

# Satni proračun energetske potrebe za grijanje i hlađenje referentne zgrade za obrazovanje dizalicom topline

---

Šagud, Petar

Master's thesis / Diplomski 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:235:817146>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Petar Šagud**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**SATNI PRORAČUN  
ENERGETSKIH POTREBA ZA  
GRIJANJE I HLAĐENJE  
REFERENTNE ZGRADE ZA  
OBRAZOVANJE DIZALICOM  
TOPLINE**

**Mentor:**  
**Doc. dr. sc. Darko Smoljan, dipl. ing.**

**Student:**  
**Petar Šagud**

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Darku Smoljanu na nesebičnoj stručnoj pomoći i strpljenju tijekom izrade ovog rada te pobuđenom interesu za ovo područje. Također se zahvaljujem dr. sc. Luki Bobanu na korisnim materijalima i savjetima koji su doprinijeli kvaliteti rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na neizmjernoj podršci i svim pruženim mogućnostima. Također se zahvaljujem svojoj djevojci Mariji na njenoj velikoj potpori koja je bila presudni faktor tijekom studiranja.

Petar Šagud



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 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Petar Šagud** JMBAG: 0246057421

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Satni proračun energetskih potreba za grijanje i hlađenje referentne zgrade za obrazovanje dizalicom topline**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Hourly calculation of energy needs for heating and cooling of reference educational building with the heat pump**

Opis zadatka:

U sklopu diplomskog rada potrebno je provesti dinamički proračun toplinskih potreba za grijanje i hlađenje referentne zgrade za obrazovanje, korištenjem dinamičke satne metode prema HRN EN ISO 52016-1:2017. Satne potrebe za grijanje i hlađenje zgrade iskoristiti za satni proračun potrebne energije za pogon dizalice topline temeljem vrijednosti faktora učinkovitosti dizalice topline COP i EER, u različitim radnim točkama, datim od strane proizvođača. Usporediti potrebnu energiju za rad dizalice topline u slučaju VRF (*eng. variable refrigerant flow*) tipa dizalice topline zrak-zrak, te dizalice topline zrak-voda s inverterskom tehnologijom. U slučaju proračuna rada dizalice topline zrak-voda u režimu grijanja koristiti proračun prema normi HRN EN 15316-4-2:2017, metoda A, put B. Temperaturni režim grijanja u projektnim uvjetima u slučaju dizalice topline zrak-voda iznosi 45/40 °C, te u slučaju hlađenja 8/12 °C. Potrebno je prikazati rezultate proračuna toplinskih potreba zgrade na satnoj i mjesečnoj razini, usporediti mjesečne i ukupne energetske potrebe za pogon dizalice topline u slučaju dizalice VRF i dizalice zrak-voda, te izračunati sezonske faktore učinkovitosti rada SCOP i SEER za oba tipa dizalice topline na temelju ukupne sezonske potrebne energije za rad. Koristiti podatke o referentnoj zgradi za obrazovanje definiranoj od strane Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja, te satne klimatske podatke Reprezentativne godine Zagreb Maksimir.

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

Zadatak zadan:

6. svibnja 2021.

Datum predaje rada:

8. srpnja 2021.

Predviđeni datumi obrane:

12. – 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao:

  
Doc.dr.sc. Darko Smoljan

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. POSTUPAK PRORAČUNA TOPLINSKOG OPTEREĆENJA .....	2
2.1. Opis korištenih jednadžbi.....	2
2.1.1. Toplinska ravnoteža na razini zone.....	2
2.1.2. Energetska bilanca elemenata zgrade .....	4
2.1.2.1. Čvor unutarnje površine.....	5
2.1.2.2. Unutarnji čvorovi elemenata.....	5
2.1.2.3. Vanjski čvorovi elemenata.....	5
2.1.2.4. Vanjski čvorovi elemenata u slučaju unutarnjeg zida.....	6
2.1.3. Toplinska svojstva elemenata zgrade.....	7
2.1.4. Opći izraz toplinske ravnoteže zone .....	8
2.2. Tijek računanja toplinskog opterećenja osjetne topline i temperatura.....	9
2.3. Operativna temperatura.....	14
3. PROCJENA VALJANOSTI SATNE METODE .....	15
3.1. Parametri jednadžbi.....	15
3.1.1. Geometrija referentne prostorije .....	15
3.1.2. Toplinska svojstva neprozirnih elemenata.....	16
3.1.3. Toplinska svojstva veličine na razini zone .....	17
3.1.4. Toplinska svojstva veličine prozora.....	17
3.1.5. Faktor gubitaka prema nebu.....	18
3.1.6. Faktori konvektivnog dijela toplinskih dobitaka .....	18
3.1.7. Koeficijenti prolaza i toplinski kapaciteti za elemente prostorije.....	19
3.1.8. Rubni uvjeti.....	20
3.1.9. Klimatski podaci .....	20
3.1.10. Unutarnji toplinski dobici .....	22
3.1.11. Ventilacija .....	22
3.1.12. Strategija kontrole .....	22
3.1.13. Dostupan toplinski i rashladni kapacitet .....	22
3.1.14. Opis verifikacijskog slučaja.....	22
3.2. Rezultati verifikacijskog slučaja .....	23
4. PRORAČUN OPTEREĆENJA REFERENTNE ZGRADE ZA OBRAZOVANJE.....	25
4.1. Zgrada za obrazovanje gotovo nulte energije .....	25
4.2. Rezultati proračuna potrebne energije satnom metodom.....	30
4.2.1. Mjesečni prikaz energetskih potreba .....	31

4.2.2.	Satni prikaz energetske potrebe .....	32
5.	SATNI PRORAČUN POTREBNE ENERGIJE ZA POGON DIZALICE TOPLINE .....	36
5.1.	Proračun prema normi EN 15316-4-2:2016 put B .....	36
5.1.1.	Rezultati mjerenja prema normi EN 14825 za primjenu EN 15316:2017 .....	37
5.1.2.	Tijek proračuna norme EN 15316 put B .....	37
5.1.3.	Rad s prekidom .....	40
5.2.	Prilagođeni proračun iz norme EN 15316-4-2:2016 put B. ....	41
5.2.1.	Režim hlađenja .....	41
5.2.1.1.	Pretpostavke za rad s prekidom .....	42
5.2.1.2.	Pretpostavke temperatura .....	43
5.2.2.	Režim grijanja .....	44
5.2.2.1.	Pretpostavke za rad s prekidom .....	44
5.2.2.2.	Pretpostavke temperatura .....	45
5.3.	Proračun satnih vrijednosti <i>EER-a</i> interpolacijom .....	46
6.	PRORAČUN DIZALICE TOPLINE ZRAK-VODA .....	47
6.1.	Zimski period .....	47
6.1.1.	Ulazni podaci .....	47
6.1.2.	Rezultati satne analize .....	50
6.2.	Ljetni period .....	52
7.	PRORAČUN DIZALICE TOPLINE ZRAK-ZRAK .....	57
7.1.	Zimski period .....	57
7.1.1.	Ulazni podaci .....	57
7.1.2.	Rezultati satne analize .....	59
7.2.	Ljetni period .....	61
7.2.1.	Ulazni podaci .....	61
7.2.2.	Rezultati satne analize .....	63
8.	ANALIZA REZULTATA .....	66
9.	ZAKLJUČAK .....	68
	LITERATURA .....	70

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Geometrija referentne prostorije .....	15
Slika 2.	Usporedba potrebne toplinske energije verifikacijskog slučaja .....	24
Slika 3.	Tlocrt nZEB referentne zgrade za obrazovanje.....	28
Slika 4.	Presjek nZEB referentne zgrade za obrazovanje.....	29
Slika 5.	Pročelja nZEB referentne zgrade za obrazovanje .....	29
Slika 6.	Vanjska temperatura s prikazanim sezonama grijanja i hlađenja.....	30
Slika 7.	Mjesečne potrebe za grijanjem.....	32
Slika 8.	Mjesečna potreba za hlađenjem .....	32
Slika 9.	Satna potreba za grijanje .....	33
Slika 10.	Satna potreba za hlađenje .....	33
Slika 11.	Satne potrebe za grijanjem za referentni dan .....	34
Slika 12.	Satna potreba za grijanje za referentni mjesec .....	34
Slika 13.	Satna potreba za hlađenje za referentni dan .....	35
Slika 14.	Satna potreba za hlađenje za referentni mjesec.....	35
Slika 15.	Ovisnost EER-a o opterećenju te temperaturama zraka i vode .....	46
Slika 16.	Odnos dostupnog i potrebnog kapaciteta za grijanje dizalicom topline zrak-voda .....	49
Slika 17.	Omjer dostupnog i potrebnog kapaciteta za grijanje dizalicom topline zrak-voda.....	50
Slika 18.	Satne vrijednosti COP-a .....	50
Slika 19.	Satne vrijednosti potrebne električne energije .....	51
Slika 20.	Vrijednost COP-a u ovisnosti o omjeru opterećenja .....	51
Slika 21.	Odnos dostupnog i potrebnog kapaciteta za hlađenje dizalicom topline zrak-voda .....	53
Slika 22.	Omjer dostupnog i potrebnog kapaciteta za hlađenje dizalicom topline zrak-voda .....	54
Slika 23.	Satne vrijednosti EER-a .....	54
Slika 24.	Satne vrijednosti potrebne električne energije .....	55
Slika 25.	Vrijednost EER-a u ovisnosti o omjeru opterećenja .....	55
Slika 26.	Odnos dostupnog i potrebnog kapaciteta za grijanje dizalicom topline zrak-zrak .....	58
Slika 27.	Omjer dostupnog i potrebnog kapaciteta za grijanje dizalicom topline zrak-zrak .....	59
Slika 28.	Satne vrijednosti COP-a .....	59
Slika 29.	Satne vrijednosti potrebne električne energije .....	60
Slika 30.	Vrijednost COP-a u ovisnosti o omjeru opterećenja .....	60
Slika 31.	Odnos dostupnog i potrebnog kapaciteta za hlađenje dizalicom topline zrak-zrak .....	62
Slika 32.	Omjer dostupnog i potrebnog kapaciteta za hlađenje dizalicom topline zrak-zrak .....	63
Slika 33.	Satne vrijednosti EER-a .....	63
Slika 34.	Satne vrijednosti potrebne električne energije .....	64
Slika 35.	Vrijednost EER-a u ovisnosti o omjeru opterećenja .....	64
Slika 36.	Usporedba COP-a u ovisnosti o LR-u za dizalice topline.....	67
Slika 37.	Prikaz potrebne električne energije za dizačice topline .....	69
Slika 38.	Usporedba SCOP-a i SEER-a za dizalice topline .....	69



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Distribucija mase neprozirnih elemenata .....	7
Tablica 2. Geometrijske vrijednosti referentne prostorije.....	15
Tablica 3. Specifični toplinski kapacitet elemenata .....	16
Tablica 4. Iznosi toplinskih otpora elemenata.....	17
Tablica 5. Parametri za elemente prostorije .....	19
Tablica 6. Koeficijenti prijelaza topline referentne prostorije .....	20
Tablica 7. Primjer klimatskih podataka za referentni dan 1. travanj.....	21
Tablica 8. Rezultati potrebne topline na satnoj bazi .....	23
Tablica 9. Podaci o geometriji zgrade za obrazovanje.....	26
Tablica 10. Toplinska svojstva građevnih dijelova zgrade za obrazovanje .....	26
Tablica 11. Postavne temperature i režimi korištenja .....	26
Tablica 12. Toplinska svojstva elemenata građevine.....	27
Tablica 13. Solarni parametri .....	28
Tablica 14. Mjesečno toplinsko opterećenje .....	31
Tablica 15. Karakteristične radne točke .....	42
Tablica 16. Karakteristične radne točke .....	44
Tablica 17. Mjerene vrijednosti EER-a za temperaturu polaza 8°C .....	46
Tablica 18. Rezultati proizvođača za DT zrak-voda .....	48
Tablica 19. Vrijednosti za proračun grijanja DT zrak-voda.....	48
Tablica 20. Vrijednosti za proračun grijanja DT zrak-zrak.....	57
Tablica 21. Karakteristične točke za hlađenje DT zrak-zrak .....	61
Tablica 22. Prikaz godišnjih potreba za grijanjem i hlađenjem .....	66
Tablica 23. Usporedba potrošnje i COP/EER-a kod dizalica topline.....	66

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_{eli}$	$m^2$	površina elementa zgrade
$COP_{cikl}$	-	korrigirani $COP$ za slučaj rada s prekidom
$C_{int;ztc}$	J/K	unutarnji toplinski kapacitet zone
$COP_{exer;biv}$	-	eksergijski faktor grijanja za bivalentne radne uvjete
$COP_{gen;exer}$	-	eksergijski faktor grijanja
$COP_{LR_{min}}$	-	vrijednost $COP$ -a kod rada pri minimalnom $LR$ -u
$E_{gen;\vartheta_{in};\vartheta_{out}}$	Wh	pogonska električna energija dizalice topline
$EER$	-	faktor hlađenja
$EER_{Carnot}$	-	carnotova vrijednost faktora hlađenja
$EER_{cikl}$	-	korrigirani $EER$ za slučaj rada s prekidom
$EER_{LR_{min}}$	-	vrijednost $EER$ -a kod rada pri minimalnom $LR$ -u
$f_{H/C,c}$	-	konvektivni dio sustava grijanja/hlađenja
$f_{int,c}$	-	konvektivni dio unutarnjih toplinskih dobitaka
$f_{LR_{exer}}$	-	faktor eksergijske efikasnosti
$F_{sh;obst;eli;t}$	-	faktor redukcije zbog vanjskih prepreka
$F_{sky}$	-	faktor gubitaka prema nebu
$f_{sol,c}$	-	konvektivni dio solarnog ozračenja
$f_{\eta_{ex}}$	-	korekcijski faktor devijacije temperature
$h_{ce;eli}$	W/( $m^2K$ )	vanjski konvektivni koeficijent prijelaza topline
$h_{ci;eli}$	W/( $m^2K$ )	unutarnji konvektivni koeficijent prijelaza topline elementa $eli$
$h_{pli;eli;t}$	W/( $m^2K$ )	provodnost između čvorova $pli+1$ i $pli$
$h_{pli-1;eli}$	W/( $m^2K$ )	toplinska provodnost između čvora $pli$ i čvora $pli-1$
$h_{re;eli}$	W/( $m^2K$ )	vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem
$h_{ri;eli}$	W/( $m^2K$ )	unutarnji koeficijent prijelaza topline zračenjem
$H_{tr;tb;ztc}$	W/K	ukupni koeficijent prolaza topline toplinskih mostova
$H_{ve;k;t}$	W/K	ukupni koeficijent prijelaza topline ventilacijom za ventilacijski element k
$I_{sol;dif;eli;t}$	W/ $m^2$	difuzni dio solarnog ozračenja elementa
$I_{sol;dir;eli;t}$	W/ $m^2$	direktni dio solarnog ozračenja elementa
$LR$	-	omjer opterećenja $LR$ (eng. <i>Load Ratio</i> )
$LR_{exer}$	-	eksergijski faktor opterećenja
$LR_{min}$	-	minimalni omjer opterećenja
$n_{exer}$	-	eksergijski faktor
$R_{c;eli}$	$m^2K/W$	toplinski otpor neprozirnog elementa $eli$

$R_{se;v}$	W/(m <sup>2</sup> K)	vanjski površinski otpor prozora
$R_{si;v}$	W/(m <sup>2</sup> K)	unutarnji površinski otpor prozora
$SCOP$	-	sezonski faktor grijanja
$SEER$	-	sezonski faktor hlađenja
$T_{vanj}$	°C	temperatura vanjskog zraka
$\Delta T$	°C	konstanta temperaturne razlike
$T_e$	°C	temperatura isparavanja
$T_c$	°C	temperatura kondenzacije
$t_x$	h	vrijeme rada dizalice topline
$t_{ci}$	h	trajanje vremenskog koraka
$U_w$	W/(m <sup>2</sup> K)	koeficijent prolaza topline prozora
$\alpha_{sol;eli}$	-	koeficijent solarne adsorpcije vanjske površine
$\Delta t$	s	duljina vremenskog intervala t
$\eta_{ex}$	-	eksergijska efikasnost
$\vartheta_{e;a;t}$	°C	temperatura vanjskog zraka
$\vartheta_{gen;in}$	°C	temperatura izvora topline (temperatura vanjskog zraka)
$\vartheta_{gen;in;\vartheta;ref}$	°C	granična operativna temperatura TOL
$\vartheta_{gen;out}$	°C	temperatura ponora topline (temperatura ogrjevne vode)
$\vartheta_{gen;out;\vartheta;ref}$	°C	nazivna temperatura polaza vode
$\vartheta_{int;a;zt;t}$	°C	temperatura unutarnjeg zraka
$\vartheta_{int;a;zt;t-1}$	°C	temperatura unutarnjeg zraka prethodnog sata
$\vartheta_{int;op;ac;zt;t}$	°C	stvarna unutarnja operativna temperatura
$\vartheta_{int;op;upper;zt;t}$	°C	gornja operativna temperatura
$\vartheta_{int;op;zt;t}$	°C	unutarnja operativna temperatura
$\vartheta_{int;op;0;zt;t}$	°C	operativna temperatura u slobodnim uvjetima
$\vartheta_{int;r;mn;zt;t}$	°C	srednje temperature zračenja
$\vartheta_{int;set;C;zt;t}$	°C	postavna unutarnja operativna temperatura za hlađenje
$\vartheta_{int;set;H;zt;t}$	°C	postavna unutarnja operativna temperatura za grijanje
$\vartheta_{pli;eli;t-1}$	°C	temperatura čvora pli elementa pli prethodnog sata
$\vartheta_{pli;eli;t}$	°C	temperatura čvora pli elementa pli
$\vartheta_{pli+1;eli;t}$	°C	temperatura čvora $pli+1$
$\vartheta_{sup;k;t}$	°C	temperatura dobavnog zraka ventilacijskog elementa k
$\Phi_{c;avail;zt;t}$	W	najveća dostupna vrijednost snage za hlađenje
$\Phi_{dgn}$	W	nazivni učin dizalice topline
$\Phi_{H;avail;zt;t}$	W	najveća dostupna vrijednost snage za grijanje
$\Phi_{H/C;ld;un;zt;t}$	W	ogrjevni ili rashladni učin potreban da se dosegne postavna temperatura
$\Phi_{H/C;ld;zt;t}$	W	toplinsko ili rashladno opterećenje
$\Phi_{H/C;upper;zt;t}$	W	gornja vrijednost toplinskog opterećenja

---

$\Phi_{H/C;zt;t}$	W	toplinsko ili rashladno opterećenje
$\Phi_{int;zt;t}$	W	ukupni unutarnji toplinski dobitci
$\Phi_{min}$	W	minimalni kapacitet dizalice topline
$\Phi_{nd}$	W	toplinsko opterećenje zgrade
$\Phi_{sky;eli;t}$	W/(m <sup>2</sup> K)	toplinsko zračenje prema nebu
$\Phi_{sol;zt;t}$	W	direktno preneseni solarni toplinski dobitci kroz sve prozore
$\Phi_{\vartheta in;\vartheta out}$	W	učin dizalice topline na radnim uvjetima
$\chi_{m;int}$	J/(m <sup>2</sup> K)	specifični toplinski kapacitet zraka i namještaja
$\chi_{m;op}$	J/(m <sup>2</sup> K)	specifični toplinski kapacitet elemenata
$\chi_{pli;eli}$	J/(m <sup>2</sup> K)	površinski toplinski kapacitet čvora

## SAŽETAK

U ovome radu se izračunava potreba toplinske energije za grijanje i hlađenje referentne zgrade za obrazovanje gotovo nulte energije (nZEB) te pokrivanje navedenih toplinskih potreba jednim od dva tipa dizalice topline, tip zrak-voda s inverterskom tehnologijom ili tip zrak-zrak (VRF).

U sklopu rada je predstavljen proračun za računanje toplinskog opterećenja u zimskom i ljetnom periodu prema normi HRN EN ISO 52016-1:2017. Navedenim proračunom je napravljena satna analiza toplinskih potreba referentne nZEB zgrade pomoću programskog paketa *Matlab*.

Također je opisan proračun za računanje potrošnje električne energije i iznosa sezonskog faktora grijanja dizalice topline zrak-voda prema normi EN 15316-4-2:2017 put B. Za proračun satnih vrijednosti faktora hlađenja i potrošnje električne energije dizalice topline zrak-voda korištena je metoda interpolacije između proširenih vrijednosti faktora hlađenja od proizvođača. Po ugledu na EN 15316-4-2:2017 napravljen je proračun grijanja i hlađenja dizalicom topline zrak-zrak. Programskim paketom *Matlab* je napravljena satna analiza rada dizalice topline prema navedenom proračunu. Dobiveni rezultati satne analize uspoređeni su radi procjene kvalitete rada dva uređaja u razmatranim uvjetima.

Ključne riječi: Dizalica topline, nZEB, HRN EN ISO 52016-1:2017, satna metoda, EN 15316-4-2:2017 put B.

## SUMMARY

This thesis deals with calculating energy needs for heating and cooling of a reference near zero energy building (nZEB) for educational purposes. The energy needs will be covered with one of two types of heat pump, air to water heat pump with inverter technology or air to air variable energy flow heat pump (VRF).

As a part of the thesis, the calculation procedure for heating load according to the norm HRN EN ISO 52016-1:2017 will be presented. According to the calculation modelled on the norm the hourly analysis of the heat load is written in the program *Matlab*.

Furthermore, the thesis describes the norm EN 15316-4-2:2017 way B. that deals in calculating electric energy needed for running an air to water heat pump as well as seasonal coefficients of power for heating. By adjusting the method described in the norm, a calculation regarding the heating and cooling modes for the air to air heat pump was done. The calculation of the cooling mode, regarding the air to water heat pump, was done by interpolating between the expanded number of measured values by the manufacturer. Using *Matlab* the hourly analysis of the heat pumps is made according to the stated calculation methods. The results of the hourly analysis of the heat pumps are compared to justify the usage of one of the two devices in the given conditions.

Key words: Heat pump, nZEB, HRN EN ISO 52016-1:2017, hourly method, EN 15316-4-2:2017 way B.

## 1. UVOD

Tema diplomskog rada je satni proračun energetske potrebe za grijanje i hlađenje referentne zgrade za obrazovanje dizalicom topline. Opisan je satni proračun iz norme HRN EN ISO 52016-1:2017. te je na temelju navedenog proračuna napisan program, koristeći programski paket *Matlab*, za računanje satne potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje referentne zgrade. U svrhu verifikacije točnosti napisanog programa izračunate su energetske potrebe referentne prostorije korištene kao primjer u normi. Podatke čine podaci o geometriji, termodinamički podaci, meteorološki podaci te specifičnosti proračuna koje vrijede za navedeni primjer. Podudaranjem izračunatih podataka o toplinskim potrebama s podacima u normi, opravdava se korištenje napisanog programa na referentnoj zgradi za obrazovanje.

Opisana je referentna nZEB zgrada za obrazovanje za kontinentalnu hrvatsku s meteorološkim podacima za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb. U svrhu pokrivanja potreba za grijanjem ili hlađenjem razmatra se implementacija jednog od dva tipa dizalice topline, tip zrak-voda s inverterskom tehnologijom ili tip zrak-zrak (VRF). Proračun satne potrošnje te sezonskih faktora grijanja dizalice topline je modeliran prema normi EN 15316-4-2:2017 put B te je za hlađenje korištena slična metodologija.

Dizalica topline zrak-voda, preko vanjskog izmjenjivača topline, koristi vanjski zrak kao izvor topline u slučaju grijanja ili ponor topline u slučaju hlađenja. Unutarnji izmjenjivači topline su ventilokonvektori. Ventilokonvektori koriste vodu kao posredni prijenosnik energije koja predaje ili uzima toplinu kondicioniranom prostoru, ovisno o režimu rada.

U slučaju dizalice topline zrak-zrak, vanjska jedinica također izmjenjuje toplinu sa zrakom, dok unutarnji izmjenjivači imaju ulogu isparivača u slučaju hlađenja, a kondenzatora u slučaju grijanja te direktno izmjenjuju toplinu s unutarnjim zrakom.

Obje dizalice topline imaju nedostatke zbog korištenja zraka kao izvora ili ponora topline na vanjskoj jedinici. Najveći nedostatak se tiče promjenjivosti vanjske temperature zbog čega će za vrijeme veće potrebe za hlađenjem faktor hlađenja (*EER*) biti manji i tako negativno utjecati na pogonske troškove. Isto vrijedi i u režimu grijanja, najmanji faktor grijanja (*COP*) se postiže za nižih vanjskih temperatura, upravo kada je i najveća potreba za grijanjem. Razlika ove dvije izvedbe dizalice topline je način izmjene topline s kondicioniranim prostorom, gdje se očekuje da će tip uređaja zrak-voda zbog korištenja vode kao posrednog prijenosnika energije te nepovoljnijeg temperaturnog režima imati manje faktore grijanja i hlađenja od izvedbe uređaja zrak-zrak.

## 2. POSTUPAK PRORAČUNA TOPLINSKOG OPTEREĆENJA

U svrhu izračuna toplinskog opterećenja koristi se norma HRN EN ISO 52016-1:2017 pod nazivom:

*Energetska svojstva zgrade -Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarnje temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja – 1. dio: Postupci proračuna.*

Norma HRN EN ISO 52016-1:2017 predstavlja dinamički satni proračun, koji će kao takav uzimati u obzir utjecaj satnih i dnevnih varijacija ulaznih parametara (meteoroloških podataka, postavne temperature, unutarnjih dobitaka, akumulacije, solarnog zasjenjenja, itd.) i njihov dinamički utjecaj na sustav grijanja i hlađenja.

U ovome poglavlju biti će opisan tijek proračuna s glavnim jednadžbama kao i način primjene istih, a u poglavlju 3 će proračun biti primijenjen na referentnu prostoriju s ciljem dobivanja istih rezultata kao u normi. Na ovaj će način biti potvrđen ispravan postupak proračuna kao i pravilan unos jednadžbi i parametara u program *Matlab*.

### 2.1. Opis korištenih jednadžbi

Prema HRN EN ISO 52016-1:2017 svaki element zgrade je podijeljen na određen broj paralelnih slojeva koje odjeljuju čvorovi. Za neprozirne elemente broj čvorova je 5, od kojih je jedan vanjski čvor, tri čvora unutar elementa te jedan čvor na unutarnjoj površini prostorije. Za elemente u kontaktu s tlom broj čvorova je također 5. Za prozore je broj čvorova 2, i to vanjski čvor i čvor na unutarnjoj površini prostorije. Između čvorova je određen toplinski otpor te svaki sloj ima toplinski kapacitet.

Jednadžbe korištene u proračunu se odnose na toplinsku ravnotežu zone, kako je opisano poglavljem 2.1.1, i na jednadžbe ravnoteže čvorova elemenata zgrade opisano poglavljem 2.1.2.

#### 2.1.1. Toplinska ravnoteža na razini zone

Jednadžba (1) predstavlja toplinsku ravnotežu zone omeđene elementima  $eli=1,\dots,eln$ . Rješavanjem jednadžbe dobivamo unutarnju temperaturu zraka u zoni.



Jednadžba glasi:

$$\left[ \frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} + \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli}) + \sum_{vei=1}^{ven} H_{ve;vei;t} + H_{tr;tb;ztc} \right] \cdot \vartheta_{int;a;ztc;t} - \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli} \cdot \vartheta_{pln;eli;t}) = \frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} \cdot \vartheta_{int;a;ztc;t-1} + \sum_{vei=1}^{ven} (H_{ve;vei;t} \cdot \vartheta_{sup;vei;t}) + H_{tr;tb;ztc} \cdot \vartheta_{e;a;t} + f_{int,c} \cdot \Phi_{int;ztc;t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + f_{H/C,c} \cdot \Phi_{H/C;ztc;t} \quad (1)$$

gdje su:

$C_{int;ztc}$	unutarnji toplinski kapacitet zone, [J/K];
$\Delta t$	duljina vremenskog intervala, $t$ [s];
$\vartheta_{int;a;ztc;t}$	unutarnja temperatura zraka, [°C];
$\vartheta_{int;a;ztc;t-1}$	unutarnja temperatura zraka u zoni na prijašnjem vremenskom intervalu $(t-\Delta t)$ , [°C];
$A_{eli}$	površina elementa zgrade $eli$ , [m <sup>2</sup> ];
$h_{ci;eli}$	unutarnji konvektivni koeficijent prijelaza topline elementa $eli$ , [W/(m <sup>2</sup> K)];
$\vartheta_{pln;eli;t}$	unutarnja površinska temperatura elementa $eli$ , [°C];
$H_{ve;k;t}$	ukupni koeficijent prijelaza topline ventilacijom za ventilacijski element $k$ , [W/K];
$\vartheta_{sup;k;t}$	temperatura dobavnog zraka ventilacijskog elementa $k$ , [°C];
$\vartheta_{e;a;t}$	temperatura vanjskog zraka, [°C];
$H_{tr;tb;ztc}$	ukupni koeficijent prolaza topline za toplinski most, [W/K];
$f_{int,c}$	konvektivni dio unutarnjih toplinskih dobitaka, [-];
$f_{sol,c}$	konvektivni dio solarnog ozračenja, [-];
$f_{H/C,c}$	konvektivni dio sustava grijanja/hlađenja, [-];
$\Phi_{int;ztc;t}$	ukupni unutarnji toplinski dobitci, [W];
$\Phi_{H/C;ztc;t}$	toplinsko ili rashladno opterećenje u zoni proračuna $ztc$ , [W];
$\Phi_{sol;ztc;t}$	direktno preneseni toplinski dobitci u zonu kroz sve prozore, [W].

Direktni solarni dobici zone kroz sve prozirne elemente  $wi=1, \dots, win$  opisani su jednadžbom (2):

$$\Phi_{sol;zt;c;t} = \sum_{wi=1}^{win} [g_{gl;wi;t} \cdot (I_{sol;dif;wi;t} + I_{sol;dir;wi;t} \cdot F_{sh;obst;wi;t}) \cdot A_{wi} \cdot (1 - F_{fr;wi})] \quad (2)$$

gdje su:

$g_{gl;wi;t}$	ukupna solarna propusnost prozora, [-];
$I_{sol;dir;wi;t}$	direktni dio solarnog ozračenja prozora, [W/m <sup>2</sup> ];
$I_{sol;dif;wi;t}$	difuzni dio solarnog ozračenja prozora, [W/m <sup>2</sup> ];
$F_{sh;obst;wi;t}$	faktor redukcije od vanjskih prepreka, [-];
$A_{wi}$	površina prozorskog elementa $wi$ , [m <sup>2</sup> ];
$F_{fr;wi}$	udio okvira u prozorskom elementu $wi$ , [-];

Ukupni unutarnji toplinski dobici računaju se jednadžbom (3) te redom ovise o specifičnim toplinskim dobicima od unutarnjeg metaboličkog toplinskog toka ( $q_{int;oc;zt;t}$ ), od disipacije topline uređaja ( $q_{int;A;zt;t}$ ), od rasvjete ( $q_{int;L;zt;t}$ ), od potrošne tople vode ( $q_{int;WA;zt;t}$ ), od gubitaka GViK sustava ( $q_{int;HVAC;zt;t}$ ) i od gubitaka ostalih procesa ( $q_{int;proc;zt;t}$ ). Jednadžba glasi:

$$\Phi_{int;zt;c;t} = (q_{int;oc;zt;t} + q_{int;A;zt;t} + q_{int;L;zt;t} + q_{int;WA;zt;t} + q_{int;HVAC;zt;t} + q_{int;proc;zt;t}) \cdot A_{use;zt} \quad (3)$$

gdje je  $A_{use;zt}$  korisna površina poda zone  $zt$  [m<sup>2</sup>].

### 2.1.2. Energetska bilanca elemenata zgrade

U ovom poglavlju prikazati će se jednadžbe (4), (5) i (6) koje prikazuju toplinske ravnoteže čvorova neprozirnih elemenata. Jednadžbe će biti korištene u kombinaciji s jednadžbom (1) za računanje satnih vrijednosti temperatura svih čvorova i zraka u prostoriji.

Neprozirni elementi imaju 5 čvorova te će se za njihovo računanje koristiti jednadžbe (4), (5) i (6). Jednadžba (5) će biti raspisana za unutarnja tri čvora. Za prozore će se koristiti jednadžbe (4) i (6) obzirom da se prozirni elementi modeliraju sa samo 2 čvora te nemaju unutarnjih slojeva čije bi toplinske jednadžbe opisivala formula (5).

### 2.1.2.1. Čvor unutarnje površine

Za  $p_{li}=p_{ln}$  (čvor unutar prostorije okrenut prema zoni  $ztc$ ) jednadžba toplinske ravnoteže glasi:

$$\begin{aligned}
 & -\left(h_{pli-1;eli} \cdot \vartheta_{pli-1;eli;t}\right) + \left[\frac{\chi_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ci;eli} + h_{ri;eli} \cdot \right. \\
 & \left. \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}}\right) + h_{pli-1;eli}\right] \cdot \vartheta_{pli;eli;t} - h_{ci;eli} \cdot \vartheta_{int;a;zt;t} - \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \cdot \right. \\
 & \left. h_{ri;eli} \cdot h_{pli;elk;t}\right) = \frac{\chi_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \vartheta_{pli;eli;t-1} + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[\left(1 - f_{int,c}\right) \cdot \Phi_{int;ztc;t} + \right. \\
 & \left. \left(1 - f_{sol,c}\right) \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + \left(1 - f_{H/C,c}\right) \cdot \Phi_{H/C;ztc;t}\right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

gdje je:

- $h_{pli-1;eli}$  koeficijent prolaza topline između čvora  $p_{li}$  i čvora  $p_{li+1}$  [ $W/(m^2K)$ ];
- $\chi_{pli;eli}$  površinski toplinski kapacitet čvora  $p_{li}$  [ $J/(m^2K)$ ];
- $h_{ri;eli}$  unutarnji koeficijent prijelaza topline zračenjem [ $W/(m^2K)$ ];
- $\vartheta_{pli;eli;t-1}$  temperatura čvora  $p_{li}$  u prethodnom vremenskom intervalu [ $^{\circ}C$ ].

Jednadžba (4) se primjenjuje na svaki elementi  $eli$ .

### 2.1.2.2. Unutarnji čvorovi elemenata

Odnosi se na čvorove  $p_{li}=2, \dots, p_{ln}-1$ , jednadžba toplinske ravnoteže glasi:

$$\begin{aligned}
 & -h_{pli-1;eli} \cdot \vartheta_{pli-1;eli;t} + \left[\frac{\chi_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{pli;eli;t} + h_{pli-1;eli}\right] \cdot \vartheta_{pli;eli;t} - \\
 & h_{pli;eli} \cdot \vartheta_{pli+1;eli;t} = \frac{\chi_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \vartheta_{pli;eli;t-1}
 \end{aligned} \tag{5}$$

gdje su:

- $\vartheta_{pli+1;eli;t}$  temperatura čvora  $p_{li+1}$  [ $^{\circ}C$ ];
- $h_{pli;eli;t}$  provodnost između čvorova  $p_{li+1}$  i  $p_{li}$  [ $W/(m^2K)$ ].

Jednadžba (5) se primjenjuje na neprozirne elemente koji imaju unutarnje čvorove.

### 2.1.2.3. Vanjski čvorovi elemenata

Odnosi se na čvora  $p_{li}=1$  (površinski čvor okrenut prema vanjskoj strani), jednadžba glasi:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\chi_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ce;eli} + h_{re;eli} + h_{pli;eli} \right) \cdot \vartheta_{pli;eli;t} - h_{pli;eli} \cdot \vartheta_{pli+1;eli;t} = \\ & \frac{\chi_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \vartheta_{pli;eli;t-1} + (h_{ce;eli} + h_{re;eli}) \cdot \vartheta_{e;a;t} + \alpha_{sol;pli;eli} \cdot (I_{sol;dif;eli;t} + \\ & I_{sol;dir;eli;t} \cdot F_{sh;obst;eli;t}) - \Phi_{sky;eli;t} \end{aligned} \quad (6)$$

gdje su:

$\vartheta_{e;t}$	temperatura vanjskog okoliša [°C];
$h_{ce;eli}$	vanjski konvektivni koeficijent prijelaza topline [W/(m <sup>2</sup> K)];
$h_{re;eli}$	vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem [W/(m <sup>2</sup> K)];
$\alpha_{sol;eli}$	koeficijent solarne adsorpcije vanjske površine [-];
$I_{sol;dir;eli;t}$	direktni dio solarnog ozračenja elementa [W/m <sup>2</sup> ];
$I_{sol;dif;eli;t}$	difuzni dio solarnog ozračenja elementa u [W/m <sup>2</sup> ];
$F_{sh;obst;eli;t}$	faktor redukcije od vanjskih prepreka [-];
$\Phi_{sky;eli;t}$	toplinsko zračenje prema nebu u [W/(m <sup>2</sup> K)].

Jednadžba (6) se primjenjuje na svaki elementi *eli*.

#### 2.1.2.4. Vanjski čvorovi elemenata u slučaju unutarnjeg zida

Odnosi se na  $pli=1$  (površinski čvor okrenut prema vanjskoj strani)

U slučaju računanja elementa zida koji odjeljuje dvije kondicionirane zone postavljaju se uvjeti:

$$h_{ce;eli} = h_{re;eli} = 0$$

$$\alpha_{sol;pli;eli} = 0$$

$$\Phi_{sky;eli;t} = 0.$$

Na ovaj smo način uveli odgovarajuće korekcije u jednadžbu (6) koji isključuju izmjenu topline prema nebu i izmjenu topline zračenjem i konvekcijom drugoj prostoriji.

### 2.1.3. Toplinska svojstva elemenata zgrade

Za neprozirne elemente se provođenja između čvorova svakog elementa računaju na slijedeći način:

$$h_{pl4;eli;t} = h_{pl1;eli;t} = \frac{6}{R_{c;eli}} \quad (7)$$

$$h_{pl2;eli;t} = h_{pl3;eli;t} = \frac{3}{R_{c;eli}} \quad (8)$$

gdje su

$h_{pli;eli;t}$  koeficijent prolaza topline između čvorova  $pli+1$  i  $pli$ , [ $W/(m^2K)$ ];

$R_{c;eli}$  toplinski otpor neprozirnog elementa  $eli$ , u [ $m^2K/W$ ].

Neprozirni elementi se dijele prema distribuciji mase na klase, kako je prikazano u slijedećoj tablici. Toplinski kapacitet čvorova su dakle ovisni o klasi elementa.

**Tablica 1. Distribucija mase neprozirnih elemenata**

<b>Klasa I</b>	Masa je koncentrirana na unutarnjoj strani
$\chi_{pl5;eli} = \chi_{m;eli}$ $\chi_{pl1;eli} = \chi_{pl2;eli} = \chi_{pl3;eli} = \chi_{pl4;eli} = 0$	
<b>Klasa E</b>	Masa je koncentrirana na vanjskoj strani
$\chi_{pl1;eli} = \chi_{m;eli}$ $\chi_{pl2;eli} = \chi_{pl3;eli} = \chi_{pl4;eli} = \chi_{pl5;eli} = 0$	
<b>Klasa IE</b>	Masa raspoređena na unutarnju i vanjsku stranu
$\chi_{pl1;eli} = \chi_{pl5;eli} = \frac{\chi_{m;eli}}{2}$ $\chi_{pl2;eli} = \chi_{pl3;eli} = \chi_{pl4;eli} = 0$	
<b>Klasa D</b>	Masa jednako raspodjeljena
$\chi_{pl2;eli} = \chi_{pl3;eli} = \chi_{pl4;eli} = \frac{\chi_{m;eli}}{4}$ $\chi_{pl1;eli} = \chi_{pl5;eli} = \frac{\chi_{m;eli}}{8}$	
<b>Klasa M</b>	Masa koncentrirana unutar elementa
$\chi_{pl1;eli} = \chi_{pl2;eli} = \chi_{pl4;eli} = \chi_{pl5;eli} = 0$ $\chi_{pl3;eli} = \chi_{m;eli}$	

Za prozore se provođenje između dva čvora računa prema jednadžbi (9) koja glasi:

$$h_{pl1;eli;t} = \frac{1}{R_{c;eli}} \quad (9)$$

gdje je  $R_{c;eli}$  toplinski otpor prozora i računa se prema jednadžbi (10):

$$R_c = \frac{1}{U_w} - R_{si;v} - R_{se;v} \quad (10)$$

gdje su:

$U_w$  koeficijent prolaza topline prozora, [W/(m<sup>2</sup>K)];

$R_{si;v}$  unutarnji površinski toplinski otpor prozora, [m<sup>2</sup>K/W];

$R_{se;v}$  vanjski površinski toplinski otpor prozora, [m<sup>2</sup>K/W].

Za toplinske kapacitete čvorova prozornih elemenata se pretpostavljaju da imaju vrijednost nula,

$$\chi_{pl1;eli} = \chi_{pl2;eli} = 0. \quad (11)$$

#### 2.1.4. Opći izraz toplinske ravnoteže zone

U svrhu izračuna potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje potrebno je rješavanje jednadžbi opisanih u poglavljima 2.1.1 i 2.1.2 za toplinsku zonu  $ztc$  i vremenski interval  $t$ . Jednadžba iz poglavlja 2.1.1 prikazuje toplinsku ravnotežu zraka u prostoru i temperature unutarnjih čvorova elemenata te ju je potrebno raspisati za svaki element zone. Jednadžbe iz poglavlja 2.1.2 opisuju toplinsku ravnotežu između čvorova te ih je potrebno raspisati za svaki element i svaki čvor elemenata. Raspisane jednadžbe će tvoriti kvadratnu matricu opisanu jednadžbom (12).

$$[Matrica A] \times [Vektor temperatura \text{ čvorova } X] = [Vektor B] \quad (12)$$

[*Matrica A*] Sadrži poznate vrijednosti s lijeve strane jednadžbi opisanih u poglavljima 2.1.1 i 2.1.2. [*Vektor B*] Sadrži poznate vrijednosti s desne strane jednadžbi opisanih u poglavljima 2.1.1 i 2.1.2.

[Vektor temperaturnih čvorova] Sadrži nepoznate vrijednosti temperatura koje tražimo. Redosljed temperatura počinje s vanjskim čvorom elementa 1 ( $pl1$ ) i završava s unutarnjim čvorom elementa  $n$  ( $pln$ ). Redosljed temperatura u matrici je:

$$(\vartheta_{1;1;ztc;t}, \dots, \vartheta_{1;eli;ztc;t}, \dots, \vartheta_{pli;1;ztc;t}, \dots, \vartheta_{pli;eli;ztc;t}, \dots, \vartheta_{pln;eli;ztc;t}, \dots, \vartheta_{pli;eln;ztc;t}, \dots, \vartheta_{pln;eln;ztc;t}, \dots, \vartheta_{int;a;ztc;t})$$

gdje su:

$\vartheta_{pli;eli;ztc;t}$  temperatura čvora  $pli$  elementa zgrade  $eli$  prema 2.1.1 i 2.1.2, [°C];

$\vartheta_{int;a;ztc;t}$  unutarnja temperatura zraka prema 2.1.1, [°C].

## 2.2. Tijek računanja toplinskog opterećenja osjetne topline i temperatura

Cilj proračuna je izračunati stvarnu operativnu temperaturu zone  $\vartheta_{int;op;ztc;t}$  i potrebu za grijanjem ili hlađenjem  $\Phi_{H/C;ld;ztc;t}$ .

Važni ulazni parametri sustava su postavna unutarnja temperatura za grijanje  $\vartheta_{int;set;H;ztc;t}$  i za hlađenje  $\vartheta_{int;set;C;ztc;t}$ . Temperature se odnose na kondicioniranu zonu  $ztc$ , u vremenskom intervalu  $t$ . Vrijednosti navedenih temperatura se unose na satnoj bazi ovisno o potrebama korisnika.

Za svaki sat i svaku zonu računa se unutarnja operativna temperatura  $\vartheta_{int;ac;op;zt;t}$  i rashladno ili ogrjevano opterećenje  $\Phi_{H/C;ld;ztc;t}$  koristeći slijedeće korake.

### 1. korak: Provjeriti postoji li potreba za grijanjem ili hlađenjem

U ovom koraku uzimamo u obzir da sustav grijanja i hlađenja ne daje toplinski učin kako bi izračunali operativnu temperaturu u ovim uvjetima (slobodnim uvjetima).

Stoga se uzima  $\Phi_{H/C;ld;ztc;t} = 0$  te izračunavaju unutarnje operativne temperature  $\vartheta_{int;op;ztc;t}$  po postupku iz poglavlja 2.1.4. Rezultat izračunatih temperatura se imenuje  $\vartheta_{int;op;ztc;t} = \vartheta_{int;op;0;ztc;t}$

gdje su:

$\vartheta_{int;op;0;ztc;t}$  operativna temperatura u slobodnim uvjetima, [°C];

$\Phi_{H/C;ld;ztc;t}$  toplinsko ili rashladno opterećenje, [W];

$\vartheta_{int;op;ztc;t}$  unutarnja operativna temperatura, [°C].

Izračunate temperature čvorova je potrebno spremi i upotrijebiti kao početne vrijednosti kod izračuna slijedećeg vremenskog intervala, kako prikazuju slijedeće jednakosti:

$$\vartheta_{int;a;zt;t-1} = \vartheta_{int;a;zt;t}$$

$$\vartheta_{pli;eli;t-1} = \vartheta_{pli;eli;t}$$

gdje su:

$$\vartheta_{int;a;zt;t} \quad \text{temperatura zraka unutar prostorije, [°C];}$$

$\vartheta_{int;a;zt;t-1}$  temperatura zraka unutar prostorije u prethodnom vremenskom intervalu, [°C];

$$\vartheta_{pli;eli;t} \quad \text{temperatura čvora } pli \text{ elementa } eli, [°C];$$

$\vartheta_{pli;eli;t-1}$  temperatura čvora *pli* elementa *eli* u prethodnom vremenskom intervalu, [°C].

Postavlja se uvjet da ukoliko je operativna temperatura u slobodnim uvjetima između postavnih temperatura grijanja ili hlađenja, tada ne postoji potreba za grijanjem ili hlađenjem. Prikaz uvjeta slijedi:

$$\text{if } \vartheta_{int;set;H;zt;t} \leq \vartheta_{int;op;0;zt;t} \leq \vartheta_{int;set;C;zt;t}:$$

$$\Phi_{H/C;ld;zt;t} = 0$$

$$\vartheta_{int;op;ac;zt;t} = \vartheta_{int;op;0;zt;t}$$

gdje su:

$$\vartheta_{int;op;ac;zt;t} \quad \text{stvarna unutarnja operativna temperatura [°C];}$$

$$\vartheta_{int;set;H;zt;t} \quad \text{postavna unutarnja operativna temperatura za grijanje [°C];}$$

$$\vartheta_{int;set;C;zt;t} \quad \text{postavna unutarnja operativna temperatura za hlađenje [°C].}$$

Za vremenski trenutak u kojem je prethodni uvjet zadovoljen preskaču se slijedeći koraci i uzimaju se dobivene vrijednosti toplinskog opterećenja i operativne temperature. Ukoliko uvjet nije zadovoljen, prelazi se na 2. korak.



## 2. korak: Proračun toplinskog opterećenja grijanja ili hlađenja

Ukoliko je vrijednost operativne temperature u slobodnim uvjetima izvan granica koje definiraju postavne temperature sustava, potrebno je kondicioniranje prostora te se odabire postavna temperatura prema slijedećim uvjetima:

$$\begin{aligned} &\text{if } \vartheta_{int;op;0;zt;t} > \vartheta_{int;set;C;zt;t} \\ &\quad \vartheta_{int;op;set;zt;t} = \vartheta_{int;set;C;zt;t} \\ &\text{if } \vartheta_{int;op;0;zt;t} < \vartheta_{int;set;H;zt;t} \\ &\quad \vartheta_{int;op;set;zt;t} = \vartheta_{int;set;H;zt;t}. \end{aligned}$$

Nakon definiranja postavne temperature sustava u svakom satu, potrebno je izračunati unutarnje operativne temperature  $\vartheta_{int;op;zt;t}$  po postupku iz poglavlja 2.1.4 uzimajući da sustav radi s najvećom mogućom snagom  $\Phi_{H/C;zt;t} = \Phi_{H/C;upper;zt;t}$ . Gdje je  $\Phi_{H/C;upper;zt;t} = \Phi_{H/C;avail;zt;t}$ , ako je dostupna maksimalna snaga grijanja ili hlađenja, a  $\Phi_{H/C;upper;zt;t} = 10 \cdot A_{use;zt;t}$  ako nije dostupna.

Rezultat u ovim uvjetima rada, kada sustav radi s najvećim dostupnom snagom, imenovati  $\vartheta_{int;op;zt;t} = \vartheta_{int;op;upper;zt;t}$ .

Gdje su:

$\Phi_{H/C;upper;zt;t}$  je najveća vrijednost toplinskog opterećenja u W;

$\vartheta_{int;op;upper;zt;t}$  je operativna temperatura prostora kada sustav radi s najvećom snagom u °C.

Stvarna potrebna snaga sustava,  $\Phi_{H/C;ld;zt;t}$ , se računa prema ranije izračunatim vrijednostima operativne temperature u slobodnim uvjetima i uvjetima rada s najvećom snagom te postavnim temperaturama sustava prema jednadžbi (13):

$$\Phi_{H/C;ld;un;zt;t} = \Phi_{H/C;ld;zt;t} \cdot \frac{(\vartheta_{int;op;set;zt;t} - \vartheta_{int;op;0;zt;t})}{(\vartheta_{int;op;upper;zt;t} - \vartheta_{int;op;0;zt;t})} \quad (13)$$

gdje su:

$\Phi_{H/C;ld;un;zt;t}$  ogrjevno ili rashladno opterećenje potrebno da se dosegne postavna temperatura, [W].

3. **korak:** Provjeriti jeli dostupna snaga grijanja ili hlađenja dovoljna

Ukoliko je dostupna snaga za grijanje ili hlađenje dovoljna, vrijedi slijedeći uvjet:

$$\begin{aligned} \text{if } -\Phi_{C;avail;ztc;t} < \Phi_{H/C;ld;ztc;t} < \Phi_{H;avail;ztc;t} \\ \Phi_{H/C;ld;ztc;t} &= \Phi_{H/C;ld;un;ztc;t} \\ \vartheta_{int;op;ac;ztc;t} &= \vartheta_{int;op;set;ztc;t}. \end{aligned}$$

Vrijednost  $\Phi_{H/C;ld;ztc;t}$  će biti imati pozitivan predznak ukoliko je potrebno grijanje, a negativan ukoliko je potrebno hlađenje. Vrijednosti  $\Phi_{H;avail;ztc;t}$  i  $\Phi_{C;avail;ztc;t}$  su apsolutne vrijednosti te su uvijek pozitivne.

Gdje su:

$$\begin{aligned} \Phi_{H;avail;ztc;t} &\text{ najveća dostupna vrijednost snage za grijanje, [W];} \\ \Phi_{C;avail;ztc;t} &\text{ najveća dostupna vrijednost snage za hlađenje, [W].} \end{aligned}$$

Rezultate dobivenih temperatura je potrebno spremati i upotrijebiti kao početne vrijednosti pri proračunu u idućem vremenskom trenutku kako slijedi:

$$\begin{aligned} \vartheta_{int;a;ztc;t-1} &= \vartheta_{int;a;ztc;t} \\ \vartheta_{pli;eli;t-1} &= \vartheta_{pli;eli;t}. \end{aligned}$$

4. **korak:** Izračun unutarnje temperature ako dostupna snaga nije dovoljna.

Ukoliko dostupna snaga za grijanje ili hlađenje nije dovoljna, točnije ne zadovoljava uvjet iz 3. koraka, uzimaju se najveće dostupne vrijednosti snage grijanja ili hlađenja na slijedeći način:

$$\begin{aligned} \text{if } \Phi_{H/C;ld;ztc;t} > \Phi_{H;avail;ztc;t} \\ \Phi_{H;ld;ztc;t} &= \Phi_{H;avail;ztc;t} \\ \text{if } \Phi_{H/C;ld;ztc;t} < -\Phi_{C;avail;ztc;t} \\ \Phi_{C;ld;ztc;t} &= \Phi_{C;avail;ztc;t}. \end{aligned}$$

Nadalje je potrebno izračunati unutarnju operativnu temperaturu  $\vartheta_{int;op;ztc;t}$  prema 2. koraku uzimajući maksimalnu dostupnu snagu grijanja ili hlađenja i rezultat spremati kao:

$$\vartheta_{int;op;ztc;t} = \vartheta_{int;op;upper;ztc;t}.$$

Izračunate temperature unutarnjeg zraka ( $\vartheta_{int;a;ztc;t}$ ) i čvorova ( $\vartheta_{pli;eli;t}$ ) je potrebno spremiti kao početne vrijednosti za slijedeći vremenski interval kako slijedi:

$$\vartheta_{int;a;ztc;t-1} = \vartheta_{int;a;ztc;t}$$

$$\vartheta_{pli;eli;t-1} = \vartheta_{pli;eli;t}$$

### 5. korak: Izračun stvarne potrebe za grijanje i hlađenje

U ovom koraku se iz rezultata potrebe za grijanjem i hlađenjem  $\Phi_{H/C;ld;ztc;t}$ , odvajaju vrijednosti za grijanje  $\Phi_{H;ld;ztc;t}$  i hlađenje  $\Phi_{C;ld;ztc;t}$  s ogovarajućim predznakom, to jest u obliku apsolutne vrijednosti prema algoritmu:

if  $\Phi_{H/C;ld;ztc;t} > 0$

$$\Phi_{H;ld;ztc;t} = \Phi_{H/C;ld;ztc;t}$$

$$\Phi_{C;ld;ztc;t} = 0$$

if  $\Phi_{H/C;ld;ztc;t} < 0$

$$\Phi_{C;ld;ztc;t} = -\Phi_{H/C;ld;ztc;t}$$

$$\Phi_{H;ld;ztc;t} = 0.$$

Gdje su vrijednosti za toplinski reguliranu zonu u vremenu t:

$\Phi_{H/C;ld;ztc;t}$  stvarna toplinska energija za grijanje (ako je pozitivna) ili hlađenje (ako je negativna), [W];

$\Phi_{H;ld;ztc;t}$  stvarna toplinska energija za grijanje, [W];

$\Phi_{C;ld;ztc;t}$  stvarna toplinska energija za hlađenje, [W].

### Period inicijalizacije:

Sami vremenski period u kojemu se obavlja proračuna mora prethoditi period inicijalizacije dovoljno dug kako bi učinio utjecaj početnih pretpostavljenih vrijednosti temperatura zanemarivim. Za proračun koji počinje 1. siječnja, početnom vremenskom trenutku će prethoditi period od barem 18.-31. prosinca.

### 2.3. Operativna temperatura

Operativna temperatura u zoni  $ztc$  u vremenskom intervalu  $t$  je srednja vrijednost temperature zraka u prostoriji i srednje vrijednosti temperature zračenja te se računa prema jednadžbi (14):

$$\vartheta_{int;op;ztc;t} = \frac{\vartheta_{int;a;ztc;t} + \vartheta_{int;r;mn;ztc;t}}{2} \quad (14)$$

gdje su:

$\vartheta_{int;op;ztc;t}$  unutarnja operativna temperatura, [°C];

$\vartheta_{int;a;ztc;t}$  temperatura zraka unutar prostorije, [°C];

$\vartheta_{int;r;mn;ztc;t}$  vrijednost srednje temperature zračenja u °C prema jednadžbi (15);

$$\vartheta_{int;r;mn;ztc;t} = \frac{\sum_{eli=1}^{elin} (A_{eli} \cdot \vartheta_{pli=pln;eli;t})}{\sum_{eli=1}^{elin} (A_{eli})} \quad (15)$$

gdje su:

$A_{eli}$  površina elementa građevine  $eli$ , [m<sup>2</sup>];

$\vartheta_{pli=pln;eli;t}$  temperatura  $pli=pln$ , čvora unutar prostorije, [°C].

Temperature čvorova i zraka u prostoriji se dobivaju rješavanjem sustava jednadžbi iz poglavlja 2.1.2.

### 3. PROCJENA VALJANOSTI SATNE METODE

U svrhu potvrde ispravnosti proračuna ponovljen je primjer predstavljen u normi s ciljem potvrde ispravnosti unošenja jednadžbi. Radi se o referentnoj prostoriji za koju su dani svi potrebni podatci u svrhu izračuna vrijednosti topline koju je potrebno dovesti ili odvesti na satnoj bazi kroz godinu. Korišten je programski paket *Matlab*.

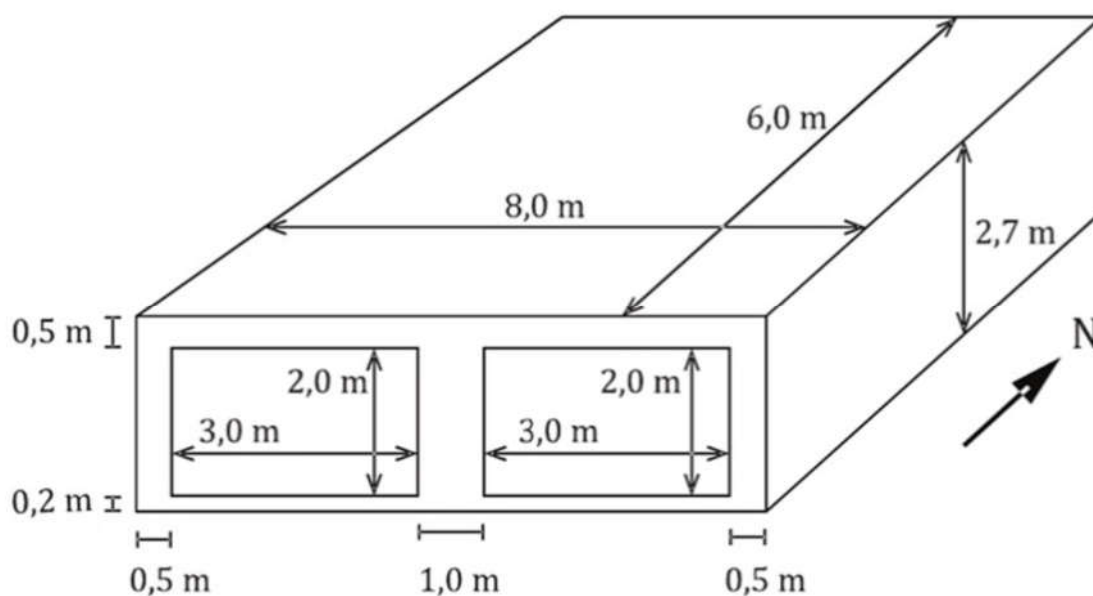
Za satnu metodu se rješava sustav jednadžbi iz poglavlja 2.1.4. prema koracima iz 2.2

Referentni slučaj ne uzima u obzir:

- Prijenos topline prema tlu,
- Prijenos topline između zona,
- Utjecaj toplinskih mostova,
- Osjenjenje vanjskih prepreka,
- Kompleksne kontrole temperature,
- Utjecaj latentne topline.

#### 3.1. Parametri jednadžbi

##### 3.1.1. Geometrija referentne prostorije



Slika 1. Geometrija referentne prostorije

Tablica 2. Geometrijske vrijednosti referentne prostorije

Komponenta	Površina [m <sup>2</sup> ]
Prednji zid (južni)	9,6
Lijevi zid (zapadni)	16,2
Desni zid (istočni)	16,2
Stražnji zid (sjeverni)	21,6
Prozor	12
Pod	48
Strop	48
Volumen [m <sup>3</sup> ]	
129,6	

### 3.1.2. Toplinska svojstva neprozirnih elemenata

Toplinski kapaciteti čvorova i koeficijenti prolaza topline se određuju na način opisan poglavljju 2.1.3.

Specifični toplinski kapacitet elemenata klasificira se prema vrsti elementa shodno slijedećoj tablici

Tablica 3. Specifični toplinski kapacitet elemenata

Klasa	$\chi_{m,op} J / (m^2 K)$	Specifikacija klase
<i>Very light</i>	50000	Konstrukcija ne sadrži komponente mase
<i>Light</i>	75000	Konstrukcija ne sadrži komponente mase osim tankog sloja lagane cigle ili betona (5-10cm)
<i>Medium</i>	110000	Konstrukcija ne sadrži komponente mase osim tankog sloja lagane cigle ili betona (10-20cm) ili manje od 7 cm pune cigle ili teškog betona
<i>Heavy</i>	175000	Konstrukcija sadrži 7-12 cm pune cigle ili teškog betona

<b>Tablica 3 nastavak</b>		
<b>Klasa</b>	$\chi_{m,op} J / (m^2 K)$	<b>Specifikacija klase</b>
<i>Veary heavy</i>	250000	Konstrukcija sadrži 12 ili više cm pune cigle ili teškog betona

Provodnost između čvorova ovisi o toplinskim otporima koje opise slijedeća tablica

**Tablica 4. Iznosi toplinskih otpora elemenata**

<b>Element</b>	<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>
Vanjski zid	1,789
Pod	25,254
Strop	2,992

Iznosi provodnosti čvorova svakog elementa se računaju na slijedeći način:

$$h_{pl4;eli;t} = h_{pl1;eli;t} = \frac{6}{R_{c;eli}} \quad (16)$$

$$h_{pl2;eli;t} = h_{pl3;eli;t} = \frac{3}{R_{c;eli}} \quad (17)$$

gdje su:

$h_{pli;eli;t}$  koeficijent prolaza topline između čvorova  $pli+1$  i  $pli$ , [W/(m<sup>2</sup>K)];

$R_{c;eli}$  toplinski otpor neprozirnog elementa  $eli$ , [m<sup>2</sup>K/W].

### 3.1.3. Toplinska svojstva veličine na razini zone

Specifični toplinski kapacitet zraka i namještaja je  $\chi_{m,int} = 10000$  J/(m<sup>2</sup>K).

### 3.1.4. Toplinska svojstva veličine prozora

Prozor referentne prostorije sadrži sljedeće karakteristike:

$$g_{g;n} = 0,789$$

$$F_w = 0,9$$

$$g_g = g_{g;n} \cdot F_w = 0,907$$

$$U_w = 2,984 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$R_{se;v} = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

$$R_{si;v} = 0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

$$F_{fr} = 0$$

$$\alpha_{sol} = 0,6.$$

Toplinski otpor prozora iznosi:

$$R_c = \frac{1}{U_w} - R_{si;v} - R_{se;v} = 0,165 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}. \quad (18)$$

### 3.1.5. Faktor gubitaka prema nebu

Faktori iznose:

$$F_{sky} = 1,0 \quad \text{za krov}$$

$$F_{sky} = 0,5 \quad \text{za zidove.}$$

### 3.1.6. Faktori konvektivnog dijela toplinskih dobitaka

Faktori iznose:

$$f_{int;c} = 0,40$$

$$f_{sol;c} = 0,10$$

$$f_{H;c} = f_{C;c} = 1,0.$$



## 3.1.7. Koeficijenti prolaza i toplinski kapaciteti za elemente prostorije

Tablica 5. Parametri za elemente prostorije

Element	Klasa distribucije mase	Klasa kapaciteta	$\chi_{m;pti;eli} \left[ \frac{J}{m^2K} \right]$	$h_{pti;eli} \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$
Element 1 Zid S	D	Very light	$\chi_{pl2;el1} = \chi_{pl3;el1} = \chi_{pl4;el1} = 12500$ $\chi_{pl1;el1} = \chi_{pl5;el1} = \frac{\chi_{m;eli}}{8} = 6250$	$h_{pl4;el1} = h_{pl1;el1} = 3,354$ $h_{pl2;el1} = h_{pl3;el1} = 1,677$
Element 2 Zid I	D	Very light	$\chi_{pl2;el2} = \chi_{pl3;el2} = \chi_{pl4;el2} = 12500$ $\chi_{pl1;el2} = \chi_{pl5;el2} = \frac{\chi_{m;eli}}{8} = 6250$	$h_{pl4;el2} = h_{pl1;el2} = 3,354$ $h_{pl2;el2} = h_{pl3;el2} = 1,677$
Element 3 Zid J	D	Very light	$\chi_{pl2;el3} = \chi_{pl3;el3} = \chi_{pl4;el3} = 12500$ $\chi_{pl1;el3} = \chi_{pl5;el3} = \frac{\chi_{m;eli}}{8} = 6250$	$h_{pl4;el3} = h_{pl1;el3} = 3,354$ $h_{pl2;el3} = h_{pl3;el3} = 1,677$
Element 4 Zid Z	D	Very light	$\chi_{pl2;el4} = \chi_{pl3;el4} = \chi_{pl4;el4} = 12500$ $\chi_{pl1;el4} = \chi_{pl5;el4} = \frac{\chi_{m;eli}}{8} = 6250$	$h_{pl4;el4} = h_{pl1;el4} = 3,354$ $h_{pl2;el4} = h_{pl3;el4} = 1,677$
Element 5 Pod	I	Very light	$\chi_{pl5;eli} = \chi_{m;eli}$ $\chi_{pl1;eli} = \chi_{pl2;eli} = \chi_{pl3;eli} = \chi_{pl4;eli} = 0$	$h_{pl1;el5} = \frac{1}{R_{c;eli}} = 0,04$
Element 6 Strop	D	Very light	$\chi_{pl2;el6} = \chi_{pl3;el6} = \chi_{pl4;el6} = 12500$ $\chi_{pl1;el6} = \chi_{pl5;el6} = \frac{\chi_{m;eli}}{8} = 6250$	$h_{pl4;el6} = h_{pl1;el6} = 3,354$ $h_{pl2;el6} = h_{pl3;el6} = 1,677$
Element 7 Pozor	-	-	$\chi_{pl1;el7} = \chi_{pl2;el7} = 0$	$h_{pl1;el7} = \frac{1}{R_{c;eli}} = 6,056$

### 3.1.8. Rubni uvjeti

Tablica 6. Koeficijenti prijelaza topline referentne prostorije

Koeficijent prijelaza topline [W/(m <sup>2</sup> K)]	Oznaka	Smjer toka topline		
		Prema gore	Horizontalno	Prema dolje
Konvektivni koeficijent, unutanja površina	$h_{c,i}$	5,0	2,5	0,7
Konvektivni koeficijent, vanjska površina	$h_{c,e}$	20	20	20
Koeficijent zračenjem, unutanja površina	$h_{r,i}$	5,13	5,13	5,13
Koeficijent zračenjem, vanjska površina	$h_{r,e}$	4,14	4,14	4,14

### 3.1.9. Klimatski podaci

Podaci su na satnoj bazi i čine ih vrijednosti:

$\vartheta_{e;a;t}$  temperatura vanjskog zraka;

$I_{sol;dir;eli;t} + I_{sol;dir;eli;t}$  ukupno direktno i difuzno ozračenje za svaku orijentaciju.

Tablica 7 prikazuje klimatske podatke za referentni datum prvoga travnja.

Tablica 7. Primjer klimatskih podataka za referentni dan 1. travanj

Sati [h]	Vanjska temperatura [°C]	Solarno ozračenje [W/m <sup>2</sup> ]				
		NV	EV	SV	WV	H
1	13,5	0	0	0	0	0
2	12,6	0	0	0	0	0
3	11,7	0	0	0	0	0
4	11,3	0	0	0	0	0
5	11	0	0	0	0	0
6	10,6	2,56	2,56	2,56	2,56	5
7	11	40,59	78,19	38,13	38,13	76,48
8	11,3	74,52	140,25	81,67	74,52	157,98
9	11,7	107,05	181,71	130,16	107,05	235,74
10	13,9	152,96	268,66	222,30	152,96	383,32
11	16,1	177,80	312,42	336,76	177,80	534,97
12	18,3	175,84	243,30	442,08	175,84	665,37
13	18,3	181,36	181,36	393,77	241,86	612,63
14	18,3	172,30	172,30	334,03	315,52	531,04
15	18,3	154,41	154,41	257,60	332,87	426,57
16	18,3	124,24	124,24	236,20	502,01	402,98
17	18,3	89,78	89,78	138,82	587,75	300,02
18	18,3	82,59	48,33	48,33	531,69	147,78
19	15,5	5,44	4,86	4,86	7,28	8,91
20	12,8	0	0	0	0	0
21	10	0	0	0	0	0
22	9,8	0	0	0	0	0
23	9,6	0	0	0	0	0
24	9,4	0	0	0	0	0

Ukupno solarno ozračenje je podijeljeno po stranama svijeta za vertikalno položene elemente (zidove), a stupac H se odnosi na horizontalno položeni element (krov).

### **3.1.10. Unutarnji toplinski dobici**

Ukupni unutarnji toplinski dobici su

$$\Phi_{int;ztc;t} = 200 \text{ W.}$$

### **3.1.11. Ventilacija**

Iznos izmjena zraka infiltracijom je:

$$ACH=0,41 \text{ izmjena/h.}$$

Infiltracija je kontinuirana (24 h/dan cijele godine).

Iznos protoka zraka je:

$$q_v = 1,107 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2\text{h}}.$$

### **3.1.12. Strategija kontrole**

Kontinuirana strategija kontrole sadrži postavne temperature:

$$\vartheta_{int;set;H} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_{int;set;C} = 17 \text{ }^\circ\text{C.}$$

### **3.1.13. Dostupan toplinski i rashladni kapacitet**

Iznosi kapaciteta su:

$$\Phi_{H;avail} = 100000 \text{ kW}$$

$$\Phi_{C;avail} = 100000 \text{ kW.}$$

### **3.1.14. Opis verifikacijskog slučaja**

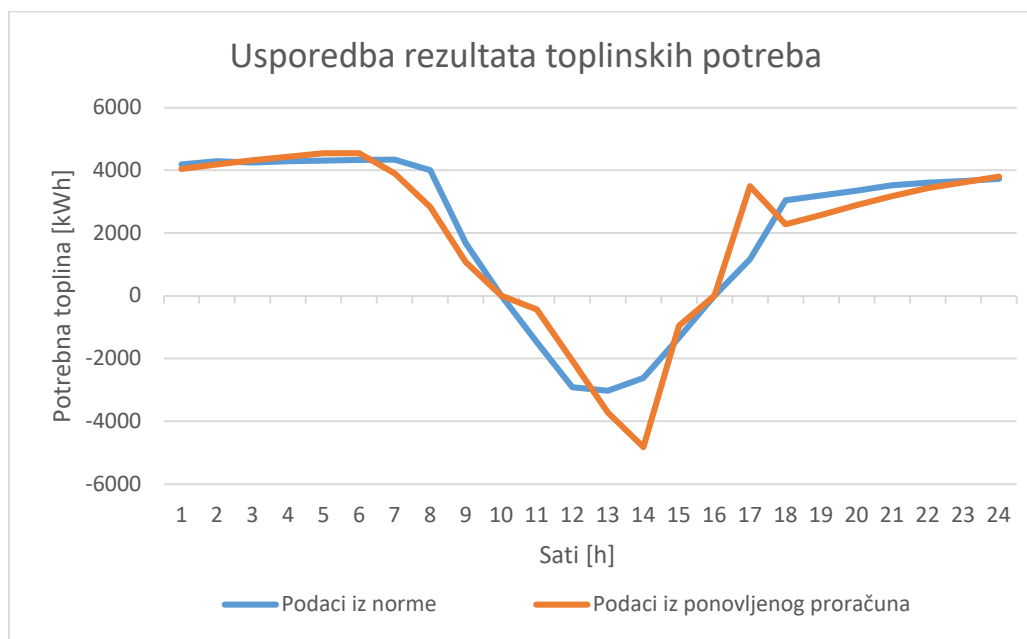
Vrsta konstrukcije: Lagana (*eng. lightweight*).

Kontrolna strategija termostata: Kontinuirana.

## 3.2. Rezultati verifikacijskog slučaja

Tablica 8. Rezultati potrebne topline na satnoj bazi

	Podaci iz norme	Podaci iz ponovljenog proračuna
Sat	0,001 $\Phi_{H/C;td}$ [kWh]	0,001 $\Phi_{H/C;td}$ [kWh]
1	4189	4040,8
2	4287	4184
3	4254	4316,4
4	4289	4438,4
5	4314	4550,6
6	4334	4552,7
7	4351	3902,9
8	4008	2830,9
9	1678	1079,3
10	0	0
11	-1478	-435,75
12	-2916	-2064,5
13	-3028	-3718,6
14	-2620	-4819,6
15	-1330	-951,72
16	0	0
17	1170	3489,7
18	3047	2276,2
19	3194	2577,4
20	3347	2892,8
21	3529	3175,3
22	3602	3428,8
23	3661	3614,8
24	3729	3799,5
Ukupno Grijanje [kWh]	60983	59151
Ukupno Hlađenje [kWh]	11372	11990



**Slika 2. Usporedba potrebne toplinske energije verifikacijskog slučaja**

Rezultati potrebnog toplinskog opterećenja u sklopu ovog rada dobiveni su praćenjem koraka iz poglavlja 2.2, točnije, rješavanjem jednažbi (1), (4), (5) i (6) iz poglavlja 2.1.1 i 2.1.2 za svaki element posebno na način koji je opisan u poglavlju 2.1.4. koristeći podatke o vrijednosti varijabli iz poglavlja 3.1.

Usporedbom rezultata dobivenih u ovom proračunu s rezultatima za referentni dan koji se nalazi u normi, dolazi se do zaključka kako je podudaranje rezultata dovoljno za primjenu opisanog proračuna na stvarnom primjeru kako bi se na taj način dobili točni podaci o toplinskom opterećenju.

## 4. PRORAČUN OPTEREĆENJA REFERENTNE ZGRADE ZA OBRAZOVANJE

U ovome poglavlju će se primijeniti norma HRN EN ISO 52016-1:2017 na referentnoj zgradi za obrazovanje iz dokumenata Ministarstva prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine [6].

### 4.1. Zgrada za obrazovanje gotovo nulte energije

Direktiva Europske unije o energetske učinkovitosti zgrada nalaže da sve nove zgrade od 2021 moraju biti zgrade gotovo nulte energije (*eng. Near Zero Energy Building; nZEB*). Što podrazumijeva zgrade vrlo visoke energetske efikasnosti čije se značajni dio energetske potreba pokriva obnovljivim izvorima energije.

Referentne zgrade predstavljaju zgrade prosječnog oblika koje se definiraju za određeno podneblje i namjenu. U obzir se uzimaju klimatski uvjeti te zahtjevi za grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom. Ovojnicu zgrade čine standardni materijali, a debljinu definiraju klimatski uvjeti i potreba za izolacijom. Računanjem vrijednosti, poput potrebne energije za grijanje i hlađenje referentne nZEB zgrade, dobivamo referentni slučaj koji služi kao orijentir za gradnju novih nZEB objekata.

Predmet razmatrana je referentna zgrada za obrazovanje gotovo nulte energije (nZEB) za kontinentalnu Hrvatsku [6]. Zgrada je dvoetažna, kondicionirane površine 2282 m<sup>2</sup>, čine ju 24 prostorije te dvoetažni hodnik s 4 stubišta. Cijeli prostor zgrade je grijan, odnosno hlađen. Zgrada je modelirana kao jedna zona.

Podaci o potrebnoj energiji za grijanje i hlađenje kroz godinu dobiveni su primjenom metode opisane normom HRN EN ISO 52016-1:2017 prema proračunu iz poglavlja 2. Vrijeme grijanja, odnosno hlađenja, zadano je 14 sati u danu tokom 5 dana u tjednu. Isto vrijedi i za zaposjednutost korisnika a time i korištenje uređaja i rasvjete.

Postavna temperatura za režim grijanja iznosi 20°C za vrijeme zaposjednutosti zgrade te 17°C izvan vremena zaposjednutosti. U slučaju hlađenja, za vrijeme zaposjednutosti zgrade, postavna temperatura iznosi 22°C dok se izvan tog vremena modelira prekid hlađenja. Vikendom je modeliran prekid grijanja i hlađenja. Navedene podatke prikazuje tablica 11.

Infiltracija iznosi 0,7 izmjena po satu, prosječni toplinski dobiti od korisnika iznose 6 W/m<sup>2</sup>K, a dobiti od rasvjete 7,2 W/m<sup>2</sup>K. Podaci o geometriji zgrade i građevnim dijelovima dani su u tablicama 9 i 10.

Tablica 9. Podaci o geometriji zgrade za obrazovanje

duljina x širina x visina	100 x 28 x 8		m x m x m
ploština korisne površine	2282		m <sup>2</sup>
Udio prozora u ovojnici	Sjever	117,4	m <sup>2</sup>
	Istok	30	m <sup>2</sup>
	Jug	467,4	m <sup>2</sup>
	Zapad	30	m <sup>2</sup>

Tablica 10. Toplinska svojstva građevnih dijelova zgrade za obrazovanje

Prosječni koeficijent prolaska topline zidova	0,17	W/m <sup>2</sup> K	
Prosječni koeficijent prolaska topline krova	0,14	W/m <sup>2</sup> K	
Prosječni koeficijent prolaska topline podruma	0,17	W/m <sup>2</sup> K	
Prosječni koeficijent prolaska topline prozora	1,3	W/m <sup>2</sup> K	
Toplinski kapacitet prema jedinici površine	260000	J/m <sup>2</sup> K	
Toplinski mostovi	Ukupna duljina	360	m
	Prosječni linijski koeficijent prolaza	-0,04	W/mK
Vrste zasjenjenja	Grilje ili rolete		
Prosječni g-faktor	Ostakljenje	0,6	-
	Ostakljenje + zasjenjenje	0,18	-
Infiltracija	0,7	1/h	

Tablica 11. Postavne temperature i režimi korištenja

Radni dani				
Postavna temperatura	Zima	6:00-19:00 h	20	°C
		19:00-6:00 h	17	°C
	Ljeto	6:00-19:00 h	22	°C
		19:00-6:00 h	-	°C



<b>Nastavak Tablica 11.</b>			
Radni dani			
toplinski dobici od korisnika	6:00-19:00 h	6	W/m <sup>2</sup> K
dobici od rasvjete		7,2	W/m <sup>2</sup> K
Vikend			
Nezaposjednuta zgrada, prekid grijanja i hlađenja.			

**Tablica 12. Toplinska svojstva elemenata građevine**

Vanjski zid	$h_{pl}$ [W/m <sup>2</sup> K]		$\kappa_{pl}$ [J/ m <sup>2</sup> K ]
$h_{pl1}$	1	$\kappa_{pl1}$	-
$h_{pl2}$	0,5	$\kappa_{pl2}$	-
$h_{pl3}$	0,5	$\kappa_{pl3}$	-
$h_{pl4}$	1	$\kappa_{pl4}$	-
		$\kappa_{pl5}$	260000
Pod	$h_{pl}$ [W/m <sup>2</sup> K]		$\kappa_{pl}$ [J/ m <sup>2</sup> K ]
$h_{pl1}$	1	$\kappa_{pl1}$	32500
$h_{pl2}$	0,5	$\kappa_{pl2}$	65000
$h_{pl3}$	0,5	$\kappa_{pl3}$	65000
$h_{pl4}$	1	$\kappa_{pl4}$	65000
Strop	$h_{pl}$ [W/m <sup>2</sup> K]		$\kappa_{pl}$ [J/ m <sup>2</sup> K ]
$h_{pl1}$	0,84	$\kappa_{pl1}$	-
$h_{pl2}$	0,42	$\kappa_{pl2}$	-
$h_{pl3}$	0,42	$\kappa_{pl3}$	-
$h_{pl4}$	0,84	$\kappa_{pl4}$	-
		$\kappa_{pl5}$	260000
Prozor	$h_{pl}$ [W/m <sup>2</sup> K]		$\kappa_{pl}$ [J/ m <sup>2</sup> K ]
$h_{pl}$	1,8	$\kappa_{pli}$	-

Vrijednost provođenja topline između čvorova elemenata zgrade ( $h_{pli}$ ) određena je prema jednadžbama (9) i (10), Raspodjela toplinskih kapaciteta je definirana u tablici 3, prema njoj će klasa raspodjele kapaciteta vanjskih zidova i stropa biti **I**, a klasa poda će biti **D**. Klasa I se odnosi na elemente kojima je masa koncentrirana na unutarnjoj strani elementa, točnije na unutarnjem čvoru, što se pojavljuje zbog prisustva izolacije na vanjskoj strani. Kod klase D je masa jednoliko raspodijeljena po čvorovima što je slučaj kod elemenata bez izolacije.

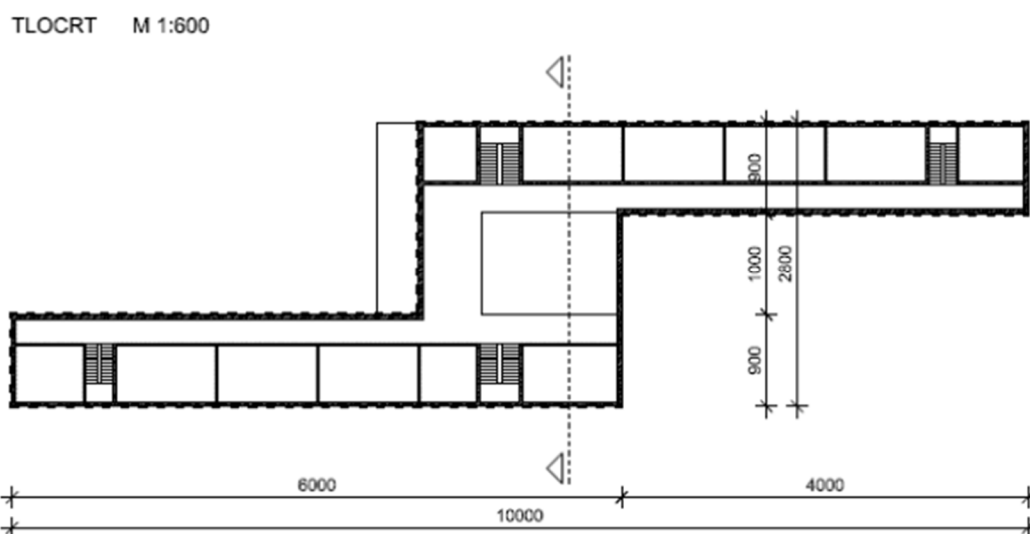
Primijenjene vrijednosti koeficijenata prolaza topline konvekcijom i zračenjem uzete su iz tablice 6. Solarni parametri navedeni su u tablici 13.

**Tablica 13. Solarni parametri**

Koeficijent prolaza topline prozirnih građevnih elemenata		$U_w$	2,984	[W/m <sup>2</sup> K]
Koeficijent solarne apsorpcije		$\alpha_{sol}$	0,6	[-]
Toplinski otpor prozora		$R_c$	0,165	[m <sup>2</sup> K/W]
Faktor smanjenja zbog kuta upadanja		$F_w$	0,9	[-]
Faktor gubitaka prema nebu	Za krov	$F_{sky}$	1	[-]
	Za zidove	$F_{sky}$	0,5	[-]

Otvorenost roleta modelirana je prema potrebi za grijanjem ili hlađenjem. Na način da su rolete otvorene ako postoji potreba za grijanjem, a zatvorene ukoliko postoji potreba za hlađenjem. Na ovaj način se smanjuje potrebna energija za grijanjem ili hlađenjem.

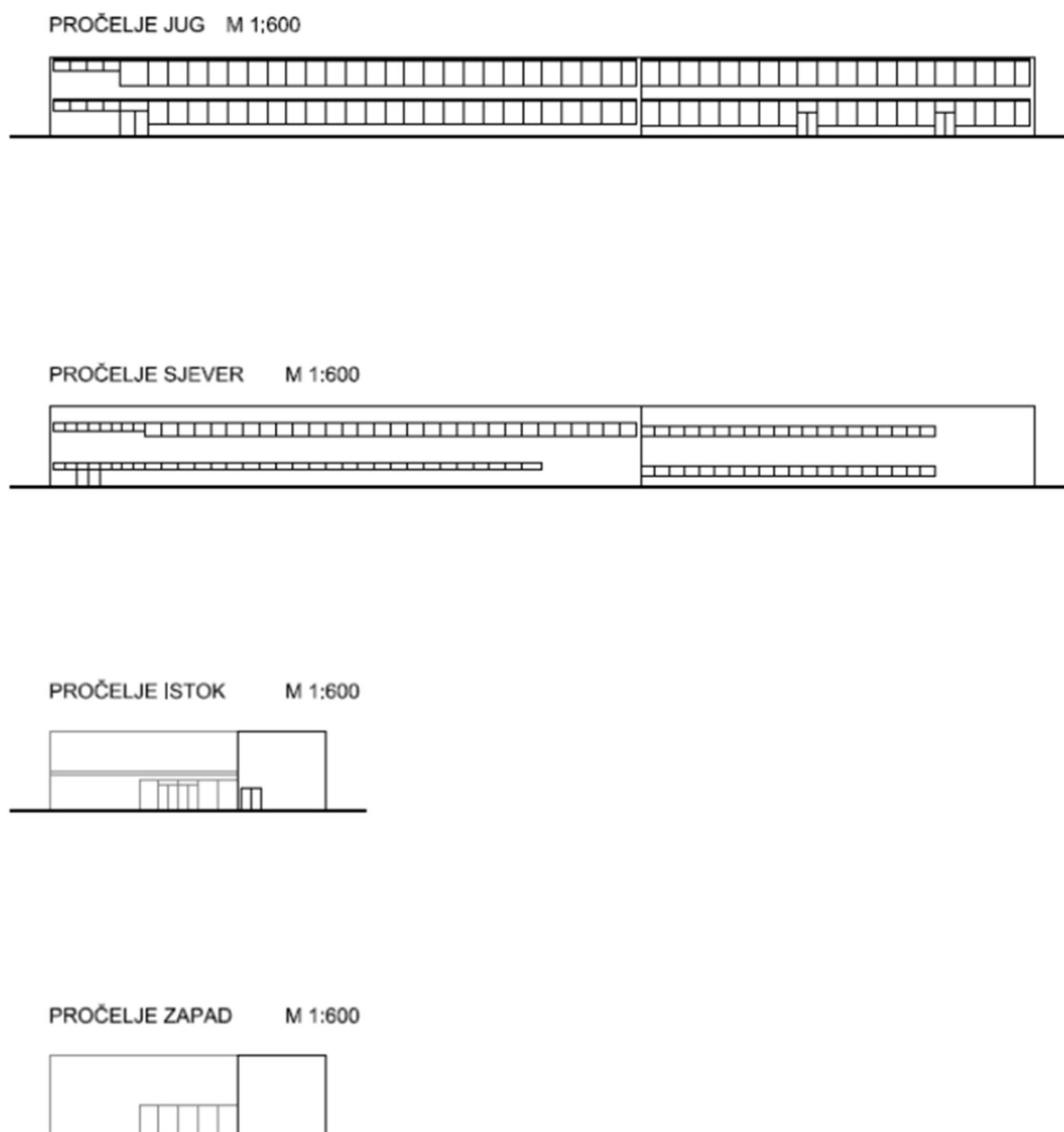
Tlocrt, presjek i pročelja nZEB zgrade za obrazovanje prikazani su na slijedećim slikama



**Slika 3. Tlocrt nZEB referentne zgrade za obrazovanje**



Slika 4. Presjek nZEB referentne zgrade za obrazovanje

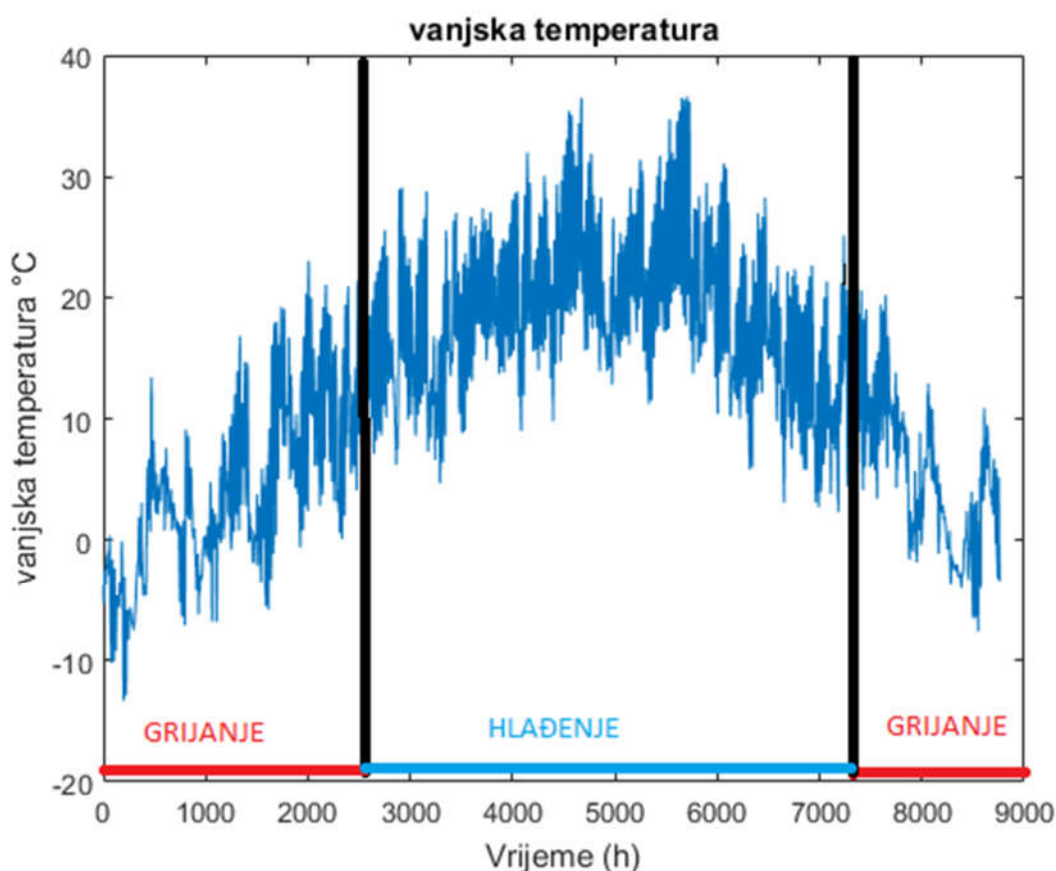


Slika 5. Pročelja nZEB referentne zgrade za obrazovanje

## 4.2. Rezultati proračuna potrebne energije satnom metodom

Simulacija referentne nZEB zgrade za obrazovanje rađena je u programskom paketu *Matlab* korištenjem satne metode prema normi HRN EN ISO 52016-1:2017. Svi potrebni meteorološki podaci uzeti su za referentnu godinu i lokaciju Zagreb, Maksimir.

Sustav radi u režimu grijanja ukupno 3960 sati i to između prvog sata u godini i 2500-tog te između 7300-tog i 8760-tog. U režimu hlađenja sustav radi 4800 sati, između 2500-tog i 7300-tog sata u godini.



Slika 6. Vanjska temperatura s prikazanim sezonama grijanja i hlađenja

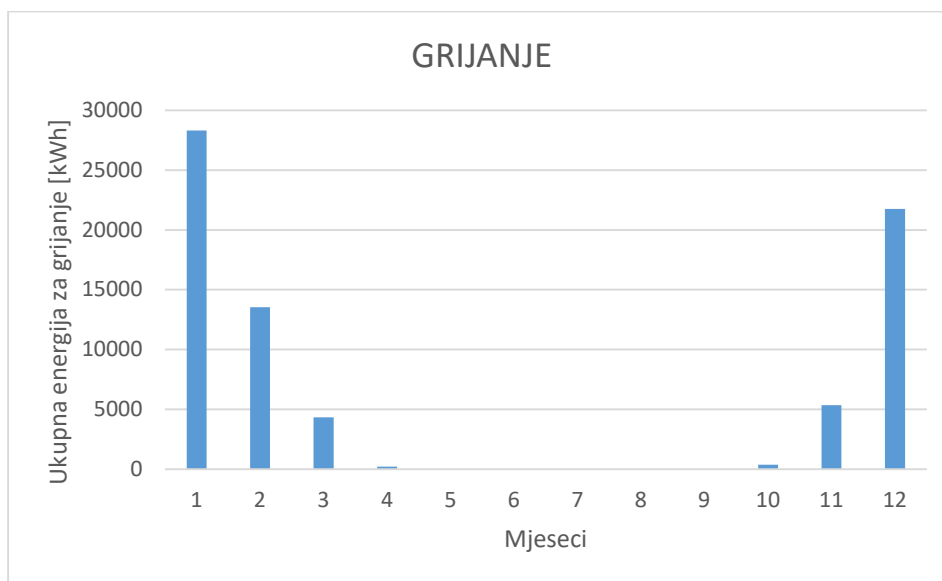
Ukupna energetska potreba za grijanje u referentnoj godini je 91525 kWh, odnosno 41 kWh/m<sup>2</sup>, dok je ukupna energetska potreba za hlađenjem 77323,8 kWh, odnosno 33,88 kWh/m<sup>2</sup>. Prikaz toplinskih potreba zgrade na mjesečnoj bazi nalazi se u tablici 14.

## 4.2.1. Mjesečni prikaz energetske potrebe

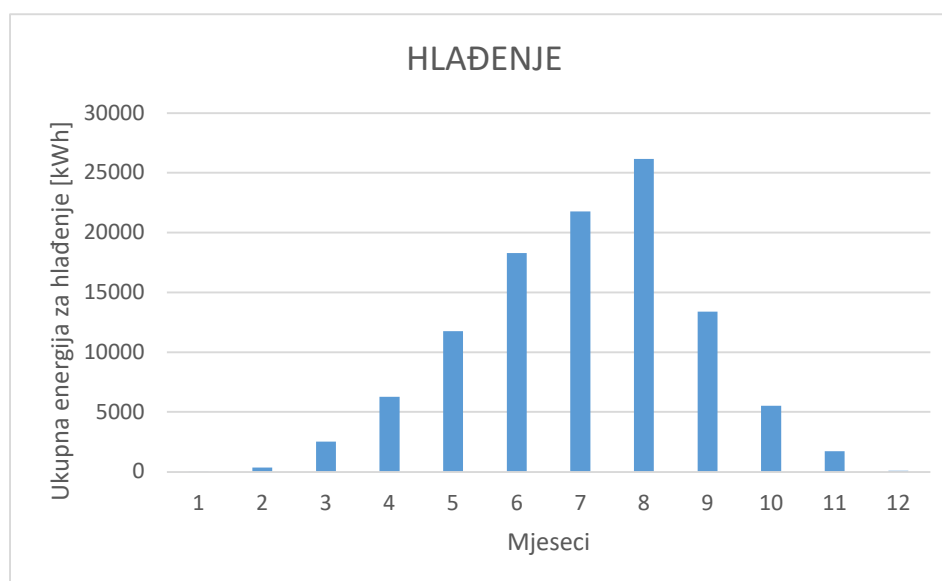
Tablica 14. Mjesečno toplinsko opterećenje

Mjesec	Grijanje [kWh]	Hlađenje [kWh]
Siječanj	27403	0
Veljača	15046,2	0
Ožujak	6275,7	0
Travanj	880,5	0
Svibanj	0	11733,8
Lipanj	0	16782,2
Srpanj	0	19660,2
Kolovoz	0	23901,8
Rujan	0	12964,2
Listopad	0	6482,7
Studeni	6586,8	
Prosinac	21131,6	
<b>Σ</b>	<b>77323,8</b>	<b>91525</b>
<b>Specifična energija [kWh/m<sup>2</sup>]</b>		
	<b>41</b>	<b>33,88</b>

Grafički prikazi mjesečnih potreba za grijanje i hlađenje prikazani su sljedećim slikama.



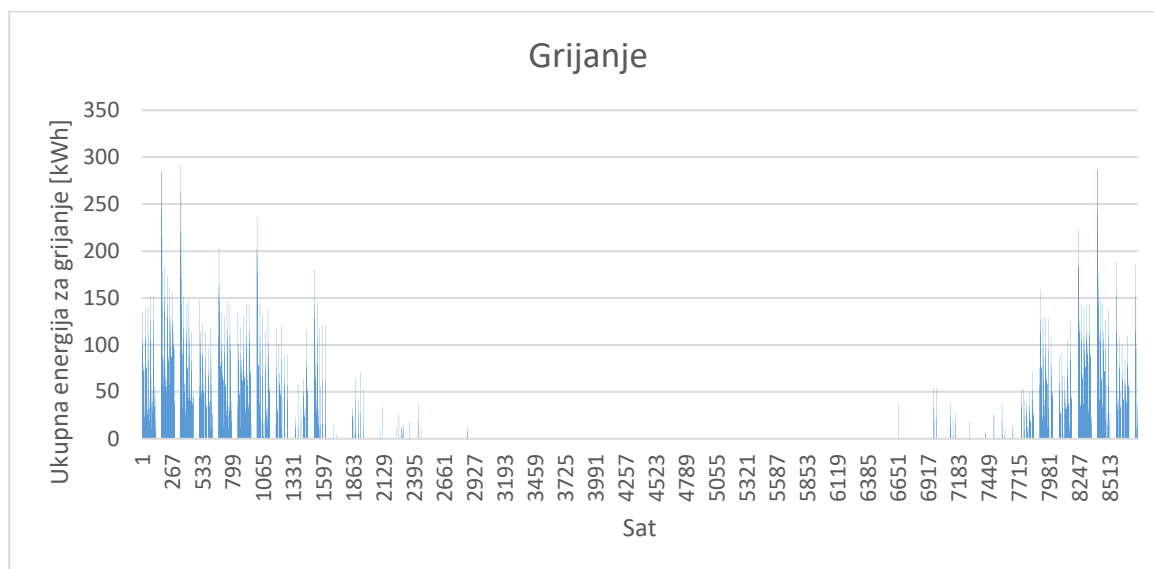
Slika 7. Mjesečne potrebe za grijanjem



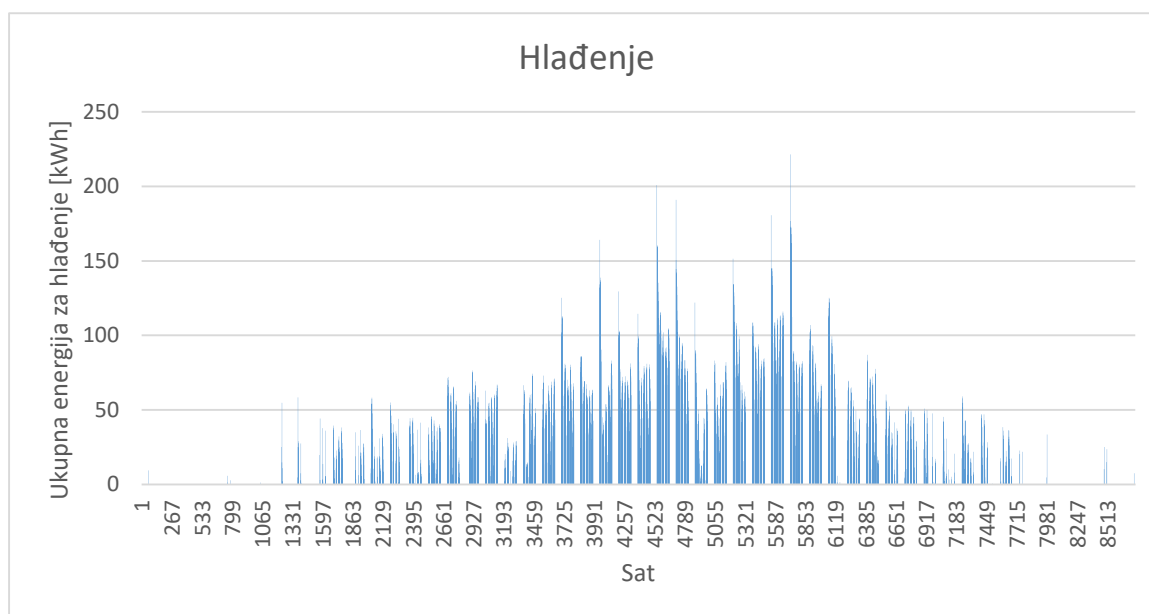
Slika 8. Mjesečna potreba za hlađenjem

#### 4.2.2. Satni prikaz energetske potrebe

Slika 9 prikazuje satnu potrebu toplinske energije za grijanje zgrade prema postavnoj temperaturi. Mogu se primijetiti vrijednosti koje znatno odstupaju od ostalih te dosežu vrijednosti do 300000kWh. Ovakva energetska potreba se javlja nakon prekida grijanja vikendom za vrijeme niskih temperatura.

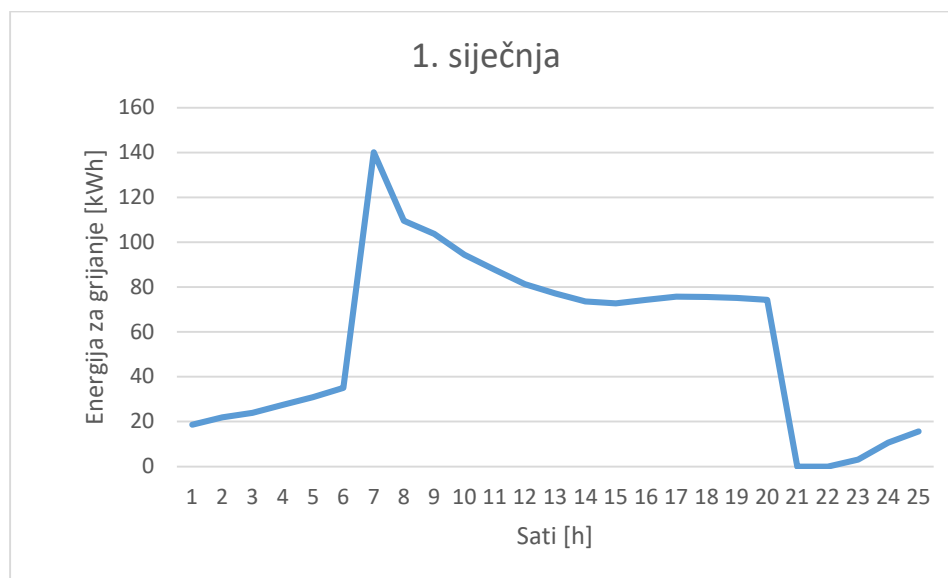


Slika 9. Satna potreba za grijanje



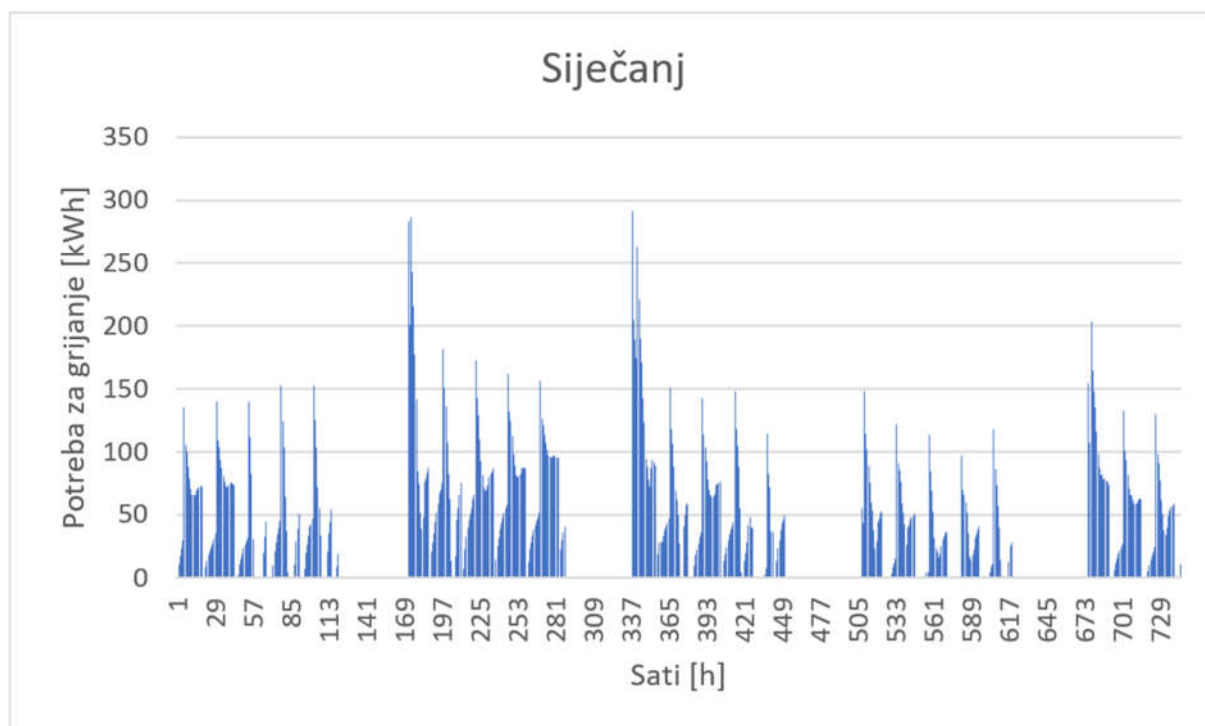
Slika 10. Satna potreba za hlađenje

Slika 11. prikazuje satnu potrebu za grijanje za 1. siječnja koji predstavlja referentni dan u godini. Na slici se mogu primijetiti nagli rast i pad potrebne energije za grijanje, takva karakteristika je uzrokovana promjenom postavne temperature režima grijanja. U vremenu između 6:00 i 19:00h, kada se korisnici nalaze u zgradi, postavna temperatura iznosi 20°C, a izvan vremena korištenja zgrade postavna temperatura iznosi 17°C.



Slika 11. Satne potrebe za grijanjem za referentni dan

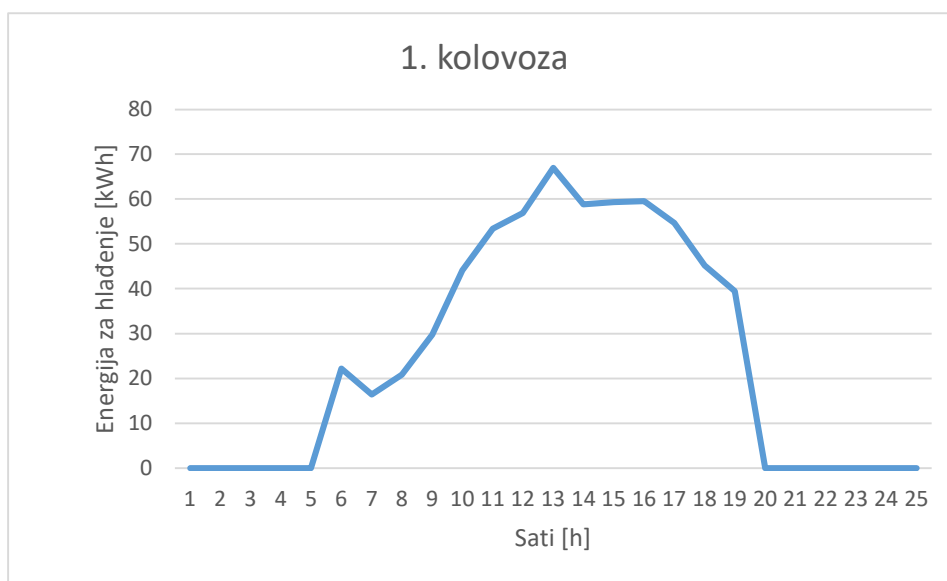
Slika 12 prikazuje satnu potrebu za grijanje, na slici se može primijetiti povećana potreba za energijom nakon prekida grijanja.



Slika 12. Satna potreba za grijanje za referentni mjesec

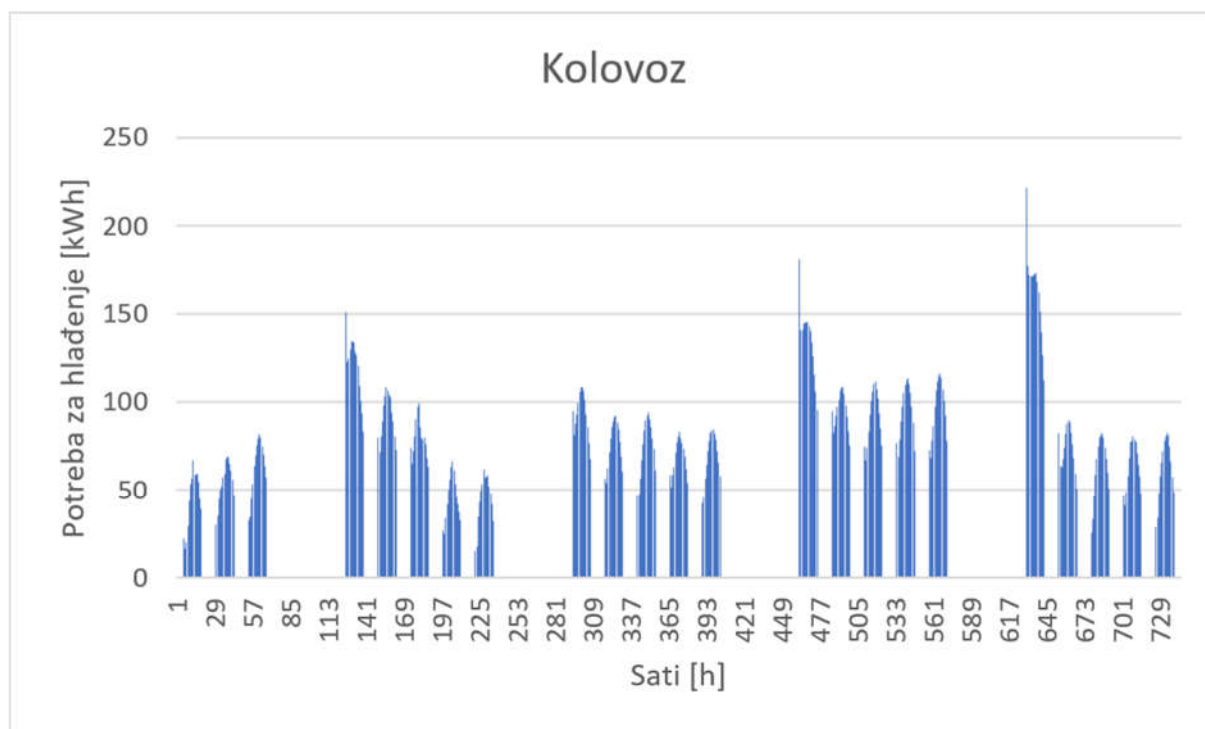


Slika 13 prikazuje satne potrebe za hlađenje za referentni dan 1. kolovoza. Na slici se mogu primijetiti prekid potrebe za hlađenjem izvan vremena boravka korisnika u zgradi shodno načinu modeliranja rada sustava.



**Slika 13. Satna potreba za hlađenje za referentni dan**

Slika 14 prikazuje satnu potrebu za hlađenje gdje se ponovno može primijetiti povećana potreba za hlađenjem nakon prekida kondicioniranja vikendom.



**Slika 14. Satna potreba za hlađenje za referentni mjesec**

## 5. SATNI PRORAČUN POTREBNE ENERGIJE ZA POGON DIZALICE TOPLINE

U ovom poglavlju će se proračunati satne potrebe električne energije i faktori grijanja i hlađenja (*COP* i *EER*) sustava grijanja i hlađenja tijekom rada kroz godinu. Razmatra se korištenje dizalice topline izvedbe zrak-voda ili izvedbe zrak-zrak. Dizalice topline koje se koriste u ovoj analizi su:

- a) dizalica topline s inverterskom tehnologijom tipa Zrak-Voda i
- b) dizalica topline izvedbe VRF (*eng. Variable refrigerant flow*) tipa Zrak-Zrak.

Dizalice topline se dimenzioniraju za pokrivanje toplinskog opterećenja nZEB zgrade za vrijeme sezona grijanja i hlađenja. Proračun dizalice topline zrak-voda opisan je poglavljem 6 dok je proračun dizalice topline zrak-zrak opisan poglavljem 7.

U proračunu će biti korišteni slijedeći pristupi za proračun potrebne energije:

- korištenje norme EN 15316-4-2:2016 put B. Ovaj pristup se koristi kod proračuna dizalice topline zrak-voda u režimu grijanja, opisan je poglavljem 5.1;
- korištenje prilagođenog proračuna iz norme 15316-4-2:2016 put B. Ovaj pristup se koristi kod proračuna grijanja i hlađenja dizalice topline zrak-zrak, opisan je poglavljem 5.2;
- korištenje većeg broja mjerenih vrijednosti faktora hlađenja od proizvođača u karakterističnim točkama za dobivanje potrebne energije. Ovaj pristup se koristi kod proračuna dizalice topline zrak-voda u režimu hlađenja, opisan je poglavljem 5.3.

### 5.1. Proračun prema normi EN 15316-4-2:2016 put B

Norma EN 15316-4-2:2016 obuhvaća dizalice topline izvedbe zrak-voda za grijanje prostora, potrošne tople vode i kombinirano grijanje prostora i potrošne tople vode. U ovom radu biti će primijenjena u svrhu satnog proračuna potrošnje električne energije i faktora grijanja.

U normi su prikazana dva puta proračuna:

- put A, temelji se na mjerenim vrijednostima u karakterističnim točkama prema normi EN 14511;
- put B, temelji se na rezultatima ispitivanja prema normi EN 14825.

U radu je odabran put B sa satnim vremenskim korakom. Ovom metodom se dobiva energetska potreba dizalice topline za pokrivanje toplinskih potreba građevine u trenutnim klimatskim uvjetima.

### 5.1.1. Rezultati mjerenja prema normi EN 14825 za primjenu EN 15316:2017

Za primjenu norme EN 15316:2017 potrebno je poznavanje vrijednosti faktora grijanja (*COP*) u radu na karakterističnim točkama koje su opisane vanjskom temperaturom i omjerom parcijalnog opterećenja.

Mjerenja se provode za prosječnu klimu kod koje će unutarnja postavna temperatura iznositi 20°C. Temperaturni režim koji definira norma je srednjetermaturni, gdje će polaz vode u sustav grijanja biti 45°C a povrat 40°C.

Temperature vanjskog zraka na kojima se provode mjerenja uznose -7, 2, 7 i 12°C. Dodatno se provode mjerenja za bivalentnu temperaturu te temperaturu granice rada. Na svakoj od tih temperatura mjerenje se provodi pri definiranoj vrijednosti omjera opterećenja (*LR*). Omjer opterećenja (*LR*) je omjer potrebne energije za grijanje i dostupnog kapaciteta koji u tom trenutku daje uređaj.

Pema normi se za zadane uvjete mjerenja određuje učin dizalice topline i faktor grijanja (*COP*).

### 5.1.2. Tijek proračuna norme EN 15316 put B

Na početku proračuna je potrebno odrediti toplinski kapacitet dizalice topline na radnim uvjetima, oznaka (*t*) naglašava da se vrijednost računa na satnoj bazi, određuje se prema jednadžbi:

$$\Phi_{\vartheta_{in};\vartheta_{out}}(t) = \Phi_{dgn} \left[ \frac{\frac{\vartheta_{gen,out;\vartheta;ref} + 273,15}{\vartheta_{gen,in;\vartheta;ref} + 273,15}}{\frac{\vartheta_{gen,out}(t) + 273,15}{\vartheta_{gen,in}(t) + 273,15}} \right]^{n_{exer}} \quad (19)$$

gdje su:

$\Phi_{\vartheta_{in};\vartheta_{out}}(t)$  učin dizalice topline na radnim uvjetima, [kW];

$\Phi_{dgn}$  nazivni učin dizalice topline, [kW];

$\vartheta_{gen,out;\vartheta;ref}$  nazivna temperatura polaza vode, [°C];

- $\vartheta_{gen,in;\vartheta;ref}$  granična operativna temperatura TOL (*eng. operation limit temperature*), [°C];
- $\vartheta_{gen,out}(t)$  temperatura ponora topline (temperatura ogrjevnice vode), [°C];
- $\vartheta_{gen,in}(t)$  temperatura izvora topline (temperatura vanjskog zraka), [°C];
- $n_{exer}$  eksergijski faktor, bezdimenzijska konstanta iznosa 3, [-].

Vrijeme rada dizalice topline, prikazano jednadžbom (20), služi za računanje energije predane prostoru. Računa se kao omjer toplinske energije potrebne za grijanje i učina dizalice topline na radnim uvjetima prema jednadžbi:

$$t_X(t) = \frac{Q_{H,nd}(t)}{\Phi_{\vartheta in;\vartheta out}(t)} \quad (20)$$

gdje je:

$Q_{H,nd}(t)$  toplinska energija potrebna za grijanje, [kWh].

Omjer opterećenja *LR* (*eng. Load Ratio*) računa se na sličan način, kako prikazuje jednadžba (21):

$$LR(t) = \frac{Q_{H,nd}(t)}{\Phi_{\vartheta in;\vartheta out}(t) \cdot t_{ci}} \quad (21)$$

gdje je:

$t_{ci}$  trajanje vremenskog koraka, iznosi 1h [h].

Slijedeći korak je računanje eksergijskih koeficijenata. Prvi koeficijent je eksergijski faktor grijanja ( $COP_{gen;exer}(t)$ ) za radne uvijete svakog sata. On će ovisiti o temperaturi vanjskog zraka, izvora topline i toplinskog ponora prema jednadžbi (22):

$$COP_{gen;exer}(t) = \frac{\vartheta_{gen,out}(t) + 273,15}{\vartheta_{gen,out}(t) - \vartheta_{gen,in}(t)} \quad (22)$$

Idući koeficijent koji je potrebno izračunati je faktor eksergijske efikasnosti ( $f_{LR;exer;XX}$ ) prema jednadžbi (24) Indeks XX označava da se računa za karakterističnu radnu točku. On će pomnožen s eksergijskom vrijednosti faktor grijanja dati stvarne vrijednosti faktora grijanja za radnu točku. Eksergijski omjer opterećenja i faktor eksergijske efikasnosti se računaju prema:

$$LR_{exer;XX} = \frac{COP_{exer;XX}}{COP_{exer;biv}} \left[ \frac{\vartheta_{out;biv} + 273,15}{\vartheta_{in;biv} + 273,15} \right]^{n_{exer}} \quad (23)$$

$$f_{LR;exer;XX} = \frac{COP_{ref;XX}}{COP_{exer;XX}} \quad (24)$$

gdje su:

$LR_{exer;XX}$	eksergijski faktor opterećenja, [-];
$COP_{gen;exer}(t)$	eksergijski faktor grijanja, [-];
$f_{LR;exer;XX}$	faktor eksergijske efikasnosti za karakterističnu radnu točku, [-];
$COP_{exer;biv}$	eksergijski faktor grijanja za bivalentne radne uvjete [-].

Vrijednosti  $LR_{exer;XX}$  i  $f_{LR;exer;XX}$  računaju se na temelju mjerenih rezultata prema normi EN 14825 za karakteristične radne točke. Te se vrijednosti za radne točke u svakom satu interpoliraju između vrijednosti za karakteristične radne točke prema jednadžbi (25). Indexi XX i YY označavaju karakteristične radne točke između kojih se interpolira vrijednost za dati sat prema jednadžbi:

$$f_{LR;exer}(t) = f_{LR;exer;XX} - (f_{LR;exer;XX} - f_{LR;exer;YY}) \left[ \frac{LR_{exer;XX} - LR_{exer}(t)}{LR_{exer;XX} - LR_{exer;YY}} \right] \quad (25)$$

gdje je  $f_{LR;exer}(t)$  faktor eksergijske efikasnosti na satnoj bazi [-].

Konačno, potrebno je izračunati pogonsku energiju dizalice topline. Ona će biti omjer potrebne toplinske energije i faktora grijanja za dati sat u godini prema jednadžbi:

$$E_{gen;\vartheta_{in};\vartheta_{out}}(t) = \frac{Q_{H;gen;out}(t)}{COP_{gen;\vartheta_{in};\vartheta_{out}}(t)} = \frac{\Phi_{\vartheta_{in};\vartheta_{out}}(t) \cdot t_X}{COP_{gen;\vartheta_{in};\vartheta_{out}}(t)} \quad (26)$$

Ukoliko dizalica topline radi ispod minimalnog faktora opterećenja, točnije ako sustav prelazi u ON/OFF režim rada, tada je potrebno izvršiti proračun rada s prekidom.

### 5.1.3. Rad s prekidom

Za izračun pogonske energije dizalice topline i faktora grijanja u *ON/OFF* režimu rada, potrebni su podaci o *COP*-u kada bi dizalica topline radila na minimalnom *LR*-u u datom satu.

Ispravak *COP*-a kod rada s prekidom se provodi na slijedeći način:

$$COP_{cikl}(t) = COP_{LR_{min}}(t) \cdot \left( 1 - LR_{min} \cdot \left( 1 - \frac{\phi_{nd}}{\phi_{min}} \right) \right) \quad (27)$$

gdje su:

$COP_{cikl}(t)$	korigirani <i>COP</i> za slučaj cikličkog rada, [-];
$COP_{LR_{min}}$	vrijednost <i>COP</i> -a kod rada pri minimalnom <i>LR</i> -u datom satu, [-];
$LR_{min}$	minimalni omjer opterećenja, [-];
$\phi_{nd}$	toplinsko opterećenje zgrade, [kW];
$\phi_{min}$	minimalni kapacitet dizalice topline, [kW];
$LR_{min}$	minimalni omjer opterećenja uređaja, [-].

## 5.2. Prilagođeni proračun iz norme 15316-4-2:2016 put B.

### 5.2.1. Režim hlađenja

Proračun obrađen u ovom poglavlju se primjenjuje za satnu analizu dizalice topline zrak-zrak u režimu hlađenja. Korištenjem eksergijskog pristupa dobivaju se vrijednosti  $EER$ -a u karakterističnim radnim točkama između kojih će se interpoliranjem dobiti približno stvarna vrijednost  $EER$  -a na satnoj bazi. Termodinamička kvaliteta procesa se može izraziti pomoću eksergijske efikasnosti  $\eta_{ex}$  prema jednadžbi:

$$\eta_{ex} = \frac{EER}{EER_{Carnot}}. \quad (28)$$

Carnotova vrijednost faktora hlađenja računa se prema jednadžbi (29):

$$EER_{Carnot} = \frac{T_e + 273,15}{T_c - T_e} \quad (29)$$

gdje su:

$T_e$  temperatura isparavanja, [°C];

$T_c$  temperatura kondenzacije, [°C].

Vrijednost carnotovog faktora hlađenja će ovisiti samo o temperaturama izvora i ponora topline. Koristeći ove temperature, metoda omogućuje interpolaciju do točne vrijednosti  $EER$ -a za različite temperature okoline. Efektivni  $EER$  za različite temperature izvora i ponora topline dobiva se slijedećim jednadžbama:

$$EER(t) = f_{\eta_{ex}}(t) \cdot EER_{Carnot} \quad (30)$$

gdje je  $f_{\eta_{ex}}(t)$  korekcijski faktor odstupanja temperature od temperatura karakterističnih radnih točaka, opisan je slijedećom jednadžbom:

$$f_{\eta_{ex}}(t) = \eta_{exXX} - (\eta_{exXX} - \eta_{exYY}) \cdot \left[ \frac{LR_{XX} - LR(t)}{LR_{XX} - LR_{YY}} \right] \quad (31)$$

gdje su:

$\eta_{exXX}$  eksergijska efikasnost referentne točke XX, [-];

$LR(t)$  omjer opterećenja u točki u kojoj se traži  $EER$ , [-];

$LR_{XX}$  omjer opterećenja u referentnoj točki XX, [-].

U stvarnim pogonskim uvjetima eksergijska efikasnost nije konstanta za sve omjere opterećenja, stoga je korekcijski faktor samo aproksimacija koja pokazuje dobre rezultate blizu standardnih radnih točaka.

Prethodne jednadžbe ukazuju na potrebu za poznavanjem omjera opterećenja ( $LR$ ) te vrijednosti temperatura isparavanja i kondenzacije ( $T_e$ ,  $T_c$ ). Slijedeće poglavlje se tiče pretpostavki kod određivanja navedenih vrijednosti.

#### 5.2.1.1. Pretpostavke za rad s prekidom

Podaci proizvođača koji su javno dostupni se odnose samo na karakteristične radne točke pri točno određenim omjerima opterećenja ( $LR$ ) kako prikazuje tablica 15.

**Tablica 15. Karakteristične radne točke**

	Vanjska temperatura [°C]	$LR$
A	35	100
B	30	73,68
C	25	47,37
D	20	21,05

U proračunu se pretpostavlja da dizalica topline daje toplinskog učina koliko zgrada zahtjeva. Dakle, toplinski učin dizalice topline je jednak opterećenju zgrade u datom trenutku.

Kod pojave cikličkog rada, sustav daje više učina nego je zgradi potrebno. Ukoliko koristimo vrijednost  $EER$ -a s faktorom korekcije  $C_d$ , pretpostavlja se da sustav daje potrebni kapacitet.

Ispravak  $EER$ -a kod rada s prekidom se provodi na slijedeći način:

$$EER_{cikl}(t) = EER_{LR_{min}}(t) \cdot \left( 1 - LR_{min} \cdot \left( 1 - \frac{\phi_{nd}}{\phi_{min}} \right) \right) \quad (32)$$

gdje su:

$EER_{cikl}(t)$  korigirani  $EER$  za slučaj cikličkog rada, [-];

$EER_{LR_{min}}(t)$  vrijednost  $EER$ -a kod rada pri minimalnom  $LR$ -u datom satu, [-];

$LR_{min}$  minimalni omjer opterećenja, [-];

$\phi_{nd}$  toplinsko opterećenje zgrade [kW];

$\phi_{min}$  minimalni kapacitet dizalice topline [kW];

$LR_{min}$  minimalni omjer opterećenja uređaja [-].



### 5.2.1.2. Pretpostavke temperatura

Temperatura kondenzacije ovisi o vanjskoj temperaturi i omjeru opterećenja zgrade. Temperatura kondenzacije i vanjska temperatura se razlikuju za vrijednost pretpostavljenu slijedećom jednačbom:

$$T_c(t) = T_{vanj}(t) + \Delta T \cdot LR(t) \quad (33)$$

gdje su:

$T_c$	temperatura kondenzacije [°C];
$T_{vanj}(t)$	temperatura vanjskog zraka [°C];
$\Delta T$	konstanta temperaturne razlike [°C].

Maksimalna vrijednost temperature kondenzacije je 25°C. Temperatura isparavanja ovisi o unutarnjoj temperaturi i rashladnom opterećenju te su kod njenog definiranja uzete su slijedeće pretpostavke:

- Temperatura isparavanja na vanjskoj temperaturi 35°C iznosi 6°C, a na vanjskoj temperaturi 20°C iznosi 15°C.
- Temperatura isparavanja ima minimalnu vrijednost 15°C.
- Temperatura isparavanja se dobiva interpolacijom između pretpostavljenih vrijednosti na vanjskim temperaturama 35°C i 20°C prema (34).

$$T_e(t) = T_e(35) - \frac{T_e(35) - T_e(20)}{LR(35) - LR(20)} (LR(t) - 1) \quad (34)$$

Pomoću pretpostavki definiranih u ovom poglavlju, definira se tablica karakterističnih radnih točaka koja sadrži faktor hlađenja za svaku točku. Iz te tablice se za vrijednost vanjske temperature interpolira vrijednost faktora hlađenja na satnoj bazi. Ova metoda se primjenjuje za proračun dizalice topline zrak-zrak u režimu hlađenja.

### 5.2.2. Režim grijanja

Režim grijanja dizalice topline zrak-zrak se modelira prilagodbom jednadžbi korištenih u režimu hlađenja. Ovo poglavlje predstavlja sažeti opis modeliranja proračuna u režimu grijanja zbog sličnosti sa prethodnim poglavljem. Tako će termodinamička kvaliteta procesa biti izražena prema slijedećoj jednadžbi:

$$\eta_{ex} = \frac{COP}{COP_{Carnot}}. \quad (35)$$

Carnotova vrijednost faktora grijanja računa se prema slijedećoj jednadžbi:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_c + 273,15}{T_e - T_c}. \quad (36)$$

Efektivni  $COP$  za različite temperature izvora i ponora topline dobiva se slijedećim jednadžbama:

$$COP(t) = f_{\eta_{ex}}(t) \cdot COP_{Carnot}, \quad (37)$$

gdje je  $f_{\eta_{ex}}(t)$  korekcijski faktor devijacije temperature od karakterističnih temperatura radnih točaka prema slijedećoj jednadžbi:

$$f_{\eta_{ex}}(t) = \eta_{exXX} - (\eta_{exXX} - \eta_{exYY}) \cdot \left[ \frac{LR_{XX} - LR(t)}{LR_{XX} - LR_{YY}} \right]. \quad (38)$$

#### 5.2.2.1. Pretpostavke za rad s prekidom

Karakteristične radne točke na kojima se provode mjerenja proizvođača su prikazane u tablici 16. Točke su opisane omjerom opterećenja i vanjskom temperatuom.

**Tablica 16. Karakteristične radne točke**

	Vanjska temperatura [°C]	LR
A	-7	100
B	2	63
C	7	39
D	12	20

Ispravak  $COP$ -a kod pojave rada s prekidom se provodi na slijedeći način:

$$COP_{cikl}(t) = COP_{LR_{min}}(t) \cdot \left( 1 - LR_{min} \cdot \left( 1 - \frac{\phi_{nd}}{\phi_{min}} \right) \right). \quad (39)$$

### 5.2.2.2. Pretpostavke temperatura

Temperatura isparavanja ovisi o vanjskoj temperaturi i omjeru opterećenja zgrade te je ograničena maksimalnom vrijednosti  $15^{\circ}\text{C}$ . Jednadžba po kojoj se određuje temperatura isparavanja glasi:

$$T_e(t) = T_{vanj}(t) + \Delta T \cdot LR(t). \quad (40)$$

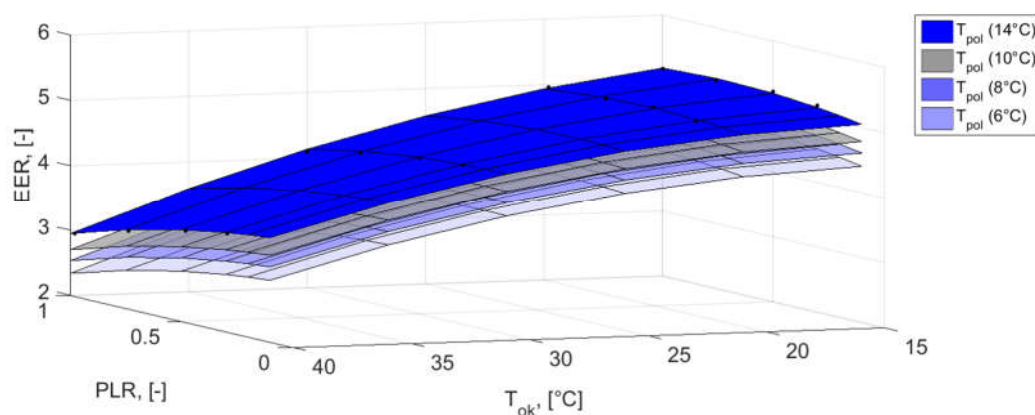
Temperatura kondenzacije ovisi o unutarnjoj temperaturi i toplinskom opterećenju. Kod temperature kondenzacije uzete su slijedeće pretpostavke:

- Temperatura kondenzacije na vanjskoj temperaturi  $-7^{\circ}\text{C}$  iznosi  $28^{\circ}\text{C}$ , a na vanjskoj temperaturi  $12^{\circ}\text{C}$  iznosi  $22^{\circ}\text{C}$ .
- Temperatura kondenzacije ima minimalnu vrijednost  $22^{\circ}\text{C}$ .
- Temperatura kondenzacije se dobiva interpolacijom između pretpostavljenih vrijednosti na vanjskim temperaturama  $35^{\circ}\text{C}$  i  $20^{\circ}\text{C}$  prema jednadžbi:

$$T_c(t) = T_c(-7) - \frac{T_c(-7) - T_c(12)}{LR(-7) - LR(12)} (LR(t) - 1). \quad (41)$$

### 5.3. Proračun satnih vrijednosti $EER$ -a interpolacijom

U ovom poglavlju opisuje se interpolacijski postupak dobivanja faktora hlađenja ( $EER$ -a) za dizalicu topline zrak-voda na satnoj bazi. Vrijednosti faktora hlađenja su prikazane u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, omjeru opterećenja te temperaturi polaza vode prema sustavu hlađenja na temelju mjerenih podataka od proizvođača [3].



Slika 15. Ovisnost  $EER$ -a o opterećenju te temperaturama zraka i vode

Tablica 17. Mjerene vrijednosti  $EER$ -a za temperaturu polaza 8°C

$T_{ok}$	LR			
	100%	75%	50%	30%
40°C	2,659	2,837	2,99	3,058
30°C	3,536	3,717	3,827	3,902
20°C	4,52	4,747	4,875	4,963
15°C	4,832	4,82	4,537	4,588

U ovoj metodi se na satnoj bazi, za određenu vrijednost omjera opterećenja ( $LR$ -a) i za trenutnu vanjsku temperaturu, interpolira vrijednost faktora hlađenja ( $EER$ -a) iz tablice 17.

Potrošnja električne energije ovisi o iznosu  $COP$ -a ili  $EER$ -a a računa se prema (42)

$$\text{Potrošena el. e. uređaja} = \frac{\text{Predana energija ventilokonvektorima}}{\text{Faktor grijanja (Hlađenja)}} \quad (42)$$

Kod pojave cikličkog rada, sustav daje više učina nego je zgradi potrebno. Kod ove metode koristimo isti pristup korekcije faktora hlađenja koji je prikazan u poglavlju 5.2.1.1. a opisan je jednadžbom (43).

$$EER_{cikl}(t) = EER_{LR_{min}}(t) \cdot \left( 1 - LR_{min} \cdot \left( 1 - \frac{\phi_{nd}}{\phi_{min}} \right) \right) \quad (43)$$

## 6. PRORAČUN DIZALICE TOPLINE ZRAK-VODA

U ovome poglavlju se analizira korištenje dizalice topline zrak-voda za potrebe pokrivanja toplinskog opterećenja referentne nZEB zgrade za obrazovanje u zimskom i ljetnom periodu.

Za proračun potrebne električne energije u svrhu pokrivanja toplinskog opterećenja u zimskom periodu i sezonskog faktora grijanja koristi se metoda opisana u pod poglavlju 5.1 *Proračun prema normi EN 15316-4-2:2016 put B*.

Za proračun istih vrijednosti u ljetnom periodu koristi se metoda opisana u poglavlju 5.3

Radi usporedbe dizalice topline zrak-voda i zrak-zrak potrebno je razmatrati uređaje sličnih kapaciteta. Kako je za proračun dizalice topline zrak-voda u režimu hlađenja potrebno koristiti proširene mjerene vrijednosti koje su dostupne za konkretnu dizalicu topline, radi uspješne usporedbe je bilo potrebno skalirati vrijednosti dizalice topline zrak-voda na vrijednosti koje odgovaraju odabranoj dizalici topline zrak-zrak. Kapacitet dizalice topline zrak-zrak je određen u odnosu na prosječne vrijednosti toplinskog opterećenja u režimu grijanja pri vanjskoj temperaturi  $-7^{\circ}\text{C}$  koja iznosi 75 kW. Na temelju te vrijednosti je, među ponuđenim uređajima, odabrana dizalica topline zrak-zrak koja ima nešto veće vrijednosti kapaciteta pri toj temperaturi. Tako će projektna vrijednost odabranog uređaja iznositi 103,4 kW, a vrijednost kapaciteta pri  $-7^{\circ}\text{C}$  će iznositi 91,47 kW. S obzirom na tu vrijednost je skalira vrijednost dizalice topline zrak-voda kako je prikazano u tablici 19. U slučajevima gdje se pojavljuje dodatna potreba za toplinskom energijom u rad se uključuje dodatni izvor topline u bivalentno paralelnom načinu rada. Ova potreba se najčešće pojavljuje nakon prekida grijanja ili promjene postavne temperature.

### 6.1. Zimski period

#### 6.1.1. Ulazni podaci

Ventilokonvektori u ljetnom periodu rade na temperaturnom režimu 45/40°C. Prema poglavlju 5.1 za proračun je potrebno poznavanje mjerenih vrijednosti prema normi EN 14825. Te vrijednosti su dostupne od proizvođača i prikazuje ih tablica 18.

Tablica 18. Rezultati proizvođača za DT zrak-voda

Item	Symbol	Value	Unit	Item	Symbol	Value	Unit
Rated heat output <sup>(3)</sup>	<i>Prated</i>	255	kW	Seasonal space heating energy efficiency	$\eta_s$	143	%
Declared capacity for heating for part load at indoor temperature 20 °C and outdoor temperature $T_i$				Declared coefficient of performance or primary energy ratio for part load at indoor temperature 20 °C and outdoor temperature $T_i$			
$T_i = -7$ °C	<i>Pdh</i>	225.7	kW	$T_i = -7$ °C	<i>COPd or PERd</i>	2.64 100.0	- or %
$T_i = +2$ °C	<i>Pdh</i>	148.7	kW	$T_i = +2$ °C	<i>COPd or PERd</i>	3.24 50.0	- or %
$T_i = +7$ °C	<i>Pdh</i>	89.7	kW	$T_i = +7$ °C	<i>COPd or PERd</i>	4.89 28.0	- or %
$T_i = +12$ °C	<i>Pdh</i>	38.5	kW	$T_i = +12$ °C	<i>COPd or PERd</i>	5.63 8.5	- or %
$T_i$ = bivalent temperature	<i>Pdh</i>	225.7	kW	$T_i$ = bivalent temperature	<i>COPd or PERd</i>	2.64 100.0	- or %
$T_i$ = operation limit temperature	<i>Pdh</i>	227.6	kW	$T_i$ = operation limit temperature	<i>COPd or PERd</i>	2.63 100.0	- or %
For air-to-air heat pumps: $T_i = -15$ °C (if $TOL < -20$ °C)	<i>Pdh</i>		kW	For air-to-air heat pumps: $T_i = -15$ °C (if $TOL < -20$ °C)	<i>COPd or PERd</i>		- or %
Bivalent temperature	$T_{biv}$	-7	°C	For air-to-water heat pumps: Operation limit temperature	<i>TOL</i>	-10	°C
Cycling interval capacity for heating	<i>Pcych</i>		kW	Cycling interval efficiency	<i>COPcyc or PERcyc</i>		- or %
Degradation co-efficient <sup>(4)</sup>	<i>Cdh</i>	0.9	—	Heating water operating limit temperature	<i>WTOL</i>	50	°C

U svrhu kvalitetnije usporedbe navedene dizalice topline zrak voda s dizalicom topline zrak-zrak, projektna snaga i kapaciteti su skalirani na odgovarajuće vrijednosti.

Vrijednosti koje unosimo u proračun su prikazane u tablici 19.

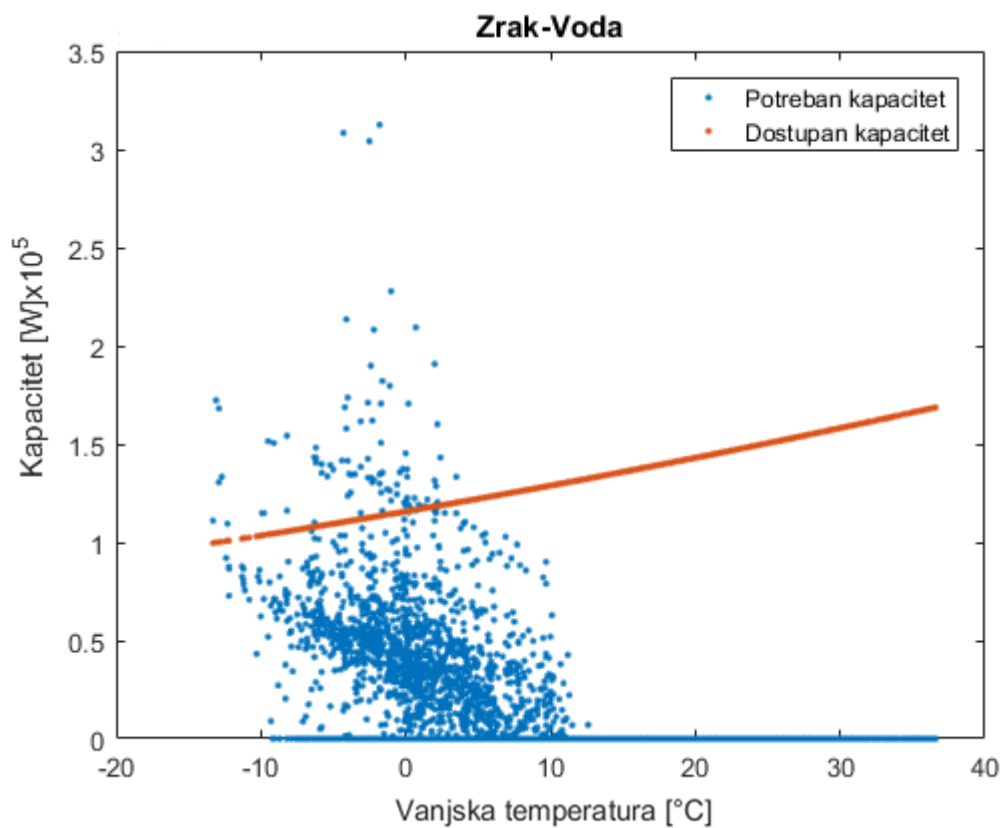
Tablica 19. Vrijednosti za proračun grijanja DT zrak-voda

Projektna snaga	103,4 kW		
	Kapacitet za parcijalno opterećenje i unutarnju postavnu temperaturu 20°C	Parcijalno opterećenje <i>LR</i>	COP
Vanjska temp. [°C]	kW	-	-
-7	90,28	1	2,64
2	59,48	0,5	3,24
7	35,88	0,28	4,89
12	15,4	0,085	5,63
TOL=-10	91,04	1	2,63

Dostupni kapacitet u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i režimu grijanja se računa prema jednadžbi (44):

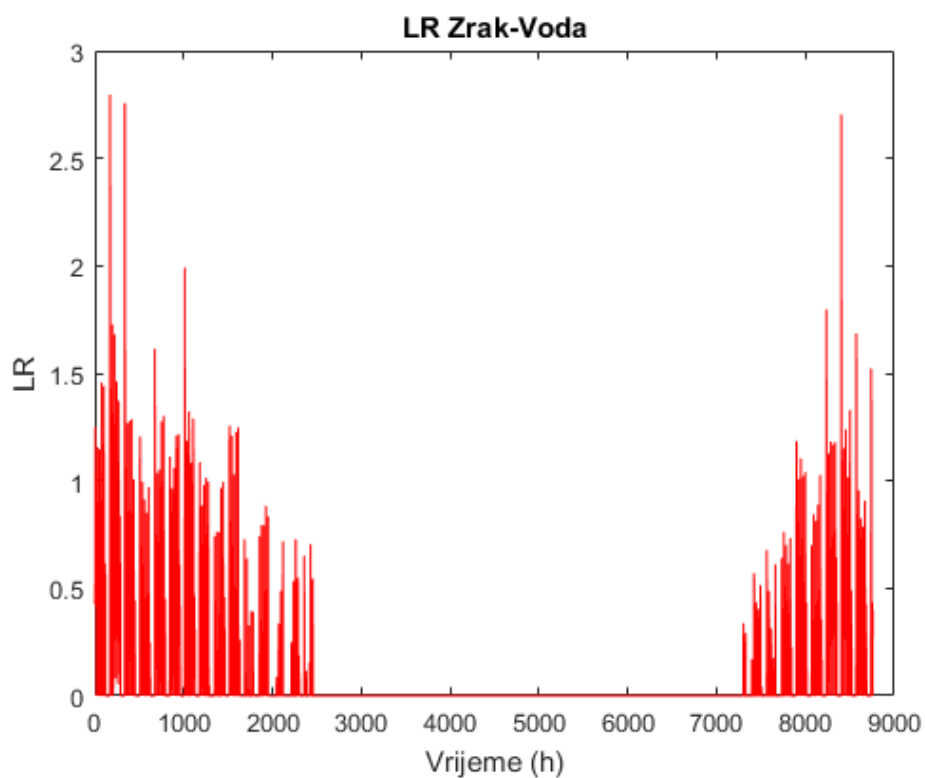
$$\Phi_{\vartheta_{in};\vartheta_{out}}(t) = \Phi_{dgn} \left[ \frac{\frac{\vartheta_{gen;out;\vartheta;ref} + 273,15}{\vartheta_{gen;in;\vartheta;ref} + 273,15}}{\frac{\vartheta_{gen;out} + 273,15}{\vartheta_{gen;in}(t) + 273,15}} \right]^{n_{.exer}} \quad (44)$$

Odnos dostupnog kapaciteta, u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, i potrebnog kapaciteta za grijanje je prikazan dijagramom na slici 16.

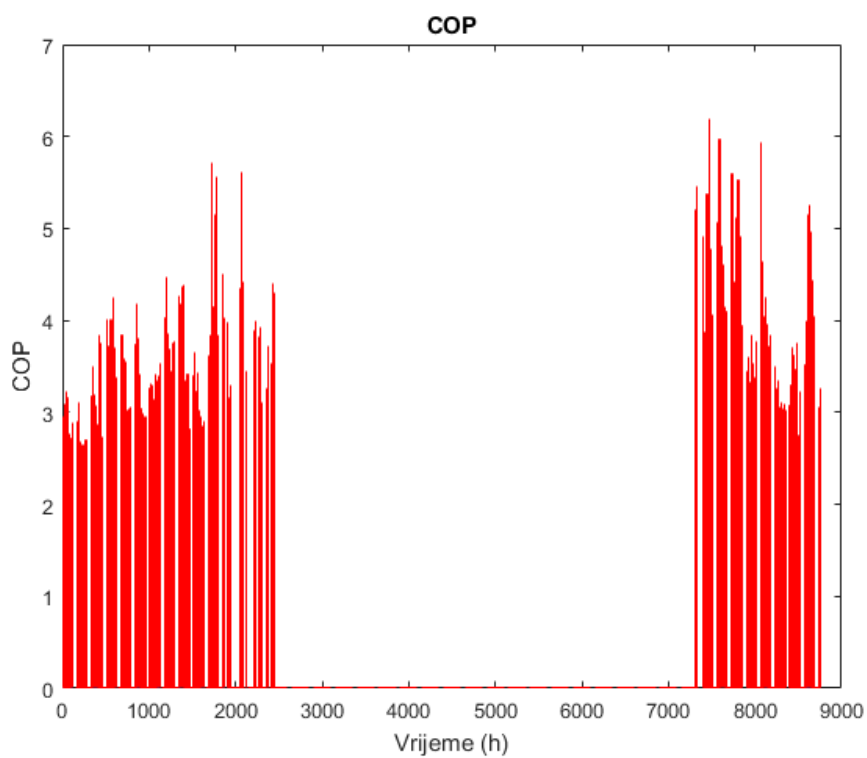


Slika 16. Odnos dostupnog i potrebnog kapaciteta za grijanje dizalicom topline zrak-voda

### 6.1.2. Rezultati satne analize

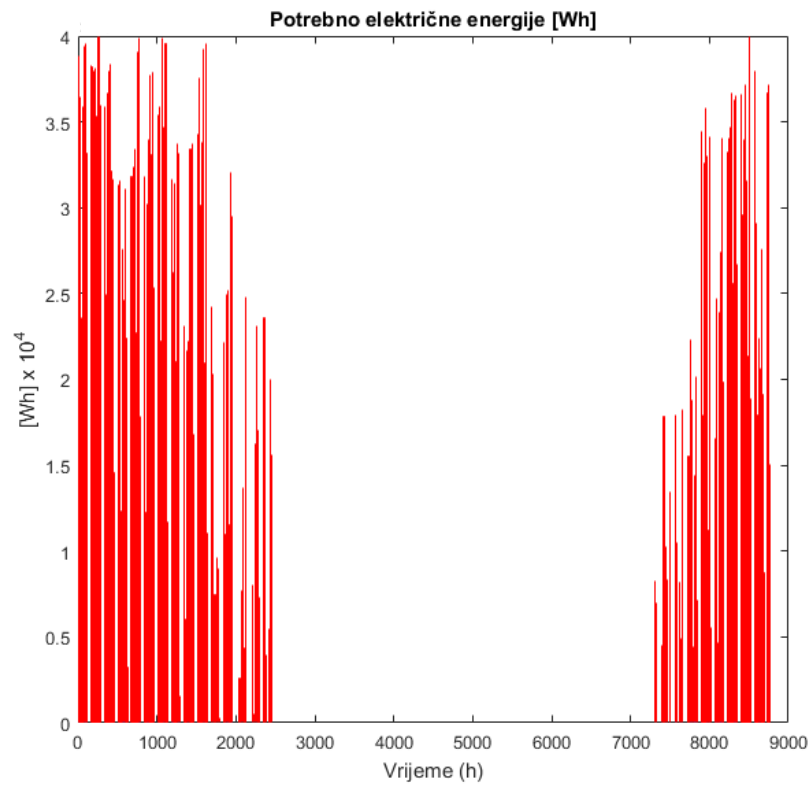


Slika 17. Omjer dostupnog i potrebnog kapaciteta za grijanje dizalicom topline zrak-voda

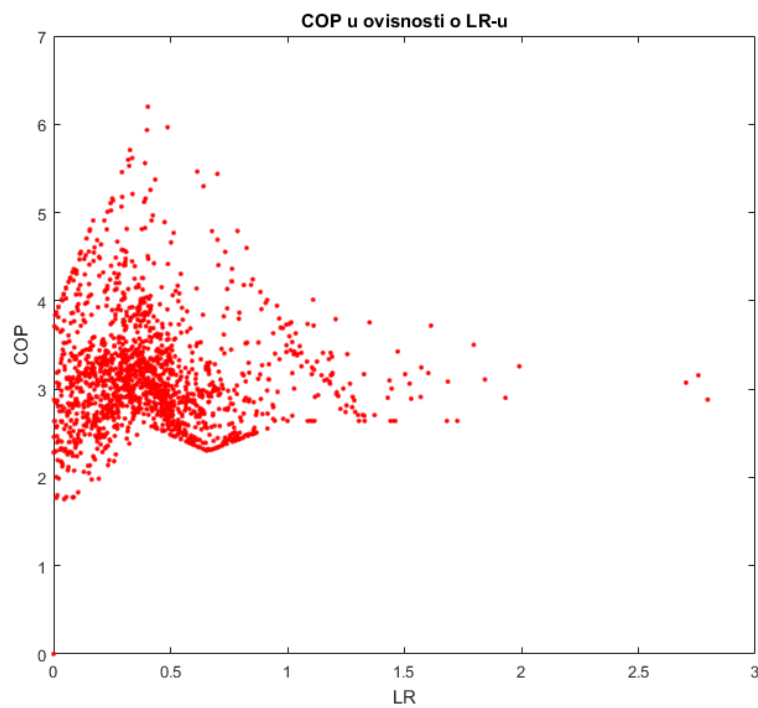


Slika 18. Satne vrijednosti COP-a





Slika 19. Satne vrijednosti potrebne električne energije



Slika 20. Vrijednost COP-a u ovisnosti o omjeru opterećenja

Vrijednosti COP-a, za omjer opterećenja ispod minimalnog koji iznosi 0,17, računaju se prema jednadžbi:

$$COP_{cikl} = COP \cdot \left( 1 - LR_{min} \cdot \left( 1 - \frac{\phi_{nd}}{\phi_{min}} \right) \right) \quad (45)$$

$COP_{cikl}$  Je korigirani COP za slučaj cikličkog rada [-]

$LR_{min}$  Je minimalni omjer opterećenja [-]

$\phi_{nd}$  Je toplinsko opterećenje zgrade [kW]

$\phi_{min}$  Je minimalni kapacitet dizalice topline [kW]

$LR_{min}$  je minimalni omjer opterećenja uređaja [-]

Iznos sezonskog faktora grijanja računa se prema jednadžbi (46).

$$SCOP = \frac{\sum_l^{8760} Q_{H,gen;out}}{E_{gen;\vartheta_{in};\vartheta_{out;UK}}} = \frac{74054 \text{ kWh}}{25308 \text{ kWh}} = 3,05 \quad (46)$$

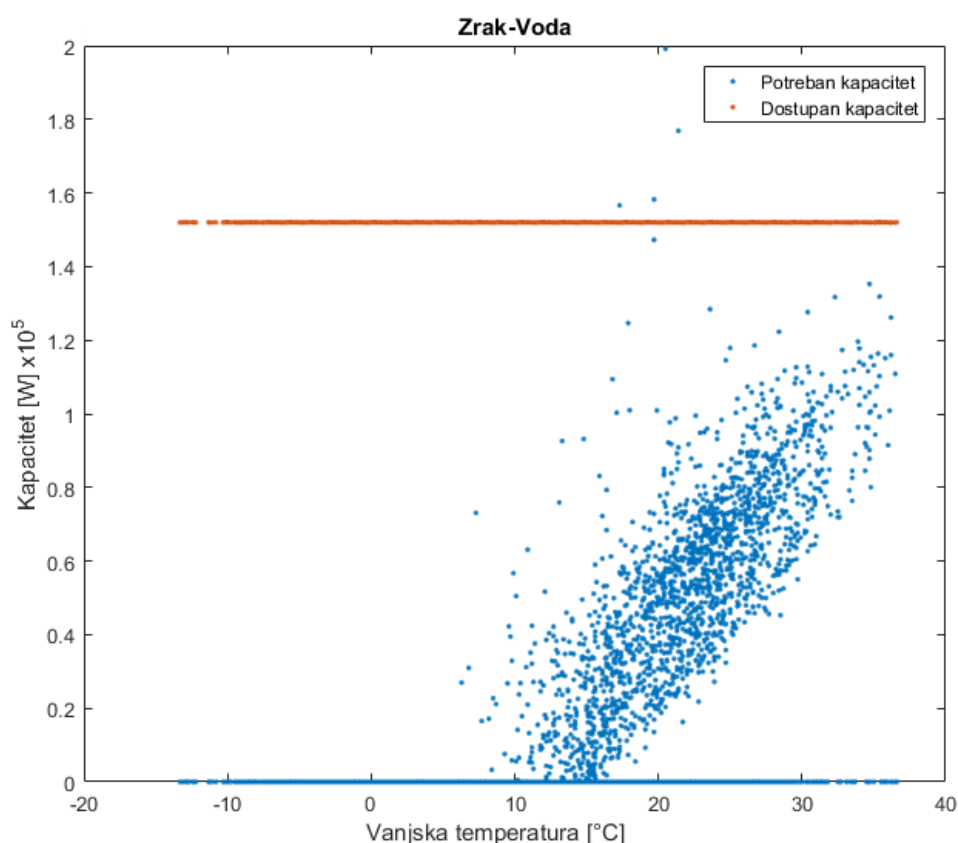
Vrijednost  $\sum_l^{8760} Q_{H,gen;out}$  je iznos ukupne toplinske energije proizvedene dizalicom topline tijekom godine. Navedena vrijednost je manja po iznosu od ukupne toplinske potrebe zgrade koja iznosi 77323,8 kWh. Razlog je podkapacitiranost sustava za određeni broj sati u godini kada potrebe zgrade bitno nadilaze uobičajene potrebe.

## 6.2. Ljetni period

Dizalica topline u ljetnom periodu radi na temperaturnom režimu 8/12°C.

Za proračun potrošnje dizalice topline zrak-voda koja radi u režimu hlađenja koristi se postupak opisan u poglavlju 5.3.

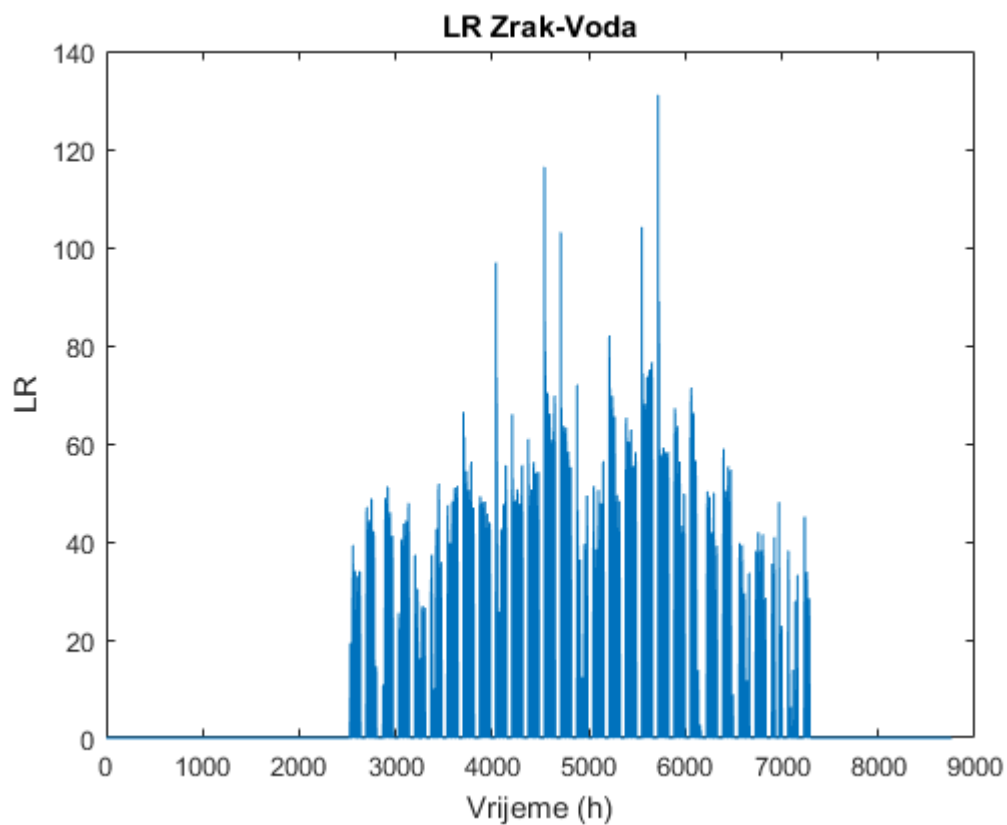
Odnos dostupnog kapaciteta, u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, i potrebnog kapaciteta za hlađenje je prikazan dijagramom na slici 21.



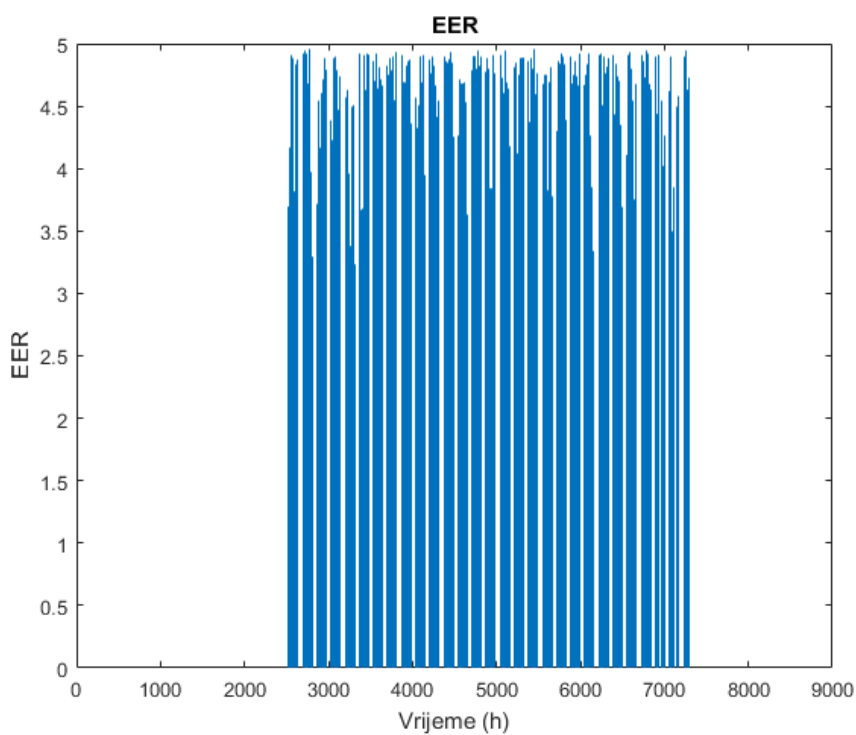
**Slika 21. Odnos dostupnog i potrebnog kapaciteta za hlađenje dizalicom topline zrak-voda**

Vrijednost dostupnog kapaciteta dizalice topline je uzet kao konstanta iznosa 152 kW. Ova pretpostavka se uzima zbog činjenice da promjena vanjske temperature ne utječe znatno na dostupni kapacitet, te je stoga uvijek dostupna projektna vrijednost kapaciteta.

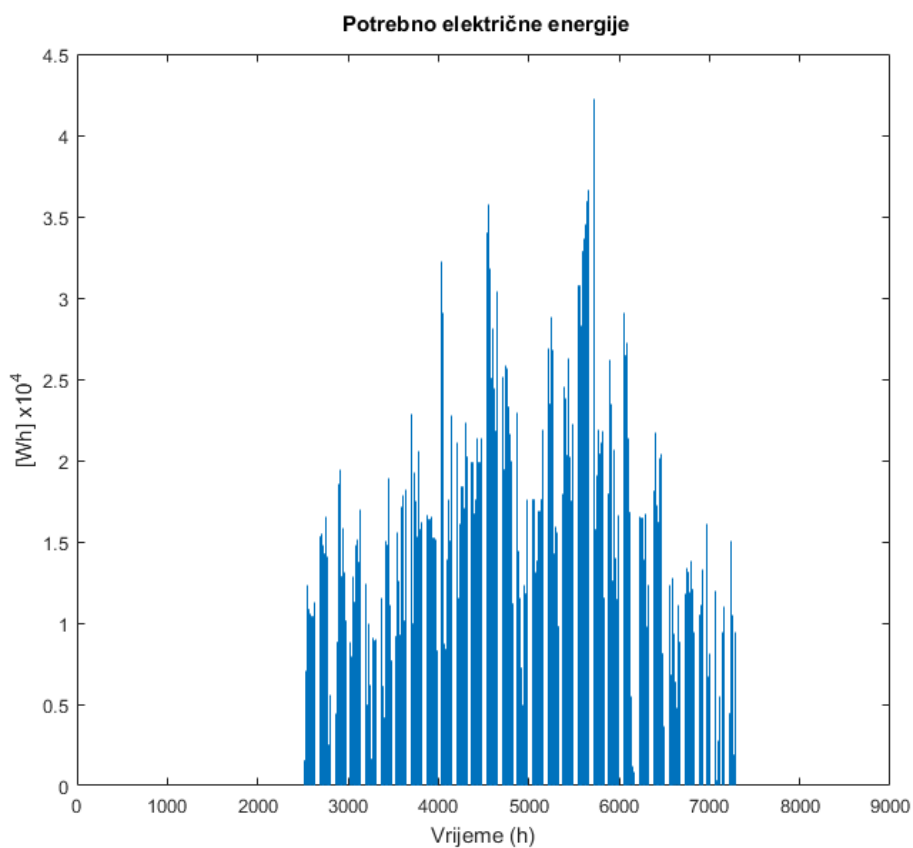
Dizalica topline je dimenzionirana za pokrivanje toplinskog opterećenja velike većine situacija te dodatni rashladni uređaj nije potreban.



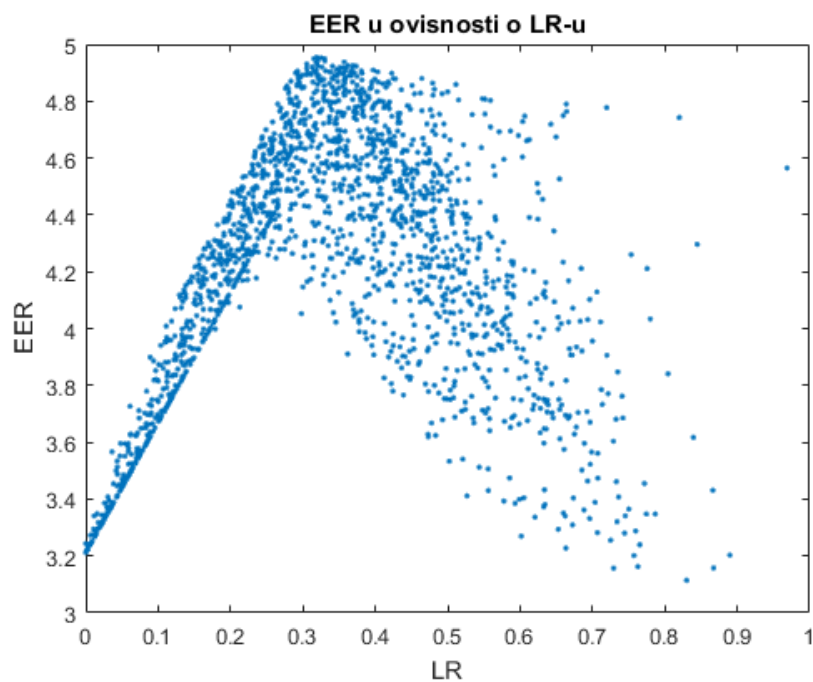
Slika 22. Omjer dostupnog i potrebnog kapaciteta za hlađenje dizalicom topline zrak-voda



Slika 23. Satne vrijednosti *EER*-a



Slika 24. Satne vrijednosti potrebne električne energije



Slika 25. Vrijednost EER-a u ovisnosti o omjeru opterećenja

Iznos sezonskog koeficijenta hlađenja dizalice topline zrak-voda računa se prema (47)

$$SEER = \frac{\sum_1^{8760} Q_{C,gen;out}}{E_{gen;\vartheta_{in};\vartheta_{out;UK}}} = \frac{91525 \text{ kWh}}{22440 \text{ kWh}} = 4,1 \quad (47)$$

## 7. PRORAČUN DIZALICE TOPLINE ZRAK-ZRAK

Proračun faktora grijanja i hlađenja te potrošnje električne energije dizalice topline zrak-zrak provodi se prema proračunu iz poglavlja 5.2 Navedeni proračun je razrađen za razmatranje sezone hlađenja, to jest ljetni period. Proračun grijanja je napravljen prilagodbom proračuna.

### 7.1. Zimski period

#### 7.1.1. Ulazni podaci

Kao što je slučaj i kod dizalice topline zrak-voda, za proračun je potrebno poznavati vrijednosti mjerene prema normi EN 14825. Te vrijednosti su dostupne od proizvođača i prikazuje ih tablica 20.

**Tablica 20. Vrijednosti za proračun grijanja DT zrak-zrak**

Projektna snaga	103,4 kW		
	Kapacitet za parcijalno opterećenje i unutarnju postavnu temperaturu 20°C	Parcijalno opterećenje <i>LR</i>	COP
Vanjska temp. [°C]			
-7	91,47	1	2,33
2	57,59	0,63	3,25
7	35,88	0,39	5,42
12	18,05	0,197	5,66
TOL=-25	71,82	0,78	1,40

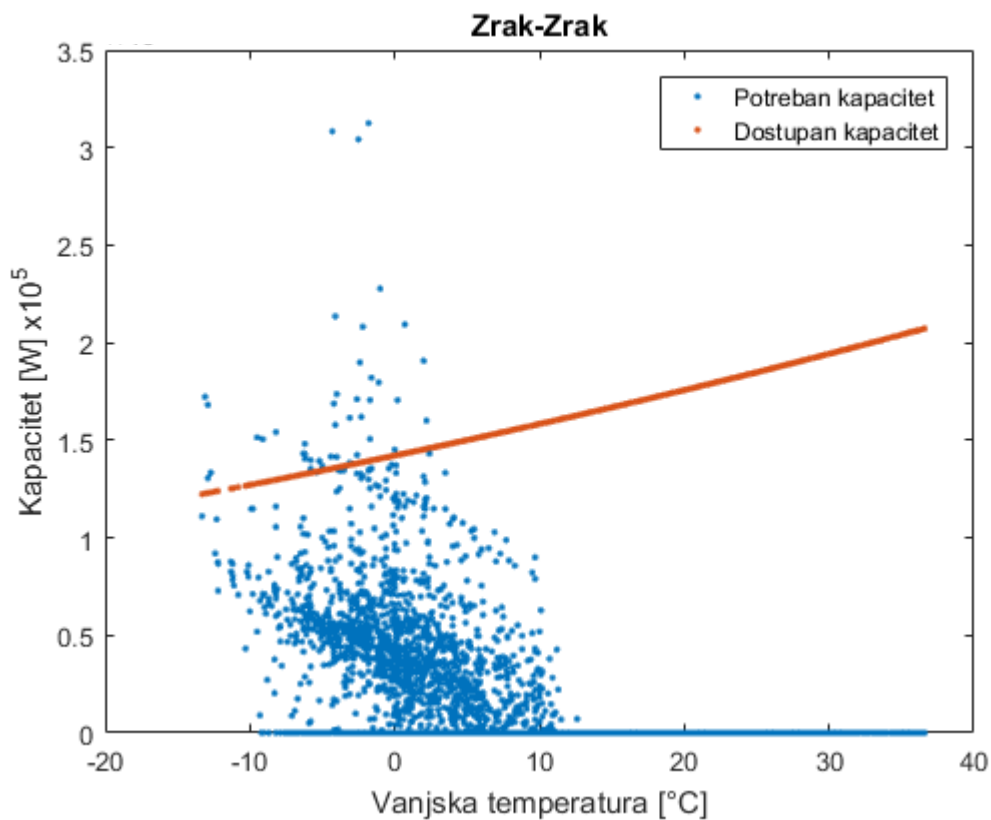
Dostupni kapacitet u ovisnosti o vanjskoj temperaturi se računa prema jednadžbi:

$$\Phi_{\vartheta_{in};\vartheta_{out}}(t) = \Phi_{dgn} \left[ \frac{\vartheta_{gen;out;\vartheta;ref} + 273,15}{\vartheta_{gen;in;\vartheta;ref} + 273,15} \right]^{n_{exer}} \frac{\vartheta_{gen;out} + 273,15}{\vartheta_{gen;in}(t) + 273,15} \quad (48)$$

gdje je:

$\Phi_{dgn}$	projektna snaga, iznosi 103,4 kW;
$\vartheta_{gen,out;\vartheta;ref}$	nazivna temperatura kondenzatora, iznosi 28°C;
$\vartheta_{gen,in;\vartheta;ref}$	projektna temperatura vanjskog zraka, iznosi -25°C;
$\vartheta_{gen,out}$	temperatura kondenzacije, iznosi 25°C;
$\vartheta_{gen,in}(t)$	temperatura vanjskog zraka, [°C];.

Odnos dostupnog kapaciteta, u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, i potrebnog kapaciteta za grijanje je prikazan dijagramom na slici 26.

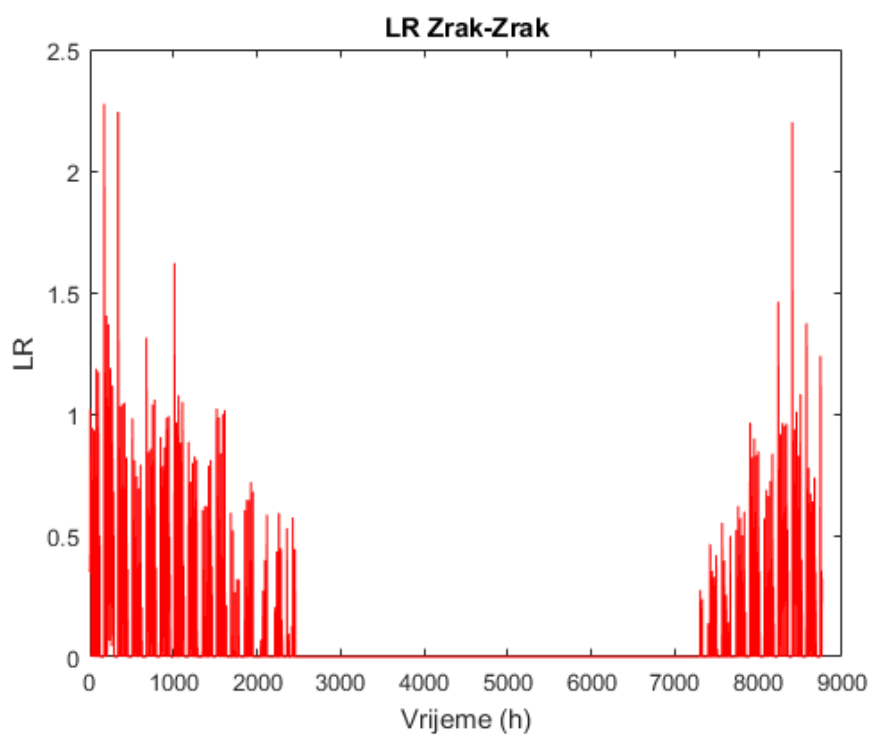


**Slika 26. Odnos dostupnog i potrebnog kapaciteta za grijanje dizalicom topline zrak-zrak**

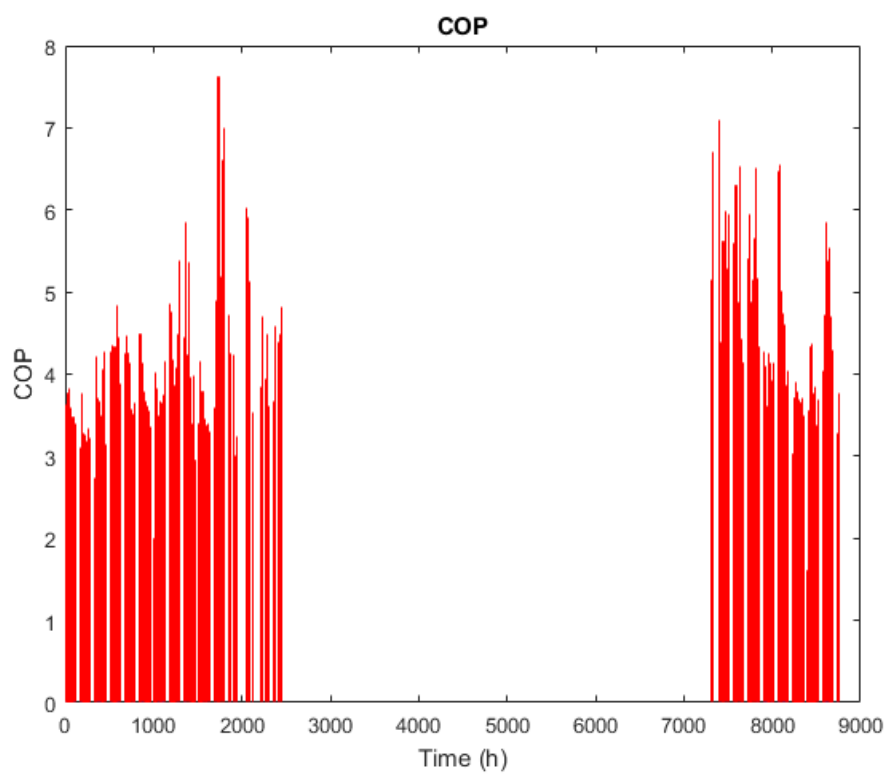
Na slici se može primijetiti nešto veća vrijednost dostupnog kapaciteta dizalice topline zrak-zrak nego kod dizalice topline zrak-voda na slici 16.



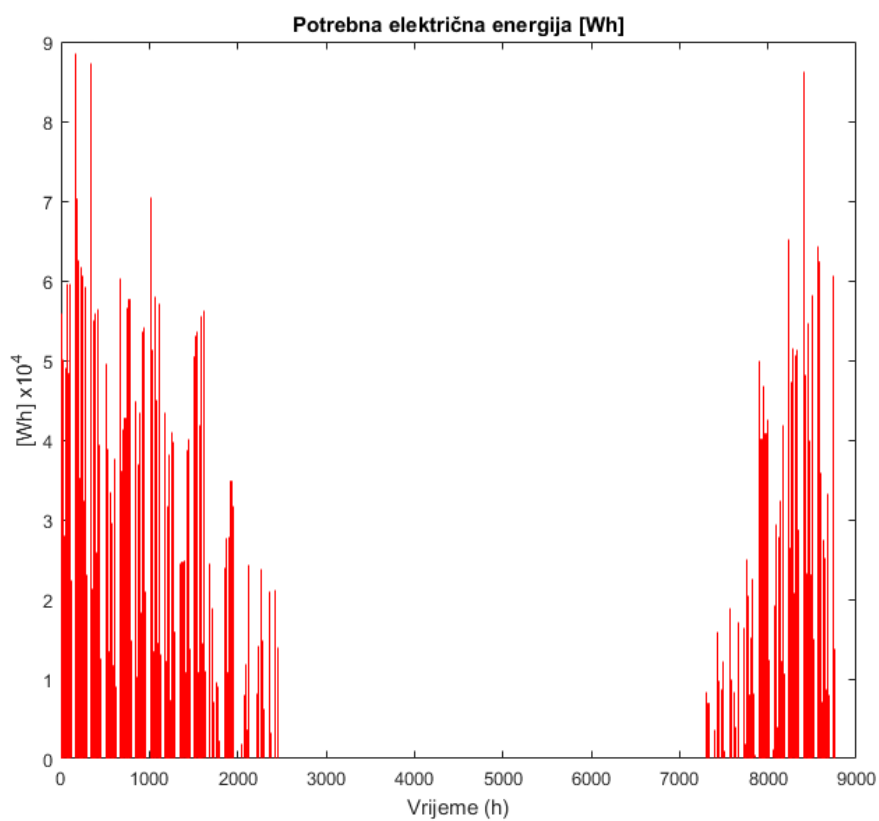
### 7.1.2. Rezultati satne analize



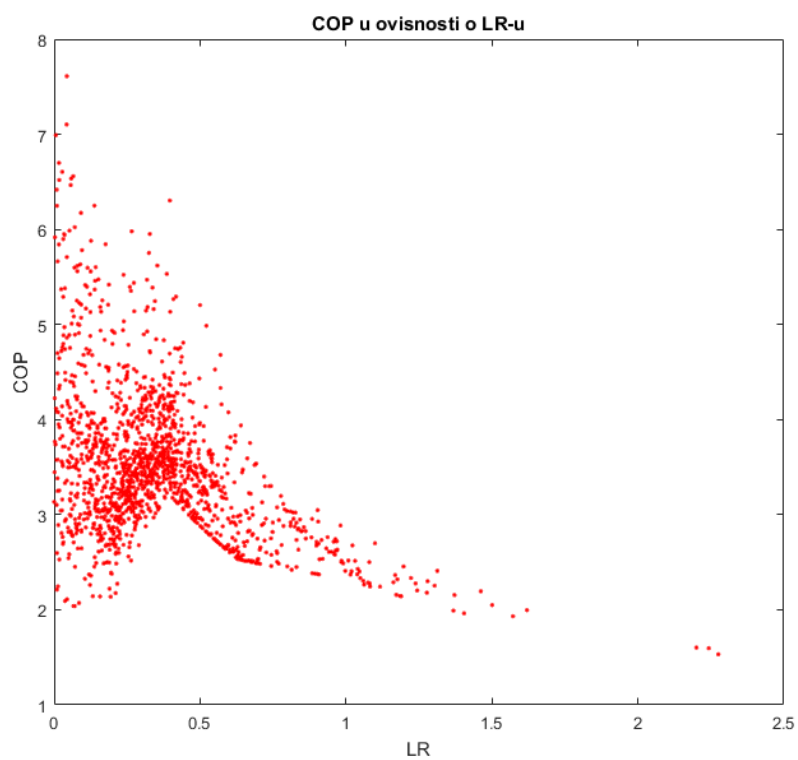
Slika 27. Omjer dostupnog i potrebnog kapaciteta za grijanje dizalicom topline zrak-zrak



Slika 28. Satne vrijednosti COP-a



Slika 29. Satne vrijednosti potrebne električne energije



Slika 30. Vrijednost COP-a u ovisnosti o omjeru opterećenja

Vrijednosti COP-a, za omjer opterećenja ispod minimalnog koji iznosi 0,17, računaju se prema jednadžbi (49):

$$COP_{cikl} = COP \cdot \left( 1 - LR_{min} \cdot \left( 1 - \frac{\phi_{nd}}{\phi_{min}} \right) \right) \quad (49)$$

Iznos sezonskog faktora grijanja računa se prema jednadžbi (50) koja glasi:

$$SCOP = \frac{\sum_1^{8760} Q_{H,gen;out}}{E_{gen;\vartheta_{in};\vartheta_{out;UK}}} = \frac{75682 \text{ kWh}}{24586 \text{ kWh}} = 3,18. \quad (50)$$

## 7.2. Ljetni period

### 7.2.1. Ulazni podaci

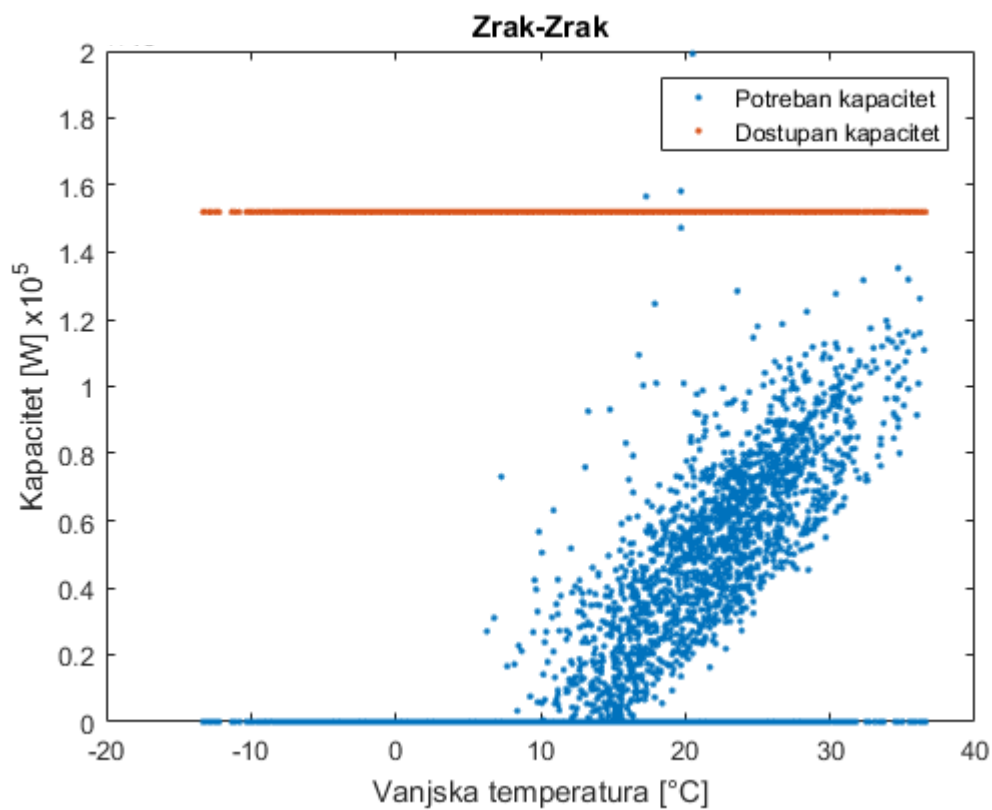
Za razliku od dizalice topline zrak-voda kod dizalice topline zrak-zrak proizvođač daje mjerene vrijednosti karakterističnih točaka i u ljetnom periodu prema normi EN 14825. Te vrijednosti su prikazane slijedećom tablicom

**Tablica 21. Karakteristične točke za hlađenje DT zrak-zrak**

Projektna snaga	152 kW		
	Kapacitet za parcijalno opterećenje i unutarnju postavnu temperaturu 20°C	Parcijalno opterećenje <i>LR</i>	<i>EER</i>
Vanjska temp. [°C]			
35	152	1	3,24
30	113,18	0,744	4,12
25	72,51	0,477	6,66
20	34,74	0,228	10,65

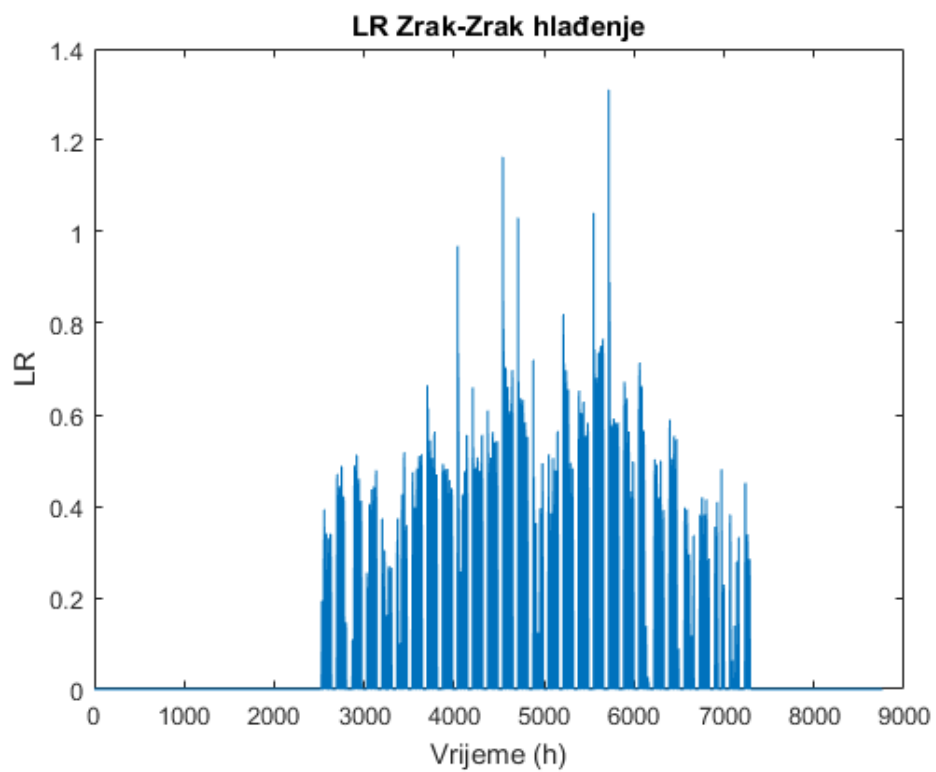
Dostupni kapacitet se smatra konstantnim i iznosi 152 kW.

Odnos dostupnog kapaciteta, u ovisnosti o vanjskoj temperaturi, i potrebnog kapaciteta za hlađenje prikazan je dijagramom na slici 31.

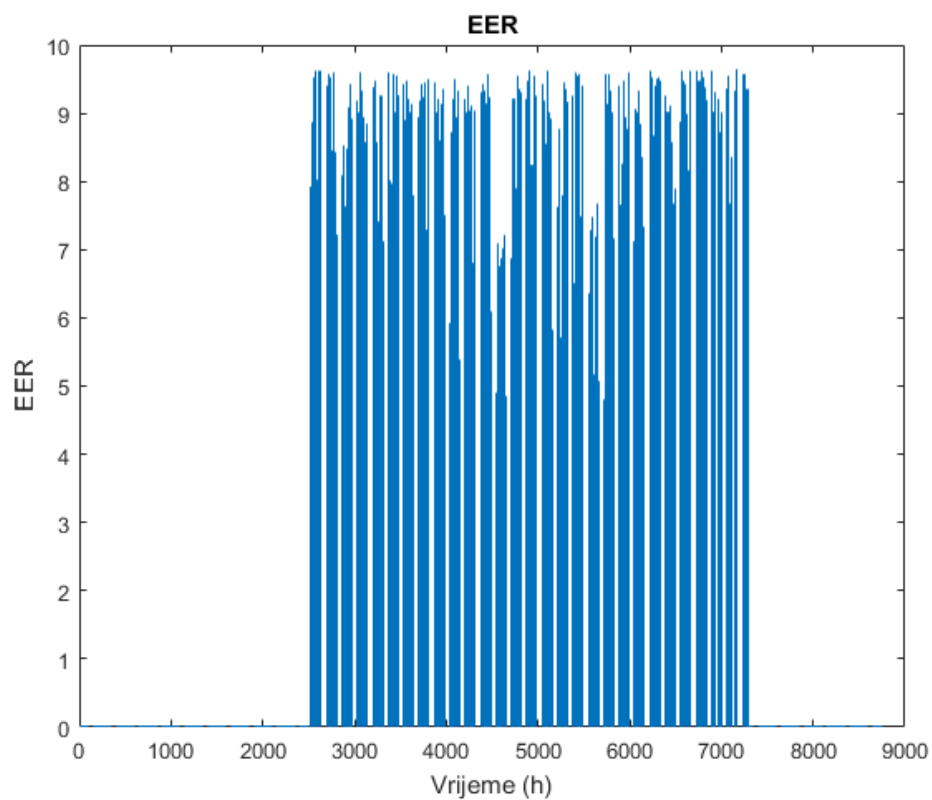


Slika 31. Odnos dostupnog i potrebnog kapaciteta za hlađenje dizalicom topline zrak-zrak

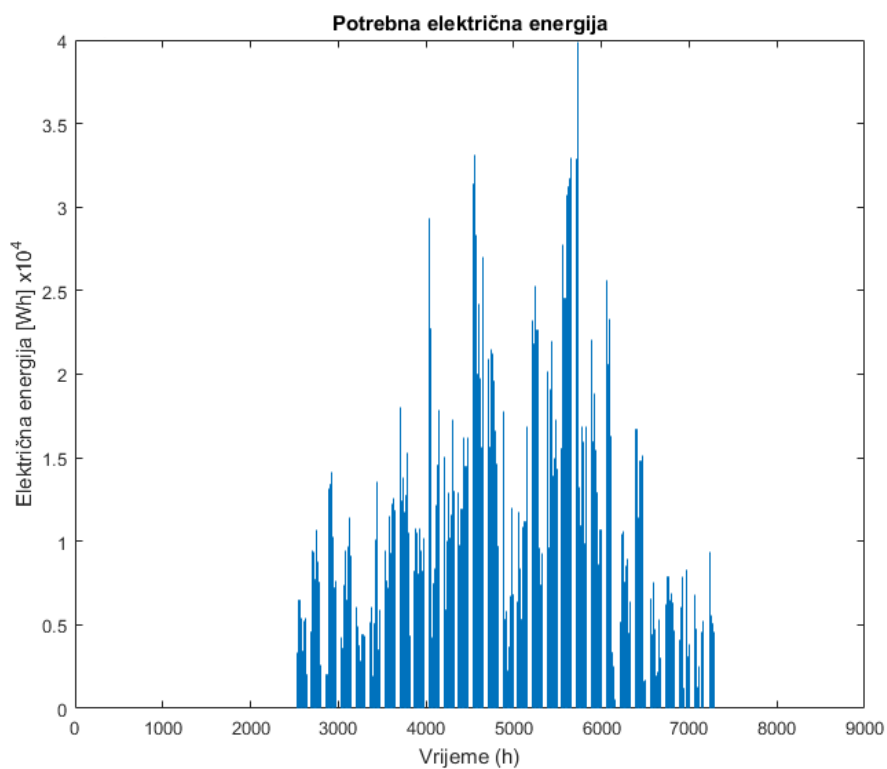
### 7.2.2. Rezultati satne analize



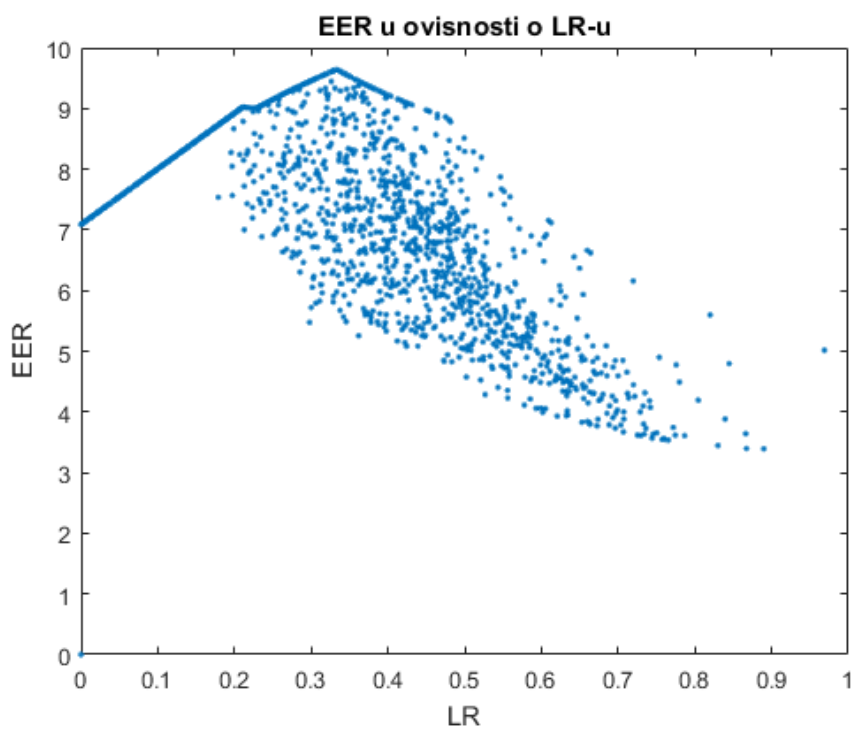
Slika 32. Omjer dostupnog i potrebnog kapaciteta za hlađenje dizalicom topline zrak-zrak



Slika 33. Satne vrijednosti EER-a



Slika 34. Satne vrijednosti potrebne električne energije



Slika 35. Vrijednost EER-a u ovisnosti o omjeru opterećenja

Na pojedinim dijelovima, posebice u području ispod minimalnog LR-a, javlja se približno linearna karakteristika krivulje ovisnosti EER-a i LR-a. Razlog je u postavljanju ograničenja na temperaturu isparavanja (maksimalno 15°C) i temperaturu kondenzacije (Minimalno 25°C) kako je opisano poglavljem 5.2.1.2. Ovi uvjeti će se postići kod niskih vanjskih temperatura kada je potrebno manje hlađenja pa je i manja vrijednost LR-a. Tada će eksergijski faktor hlađenja biti konstantan te će stvarni faktor hlađenja ovisiti samo o LR-u.

Iznos sezonskog faktora hlađenja računa se prema jednadžbi:

$$SEER = \frac{\sum_l^{8760} Q_{C,gen;out}}{E_{gen;\vartheta_{in};\vartheta_{out},UK}} = \frac{91525 \text{ kWh}}{14901,4 \text{ kWh}} = 6,14. \quad (51)$$

## 8. ANALIZA REZULTATA

Iznose izračunatih godišnjih potreba za grijanje i hlađenje prema normi HRN EN ISO 52016-1:2017 prikazuje tablica 22.

**Tablica 22. Prikaz godišnjih potreba za grijanjem i hlađenjem**

Grijanje [kWh]	Hlađenje [kWh]
77323,8	91525
Specifična energija [kWh/m <sup>2</sup> ]	
41	33,88

U tablici 23 je prikazana potrebna električna energija dizalica topline na godišnjoj razini i sezonski faktori grijanja i hlađenja.

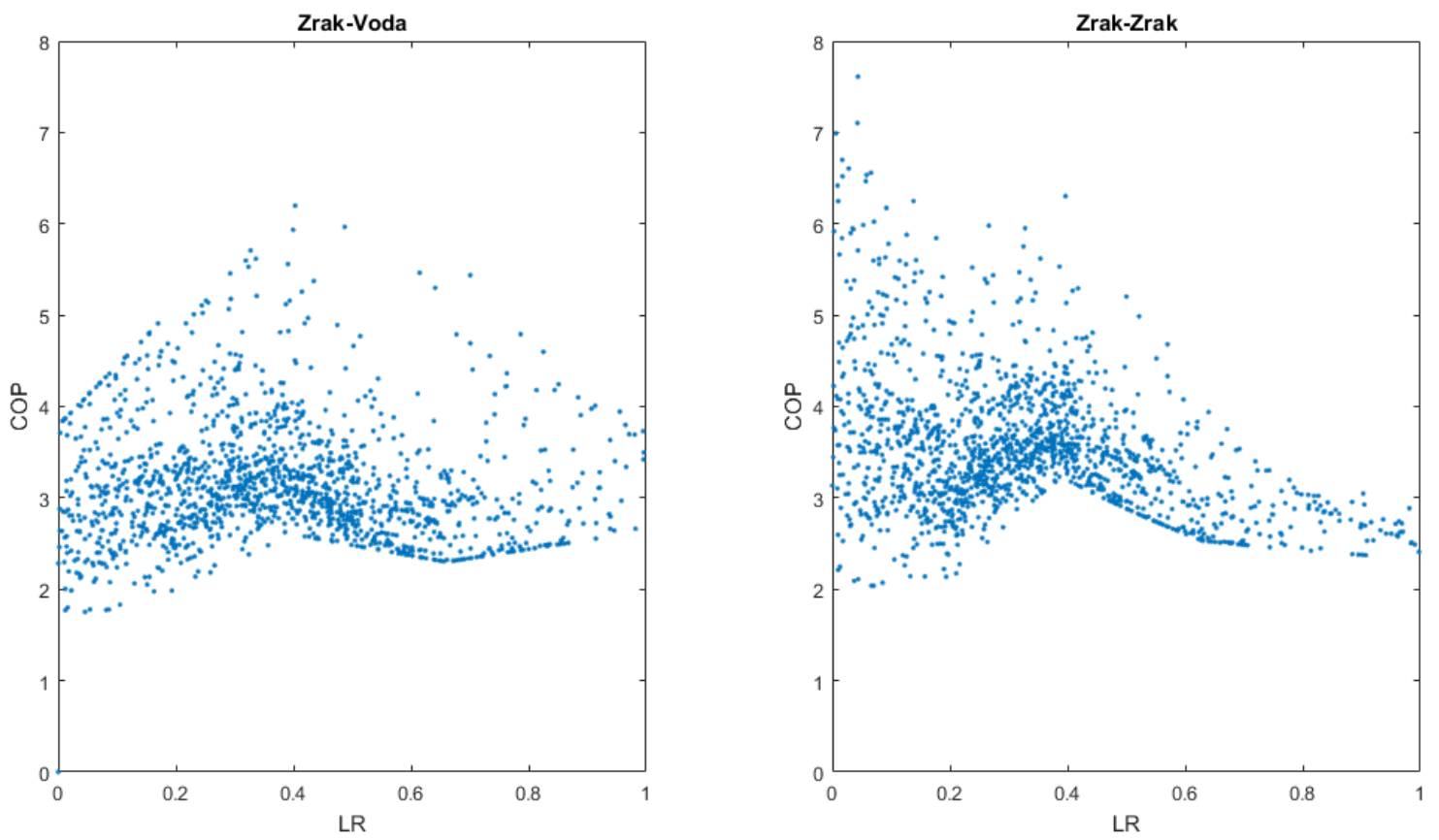
**Tablica 23. Usporedba potrošnje i COP/EER-a kod dizalica topline**

		Dizalica topline Zrak-Voda	Dizalica topline Zrak-Zrak
Potrebno električne energije na godišnjoj razini [kWh]	Grijanje	25308	24586
	Hlađenje	22440	14901,4
SCOP		3,05	3,18
SEER		4,1	6,14

Dizalica topline Zrak-Zrak ne pokazuje znatno veći sezonski faktor grijanja (SCOP). Razlog je u manjem kapacitetu dizalice topline zrak-voda. Manji kapacitet uzrokuje da dizalica topline zrak-voda dulje radi u području rada većeg faktora grijanja (između  $LR=0,3$  i  $0,5$ ) nego li je slučaj kod dizalice topline zrak-zrak. Također, dizalica topline zrak-zrak češće upada u područje rada s prekidom što dodatno smanjuje sezonski faktor hlađenja.

Slika 36 prikazuje usporedbu faktora grijanja ( $COP$ ) u ovisnosti o omjeru opterećenja ( $LR$ ).



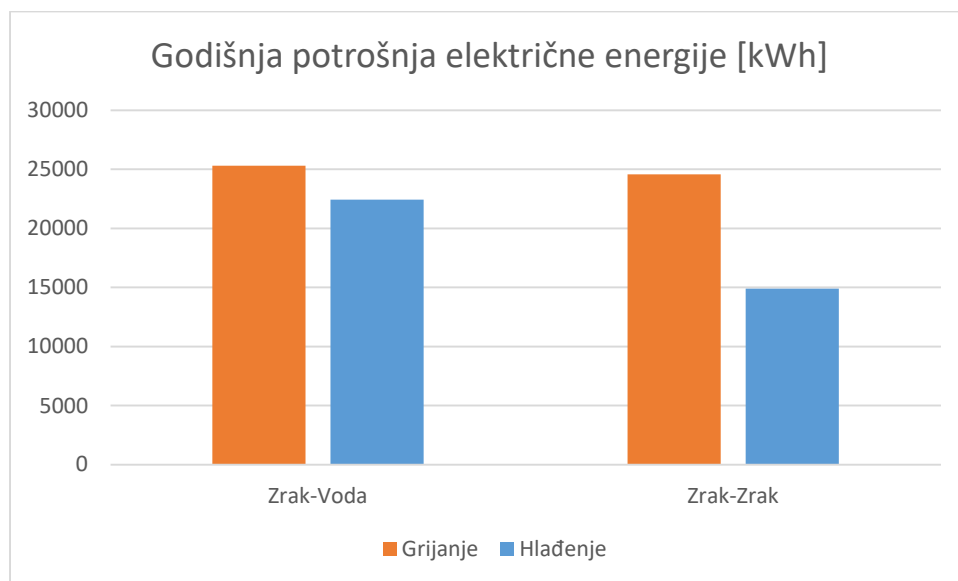


Slika 36. Usporedba COP-a u ovisnosti o LR-u za dizalice topline

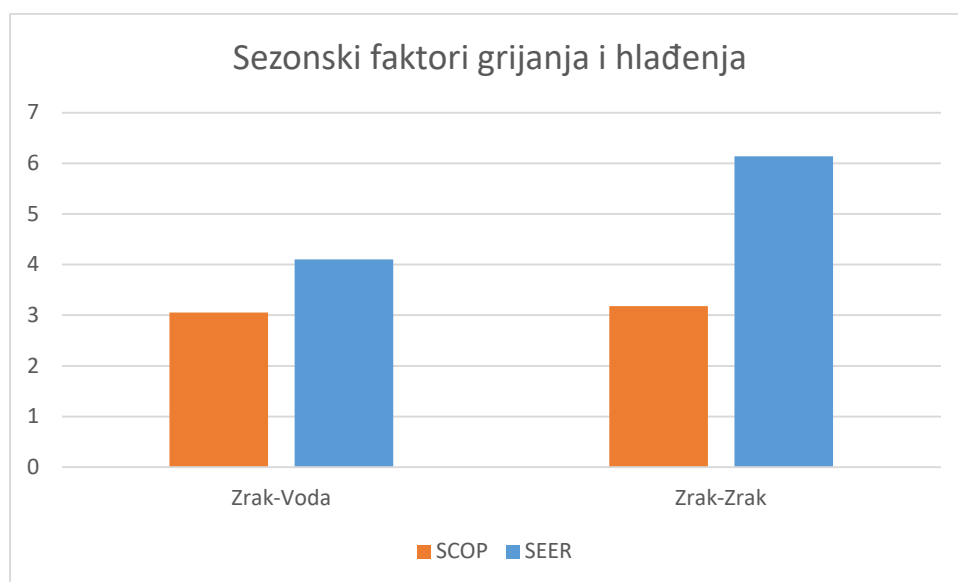
## 9. ZAKLJUČAK

U radu je izvršeno modeliranje toplinskih potreba za grijanje i hlađenje referentne zgrade za obrazovanje gotovo nulte energije prema normi HRN EN ISO 52016-1:2017. Razvijen je algoritam u računalnom programu *Matlab* koji na satnoj bazi daje informacije o toplinskom opterećenju. Modeliranje je izvršeno na temelju ulaznih podataka o referentnoj zgradi koje čine podaci o geometriji zgrade, termodinamički podaci te meteorološki podaci za grad Zagreb. Modeliran je prekid grijanja i hlađenja vikendom, te promjene postavnih temperatura ovisno o okupiranosti zgrade. Tako će u sezoni grijanja postavna temperatura za vrijeme boravka korisnika biti 20°C, a izvan tog vremena 17°C. Za vrijeme sezone hlađenja, u vrijeme boravka korisnika, postavna temperatura će biti 22°C, a izvan vremena boravka korisnika modeliran je prekid hlađenja. Dodatna pretpostavka je promjena zasjenjenja prozora, gdje će se otvaranjem i zatvaranjem roleta, ovisno o solarnom ozračenju, smanjivati energetska potreba za grijanjem i hlađenjem. Navedenim načinom modeliranja algoritma i unošenjem ulaznih podataka dobiveni su podaci o potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje i hlađenje zgrade. Tako je ukupna godišnja energetska potreba za grijanjem u referentnoj godini je 91525 kWh, odnosno 41 kWh/m<sup>2</sup>, dok je ukupna energetska potreba za hlađenjem 77323,8 kWh, odnosno 33,88 kWh/m<sup>2</sup>.

Na temelju izračunatih toplinskih potreba računa se satna potreba električne energije za pogon dizalice topline u svrhu pokrivanja opterećenja zgrade. U radu se analizira pokrivanje toplinskih potreba jednim od dva tipa dizalice topline, tip zrak-voda s inverterskom tehnologijom i tip zrak-zrak (VRF). Za satni proračun potrebne električne energije dizalica topline koristi se više metoda. Za režim grijanja dizalice topline zrak-voda koristi se proračun prema normi EN 15316-4-2:2016 put B, a za režim hlađenja koristi se metoda interpolacije između većeg broja mjerenih vrijednosti datih od proizvođača. Za režime grijanja i hlađenja dizalice topline zrak-zrak koristi se prilagođeni proračun norme EN 15316-4-2:2016 put B. Navedenim metodama dobivene su vrijednosti potrebne električne energije za pokrivanje godišnjih potreba za grijanje koje kod dizalice topline zrak-voda iznose 25308 kWh, a kod zrak-zrak iznose 24586 kWh. U slučaju hlađenja potrebna električna energija iznosi 22440 [kWh] kod izvedbe zrak-voda, a 14901,4 [kWh] kod izvedbe zrak-zrak.



Slika 37. Prikaz potrebne električne energije za dizalice topline



Slika 38. Usporedba SCOP-a i SEER-a za dizalice topline

Zaključak ovog rada je da dizalica topline zrak-zrak pokazuje bolje faktore grijanja i hlađenja tokom rada, čak i uz nepovoljniji omjer opterećenja koji uzrokuje češći rad u području manjeg faktora grijanja.

U radu su se pojavili nedostaci usporedbe izvedbe dizalnice topline zrak-voda sa izvedbom zrak-zrak. Nedostaci se tiču činjenice da je korišteno više metoda proračuna. Tako kod metode interpolacije između proširenih vrijednosti faktora hlađenja dizalnice topline zrak-voda, datim od proizvođača, postoje dvojbe o tome jesu li mjerenja rađena u skladu sa drugim korištenim kataloškim podacima.

**LITERATURA**

- [1] SO/DIS 52016-1 Energy performance of buildings – Calculation of energy needs for heating and cooling, internal temperatures and cooling load in a building or building zone – Part 1: Calculation procedures, 2017.
- [2] FprEN 15316-4-2:2016 Energy performance of buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies – Part 4-2: Space heating generation systems, heat pump systems, Module M3-8-2, M8-8-2, 2017
- [3] Žakula T.: Podaci o COP-u i EER-u; dizalica topline zrak-voda
- [4] Balen, I., Smoljan D. Podloge za predavanja iz kolegija “Termotehnika KGH“. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [5] Soldo, V., Boban L. Podloge za predavanja iz kolegija “Dizalice topline s OIE“. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [6] [https://mgipu.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/PLAN\\_PBZ\\_0\\_energije\\_do\\_2020.pdf](https://mgipu.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/PLAN_PBZ_0_energije_do_2020.pdf)