

Utjecaj klimatskih promjena na potrošnju energije u zgradama

Hajsok, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:074071>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-29**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Lucija Hajsok

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Student:

Lucija Hajsok

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem doc. dr. sc. Tei Žakuli na prihvaćanju mentorstva, stručnosti, kontinuiranom praćenju i odvojenom vremenu te asistentu Nikoli Bađunu na pomoći i savjetima.

Posebne zahvale roditeljima, bratu Luki, Mariji i ostalim prijateljima koji su bili uz mene tijekom preddiplomskog studija te mi olakšali put i pružali veliku podršku.

Lucija Hajsok



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lucija Hajsok** Mat. br.: 0035214294

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj klimatskih promjena na potrošnju energije u zgradama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The effect of climate change on building's energy consumption**

Opis zadatka:

Pri simulaciji energijskih tokova i potrošnje energije u zgradama koriste se meteorološki podaci obrađeni prema međunarodno usklađenim standardima, a nazivaju se *tipična meteorološka godina*. Ovi podaci dobiveni su statističkom obradom zadnjih 30 godina mjerenja na pojedinoj lokaciji. Međutim, zbog osjetnog povećanja temperature zadnjih desetak godina, analize provedene na temelju tipične meteorološke godine mogu imati za posljedicu krive zaključke o trenutnoj i budućoj potrošnji energije. Cilj rada je analizirati u kojoj mjeri povećanje temperature utječe na potrošnju energije za grijanje i hlađenje. Specifično, potrebno je analizirati kako povećanje temperature utječe na potrebnu energiju te također kako utječe na učinkovitost rada dizalice topline zrak-voda, te posljedično na isporučenu energiju. Analizu je potrebno provesti za tipični kat zgrade Tehničke škole Ruder Bošković u Zagrebu koja je trenutno u fazi projektiranja prema standardu za zgrade gotovo nulte potrošnje energije. Za geometriju zgrade koristiti podatke prema idejnom arhitektonskom rješenju. Dinamičku simulaciju energijskih tokova zgrade u ovisnosti o utjecajnim parametrima provesti korištenjem računalnog programa TRNSYS®. U svrhu analize porasta temperature, proračun potrebne i isporučene energije potrebno je provesti na temelju podataka za tipičnu meteorološku godinu u Zagrebu i također na temelju meteoroloških podataka Državnog hidrometeorološkog zavoda za 2019. godinu.

Rad treba sadržavati:

- opis modela i ulaznih parametara simulacije,
- usporedbu meteoroloških podataka za tipičnu i stvarnu (2019.) meteorološku godinu,
- rezultate o potrebnoj i isporučenoj energiji za tipičnu i stvarnu (2019.) meteorološku godinu,
- analizu utjecaja povećanja temperature na proračun potrošnje energije.

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

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predvideni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadala:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. OPIS ZGRADE	2
3. METEOROLOŠKI PODACI NA LOKACIJI ZGRADE	7
4. OPIS PROGRAMA ZA RAČUNALNE SIMULACIJE.....	9
4.1. Izrada energijskog modela zgrade.....	9
4.2. Opis rada u korisničkom sučelju TRNSYS-a Simulation Studio	13
4.3. Opis matematičkog modela višezonske zgrade (<i>Type56</i>) u TRNSYS-u	14
4.3.1. Konvektivni toplinski tok na zonu	14
4.3.2. Prijenos topline provođenjem	15
4.3.3. Toplinska bilanca na vanjsku stranu zida	16
4.3.4. Toplinska bilanca na unutarnju stranu zida.....	17
4.3.5. Ventilacija i infiltracija	20
4.3.6. Infiltracijski dobici od susjedne zone.....	21
4.3.7. Sunčevo zračenje.....	21
5. MODELIRANJE DIZALICE TOPLINE ZRAK-VODA	23
5.1. Rad dizalice topline.....	23
5.1.1. Izračun satnih vrijednosti faktora grijanja (COP).....	24
5.1.2. Izračun satnih vrijednosti faktora hlađenja (EER).....	25
6. REZULTATI	26
6.1. Potrebna energija za grijanje i hlađenje	26
6.2. Isporučena energija za grijanje i hlađenje.....	29
7. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA.....	35
PRILOZI.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1.	Analizirana zgrada Tehničke škole Ruđer Bošković [5]	3
Slika 2.	Prikaz zoniranja 1. kata	4
Slika 3.	Promjena vanjske temperature tijekom tipične godine	7
Slika 4.	Temperaturna razlika između tipične i 2019. godine	8
Slika 5.	Primjer modeliranja druge zone u korisničkom sučelju TRNBuild	9
Slika 6.	Definiranje slojeva zidova u izborniku Wall Type Manager	10
Slika 7.	Definiranje dnevnog rasporeda korištenja zgrade u izborniku Shedule Type Manager	11
Slika 8.	Definiranje tjednog rasporeda korištenja zgrade u izborniku Shedule Type Manager	11
Slika 9.	Definiranje tjednog rasporeda korištenja zgrade u izborniku Shedule Type Manager	12
Slika 10.	Prikaz povezivanja komponenti simulacije u korisničkom sučelju Simulation Studio	13
Slika 11.	Bilanca toplinskih tokova za zrak u prostoriji [1]	14
Slika 12.	Toplinska bilanca na vanjsku stranu zida	16
Slika 13.	Toplinska bilanca na unutarnju stranu zida	18
Slika 14.	Star network model	19
Slika 15.	Shema rada dizalice topline zrak-voda [4]	23
Slika 16.	Vrijednosti <i>COP</i> -a u ovisnosti o temperaturi okoliša, temperature polaza vode i djelomičnom opterećenju	24
Slika 17.	Krivulja za radijatorsko grijanje	25
Slika 18.	Vrijednosti <i>EER</i> -a u ovisnosti o temperaturi okoliša, temperature polaza vode i djelomičnom opterećenju	25
Slika 19.	Mjesečna raspodjela potrebne energije za grijanje	27
Slika 20.	Mjesečna raspodjela potrebne energije za hlađenje	27
Slika 21.	Potrebna energija za grijanje po zonama	28
Slika 22.	Potrebna energija za hlađenje po zonama	28
Slika 23.	Satne vrijednosti <i>COP</i> -a i <i>EER</i> -a za tipičnu meteorološku godinu	29
Slika 24.	Promjena <i>COP</i> -a i <i>EER</i> -a za 2019. godinu u odnosu na tipičnu	30
Slika 25.	Isporučena energija za grijanje	31
Slika 26.	Isporučena energija za hlađenje	31
Slika 27.	Isporučena energija za grijanje po zonama	32
Slika 28.	Isporučena energija za hlađenje po zonama	32

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sastav vanjskog zida.....	4
Tablica 2. Sastav pregradnog zida.....	5
Tablica 3. Sastav stropa između grijanih zona	5
Tablica 4. Sastav prozora na jugu.....	5
Tablica 5. Sastav prozora na ostalim orijentacijama	6
Tablica 6. Podaci o režimu rada	6
Tablica 7. Potrebna ukupna energija	26
Tablica 8. Isporučena ukupna energija.....	30

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d	cm	debljina zida
c_p	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet
ρ	kg/m ³	gustoća
λ	W/(Mk)	toplinska provodnost
S_d	m	ukupna debljina zida
R	m ² K/W	otpor prolaza topline
U	W/(m ² K)	koeficijent prolaza topline stakla
g	-	stupanj propuštanja sunčevog zračenja kroz ostakljenje
T_{set}	°C	postavna temperatura za grijanje/hlađenje
$\dot{Q}_{surf,i}$	W	konvektivni toplinski tok od unutarnjih površina zone
$\dot{Q}_{vent,i}$	W	ventilacijski toplinski tok prema zoni
$\dot{Q}_{inf,i}$	W	infiltracijski toplinski tok vanjskog zraka
$\dot{Q}_{cplg,i}$	W	infiltracijski toplinski tok zraka iz susjednih zona
$\dot{Q}_{g,c,i}$	W	konvektivni dobici od unutrašnjih izvora (ljudi, oprema)
$\dot{Q}_{solair,i}$	W	dio sunčevog zračenja koje ulazi u zonu kroz vanjske prozore i trenutno se pretvara u konvektivne toplinske dobitke zone
$\dot{Q}_{ISHCCL,i}$	W	apsorbirano Sunčevo zračenje na unutarnjim zasjenjenjima zone koje direktno prelazi u konvektivne toplinske dobitke zone
$q_{s,o}$	W/m ²	toplinski tok na vanjskoj površini uslijed provođenja
$q_{s,i}$	W/m ²	toplinski tok na unutarnjoj površini uslijed provođenja
$T_{s,i}$	K	temperatura zraka u toplinskoj zoni
$T_{s,o}$	K	temperatura okolišnog zraka
S_{so}	W/m ²	toplinski tok izmijenjen zračenjem te apsorbiran na vanjskoj površini (dobici od sunca)
$q_{c,s,o}$	W/m ²	konvektivni toplinski tok s vanjskog zraka na vanjsku površinu
$q_{r,s,o}$	W/m ²	toplinski tok izmijenjen zračenjem između neba i tla te vanjske površine
$T_{s,o}$	K	temperatura na vanjskoj površini zida

$q_{comb,s,o}$	W/m^2	kombinirani toplinski tok koji uključuje konvekciju i zračenje
$h_{conv,s,o}$	$W/(m^2K)$	koeficijent za konvektivni prijenos topline na vanjskoj površini
f_{sky}	-	vidni faktor
T_{sky}	K	fiktivna temperatura neba
T_{sgrd}	K	fiktivna temperatura tla
$\varepsilon_{s,o}$	-	emisijski faktor za dugovalno zračenje vanjske površine zida
σ	$W/(m^2K^4)$	Stephan-Boltzmannova konstanta
$q_{comb,s,i}$	W/m^2	ukupni toplinski tok izmijenjen konvekcijom i zračenjem
$S_{s,i}$	W/m^2	toplinski tok izmijenjen zračenjem te apsorbiran na unutarnjoj površini (dobici od Sunca i unutarnji dobiti)
WG	W/m^2	toplinski dobiti definirani od strane korisnika programa
$q_{r,s,i}$	W/m^2	toplinski tok izmijenjen zračenjem između unutarnje površine i ostalih površina
$T_{s,i}$	K	temperatura na unutarnjoj površini zida
T_a	K	temperatura vanjskog zraka
T_i	K	temperatura unutarnjeg zraka
$q_{c,s,i}$	W/m^2	konvektivni toplinski tok između unutarnje površine zida i unutarnjeg zraka
$R_{equ,i}$	m^2K/W	ekvivalentni otpor prijelazu topline
$A_{s,i}$	m^2	površina unutarnjeg zida
T_{star}	K	fiktivna temperatura u fiktivnom čvoru
$R_{STAR,i}$	m^2K/W	fiktivni otpor prijelazu topline u fiktivnom čvoru
$m_{v,k,i}$	kg/s	maseni protok zraka doveden sustavom ventilacije
c_p	$J/(kgK)$	specifični toplinski kapacitet zraka
$T_{v,k}$	K	temperatura zraka dovedenog ventilacijom
f_{solair}	-	faktor koji određuje koliko se ukupnog zračenja pretvara u konvektivno
I_{dif}	W	difuzno Sunčevo zračenje preneseno kroz prozore
I_{dir}	W	direktno Sunčevo zračenje preneseno kroz prozore
$\rho_{dif,s}$	-	faktor refleksije za difuzno Sunčevo zračenje plohe zone

A_s	m^2	površina promatrane plohe
$f_{dif,s,s}$	-	površinski težinski faktor propusnosti i apsorpcije za raspodjelu difuznog zračenja
\dot{m}_{cplg}	kg/s	maseni protok zraka iz susjednih zona
T_j	K	temperatura zraka susjedne zone j
$T_{b,s}$	K	temperatura deifinirana kao rubni uvjet

SAŽETAK

U radu je analiziran utjecaj klimatskih promjena na potrebnu i isporučenu energiju za grijanje i hlađenje za tipičan kat zgrade Tehničke škole Ruder Bošković u Zagrebu. Simulacija potrebne energije za grijanje i hlađenje za svaki sat u godini provedena je za tipičnu meteorološku godinu i 2019. godinu korištenjem računalnog programa TRNSYS. U radu je pretpostavljeno da je izvor toplinske i rashladne energije dizalica topline zrak-voda. Sustav predaje i razvoda nije bio predmet analize ovog rada. Na temelju podataka proizvođača dizalice topline u računalnom programu MATLAB napravljen je algoritam koji omogućuje izračun potrošnje električne energije za svaki sat u godini, a na temelju promjenjivih vrijednosti faktora grijanja (*COP*) i faktora hlađenja (*EER*). Oba faktora ovise o vanjskoj temperaturi, djelomičnom opterećenju te temperaturi polaza vode.

Usporedbom meteoroloških podataka pokazano je kako su vanjske temperature za 2019. godinu pretežno više tijekom cijele godine u odnosu na temperature za tipičnu meteorološku godinu, što izravno utječe na potrebnu, odnosno isporučenu energiju. Rezultati simulacije pokazuju da kod energije za hlađenje nema značajne razlike između 2019. i tipične godine, dok za grijanje postoje značajnije razlike. Za tipičnu meteorološku godinu ukupna isporučena energija za grijanje iznosi 6949 kWh, dok za 2019. godinu iznosi 4826 kWh. Za hlađenje vrijednost isporučene energije za tipičnu godinu iznosi 2651 kWh, a za 2019. godinu 3096 kWh.

Ključne riječi: potrošnja energije, utjecaj klimatskih promjena, računalne simulacije

SUMMARY

The effect of the climate change on heating and cooling energy needs and the delivered energy is analyzed for a typical floor of the Technical school Ruđer Bošković in Zagreb. The heating and cooling needs have been calculated for every hour in a year using the data for a typical meteorological year 2019. Energy simulations have been carried out using the computer program TRNSYS. It has been assumed that an air-water heat pump is a heating and cooling source of energy. The modeling of heating and cooling emitters in rooms and a distribution system were not within the scope of the analysis. Heat pump electricity consumption has been calculated using heat pump manufactures data and the algorithm developed in the MATLAB software. It enables the calculation of the electricity consumption for every hour in the year based on a variable coefficient of performance (*COP*) and an energy efficiency ratio (*EER*). The *COP* and *EER* depend on the outdoor air temperature, part-load ratio and supply water temperature.

According to meteorological data, the outdoor air temperatures are predominantly higher during 2019, compared to the typical meteorological year. This has a direct impact on heating and cooling needs, as well as on the delivered energy. The simulation results indicate that there is no significant variation between year 2019 and typical year, regarding the energy for cooling. On the other hand, there are noticeable differences in the energy for heating. The delivered energy for heating is 6949 kWh for a typical meteorological year and 4826 kWh for year 2019. In addition, the delivered energy for cooling is 2651 kWh for a typical meteorological year and 3096 kWh for year 2019.

Key words: energy consumption, the effect of climate change, computer simulation

1. UVOD

Klima predstavlja prosječne vremenske prilike mjerene tijekom 30 godina. Osim što klima varira prostorno, ona se mijenja i u vremenu, a statistički izraženije promjene srednjeg stanja ili varijabilnosti klimatskih veličina nazivaju se klimatskom promjenom. Utjecaj na promjenu klime imaju prirodni čimbenici, poput izbacivanje veće količine aerosola u atmosferu i promjena Sunčevog zračenja uslijed promjene parametara u Zemljinoj putanji oko Sunca, a sve veću važnost i interes izaziva ljudski utjecaj na promjenu klime [3]. Trend porasta temperatura prisutan je na globalnoj razini, a u ovome radu analizirat će se u kojoj mjeri je on prisutan za grad Zagreb te kakav utjecaj ima na potrebnu, odnosno isporučenu energiju za grijanje i hlađenje.

Glavni cilj rada je analiza utjecaja klimatskih promjena na potrebnu i isporučenu energiju za grijanje i hlađenje, a sve analize provode se za podatke Državnog hidrometeorološkog zavoda za tipičnu meteorološku godinu te se rezultati uspoređuju s rezultatima za meteorološke podatke za 2019. godinu. Analiza potrebne energije za grijanje i hlađenje provodi se za prvi kat zgrade Tehničke škole Ruđer Bošković u Zagrebu. Modeliranje kata zgrade u TRNBuildu, jednom od korisničkih sučelja računalnog programa TRNSYS, početni je korak za izračun potrebne energije za grijanje i hlađenje, a uključuje zoniranje kata na toplinske zone, unos pogonskih režima te definiranja svojstva zidova i prozora. Model u TRNBuildu te meteorološki podaci ulazni su parametri za simulaciju koja se provodi u glavnom korisničkom sučelju TRNSYS-a, Simulation Studio. Izvor toplinske i rashladne energije je dizalica topline zrak-voda, a energija se isporučuje ventilokonvektorima čiji se parametri u ovom radu ne analiziraju. Isporučena energija za grijanje i hlađenje dobiva se dijeljenjem potrebne energije za grijanje i hlađenje faktorom grijanja (COP), odnosno faktorom hlađenja (EER), pri čemu su vrijednosti izračunate za svaki sat u godini. Na temelju podatka proizvođača dizalice topline u računalnom programu MATLAB modeliran je rad dizalice topline, a razvijenim algoritmom prvenstveno je omogućen izračun COP -a i EER -a za svaki sat u godini. COP i EER modelirani su u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, temperaturi polaza vode te djelomičnom opterećenju. Pri tome je pretpostavljeno da se temperatura polaza vode mijenja prema krivulji grijanja u režimu grijanja, odnosno da je konstanta i iznosi $7^{\circ}C$ u režimu hlađenja. S obzirom da detaljno dimenzioniranje sustava nije bilo u opsegu ovog rada bilo u opsegu ovog rada, izračun isporučene energije za grijanje i hlađenje provodi se pod pretpostavkom djelomičnog opterećenja dizalice topline od 50%.

2. OPIS ZGRADE

Analiza utjecaja klimatskih promjena na potrošnju energije za grijanje i hlađenje provodi se na tipičnom katu zgrade Tehničke škole Ruđer Bošković u Zagrebu koja se trenutno nalazi u fazi projektiranja prema standardu za zgrade gotovo nulte potrošnje energije (Slika 1.). Prvi korak u proračunu potrebne toplinske energije je pravilno zoniranje zgrade. Ono je izvršeno prema normi ISO 52016-1:2017 [2]. Normom se provodi zoniranje prema deset smjernica:

1. Za svaki prostor određuje se namjena.
2. Susjedni prostori iste namjene svrstavaju se u istu toplinsku zonu.
3. Ako postoje veliki otvori između prostora, oni se zoniraju zajedno.
4. Toplinska zona sadržava prostorije istog zahtjeva (grijanje/hlađenje).
5. Susjedni prostori se mogu zonirati zajedno ako imaju isti ili sličan režim rada.
6. Susjedni prostori istog zahtjeva (grijanje/hlađenje) mogu se zonirati zajedno.
7. Mora se osigurati toplinska homogenost zone (posebno u režimu hlađenja).
8. Negrijani ili nehlađeni prostori mogu se zonirati zajedno.
9. Površinom male susjedne zone mogu se zonirati sa susjednim prostorom ako su zahtjevi za grijanjem i hlađenjem isti, iako imaju različite režime rada.
10. Površinom jako male susjedne zone mogu se zonirati sa susjednim prostorom, iako imaju različite zahtjev za grijanje/hlađenje i različite režime rada.



Slika 1. Analizirana zgrada Tehničke škole Ruđer Bošković [5]

Glavni kriterij zoniranja je orijentacija prostorija, a budući da je zgrada izdužena, većim dijelom je izložena sjeveru i jugu. Uzimajući u obzir i namjenu prostorija, prva zona obuhvaća predavaonu na južnoj strani. Druga zona uključuje laboratorij te spremište koji se nalaze na južnoj strani. Sukladno južnom dijelu, zonira se i sjeverni dio zgrade pa tako treću zonu čini predavaona. Četvrtu zonu čine laboratorij i spremište. Hodnik i sanitarije čine petu zonu koja se ističe posebnim režimom rada. Svi parametri potrebni za modeliranje zidova uključujući debljinu, gustoću, koeficijent toplinske definerani su za referentnu nZEB zgradu obrazovne ustanove u kontinentalnoj klimi [6] (Tablica 1., Tablica 2., Tablica 3., Tablica 4., Tablica 5.).



Slika 2. Prikaz zoniranja 1. kata

Tablica 1. Svojstva vanjskog zida

Oznaka i sastav građevnog dijela				$R =$ otpor prolaza topline		Debljina (cm)
VANJSKI ZID				$R = 5,798 \text{ m}^2\text{K/W}$		40,50
Sloj	Materijal	d (cm)	c_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	S_d (m)
1	Armirani beton	20	1000	2500	2,6	26
2	Mineralna vuna	20	1030	50	0,035	0,2
3	Polimer-cementna žbuka armirana staklenom mrežicom	0,3	1000	1100	0,7	0,6
4	Silikatna žbuka	0,2	1050	1850	0,87	0,1

Tablica 2. Svojstva pregradnog zida

Oznaka i sastav građevnog dijela				$R = \text{otpor prolaza topline}$		Debljina (cm)
PREGRADNI ZID				$R = 0,077 \text{ m}^2\text{K/W}$		20,00
Sloj	Materijal	d (cm)	c_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	S_d (m)
1	Armirani beton	20	1000	2500	2,6	26

Tablica 3. Svojstva stropa između grijanih zona

Oznaka i sastav građevnog dijela				$R = \text{otpor prolaza topline}$		Debljina (cm)
STROP				$R = 1,718 \text{ m}^2\text{K/W}$		32,32
Sloj	Materijal	d (cm)	c_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	S_d (m)
1	Epoksi smola	0,3	1400	1200	0,2	30
2	Cementni estrih	6	1100	2000	1,6	3
3	PE folija	0,02	1250	1000	0,19	0
4	Stiropor EPS T	2	1260	12	0,042	0,8
5	Stiropor EPS 150	4	1260	25	0,036	2,8
6	Armirani beton	20	1000	2500	2,6	26

Tablica 4. Svojstva prozora na jugu

Oznaka i sastav građevnog dijela	$R = \text{otpor prolaza topline}$
PROZOR NA JUGU	$R = 1,429 \text{ m}^2\text{K/W}$
Koeficijent prolaza topline stakla, U (W/m ² K)	0,7
Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, g [-]	0,407

Tablica 5. Svojstva prozora na ostalim orijentacijama

Oznaka i sastav građevnog dijela	R = otpor prolaza topline
PROZOR OSTALE ORIJENTACIJE	R = 0,909 m²K/W
Koeficijent prolaza topline stakla, U (W/m ² K)	1,1
Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, g [-]	0,598

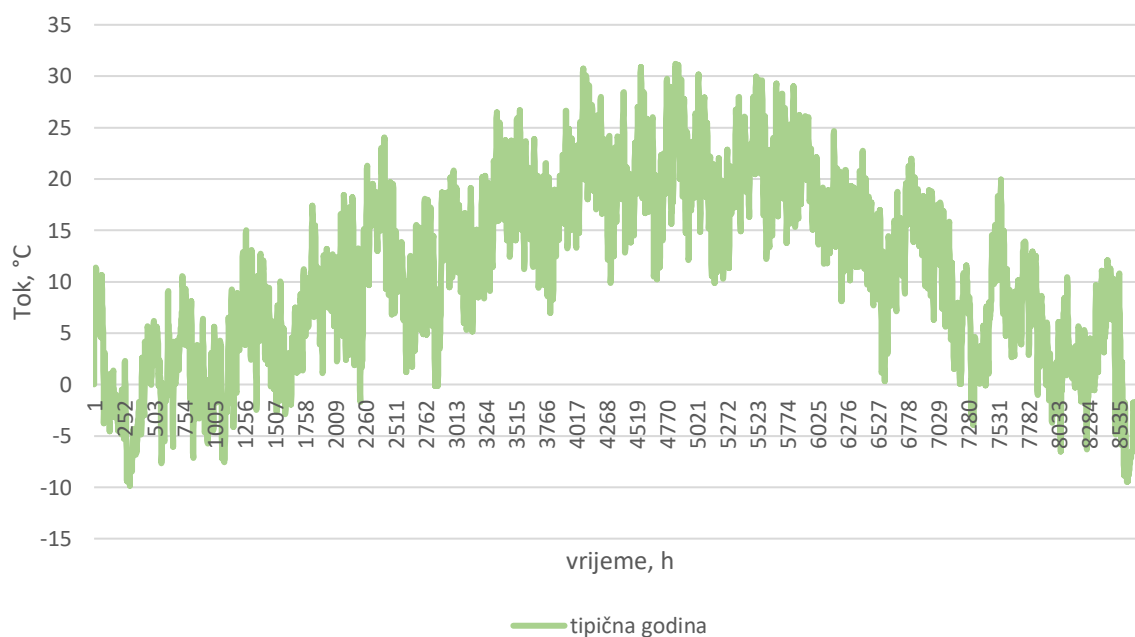
Ulazni podaci uključuju postavne temperature grijanja i hlađenja, vrijeme rada sustava, infiltraciju te unutarnje toplinske dobitke [6] prikazani su u Tablica 6. Infiltracijski gubici iznose $0,7 \text{ h}^{-1}$ za svaku zonu. Zgrada se koristi u vremenskom periodu od 6:00 do 20:00 h, od ponedjeljka do petka. Postavna temperatura za grijanje iznosi 20°C , dok za hlađenje iznosi 22°C . Grijanje i hlađenje nisu uključeni u periodima kada se zgrada ne koristi. Unutarnji toplinski dobitci u periodima korištenja zgrade iznose 10 W/m^2 , a ako se zgrada ne koristi, oni se ne uzimaju u obzir. Navedeni parametri vrijede za sve zone, osim unutarnjih dobitaka. Budući da peta zona obuhvaća hodnik i sanitarije, pretpostavlja se da ova zona nema značajnijih unutarnjih toplinskih dobitaka.

Tablica 6. Ulazni podaci

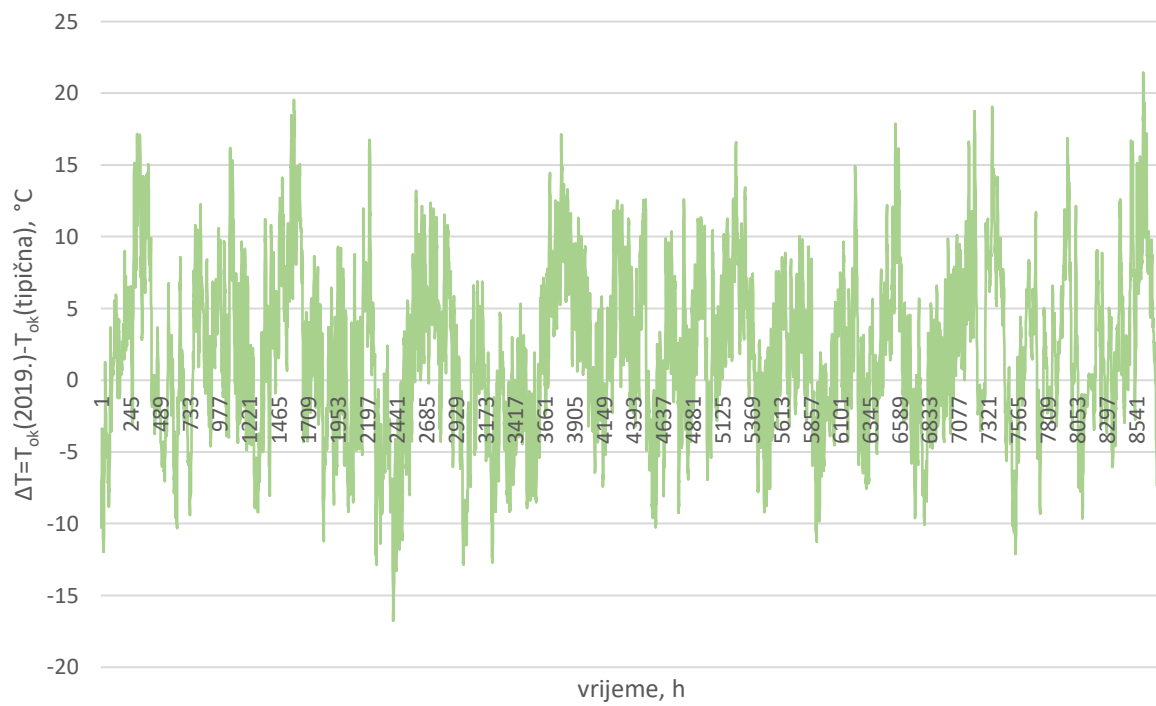
PARAMETAR	VRIJEDNOST
Infiltracija	$0,7 \text{ h}^{-1}$
Raspored korištenja zgrade	6:00 – 20:00 (5 dana u tjednu)
Postavna temperatura za grijanje	20°C
Postavna temperatura za hlađenje	22°C
Unutarnji toplinski dobitci u periodima korištenja zgrade	10 W/m^2
Unutarnji toplinski dobitci u periodima kada se zgrada ne koristi	0 W/m^2

3. METEOROLOŠKI PODACI NA LOKACIJI ZGRADE

Za meteorološke podatke korištene su satne vrijednosti za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb, koji su dobivene statističkom obradom podataka za 30 godina, te za 2019. godinu. Meteorološki podaci su ulazni parametar za energijsku simulaciju, a uključuju vanjsku temperaturu, relativnu vlažnost, fiktivnu temperaturu neba i tla, kut upada Sunčevog zračenja i Sunčevo zračenje. Slika 3. prikazuje godišnju promjenu vanjske temperature zraka, a Slika 4. oscilaciju temperature za 2019. godinu u odnosu na tipičnu godinu. Uočljivo je da je u 2019. godini prisutan prirast temperature tijekom cijele godine što izravno utječe na potrebnu i isporučenu energiju.



Slika 3. Promjena vanjske temperature tijekom tipične godine

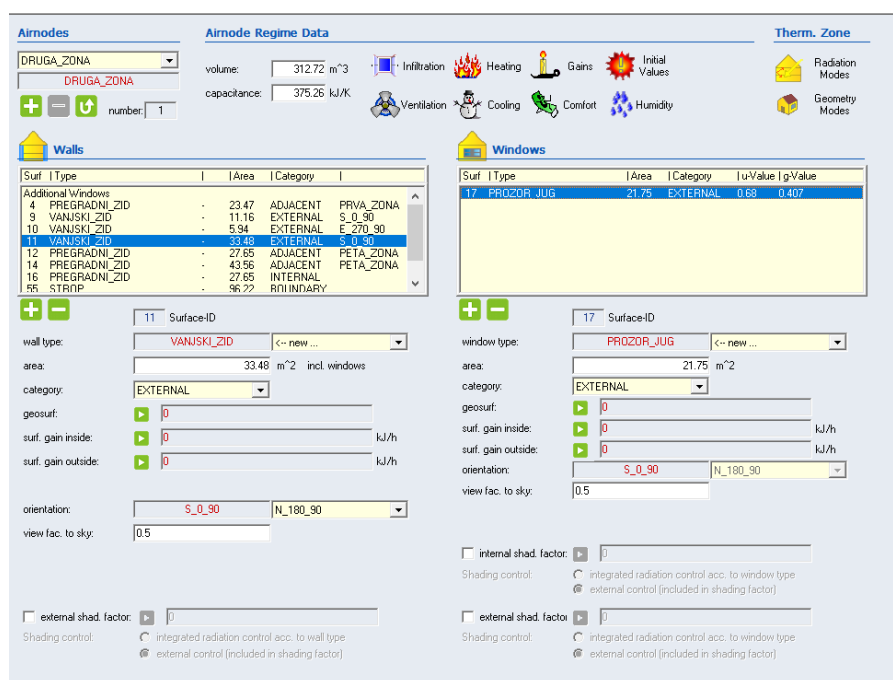


Slika 4. Temperaturna razlika između tipične i 2019. godine

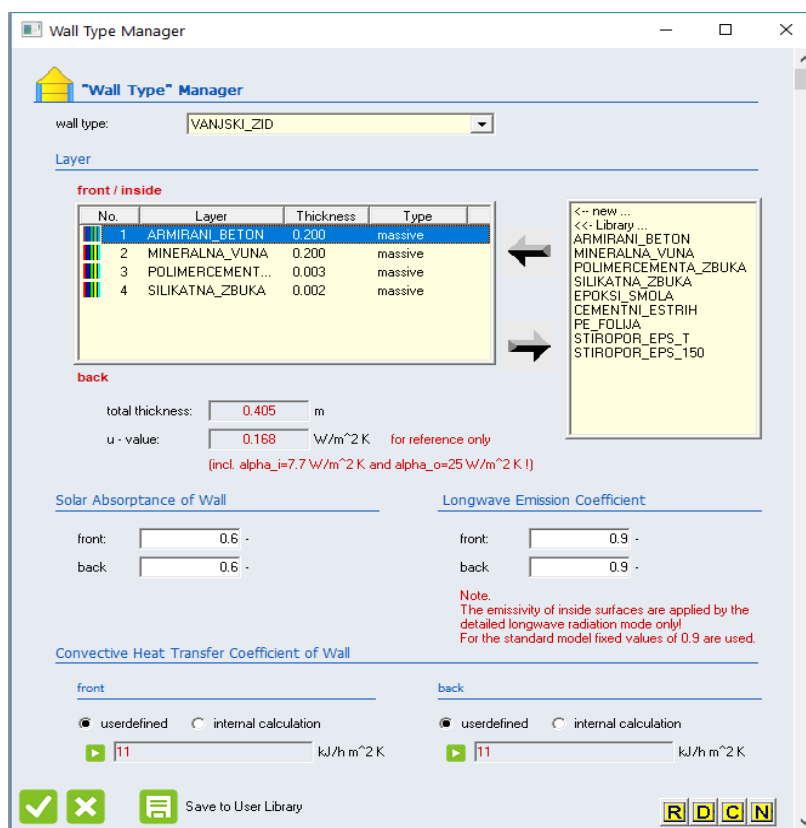
4. OPIS PROGRAMA ZA RAČUNALNE SIMULACIJE

4.1. Izrada energijskog modela zgrade

Za analizu potrebne energije za grijanje i hlađenje korišten je računalni program TRNSYS koji se koristi za dinamičke energetske simulacije. U nastavku je detaljno opisan način energijskog modeliranja zgrade u TRNSYS-u. Kod otvaranja TRNBuilda, prvo je potrebno definirati Zemljinu polutku te strane svijeta koje će biti korištene. Prilikom toga važno je obratiti pozornost na redoslijed definiranja strana svijeta koji odgovara redoslijedu pripremljenih meteoroloških podataka. Nakon toga, unose se podaci o geometriji i svojstvima slojeva koji čine pojedine zidove, uključujući toplinsku provodnost, specifični toplinski kapacitet, gustoću te debljinu sloja za što se koristi izbornik *Wall Type Manager* (Slika 6.). Zid može biti unutarnji (nalazi se unutar toplinske zone), vanjski (orijentiran prema vanjskom okolišu), susjedni (graniči s drugom toplinskom zonom) i adijabatski (nema izmjene topline kroz zid) (Slika 5.). Prilikom određivanja zida, odabire se *view to sky factor* koji govori o orijentaciji plohe prema nebu. Za vertikalne zidove vrijedi da je on 0,5 jer zid samo s jedne svoje strane orijentiran prema nebu, dok se za horizontalne površine (pod, strop) faktor uzima 1 jer je cijela površina orijentirana prema nebu. Na pojedinom zidu može se specificirati prozor koji se odabire na temelju podataka za g i U vrijednost (Tablica 4., Tablica 5.).



Slika 5. Primjer modeliranja druge zone u korisničkom sučelju TRNBuild



Slika 6. Definiranje slojeva zidova u izborniku Wall Type Manager

Osim definirane geometrije, toplinsku zonu određuju i drugi ulazni podaci, kao primjerice, postavne temperature i raspoloživi kapaciteti sustava grijanja i hlađenja, infiltracija te unutarnji toplinski dobici. Budući da se zgrada koristi u razdoblju od 6:00 do 20:00 h pet dana u tjednu potrebno je definirati raspored korištenja, za što je korišten izbornik *Schedule Type Manager*. U razdoblju rada škole, dakle od 6:00 do 20:00 h dodijeljen je faktor 1, dok je razdobljima kada se zgrada ne koristi (od 0:00 do 8:00 h te od 20:00 do 24:00 h) dodijeljen faktor 0. Time je definiran dnevni raspored u radnom tjednu od ponedjeljka do petka (Slika 77.). Subotom i nedjeljom sustav neće raditi, stoga je potrebno izraditi raspored vikendom koji će od 0:00 do 24:00 h imati faktor 0 (Slika 88.).

Schedule Type Manager

"Schedule Type" Manager

schedule type:

daily weekly

Daily

From	Until	Value
00:00	06:00	0.00
06:00	20:00	1.00
20:00	24:00	0.00

from until value

h:

min:

Slika 7. Definiranje dnevnog rasporeda korištenja zgrade u izborniku Shedule Type Manager

Schedule Type Manager

"Schedule Type" Manager

schedule type:

daily weekly

Daily

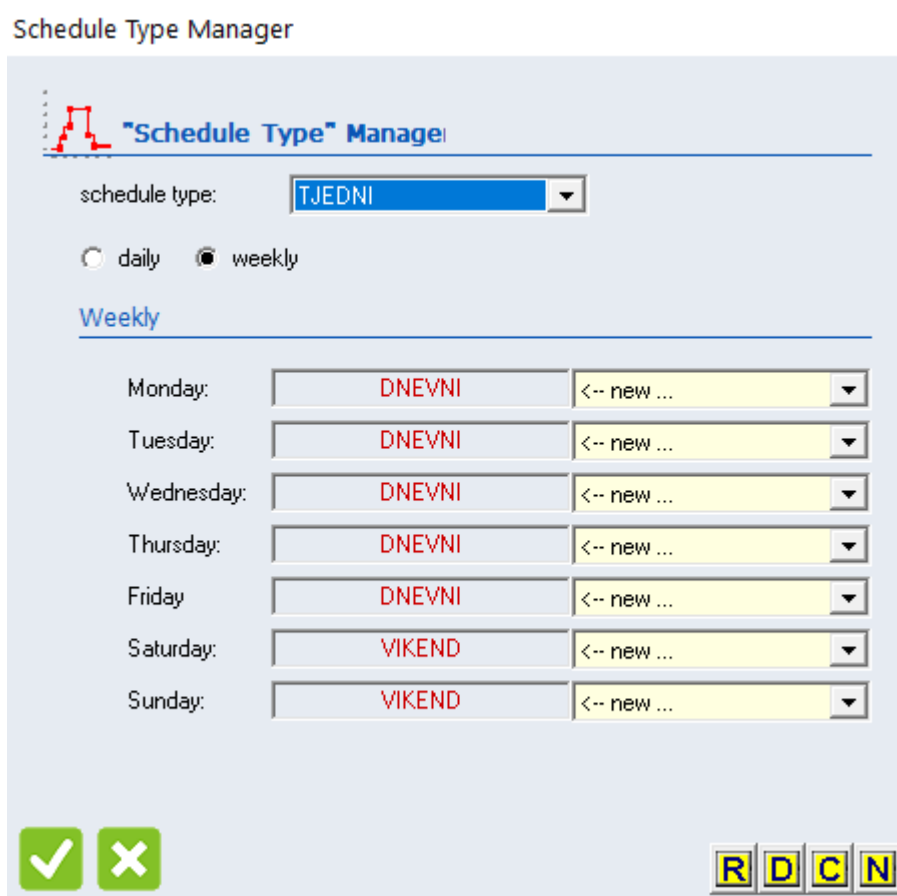
From	Until	Value
00:00	24:00	0.00

from until value

h:

min:

Slika 8. Definiranje tjednog rasporeda korištenja zgrade u izborniku Shedule Type Manager



Slika 9. Definiranje tjednog rasporeda korištenja zgrade u izborniku Schedule Type Manager

Tjedni raspored sastoji se od dnevnog koji uključuje dane od ponedjeljka do petka, dok je subotom i nedjeljom primijenjen raspored vikendom (Slika 9.). Postavke sustava grijanja, hlađenja te unutarnji dobici određuju se na temelju podataka danih u Tablica 6. te implementacijom tjednog rasporeda. Postavna temperatura grijanja opisana je jednadžbom (1):

$$T_{set} = 35 \cdot X - 15 \quad (1)$$

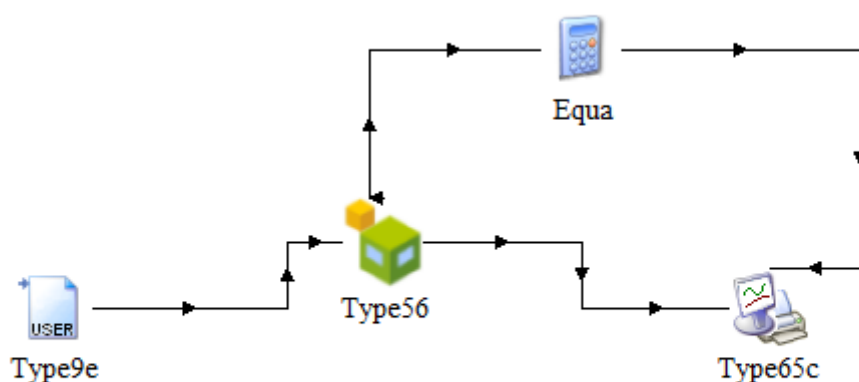
Za vrijeme rada zgrade raspored u tjednu definiran je faktorom $X=1$ pa se rješavanjem jednadžbe dobije vrijednost 20°C . Kada sustav ne radi faktor će biti 0 te postavna temperatura iznosi -15°C . Time je modeliran način rada u kojem je sustav grijanja u potpunosti isključen tijekom neradnih sati, s obzirom da se -15°C u zgradi nikada neće ostvariti. Za hlađenje postavna temperatura iznosi 22°C u radnim satima, odnosno 50°C ako sustav ne radi.

Analogno grijanju, određuje se jednadžba koja opisuje postavnu temperaturu za hlađenje (2). Pretpostavlja se da se unutarnji dobici, također definirani primjenom rasporeda korištenja, dijele se na 50% konvektivni udio te na 50% udio zračenjem. Infiltracija je određena neovisno o rasporedu rada te poprima konstantu vrijednost $0,7 \text{ h}^{-1}$.

$$T_{set} = -28 \cdot X + 50 \quad (2)$$

4.2. Opis rada u korisničkom sučelju TRNSYS-a Simulation Studio

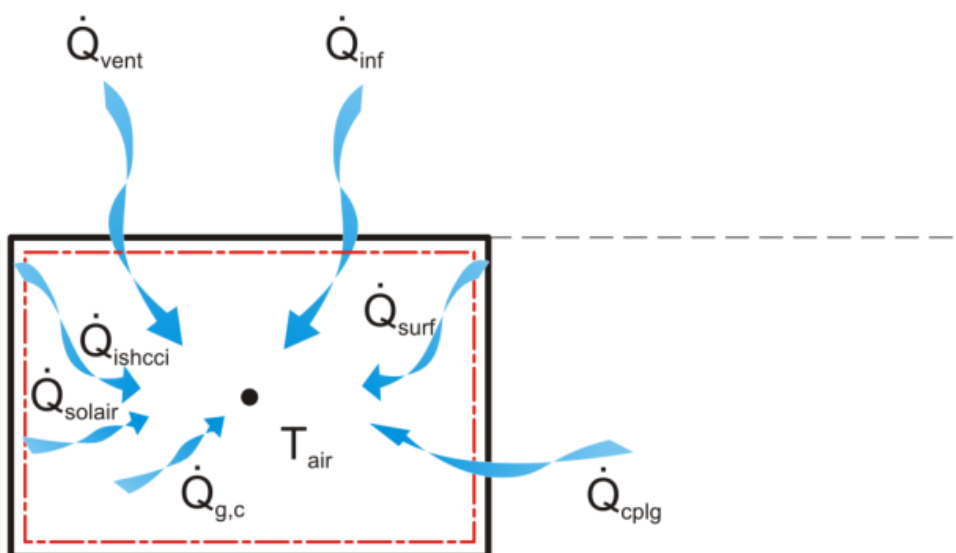
Nakon što su definirane sve zone, potrebno je provesti simulaciju za potrebnu energiju za grijanje i hlađenja za tipičnu meteorološku godinu i 2019. godinu u programskom sučelju Simulation Studio. U Simulation Studio povezuju se komponente tako da izlazni podaci jedne komponente postaju ulazni druge komponente (Slika 10.). Ulazni parametri za komponentu *Type56*, koja omogućuje dinamičku simulaciju višezonske zgrade, definiraju se u korisničkom sučelju TRNBuild. Meteorološki podaci na lokaciji zgrade, a koji su ulazni podaci za *Type56* učitavaju se korištenjem komponente *Type9e*. Ispis rezultata omogućuje komponenta *Type65c*, a s obzirom da se vrijednost potrebne energije ispisuje u jedinici kJs, pomoću dodatka *Equa* kJs se preračunaju u kWh. Simulacija je provedena za 8760 h, s vremenskim korakom od 1 h.



Slika 10. Prikaz povezivanja komponenti simulacije u korisničkom sučelju Simulation Studio

4.3. Opis matematičkog modela višezonske zgrade (*Type56*) u TRNSYS-u

Komponenta *Type56* [1] omogućuje dinamičku simulaciju višezonske zgrade na temelju ulaznih parametara, a koji se definiraju korištenjem korisničkog sučelja TRNBuild (opisano u poglavlju 3.1.). Prostor zgrade podijeljen je na toplinske zone koje povezuju zajedničke karakteristike. Za svaku se toplinsku zonu postavlja energetska bilanca za sve unutarnje i vanjske plohe te za zrak u prostoriji (Slika 11.).



Slika 11. Bilanca toplinskih tokova za zrak u prostoriji [1]

4.3.1. Konvektivni toplinski tok na zonu

Ukupni konvektivni toplinski tok izmijenjen sa zonom definiran je jednačbom (3). Pojedini članovi jednačbe objasniti će se u nastavku.

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{solair,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{ISHCCI,i} \quad [W] \quad (3)$$

gdje su:

$\dot{Q}_{surf,i}$ konvektivni toplinski tok od unutarnjih površina zone [W]

$\dot{Q}_{vent,i}$ ventilacijski toplinski tok prema zoni [W]

$\dot{Q}_{inf,i}$	infiltracijski toplinski tok vanjskog zraka [W]
$\dot{Q}_{cplg,i}$	infiltracijski toplinski tok zraka iz susjednih zona [W]
$\dot{Q}_{g,c,i}$	konvektivni dobici od unutrašnjih izvora (ljudi, oprema) [W]
$\dot{Q}_{solair,i}$	dio Sunčevog zračenja koje ulazi u zonu kroz vanjske prozore i trenutno se pretvara u konvektivne toplinske dobitke zone [W]
$\dot{Q}_{ISHCCI,i}$	apsorbirano Sunčevo zračenje na unutarnjim zasjenjenjima zone koje direktno prelazi u konvektivne toplinske dobitke zone [W]

4.3.2. Prijenos topline provođenjem

Jednadžbe koje opisuju prijenos topline provođenjem za unutarnju (5) i vanjsku (4) stranu zida dane su jednadžbama u kojima eksponent k označava vremenski trenutak. U početnom trenutku $k=0$, a za sve prethodne trenutke vrijedi $k>1$, dok su koeficijenti a , b , c , i d izračunati u TRNBuildu u ovisnosti o svojstvima zidova (TRNSYS ih izračunava preko prijenosnih funkcija).

$$q_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot q_{s,o}^k \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (4)$$

$$q_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot q_{s,i}^k \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (5)$$

gdje su:

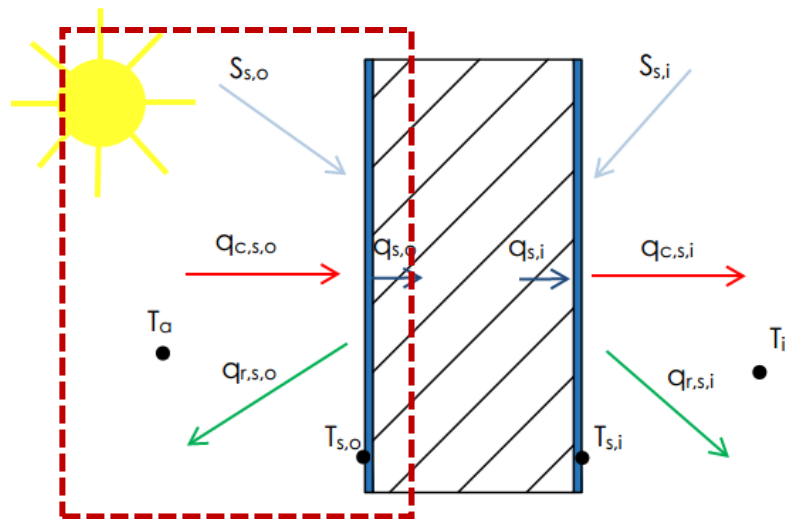
$q_{s,o}$ toplinski tok na vanjskoj površini uslijed provođenja [W/m^2]

$q_{s,i}$ toplinski tok na unutarnjoj površini uslijed provođenja [W/m^2]

$T_{s,i}$ temperatura zraka u toplinskoj zoni [K]

$T_{s,o}$ temperatura okolišnog zraka [K]

4.3.3. Toplinska bilanca na vanjsku stranu zida



Slika 12. Toplinska bilanca na vanjsku stranu zida

gdje su:

- $S_{s,o}$ toplinski tok izmijenjen zračenjem te apsorbiran na vanjskoj površini (dobici od Sunca) [W/m^2]
- $q_{c,s,o}$ konvektivni toplinski tok s vanjskog zraka na vanjsku površinu [W/m^2]
- $q_{r,s,o}$ toplinski tok izmijenjen zračenjem između neba i tla te vanjske površine [W/m^2]
- $q_{s,o}$ toplinski tok na vanjskoj površini uslijed provođenja [W/m^2]
- $T_{s,o}$ temperatura na vanjskoj površini zida [K]

Ako se postavi toplinska bilanca na vanjsku stranu zida (Slika 12.) mora vrijediti da je toplinski tok provođenja jednak zbroju konvektivnog toplinskog toka i toplinskih dobitaka umanjeni za dio koji se odnosi na toplinski tok izmijenjen zračenjem. Dugovalno zračenje s nebom razmatra se koristeći fiktivnu temperaturu neba, T_{sky} koja je ulazni parametar u modelu *Type56*. Osim toga, definira se i fiktivna temperatura tla te vidni faktor za svaku vanjsku površinu. Ukupna toplinska energija jednaka je zbroju konvektivnog prijelaza topline i zračenja.

(6)

$$\dot{q}_{s,o} = \dot{q}_{comb,s,o} + S_{s,o}$$

(7)

$$\dot{q}_{c,s,o} = h_{conv,s,o} \cdot (T_{a,s} - T_{s,o})$$

(8)

$$\dot{q}_{r,s,o} = \sigma \cdot \varepsilon_{s,o} \cdot (T_{s,o}^4 - T_{fsky}^4)$$

(9)

$$\dot{q}_{comb,s,o} = \dot{q}_{c,s,o} - \dot{q}_{r,s,o}$$

(10)

$$T_{fsky} = (1 - f_{s,sky}) \cdot T_{sgrd} - f_{s,sky} \cdot T_{sky}$$

gdje su:

$\dot{q}_{comb,s,o}$	kombinirani toplinski tok koji uključuje konvekciju i zračenje [w/m ²]
$h_{conv,s,o}$	koeficijent za konvektivni prijenos topline na vanjskoj površini [w/m ² k]
f_{sky}	vidni faktor [-]
T_{sky}	fiktivna temperatura neba [k]
T_{sgrd}	fiktivna temperatura tla [k]
$\varepsilon_{s,o}$	emisijski faktor za dugovalno zračenje vanjske površine zida [-]
σ	Stephan-Boltzmannova konstanta [W/m ² K ⁴]

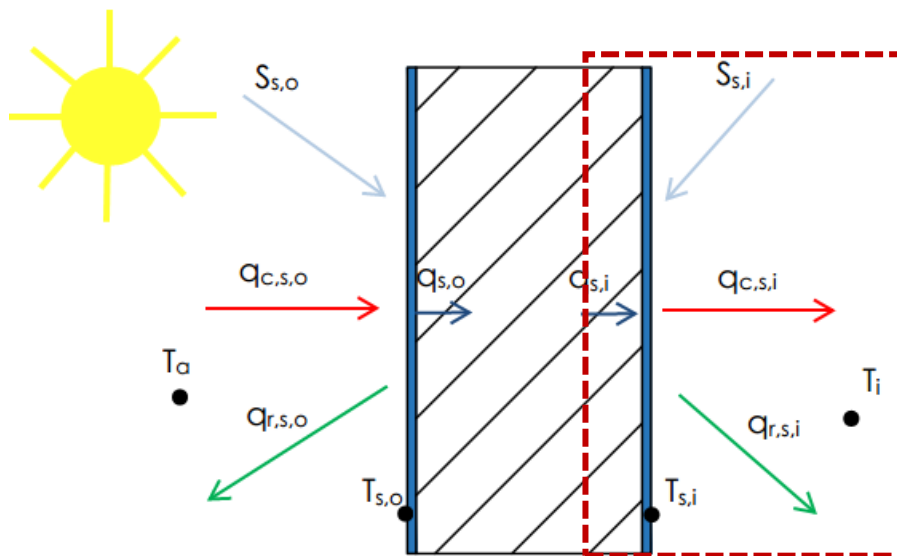
4.3.4. Toplinska bilanca na unutarnju stranu zida

Iz toplinske bilance provedene na unutarnjoj strani zida (Slika 13.) proizlazi da je toplinski tok uslijed provođenja jednak sumi konvektivnog toplinskog toka, zračenja, toplinskih dobitaka uzrokovanih Sunčevim zračenjem, ali i od unutarnjih objekata, poput ljudi, rasvjete i uređaja. Osim toga, pridodaje se i dodatni toplinski tok *Wallgain* koji definira korisnik programa. U obzir može uzimati nejednolikost intenziteta Sunčevog zračenja tijekom dana kao posljedicu promjenjivosti položaja Sunca ili može predstavljati pojednostavljeni način modeliranja podnog grijanja ili hlađenja.

$$q_{s,i} = q_{comb,s,i} + S_{s,i} + WG \quad (11)$$

gdje su:

- $q_{s,i}$ toplinski tok provođenjem na unutarnjoj strani zida [W/m^2]
- $q_{comb,s,i}$ ukupni toplinski tok izmijenjen konvekcijom i zračenjem [W/m^2]
- $S_{s,i}$ toplinski tok izmijenjen zračenjem te apsorbiran na unutarnjoj površini (dobici od Sunca i unutarnji dobiti) [W/m^2]
- WG toplinski dobiti definirani od strane korisnika programa [W/m^2]



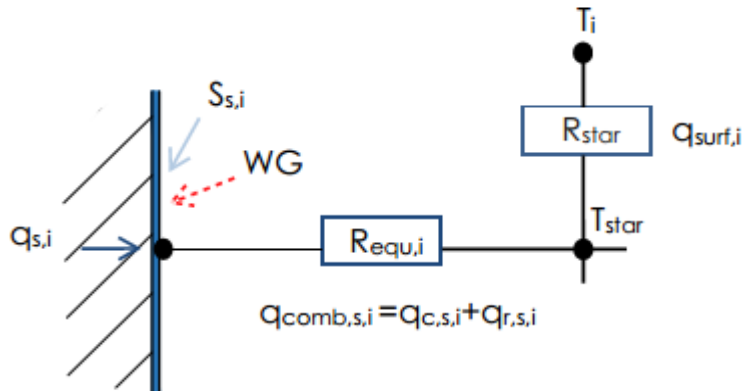
Slika 13. Toplinska bilanca na unutarnju stranu zida

gdje su:

- $S_{s,i}$ toplinski tok izmijenjen zračenjem te apsorbiran na unutarnjoj površini (dobici od Sunca i unutarnji dobiti) [W/m^2]
- $q_{c,s,i}$ konvektivni toplinski tok između unutarnje površine zida i unutarnjeg zraka [W/m^2]

$q_{r,s,i}$	toplinski tok izmijenjen zračenjem između unutarnje površine i ostalih površina [W/m ²]
$q_{s,i}$	toplinski tok na unutarnjoj površini uslijed provođenja [W/m ²]
$T_{s,i}$	temperatura na unutarnjoj površini zida [k]
T_a	temperatura vanjskog zraka [k]
T_i	temperatura unutarnjeg zraka [k]

Dugovalno zračenje između površina u zoni i konvektivni toplinski tok između unutarnje površine zida i zraka u prostoriji aproksimira se koristeći *Star network* metodu (Slika 14.). Model je ograničen na jedan volumen zraka (*airnode*) te koristi fiktivni temperaturi čvor T_{star} i fiktivni otpor prijelazu topline R_{star} kojim su povezani konvektivni toplinski tok i toplinski tok zračenjem prema ostalim zidovima i prozorima.



Slika 14. Star network model

$$q_{comb,s,i} = q_{c,s,i} + q_{r,s,i} \quad (12)$$

$$q_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equ,i} \cdot A_{s,i}} \cdot (T_{s,i} - T_{star}) \quad (13)$$

$$Q_{surf,i} = \frac{1}{R_{STAR,i}} \cdot (T_{star} - T_i) \quad (14)$$

gdje su:

$q_{comb,s,i}$ ukupni toplinski tok izmijenjen konvekcijom i zračenjem [w/m^2]

$R_{equ,i}$ ekvivalenti otpor prijelazu topline [$\text{m}^2\text{k}/\text{w}$]

$A_{s,i}$ površina unutarnjeg zida [m^2]

T_{star} fiktivna temperatura u fiktivnom čvoru [k]

$R_{STAR,i}$ fiktivni otpor prijelazu topline u fiktivnom čvoru [$\text{m}^2\text{k}/\text{w}$]

4.3.5. Ventilacija i infiltracija

Ventilacija i infiltracija također utječu na energetska bilancu toplinske zone. Toplinski tok ventilacijom ovisi o masenom protoku zraka, specifičnom toplinskom kapacitetu zraka te razlici temperature između dobavnog zraka i zraka u zoni. Infiltracijski toplinski tok zone odnosi se na nekontrolirani ulaz vanjskog zraka u promatranu toplinsku zonu.

Toplinski tok ventilacijom:

$$Q_{v,i} = \sum m_{v,k,i} \cdot c_p \cdot (T_{v,k} - T_i) \quad (15)$$

gdje su:

$m_{v,k,i}$ maseni protok zraka doveden sustavom ventilacije [kg/s]

c_p specifični toplinski kapacitet zraka [$\text{J}/(\text{kgK})$]

$T_{v,k}$ temperatura zraka dovedenog ventilacijom [K]

Toplinski tok infiltracijom:

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{m}_{inf,i} \cdot c_p \cdot (T_a - T_i) \quad (16)$$

gdje su:

$\dot{m}_{inf,i}$ maseni protok infiltriranog vanjskog zraka [kg/s]

T_a temperatura vanjskog zraka [K]

4.3.6. Infiltracijski dobici od susjedne zone

Ako postoji zid ili prozor unutar toplinske zone kroz koji postoje infiltracijski dobici ili postoje adijabatski rubni uvjet definira se toplinski tok označen s $Q_{cplg,i}$ (eng. *coupling*).

Coupling označava maseni protok koji uđe u prostoriju kroz površine, a pretpostavlja se da jednaka količina zraka mora izaći pri temperaturi toplinske zone.

$$Q_{cplg,i} = \sum \sum m_{cplg,s} \cdot C_P \cdot (T_j - T_i) + \dots + \sum m_{cplg,s} C_P \cdot (T_{b,s} - T_i) \quad (17)$$

gdje su:

\dot{m}_{cplg} maseni protok zraka iz susjednih zona [kg/s]

T_j temperatura zraka susjedne zone j [K]

$T_{b,s}$ temperatura deifinirana kao rubni uvjet [K]

4.3.7. Sunčevo zračenje

Sunčevo zračenje može biti difuznog i direktnog karaktera. Prilikom upada Sunčeva zračenja u prostoriju kroz prozore (Q_{solair}), ne dolazi do direktnog prelaska u konvektivan toplinski tok, već uvijek postoji posrednik koji izmijenjuje toplinu konvekcijom s određenim vremenskim odmakom. Kako bi se zanemarilo postojanje posrednika i pojednostavio model, uvodi se faktor f_{solair} koji određuje udio zračenja koji se trenutno pretvara u konvektivni toplinski tok.

$$\dot{Q}_{solair} = f_{solair} \cdot (I_{dif} + I_{dir}) \quad [\text{W}] \quad (18)$$

gdje su:

f_{solair} faktor koji određuje koliko se ukupnog zračenja pretvara u konvektivno [-]

I_{dif} difuzno Sunčevo zračenje preneseno kroz prozore [W]

I_{dir} direktno Sunčevo zračenje preneseno kroz prozore [W]

Preostalo direktno Sunčevo zračenje raspoređuje se po unutarnjim površinama, a opisuje se pomoću GEOSURF koeficijenta koje definira korisnik programa. Ukoliko su GEOSURF vrijednosti svih unutarnjih ploha jednake nuli, svo direktno Sunčevo zračenje tretira se kao difuzno Sunčevo zračenje. Distribucija difuznog Sunčevog zračenja određuje se prema sljedećoj jednadžbi:

$$f_{dif,s,s} = \frac{(1 - \rho_{dif,s}) \cdot A_s}{\sum_{surfaces} (1 - \rho_{dif,s}) \cdot A_s} \quad [-] \quad (19)$$

gdje su:

$f_{dif,s,s}$ površinski težinski faktor propusnosti i apsorpcije za raspodjelu difuznog zračenja [-]

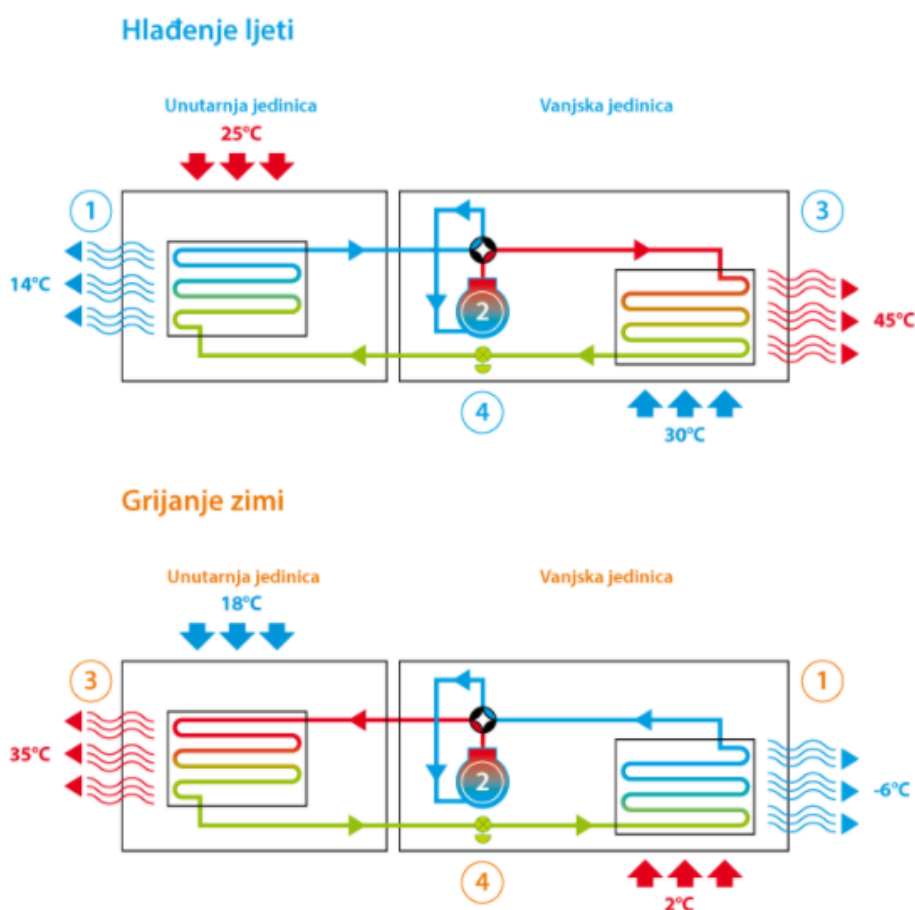
$\rho_{dif,s}$ faktor refleksije za difuzno Sunčevo zračenje plohe zone [-]

A_s površina promatrane plohe [m²]

5. MODELIRANJE DIZALICE TOPLINE ZRAK-VODA

5.1. Rad dizalice topline

Dizalica topline proizvodi ogrjevnu, odnosno rashladnu energiju. Glavne komponente koje sadrži rashladni, odnosno ogrjevni proces su unutarnja, vanjska jedinica, kompresor te prigušni ventil (Slika 15.). Prilikom hlađenja unutarnja jedinica koristi se kao isparivač u kojem radna tvar primajući toplinu od vode isparuje. Nakon toga se radna tvar kompresorom tlači na tlak kondenzacije, a oslobođena toplina u kondenzatoru predaje se vanjskom zraku. Prigušivanjem, radna tvar se dovodi do tlaka isparivanja. Prekretni ventil omogućuje preokretanje procesa iz hlađenja u grijanje pri čemu se uloge isparivača i kondenzatora izmijene.



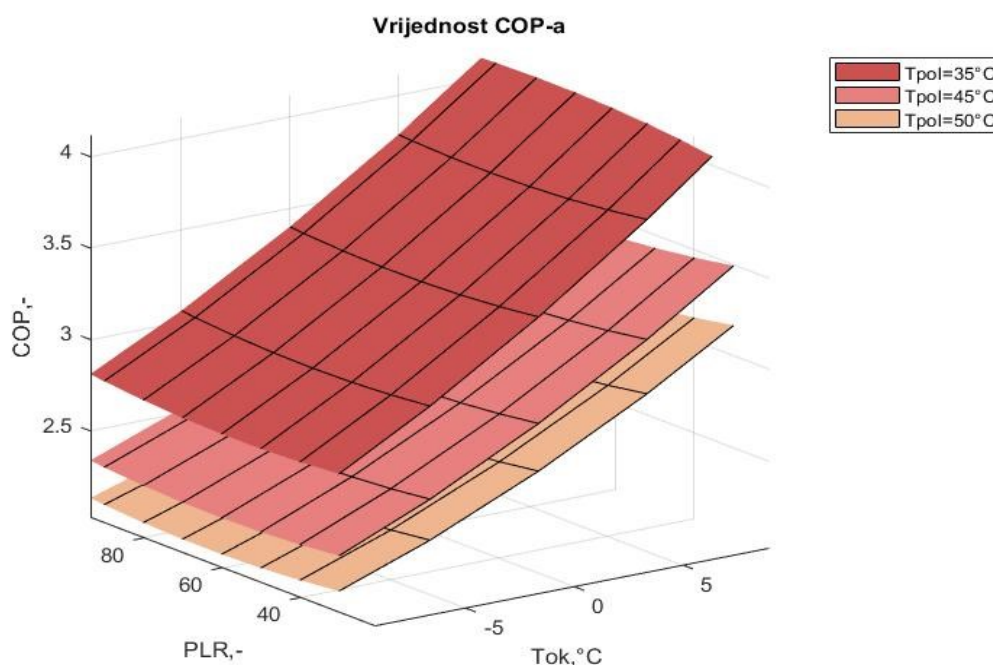
Slika 15. Shema rada dizalice topline zrak-voda [4]

5.1.1. Izračun satnih vrijednosti faktora grijanja (COP)

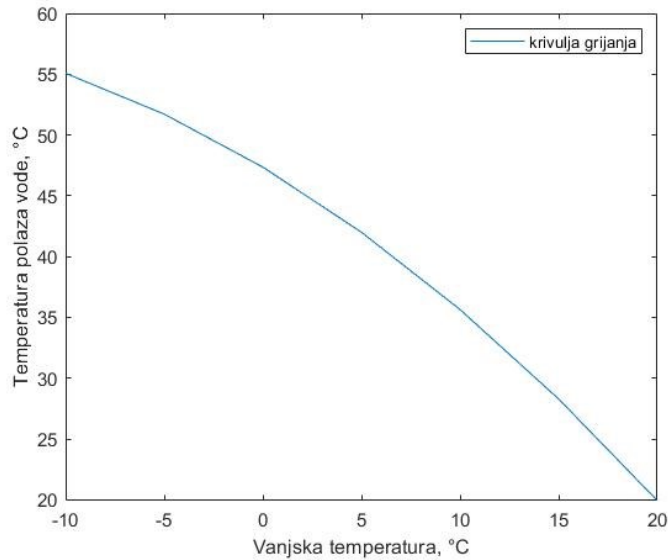
Učinkovitost dizalice topline u režimu grijanja iskazuje se faktorom grijanja (COP) koji nije konstantan. COP ovisi o vanjskoj temperaturi zraka (T_{ok}), temperaturi polaza vode (T_{pol}) te djelomičnom opterećenju (PLR) dizalice topline. Na temelju podataka proizvođača Daikin za vrijednosti COP -a u 48 mjernih točaka, razvijen je algoritam u MATLAB-u [I] za interpolaciju podataka u ovisnosti o pogonskim parametrima. Drugim riječima, algoritam omogućuje izračun COP -a u svakom satu u godini u ovisnosti o satnim vrijednostima relevantnih parametara (T_{ok} , T_{pol} te PLR) (Slika 16.).

U radu je pretpostavljeno da se temperatura polaza vode regulira prema krivulji grijanja [7] (Slika 17.). Za vanjsku temperaturu su korišteni podaci za tipičnu meteorološku godinu i za 2019. godinu, s ciljem analize utjecaja promjene temperature na COP , a posljedično i na isporučenu energiju.

S obzirom da dimenzioniranje komponentni sustava nije bilo u opsegu ovog rada, pretpostavljeno je da dizalica taopline radi na konstantnom djelomičnom opterećenju od 50%.



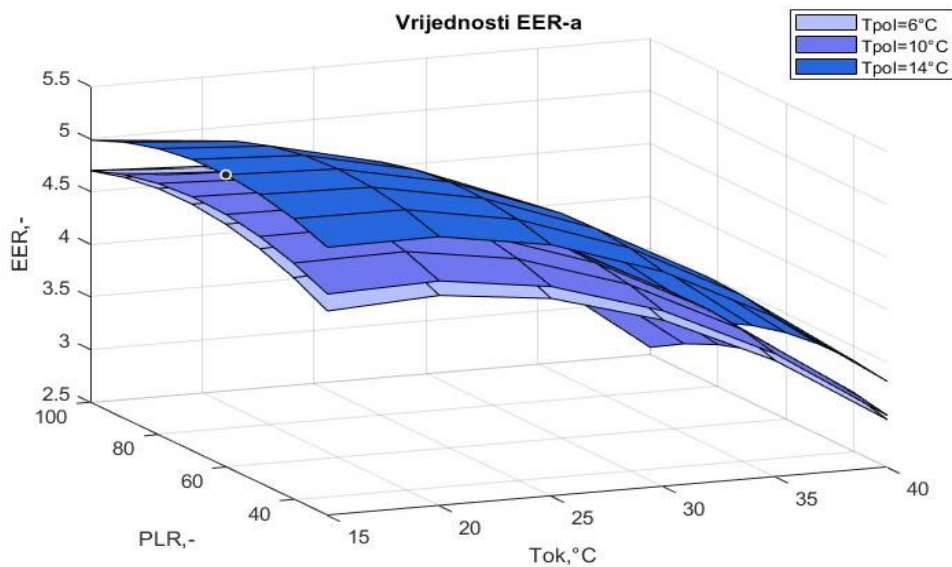
Slika 16. Vrijednosti COP -a u ovisnosti o temperaturi okoliša, temperature polaza vode i djelomičnom opterećenju



Slika 17. Krivulja za radijatorsko grijanje

5.1.2. Izračun satnih vrijednosti faktora hlađenja (*EER*)

Faktor hlađenja (*EER*) ovisi o vanjskoj temperaturi zraka (T_{ok}), temperaturi polaza vode (T_{pol}) te djelomičnom opterećenju (*PLR*) dizalice topline. Tipičan režim za hlađenje je 12/7°C, a temperatura od 7°C uzima se kao konstanta vrijednost, a pretpostavljeno je da dizalica topline radi na konstantom djelomičnom opterećenju od 50%. Analogno *COP*-u, dobiva se i algoritam za izračunavanje *EER*-a u svakom satu u godini (Slika 18.).

Slika 18. Vrijednosti *EER*-a u ovisnosti o temperaturi okoliša, temperature polaza vode i djelomičnom opterećenju

6. REZULTATI

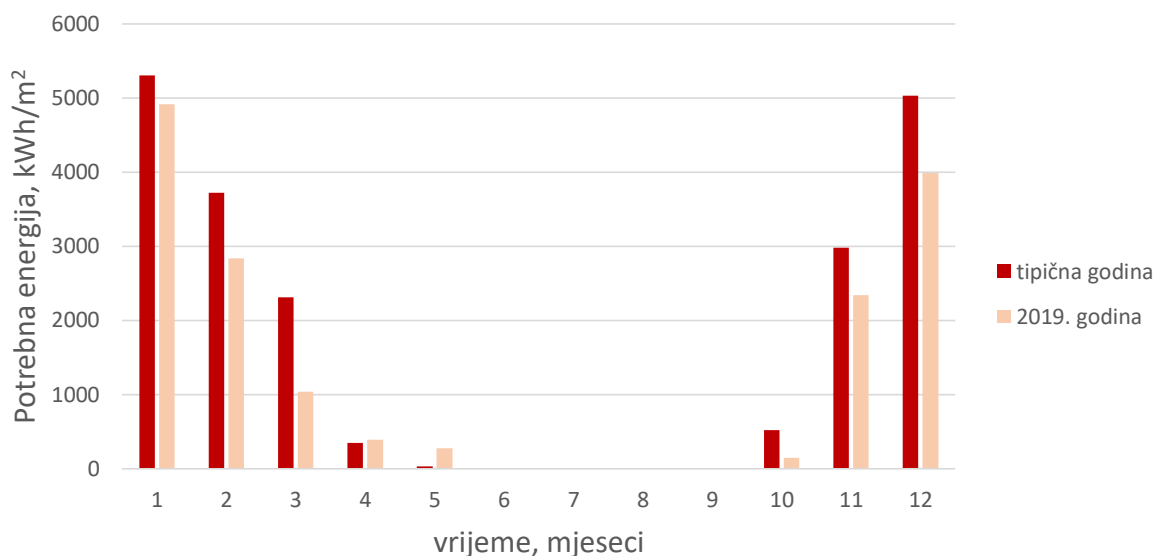
6.1. Potrebna energija za grijanje i hlađenje

Nakon provedene simulacije u programu TRNSYS dobivena je potrebna energija za grijanje i hlađenje za svaki sat u godini u pojedinoj toplinskoj zoni. Na godišnjoj razini potrebna energija za grijanje za tipičnu meteorološku godinu znosi 39 kWh/m², dok za 2019. godinu iznosi 30,73 kWh/m² (Tablica 7.). Potrebna energija za grijanje manja je za 21% u odnosu na tipičnu meteorološku godinu, a veća za 13% za hlađenje. Ovo je posljedica činjenice da su za zimski period vanjske temperature tijekom 2019. godinu više od temperatura za tipičnu meteorološku godinu, što izravno utječe na potrebnu energiju za grijanje.

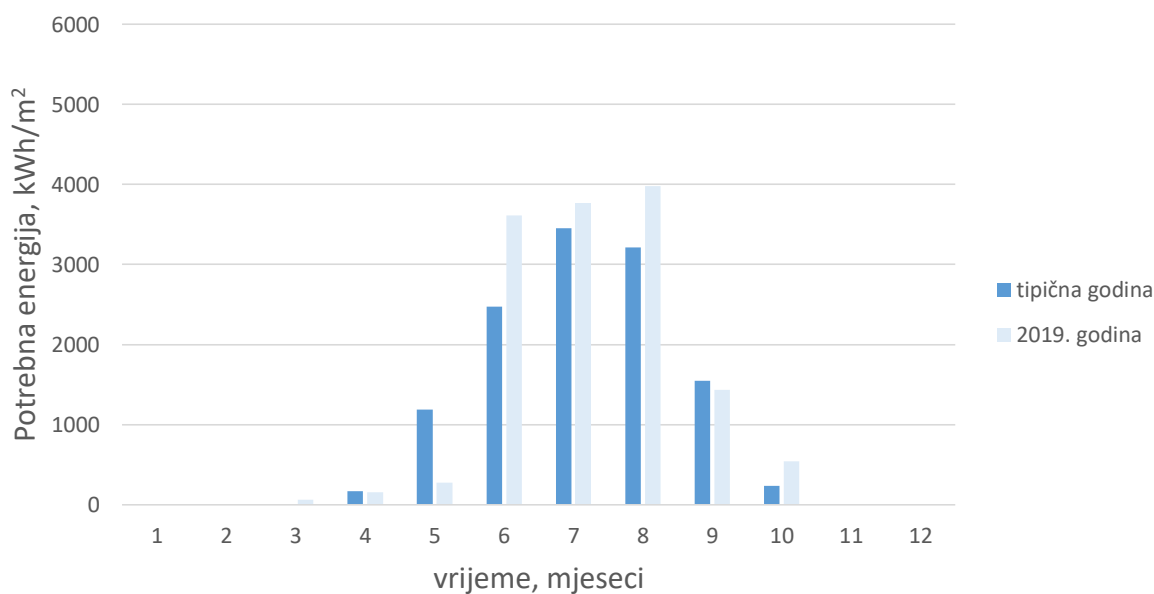
Tablica 7. Potrebna ukupna energija

Potrebna ukupna energija	Grijanje		Hlađenje	
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²
Tipična godina	20243	39	12281	24
2019. godina	15918	31	13835	27

Promatrajući rezultate za potrebnu energiju za grijanje po mjesecima također se uočava da je potreba za 2019. godinu niža za sve mjesece u kojima je potrebno grijanje (Slika 19.). Iz rezultata potrebne energije za hlađenje, vidljivo je da je za svibanj i rujan ona viša za tipičnu meteorološku godinu od potrebne energije za 2019. godinu. U lipnju, srpnju i kolovozu izraženija je potrebna energija za 2019. godinu (Slika 20.).

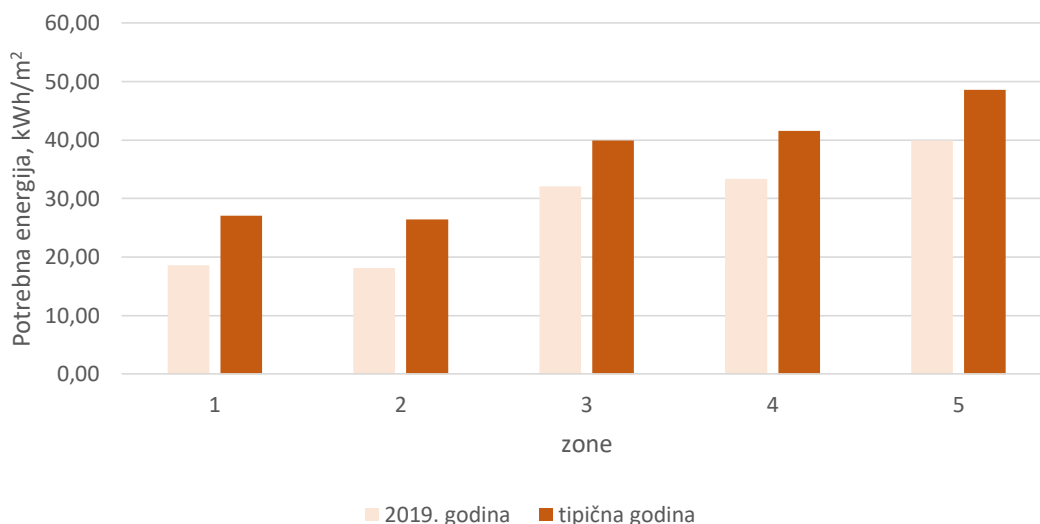


Slika 19. Mjesečna raspodjela potrebne energije za grijanje



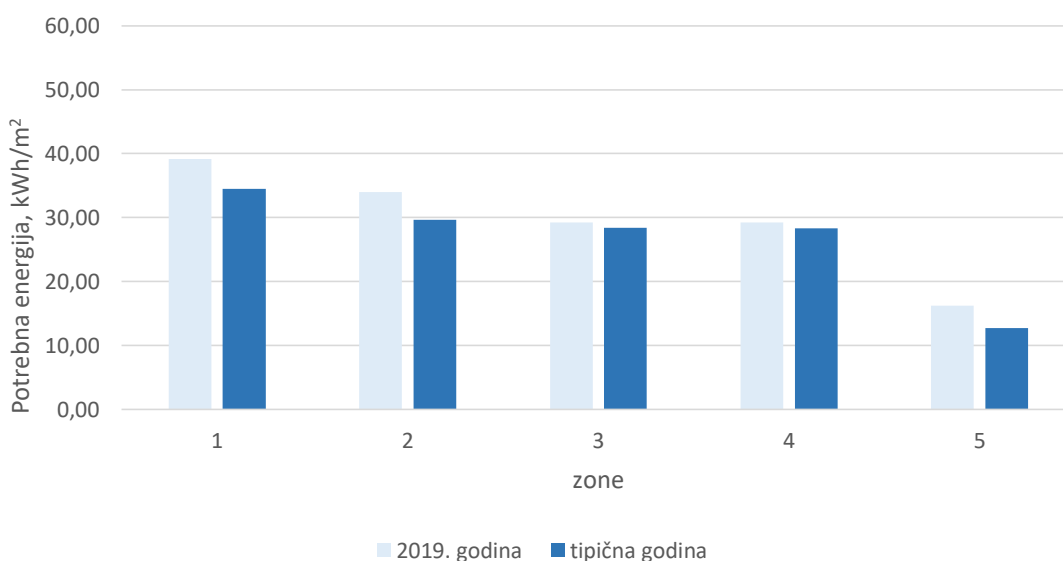
Slika 20. Mjesečna raspodjela potrebne energije za hlađenje

Najviši zahtjevi za potrebnom energijom su za tipičnu godinu u petoj zoni ($48,6 \text{ kWh/m}^2$) u kojoj se zanemaruju unutarnji toplinski dobici (Slika 21.). Prva i druga zona imaju manju potrebu za grijanje od $27,04$ i $26,44 \text{ kWh/m}^2$ za tipičnu godinu jer se nalaze na južnoj strani pa Sunčevo zračenje doprinosi zagrijavanju prostorija. Za meteorološke podatke za 2019. godinu uočava se da je potrebna energija za grijanje osjetno niža za sve zone.



Slika 21. Potrebna energija za grijanje po zonama

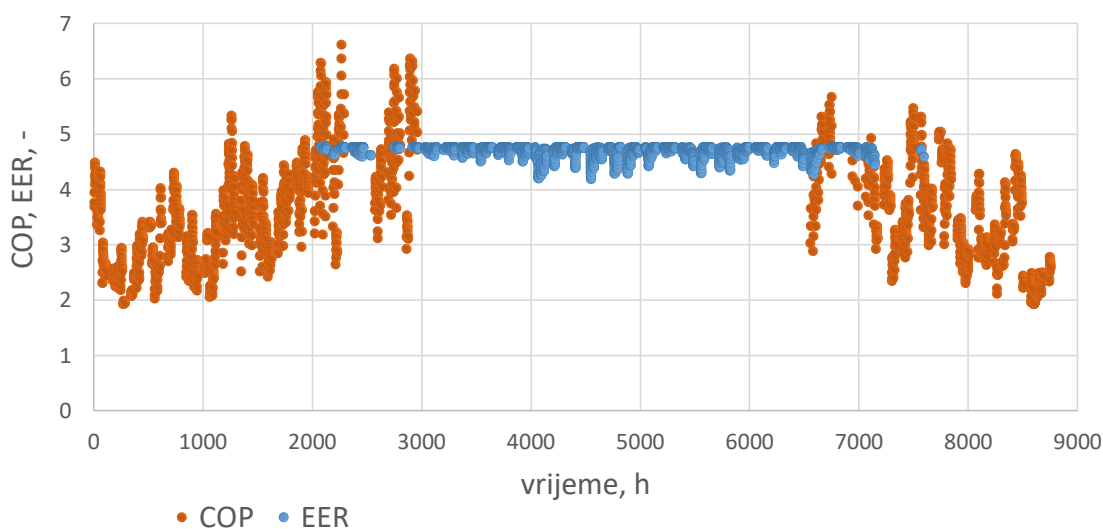
Utjecaj orijentacije te ulaznih parametara očituje se i u potrebnoj energiji za hlađenje (Slika 22.). Prva i druga zona, koje se nalaze na južnoj strani, imaju potrebu za hlađenjem od 34,44 kWh/m², odnosno 29,65 kWh/m². Peta zona koja nema unutarnjih dobitaka i nije izložena Sunčevoj energiji, ima nižu potrebu za hlađenje od 12,73 kWh/m². Posljedica izraženijeg porasta vanjske temperature u 2019. godini jest niža potrebna energija za sve zone.



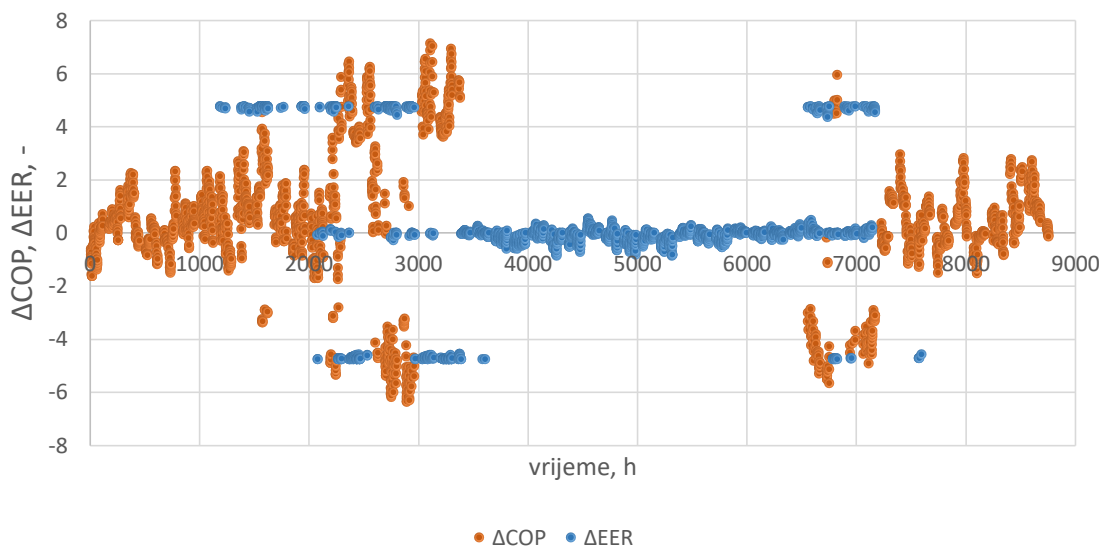
Slika 22. Potrebna energija za hlađenje po zonama

6.2. Isporučena energija za grijanje i hlađenje

Slika 23. prikazuje satne vrijednosti faktora grijanja i hlađenja za tipičnu meteorološku godinu. Zbog ovisnosti temperatura polaza vode o vanjskoj temperaturi, oscilacije COP -a puno su izraženije, dok su zbog konstantne vrijednosti temperaturnog režima kod hlađenja oscilacije EER -a manje zamjetne. Slika 24. prikazuje promjenu COP -a i EER -a za 2019. godinu u odnosu na tipičnu meteorološku godinu. Vrijednosti COP -a vidljivo su veće za 2019. godinu u odnosu za tipičnu meteorološku godinu, dok su razlike najviše izražene tijekom proljeća i jeseni. Budući da izračunate COP i EER vrijednosti direktno utječu na isporučenu energiju, detaljnija analiza njihovog utjecaja provodi se na rezultatima za isporučenu energiju po mjesecima za tipičnu i 2019. godinu.



Slika 23. Satne vrijednosti COP -a i EER -a za tipičnu meteorološku godinu

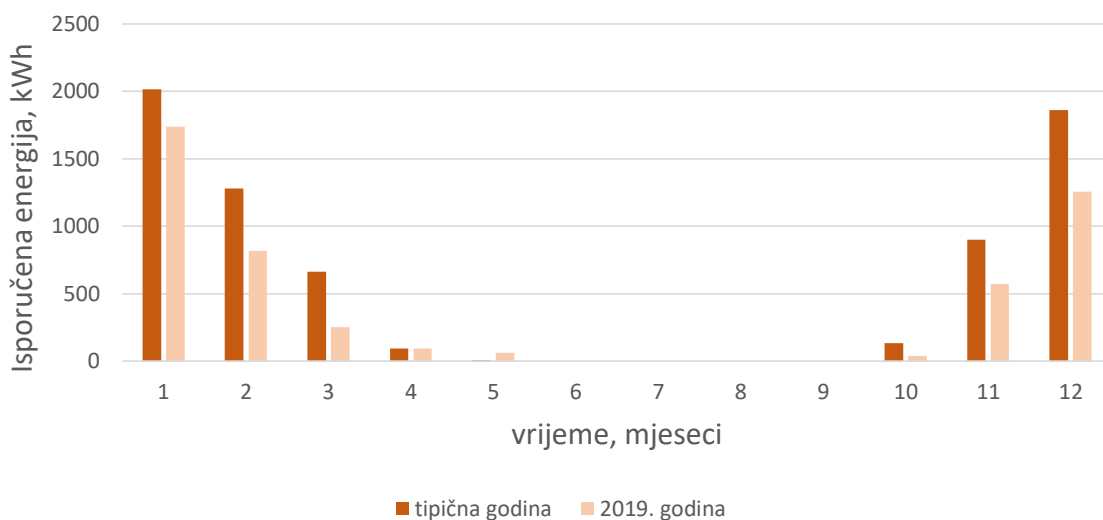


Slika 24. Promjena COP-a i EER-a za 2019. godinu u odnosu na tipičnu

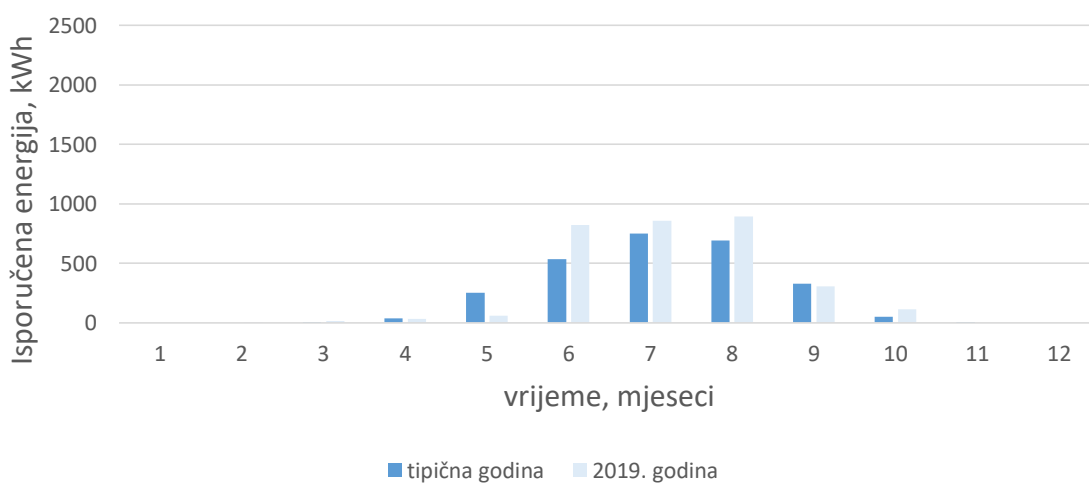
Za isporučenu ukupnu energiju (Tablica 8.) na godišnjoj razini vrijednosti za hlađenje su vrlo slične ($5,11 \text{ kWh/m}^2$ za tipičnu i $5,97 \text{ kWh/m}^2$ za 2019. godinu), dok u grijanju postoji izraženija razlika ($13,42 \text{ kWh/m}^2$, za tipičnu i $9,31 \text{ kWh/m}^2$ za 2019. godinu). Isporučena energija za 2019. godinu manja je za 31% u odnosu na tipičnu za grijanje, dok je za hlađenje ona veća za 17%. Ukupna isporučena energija za grijanje i hlađenja manja je za 17% za 2019. godinu. Detaljnija analiza za isporučenu energiju po mjesecima ukazuje da je na godišnjoj razini isporučena energija za grijanje veća za tipičnu meteorološku godinu u odnosu na 2019. godinu (Slika 25.). Zbog viših temperatura u lipnju, srpnju i kolovozu u 2019. godini, vrijednosti *EER*-a su niže što doprinosi većoj isporučenoj energiji za hlađenje. Uočava se da je isporučena energija manja za proljetno razdoblje za 2019. godinu (Slika 26.).

Tablica 8. Isporučena ukupna energija

Isporučena ukupna energija	Grijanje		Hlađenje	
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²
Tipična godina	6949	13	2651	5
2019. godina	4826	9	3096	6

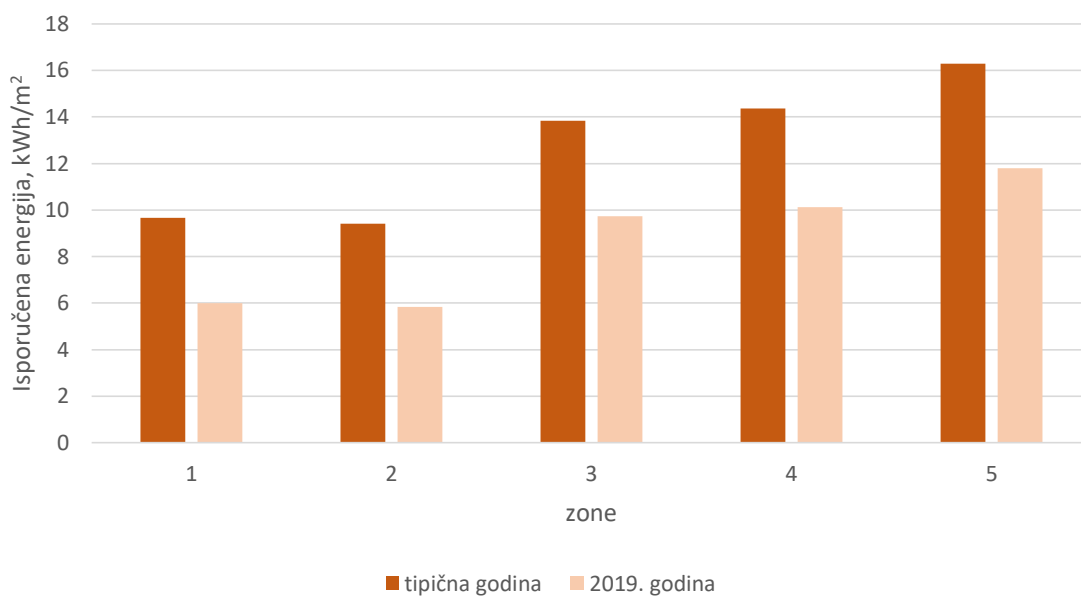


Slika 25. Isporučena energija za grijanje

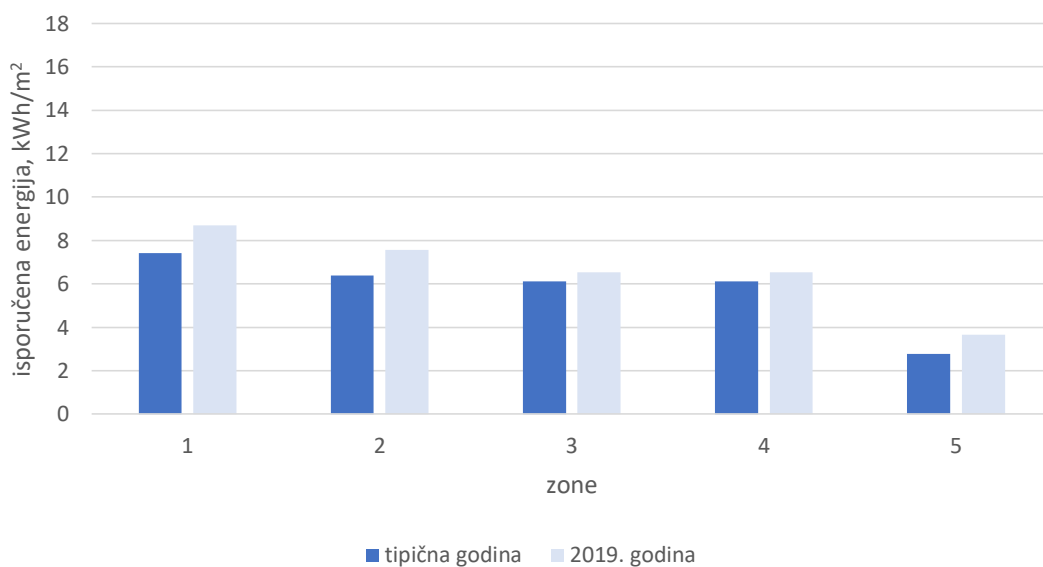


Slika 26. Isporučena energija za hlađenje

Peta zona (Slika 2.) koja nema unutarnjih dobitaka i nije orijentirana ni prema jednoj strani svijeta ima najvišu isporučenu energiju za grijanje od $16,3 \text{ kWh/m}^2$ za tipičnu meteorološku godinu, odnosno $11,8 \text{ kWh/m}^2$ za 2019. godinu. Primjetno je i da sve zone imaju višu isporučenu energiju za tipičnu meteorološku godinu (Slika 27.). Najviši iznos isporučene energije za hlađenje iznosi za prvu zonu za tipičnu godinu i iznosi $7,41 \text{ kWh/m}^2$, dok za 2019. godinu iznosi $8,69 \text{ kWh/m}^2$. Peta zona ima znatno manji iznos isporučene energije zbog svoje orijentacije i pogonskih režima. Zabilježen je porast iznosa isporučene energije za 2019. godinu za sve zone u odnosu na podatke za tipičnu meteorološku godinu (Slika 28.).



Slika 27. Isporučena energija za grijanje po zonama



Slika 28. Isporučena energija za hlađenje po zonama

7. ZAKLJUČAK

Potrebna i isporučena energija za grijanje i hlađenje za tipičnu meteorološku godinu analizirane su u odnosu na meteorološke podatke za 2019. godinu u svrhu analize utjecaja klimatskih promjena. Analiza je provedena za tipičan kat zgrade Tehničke škole Ruđer Bošković u Zagrebu. Tipičan kat podijeljen je na temelju preporuka o zoniranju na pet toplinskih zona te modeliran u računalnom programu TRNSYS. Simulacija je provedena za tipičnu meteorološku godinu te 2019. godinu, za svaki sat u godini. Rezultat simulacije je potrebna energija za grijanje i hlađenje za oba seta meteoroloških podataka. Isporučena energija za grijanje i hlađenje dobivena je dijeljenjem potrebne energije s faktorom grijanja (*COP*), odnosno faktorom hlađenja (*EER*) s obzirom da je pretpostavljeno da se kao izvor toplinske i rashladne energije koristi dizalica topline zrak-voda. Sustav predaje i distribucije energije nisu analizirani u ovom radu. Faktori grijanja i hlađenja (*COP* i *EER*) izračunati su za svaki sat u godini u ovisnosti o pogonskim parametrima dizalice topline, prvenstveno temperaturi polaza vode, vanjskoj temperaturi te djelomičnom opterećenju. Za izračun su korišteni podaci proizvođača te razvijeni algoritam u računalnom programu MATLAB. Pri tome je pretpostavljeno da se temperatura polaza vode regulira prema krivulji grijanja, ovisno o vanjskoj temperaturi. Za režim hlađenja pretpostavljena je konstantna temperatura polaza od 7°C. Djelomično opterećenje je pretpostavljeno da iznosi 50% za sve sate u godini kada dizalica topline radi, s obzirom da dimenzioniranje sustava nije bila tema ovog rada.

Ukupna godišnja isporučena energija za grijanje za tipičnu godinu iznosi 13,42 kWh/m², a za 2019. godinu iznosi 9,31 kWh/m². Vrijednost isporučene energije za hlađenje za tipičnu godinu iznosi 5,11 kWh/m², dok za 2019. godinu iznosi 5,97 kWh/m². Iz rezultata proizlazi da je potrebna energija za grijanje manja za 21% u odnosu na tipičnu meteorološku godinu, a veća za 13% za hlađenje. Isporučena energija za 2019. godinu manja je za 31% u odnosu na tipičnu za grijanje, dok je za hlađenje ona veća za 17%.

Iz rezultata za isporučenu energiju po zonama vidljiva je i važnost zoniranja kata. Peta zona koja nema unutarnjih dobitaka ima najvišu isporučenu energiju za grijanje od 16,3 kWh/m² za tipičnu meteorološku godinu, odnosno 11,8 kWh/m² za 2019. godinu. Zone na južnoj strani svijeta imaju znatan utjecaj na isporučenu energiju za hlađenje. Za prvu zonu za tipičnu godinu ona iznosi 7,41 kWh/m², dok za 2019. godinu iznosi 8,69 kWh/m².

Budući da je ukupna isporučena energija za hlađenje i grijanje manja za 17% kada su korišteni podaci za 2019. godinu, može se zaključiti da provedene analize na temelju podataka

za tipičnu meteorološku godinu mogu imati za posljedicu krive zaključke o trenutnoj i budućoj potrošnji energije. Stoga je preporuka da se zbog osjetnog povećanja vanjske temperature zadnjih desetak godina, prilikom modeliranja potrošnje energije u obzir uzme i promjena vanjske temperature uslijed klimatskih promjena.

LITERATURA

- [1] TRNSYS 17 Documentation: Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild (Volume 5). Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2012.
- [2] HRN EN ISO 52016-1. Energijska svojstva zgrada- Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarnje temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja, 2017.
- [3] Patarčić M.. Klima i klimatske promjene
https://meteo.hr/klima.php?section=klima_modeli¶m=klima_promjene
(17.2.2021.)
- [4] Internetska stranica proizvođača Daikin
https://www.daikin.hr/hr_hr/area-of-expertise/heating-and-heat-pumps.html?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_content=Brand_Combinations&utm_campaign=Branding&gclid=Cj0KCQiA_qD_BRDiARIsANjZ2LBbeIOdkuhpwtUGb-_VKR6cNIvkd839v1-JHkBLUT569-gekLPwTIaAi1UEALw_wcB
(17.2.2021.)
- [5] Internetska stranica Tehničke škole Ruđer Bošković
<https://www.tsrh.hr/o-skoli/> (17.2.2021.)
- [6] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Plan za povećanje broja zgrada gotovo nulte energije do 2020. godine; Zagreb, 2014. Dostupno na:
<https://mgipu.gov.hr/naslovna-blokovi/o-ministarstvu-15/djelokrug/energetska-ucinkovitost-u-zgradarstvu/zgrade-gotovo-nulte-energije-nzeb/10504> (17.2.2021.)
- [7] Dović D., Rodić A., Soldo V., Švaić S.. Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2011. Dostupno na:
http://www.hkis.hr/Upload/Documents/Vijesti/Algoritam_2011.pdf (17.2.2021.)

PRILOZI

- I. Razvijeni algoritam za izračun *COP*-a i *EER*-a u računalnom programu MATLAB

PRILOG I

Izračun EER-a

polyfitn funkcija

x=[6 40 100;

6 40 75;

6 40 50;

6 40 30;

6 30 100;

6 30 75;

6 30 50;

6 30 30;

6 20 100;

6 20 75;

6 20 50;

6 20 30;

6 15 100;

6 15 75;

6 15 50;

6 15 30;

8 40 100;

8 40 75;

8 40 50;

8 40 30;

8 30 100;

8 30 75;

8 30 50;

8 30 30;

8 20 100;

8 20 75;

8 20 50;

8 20 30;

8 15 100;

8 15 75;

8 15 50;

8 15 30;

10 40 100;

10 40 75;

10 40 50;

10 40 30;

10 30 100;

10 30 75;

10 30 50;

10 30 30;

10 20 100;

10 20 75;

10 20 50;

10 20 30;

10 15 100;

10 15 75;

10 15 50;

10 15 30;

```

14 40 100;

14 40 75;
14 40 50;
14 40 30;
14 30 100;
14 30 75;
14 30 50;
14 30 30;
14 20 100;
14 20 75;
14 20 50;
14 20 30;
14 15 100;
14 15 75;
14 15 50;
14 15 30];

y=[2.521;2.68;2.807;2.869;
    3.358;8.661;3.596;3.661;
    4.296;4.492;4.621;4.69;
    4.62; 4.621;4.365;4.407;
    2.659;2.837;2.99;3.058;
    3.536;3.717;3.827;3.902;
    4.52; 4.747;4.875;4.963;
    4.832;4.82;4.537;4.588;
    2.777;2.976;3.152;3.222;
    3.686;3.89;4.028;4.102;
    4.704;4.924;5.075;5.165;
    5.001;5.114;4.658;4.699;
    2.985;3.228;3.451;3.51;
    3.945;4.195;4.381;4.426;
    5.008;5.239;5.381;5.408;
    5.265;5.199;4.804;4.789];

p=polyfitn(x,y,2);
polyn2sympoly(p)
P=0.0088455*X1^2 - 0.0012081*X1*X2 - 0.00056567*X1*X3 - 0.066109*X1
- 0.0035455*X2^2 - 0.00030139*X2*X3 + 0.15177*X2 - 0.00021099*X3^2 +
0.039*X3 + 2.4077

for i=1:8760
ime_datoteke='Weather_data_2019_TRNSYS_Zagreb.dat';
M_vanjski=csvread(ime_datoteke);
T=M_vanjski (:,1);

X2(i,1)= T(i,1);

X3=50;
X1=7;
EER(i,1)=0.0088455.*X1.^2 - 0.0012081.*X1.*X2(i,1) -
0.00056567.*X1.*X3 - 0.066109.*X1 - 0.0035455.*X2(i,1).^2 -

```

```
0.00030139.*X2(i,1).*X3 + 0.15177.*X2(i,1) - 0.00021099.*X3.^2 +  
0.039.*X3 + 2.4077;  
i=i+1;  
end
```

COP

polyfitn funkcija

```
x=[ 35 10 100;  
    35 10 75;  
    35 10 50;  
    35 10 30;  
    35 5 100;  
    35 5 75;  
    35 5 50;  
    35 5 30;  
    35 0 100;  
    35 0 75;  
    35 0 50;  
    35 0 30;  
    35 -10 100;  
    35 -10 75;  
    35 -10 50;  
    35 -10 30;  
    45 10 100;  
    45 10 75;  
    45 10 50;  
    45 10 30;  
    45 5 100;  
    45 5 75;  
    45 5 50;  
    45 5 30;  
    45 0 100;  
    45 0 75;  
    45 0 50;  
    45 0 30;  
    45 -10 100;  
    45 -10 75;  
    45 -10 50;  
    45 -10 30;  
    50 10 100;  
    50 10 75;  
    50 10 50;  
    50 10 30;  
    50 5 100;  
    50 5 75;  
    50 5 50;  
    50 5 30;  
    50 0 100;  
    50 0 75;  
    50 0 50;  
    50 0 30]
```

```
y=[4.223; 4.2398; 4.226;4.32; 3.786; 3.784; 3.749; 3.847; 3.409;  
3.392; 3.338;3.434; 2.789; 2.753; 2.67; 2.758; 3.459;3.483; 3.491;  
3.579; 3.108; 3.118; 3.107; 3.194;2.803; 2.802; 2.774; 2.857; 2.3;  
2.282; 2.231; 2.306; 3.109; 3.135; 3.149; 3.231; 2.801; 2.813;  
2.809;2.889; 2.531;2.533; 2.513; 2.591];
```

```
p=polyfitn(x,y,2)
```

```
polyn2sympoly(p)
```

```
-----  
for i=1:8760  
ime_datoteke='Weather_data_Zagreb_22_variables_8760_hours.dat';  
M_vanjski=csvread(ime_datoteke);  
T=M_vanjski(:,1); %T je matrica u kojoj su u prvom stupcu vanjske  
temp  
  
X2(i,1)= T(i,1);  
X1(i,1)=-0.02.*X2(i,1).^2-0.9714.*X2(i,1)+47.3571;  
X3=50;  
  
COP(i,1)=0.00041258*X1(i,1)^2 - 0.0014656*X1(i,1)*X2(i,1) - 3.8341e-  
05*X1(i,1)*X3 - 0.090129*X1(i,1) + 0.00090823*X2(i,1)^2 - 8.9926e-  
05*X2(i,1)*X3 + 0.13246*X2(i,1) + 3.8847e-05*X3^2 - 0.0038612*X3 +  
6.1955;  
i=i+1;  
end  
  
% krivulja grijanja  
x=[-10 -5 0 5 10 15 20];  
y=[55 52 47 42 36 28 20];  
p=polyfit(x,y,3)  
  
y1 = polyval(p,x);  
  
plot(x,y1)  
polyn2sympoly(p)
```