125
toplinska provodnost vode [W/mK]	λ_w	0,582
Prandtlov broj [-]	Pr_w	9,02
gustoća vode [kg/m ³]	ρ_w	999,56
specifični toplinski kapacitet vode [kJ/kgK]	$c_{p,w}$	4,193

Tablica 24. Svojstva radne tvari R410A za proračun isparivača

Svojstvo	Oznaka	vrijednost
temperatura isparavanja [°C]	ϑ_i	5
dinamička viskoznost R410A [Pa s]	μ_{RT}	0,00015
toplinska provodnost R410A [W/mK]	λ_{RT}	0,1
Prandtlov broj [-]	Pr_{RT}	2,38

Srednja logaritamska temperatura pločastog isparivača izračunata je sljedećom jednadžbom:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_{w,u} - \vartheta_i) - (\vartheta_{w,i} - \vartheta_i)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{w,u} - \vartheta_i}{\vartheta_{w,i} - \vartheta_i}\right)} = \frac{(14 - 5) - (8 - 5)}{\ln\left(\frac{14 - 5}{9 - 5}\right)} = 6,17 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (72)$$

Maseni protok radne tvari R410A izračunat je prethodno i iznosi:

$$q_{m,RT} = 0,119 \quad [\text{kg/s}]$$

Maseni protok vode računa se prema jednadžbi te iznosi:

$$q_{m,w} = \frac{\phi_i}{c_{p,w} * (\vartheta_{w,u} - \vartheta_{w,i})} = \frac{20}{4,193 * (14 - 9)} = 0,954 \quad [\text{kg/s}] \quad (73)$$

Gustoća masenog toka potrebna je za proračun Reynoldsovog i Boilingovog broja. Računa se posebno za oba radna medija prema jednadžbi:

$$G = \frac{q_m}{N_{pr} * A_{kanal}} \quad [\text{kg/sm}^2] \quad (74)$$

Gdje je:

q_m – maseni protok medija [kg/s]

N_{pr} – broj kanala

A_{kanal} – poprečni presjek kanala [m²]

Gustoća masenog toka radne tvari R410A iznosi:

$$G_{RT} = \frac{q_{m,RT}}{N_{pr} * A_{kanal}} = \frac{0,119}{22 * 0,00015} = 36,87 \quad [\text{kg/sm}^2]$$

Gustoća masenog toka vode iznosi:

$$G_w = \frac{q_{m,w}}{N_{pr} * A_{kanal}} = \frac{0,954}{22 * 0,00015} = 294,99 \quad [\text{kg/sm}^2]$$

Reynoldsov broj računa se također zasebno za oba radna medija prema jednadžbi:

$$Re = \frac{G * D_h}{\mu} \quad [-] \quad (75)$$

Gdje je:

G – gustoća masenog toka medija [kg/sm²]

D_h – hidraulički promjer [m]

μ – dinamička viskoznost medija [Pa s]

Reynoldsov broj za radnu tvar R410A iznosi:

$$Re_{RT} = \frac{G_{RT} * D_h}{\mu_{RT}} = \frac{36,87 * 0,0026}{0,00015} = 611,38$$

Reynoldsov broj za vodu iznosi:

$$Re_w = \frac{G_w * D_h}{\mu_w} = \frac{294,99 * 0,0026}{0,00125} = 604,43$$

Nussletov broj računa se za rashladnu vodu prema jednadžbi:

$$Nu = C_h * Re_w^n * Pr_w^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu_{RT}}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad [-] \quad (76)$$

Gdje je:

C_h – faktor određen prema iskustvenim podacima ovisan o kutu nabora i strujanju

n – faktor određen prema iskustvenim podacima ovisan o kutu nabora i strujanju

Re_w – Reynoldsov broj rashladne vode

Pr_w – Prandtlov broj rashladne vode

μ – dinamička viskoznost medija [Pa s]

Za kut nabora od 60° i Reynoldsov broj veći od 400, faktor C_h iznosi 0,108, a faktor n jednak je 0,703.

Nusseltov broj za vodu iznosi:

$$Nu_w = 0,108 * Re_w^{0,703} * Pr_w^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu_{RT}}{\mu_w}\right)^{0,14} = 20,28$$

Preko Nusseltovog broja izračunat je koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode i on iznosi:

$$\alpha_w = \frac{Nu_w * \lambda_w}{D_h} = \frac{20,28 * 0,582}{0,0026} = 4602,2 \quad [W/m^2K] \quad (77)$$

Prema jednadžbama (70) i (69) i (68) izračunati su Boilingov broj i koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari R410A.

$$Bo = \frac{q}{G * (h_1 - h_4)} = \frac{15735}{36,87 * (428,538 - 260,804)} = 0,00254$$

$$\alpha_{RT,liq} = 0,2092 * \frac{\lambda_{RT}}{D_h} * Re_{RT,liq}^{0,78} * Pr_{RT,liq}^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu_{RT}}{\mu_w}\right)^{0,14} = 1630,22 \quad [W/m^2K]$$

$$\alpha_{RT,isp} = \alpha_{RT,liq} * 88 * Bo^{0,5} = 1630,22 * 88 * 0,00254^{0,5} = 7236,38 \quad [W/m^2K]$$

Iz toga izračunat je koeficijent prolaza topline:

$$k_{\text{isp}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{RT,isp}}} + \frac{t_{\text{pl}}}{\lambda_{\text{pl}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{w}}}} = 2552,1 \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (78)$$

Potrebna površina za izmjenu topline je

$$A_{\text{potr}} = \frac{\phi_i}{q} = \frac{20000}{15735} = 1,271 \quad [\text{m}^2] \quad (79)$$

Ukupna površina odabranog isparivača je:

$$A_{\text{isp.}} = A_1 * N_{\text{uk}} = 0,0286 * 45 = 1,285 \quad [\text{m}^2] \quad (80)$$

Kako je površina izmjenjivača veća od potrebne površine, odabrani isparivač zadovoljava.

7.4. Proračun pločastog rekuperatora topline za pripremu PTV-a

Proračun pločastog rekuperatora topline za zagrijavanje PTV-a proveden je također prema podlogama iz literature „*Heat exchangers selection, rating, and thermal design*“ [13]. Kako proračun koristi iste formule kao u poglavlju 7.3. postupak proračuna se neće ponavljati nego će se dati samo jednadžbe s izračunatim rezultatima.

Pločasti rekuperator topline također je od proizvođača Alfa Laval [15]. Odabran je ponovo Alfa Laval AC40, ali s manjim brojem ploča nego kao kod isparivača. Tehnički podaci prikazani su u Tablici 25., a pomoćne izračunate veličine u Tablici 26.

Tablica 25. Tehnički podaci Alfa Laval AC40 pločastog izmjenjivača topline

Tehnički podatak	Oznaka	Iznos
vertikalna udaljenost priključaka [mm]	L_v	279
horizontalna udaljenost priključaka [mm]	L_h	68
promjer priključka [mm]	D_{pr}	20
debljina ploče [mm]	t_{pl}	0,6
Kut nabora ploče [°]	β	60
Faktor povećanja površine [-]	ϕ	1,17
Ukupni broj ploča [-]	N_{uk}	35
Toplinska provodnost nehrđajućeg čelika [W/mK]	$\lambda_{\text{č}}$	16,5

Tablica 26. Pomoćne veličine Alfa Laval AC40 pločastog izmjenjivača

Pomoćna veličina	Oznaka	Iznos
efektivna površina izmjenjivača topline [m ²]	A_1	0,0267
poprečni presjek kanala [m ²]	A_{kanal}	0,00013
broj kanala [-]	N_{pr}	17
Hidraulički promjer [m]	D_h	0,0026

Izračunati učinak pločastog izmjenjivača iznosi 4,8 kW. Nazivni temperaturni režim vode iznosi na pločastom rekuperatoru iznosi 40/45 °C. Radna tvar ulazi u međuizmjenjivač topline u pregrijanom stanju temperature 68 °C, a pretpostavlja se da će se radna tvar ohladiti do temperature 43 °C.

Svojstva za potrošnu toplu vodu i svojstva radne tvari izračunata su za srednje temperature medija. Svojstva su prikazana u sljedećim tablicama.

Tablica 27. Svojstva potrošne tople vode za proračun rekuperatora topline

Svojstvo	Oznaka	vrijednost
srednja temperatura vode [°C]	$\vartheta_{m,w}$	35
dinamička viskoznost vode [Pa s]	μ_w	0,00072
toplinska provodnost vode [W/mK]	λ_w	0,622
Prandtlov broj [-]	Pr_w	4,83
gustoća vode [kg/m ³]	ρ_w	994,03
specifični toplinski kapacitet vode [kJ/kgK]	$c_{p,w}$	4,179

Tablica 28. Svojstva radne tvari R410A za proračun rekuperatora topline

Svojstvo	Oznaka	vrijednost
srednja temperatura radne tvari [°C]	ϑ_i	55,5
dinamička viskoznost R410A [Pa s]	μ_{RT}	0,00002
toplinska provodnost R410A [W/mK]	λ_{RT}	0,019
Prandtlov broj [-]	Pr_{RT}	2,2

Srednja logaritamska temperatura pločastog izmjenjivača iznosi:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_{DES,u} - \vartheta_{PTV,i}) - (\vartheta_{DES,i} - \vartheta_{PTV,u})}{\ln\left(\frac{\vartheta_{DES,u} - \vartheta_{PTV,i}}{\vartheta_{DES,i} - \vartheta_{PTV,u}}\right)} = 20,17 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Maseni protok radne tvari R410A izračunat je prethodno i iznosi:

$$q_{m,RT} = 0,119 \quad [\text{kg/s}]$$

Maseni protok potrošne tople vode iznosi:

$$q_{m,PTV} = \frac{\phi_{DES}}{c_{p,PTV} * (\vartheta_{PTV,i} - \vartheta_{PTV,u})} = \frac{5,3}{4,179 * (55 - 15)} = 0,029 \quad [\text{kg/s}]$$

Gustoća masenog toka radne tvari R410A iznosi:

$$G_{RT} = \frac{q_{m,RT}}{N_{pr} * A_{kanal}} = \frac{0,119}{17 * 0,00013} = 53,14 \quad [\text{kg/sm}^2]$$

Gustoća masenog toka vode iznosi:

$$G_{PTV} = \frac{q_{m,PTV}}{N_{pr} * A_{kanal}} = \frac{0,029}{17 * 0,00013} = 12,75 \quad [\text{kg/sm}^2]$$

Reynoldsov broj za radnu tvar R410A iznosi:

$$Re_{RT} = \frac{G_{RT} * D_h}{\mu_{RT}} = \frac{53,14 * 0,0026}{0,00002} = 8772,27$$

Reynoldsov broj za vodu iznosi:

$$Re_w = \frac{G_w * D_h}{\mu_w} = \frac{14,01 * 0,0026}{0,00072} = 45,44$$

Za kut nabora od 60° i Reynoldsov broj veći od 400, faktor C_h iznosi 0,108, a faktor n jednak je 0,703, a za Reynoldsov broj manji od 400 faktor C_h iznosi 0,306, a faktor n jednak je 0,529.

Nusseltov broj za radnu tvar R410A iznosi:

$$Nu_{RT} = 0,108 * Re_{RT}^{0,703} * Pr_{RT}^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu_{RT}}{\mu_{PTV}}\right)^{0,14} = 83,1$$

Nusseltov broj za potrošnu toplu vodu iznosi:

$$\text{Nu}_{\text{PTV}} = 0,306 * \text{Re}_{\text{PTV}}^{0,529} * \text{Pr}_{\text{PTV}}^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu_{\text{RT}}}{\mu_{\text{PTV}}} \right)^{0,14} = 3,9$$

Preko Nusseltovog broja izračunati su koeficijenti prijelaza topline na strani potrošne tople vode i na strani radne tvari, a oni iznose:

$$\alpha_{\text{RT}} = \frac{\text{Nu}_{\text{RT}} * \lambda_{\text{RT}}}{D_h} = \frac{83,1 * 0,019}{0,0026} = 601,29 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$\alpha_{\text{PTV}} = \frac{\text{Nu}_{\text{PTV}} * \lambda_{\text{PTV}}}{D_h} = \frac{4,1 * 0,622}{0,0026} = 944,67 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

Iz toga izračunat je koeficijent prolaza topline:

$$k_{\text{DES}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{RT}}} + \frac{t_{\text{pl}}}{\lambda_{\text{pl}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{PTV}}}} = \frac{1}{\frac{1}{601,29} + \frac{0,0006}{16,5} + \frac{1}{944,67}} = 362,6 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

Potrebna površina za izmjenu topline je

$$A_{\text{potr}} = \frac{\Phi_{\text{DES}}}{q} = \frac{\Phi_{\text{DES}}}{\Delta\theta_m * k_{\text{DES}}} = \frac{4800}{20,17 * 362,6} = 0,654 \quad [\text{m}^2]$$

Ukupna površina odabranog izmjenjivača je:

$$A_{\text{isp.}} = A_1 * N_{\text{uk}} = 0,0267 * 35 = 0,933 \quad [\text{m}^2]$$

Kako je površina izmjenjivača veća od potrebne površine, odabrani rekuperator za pripremu PTV-a zadovoljava.

7.5. Proračun cjevovoda

Cjevovod dizalice topline podijeljen je na usisni, tlačni i kapljevinski vod. Drugi cjevovod je cjevovod polaza i povrata rashladne vode. Odabrane cijevi za vodove dizalice topline su izrađene od bakra, a vod polaza i povrata vode od polietilena. Dimenzije su određene prema „*Krautovom strojarском priručniku*“ [16]. Prethodno izračunat maseni tok radne tvari R410A iznosi 0,119 kg/s.

7.5.1. Usisni vod

Usisni vod je vod između isparivača i kompresora. Gustoća radne tvari u usisnom vodu iznosi 34,57 kg/m³. Prema tome volumenski protok iznosi:

$$q_{V,RT,1} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_{RT,1}} = \frac{0,119}{34,57} = 0,0035 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (81)$$

Pretpostavit će se brzina strujanja od 10 m/s. Unutarnji promjer cijevi usisnog voda računa se prema jednadžbi:

$$d_{u,usis} = \sqrt{\frac{4 * q_{V,RT,1}}{\pi * w_{pret.}}} = \sqrt{\frac{4 * 0,0035}{\pi * 10}} = 0,0210 \quad [\text{m}] \quad (82)$$

Odabrana cijev je Cu \varnothing 28 x 1,5 mm.

Stvarna brzina u usisnom vodu iznosi:

$$w_1 = \frac{4 * q_{V,RT,1}}{\pi * d_{u,usis}^2} = \frac{4 * 0,0035}{\pi * 0,025^2} = 7,03 \quad [\text{m/s}] \quad (83)$$

7.5.2. Tlačni vod

Tlačni vod je vod između kompresora i međuizmjenjivača te kondenzatora, pa je gustoća radne tvari u tlačnom vodu 77,50 kg/m³. Volumenski protok iznosi:

$$q_{V,RT,2} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_{RT,2}} = \frac{0,119}{77,50} = 0,0015 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (84)$$

Pretpostavit će se ponovo brzina strujanja od 10 m/s. Unutarnji promjer cijevi tlačnog voda iznosi:

$$d_{u,tl} = \sqrt{\frac{4 * q_{V,RT,2}}{\pi * w_{pret.}}} = \sqrt{\frac{4 * 0,0015}{\pi * 10}} = 0,0140 \quad [\text{m}] \quad (85)$$

Odabrana cijev je Cu \varnothing 18 x 1 mm.

Stvarna brzina u tlačnom vodu iznosi:

$$w_2 = \frac{4 * q_{v,RT,1}}{\pi * d_{u,tl}^2} = \frac{4 * 0,0015}{\pi * 0,016^2} = 7,65 \quad [\text{m/s}] \quad (86)$$

7.5.3. *Kapljevinski vod*

Kapljevinski vod izlazi iz kondenzatora te je gustoća radne tvari na izlazu iz kondenzatora 996,35 kg/m³. Volumenski protok radne tvari iznosi:

$$q_{v,RT,3} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_{RT,3}} = \frac{0,119}{996,35} = 0,00012 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (87)$$

Pretpostavljena brzina strujanja u kapljevinskom vodu iznosi 1 m/s. Unutarnji promjer cijevi tlačnog voda iznosi:

$$d_{u,kap} = \sqrt{\frac{4 * q_{v,RT,3}}{\pi * W_{pret.kap.}}} = \sqrt{\frac{4 * 0,00012}{\pi * 1}} = 0,0123 \quad [\text{m}] \quad (88)$$

Odabrana cijev je Cu ø 16 x 1 mm.

Stvarna brzina u kapljevinskom vodu iznosi:

$$w_3 = \frac{4 * q_{v,RT,3}}{\pi * d_{u,kap}^2} = \frac{4 * 0,00012}{\pi * 0,014^2} = 0,78 \quad [\text{m/s}] \quad (89)$$

7.5.4. *Vod polaza i povrata rashladne vode*

Gustoća rashladne vode i maseni protok rashladne vode izračunati su tokom proračuna pločastog isparivača te prema tome gustoća vode iznosi 999,56 kg/m³, a maseni protok vode iznosi 0,954 kg/s. Volumenski protok rashladne vode iznosi:

$$q_{v,w} = \frac{q_{m,w}}{\rho_w} = \frac{0,954}{999,56} = 0,00095 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (90)$$

Pretpostavljena brzina strujanja vode iznosi 1 m/s. Unutarnji promjer cijevi voda polaza i povrata vode iznosi:

$$d_{u,w} = \sqrt{\frac{4 * q_{v,RT,3}}{\pi * W_{pret.kap.}}} = \sqrt{\frac{4 * 0,00095}{\pi * 1}} = 0,0349 \quad [\text{m}] \quad (91)$$

Odabrana PE cijev je nazivnog promjera DN40.

Stvarna brzina vode iznosi:

$$w_w = \frac{4 * q_{v,w}}{\pi * d_{u,w}^2} = \frac{4 * 0,00095}{\pi * 0,0354^2} = 0,97 \quad [\text{m/s}] \quad (92)$$

Odabrani promjeri cijevi svih cjevovoda prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 29. Dimenzije cjevovoda

Vod	Vanjski promjer [mm]	Debljina stijenke [mm]	Unutarnji promjer [mm]
usisni vod: Cu \varnothing 28 x 1,5	28	1,5	25
tlačni vod: Cu \varnothing 18 x 1	18	1	16
kapljevinski vod: Cu \varnothing 16 x 1	16	1	14
vod polaza i povrata rashladne vode DN40	40	2,3	35,4

7.6. Proračun pada tlaka

Kako bi se dimenzionirala cirkulacijska pumpa potrebno je odrediti ukupni pad tlaka u sustavu. Cirkulacijska pumpa mora nadvladati ukupni pad tlaka na najkritičnijoj dionici, pad tlaka na isparivaču te pad tlaka na ogrjevnom tijelu. Proračunate su dvije točke, prema dnevnom boravku i prema konobi, kao dvije najudaljenije točke s najvećim rashladnim opterećenjima.

7.6.1. Pad tlaka u cjevovodu

Ukupni pad tlaka u cjevovodu sastoji se od linijskih i lokalnih padova tlaka. Linijski pad tlaka javlja se uslijed trenja tokom strujanja, a lokalni padovi tlaka posljedica su elemenata koji mijenjaju smjer i iznos strujanja. Padovi tlaka mogu se izraziti jednadžbama:

$$\Delta p_{tr} = \lambda * \frac{L}{D_u} * \frac{\rho_w * w_w^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (93)$$

Gdje je:

λ – faktor trenja ovisan o vrsti strujanja, funkcija je Reynoldsovog broja

L – duljina cjevovoda [m]

D_u – unutarnji promjer cjevovoda [m²]

ρ_w – gustoća vode [kg/m³]

w_w – brzina strujanja vode [m/s]

$$\Delta p_{lok} = \sum \xi * \frac{\rho_w * w_w^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (94)$$

Gdje je:

ξ – koeficijent lokalnog otpora strujanja

ρ_w – gustoća vode [kg/m³]

w_w – brzina strujanja vode [m/s]

Svojstva vode određena su prilikom proračuna isparivača. Specifični toplinski kapacitet vode iznosi 4193 J/kgK, gustoća vode iznosi 999,56 kg/m³, a dinamička viskoznost vode je 0,00125 Pa s. Maseni protok vode iznosi 0,954 kg/s, a volumenski protok 0,00095 m³/s. Cijevi su od polietilena visoke gustoće pa je koeficijent hrapavosti cijevi 0,0000045 m.

Prilikom određivanja koeficijenata lokalnog otpora strujanja korišten je priručnik „HERZ Sustavi toplovodnog grijanja, Hidraulika“ [17], a polietilenske cijevi su odabrane prema proizvodnom programu „Heplast pipe“ [18]. Odabirane su cijevi PE80 različitih nazivnih promjera i debljini stijenke.

Proračun je proveden u računalnom programu Excel, a izračunate vrijednosti i rezultati prikazani su sljedećim tablicama za slučaj do dnevnog boravka i slučaj prema konobi.

Tablica 30. Proračun pada tlaka za dnevni boravak

dionica	D1	D2	D3
dužina dionice [m]	8,4	5,4	19,2
rashladno opterećenje [W]	20000	5600	4950
protok vode [kg/s]	0,954	0,267	0,236
odabrani promjer	DN 40	DN 32	DN 32
unutarnji promjer [mm]	35,4	28,4	28,4
brzina vode [m/s]	0,970	0,422	0,373
Reynoldsov broj [-]	27419	9570	8459
koeficijent trenja [-]	0,0239	0,0313	0,0324
jedinični pad tlaka [Pa/m]	317,14	98,18	79,39
Linijski pad tlaka [Pa]	2664	530	1524
suma koeficijenata otpora	4,9	4	2,3
Lokalni pad tlaka [Pa]	2303	356	160
Ukupni pad tlaka na dionici	4967	886	1684
Σ	7537 Pa		

Tablica 31. Proračun pada tlaka za konobu

dionica	D1	D2	D3
dužina dionice [m]	8,4	12,2	8,0
rashladno opterećenje [W]	20000	5800	2940
protok vode [kg/s]	0,954	0,277	0,140
odabrani promjer	DN 40	DN 40	DN 32
unutarnji promjer [mm]	35,4	34	28,4
brzina vode [m/s]	0,970	0,305	0,225
Reynoldsov broj [-]	27419	8279	5060
koeficijent trenja [-]	0,0239	0,0326	0,0377
jedinični pad tlaka [Pa/m]	317,14	44,59	33,72
Linijski pad tlaka [Pa]	2664	544	270
suma koeficijenata otpora	4,9	4,4	2,3
Lokalni pad tlaka [Pa]	2303	204	58
Ukupni pad tlaka na dionici	4967	748	328
Σ	6043 Pa		

7.6.2. Proračun pada tlaka na isparivaču na strani vode

Pad tlaka na isparivaču na strani vode izračunat je prema literaturi „*Heat exchangers selection, rating, and thermal design*“ [13]. Pad tlaka sastoji se od pada tlaka u kanalima i pada tlaka na ulazu u isparivač. Ukupni pad tlaka može se izraziti jednadžbom:

$$\Delta p_i = \Delta p_{\text{kanal}} + \Delta p_{\text{ulaz}} \quad [\text{Pa}] \quad (95)$$

Gdje je:

$$\Delta p_{\text{kanal}} = 4 * \left(\frac{K_p}{\text{Re}_w^m} \right) * \frac{L_v * N_{\text{prolaz}}}{D_h} * \frac{G_w^2}{2 * \rho_w} \quad [\text{Pa}] \quad (96)$$

K_p – faktor određen iz tablica ovisan o kutu nabora i Reynoldsovom broju

m – faktor određen iz tablica ovisan o kutu nabora i Reynoldsovom broju

Re_w – Reynoldsov broj na strani vode

L_v – vertikalna udaljenost priključaka [m]

N_{prolaz} – broj prolaza

D_h – hidraulički promjer [m]

G_w – gustoća masenog toka vode [kg/sm^2]

ρ_w – gustoća vode [kg/m^3]

$$\Delta p_{\text{kanal}} = 1,4 * N_{\text{prolaz}} * \frac{1}{2 * \rho_w} * \left(\frac{4 * q_{m,w}}{\pi * D_{pr}} \right)^2 \quad [\text{Pa}] \quad (97)$$

N_{prolaz} – broj prolaza

D_{pr} – promjer priključka [m]

$q_{m,w}$ – maseni tok vode [kg/sm^2]

ρ_w – gustoća vode [kg/m^3]

Faktori očitani iz literature za kut nabora od 60° i vrijednost Reynoldsovog broja većeg od 400 iznose $K_p = 0,76$ i $m=0,215$ [13]. Prema gore navedenim jednadžbama izračunati su padovi tlaka na ulazu u isparivač i u kanalima. Ukupni pad tlaka iznosi:

$$\Delta p_i = \Delta p_{\text{kanal}} + \Delta p_{\text{ulaz}} = 3634 + 1276 = 4910 \text{ Pa}$$

7.6.3. Potrebna snaga pumpe

Prema provedenom proračunu cjevovod prema dnevnom boravku je najkritičniji te ima najveći izračunati pad tlaka. Za dimenzioniranje pumpe pretpostavit će se i pad tlaka na ulazu u ventilokonvektor od 20 kPa [19]. Ukupni pad tlaka zbroj je pada tlaka isparivača, cjevovoda i ogrjevnog tijela te iznosi:

$$\Delta p_{\text{uk}} = \Delta p_i + \Delta p_{\text{vod}} + \Delta p_{\text{rs}} = 4910 + 7537 + 20000 = 32447 \text{ Pa}$$

Potrebna snaga cirkulacijske pumpe računa se prema jednadžbi:

$$P_p = \frac{q_{v,w} * \Delta p_{\text{uk}}}{\eta_p} \quad [\text{W}] \quad (98)$$

Gdje je:

Δp_{uk} – ukupni pad tlaka [Pa]

$q_{v,w}$ – protok vode [m^3/s]

η_p – učinkovitost pumpe; prosječna vrijednost iznosi 0,6

Prema tome potrebna snaga cirkulacijske pumpe iznosi:

$$P_p = \frac{0,00095 * 32447}{0,6} = 51,4 \text{ W}$$

8. ODABIR OSNOVNIH KOMPONENTI DIZALICE TOPLINE

Kako je navedeno u poglavlju 7.3. i 7.4., isparivač i rekuperator topline odabrani su od komercijalnog proizvođača Alfa Laval. Za oba izmjenjivača topline odabran je model Alfa Laval AC40. Model izmjenjivača topline prikazan je na sljedećoj slici[15].



Slika 17. ALFA LAVAL AC40 pločasti izmjenjivač topline

Alfa Laval AC40 izmjenjivač je topline izrađen od nehrđajućeg čelika, specifično dizajniran za funkciju isparivača ili kondenzatora dizalica topline. Specifikacije isparivača prikazane su u Tablici 32. a specifikacije rekuperatora topline u Tablici 33.

Tablica 32. Specifikacije isparivača Alfa Laval AC40

rashladni učinak:	20 kW
temperatura isparavanja:	5 °C
temperaturni režim vode:	14 / 9 °C
radna tvar:	R410A
površina izmjene topline:	1,285 m ²
dimenzije:	279 x 121 x 82,25 mm

Tablica 33. Specifikacije rekuperatora topline Alfa Laval AC40

ogrijevni učinak:	4,8 kW
temperaturni režim vode:	15 / 55 °C
radna tvar:	R410A
površina izmjene topline:	0,933 m ²
dimenzije:	279 x 121 x 66,75 mm

Za ekspanziju radne tvari i osiguranje pregrijanja u isparivaču odabran je elektronički ekspanzijski ventil proizvođača Carel. Odabran je model E2V – Z. Radno područje ventila je od -40 °C do 70 °C. Odabrani elektronički ekspanzijski ventil prikazan je na slici 18. [20]

**Slika 18. CAREL elektronički ekspanzijski ventil**

Vanjska kondenzacijska jedinica hlađena zrakom sastoji se od kondenzatora i spiralnog kompresora. Kondenzator ima projektni učinak 24,4 kW. Projektna temperatura kondenzacije iznosi 40 °C. Odabrani proizvođač kondenzacijske jedinice je Frigo Plus, a kondenzacijska jedinica prikazana je na sljedećoj slici [21].



Slika 19. Frigo Plus kondenzacijska jedinica

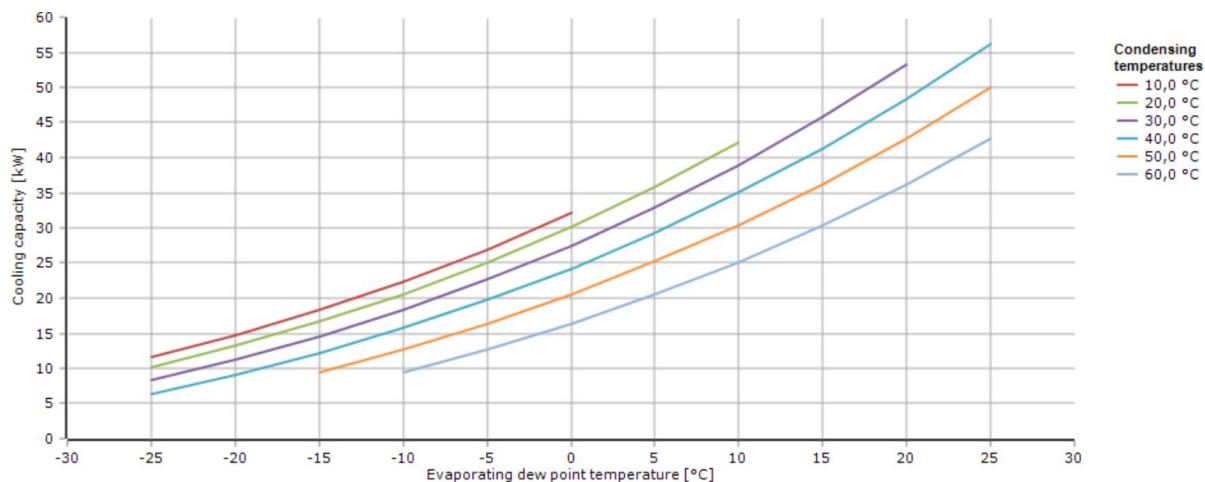
Unutar kondenzacijske jedinice ugrađen je spiralni kompresor, odabran prema katalogu proizvođača Danfoss. Odabrani model je VZH052CGANB te je prikazan na Slici 20. [22]



Slika 20. Danfoss spiralni kompresor

Zadatak kompresora je usisati svu paru koja ispari u isparivaču. Prema tome rashladni učinak kompresora mora odgovarati rashladnom učinku isparivača u danom režimu. Za niže temperature isparavanja, rashladni učinak kompresora se smanjuje pa je potrebno da odabrani kompresor ostvaruje tražene rashladne učinke u određenim režimima. Potrebni rashladni učinak kompresora u režimu hlađenja je 20 kW pri temperaturi isparavanja od 5 °C, a u režimu grijanja pri temperaturi isparavanja -12 °C potrebni rashladni učinak je 11,8 kW.

Odabrani spiralni kompresor analiziran je u softverskom programu proizvođača Danfoss „Danfoss Coolselector2“ [23]. Radne točke kompresora prikazane su na sljedećoj slici.



Slika 21. Radne točke odabranog kompresora

Prema dijagramu odabrani kompresor ostvaruje rashladni učinak od 11,8 kW pri temperaturi isparavanja -12 °C i temperaturi kondenzacije 40 °C . U režimu hlađenja, temperatura kondenzacije je 48 °C , a temperatura isparavanja 5 °C . Pri tim radnim uvjetima kompresor može ostvariti rashladni učinak od 20 kW pa je time odabrani kompresor zadovoljavajući.

9. ZAKLJUČAK

Kroz diplomski rad predstavljeno je i proračunato projektno rješenje za sustav grijanja i hlađenja obiteljske kuće kondicionirane površine 381,62 m². Obiteljska kuća projektirana je kao zgrada visoke energetske učinkovitosti, koja ostvaruje standard „zgrade nulte emisije“.

Svi proračuni izrađeni su u skladu s važećim Tehničkim propisom, normama i pravilnicima. Proračunom fizike zgrade i toplinskim dobicima i gubicima pokazana je važnost kvalitetnog odabira građevinskih materijala i optimalne izgradnje i orijentacije objekta. Toplinskom izolacijom ovojnice i pravilnom orijentacijom ostakljenih elemenata, toplinski dobici i gubici mogu se minimalizirati i time reducirati potrebnu godišnju toplinsku energiju za grijanje i hlađenje. Analizirana obiteljska kuća ima specifičnu godišnju potrebu za toplinskom energijom za grijanje u iznosu od 15,34 kWh/m² te 23,14 kWh/m² za hlađenje, što ju svrstava u visoki energetska razred.

Na temelju potrebe za toplinskom energijom predviđen je termotehnički sustav dizalice topline zrak – voda. Dizalica topline namijenjena je i za grijanje i za hlađenje obiteljske kuće, a projektirana je u izvedbi s ventilokonvektorima kako bi se omogućio niskotemperaturni režim rada. Proračunom dizalice topline dobiveni su potrebni učinci vanjske i unutarnje jedinice, te su na temelju toga dimenzionirani unutarnji pločasti izmjenjivači topline, cjevovodi sustava i cirkulacijska pumpa. Proračunata dizalice topline ima faktor grijanja (COP) 2,92 te faktor hlađenja (EER) 4,5.

Potrebna električna energija za rad dizalice topline osigurava fotonaponski sustav na krovovima obiteljske kuće. Projektiranje fotonaponskog sustava temeljeno je na potrošnji dizalice topline pa je proizvodnja izjednačena s potrošnjom. Pokazano je da objekt ima i više nego dovoljno krovne površine za ugradnju fotonaponskih panela da se pokrije cjelokupna potrošnja električne energije za dizalicu topline. Time je moguće fotonaponski sustav i predimenzionirati za potencijalno povećanje potrošnje električne energije.

LITERATURA

- [1] „Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings“. Pristupljeno: 21. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>
- [2] „Nearly zero-energy buildings“. Pristupljeno: 21. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en
- [3] „Energy performance of buildings directive“. Pristupljeno: 21. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en#proposal-for-a-revision-of-the-directive
- [4] „Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the energy performance of buildings“. Pristupljeno: 21. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0802&qid=1641802763889>
- [5] „Tehnički propis o racionalnoj upotrebi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama“, MINISTARSTVO PROSTORNOGA UREĐENJA, GRADITELJSTVA I DRŽAVNE IMOVINE. Pristupljeno: 21. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: </eli/sluzbeni/2020/102/1922>
- [6] „Metoda proračuna projektnog toplinskog opterećenja prema HRN EN 12831:2003“. podloge kolegija „Termotehnika“, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [7] „Meteorološki parametri u tablicama po postajama“. Pristupljeno: 21. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Meteo_parametri_po_postajama.pdf
- [8] Smeits, „Proračun rashladnog opterećenja klimatiziranih prostorija“.
- [9] „Računalni program za određivanje energetske svojstva zgrade“. Pristupljeno: 21. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: <https://mpgi.gov.hr/o-ministarstvu/djelokrug/energetsko-certificiranje-zgrada-8304/racunalni-program-za-odredjivanje-energetskog-svojstva-zgrade-8359/8359>
- [10] dipl. ing. stroj. prof.dr.sc. Vladimir Soldo, dipl. ing. građ. Silvio Novak, i mag. ing. mech. Ivan Horvat, „Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790“.

- [11] „Faktori primarne energije “. Pristupljeno: 25. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: <https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/14605>
- [12] „PVGIS - PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM“. [Na internetu]. Dostupno na: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [13] Sadik Kakac i Hongtan Liu, *Heat exchangers selection, rating, and thermal design*.
- [14] Y. Y. Hsieh i T. F. Lin, „Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop of refrigerant R-410A in a vertical plate heat exchanger“. [Na internetu]. Dostupno na: www.elsevier.com/locate/ijhmt
- [15] „Alfa Laval - brazed plate heat exchangers“. Pristupljeno: 25. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/brazed-plate-heat-exchangers/ac/>
- [16] Bojan Kraut, *Strojarski priručnik* . 2009.
- [17] R. Jauschowitz, „HERZ TOPLOVODNO GRIJANJE-HIDRAULIKA“.
- [18] „EN 12201 - HDPE cijevi za vodu“. Pristupljeno: 29. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: <https://heplast-pipe.hr/prodajni-program/cijevni-sustavi/pehd-glatke-cijevi/en-12201/>
- [19] „Klimakoncept.hr - ventilokonvektori“. Pristupljeno: 29. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.klimakoncept.hr/upload/2-pdf-klimakoncept/4-dizalice-topline/6.6-ventilkonvektori/terma-katalog-ventilkonvektori-klimakoncept.pdf>
- [20] „Carel - EEV technology - products“. Pristupljeno: 29. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.carel.com/product/e2v-smart>
- [21] „Frigo Plus - kondenzacijske jedinice “. Pristupljeno: 29. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.frigo-plus.hr/kondenzacijske-jedinice/>
- [22] „Danfoss - inverter scroll compressors“. Pristupljeno: 29. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: https://store.danfoss.com/gb/en_GB/Climate-Solutions-for-cooling/Compressors/Compressors-for-air-conditioning/Inverter-compressors/Scroll-compressor%2C-VZH052CGANB/p/120G0149
- [23] „Danfoss Coolselector2 “. Pristupljeno: 29. studeni 2023. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/downloads/dcs/coolselector-2/>

PRILOZI

I. Tehnička dokumentacija