Energijsko modeliranje zgrade gotovo nulte energije na primjeru školske ustanove

Magdić, Lucija

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:235:399668

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Lucija Magdić

Zagreb, srpanj 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:
Doc. dr. sc. Tea Žakula, dipl. ing.

Studentica:
Lucija Magdić

Zagreb, srpanj 2021.

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

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Tei Žakuli na ukazanoj prilici, odvojenom vremenu te besprijekorno vođenom mentorstvu. Posebna zahvala i doktorandu Nikoli Bađunu na nesebičnoj pomoći u rješavanju svakog problema i dostupnosti tijekom cijele izrade rada.

Hvala mojoj obitelji koja mi je omogućila jedno lijepo i bezbrižno iskustvo studiranja. Hvala dečku Matiji koji je moja najveća podrška. Za kraj, hvala svim mojim kolegama i prijateljima koji su cijelo ovo iskustvo učinili nezaboravnim. Volim vas.

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, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Lucija Magdić** Mat. br.: 0035210573

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Energijsko modeliranje zgrade gotovo nulte energije na primjeru školske ustanove**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Energy modeling of a nearly-zero energy building on the example of a school building**

Opis zadatka:

Cilj rada je dinamička simulacija potrošnje i proizvodnje energije zgrade gotovo nulte energije (NZEB) na primjeru zgrade Tehničke škole Ruđer Bošković u Zagrebu. Geometriju zgrade modelirati prema idejnom arhitektonskom rješenju. Analizu je potrebno provesti za grijanje i hlađenje zgrade, pri čemu se za predaju toplinske i rashladne energije koristi aktivna betonska jezgra. Za proizvodnju toplinske i rashladne energije koristi se dizalica topline zrak-voda, a za proizvodnju električne energije potrebno je modelirati i optimizirati sustav fotonaponskih panela na krovu zgrade. U radu zanemariti gubitke podsustava distribucije. Za sastav ovojnice, unutarnje dobitke, postavne temperature te vrijeme korištenja zgrade koristiti službene podatke Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja za referentnu NZEB školu u kontinentalnoj klimi. Dinamičku simulaciju energijskih tokova zgrade u ovisnosti o utjecajnim parametrima provesti u računalnom programu TRNSYS®.

Rad treba sadržavati:
- opis zgrade i načina korištenja,
- opis energijskog modela zgrade,
- rezultate simulacije i optimizacije analiziranih sustava,
- rezultate o potrebnoj, isporučenoj i primarnoj energiji za grijanje i hlađenje.

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

Zadatak zadan: 06. svibnja 2021.

Datum predaje rada: 08. srpnja 2021.

Predviđeni datum obrane: 12. – 16. srpnja 2021.

Zadatak zadala: Doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednica Povjerenstva: Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA I
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1
2. PODACI O ZGRADI 2
2.1. Geometrija zgrade i namjena prostorija 2
2.2. Svojstva zidova i prozora i ostali ulazni podaci 8
3. OPIS RAČUNALNOG PROGRAMA TRNSYS 14
4. MODELIRANJE ENERGIJSKIH POTREBA ZGRADE U TRNSYS-u 15
5. MODELIRANJE SUSTAVA PREDAJE TOPLINSKE I RASHLADNE ENERGIJE 23
6. MODELIRANJE SUSTAVA PROIZVODNJE TOPLINSKE I RASHLADNE ENERGIJE 28
7. MODELIRANJE SUSTAVA PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE 32
8. REZULTATI 38
8.1. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje 38
8.2. Odabir temperatura polaza vode u aktivnoj betonskoj jezgri 40
8.2.1. Odabir temperature polaza vode za režim grijanja 40
8.2.2. Odabir temperature polaza vode za režim hlađenja 44
8.3. Potrošnja električne energije dizalice topline 46
8.4. Optimiranje nagiba i površine fotonaponskih panela 47
8.5. Isporučena i primarna energija za grijanje i hlađenje 50
9. ZAKLJUČAK 51
LITERATURA 53
PRILOG I – temperature zraka i poda u ostalim zonama 54

POPIS SLIKA

Slika 1 Sjeverno pročelje zgrade....2
Slika 2 Južno pročelje zgrade....2
Slika 3 Istočno pročelje zgrade....3
Slika 4 Tlocrt prizemlja....4
Slika 5 Tlocrt prvog kata....4
Slika 6 Tlocrt drugog kata....5
Slika 7 Tlocrt trećeg kata....5
Slika 8 Zoniranje prizemlja....11
Slika 9 Zoniranje prvog kata....11
Slika 10 Zoniranje drugog kata....12
Slika 11 Zoniranje trećeg kata....12
Slika 12 Definiranje orijentacije zgrade i ploha....15
Slika 13 Definiranje svojstava slojeva zida....16
Slika 14 Definiranje svojstava zidova....17
Slika 15 Definiranje toplinskih zona....18
Slika 16 Definiranje svojstava neprozirnih ploha....19
Slika 17 Definiranje svojstava prozora....20
Slika 18 Definiranje pogonskih režima....20
Slika 19 Povezivanje komponenti u Simulation Studiu....22
Slika 20 Definiranje aktivnog sloja u TRNBuildu....23
Slika 21 Slaganje slojeva aktivnog poda u Wall Type Manager-u....24
Slika 22 Zahtjevi na debljinu betona iznad postavljenih cijevi aktivnog sloja [5]....24
Slika 23 Definiranje parametara aktivnog sloja....25
Slika 24 Definiranje protoka i temperature polaza vode u aktivnom sloju....26
Slika 25 Odabir izlaznih podataka vezanih uz aktivni sloj....27
Slika 26 Proces u dizalici topline [8]....28
Slika 27 Ovisnost COP-a o režimu rada....31
Slika 28 Ovisnost EER-a o pojedinim parametrima....31
Slika 29 Model proizvodnje el. energije fotonaponskim panelima u Simulation Studio-u....32
Slika 30 Ekvivalentni strujni krug [9]....36
Slika 31 Potrebna energija za grijanje zgrade po satima....39

Slika 32 Potrebna energija za hlađenje zgrade po satima 39
Slika 33 Temperatura zraka u kritičnoj zoni (Zona 8) pod pretpostavkom prekida grijanja vikendom s temperaturom polaza 34°C 41
Slika 34 Temperatura zraka u kritičnoj zoni (Zona 8) bez prekida grijanja vikendom s temperaturom polaza 34°C 42
Slika 35 Temperatura poda u kritičnoj zoni (Zona 8) bez prekida grijanja vikendom s temperaturom polaza 34°C 42
Slika 36 Temperatura poda u kritičnoj zoni (Zona 8) bez prekida grijanja vikendom s temperaturom polaza 30°C 43
Slika 37 Temperatura zraka u kritičnoj zoni (Zona 8) bez prekida grijanja vikendom s temperaturom polaza 30°C 44
Slika 38 Temperatura zraka u kritičnoj zoni (Zona 9) bez prekida hlađenja vikendom 45
Slika 39 Temperatura poda u kritičnoj zoni (Zona 9) bez prekida hlađenja vikendom 45
Slika 40 Potrošnja električne energije dizalice topline 47
Slika 41 Proizvedena električna energija po m^2 fotonaponskog panela, u ovisnosti o nagibu panela 48
Slika 42 Električna energija preuzeta iz mreže u ovisnosti o instaliranoj površini fotonaponskih panela 49

POPIS TABLICA

Tablica 1 Opis prostorija i njihove površine 6
Tablica 2 Svojstva vanjskog zida 8
Tablica 3 Svojstva pregradnog zida 8
Tablica 4 Svojstva stropa 8
Tablica 5 Svojstva ravnog krova 9
Tablica 6 Svojstva poda na tlu 9
Tablica 7 Svojstva vrata 9
Tablica 8 Svojstva prozora na južnoj strani zgrade 9
Tablica 9 Svojstva prozora na ostalim stranama zgrade 10
Tablica 10 Ostali parametri zgrade 10
Tablica 11 Broj izmjena zraka po zonama 13
Tablica 12 Protoci vode kroz aktivnu betonsku jezgru za pojedine zone 26
Tablica 13 Korištene komponente prilikom modeliranja fotonaponskih panela 33
Tablica 14 Ulazni i izlazni podaci komponente Type16g 34
Tablica 15 Parametri koje je potrebno definirati u komponenti Type194 35
Tablica 16 Parametri komponente Type194 35
Tablica 17 Ulazni i izlazni podaci komponente Type194 37
Tablica 18 Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje po zonama 38
Tablica 19 Toplinski učini odabrane dizalice topline 46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d	cm	debljina
c_p	J/kgK	specifični toplinski kapacitet
ρ	kg/m^3	gustoća
λ	W/mK	toplinska provodnost
U	W/m^{2}K	koeficijent prolaza topline
g	-	stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje
COP	-	faktor grijanja
Q_{kond}	kWh	toplina predana mediju (vodi) na kondenzatoru
W_{komp}	kWh	potrošnja električne energije dizalice topline
EER	-	faktor hlađenja
Q_{isp}	kWh	toplina preuzeta od medija
I	A	jakost struje
U	V	napon
I_{L}	A	fotoelektrični efekt modula pri referentnim uvjetima
I_0	A	struja pri obrnutom zasićenju diode pri referentnim uvjetima
R_s	Ω	otpor serije modula
R_{sh}	Ω	otpor bypassa
$Q_{\text{H,nd}}$	kWh	potrebna energija za grijanje
$Q_{\text{C,nd}}$	kWh	potrebna energija za hlađenje
$E_{\text{mreža}}$	kWh	električna energija preuzeta iz mreže
$E_{p\text{potrebaDT}}$	kWh	potrebna električna energija za pogon dizalice topline
$E_{\text{proizvedenoPV}}$	kWh	električna energija proizvedena fotonaponskim panelima

SAŽETAK

U radu je modeliran i simuliran rad sustava grijanja, hlađenja te proizvodnje električne energije nZEB (zgrade gotovo nulte energije) obrazovne ustanove, čija je korisna površina 1590 m^2. Satne potrebne energije za grijanje i hlađenje izračunate su korištenjem računalnog programa TRNSYS, pri čemu godišnja potrebna energija iznosi 16 kWh/m^2a za grijanje i 22 kWh/m^2a za hlađenje. U TRNSYS-u je također modelirana aktivna betonska jezgra koja u zgradi predstavlja sustav predaje toplinske i rashladne energije. Nakon analize rada sličnih sustava u praksi, odabrana je temperatura polaza vode za grijanje od 30°C, a za hlađenje 17°C. U idućem koraku je na temelju podataka dobivenih od proizvođača modeliran rad dizalice topline zrak – voda kao sustava za proizvodnju toplinske i rashladne energije. Dobivena je jednadžba kojom se izračunavaju vrijednosti COP-a i EER-a dizalice topline pri bilo kojim radnim uvjetima. Specifično, poznavajući temperaturu polaza vode, temperaturu okoliša i djelomično opterećenje dizalice topline, jednadžbom je moguće u svakom satu u godini izračunati COP, EER te potrošnju električne energije dizalice topline. Na godišnjoj razini ta potrošnja iznosi 9 kWh/m^2a. Zadnji korak bilo je modeliranje sustava proizvodnje električne energije, odnosno, fotonaponskih panela. Optimiran je nagib panela kojim će se proizvesti najviše električne energije. Optimalan nagib panela iznosi 25°, pri kojem se proizvodi 124 kWh/m^2a električne energije. Nakon toga je optimizirana površina panela, s ciljem izračuna površine koju je potrebno instalirati za postizanje standarda zgrade nulte potrošnje energije (zgrada čija je potrošnja jednaka proizvodnji energije). Za analizirani sustav ta površina iznosi 111 m^2.

Ključne riječi: nZEB, grijanje, hlađenje, aktivna betonska jezgra, dizalica topline, fotonaponski paneli

SUMMARY

The scope of this thesis includes the modelling and simulation of a heating and cooling system operation of a nZEB (nearly zero energy building) educational institution, as well as the on-site electricity production. The net surface of the analyzed building is 1590 m^2. Hourly heating and cooling demands have been calculated in TRNSYS, with the annual heating demand of 16 kWh/m^2a, and cooling demand of 22 kWh/m^2a. A thermally-active building system has also been modeled in TRNSYS, and it represents a heating/cooling energy emitter in the building. Based on the analysis of similar systems in practice, the supply water temperature has been set to 30°C for heating and 17°C for cooling. Furthermore, an air – water heat pump, which represents a heating/cooling energy production system, has been modeled. The model is based on the data from the heat pump manufacturer. The model has resulted in an equation that calculates the COP and the EER for any operating condition. Specifically, if the supply water temperature, ambient temperature and a heat pump part-load ratio are known, it is possible to calculate the COP, the EER and the electricity consumption for each hour in a year. For the analyzed system, the heat pump annual electricity consumption is 9 kWh/m^2a. Finally, photovoltaic panels have been modeled as an on-site electricity production system. The panel slope has been optimized so that it enables the maximum electricity production. With the optimal slope of 25° the system produces 124 kWh/m^2a of electricity. The panel surface has also been optimized, with the goal of finding the surface area needed to achieve the net-zero energy standard (the energy consumption equal to the energy production of a building). For the analyzed system that surface is 111 m^2.

Keywords: nZEB, heating, cooling, thermally-active building system, heat pump, photovoltaic panels

1. UVOD

Tema diplomskog rada je modeliranje i simulacija sustava grijanja, hlađenja te proizvodnje električne energije Tehničke škole Ruđer Bošković u Zagrebu, koja predstavlja primjer zgrade gotovo nulte energije (nZEB). U prvom dijelu je opisana zgrada koja je predmet modeliranja, prikazana je njena geometrija te dan pregled parametara koji se koriste u energijskom modelu zgrade. Napravljen je energijski model zgrade u TRNSYS-u u svrhu analize godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade. Za predaju toplinske i rashladne energije koristi se aktivna betonska jezgra koja je također modelirana pomoću TRNSYS-a. Bilo je potrebno odabrati optimalne temperature polaza vode u aktivnoj betonskoj jezgri za grijanje/hlađenje te provjeriti postiže li se odabranim režimom rada toplinska ugodnost u prostorijama. Zatim je uslijedilo modeliranje sustava proizvodnje toplinske i rashladne energije, odnosno dizalice topline zrak – voda. Od proizvođača dizalice topline dobiveni su podaci o COP-u i EER-u u velikom broju radnih točaka koji su korišteni za opis rada. Specifično, na temelju podataka proizvođača je u MATLAB-u dobivena funkcija pomoću koje se ovi parametri mogu izračunati za bilo koju temperaturu polaza vode, temperaturu okoliša i djelomično opterećenje dizalice topline. Na taj način moguće je izračunati potrošnju električne energije dizalice topline pri varijabilnim uvjetima rada kroz godinu. Nakon što je izračunata potrošnja električne energije dizalice topline, izmodeliran je sustav proizvodnje električne energije sa svrhom proizvodnje te energije. Sustav proizvodnje električne energije sastoji se od fotonaponskih panela, a glavni cilj simulacije bila je optimizacija nagiba panela za maksimalnu proizvodnju električne energije te izračun površine panela kojom će se proizvesti dovoljno električne energije na godišnjoj razini za pokrivanje potreba dizalice topline. Na samom kraju rada izračunata je isporučena i primarna energija za grijanje i hlađenje zgrade.

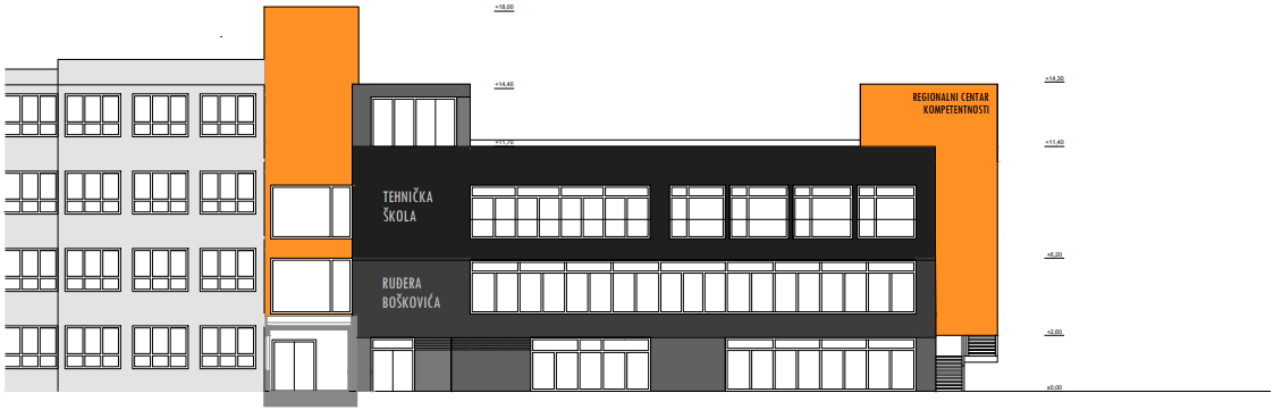
2. PODACI O ZGRADI

2.1. Geometrija zgrade i namjena prostorija

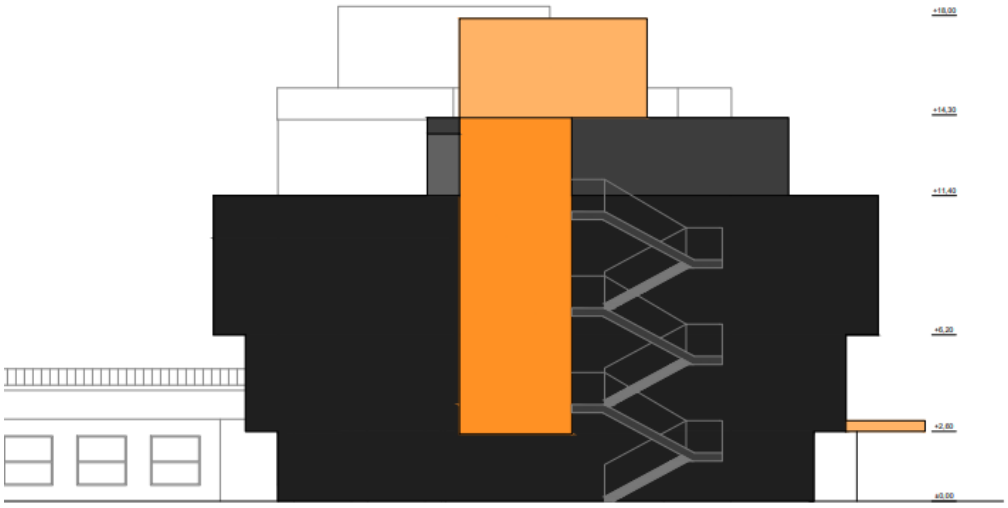
Modeliranje je provedeno za nZEB obrazovnu zgradu tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu, koja je trenutno u fazi projektiranja. Zgrada se sastoji od prizemlja i tri kata. Crteži pročelja te tlocrta zgrade dobiveni su u arhitektonskim podlogama. Sjeverno, južno i istočno pročelje prikazani su na Slikama 1 – 3, a zapadnom stranom je zgrada spojena na staru zgradu.



Slika 1 Sjeverno pročelje zgrade



Slika 2 Južno pročelje zgrade



Slika 3 Istočno pročelje zgrade

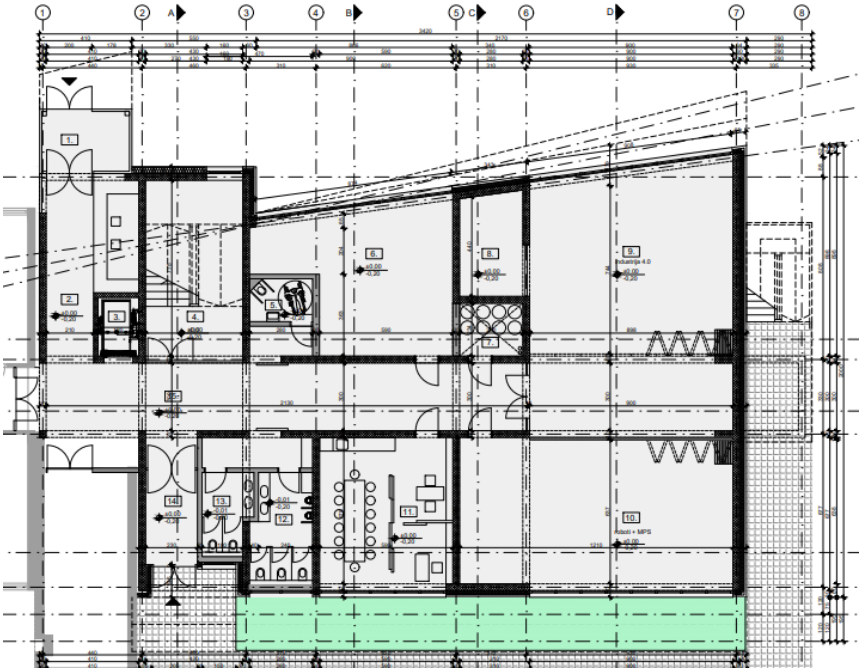
Prizemlje zgrade, čiji je tlocrt prikazan na Slici 4, obuhvaća ulazni prostor u zgradu koji se nalazi na sjevernoj strani zgrade, a ostatak prizemlja zauzimaju prostorije predviđene za održavanje nastave te prostorija uprave zgrade. Ukupne je neto površine 493,18 m^2, a sadrži 15 prostorija.

Tlocrt prvog kata prikazuje Slika 5. Neto površina prvog kata je 507,39 m^2, a sastoji se od ukupno 13 prostorija. Najveći dio površine kata zauzimaju učionice.

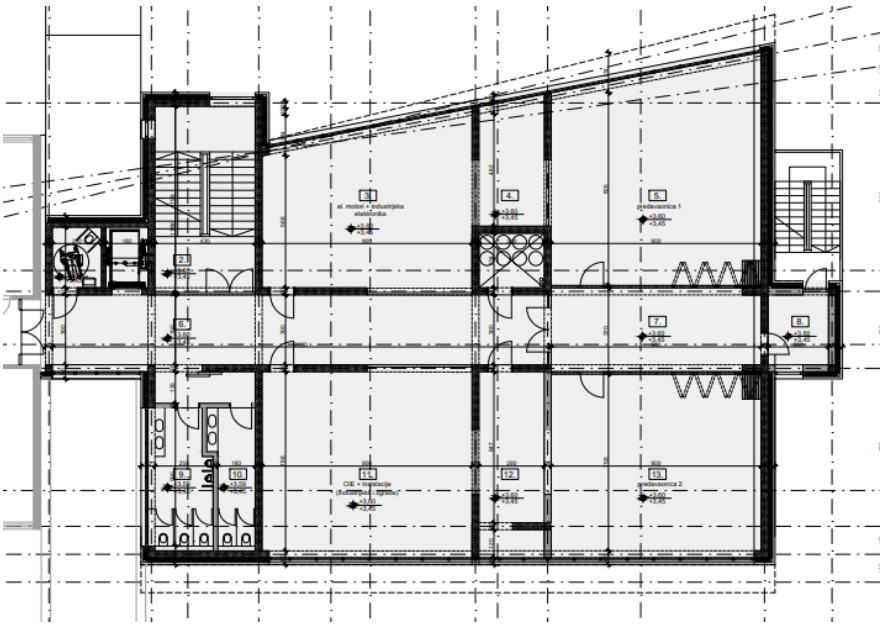
Tlocrt drugog kata površine 457,97 m^2 prikazuje Slika 6. Sadrži ukupno 34 prostorije, a namjena je smještaj gostujućih predavača. Kat se sastoji uglavnom od soba, kupaonica te restorana.

Površina trećeg kata čiji je tlocrt na Slici 7 iznosi 75,75 m^2, a sastoji se od 5 prostorija koje se nalaze na krovu zgrade, dok ostatak čini prohodan krov.

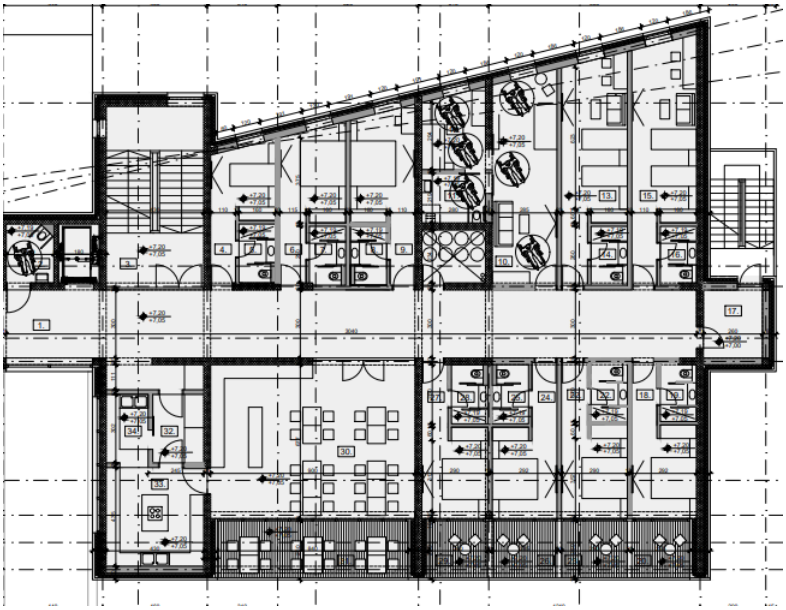
Detaljan opis svake prostorije na pojedinom katu, kao i njihove površine, iskazane su u Tablici 1. Ovi podaci su također dobiveni uz arhitektonske podloge, a bitni su za postupak zoniranja koji se provodi prije samog početka modeliranja zgrade.



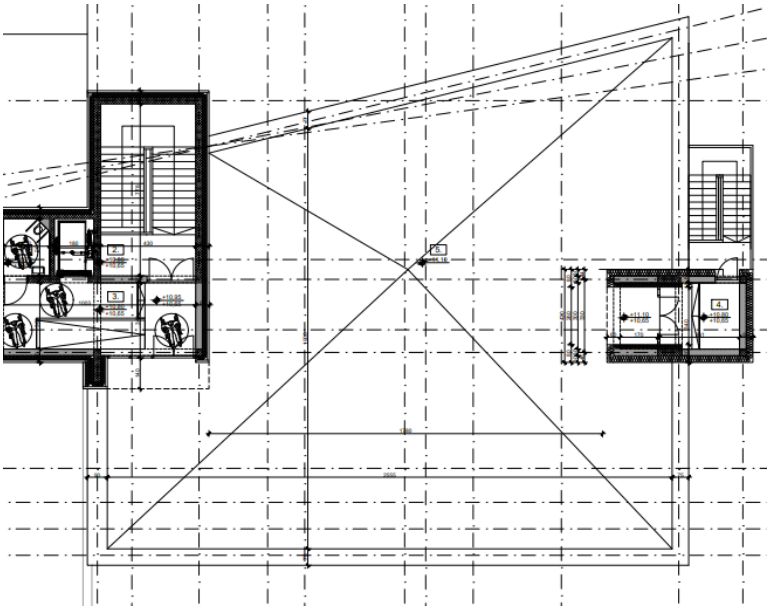
Slika 4 Tlocrt prizemlja



Slika 5 Tlocrt prvog kata



Slika 6 Tlocrt drugog kata



Slika 7 Tlocrt trećeg kata

Tablica 1 Opis prostorija i njihove površine

PRIZEMLJE	
Prostorija	**Površina [m^2]**
1.vjetrobran	10,3
2. recepcija	27,9
3. okno dizala	4,7
4. stubište	33,5
5. WC za osobe s invaliditetom	5,1
6. strojarnica	49,9
7. instalacijsko okno	6,6
8. spremište	12,9
9. industrija 4.0	106,1
10. roboti + MPS	82,9
11. uprava	41,0
12. sanitarije Ž	14,3
13. sanitarije M	7,6
14. vjetrobran	13,1
15. hodnik	77,4
UKUPNO	493,2

1.KAT	
Prostorija	**Površina [m^2]**
1.WC za osobe s invaliditetom	4,8
2. stubište	34,3
3. el. motori + industrijska elektronika	62,6
4. spremište	15,7
5. predavaonica 1	82,5
6. hodnik	66,0
7. hodnik	6,8
8. pretprostor evakuacijskog stubišta	32,2
9. sanitarije M	18,8
10. sanitarije Ž	14,3
11. OIE + instalacije	73,3
12. spremište	22,9
13. predavaonica 2	71,3
UKUPNO	507,4

2. KAT	
Prostorija	**Površina [m^2]**
1.hodnik	96,0
2. WC za osobe s invaliditetom	5,5
3. stubište	34,4

4. soba 1	13,5
5. kupaonica 1	3,9
6. soba 2	16,5
7. kupaonica 2	3,9
8. kupaonica 3	3,9
9. soba 3	18,2
10. soba 4 (za osobe s invaliditetom)	27,6
11. kupaonica 4	6,3
12. soba 4 – spavaonica	10,7
13. soba 5	25,4
14. kupaonica 5	3,9
15. soba 6	27,1
16. kupaonica 6	3,9
17. pretprostor evakuacijskog stubišta	7,8
18. soba 7	14,7
19. kupaonica 7	3,9
20. lođa 7	6,5
21. soba 8	14,7
22. kupaonica 8	3,9
23. lođa 8	6,5
24. soba 9	14,7
25. kupaonica 9	3,9
26. lođa 9	6,5
27. soba 10	14,5
28. kupaonica 10	3,9
29. lođa 10	6,5
30. restoran	61,0
31. terasa restorana	21,0
32. spremište namirnica	6,8
33. kuhinja	18,7
34. prostorija za pranje suđa	5,6
UKUPNO	457,9

3. KAT	
Prostorija	**Površina [m^2]**
1.WC za osobe s invaliditetom	5,8
2. stubište	33,9
3. hodnik	28,3
4. pretprostor evakuacijskog stubišta	7,8
UKUPNO	75,8

2.2. Svojstva zidova i prozora i ostali ulazni podaci

U Tablicama 2 – 10 dani su podaci o svojstvima ovojnice i pogonskim režimima zgrade. Podaci su definirani od strane Ministarstva prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine, a odnose se na referentnu nZEB obrazovnu zgradu za kontinentalnu Hrvatsku. Podaci iz Tablice 10 usklađeni su s podacima iz Algoritma za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790 [1].

Tablica 2 Svojstva vanjskog zida

VANJSKI ZID					
Sloj	**Materijal**	***d* (cm)**	**c_p (J/kgK)**	**ρ (kg/m^3)**	**λ (W/mK)**
1	armirani beton	20	1000	2500	2,6
2	mineralna vuna	20	1030	50	0,035
3	polimer-cementna žbuka armirana staklenom mrežicom	0,3	1000	1100	0,7
4	silikatna žbuka	0,2	1050	1850	0,87
Koeficijent prolaza topline *U* (W/m^{2}K)		0,168			

Tablica 3 Svojstva pregradnog zida

PREGRADNI ZID					
Sloj	**Materijal**	***d* (cm)**	**c_p (J/kgK)**	**ρ (kg/m^3)**	**λ (W/mK)**
1	armirani beton	20	1000	2500	2,6
Koeficijent prolaza topline *U* (W/m^{2}K)		4,05			

Tablica 4 Svojstva stropa

STROP					
Sloj	**Materijal**	***d* (cm)**	**c_p (J/kgK)**	**ρ (kg/m^3)**	**λ (W/mK)**
1	epoksi smola	0,3	1400	1200	0,2
2	cementni estrih	6	1100	2000	1,6
3	PE folija	0,02	1250	1000	0,19
4	stiropor EPS T	2	1260	12	0,042
5	stiropor EPS 150	4	1260	25	0,036
6	armirani beton	20	1000	2500	2,6
Koeficijent prolaza topline *U* (W/m^{2}K)		0,527			

Tablica 5 Svojstva ravnog krova

RAVNI KROV					
Sloj	**Materijal**	***d* (cm)**	**c_p (J/kgK)**	**ρ (kg/m^3)**	**λ (W/mK)**
1	armirani beton	20	1000	2500	2,6
2	parna brana – bitumenska traka 4 mm s uloškom od Al folije	0,02	940	2700	203
3	mineralna vuna	24	1030	50	0,035
4	poliemarna hidroizolacijska traka na bazi PIB	0,02	960	1600	0,26
5	šljunak suhi (*ne ulazi u proračun)	6	840	1700	0,81
Koeficijent prolaza topline *U* (W/m^{2}K)		0,141			

Tablica 6 Svojstva poda na tlu

POD NA TLU					
Sloj	**Materijal**	***d* (cm)**	**c_p (J/kgK)**	**ρ (kg/m^3)**	**λ (W/mK)**
1	epoksi smola	0,3	1400	1200	0,2
2	cementni estrih	6	1100	2000	1,6
3	PE folija	0,02	1250	1000	0,19
4	stiropor EPS T	2	1260	12	0,042
5	stiropor EPS 150	4	1260	25	0,036
6	višeslojne polimer-bitumenske hidroizolacijske trake	1	1000	1100	0,23
7	beton (*ne ulazi u proračun)	10	1000	2200	1,65
8	ekstrudirana polistirenska pjena (*ne ulazi u proračun)	10	1450	25	0,03
Koeficijent prolaza topline *U* (W/m^{2}K)		0,283			

Tablica 7 Svojstva vrata

VRATA	
Koeficijent prolaza topline, *U* (W/m2K)	2

Tablica 8 Svojstva prozora na južnoj strani zgrade

PROZORI - jug	
Koeficijent prolaza topline stakla, *U* (W/m²K)	0,7
Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, *g* [-]	0,407

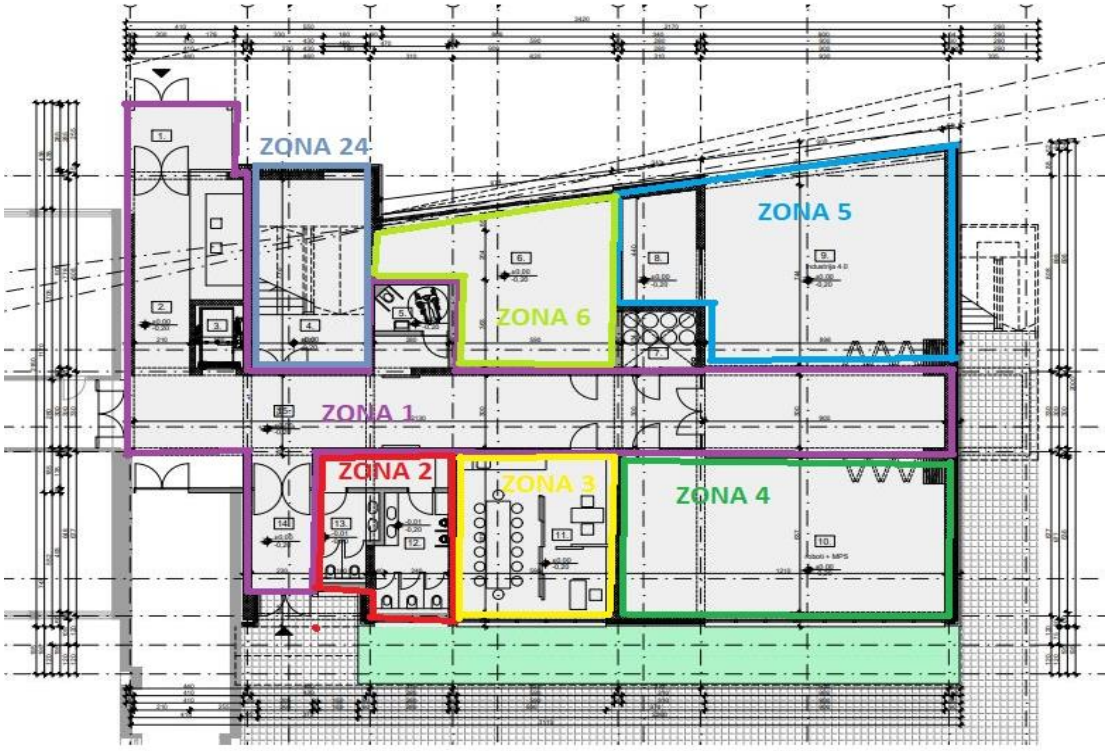
Tablica 9 Svojstva prozora na ostalim stranama zgrade

PROZORI – sjever, istok, zapad	
Koeficijent prolaza topline stakla, U (W/m²K)	1,1
Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, g [-]	0,598

Tablica 10 Ostali parametri zgrade

Parametar	**Vrijednost**
Izmjena zraka uslijed infiltracije	0,1 h^{-1} kada je sustav mehaničke ventilacije isključen, odnosno 0 za vrijeme rada mehaničke ventilacije
Raspored korištenja zgrade	08:00-20:00 (5 dana u tjednu)
Postavna temperatura za grijanje	20°C
Postavna temperatura za hlađenje	22°C
Unutarnji toplinski dobici u periodima korištenja zgrade	10 W/m^2
Unutarnji toplinski dobici u periodima kada se zgrada ne koristi	0 W/m^2

Zgradu je prije početka modeliranja bilo potrebno podijeliti na toplinske zone. Podjela na zone izvršena je prema normi HRN EN ISO 52016-1:2017 [2]. Toplinska zona može obuhvaćati jednu ili više prostorija, pri čemu se više prostorija može grupirati u jednu toplinsku zonu ukoliko one imaju slična svojstva (toplinska opterećenja, pogonske režime, raspored korištenja i slično). Na Slikama 8 – 11 prikazano je konačno rješenje zoniranja analizirane zgrade, a na temelju kojega su određene 24 toplinske zone.



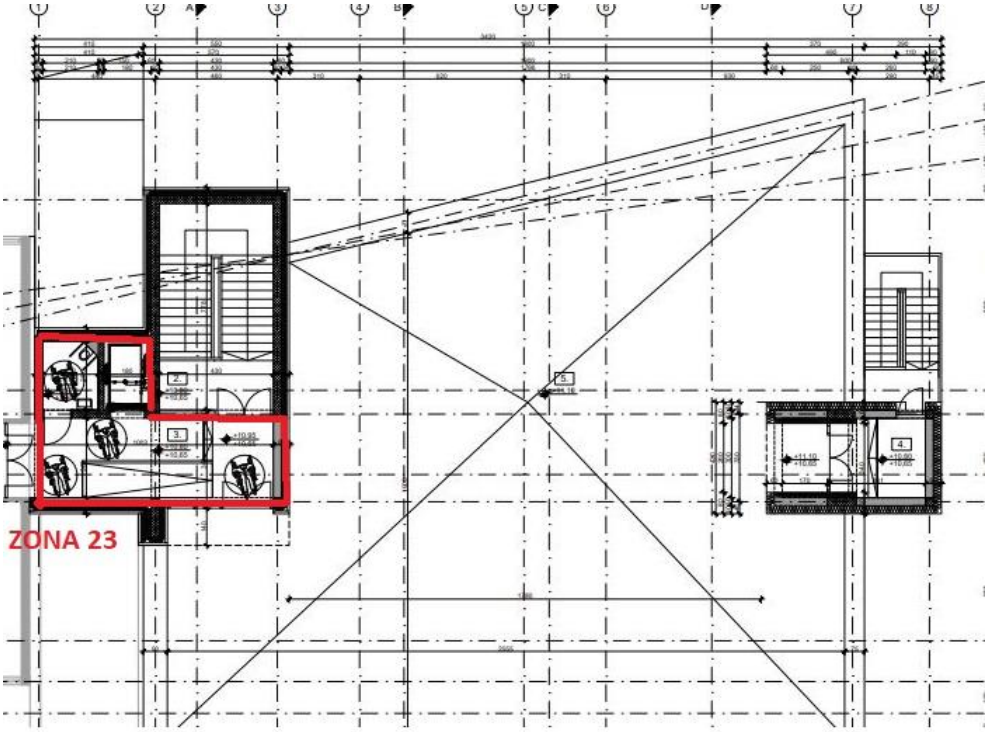
Slika 8 Zoniranje prizemlja



Slika 9 Zoniranje prvog kata



Slika 10 Zoniranje drugog kata



Slika 11 Zoniranje trećeg kata

U zgradi je predviđen sustav mehaničke ventilacije te je nakon provedbe zoniranja izračunat potreban broj izmjena zraka za svaku zonu, a rezultati su prikazani u Tablici 11. Proračun je proveden prema ASHRAE standardu [3] koji u obzir uzima površinu prostorije te zaokupljenost prostorije koja se predviđa na temelju svrhe koju prostorija ima.

Tablica 11 Broj izmjena zraka po zonama

ZONA	BROJ IZMJENA ZRAKA [h^{-1}]
Z1	1
Z2	6
Z3	1,6
Z4	7,6
Z5	4,7
Z6	4,7
Z7	1
Z8	4,7
Z9	4,7
Z10	4
Z11	1
Z12	1,7
Z13	1,5
Z14	1,6
Z15	1,3
Z16	1,4
Z17	1,4
Z18	1,6
Z19	1,6
Z20	1,6
Z21	1,6
Z22	1,6
Z23	1
Z24	1

3. OPIS RAČUNALNOG PROGRAMA TRNSYS

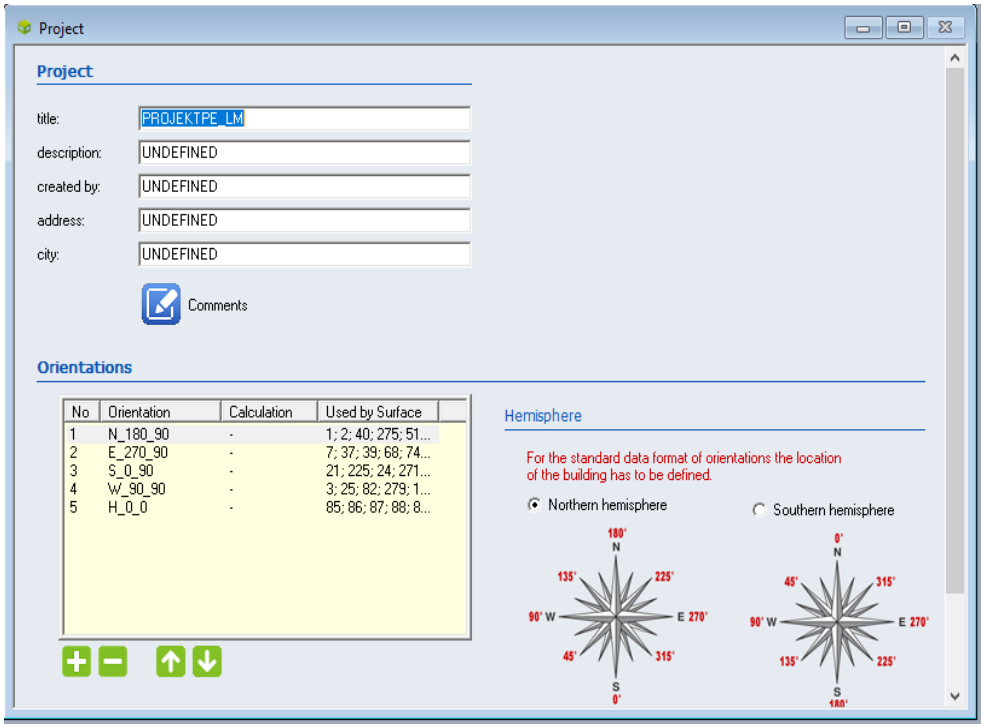
U poglavlju je dan kratak opis računalnog programa TRNSYS koji je korišten za modeliranje energijskih potreba zgrade, modeliranje aktivne betonske jezgre i modeliranje proizvodnje električne energije iz fotonaponskih panela.

TRNSYS (Transient System Simulation Tool) je računalni simulacijski program namijenjen simulaciji dinamičkih sustava. Njime je moguće simulirati razne energetske sustave, poput solarnih sustava, kogeneracijskih sustava, sustava klimatizacije, grijanja, i hlađenja (KGH sustava) i mnogih drugih. Osim za energetske sustave, može se koristiti i za simulaciju bilo kojeg dinamičkog sustava, pa čak i protoka prometa ili nekih bioloških procesa. TRNSYS se sastoji od velikog broja komponenti pri čemu je svaka od njih namijenjena modeliranju jednog dijela sustava, pa tako postoje komponente za simulaciju solarnih sustava, vjetroturbina itd. Komponenta koja je vrlo bitna za ovaj rad je *Type 56*, komponenta višezonske zgrade, koja služi za izračun potrebne energije za grijanje i hlađenje te dinamičkog odziva temperature u toplinskim zonama. Matematički model prema kojem radi *Type 56* temelji se na energetskim bilancama za toplinske zone ili tzv. *airnode*. *Airnode*-om se smatra onaj dio volumena prostora u kojem se pretpostavlja jednoliko raspoređena temperatura. Toplinska zona obuhvaća prostor sa sličnim toplinskim opterećenjima, pogonskim uvjetima, rasporedima rada itd., te može uključivati i više prostorija. Određena je volumenom te toplinskim kapacitetom zraka. U novoj verziji TRNSYS-a jedna toplinska zona može sadržavati više airnodova, ako se, primjerice, želi modelirati temperaturna stratifikacija ili strujanje zraka unutar prostorije. Detaljan matematički model komponente *Type56* opisan je u Projektu PE [4] te se ovdje neće ponavljati. Unutar ove komponente također je modelirana aktivna betonska jezgra koja predstavlja sustav predaje toplinske i rashladne energije u promatranoj zgradi. Važna je spomenuti i komponentu *Type194* koja služi za modeliranje sustava proizvodnje električne energije putem fotonaponskih panela, a opis te komponente biti će dan u nastavku rada.

4. MODELIRANJE ENERGIJSKIH POTREBA ZGRADE U TRNSYS-u

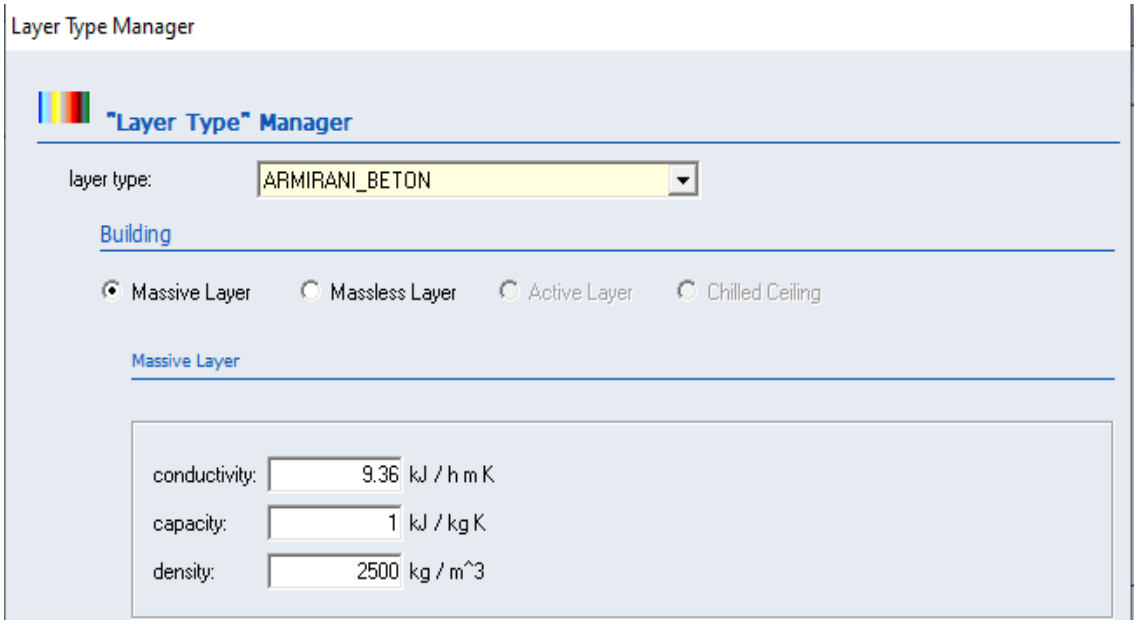
TRNBuild je korisničko sučelje TRNSYS-a za izradu modela višezonske zgrade, a koji se kasnije koristi u *Type56* za izračun energetskih bilanci u zonama. U TRNBuild-u se definiraju geometrija i orijentacija zgrade, sastav elemenata zgrade (zidova, prozora) te svi podaci o režimima grijanja, hlađenja, mehaničke ventilacije, infiltracije, rasporedu korištenja zgrade, unutarnjim dobicima topline.

U ovom poglavlju opisan je tijek modeliranja zgrade u TRNBuild-u te način na koje su komponente povezane u glavnom korisničkom sučelju TRNSYS-a, Simulation Studio-u. Kao prvi korak potrebno je definirati na kojoj zemljinoj polutci je smještena promatrana zgrada, što je za slučaj zgrade u ovom radu bila sjeverna polutka. Također je potrebno definirati orijentacije koje će se kasnije pridruživati svakoj plohi, pri čemu se strane svijeta definiraju preko azimuta i nagiba plohe u odnosu na vertikalu, što je prikazano na Slici 12.

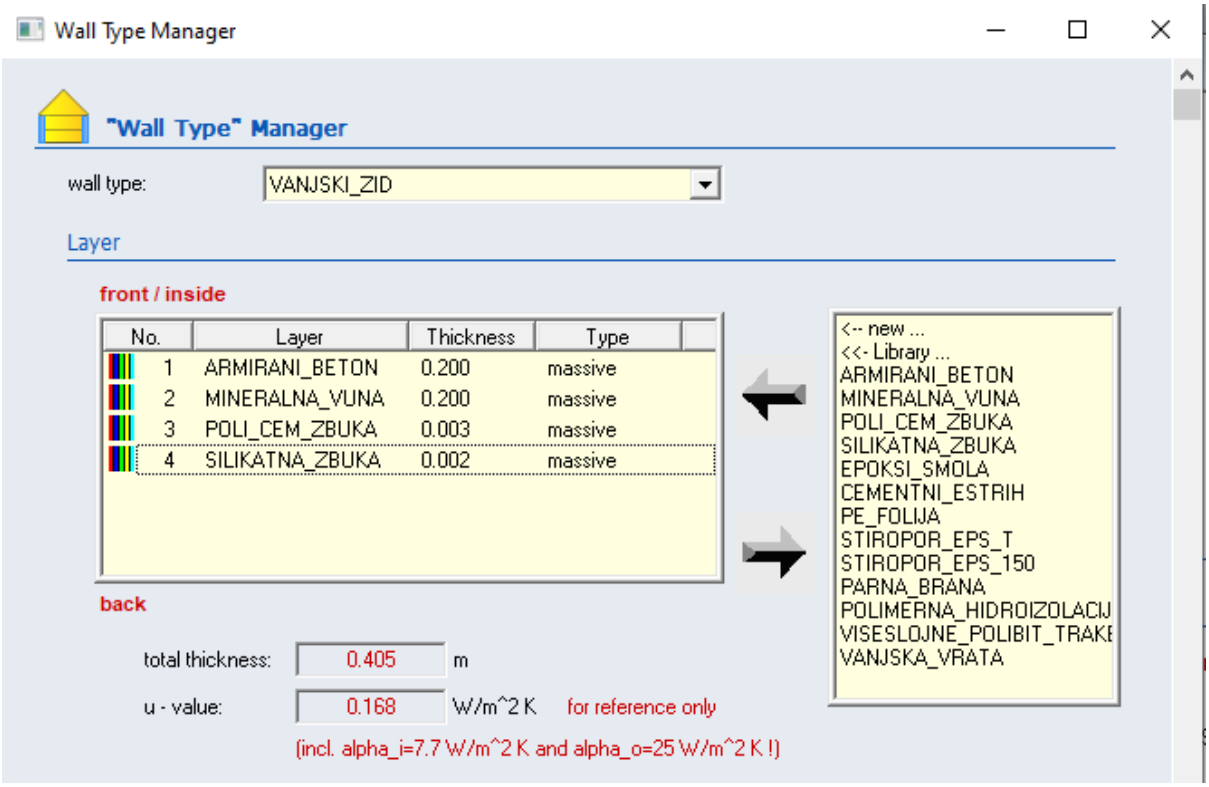


Slika 12 Definiranje orijentacije zgrade i ploha

Također se mogu definirati određene konstante modela, poput gustoće zraka te specifičnog toplinskog kapaciteta zraka. Nakon toga, koristeći opciju *Layer type manager*, definiraju se svi slojevi i svojstva zidova koji su prethodno navedeni u Tablicama 2 – 7. Nakon definiranja svih slojeva, u *Wall type manager*-u se određuju vrste zidova od kojih se zgrada sastoji, poštujući redoslijed slojeva te debljinu pojedinog sloja. Unos slojeva zidova prikazan je na Slici 13, a definiranje cijelog zida na Slici 14.

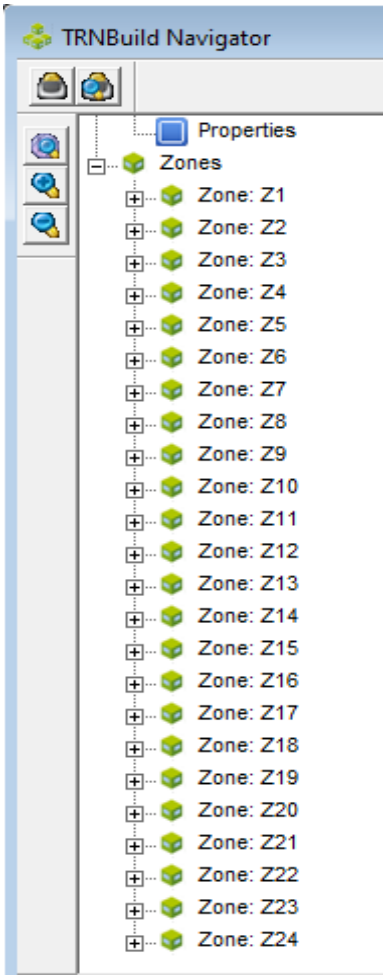


Slika 13 Definiranje svojstava slojeva zida



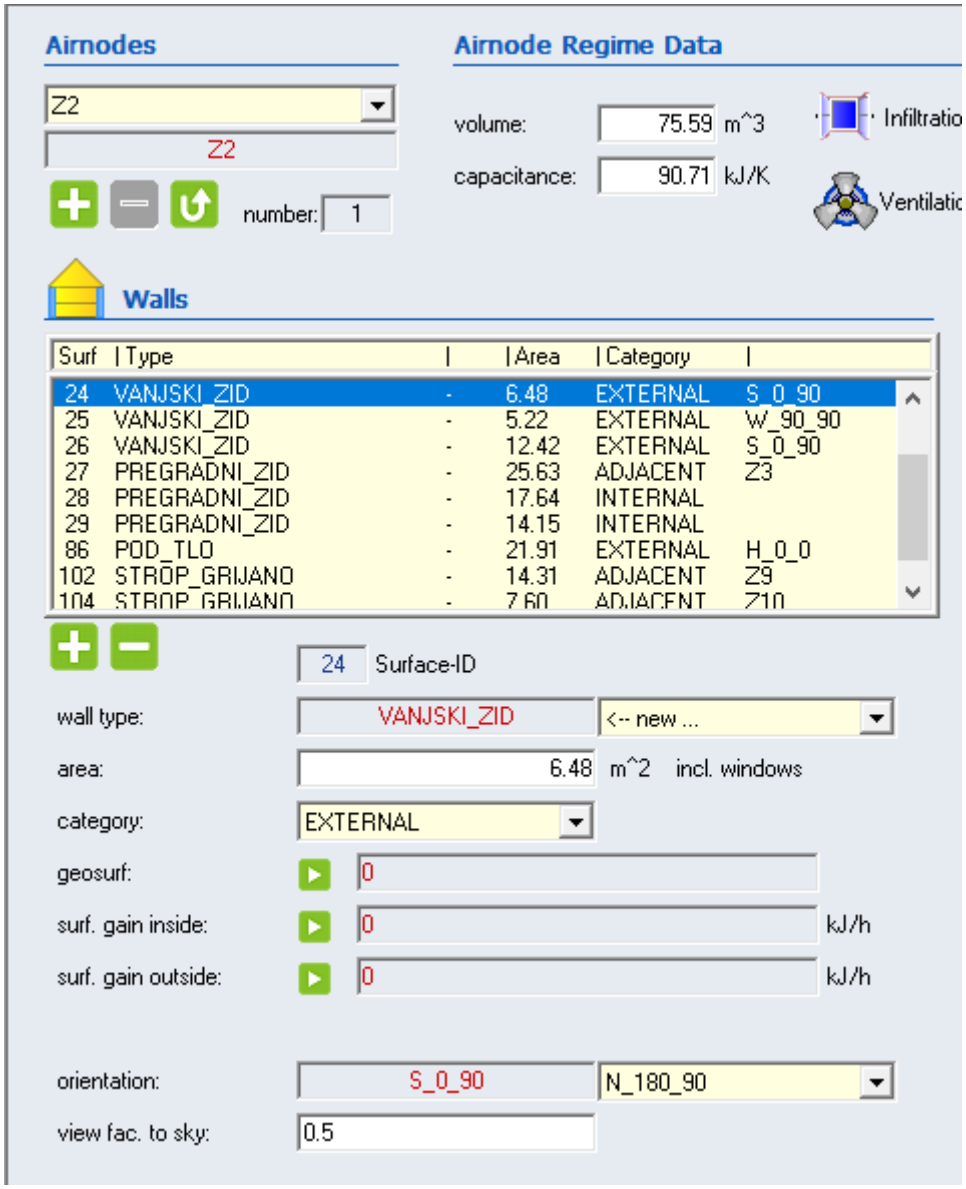
Slika 14 Definiranje svojstava zidova

TRNBuild automatski računa ukupnu debljinu zida te koeficijent prolaza topline istog. Idući korak je definiranje prethodno toplinskih zona definiranih na Slikama 8 – 11. Unos toplinskih zona prikazan je na Slici 15.



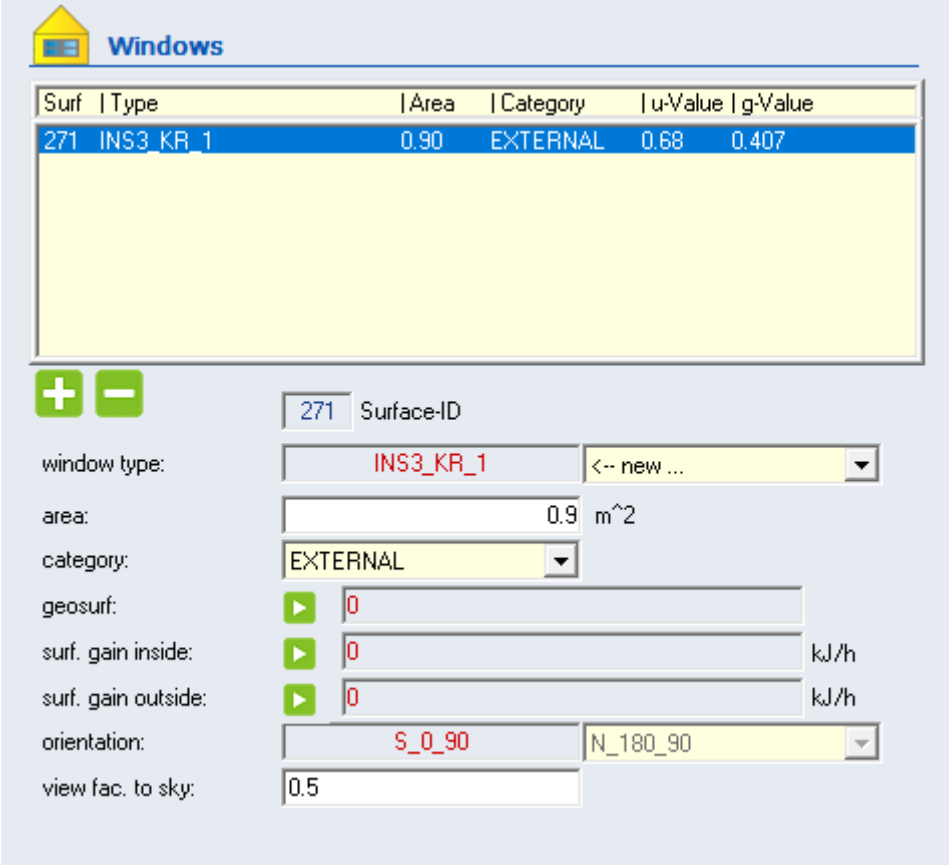
Slika 15 Definiranje toplinskih zona

Zatim je za svaku zonu definiran volumen zraka te sve plohe koje zona sadržava (zid, pod, strop). Plohama su dodijeljeni atributi EXTERNAL, INTERNAL, ADJANCED ili BOUNDARY. EXTERNAL se odnosi na vanjske plohe koje graniče s okolišem, INTERNAL se odnosi na plohe unutar zone, ADJANCED su unutarnje plohe koji graniče s drugom zonom, a BOUNDARY su plohe s adijabatskim rubnim uvjetom, odnosno plohe kroz koje nema izmjene topline. Za svaku plohu definirana je površina i termodinamička svojstva, a za vanjske (EXTERNAL) plohe dodatno je bilo potrebno definirati i orijentaciju prema strani svijeta, nagib plohe te vidni faktor neba. Prozor za definiranje geometrije unutar zone prikazan je na Slici 16.



Slika 16 Definiranje svojstava neprozirnih ploha

Nakon unosa svih neprozirnih ploha u zonama, definirani su prozori, kako je prikazano na Slici 17. Definirani su na zidu na kojem se nalaze te je također potrebno unijeti njihovu površinu, termodinamička svojstva te orijentaciju i vidni faktor neba. Vrsta prozora odabrana je iz TRNBuild-ove baze prozora, pri čemu je odabran prozor s parametrima najsličnijima onima u Tablicama 8 i 9. Iz baze je odabran prozor naziva *INS3_KR_1* za prozore koji su orijentirani prema jugu, s koeficijentom prolaza topline jednakom U=0,68 W/m^{2}K i faktorom propuštanja g=0,407. Za prozore orijentirane prema ostalim stranama svijeta odabran je *INS2_KR_3* čiji je koeficijent prolaza topline jednak U=1,1 W/m^{2}K, a faktor propuštanja g=0,609.



Slika 17 Definiranje svojstava prozora

Nakon određivanja geometrije i svojstava ploha zone, definirani su pogonski režimi, također za svaku zonu. Moguće je definirati svojstva infiltracije, sustava grijanja, hlađenja, ventilacije, toplinske dobitke te vlažnost zraka, što je prikazano na Slici 18.



Slika 18 Definiranje pogonskih režima

Za definiciju pogonskih režima potrebno je prethodno definirati raspored korištenja zgrade, budući da su sustavi grijanja i hlađenja isključeni u periodu kada se zgrada ne koristi. Raspored korištenja definira se u *Schedule Type Manager*-u, pri čemu su definirani dnevni i tjedni raspored korištenja zgrade.

Postavke sustava grijanja definirane su pomoću *Heating Type Manager*-a, gdje je postavna temperatura toplinskih zona funkcija rasporeda korištenja zgrade. U periodu kada se zgrada koristi definirana je postavna temperatura od 20°C, a kada se zgrada ne koristi, grijanje je u potpunosti isključeno.

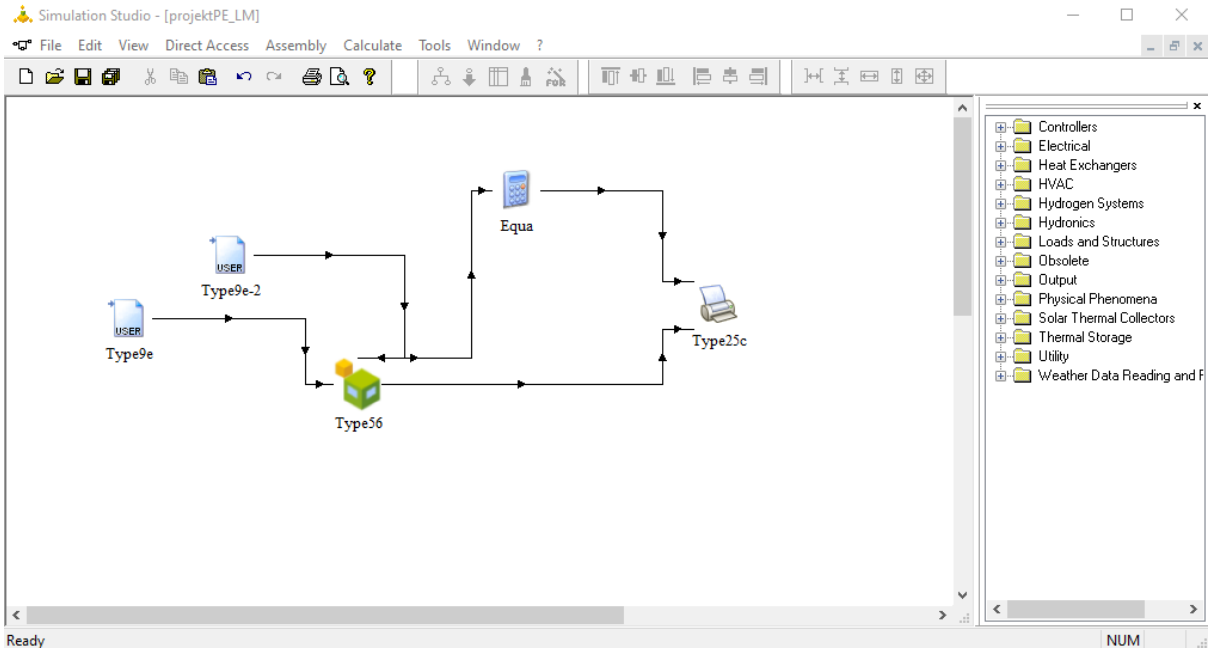
Isto se odnosi i na režim hlađenja koji se definira u *Cooling Type Manager*-u, a postavna temperatura za vrijeme hlađenja zadana je kao 22°C, dok je hlađenje isključeno kada se zgrada ne koristi. Pretpostavljeno je da se grijanje i hlađenje uključuju dva sata prije početka korištenja zgrade, kako je definirano normom HRN EN ISO 13790 [1].

Pretpostavljen je i sustav mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline učinkovitosti 80%. Mehanička ventilacija definirana je u *Ventilation Type Manager*-u. Za svaku zonu određen je broj izmjena zraka prema ASHRAE standardu [3], što je prikazano u Tablici 11. Utjecaj rekuperacije izračunat je na pojednostavljen način, tako da je temperatura dobavnog zraka jednaka temperaturi okoliša u pojedinom satu uvećanoj za 80% razlike temperature između odsisnog zraka i okolišnog zraka. Temperatura dobavnog zraka nakon rekuperacije topline je prema ovom pojednostavljenom modelu izračunata u MATLAB-u za svih 8760 sati te u TRNBuild unesena kao ulazni podatak. Mehanička ventilacija uključena je za vrijeme rada zgrade prema definiranom rasporedu.

Infiltracija se definira u *Infiltration Type Manager*-u te je unesena kao konstantna vrijednost od 0,1 izmjena zraka po satu u periodima kada mehanička ventilacija ne radi, dok je za vrijeme rada mehaničke ventilacije infiltracija jednaka nuli.

Unutarnji dobici definiraju se u *Gain Type Manager*-u te su također funkcija rasporeda korištenja zgrade. Pretpostavljeno je da u periodu kada se zgrada ne koristi nema toplinskih dobitaka. Također su toplinski dobici jednaki nuli za prostorije u kojima ljudi ne borave konstantno (WC, hodnik, stubište itd.)

Ovime su definirani svi parametri potrebni za pokretanje simulacije te dobivanje rezultata. Nakon toga se u glavnom korisničkom sučelju, Simulation Studio, komponente povezuju u model sustava te se definiraju parametri simulacije, prvenstveno, vrijeme početka, vrijeme završetka i vremenski korak simulacije koji je zadan kao 1 h. Model u Simulation Studio-u prikazan je na Slici 19.



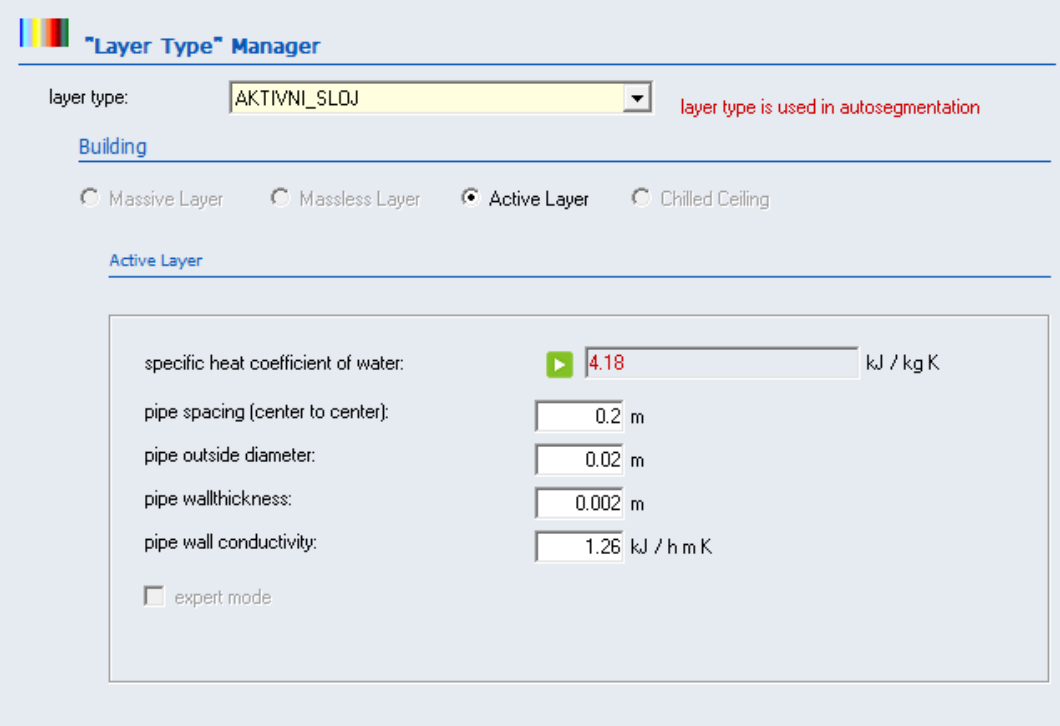
Slika 19 Povezivanje komponenti u Simulation Studiu

Komponenta *Type9e* služi za čitanje tekstualnih datoteka, a u ovom slučaju je služila za učitavanje datoteke koje sadrži meteorološke podatake za Zagreb, za svih 8760 sati u godini. Podaci koje datoteka sadrži su temperatura zraka, vlažnost, temperatura neba, temperatura tla, itd. Komponenta se spaja na *Type56* te predstavlja ulazni podatak. Pomoću *Type9e-2* učitana je temperatura dobavnog zraka mehaničke ventilacije, koja je u TRNBuild-u također definirana kao input. Komponente se u Simulation Studio-u spajaju pomoću opcije *Link*. Izlazne varijable (temperatura u svakoj zoni, potrebna energija za grijanje/hlađenje) ispisuju se u tekstualnu datoteku pomoću komponente *Type25c*. Moguće je dobiti i grafički prikaz rezultata, a to bi se ostvarilo spajanjem na komponentu *Type 65c*. Komponenta *Equa* služi za rješavanje jednadžbi, a u ovom slučaju je dodana kako bi se potrebna energija iz kJ/h pretvorila u kW. Simulacija se pokreće opcijom *Calculate* i *Run Simulation.*

5. MODELIRANJE SUSTAVA PREDAJE TOPLINSKE I RASHLADNE ENERGIJE

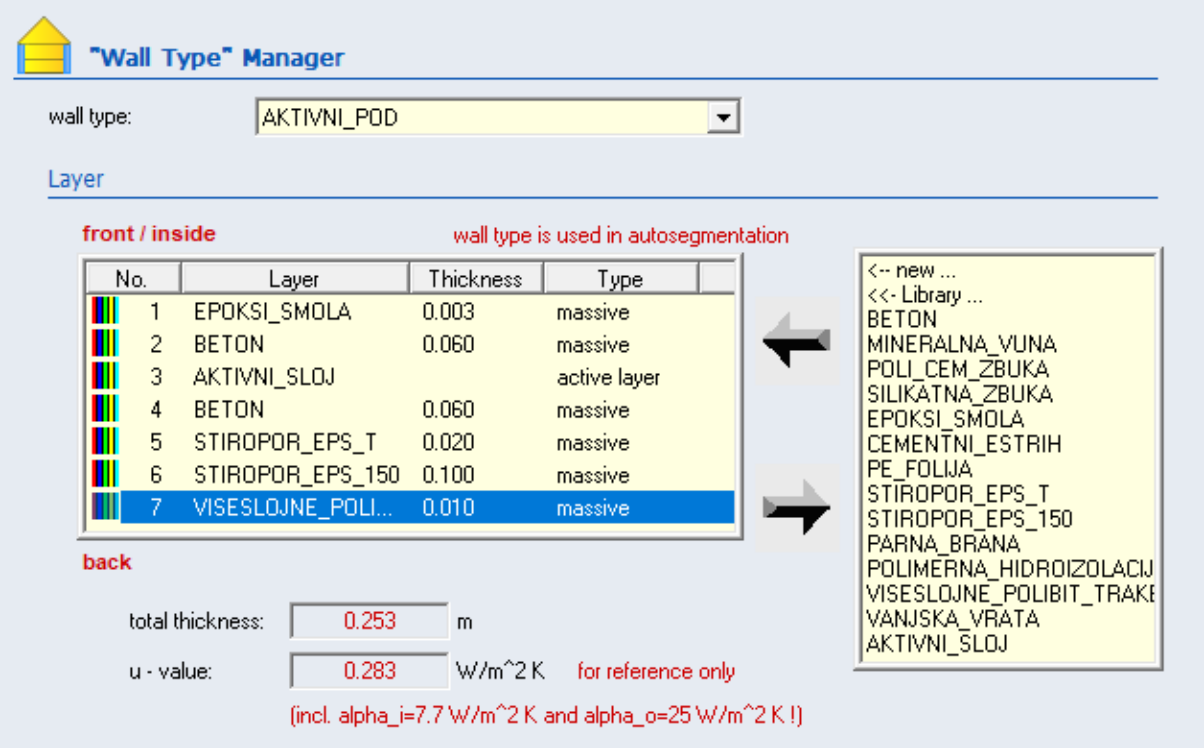
U radu je modeliran sustav predaje kojim se toplinska i rashladna energija za održavanje postavne temperature u prostorijama predaju putem aktivne betonske jezgre. Aktivna betonska jezgra oblik je podnog/stropnog grijanja i hlađenja gdje se u betonsku međuetažnu konstrukciju postavljaju mreže cijevi slične mreži podnog grijanja/hlađenja. Ovakav način predaje toplinske i rashladne energije omogućuje ravnomjernu raspodjelu temperature unutar prostorije te visoku razinu toplinske ugodnosti. Također, zbog velike izmjenjivačke površine, moguće je imati znatno niže temperature polaza vode u slučaju grijanja (niskotemperaturno grijanje), odnosno više temperature u slučaju hlađenja (visokotemperaturno hlađenje), što rezultira nižom potrošnjom električne energije dizalice topline. S druge strane, sustav karakterizira velika tromost i spori odziv zbog velike količine vode koja struji cijevima, stoga je potrebno posebnu pozornost dati sustavu regulacije (nije predmet analize u ovom radu).

Primjer modeliranja aktivnog sloja u TRNBuild-u prikazan je na primjeru Zone Z8. Aktivni sloj definira se u *Layer Type Manager*-u, kako je prikazano na Slici 20, gdje je kao parametre potrebno unijeti specifični toplinski kapacitet vode, promjer cijevi, debljinu cijevi, udaljenost između cijevi te toplinsku provodnost materijala cijevi.

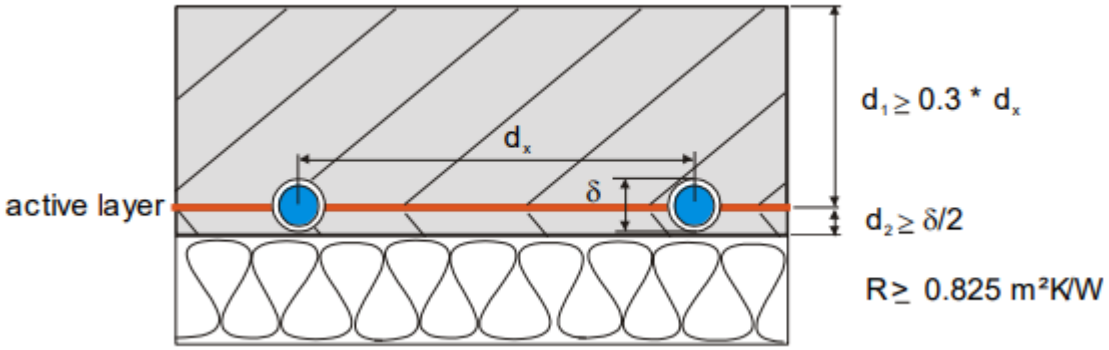


Slika 20 Definiranje aktivnog sloja u TRNBuildu

Zatim se u *Wall Type Manager*-u uz aktivni sloj definiraju i ostali slojevi aktivne plohe, kao što je prikazano na Slici 21. Aktivni sloj postavlja se između dva sloja betona, čija debljina je ograničena zahtjevima TRNBuild-a (Slika 22).

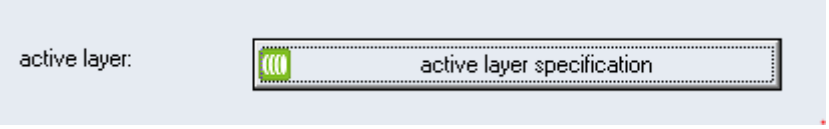


Slika 21 Slaganje slojeva aktivnog poda u Wall Type Manager-u



Slika 22 Zahtjevi na debljinu betona iznad postavljenih cijevi aktivnog sloja [5]

Sljedeći korak je povezivanje modela aktivnog poda s pojedinom zonom. Otvaranjem prozora za definiranje geometrije zone, dodaje se novi zid, koji je u ovom slučaju aktivna ploha za koju se definira površina. U modelu analizirane zgrade su podovi definirani kao aktivne plohe. Za aktivne plohe u TRNBuild-u se pojavljuje dodatna opcija za definiranje parametara aktivnog sloja, prikazana na Slici 23.

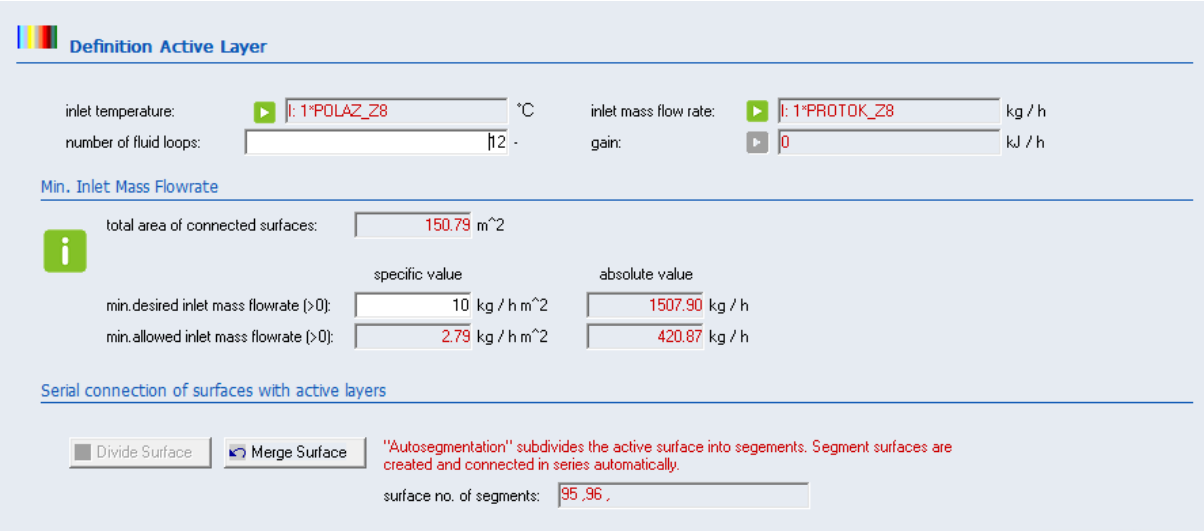


Slika 23 Definiranje parametara aktivnog sloja

Otvara se izbornik u kojem je potrebno definirati parametre prikazane na Slici 24: broj petlji, temperaturu polaza fluida, maseni protok fluida te toplinske dobitke sloja ukoliko postoje. TRNBuild na temelju površine zone određuje minimalni dopušteni te preporučeni maseni protok vode. Broj petlji u pojedinoj zoni preuzet je iz glavnog strojarskog projekta.

Maseni protok vode u petljama definiran je kao ulazni podatak. S obzirom da modeliranje sustava regulacije nije bilo u obimu ovog rada, pretpostavljen je pojednostavljeni način rada aktivne jezgre. Specifično, ukoliko je u određenom satu postojala potreba za grijanjem ili hlađenjem, protok bi bio jednak projektnom za pojedinu zonu, a ukoliko nije bilo potrebe za grijanjem i hlađenjem, protok bi bio jednak nuli. Ovakav način modeliranja zapravo znatno odstupa od optimalnog grijanja/hlađenja korištenjem betonske jezgre budući da se radi o iznimno internom sustavu te bi sustav obično započeo s radom i nekoliko sati prije pojave potrebe za grijanjem/hlađenjem. Odabrani maseni protoci za analizirane zone prikazani su u Tablici 12. Analizirane su sve zone u prizemlju i na prvom katu zgrade, osim hodnika. Na drugom katu zgrade, gdje se nalazi hotelski prostor, u stvarnosti nije predviđeno grijanje/hlađenje putem betonske jezgre te za te zone ne postoje podaci o brojevima petlji iz glavnog strojarskog projekta. Unatoč tome, napravljena je simulacija za 3 zone na trećem katu: Z15 koja predstavlja karakterističnu sobu na sjevernoj strani trećeg kata, Z18 koja predstavlja karakterističnu sobu na južnoj strani trećeg kata te Z22 koja predstavlja prostor kuhinje i restorana. Odabrane karakteristične sobe imaju najveće potrebe za grijanjem/hlađenjem u odnosu na ostale te se zbog sličnosti površina svih soba pretpostavlja da bi se i u ostalim sobama s navedenim podacima ostvarila toplinska ugodnost. Temperatura polaza vode isto je zadana kao ulazni podatak, ovisno o tome da li se u pojedinom satu grije ili hladi. Temperature polaza vode koje su unesene kao početni ulazni podatak u simulaciju su 34°C za grijanje te

17°C za hlađenje. Ove temperature su odabrane prema primjeru nove zgrade *BMW Welt*-a u Munchenu [6], gdje se koristi panelno grijanje/hlađenje s navedenim temperaturama polaza.



Slika 24 Definiranje protoka i temperature polaza vode u aktivnom sloju

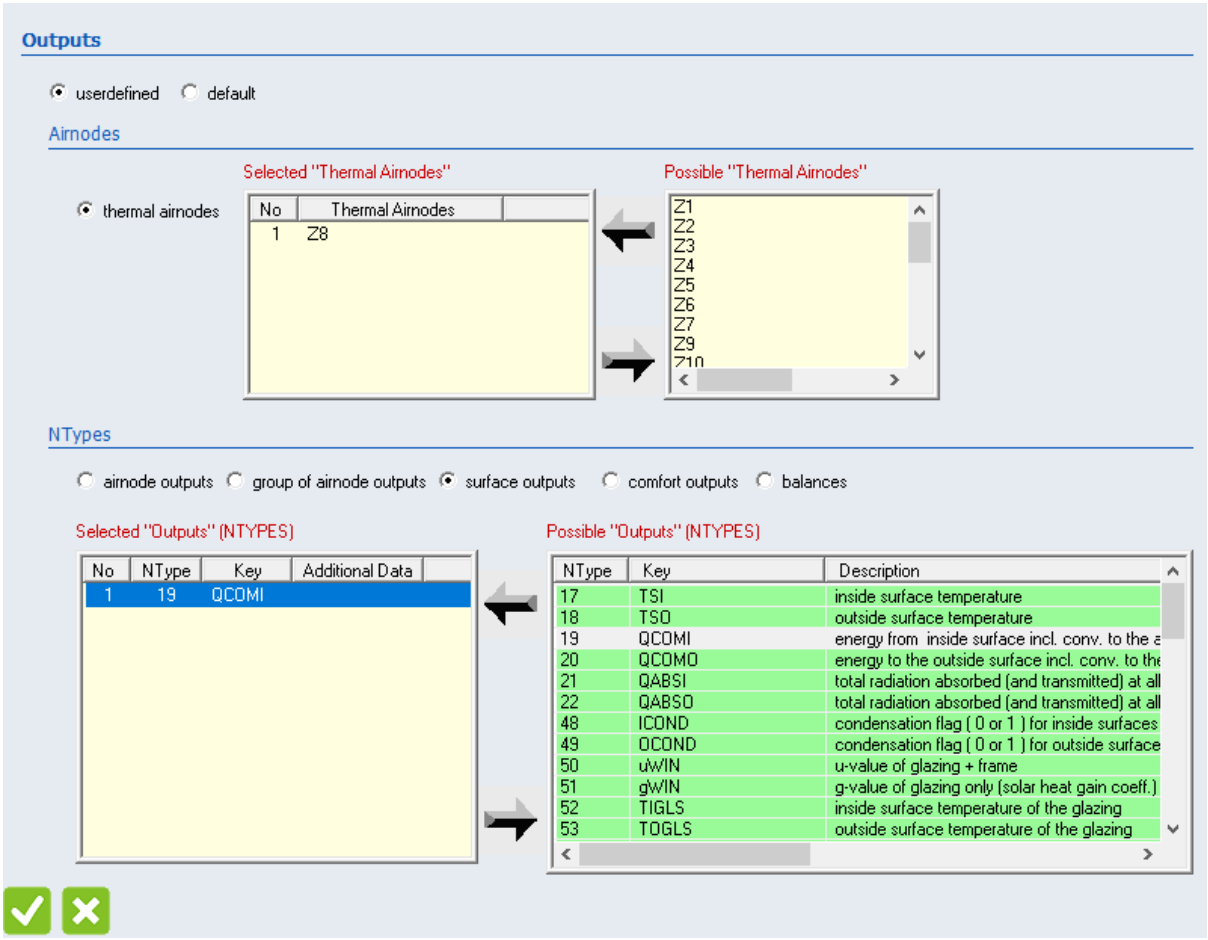
Tablica 12 Protoci vode kroz aktivnu betonsku jezgru za pojedine zone

ZONA	PROTOK [kg/h]
Z2	240
Z3	420
Z4	1200
Z5	1100
Z8	1500
Z9	1500
Z15	400
Z18	190
Z22	920

Također, ukoliko se radi o većoj površini poda, poželjno je tu površinu podijeliti na segmente. TRNBuild to automatski radi pritiskom na gumb *Divide Surface* gdje od jedne površine stvori dvije ili više povezane u seriju. Ovim načinom olakšava se rješavanje jednadžbi.

U glavnom izborniku TRNBuilda pod opcijom *Outputs* moguće je definirati nove izlazne parametre vezane za aktivnu površinu. Prozor za definiranje novih izlaznih podataka prikazan je na Slici 25. Postoji niz izlaznih podataka koji se mogu odabrati, a neki od njih su: toplinski tok predan zoni putem aktivne površine, toplinski tok predan vanjskom okolišu ili prostoriji ispod aktivnog sloja, temperature aktivnog sloja, izlazna temperatura fluida u

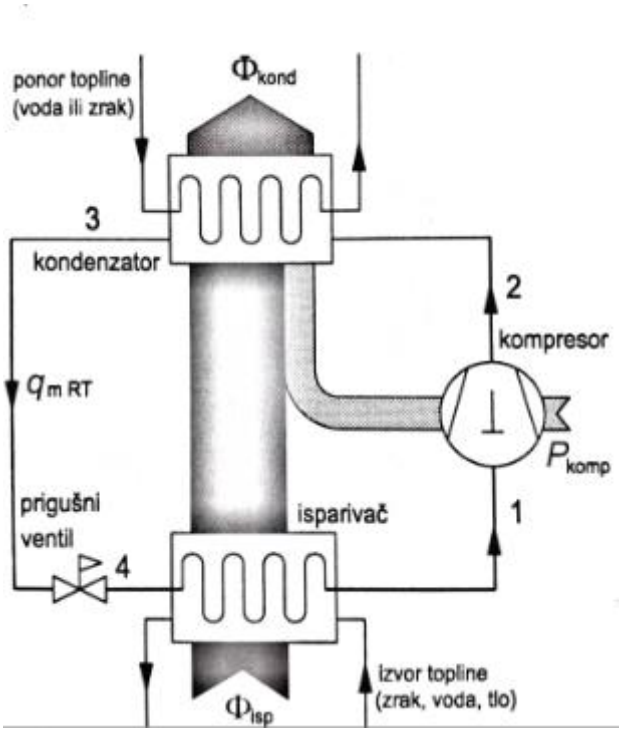
aktivnom sloju itd. Za potrebe ove analize je promatrana T_{air}, odnosno temperatura prostorije, koja nije dio izlaznih podataka vezanih uz aktivnu plohu. Pomoću tog podatka moguće je provjeriti zadovoljavaju li odabrane temperature polaza vode u aktivnoj betonskoj jezgri granice temperaturne ugodnosti u prostorijama, koje se kreću od 20°C do 25°C. Izlazni podatak vezan uz aktivnu plohu koji je dodatno analiziran je temperatura poda. Prema normi HRN EN 1264 [7] maksimalno dozvoljena temperatura poda u slučaju grijanja iznosi 27°C, a minimalno dozvoljena temperatura poda u slučaju hlađenja iznosi 19°C.



Slika 25 Odabir izlaznih podataka vezanih uz aktivni sloj

6. MODELIRANJE SUSTAVA PROIZVODNJE TOPLINSKE I RASHLADNE ENERGIJE

Na zgradi će se kao sustav proizvodnje toplinske, odnosno rashladne energije, koristiti dizalica topline zrak – voda. Pod nazivom dizalica topline podrazumijeva se, općenito, uređaj koji prenosi toplinu sa spremnika niže temperature na spremnik više temperature, uz dovedeni vanjski rad s ciljem korisne primjene topline. Proces koji se odvija u dizalici topline istovjetan je ljevokretnom rashladnom procesu, a prikazan je na Slici 26. Postoje kompresijske dizalice topline koje koriste mehanički rad za pogon uređaja te apsorpcijske dizalice topline koje koriste toplinsku energiju za pogon uređaja.



Slika 26 Proces u dizalici topline [8]

Kod dizalice topline zrak – voda, u slučaju grijanja se toplinska energija na isparivaču uzima iz vanjskog zraka, pomoću kompresora diže na viši tlak i višu temperaturnu razinu te se zatim na kondenzatoru predaje mediju (vodi), koji dalje tu toplinsku energiju iskorištava za zagrijavanje prostora. Za proces se troši mehanički rad za pogon kompresora (najveći udio) te ventilatore i pumpe izmjenjivača i kondenzatora. Kod hlađenja je proces obrnut – toplinska energija se odvodi od medija (vode) i predaje vanjskom zraku uz utrošak mehaničkog rada.

Prekretanjem procesa, odnosno zamjenom uloga isparivača i kondenzatora, jedan uređaj može se koristiti i za grijanje i za hlađenje. Prednost dizalica topline je to što mogu predati i nekoliko puta više toplinske odnosno rashladne energije od električne energije koju je za tu predaju potrebno utrošiti.

Količina toplinske energije u odnosu na potrošenu električnu energiju definirana je pomoću faktora grijanja, poznatog i kao COP (eng. *coefficient of performance*), koji je jednak:

$$COP = \frac{Q_{\text{kond}}}{W_{\text{komp}}} \quad (1)$$

gdje su:

Q_{kond} toplina predana mediju (vodi) na kondenzatoru [kWh],

W_{komp} potrošnja električne energije dizalice topline [kWh].

Količina rashladne energije u odnosu na utrošen rad kompresora definirana je pomoću faktora hlađenja, poznatog i kao EER:

$$EER = \frac{Q_{isp}}{W_{komp}} \quad (2)$$

gdje je:

Q_{isp} toplina preuzeta od medija [kWh].

COP i EER za dizalicu topline zrak – voda ovise o sljedećim parametrima:

- temperaturi okoliša
- temperaturi polaza vode
- djelomičnom opterećenju dizalice topline (eng. *part load ratio – PLR*)

Poznavanjem ovih podataka za svaki sat u godini moguće je izračunati promjenjivi COP ili EER dizalice topline. U ovom radu korišteni su podaci proizvođača Daikin o vrijednostima COP-a i EER-a u određenim radnim točkama. Proizvođač je deklarirao vrijednosti COP-a za temperature polaza vode od 35°C, 45°C i 50°C, za temperature okoliša od 10°C, 5°C, 0°C i -10°C te za stupanj djelomičnog opterećenja od 100%, 75%, 50% i 30%. Vrijednosti EER-a dane su za temperature polaza vode od 6°C, 8°C, 10°C i 14°C, za temperature okoliša od 40°C, 30°C, 20°C i 15°C te za stupanj djelomičnog opterećenja od 100%, 75%, 50% i 30%.

Na temelju podataka od proizvođača i MATLAB funkcije *polyfitn* aproksimacijom su dobiven polinomi koji opisuju ovisnost COP-a i EER-a o spomenutim parametrima. Jednadžbe su prikazane u nastavku.

$$COP = 0.00090765 * X1^2 - 0.0089986 * X1 * X2 - 0.0014648 * X1 * X3 + 0.13242 * X1 + 0.38885 * X2^2 - 0.0038269 * X2 * X3 - 0.38694 * X2 + 0.00041192 * X3^2 - 0.090076 * X3 + 6.1947 \quad (3)$$

$$EER = 0.00034977 * X1^3 + 0.003673 * X1^2 * X2 - 0.00015 * X1^2 * X3 - 0.031882 * X1^2 - 0.01097 * X1 * X2^2 - 0.0030545 * X1 * X2 * X3 - 0.19377 * X1 * X2 + 0.00019992 * X1 * X3^2 + 0.0063154 * X1 * X3 + 0.85107 * X1 - 2.1588 * X2^3 - 0.0052301 * X2^2 * X3 + 4.1564 * X2^2 - 0.00010639 * X2 * X3^2 + 0.083187 * X2 * X3 - 0.08307 * X2 - 0.00049707 * X3^3 + 0.0052184 * X3^2 - 0.021813 * X3 - 2.5042 \quad (4)$$

gdje su:

X1 temperatura okoliša [°C],

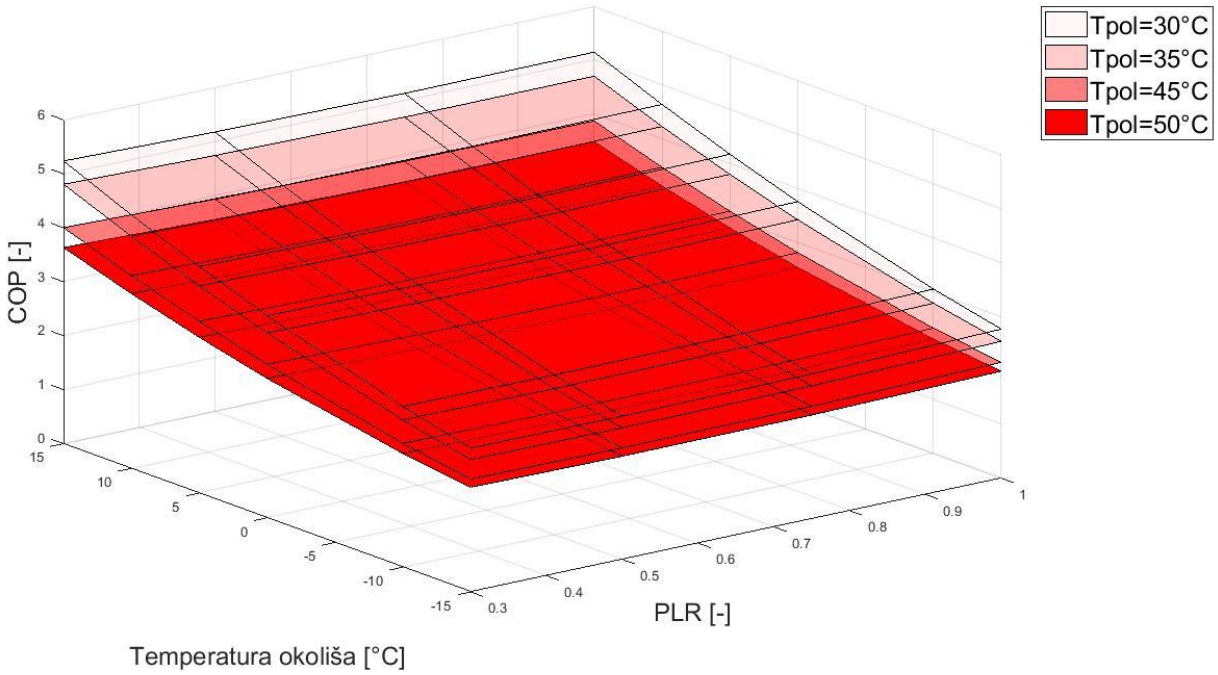
X2 djelomično opterećenje dizalice topline [%],

X3 temperatura polaza vode [°C].

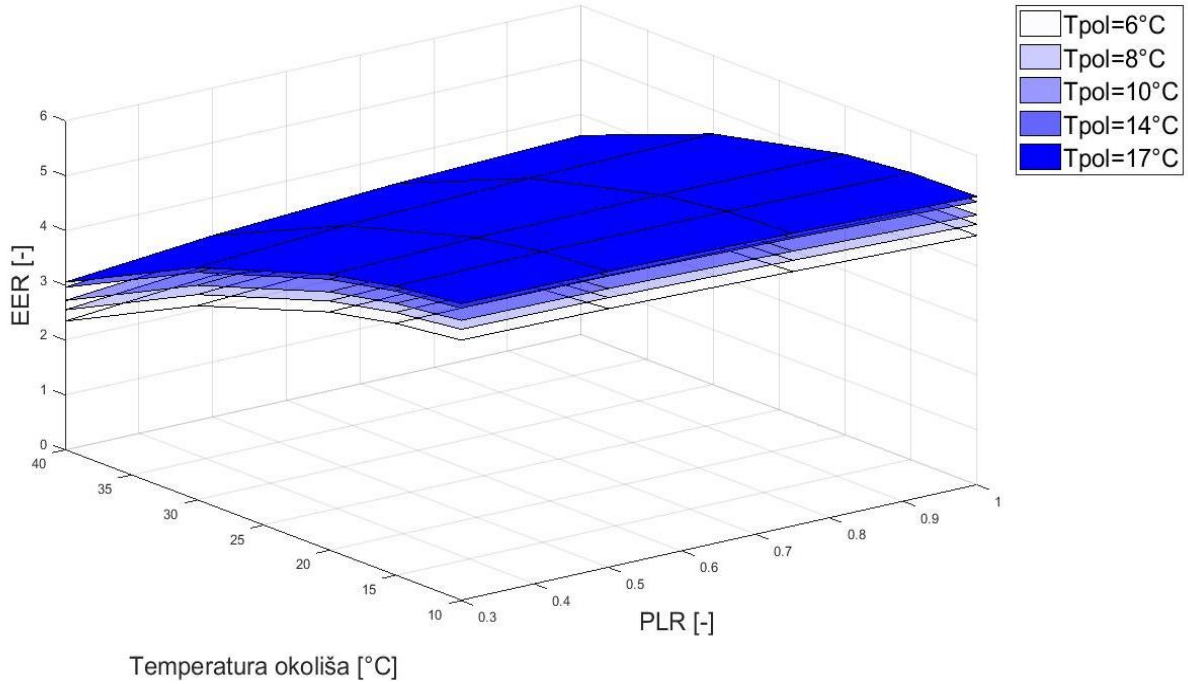
Pomoću ovih jednadžbi moguć je izračun COP-a i EER-a za bilo koju temperaturu okoliša, temperaturu polaza vode i vrijednost djelomičnog opterećenja dizalice topline. Na Slici 27 i Slici 28 su grafički prikazane ovisnosti COP i EER o spomenutim parametrima.

Sa Slike 26 je očito da smanjenjem temperature polaza vode vrijednost COP-a raste, odnosno dizalica topline je učinkovitija te troši manje električne energije. Isto vrijedi i pri porastu temperature okoliša.

Kod EER-a je obrnuto, odnosno što je viša temperature polaza vode, to je EER veći i dizalica topline je učinkovitija. Isto je i sa smanjenjem temperature okoliša.



Slika 27 Ovisnost COP-a o režimu rada

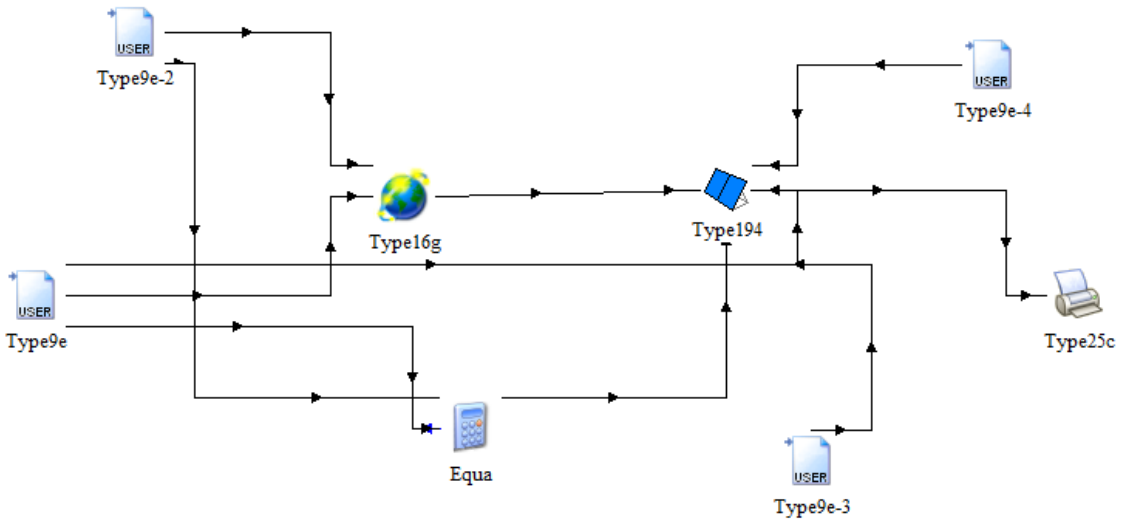


Slika 28 Ovisnost EER-a o pojedinim parametrima

7. MODELIRANJE SUSTAVA PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Na zgradi će se kao sustav proizvodnje električne energije koristiti fotonaponski paneli. Fotonaponske ćelije koriste se za izravnu pretvorbu energije Sunčevog zračenja u električnu energiju, pri čemu se pretvorba temelji na fotoelektričnom efektu. Svrha fotonaponskih panela u ovom radu je pokrivanje potreba za električnom energijom dizalice topline. Cilj modeliranja je pokušati prikupiti što više energije optimiranjem nagiba i površine panela.

Modeliranje proizvodnje fotonaponskih panela odvijalo se u glavnom korisničkom sučelju TRNSYS-a, Simulation Studio-u, a model je prikazan na Slici 29. Najvažnija korištena komponenta je *Type194*, koja na temelju podataka o ozračenosti Sunca i parametrima korištenih fotonaponskih panela predviđa proizvodnju električne energije. Pregled korištenih komponenti u modelu prikazan je u Tablici 13.



Slika 29 Model proizvodnje el. energije fotonaponskim panelima u Simulation Studio-u

Tablica 13 Korištene komponente prilikom modeliranja fotonaponskih panela

Korištena komponenta	Opis
Type9e	Čitanje tekstualnih datoteka, u ovom slučaju vremenskih podataka na lokaciji Zagreb za 8760 sati.
Type9e-2	Učitavanje nagiba panela kroz 8760 sati.
Type9e-3	Učitavanje brzina vjetra na lokaciji Zagreb za svih 8760 sati (preuzeto sa stranica DHMZ-a).
Equa	Rješavanje jednadžbi.
Type16g	Računa ozračenje na plohu pod nagibom (ukoliko je poznato ukupno i direktno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu).
Type194	Računa električnu energiju koju proizvodi fotonaponski modul.
Type25c	Komponenta koja ispisuje podatke u tekstualnu datoteku.

Kako je već rečeno, komponenta *Type16g* se koristi izračun ozračenja na nagnutu plohu, ukoliko su poznati podaci o ukupnom i direktnom Sunčevom zračenju na horizontalnu plohu. Kako je jedan od ciljeva modeliranja fotonaponskih panela i odabir optimalnog nagiba panela, ulazni podatak u komponentu *Type194* je, između ostalog, i podatak o ozračenosti ploha pod različitim nagibom, što se može dobiti kao izlazni podatak iz komponente *Type16g*.

U komponentu *Type16g* potrebno je kao parameter unijeti geografsku širinu promatrane lokacije, koja za Zagreba iznosi 45,81°. Također je potrebno odrediti jesu li plohe fiksne ili postoji sustav promjene nagiba ploha ili praćenja azimuta Sunca.

U Tablici 14 prikazani su ulazni podaci u komponentu *Type16g* koje je potrebno definirati za sve sate u godini, kao i izlazni podaci koje komponenta daje. Ulazni podaci pod rednim brojem 1. – 3. i 5. dobiveni su iz dokumenta o vremenskim podacima na lokaciji Zagreb koji je učitan komponentom *Type9e*. Nagib panela unesen je kao ulazni podatak komponentom *Type9e-2*, a promatrani su razni slučajevi nagiba, od 0° do 60°, s korakom od 5°. U ovom modelu paneli su fiksnog nagiba, pa je nagib panela konstantan kroz godinu.

Tablica 14 Ulazni i izlazni podaci komponente Type16g

R.br.	Ulazni podatak u *Type16g*	R.br.	Izlazni podatak iz *Type16g*
1.	ukupno ozračenje na horizontalnu plohu [kJ/m^{2}h]	1.	ekstraterestričko ozračenje na horizontalnu plohu [kJ/m^{2}h]
		2.	solarni zenitni kut [°]
2.	direktno ozračenje na horizontalnu plohu [kJ/m^{2}h]	3.	solarni azimutni kut [°]
		4.	ukupno ozračenje na horizontalnu plohu [kJ/m^{2}h]
3.	faktor refleksije tla [-]	5.	direktno ozračenje na horizontalnu plohu [kJ/m^{2}h]
		6.	difuzno ozračenje na horizontalnu plohu [kJ/m^{2}h]
4.	nagib panela [°]	7.	ukupno ozračenje na nagnutu plohu [kJ/m^{2}h]
		8.	direktno ozračenje na nagutu plohu [kJ/m^{2}h]
5.	azimut panela [°]	9.	difuzno ozračenje na nagnutu plohu [kJ/m^{2}h]
		10.	upadni kut zračenja na nagnutu plohu [°]
		11.	nagib panela [°]

Komponenta *Type194* zahtijeva unos parametara karakterističnih za odabrani fotonaponski panel. U sklopu ovog rada korišteni su preporučeni parametri u Simulation Studio-u (Tablica 15), no oni se mogu mijenjati u ovisnosti o karakteristikama fotonaponskog modula koji se koristi. Podaci iz Tablice 15 su nešto lošiji u odnosu na karakteristike današnjih fotonaponskih panela, no korišteni su radi jednostavnosti i dostupnosti.

Tablica 15 Parametri koje je potrebno definirati u komponenti Type194

R.br.	Parametar	Vrijednost
1.	struja kratkog spoja modula pri referentnim uvjetima [A]	6,5
2.	napon otvorenog kruga modula pri referentnim uvjetima [V]	21,6
3.	referentna temperatura [K]	298
4.	referentno Sunčevo zračenje [W/m^2]	1000
5.	napon modula pri nazivnoj snazi i referentnim uvjetima [V]	17
6.	struja modula pri nazivnoj snazi i referentnim uvjetima [A]	5,9
7.	temperaturni koeficijent struje [A/K]	0,02
8.	temperaturni koeficijent napona [V/K]	-0,079
9.	broj ćelija u jednom modulu [-]	36
10.	broj modula u seriji [-]	1
11.	broj modula u paraleli [-]	1
12.	temperature modula u NOCT (eng. *nominal operating cell temperature*) točki [K]	313
13.	temperature okoliša u NOCT točki [K]	293
14.	insolacija u NOCT točki [W/m^2]	800
15.	površina modula [m^2]	1
16.	umnožak emisivnosti i apsorpcije modula pri direktnom zračenju [-]	0,95
17.	energija potrebna za oslobađanje elektrona, ovisna o materijalu poluvodiča [eV]	1,12

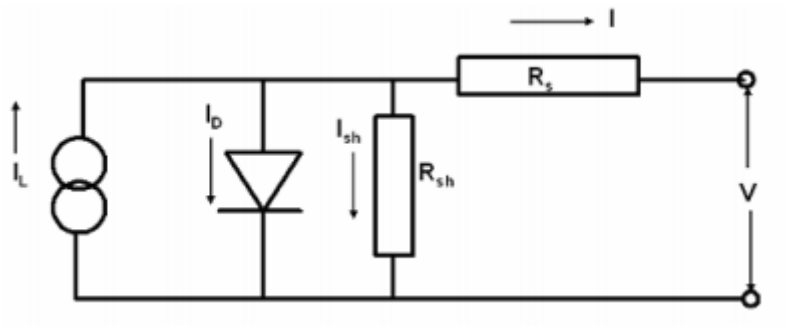
Na temelju gore navedenih parametara, moguće je izračunati 5 parametara prikazanih u Tablici 16 pomoću EES (eng. *Engineering Equation Solver*) programa, koji je implementiran unutar Simulation Studio-a.

Tablica 16 Parametri komponente Type194

R.br.	Parametar	Vrijednost
1.	modificirani faktor idealnosti [-]	0,9893
2.	fotoelektrični efekt modula pri referentnim uvjetima [A]	6,527
3.	struja pri obrnutom zasićenju diode pri referentnim uvjetima [A]	$2{,}053 \cdot 10^{-9}$
4.	otpor serije modula [Ω]	0,3065
5.	otpor bypassa [Ω]	73,34

Proizvođači fotonaponskih panela obično daju podatke o parametrima panela u samo jednoj radnoj točki i to najčešće pri referentnim uvjetima (I = 1000 W/m^2, T = 25°C). U stvarnosti fotonaponski paneli rade u nizu radnih točaka pa stoga informacije proizvođača nisu dovoljne za utvrđivanje stvarnog ponašanja panela. Struja-napon (I-V) karakteristika panela, a time i proizvedena snaga, mijenja se u ovisnosti o Sunčevoj insolaciji i temperaturi modula.

Osnovni matematički model na kojem se temelji rad komponente *Type194* prikazan je u nastavku. Izlazna snaga iz fotonaponskog modula može se modelirati na primjeru klasičnog ekvivalentnog strujnog kruga prikazanog na Slici 30.



Slika 30 Ekvivalentni strujni krug [9]

Veza između napona i struje prema primjeru sa slike je sljedeća:

$$I = I_{\mathrm{L}} - I_0 \left[e^{\frac{V+IR_{\mathrm{S}}}{a}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \tag{5}$$

Parametri koji se javljaju u jednadžbi (5) su oni opisani u Tablici 14. Za određivanje 5 nepoznatih parametara iz jednadžbe potrebno je 5 neovisnih podataka. Ti podaci su obično funkcije količine ozračenja na ćeliju i temperature ćelije. Od proizvođača su poznati *I-V* parovi u tri točke: struja kratkog spoja (kad je $V = 0$), napon praznog hoda ($I = 0$) te struja i napon pri nazivnoj snazi. Četvrti podatak je taj da je derivacija snage pri nazivnoj snazi jednaka nuli. Peti podatak je temperaturni koeficijent napona. Uvrštavanjem ovih podataka u jednadžbu, te njenim rješavanjem, dobije se 5 parametara pomoću kojih je omogućeno predviđanje proizvodnje električne energije fotonaponskih panela u bilo kojim radnim uvjetima [9].

Fotonaponski modul može raditi na 2 načina: na naponu koji u svakom trenutku proizvodi najviše snage, pomoću MPPT (eng. *maximum power point tracker*) uređaja, ili na naponu koji je jednak naponu potrošača. Preporuka je koristiti MPPT uređaj kako bi se iskoristilo što više snage, što je primijenjeno u ovom radu.

Osim prethodno navedenih parametara koji se odnose uglavnom na tip kolektora, u *Type194* potrebno je unijeti i određene dodatne ulazne podatke. Ulazni i izlazni podaci komponente *Type194* prikazani su u Tablici 17.

Tablica 17 Ulazni i izlazni podaci komponente Type194

R.br.	Ulazni podaci	R.br.	Izlazni podaci
1.	ukupno ozračenje na nagnutu plohu [kJ/m^{2}h]	1.	napon modula (direktno spojenog na potrošač, bez MPPT uređaja) [V]
2.	temperatura okoliša [°C]	2.	struja modula (direktno spojenog na potrošač, bez MPPT uređaja) [A]
3.	napon potrošača (ukoliko postoji MPPT uređaj, nije potrebno unositi ovaj podatak) [V]	3.	snaga modula (direktno spojenog na potrošač, bez MPPT uređaja) [W]
4.	nagib panela [°]	4.	snaga modula (uz MPPT uređaj) [W]
5.	direktno ozračenje na nagnutu plohu [kJ/m^{2}h]	5.	omjer snaga (snage bez MPPT uređaja i s MPPT uređajem) [-]
6.	difuzno ozračenje na nagnutu plohu, od neba [kJ/m^{2}h]	6.	napon modula (uz MPPT uređaj) [V]
7.	reflektirano ozračenje na nagutu plohu, od tla [kJ/m^{2}h]	7.	struja modula (uz MPPT uređaj) [A]
8.	upadni kut zračenja na nagnutu plohu [°]	8.	napon otvorenog kruga [V]
9.	zenitni kut [°]	9.	struja kratkog spoja [A]
10.	brzina vjetra [m/s]	10.	temperatura modula [K]
		11.	učinkovitost modula [-]

Ulazni podaci pod rednim brojem 1., 4. – 6., 8. i 9. dobiveni su kao izlazni podaci iz komponente *Type16g* te se pomoću opcije *Link* tako i spajaju. Ulazni podatak pod rednim brojem 2. dobiven je iz tekstualne datoteke o vremenskim podacima grada Zagreba, učitanog komponentom *Type9e*, a podatak pod rednim brojem 10. također je unesen kao datoteka komponentom *Type9e-3*, a odnosi se na brzine vjetra za lokaciju Zagreb, kroz svih 8760 sati u godini (preuzeto sa stranica Državnog hidrometeorološkog zavoda).

Kada se unesu svi parametri i ulazni podaci, komponentu *Type164* moguće je spojiti na *Type25c* te odabrati koje izlazne podatke je potrebno ispisati te nakon toga pokrenuti simulaciju.

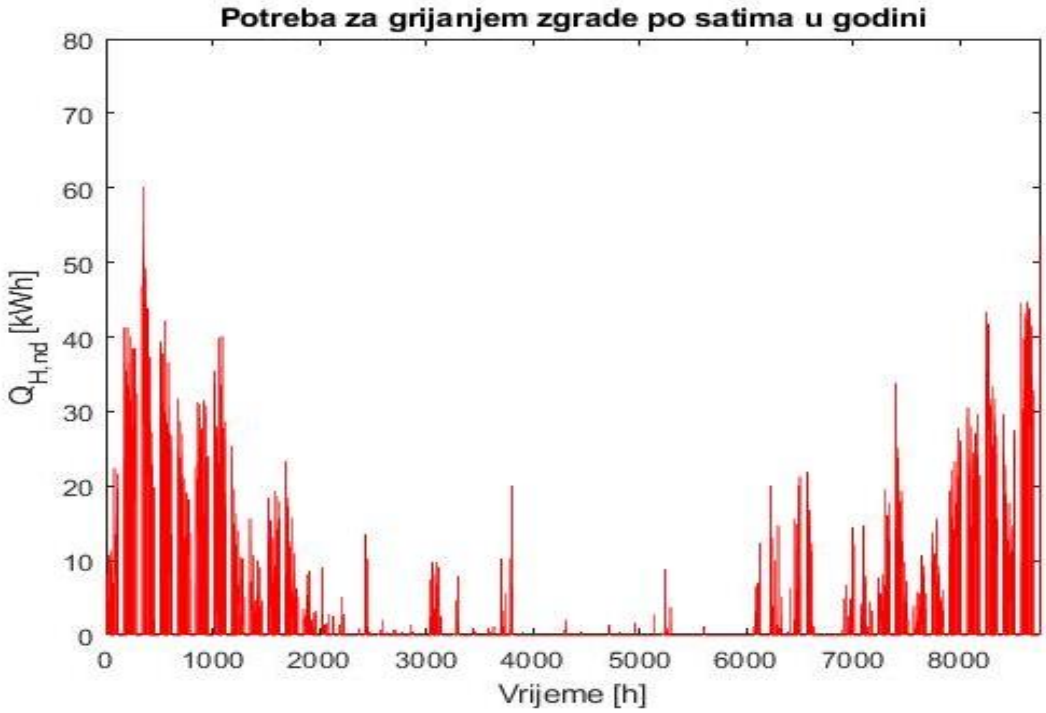
8. REZULTATI

8.1. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje

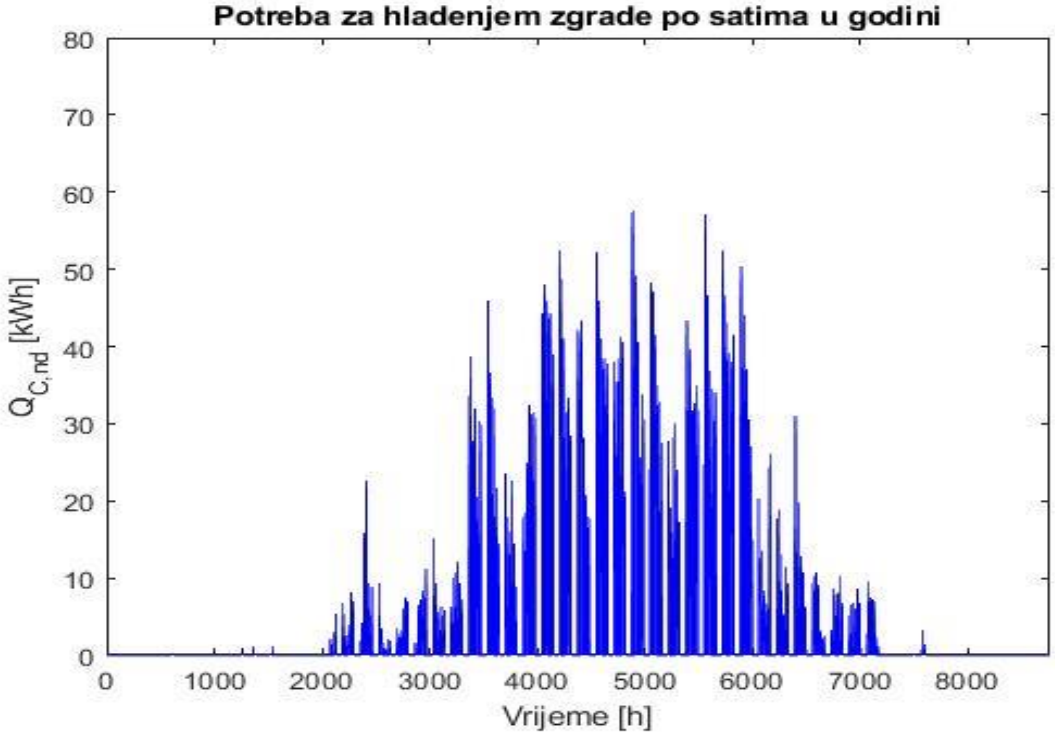
Na temelju rezultata simulacije godišnja potrebna energija za grijanje cijele zgrade, $Q_{H,nd}$, iznosi 25688 kWh/a, odnosno 16 kWh/m^{2}a. Godišnja potrebna energija za hlađenje, $Q_{C,nd}$, za cijelu zgradu iznosi 35161 kWh/a, odnosno 22 kWh/m^{2}a. U Tablici 18 prikazani su rezultati za pojedine zone, a na Slikama 31 i 32 prikazane su potrebe za grijanjem i hlađenjem za cijelu zgradu kroz sve sate u godini. Najveća satna potreba za grijanjem cijele zgrade iznosi 60 kWh, a za hlađenje 58 kWh. Navedene potrebe uključuju i potrebu za dodatnim zagrijavanjem i hlađenjem ventilacijskog zraka koji se dobavlja u prostorije nakon prolaska kroz rekuperator.

Tablica 18 Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje po zonama

	Ime zone	**Površina [m^2]**	**$Q_{H,nd}$ [kWh/a]**	**$Q_{H,nd}$ [kWh/m^{2}a]**	**$Q_{C,nd}$ [kWh/a]**	**$Q_{C,nd}$ [kWh/m^{2}a]**
PRIZEMLJE	Z1	142,13	2042	14	1618	11
	Z2	21,91	700	32	405	19
	Z3	41,02	173	4	1529	37
	Z4	82,85	2483	18	1890	13
	Z5	112,18	2799	25	2323	21
	Z6	48,87	1407	29	1451	30
1.KAT	Z7	119,73	1090	9	1894	16
	Z8	150,79	3964	26	3872	26
	Z9	167,55	2052	12	4557	27
	Z10	33,05	834	25	556	17
2.KAT	Z11	113,65	1360	12	1472	13
	Z12	17,45	380	22	556	32
	Z13	19,47	353	18	566	29
	Z14	20,58	353	17	580	28
	Z15	39,52	597	15	1060	27
	Z16	25,71	427	17	650	25
	Z17	26,77	566	21	619	23
	Z18	18,59	186	10	867	47
	Z19	18,59	130	7	906	49
	Z20	18,59	132	7	937	50
	Z21	18,59	136	7	930	50
	Z22	92,04	766	8	3300	35
3.KAT	Z23	43,55	710	16	1188	27
Stubište	Z24	33,89	2047	15	1429	10



Slika 31 Potrebna energija za grijanje zgrade po satima



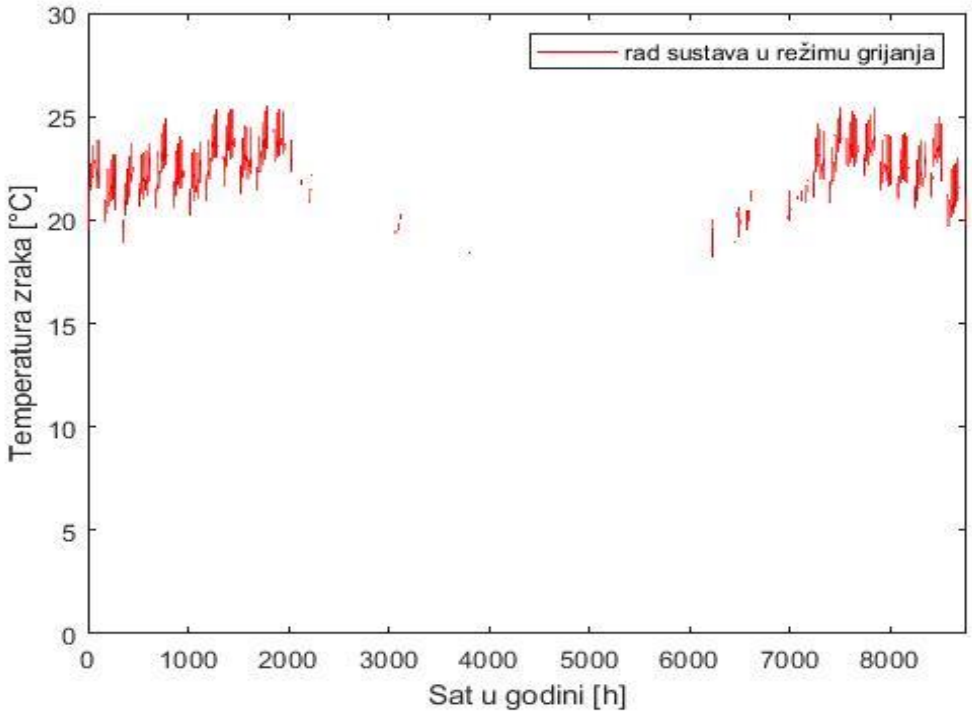
Slika 32 Potrebna energija za hlađenje zgrade po satima

8.2. Odabir temperatura polaza vode u aktivnoj betonskoj jezgri

Prilikom modeliranja aktivne betonske jezgre cilj je bio zadovoljiti potrebe u kritičnim zonama sa što nižom temperaturom polaza vode u slučaju grijanja te što višom temperaturom polaza vode u slučaju hlađenja, a kako bi se minimizirala potrošnja električne energije dizalice topline. Kritičnu potrebu za grijanjem od 8,6 kWh ima zona Z8, a ona se javlja u 346. satu u godini. Kritičnu potrebu za hlađenjem od 8,5 kWh ima zona Z9, a javlja se u 5559. satu u godini. Na primjeru ovih zona će biti prikazani rezultati simulacije.

8.2.1. Odabir temperature polaza vode za režim grijanja

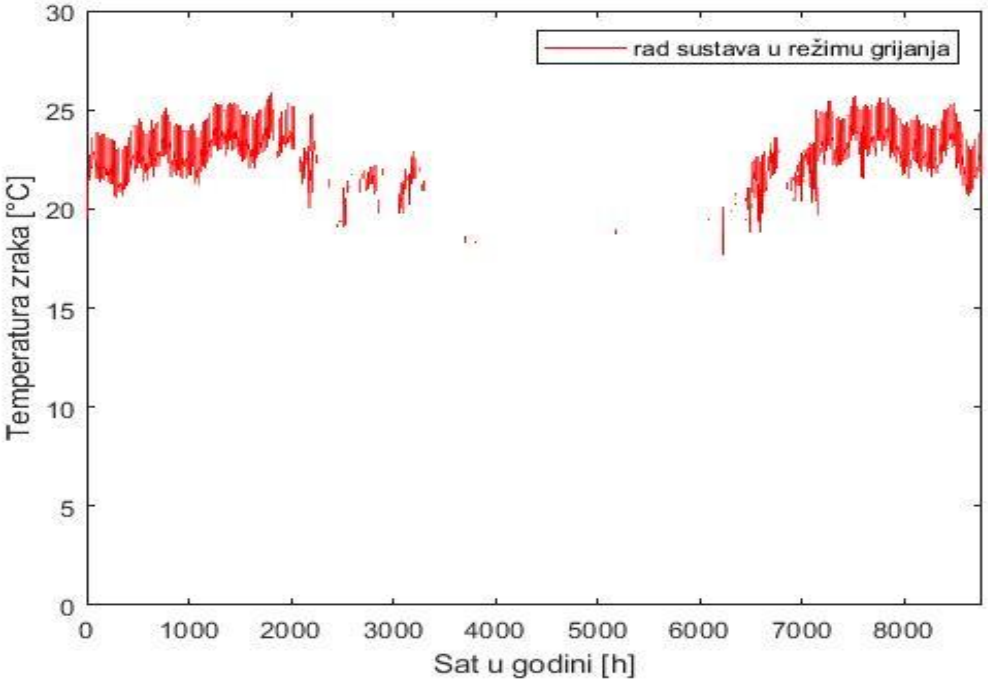
Pri odabiru temperature polaze vode u režimu grijanja analizirana je Zona 8 kao kritična zona za grjanje. Broj petlji u ovoj zoni je 12, a maseni protok vode je 1500 kg/h. U početnom koraku je za temperaturu polaza odabrana temperatura od 34^{o}C na temelju analize rada sličnih sustava u praksi [6]. Nakon provedene simulacije s odabranom temperaturom polaza, analizirane su temperature koje se javljaju u prostoriji tijekom vremena rada sustava grijanja/hlađenja, a s ciljem provjere uvjeta toplinske ugodnosti te ograničenja u vidu dozvoljene temperature poda. Temperatura zraka Zone 8 prikazana je na Slici 33.



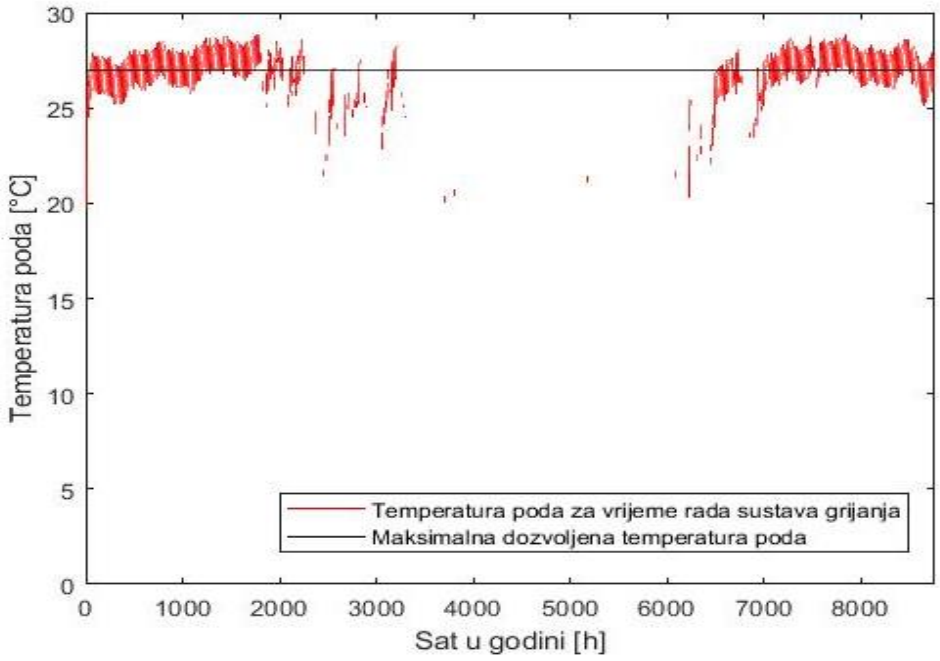
Slika 33 Temperatura zraka u kritičnoj zoni (Zona 8) pod pretpostavkom prekida grijanja vikendom s temperaturom polaza 34°C

Kako je vidljivo sa slike, u određenim trenucima rada sustava grijanja temperatura prostorije pada ispod postavne temperature koja je definirana kao 20°C. Nakon detaljnijeg pregleda utvrđeno je da se kritične potrebe ove zone javljaju nakon vikenda, odnosno neradnih dana. To je sasvim logično budući da tijekom vikenda dolazi do hlađenja zgrade zbog nekorištenja, pa početkom radnog tjedna treba pojačano grijati kako bi se postigla temperatura od 20°C. No, ovo predstavlja određeni izazov za aktivnu betonsku jezgru zbog njene tromosti i sporog odziva, a koji se rješava regulacijom sustava, odnosno uključivanjem sustava znatno prije početka korištenja zgrade. S obzirom da modeliranje sustava regulacije nije bilo u opsegu ovog rada, regulacija je pojednostavljena na način da se u idućem koraku simulacije zanemario prekid grijanja vikendom, odnosno pretpostavljeno je da sustav grijanja radi svaki dan u tjednu. Time su dobiveni rezultati prikazani na Slici 34, gdje je vidljivo da tijekom sezone grijanja više ne dolazi do pada temperature ispod 20°C te se dokazuje da je u prethodnoj simulaciji to bila posljedica tromosti sustava. Iznimku čine sati u prijelaznom razdoblju godine, gdje je moguće da se, primjerice, samo u jednom satu javi potreba za grijanjem te se u takvim situacijama radi tromosti sustava ne uspijevaju zadovoljiti postavne temperature. Analizirana je i temperatura poda koja se javlja pri temperaturi polaza od 34°C, a rezultati simulacije prikazani su na Slici

35. Iz prikaza je vidljivo da temperatura poda u većem broju sati prelazi gornju dozvoljenu vrijednost, a koja iznosi 27°C.

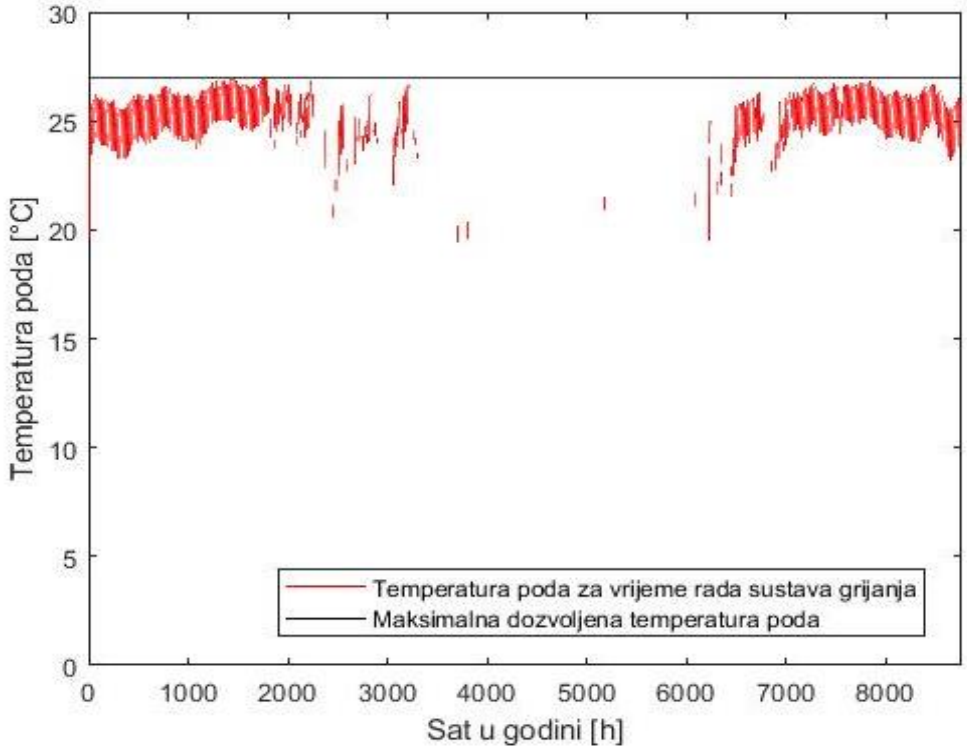


Slika 34 Temperatura zraka u kritičnoj zoni (Zona 8) bez prekida grijanja vikendom s temperaturom polaza 34°C

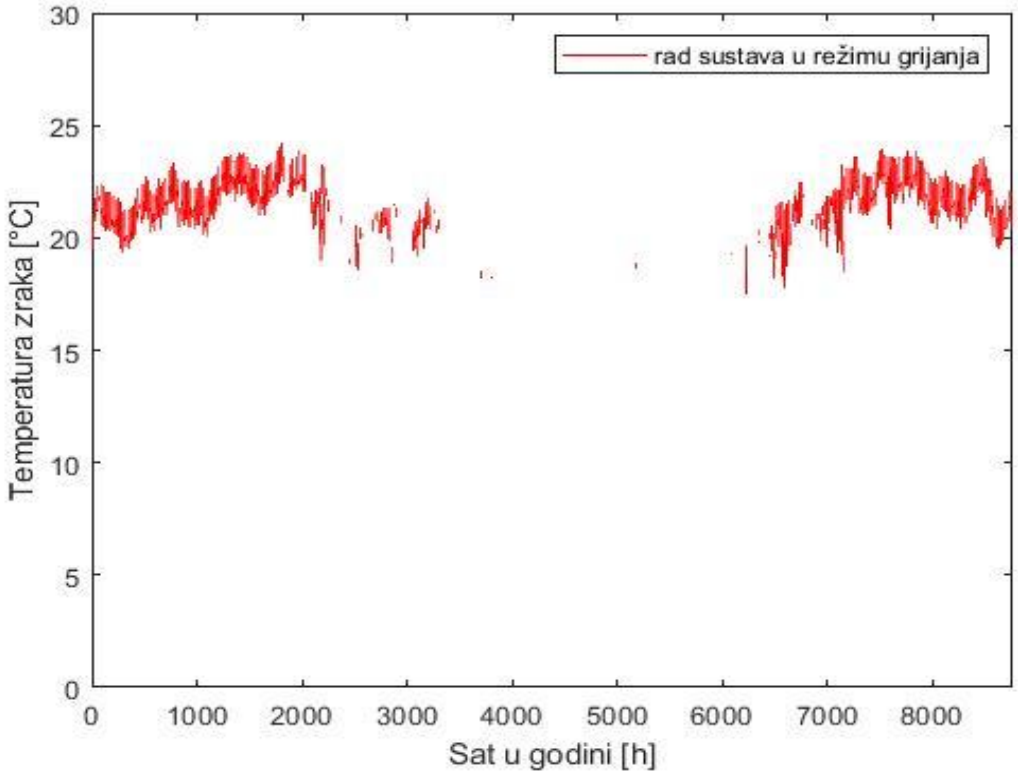


Slika 35 Temperatura poda u kritičnoj zoni (Zona 8) bez prekida grijanja vikendom s temperaturom polaza 34°C

S obzirom da izračunate temperature poda nisu u skladu s normom EN 1264 [7], u idućim koracima snižavane su temperature polaza vode kako bi se osiguralo da maksimalna temperatura poda ne prelazi 27°C. Taj uvjet ispunjava temperatura polaza vode od 30°C, a temperature poda u tom slučaju prikazane su na Slici 36. Na Slici 37 prikazana je temperatura zraka u Zoni 8 koja se javlja pri novoj temperaturi polaza vode. Osim u prijelaznom razdoblju, s temperaturom polaza od 30°C se ne zadovoljavaju potrebe u nekoliko sati ni tijekom sezone grijanja. Sveukupan broj sati u godini u kojima nije zadovoljena potreba za grijanjem iznosi 138. U tim satima bi se mogla povisiti temperatura polaza vode te bi tada temperatura poda bila nešto viša od one dopuštene. Ukoliko se to želi izbjeći, moguća je instalacija dodatnih ogrjevnih elemenata, primjerice ventilokonvektora, koji bi pokrivali vršne potrebe. Odabir načina pokrivanja vršnog opterećenja je izvan opsega ovoga rada te se zaključuje da je temperatura polaza vode od 30°C ona koja se koristi tijekom cijele godine, budući da zadovoljava 85% potreba za grijanjem. Rezultati za ostale zone u zgradi prikazani su u Prilogu I.



Slika 36 Temperatura poda u kritičnoj zoni (Zona 8) bez prekida grijanja vikendom s temperaturom polaza 30°C

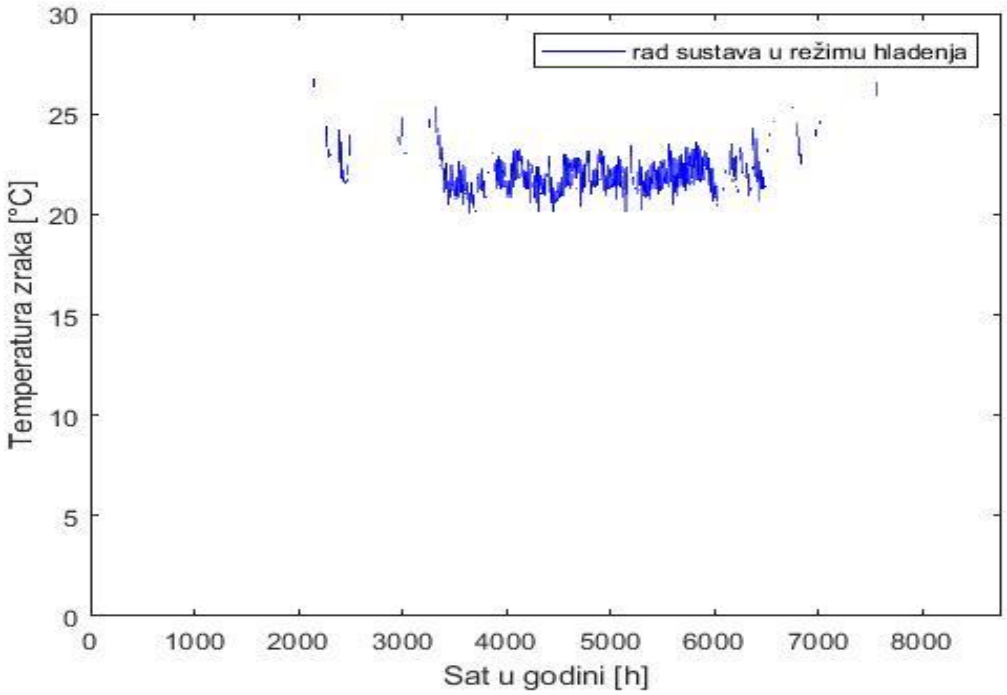


Slika 37 Temperatura zraka u kritičnoj zoni (Zona 8) bez prekida grijanja vikendom s temperaturom polaza 30°C

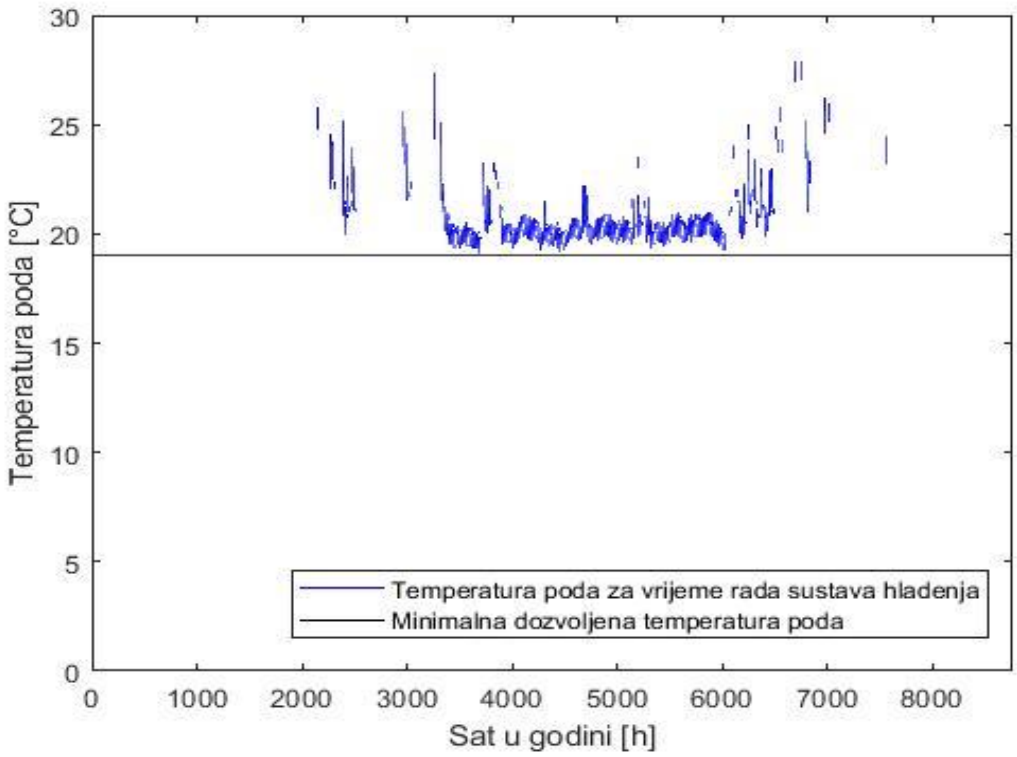
8.2.2. Odabir temperature polaza vode za režim hlađenja

Odabir temperature polaza vode za hlađenje izvršen je na primjeru Zone 9, koja je kritična za hlađenje. Kako bi se izbjegao utjecaj tromosti sustava koji je vidljiv u simulaciji Zone 8, ovdje je odmah zanemaren prekid sustava grijanja/hlađenja vikendom, a dobiveni rezultati prikazani su na Slici 38. Vidljivo je da temperatura polaza od 17°C održava temperaturu kritične zone ispod 25°C, što se smatra gornjom granicom toplinske ugodnosti te se zaključuje da je ta temperature polaza dovoljna kako bi pokrila potrebe za hlađenjem u svim zonama.

Dodatno je analizirana temperature poda koja se javlja u Zoni 9 pri temperaturi polaza vode od 17°C. Iz prikaza na Slici 39 vidljivo je da pri navedenim uvjetima temperatura ne pada ispod propisane granice temperature poda od 19°C. Rezultati za ostale zone u zgradi prikazani su u Prilogu I.



Slika 38 Temperatura zraka u kritičnoj zoni (Zona 9) bez prekida hlađenja vikendom



Slika 39 Temperatura poda u kritičnoj zoni (Zona 9) bez prekida hlađenja vikendom

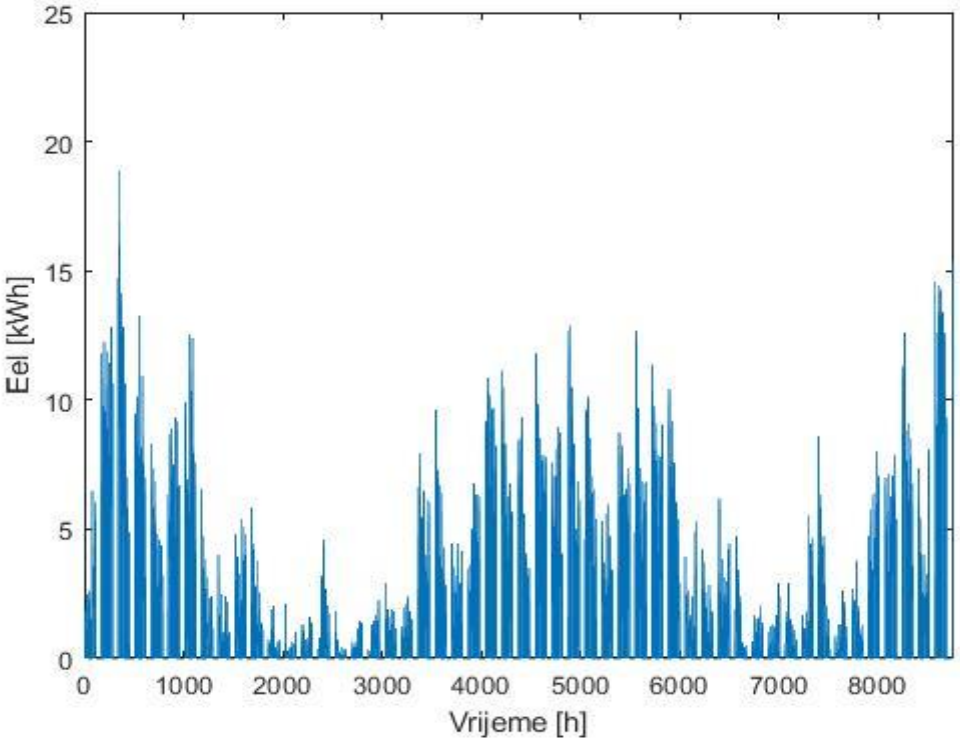
8.3. Potrošnja električne energije dizalice topline

Kako je ranije opisano, na potrošnju električne energije dizalice topline utječu faktori COP i EER. Za poznate temperature polaza vode za grijanje/hlađenje te temperatura okoliša i djelomično opterećenje, moguće je izračunati COP i EER za sve sate u godini i na temelju toga odrediti potrošnju električne energije dizalice topline. Dizalica topline odabrana je na temelju maksimalnog satnog opterećenja zgrade, koje za grijanje iznosi 60 kWh, a za hlađenje 58 kWh. Odabrana je dizalica topline proizvođača *Daikin*, tip EWYQ064-CWN. Toplinski učini ove dizalice topline prikazani su u Tablici 19.

Tablica 19 Toplinski učini odabrane dizalice topline

UČIN GRIJANJA [kW]		**UČIN HLAĐENJA [kW]**	
nazivni	maksimalni	nazivni	maksimalni
62,9	74,9	63,2	75,2

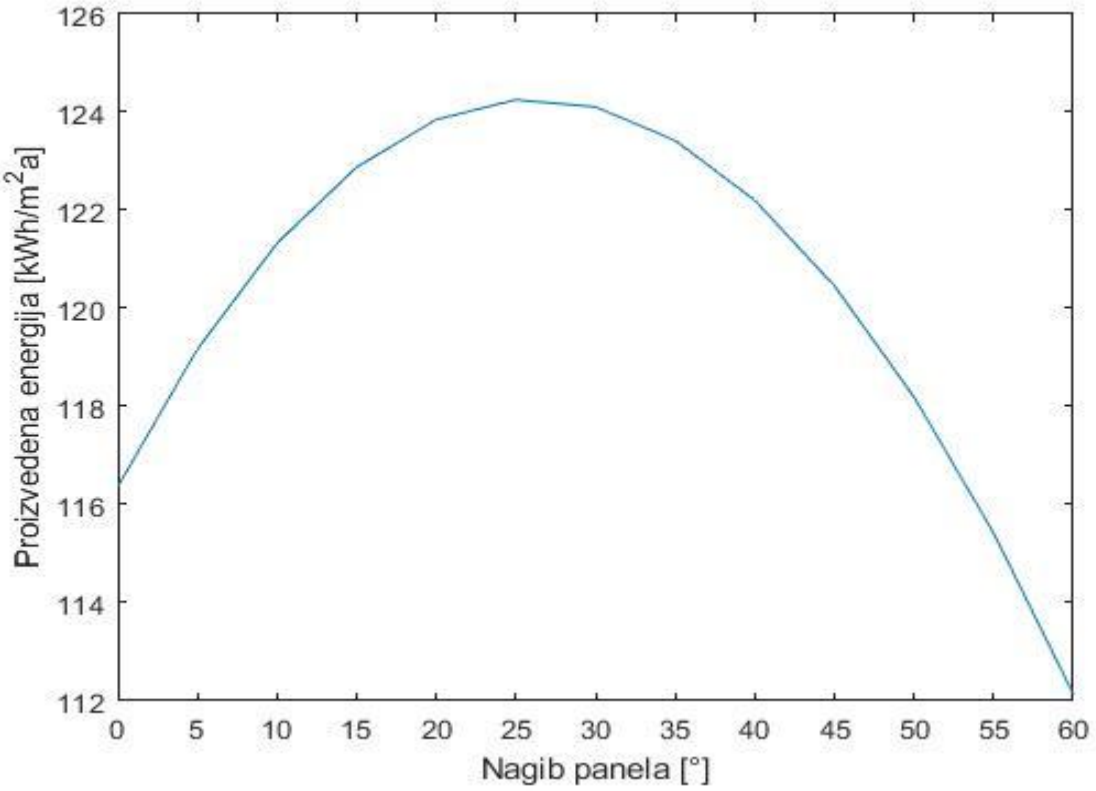
Ukupna potrošnja električne energije dizalice topline iznosi 13736 kWh/a, odnosno 9 kWh/m^{2}a. Na Slici 40 prikazana je potrošnja električne energije za pogon dizalice topline za sve sate u godini, pri čemu broj sati rada u režimu grijanja iznosi 1632 h, a u režimu hlađenja 2018 h. Sezonska vrijednost faktora grijanja (SCOP) iznosi 3,84, a sezonska vrijednost faktora hlađenja (SEER) iznosi 4,93.



Slika 40 Potrošnja električne energije dizalice topline

8.4. Optimiranje nagiba i površine fotonaponskih panela

U radu je bilo potrebno odabrati nagib panela kojim će se proizvesti najviše električne energije, te je stoga korištenjem ranije opisanog modela analizirana neto godišnje proizvedena električna energija izražena po jedinici površine panela. Optimizacijska varijabla bio je nagib panela, a promatrani su nagibi od 0° do 60°, s korakom od 5°. Rezultati optimiranja prikazani na Slici 41, iz čega je vidljivo da se najviše električne energije, odnosno 124 kWh/m^{2}a, proizvede za nagib panela od 25°.



Slika 41 Proizvedena električna energija po m^2 fotonaponskog panela, u ovisnosti o nagibu panela

Drugi zadatak bio je izračunati potrebnu instaliranu površinu panela kojom bi se pokrila sva potreba dizalice topline za grijanje i hlađenje zgrade. Pretpostavljeno je da jedan panel ima površinu 1 m^2, a ukupna instalirana površina povećavala se slaganjem panela u serije i paralele. Slaganjem u serije ostvaruje se dvostruko veći napon, a slaganjem u paralele dvostruko veća struja, no njihov se umnožak, odnosno snaga, udvostruči neovisno o načinu slaganja. Energija koju je potrebno preuzeti iz mreže izračunata je kao:

$$E_{\text{mreža}} = E_{\text{potrebaDT}} - E_{\text{proizvedenoPV}} \tag{6}$$

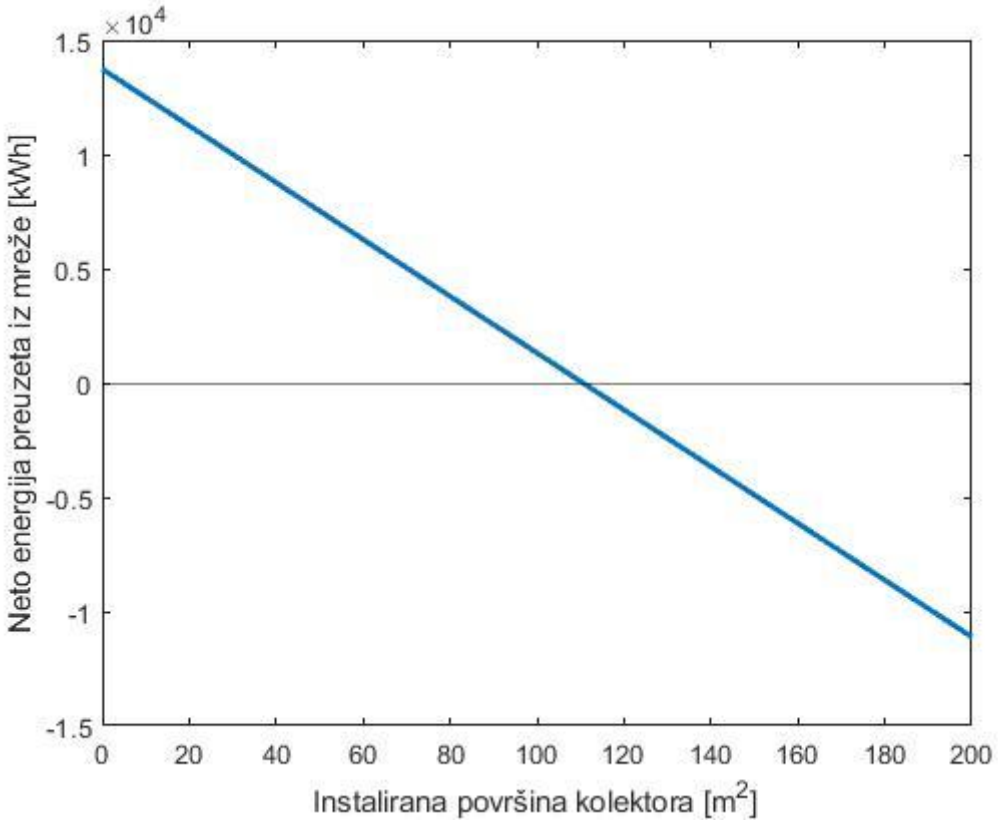
gdje su:

$E_{\text{mreža}}$ električna energija preuzeta iz mreže [kWh/a]

$E_{\text{potrebaDT}}$ potrebna električna energija za pogon dizalice topline [kWh/a]

$E_{\text{proizvedenoPV}}$ električna energija proizvedena fotonaponskim panelima [kWh/a].

Analizirane su površine od 0 do 200 m^2 fotonaponskih panela, a rezultati su prikazani na Slici 42. Vidljivo je kako je pad električne energije koju je potrebno preuzeti iz mreže linearno ovisan o instaliranoj površini fotonaponskih panela. Na temelju jednadžbe pravca moguće je izračunati optimalnu površinu za postizanje standarda nulte potrošnje energije (proizvedeno onoliko električne energije koliko je potrošeno). Ako se zanemare ostali potrošači energije, odnosno pretpostavi da je dizalica topline jedini potrošač na zgradi, površina fotonaponsog panela za postizanje standarda zgrade nulte potrošnje energije iznosi 111 m^2. Daljnjim povećanjem instalirane površine panela električna energija bi se počela proizvoditi u suvišku te bi se mogla prodavati u mreži.



Slika 42 Električna energija preuzeta iz mreže u ovisnosti o instaliranoj površini fotonaponskih panela

8.5. Isporučena i primarna energija za grijanje i hlađenje

Isporučena električna energija za grijanje zgrade iznosi 6695 kWh/a ili 4,21 kWh/m^{2}a, a za hlađenje 7118 kWh/a ili 4,48 kWh/m^{2}a. Prilikom izračuna isporučene energije zanemareni su gubici podsustava distrubucije. Prema podacima Ministarstva prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine, faktor primarne energije za električnu energiju iznosi 1,614. Za grijanje i hlađenje zgrade godišnje se prema tome utroši ukupno 13813 kWh/a, odnosno, 14 kWh/m^{2}a primarne energije.

9. ZAKLJUČAK

Svrha ovoga rada bila je modeliranje i simulacija sustava grijanja i hlađenja te proizvodnje električne energije na primjeru Tehničke škole Ruđer Bošković u Zagrebu. Zgrada se sastoji od prizemlja i 3 kata te sadrži 66 prostorija. Podjela prostorija na zone izvršena je prema normi HRN EN ISO 52016-1:2017 [2] te su definirane 24 zone. Zatim je izrađen energijski model zgrade u računalnom programu TRNSYS-u, s ciljem dinamičke simulacije energijskih tokova u zgradi. Prilikom modeliranja geometrije zgrade korišteni su podaci iz glavnog arhitektonskog projekta. Svojstva zidova i prozora definirana su prema svojstvima referentne nZEB obrazovne ustanove u kontinentalnoj Hrvatskoj, dok su pogonski režimi i raspored korištenja zgrade usklađeni s HRN EN ISO 13790 [1] normom. Pomoću ovog modela dobiveni su podaci o potrebnoj energiji za grijanje i hlađenje u svim satima u godini, pri čemu godišnja potrebna energija za grijanje zgrade iznosi 25688 kWh/a, odnosno 16 kWh/m^{2}a, a godišnja potrebna energija za hlađenje iznosi 35161 kWh/a, odnosno 22 kWh/m^{2}a.

Korištenjem TRNSYS-a također je modeliran sustav aktivne betonske jezgre koja služi za predaju toplinske/rashladne energije. Za svaku zonu definiran je protok vode te broj petlji prema glavnom strojarskom projektu. Početne temperature polaza vode betonske jezgre odabrane su prema primjeru zgrade *BMW Welt*-a u Munchenu [6], a iznose 34°C za režim grijanja i 17°C za režim hlađenja. Rezultati simulacije kritične zone za grijanje pokazali su da se temperatura polaza za grijanje mora sniziti na 30°C kako bi se zadovoljila ograničenja vezana uz maksimalno dozvoljene temperature poda.

Modeliranje dizalice topline zrak – voda provedeno je pomoću podataka proizvođača *Daikin*. Korišteni su podaci o COP-u i EER-u u nekoliko radnih točaka, u ovisnosti o temperaturi okoliša, temperaturi polaza vode i djelomičnom opterećenju dizalice topline. Na temelju podataka proizvođača te korištenjem MATLAB funkcije *polyfitn* dobivena je jednadžba koja opisuje ovisnost COP-a i EER-a o navedenim parametrima. Korištenjem te jednadžbe izračunata je potrošnja električne energije za pogon dizalice topline u svim satima u godini, a koja na godišnjoj razini iznosi 13736 kWh/a, odnosno 9 kWh/m^{2}a. U radu su zanemareni gubici sustava distribucije.

U radu je također analiziran i sustav proizvodnje električne energije korištenjem fotonaponskih panela, čiji je energijski model izrađen je u TRNSYS-u. Za karakteristike panela korištene su standardne vrijednosti iz TRNSYS-a. Korištenjem simulacija analiziran je utjecaj

nagiba panela na proizvodnju električne energije, pri čemu se maksimum postiže pri nagibu od 25°, a proizvedena električna energija tada iznosi 124 kWh/m^{2}a. Rezultati analize također su pokazali da površina fotonaponskih panela za koju se postiže (na godišnjoj razini) proizvodnja energije jednaka potrošnji dizalice topline iznosi 111 m^2.

Godišnja specifična primarna energija potrebna za grijanje i hlađenje zgrade iznosi 14 kWh/m^{2}a bez korištenja fotonaponskih panela, dok se ugradnjom 111 m^2 panela postiže nulta potrošnja primarne energije za sustav grijanja i hlađenja .

LITERATURA

[1] Soldo V., Novak S., Horvat I.: Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[2] Energijska svojstva zgrada – Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarnje temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja – 1. dio: Postupci proračuna (ISO 52016-1:2017; EN ISO 52016-1:2017)

[3] ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality

[4] Magdić L.: Projekt PE, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.

[5] TRNSYS 17 Volume 5, Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2012.

[6] https://web.uponor.hk/radiant-cooling-blog/radiant-cooling-the-bmw-welt/

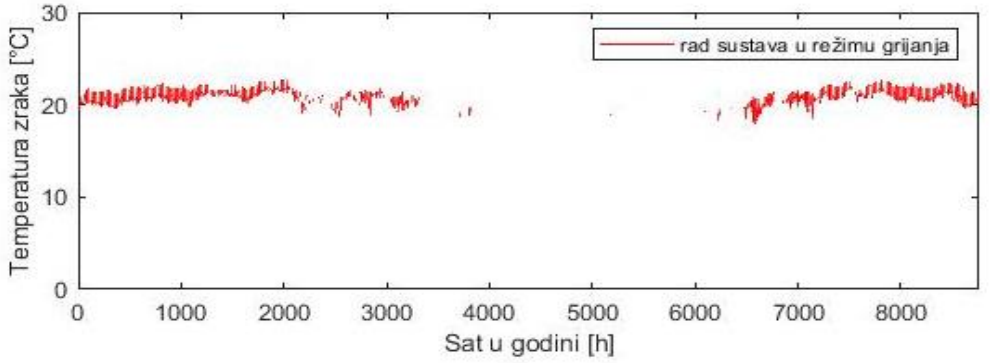
[7] Ugradbeni sustavi površinskog grijanja i hlađenja vodom – 3.dio: Dimenzioniranje (EN 1264-3:2009)

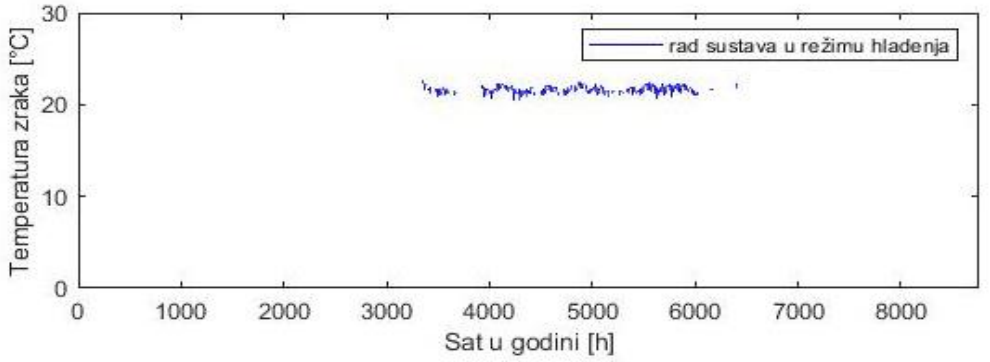
[8] Soldo V.: Podloge za predavanja iz kolegija "Dizalice topline", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.

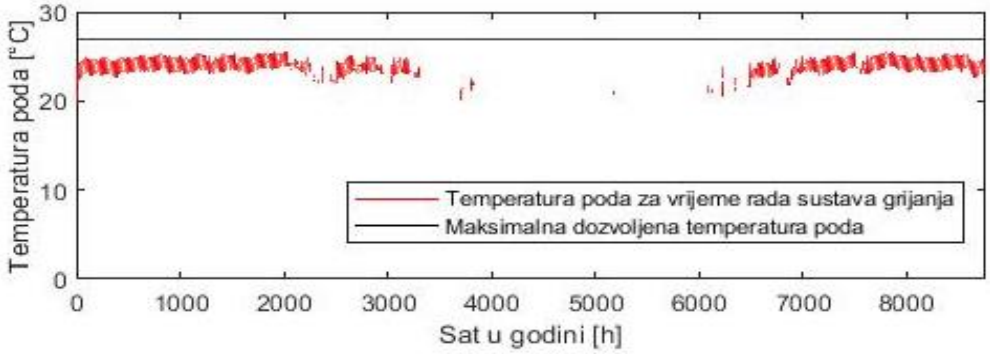
[9] TRNSYS 17 Volume 4, Mathematical Reference, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2012.

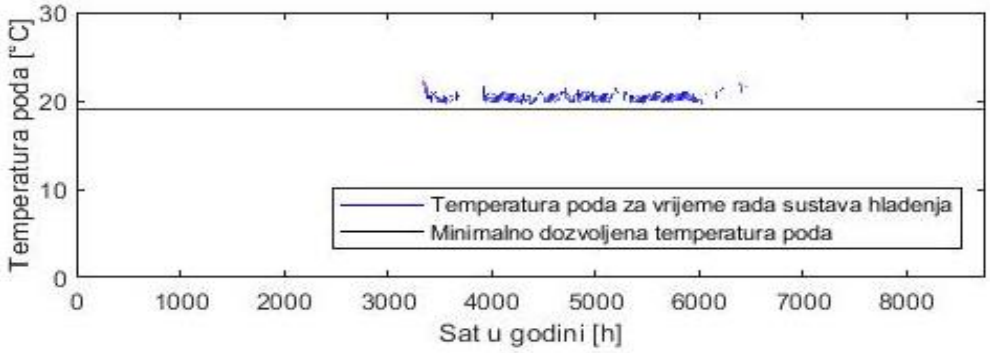
PRILOG I – temperature zraka i poda u ostalim zonama

1) Zona 2

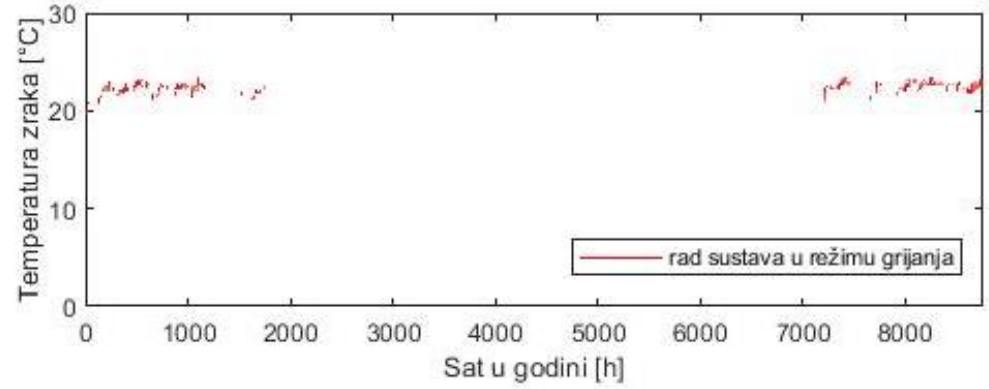


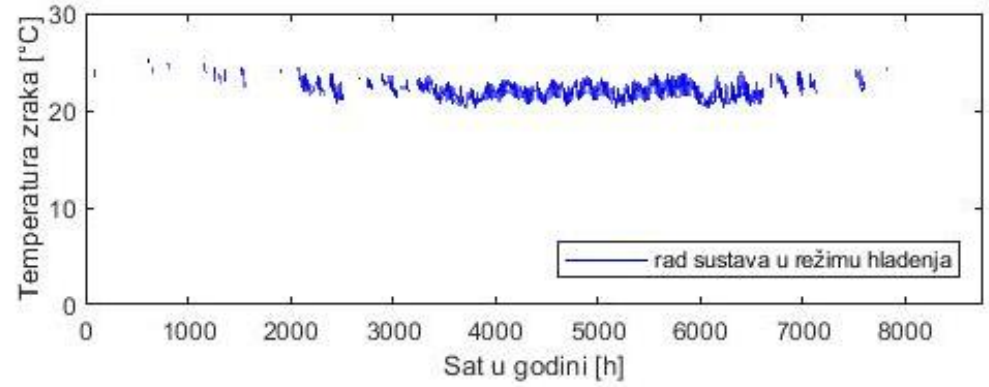


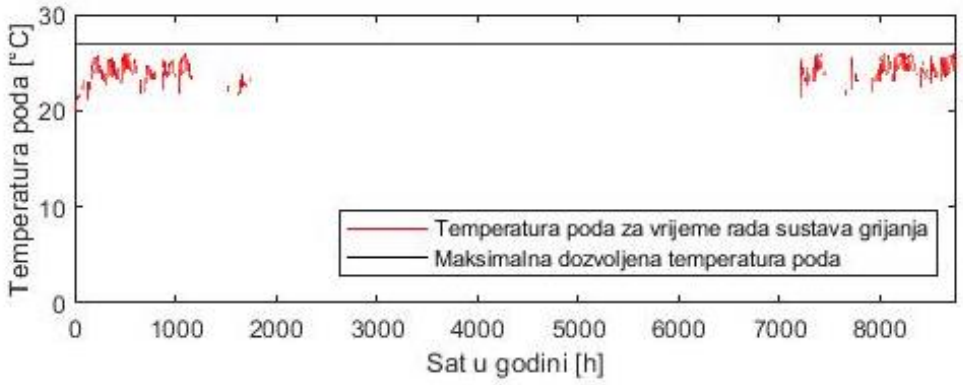


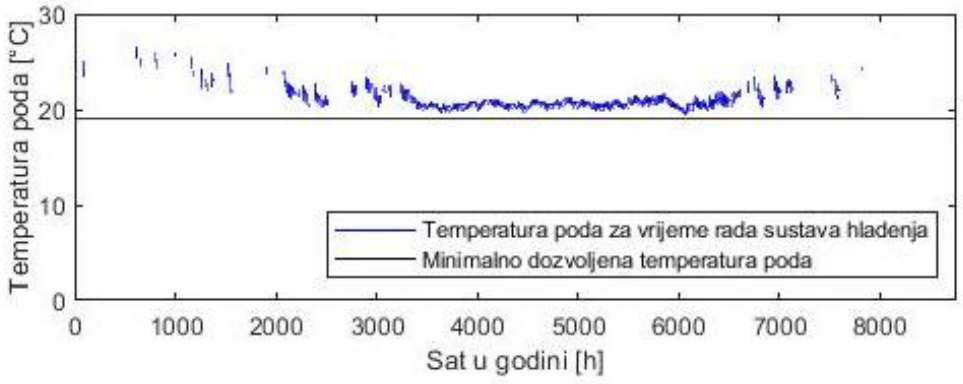


2) Zona 3

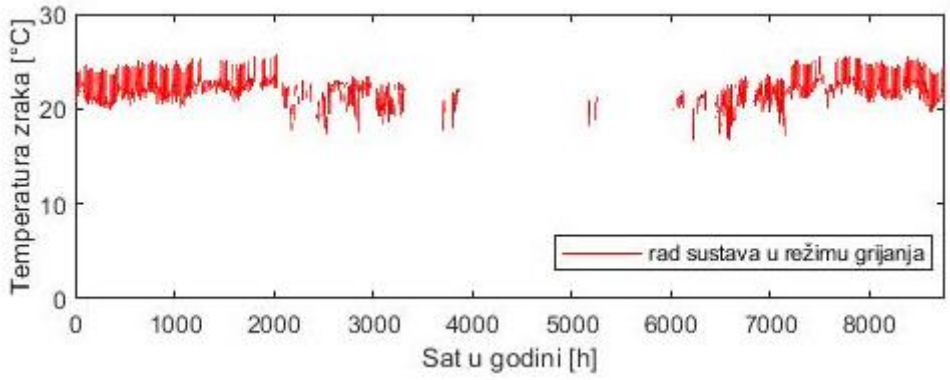

Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu grijanja

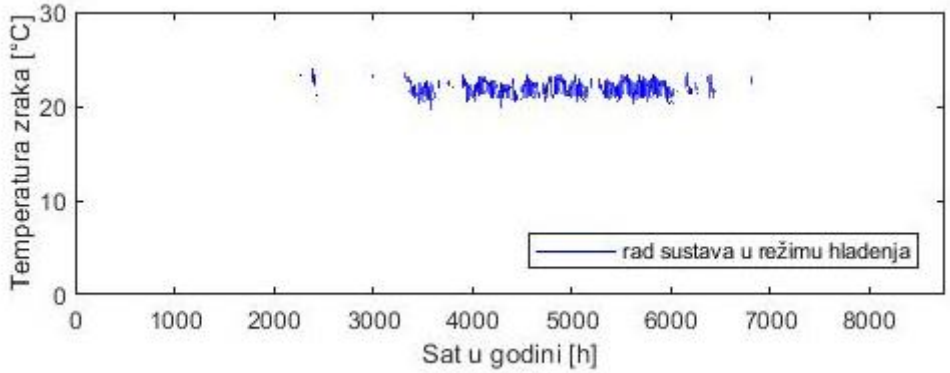

Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu hladenja

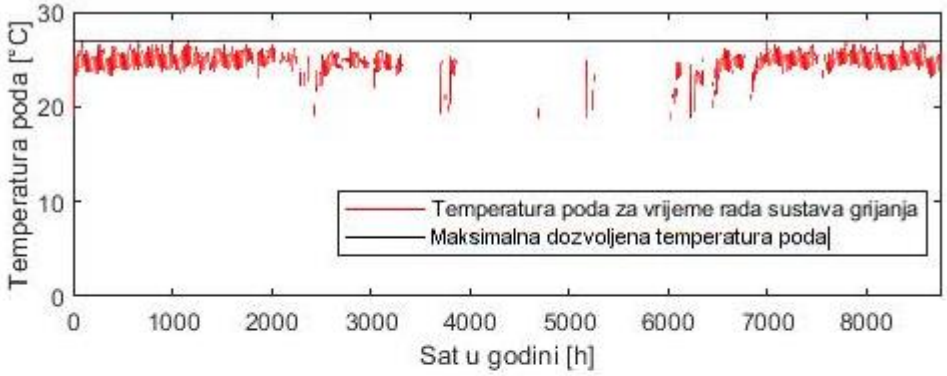

Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava grijanja
Maksimalna dozvoljena temperatura poda

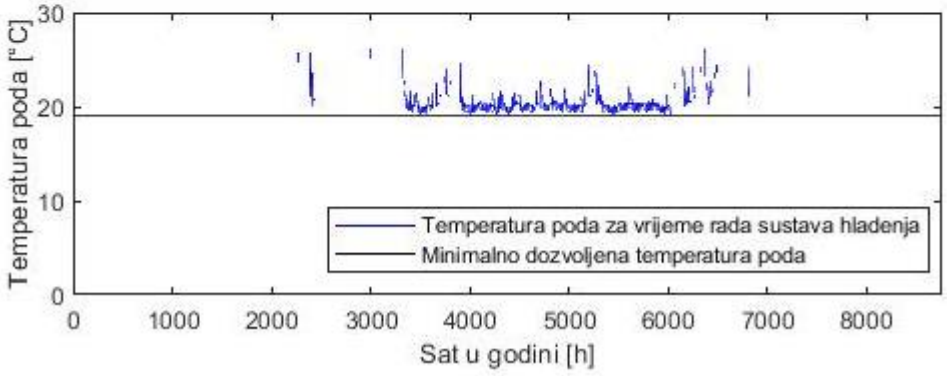

Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava hladenja
Minimalno dozvoljena temperatura poda

3) Zona 4

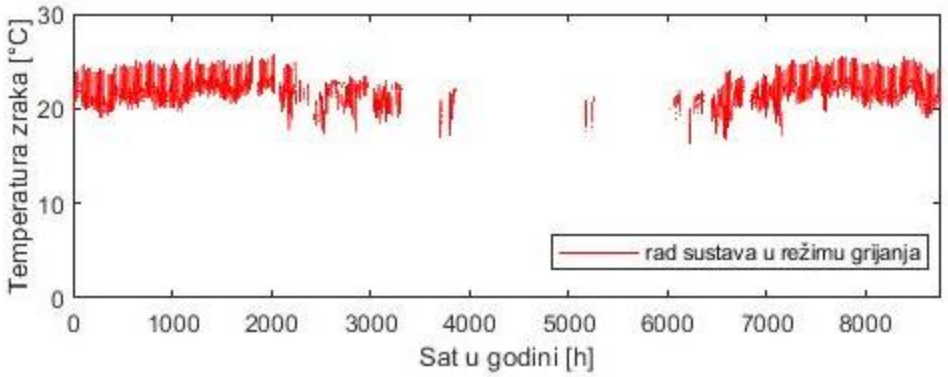

Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu grijanja

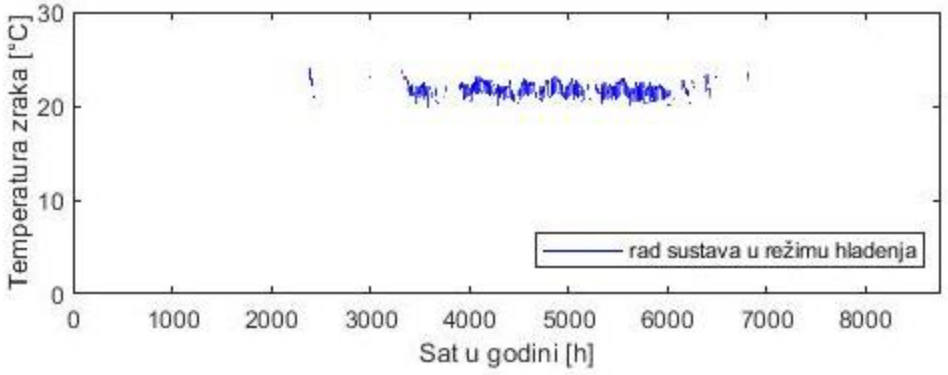

Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu hladenja

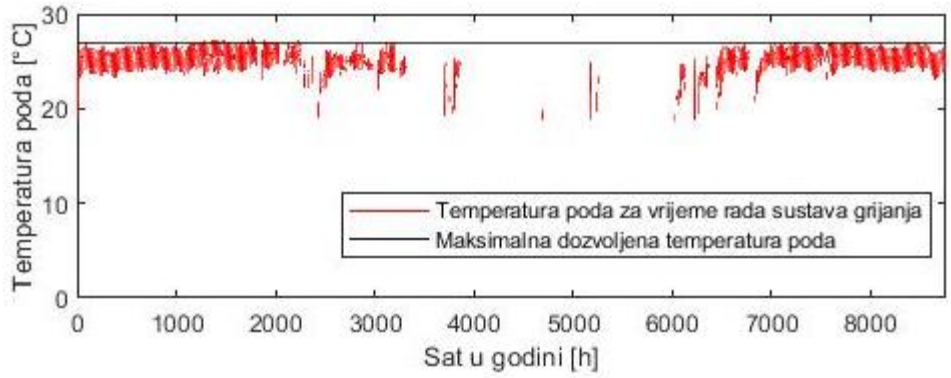

Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava grijanja
Maksimalna dozvoljena temperatura poda

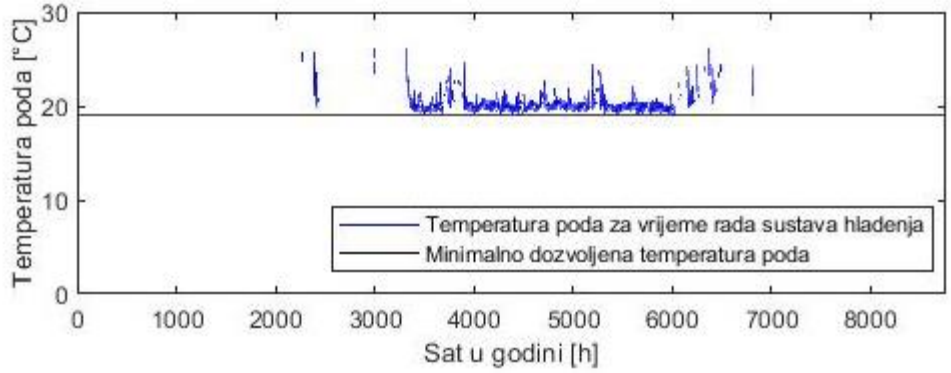

Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava hladenja
Minimalno dozvoljena temperatura poda

4) Zona 5

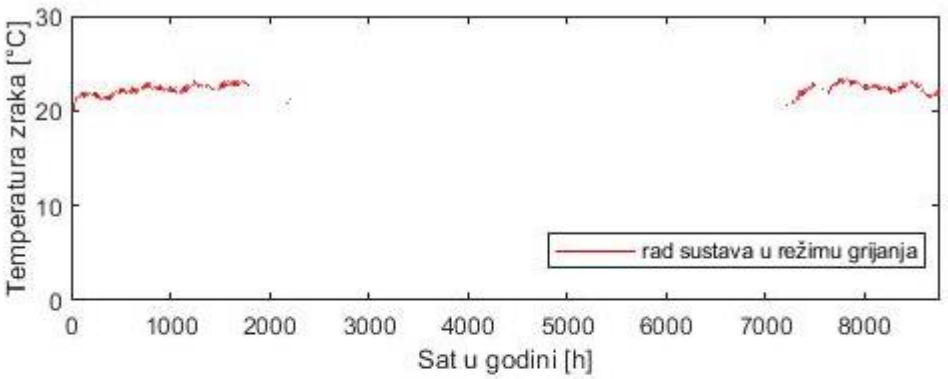

Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu grijanja

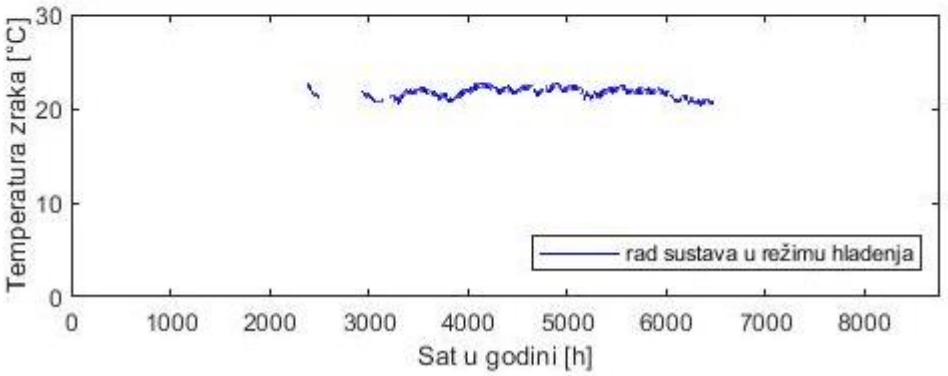

Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu hladenja

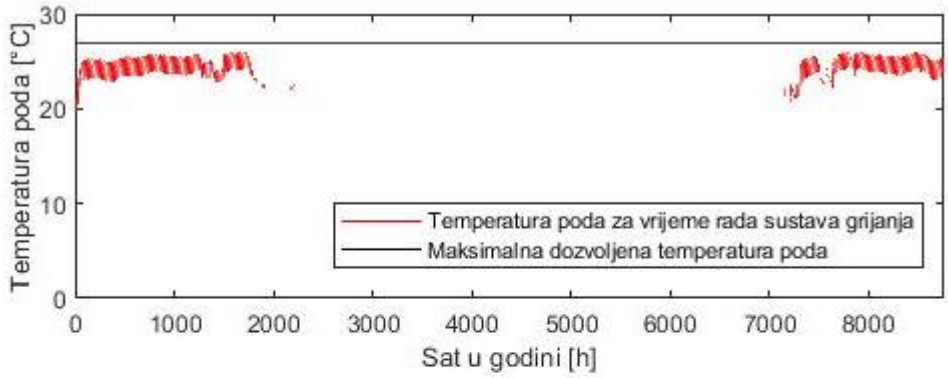

Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava grijanja
Maksimalna dozvoljena temperatura poda

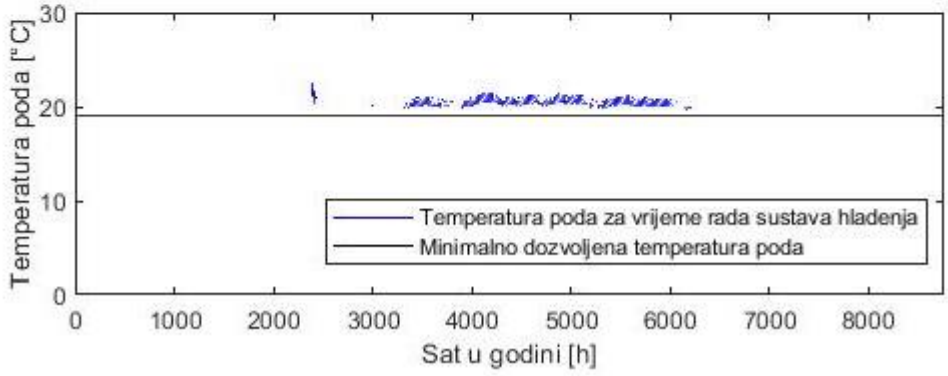

Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava hladenja
Minimalno dozvoljena temperatura poda

5) Zona 15

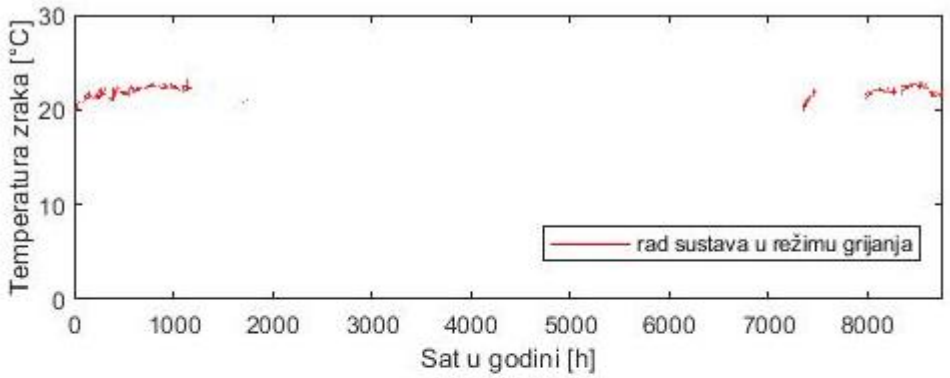

Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu grijanja

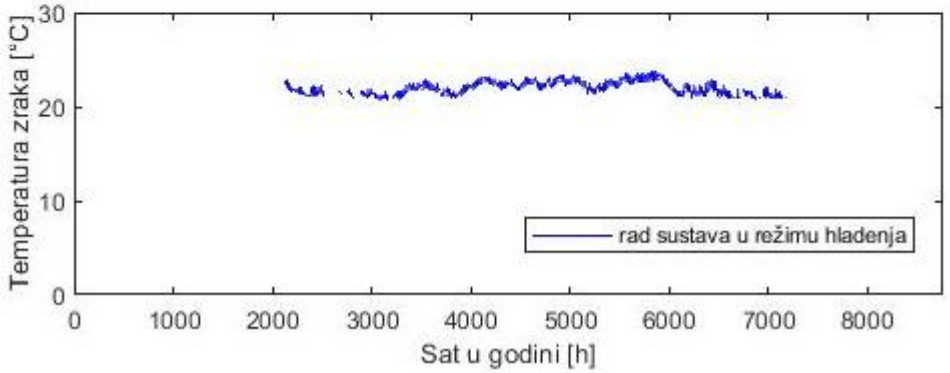

Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu hladenja

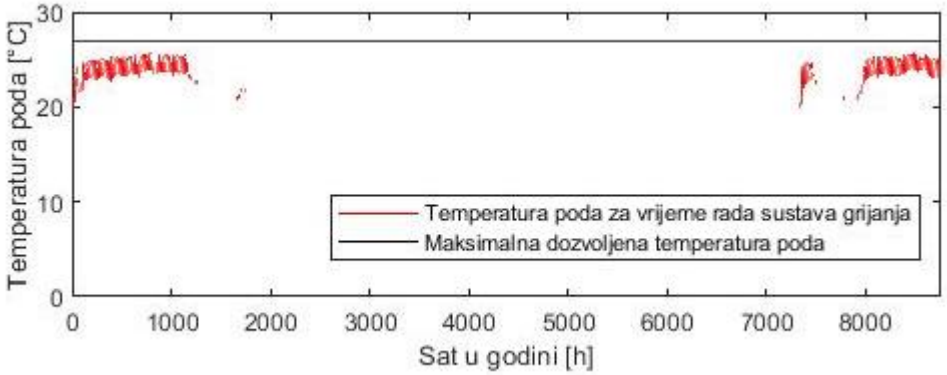

Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava grijanja
Maksimalna dozvoljena temperatura poda

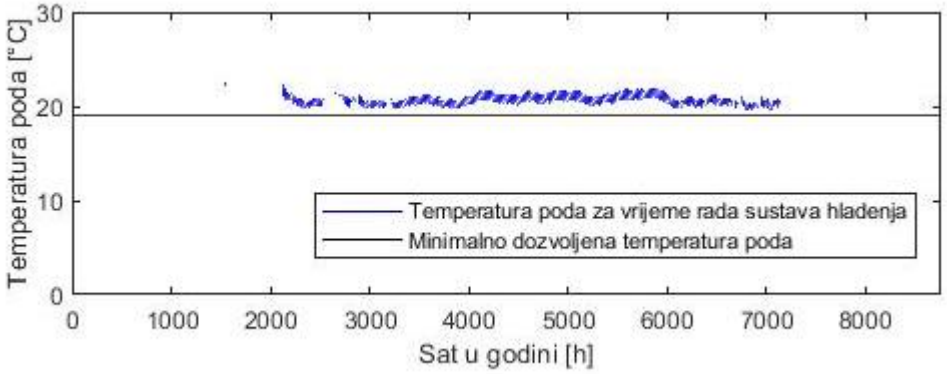

Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava hladenja
Minimalno dozvoljena temperatura poda

6) Zona 18

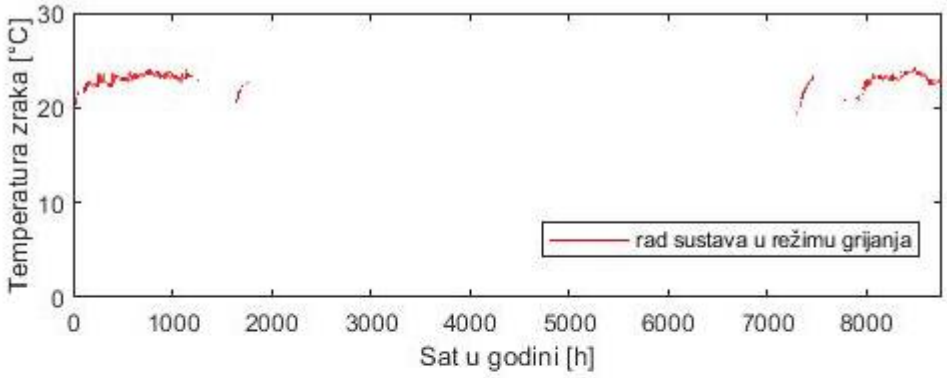

Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu grijanja

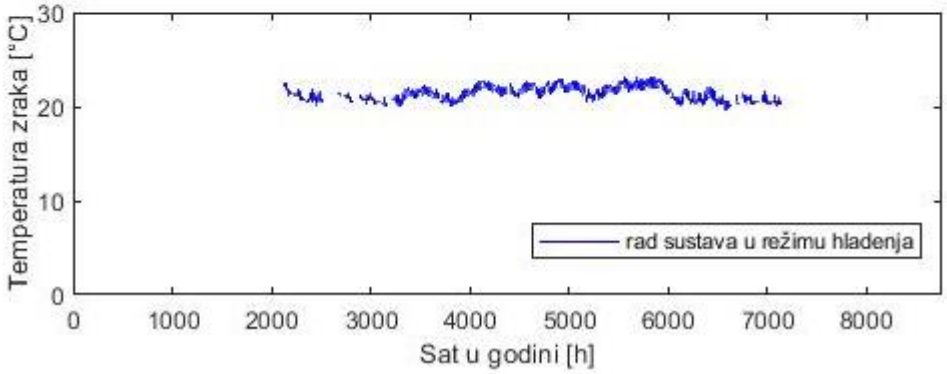

Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu hladenja

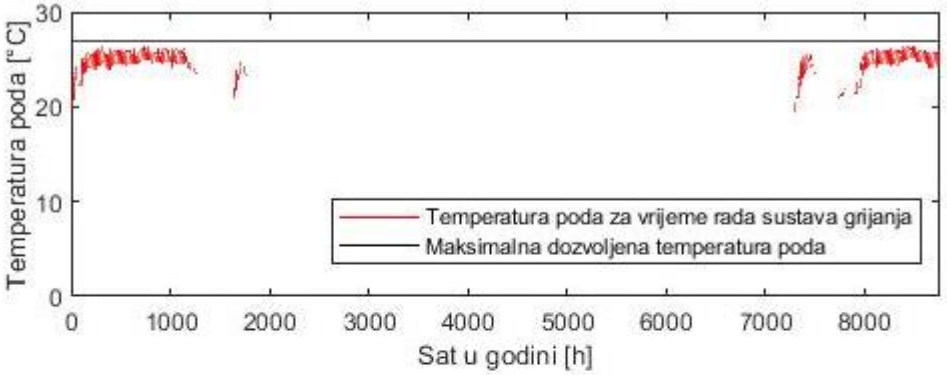

Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava grijanja
Maksimalna dozvoljena temperatura poda

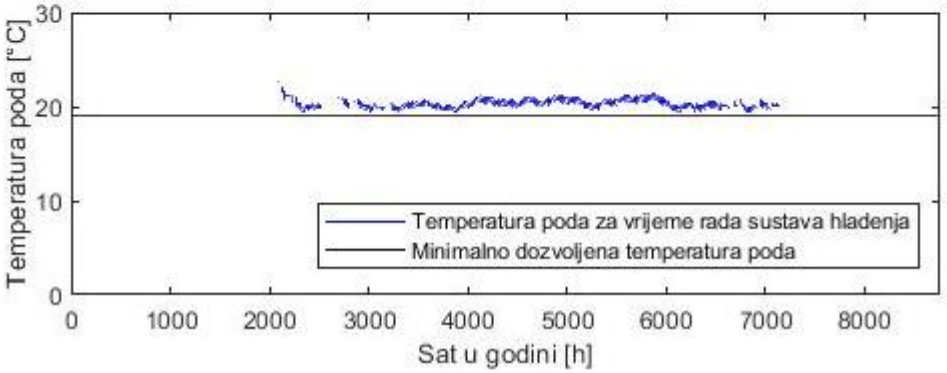

Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava hladenja
Minimalno dozvoljena temperatura poda

7) Zona 22


Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu grijanja


Temperatura zraka [°C]
Sat u godini [h]
rad sustava u režimu hladenja


Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava grijanja
Maksimalna dozvoljena temperatura poda


Temperatura poda [°C]
Sat u godini [h]
Temperatura poda za vrijeme rada sustava hladenja
Minimalno dozvoljena temperatura poda