

Dinamički energetska model obiteljske kuće i termotehničkih sustava

Levačić, Janko

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:235:930493>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-29**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Janko Levačić

Zagreb, 2019. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Marino Grozdek, dipl. ing.

Student:

Janko Levačić

Zagreb, 2019. godina.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, Prof. dr. sc. Marinu Grozdeku na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći prilikom izrade ovog rada. Hvala na strpljenju, motivaciji, podršci te prenesenim znanjima.

Hvala mojim prijateljima i curi koji su zajedno sa mnom prolazili kroz dobre, ali i one manje dobre trenutke studiranja te mi posebno uljepšali i olakšali moje studentsko razdoblje.

Najveće hvala mojim roditeljima koji su mi omogućili ovo školovanje, motivirali me, hrabрили i bili najveća potpora, kako na studiju tako i u životu.

Janko Levačić



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, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur. broj: | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Janko Levačić**

Mat. br.: **0035194948**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dinamički energetski model obiteljske kuće i termotehničkih sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Dynamic energy model of a family house and HVAC systems**

Opis zadatka:

Za obiteljsku kuću definirane geometrije i građevinskih materijala, na području Kvarnera, potrebno je izraditi energetski dinamički model u programu TRNSYS. Zone je potrebno definirati sukladno namjeni pojedinog prostora, a meteorološke podatke koristiti za najbliži dostupan grad.

Također je potrebno izraditi dinamičke modele korištenih termotehničkih sustava u kući:

- grijanja i hlađenja zgrade podnim registrima i ventilokonvektorima,
- pripreme potrošne tople vode,
- grijanja bazenske vode.

Pripremu ogrjevnice i rashladne vode predvidjeti dizalicom zrak-voda.

Po izradi modela termotehničke sustave je potrebno nadograditi regulacijskim elementima.

Rad treba sadržavati:

- Tehnički opis matematičkog modela zgrade i elemenata termotehničkih sustava s navedenim parametrima sustava korištenim prilikom simulacija.
- Simulacijama utvrđenu maksimalnu potrebnu snagu grijanja i hlađenja.
- Simulacijama utvrđenu godišnju potrošnju energije za grijanje i hlađenje zgrade.
- Utjecaj načina regulacije termotehničkih sustava na potrošnju energije za grijanje i hlađenje zgrade.


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

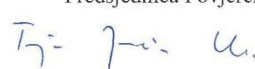
Napomena: Svi potrebni podaci i parametri za izradu modela bit će dogovoreni s mentorom.

Zadatak zadan:
17. siječnja 2019.

Datum predaje rada:
21. ožujka 2019.

Predvideni datum obrane:
27., 28. i 29. ožujka 2019.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Marino Grozdek

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| SAŽETAK..... | VI |
| SUMMARY | VII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. OPIS MODELA ZGRADE | 3 |
| 2.1. Fizika zgrade | 3 |
| 2.1.1. Geometrija zgrade | 3 |
| 2.1.2. Vanjska ovojnica zgrade | 5 |
| 2.1.3. Zone zgrade..... | 6 |
| 2.1.4. Koeficijenti prolaza topline..... | 7 |
| 2.2. Opis rada u korisničkom sučelju TRNBuild | 12 |
| 2.2.1. Definiranje zidova..... | 14 |
| 2.2.2. Definiranje aktivnog sloja..... | 16 |
| 2.2.3. Definiranje prozora | 17 |
| 2.2.4. Infiltracija zraka | 18 |
| 2.2.5. Grijanje i hlađenje..... | 18 |
| 2.2.6. Unutarnji toplinski dobici | 19 |
| 2.3. Matematički model višezonske zgrade – Type 56 [2] | 20 |
| 2.3.1. Konvektivni toplinski tok u zonu..... | 20 |
| 2.3.2. Toplinski tok izmijenjen zračenjem prema zidovima unutar zone | 21 |
| 2.3.3. Model prolaza topline kroz zidove i prozore | 21 |
| 2.3.3.1. Star network model | 22 |
| 2.3.4. Optički i toplinski model prozora | 25 |
| 3. OPIS MODELA TERMOTEHNIČKOG SUSTAVA..... | 26 |
| 3.1. Tehnički opis termotehničkog sustava | 26 |
| 3.2. Model termotehničkog sustava u računalnom programu TRNSYS..... | 30 |
| 3.2.1. Opis rada u korisničkom sučelju TRNSYS Simulation Studio | 30 |
| 3.2.2. Dinamički energetski model termotehničkog sustava | 31 |
| 3.3. Matematički opis modela komponenti sustava | 35 |
| 3.3.1. Dizalica topline – Type 941 [7] | 35 |
| 3.3.1.1. Type 941 – režim grijanja | 35 |
| 3.3.1.2. Type 941 – režim hlađenja..... | 37 |
| 3.3.2. Ventilokonvektori – Type 600 | 37 |
| 3.3.3. Spremnik PTV-a – Type 534 [8] | 38 |
| 3.3.4. Međuspremnik – Type 4 [9] | 42 |
| 3.3.5. MATLAB komponenta bazena – Type 155..... | 44 |
| 3.3.6. Izmjenjivač topline – Type 91 [9]..... | 48 |
| 3.3.7. Cirkulacijska pumpa – Type 3 [9] | 50 |
| 3.3.8. Cjevovod – Type 31 [9] | 52 |
| 3.3.9. Armatura | 54 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 3.3.9.1. | T-komad – Type 11h [9] | 54 |
| 3.3.9.2. | Razdjelni ventil – Type 11f [9] | 54 |
| 3.3.9.3. | Termoregulacijski ventil – Type 11b [9] | 55 |
| 3.3.9.4. | Razdjelnik – Type 647 [7] | 56 |
| 3.3.9.5. | Sabirnik – Type 649 [7] | 56 |
| 3.3.10. | Diferencijalni regulator – Type 2 [9] | 56 |
| 3.3.11. | Sobni termostat – Type 108 [9] | 58 |
| 3.3.12. | PID regulator – Type 23 [9] | 59 |
| 3.3.13. | Pomoćni grijač – Type 6 [9] | 60 |
| 3.3.14. | Zasjenjenje od bočnog zida – Type 3 [9] | 61 |
| 3.4. | Model regulacije termotehničkog sustava | 64 |
| 3.4.1. | Regulacija dizalice topline | 64 |
| 3.4.2. | Regulacija kruga potrošne tople vode | 68 |
| 3.4.3. | Regulacija kruga bazena | 69 |
| 3.4.4. | Regulacija kruga grijanja i hlađenja zgrade | 72 |
| 3.4.5. | Regulacija troputnog ventila | 75 |
| 3.4.6. | Regulacija infiltracije zraka i zasjenjenja prozora | 76 |
| 4. | ANALIZA REZULTATA SIMULACIJA | 78 |
| 4.1. | Maksimalna potrebna snaga za grijanje | 78 |
| 4.2. | Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje | 79 |
| 4.2.1. | Godišnja potrebna energija za grijanje | 79 |
| 4.2.2. | Godišnja potrebna energija za hlađenje | 81 |
| 4.2.3. | Maksimalna potrebna snaga za hlađenje | 83 |
| 4.3. | Godišnja potrošnja energija za grijanje i hlađenje | 84 |
| 4.4. | Utjecaj načina regulacije termotehničkog sustava na potrošnju energije za grijanje i hlađenje | 92 |
| 4.4.1. | Utjecaj regulacije zasjenjenja | 92 |
| 4.4.2. | Utjecaj regulacije infiltracije | 94 |
| 4.4.3. | Utjecaj „set back“ temperature | 95 |
| 4.4.4. | Utjecaj regulacije temperature povrata u dizalicu topline | 97 |
| 5. | ZAKLJUČAK | 98 |
| | LITERATURA | 100 |
| | PRILOZI | 101 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Tlocrt suterena..... | 4 |
| Slika 2. | Tlocrt prizemlja..... | 5 |
| Slika 3. | Podjela prizemlja (lijevo) i suterena (desno) na zone..... | 7 |
| Slika 4. | TRNBuild – prozor inicijalizacije projekta..... | 13 |
| Slika 5. | TRNBuild – prozor zone..... | 14 |
| Slika 6. | TRNBuild – definiranje slojeva zida..... | 15 |
| Slika 7. | TRNBuild – kreiranje zida..... | 15 |
| Slika 8. | TRNBuild – definiranje aktivnog sloja..... | 16 |
| Slika 9. | TRNBuild – specificiranje aktivnog sloja..... | 17 |
| Slika 10. | Zid s aktivnim slojem za podno grijanje i hlađenje [2]..... | 17 |
| Slika 11. | TRNBuild – grijanje..... | 18 |
| Slika 12. | TRNBuild – definiranje unutarnjih toplinskih dobitaka..... | 19 |
| Slika 13. | Toplinska bilanca zraka zone [2]..... | 20 |
| Slika 14. | Toplinski tokovi i temperature na vanjskoj i unutarnjoj strani zida [2]..... | 21 |
| Slika 15. | Star network model [2]..... | 23 |
| Slika 16. | Detaljan model prozora [2]..... | 25 |
| Slika 17. | Daikin Altherma unutarnja [4] i vanjska jedinica [3]..... | 27 |
| Slika 18. | Pojednostavljena shema sustava proizvodnje energije za grijanje i hlađenje..... | 28 |
| Slika 19. | Daikin FWP-AT ventilokonvektor [5]..... | 29 |
| Slika 20. | Sučelje Simulation Studio..... | 30 |
| Slika 21. | TRNSYS model termotehničkog sustava bez pripadajuće regulacije..... | 33 |
| Slika 22. | Shematski prikaz stratifikacijskog spremnika [8]..... | 39 |
| Slika 23. | Stratificirani spremnik tekućine [9]..... | 43 |
| Slika 24. | Shema komponente Type 91 [9]..... | 49 |
| Slika 25. | Protok fluida kroz cjevovod [9]..... | 53 |
| Slika 26. | Model T-komada..... | 54 |
| Slika 27. | Model razdjelnog ventila..... | 55 |
| Slika 28. | Primjer termoregulacijskog ventila [9]..... | 56 |
| Slika 29. | Funkcija diferencijalnog regulatora [9]..... | 57 |
| Slika 30. | Temperaturne razine sobnog termostata..... | 58 |
| Slika 31. | Dead band temperaturna razlika..... | 59 |
| Slika 32. | Zasjenjenje od krova ili bočnog zida [9]..... | 62 |
| Slika 33. | Model regulacije cirkulacijskog kruga dizalice topline..... | 64 |
| Slika 34. | Diferencijalni regulator PTV-a..... | 65 |
| Slika 35. | Diferencijalni regulator temperature povrata u režimu grijanja/pripreme PTV-a..... | 66 |
| Slika 36. | Diferencijalni regulator temperature povrata u režimu hlađenja..... | 66 |
| Slika 37. | Povezivanje kontrolnih signala grijanja i hlađenja s Type 941..... | 67 |
| Slika 38. | Dijagram toka regulacije dizalice topline u režimu grijanja (lijevo) i hlađenja (desno)..... | 68 |
| Slika 39. | Model regulacije cirkulacijskog kruga PTV-a..... | 69 |
| Slika 40. | Model regulacije cirkulacijskog kruga bazena..... | 70 |
| Slika 41. | Dijagram toka regulacije pumpe bazenske vode (lijevo) i pumpe ogrjevnice vode (desno)..... | 71 |
| Slika 42. | Diferencijalni regulator temperaturne razlike vode međuspremnik i vode bazena..... | 72 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 43. | Model regulacije cirkulacijskog kruga grijanja i hlađenja zgrade | 73 |
| Slika 44. | Model regulacije troputnog ventila | 75 |
| Slika 45. | Model regulacije infiltracije zraka i zasjenjenja prozora | 76 |
| Slika 46. | Simulacija maksimalne snage grijanja | 78 |
| Slika 47. | Simulacija godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje | 79 |
| Slika 48. | Potrebna energija za grijanje zgrade po mjesecima | 80 |
| Slika 49. | Udio godišnje energije potrebne za grijanje po zonama | 81 |
| Slika 50. | Potrebna energija za hlađenje zgrade po mjesecima | 81 |
| Slika 51. | Udio godišnje energije potrebne za hlađenje po zonama | 82 |
| Slika 52. | Potrošnja proizvedene toplinske energije dizalicom topline | 86 |
| Slika 53. | Potrošnja proizvedene rashladne | 86 |
| Slika 54. | Temperature zraka u sezoni grijanja – Zona 1 i 3 | 88 |
| Slika 55. | Temperature zraka u sezoni grijanja – Zona 2, 4 i 5 | 88 |
| Slika 56. | Temperature zraka zona u sezoni hlađenja – Zona 1 i 3 | 89 |
| Slika 57. | Temperature zraka zona u sezoni hlađenja – Zona 2, 4 i 5 | 89 |
| Slika 58. | Temperatura PTV-a na potrošačima tijekom cijele godine | 90 |
| Slika 59. | Temperatura bazenske vode u periodu korištenja | 90 |
| Slika 60. | Potrošnja električne energije za pogon sustava s regulacijom zasjenjenja i bez ... | 93 |
| Slika 61. | Temperature zraka zona u travnju – regulacija zasjenjenja | 93 |
| Slika 62. | Temperature zraka zona u travnju – bez regulacije zasjenjenja | 94 |
| Slika 63. | Potrošnja električne energije za pogon sustava s regulacijom infiltracije i bez | 95 |
| Slika 64. | Potrošnja električne energije za pogon sustava sa/bez <i>set back</i> temperature | 96 |
| Slika 65. | Potrošnja električne energije za pogon sustava ovisno regulaciji temperature povrata | 97 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Opći podaci o zgradi..... | 3 |
| Tablica 2. Dimenzije, površine i volumeni prostorija | 4 |
| Tablica 3. Površine i orijentacije elemenata vanjske ovojnice zgrade | 6 |
| Tablica 4. Podjela prostora na zone..... | 7 |
| Tablica 5. Koeficijenti prolaza topline neprozirnih elemenata zgrade..... | 8 |
| Tablica 6. Koeficijenti prolaza topline prozirnih elemenata vanjske ovojnice zgrade..... | 11 |
| Tablica 7. Koeficijenti prolaza topline elemenata vanjske ovojnice zgrade | 11 |
| Tablica 8. Korištene komponente u simulacijama | 31 |
| Tablica 9. Parametri komponente dizalice topline | 35 |
| Tablica 10. Parametri modela ventilokonvektora suterena | 38 |
| Tablica 11. Parametri modela ventilokonvektora prizemlja | 38 |
| Tablica 12. Parametri komponente spremnika PTV-a | 42 |
| Tablica 13. Parametri komponente međuizmjenjivača | 44 |
| Tablica 14. Ulazne varijable komponente Type 155..... | 44 |
| Tablica 15. Parametri komponente Type 155 | 45 |
| Tablica 16. Parametri komponenti Type 3 | 51 |
| Tablica 17. Postavne temperature komponenata Type 108..... | 59 |
| Tablica 18. Parametri komponente Type 34 | 63 |
| Tablica 19. Dnevni profil potrošnje PTV-a..... | 68 |
| Tablica 20. Protoci vode kroz podne registre pojedinih zona | 73 |
| Tablica 21. Protoci vode kroz ventilokonvektore | 74 |
| Tablica 22. Infiltracija zraka po zonama u sezoni hlađenja | 77 |
| Tablica 23. Maksimalna potrebna snaga grijanja po zonama | 78 |
| Tablica 24. Potrebna energija za grijanje po mjesecima u kWh | 80 |
| Tablica 25. Potrebna energija za hlađenje po mjesecima u kWh..... | 82 |
| Tablica 26. Maksimalna potrebna snaga hlađenja po zonama | 83 |
| Tablica 27. Rezultati simulacije godišnjeg rada termotehničkog sustava obiteljske kuće..... | 84 |
| Tablica 28. Izmijenjene toplinske energije preko pojedinih komponenti sustava | 85 |
| Tablica 29. Toplinska energija predana podnim grijanjem pojedinim zonama | 87 |
| Tablica 30. Rashladna energija predana podnim hlađenjem pojedinim zonama | 87 |
| Tablica 31. Rezultati simulacije rada sustava bez regulacije zasjenjenja | 92 |
| Tablica 32. Rezultati simulacije rada sustava bez regulacije infiltracije | 94 |
| Tablica 33. Rezultati simulacije godišnjeg rada termotehničkog sustava bez <i>set back</i> postavka | 96 |
| Tablica 34. Rezultati simulacije proizvodnje toplinske energije pri višoj temperaturi povrata..... | 97 |

SAŽETAK

U sklopu ovoga diplomskog rada izrađen je dinamički energetska model obiteljske kuće i termotehničkih sustava. Provedene su simulacije rada sustava te je izvršena njihova analiza. Obiteljska kuća definirane geometrije i građevinskih materijala nalazi se na području Kvarnera te koristi dizalicu topline zrak-voda za pripremu ogrjevnice i rashladne vode. Energetski model izrađen je pomoću računalnog paketa programa TRNSYS te se sastoji od sustava grijanja i hlađenja obiteljske kuće, pripreme potrošne tople vode i zagrijavanja vode vanjskog bazena. Model termotehničkih sustava nadograđen je regulacijskim elementima s ciljem optimizacije rada sustava. U radu je detaljno prikazan postupak izrade energetskog modela višezonske zgrade u korisničkom sučelju TRNBuild. Uz tehnički opis, pojašnjena je matematika energetskih modela svake komponente termotehničkog sustava. U posljednjem poglavlju prikazani su rezultati simulacija rada sustava. Simulacijama je utvrđena maksimalna potrebna snaga grijanja i hlađenja te je izračunata godišnja potrošnja energije za grijanje i hlađenje zgrade. Također je analiziran utjecaj regulacije termotehničkih sustava na potrošnju energije.

Ključne riječi: dinamička simulacija, energetski model, termotehnički sustav, regulacija sustava, dizalica topline, TRNSYS

SUMMARY

In the scope of this master's thesis a dynamic energy model of a family house and HVAC systems was developed. Simulations of the HVAC systems and their analysis were performed. The family house of defined geometry and building material is located in the Kvarner area and it uses an air-to-water heat pump for the preparation of heating and cooling water. The energy model was developed using computer software package TRNSYS and consists of family house heating and cooling system, domestic hot water preparation and water heating of an outdoor pool. The HVAC systems model was upgraded with control elements to optimize system operation. The thesis contains detailed description of multizone building energy model development in the user interface TRNBuild. Along with technical description, the mathematics of each HVAC system components' energy model is explained. In the last chapter the simulation results are shown. Maximum required heating and cooling power is determined with the simulations and the annual energy consumption for heating and cooling of the building is calculated. The influence of the HVAC system control is analyzed as well.

Key words: dynamic simulation, energy model, HVAC system, system control, heat pump, TRNSYS

1. UVOD

U sklopu ovoga rada načinjen je dinamički energetska model obiteljske kuće i termotehničkih sustava korištenjem računalnog programa TRNSYS. Obiteljska kuća nalazi se na području Kvarnera te kao izvor toplinske i rashladne energije koristi dizalicu topline. Dizalica topline se, osim za grijanje i hlađenje kuće, koristi za zagrijavanje potrošne tople vode te vode vanjskog bazena. Provođenjem simulacija detaljno je analiziran rad termotehničkog sustava na godišnjoj razini te utjecaj regulacije na potrošnju energije. Svrha ovakve analize je optimizacija rada termotehničkog sustava što u konačnici rezultira smanjenjem potrošnje energije te ekonomskim uštedama.

Dizalica topline je uređaj koji, koristeći se obnovljivim izvorima topline, zadovoljava potrebe grijanja i hlađenja u zgradi. Korištenjem dizalica topline neposredno neiskoristiva energija iz vanjskog zraka, tla ili vode pretvara se u toplinsku energiju. Pomoću električne energije pretvaraju toplinsku energiju iz okoline niže temperature u okolinu više temperature. U analiziranoj zgradi se u svrhu pokrivanja potreba za toplinskom i rashladnom energijom koristi dizalica topline u izvedbi zrak-voda. U takvoj izvedbi se dizalicom topline u sezoni grijanja s vanjskog zraka niže temperature prenosi toplina na ogrjevnu vodu niskotemperaturnog grijanja i pripreme PTV-a više temperature. Za vrijeme sezone hlađenja se toplina s rashladne vode niže temperature prenosi na vanjski zrak više temperature.

Korištenjem računalnog paketa TRNSYS postavljen je dinamički energetska model obiteljske kuće i termotehničkog sustava. TRNSYS (*a TRaNsient SYstem Simulation program*) je računalni program koji se koristi za dinamičke simulacije energetskih sustava. Najčešća primjena je kod simulacija solarnih sustava, sustava grijanja, hlađenja i ventilacije, kogeneracijskih sustava te niskoenergetskih zgrada i slično. Osim za simulaciju zgrada i sustava, koristi se za stvaranje novih energetskih koncepata i strategija upravljanja te analizu alternativnih sustava energije. Program na temelju parametara i ulaznih varijabli te međusobnoj povezanosti komponenti, postavlja energetske bilance. Sastoji se od dva dijela: procesora koji učitava i obrađuje ulazne varijable, iterativno rješava sustav jednadžbi i prikazuje izlazne varijable te baze komponenta kojima se modeliraju pojedini elementi sustava. TRNSYS računalni paket sastoji se od više programa. Glavno korisničko sučelje TRNSYS Simulation Studio omogućuje međusobno povezivanje komponenti te pokretanje simulacija. Dodatno korisničko sučelje TRNBuild koristi se za stvaranje modela višezonske

zgrade tako što na relativno pristupačan način omogućuje definiranje geometrijskih i termodinamičkih svojstva ovojnice zgrade, unutarnje toplinske dobitke, infiltraciju i ventilaciju, pogonske režime, uvjete toplinske ugodnosti i slično [1].

2. OPIS MODELA ZGRADE

Dinamički energetska model te analiza rađeni su za obiteljsku kuću definirane geometrije i građevinskih materijala, na području Kvarnera. Kuća je izgrađena na dvije etaže, suteran i prizemlje. U svrhu izrade modela, kuća je podijeljena na pet zona. Za izradu energetskog modela višezonske zgrade korišteno je sučelje TRNBuild, računalnog programa TRNSYS.

2.1. Fizika zgrade

2.1.1. Geometrija zgrade

Opći podaci o kući prikazani su u Tablica 1. Bruto površina zgrade obračunava se zbrajanjem površina mjerenih u razini podova određenih prema vanjskim mjerama obodnih zidova s oblogama (NN 93/2017). U bruto korisnu površinu uračunati su pregradni zidovi, dok u neto korisnu površinu nisu.

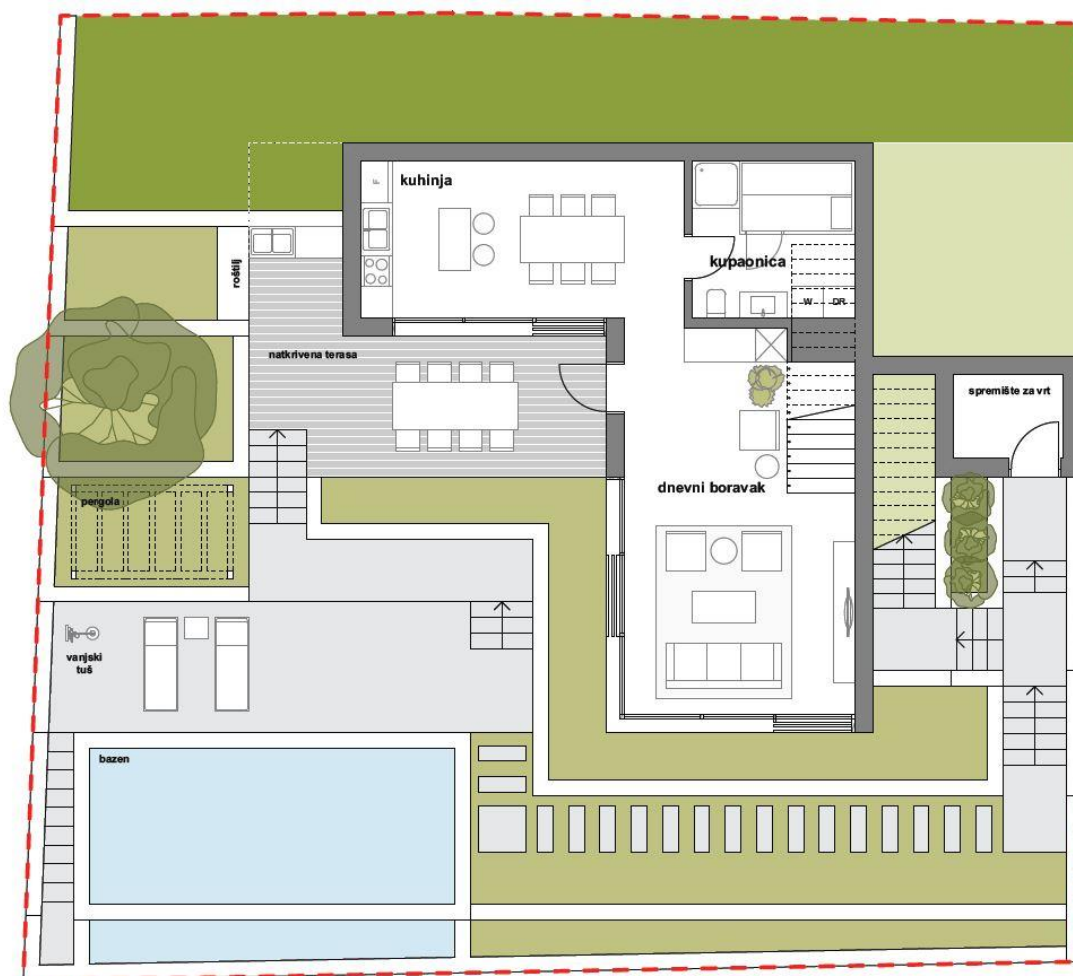
Tablica 1. Opći podaci o zgradi

| Parametar | Suteran | Prizemlje |
|--|---|---------------------|
| Bruto dimenzije d x š x v [m] | 10,15 x 3,70 x 3,15 + 7,60 x 5,10 x 3,15 | 11,95 x 6,40 x 3,30 |
| Bruto površina [m ²] | 76,31 | 76,48 |
| Bruto korisna površina [m ²] | 61,79 | 62,65 |
| Neto korisna površina [m ²] | 59,86 | 58,75 |
| Bruto volumen [m ³] | 240,37 | 301,86 |
| Bruto korisni volumen [m ³] | 166,83 | 212,29 |
| Neto korisni volumen [m ³] | 163,30 | 188,32 |
| Bruto/neto dimenzije bazena [m] | 7,60 x 3,60/7,00 x 3,00 | - |
| Bruto/neto površina bazena [m ²] | 27,36/21,00 | - |

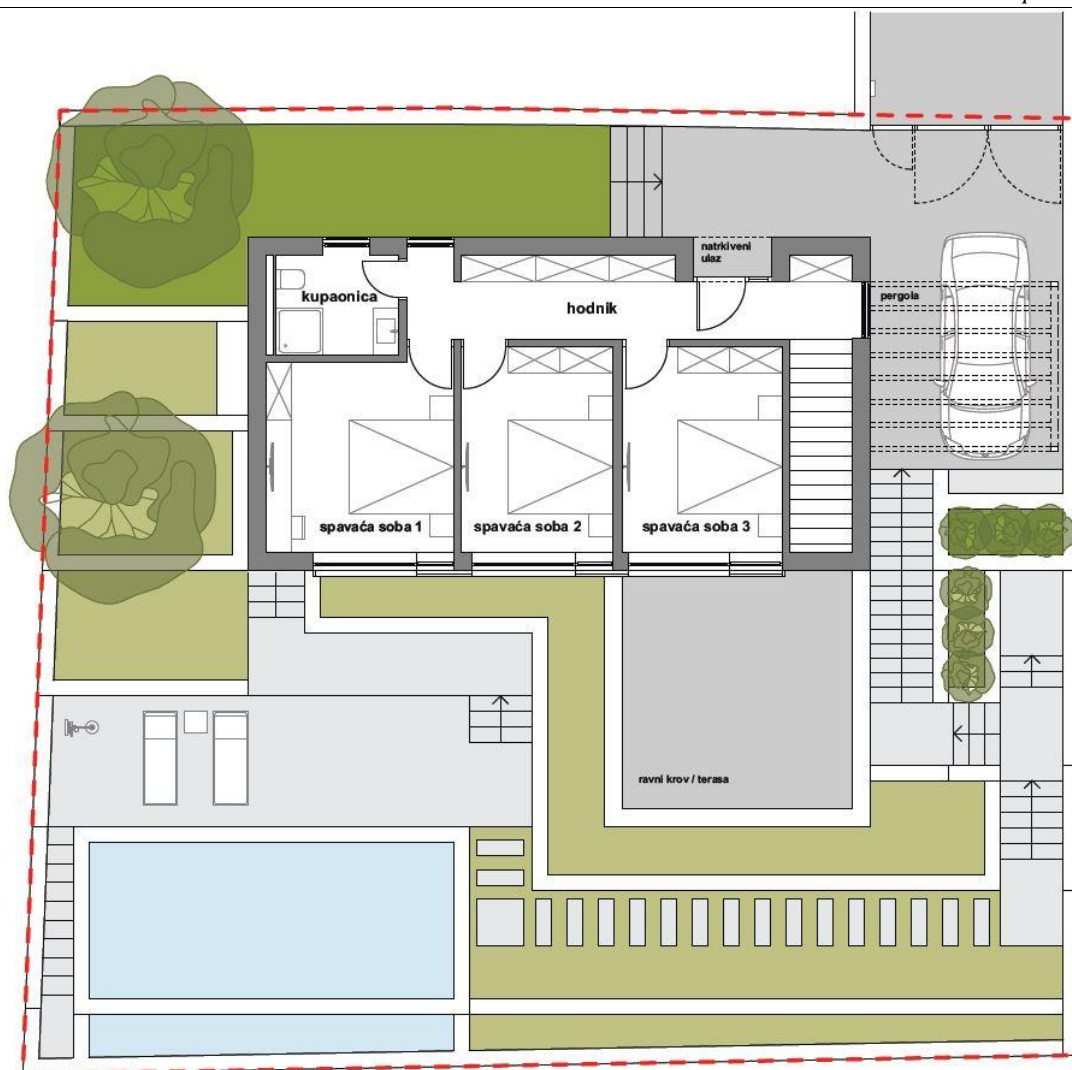
U suteranu kuće nalaze se dnevni boravak, kuhinja i kupaona [Slika 1.], dok se u prizemlju nalaze tri spavaće sobe, druga kupaona i hodnik [Slika 2.]. Izvan kuće nalazi se vanjski bazen. Dimenzije, površine i volumeni pojedinih prostora prikazani su u Tablica 2.

Tablica 2. Dimenzije, površine i volumeni prostorija

| Prostorija | Etaža | Osnovne neto dimenzije š x d x v [m] | Neto površina [m ²] | Neto volumen [m ³] |
|----------------|-----------|---|------------------------------------|-----------------------------------|
| Dnevni boravak | Suteren | 4,40 x 6,75 x 2,70 | 31,96 | 88,80 |
| Kuhinja | Suteren | 3,00 x 6,20 x 2,70 | 18,60 | 50,22 |
| Kupaona 1 | Suteren | 3,00 x 3,10 x 2,70 | 9,30 | 24,28 |
| Soba 1 | Prizemlje | 3,60 x 3,65 x 2,76 | 13,41 | 46,00 |
| Soba 2 | Prizemlje | 2,90 x 3,95 x 2,76 | 11,45 | 39,38 |
| Soba 3 | Prizemlje | 3,05 x 3,95 x 2,76 | 12,05 | 41,42 |
| Kupaona 2 | Prizemlje | 1,90 x 2,35 x 2,76 | 4,46 | 14,05 |
| Hodnik | Prizemlje | - | 17,38 | 47,47 |
| UKUPNO | | | 118,61 | 351,62 |



Slika 1. Tlocrt suterena



Slika 2. Tlocrt prizemlja

2.1.2. Vanjska ovojnica zgrade

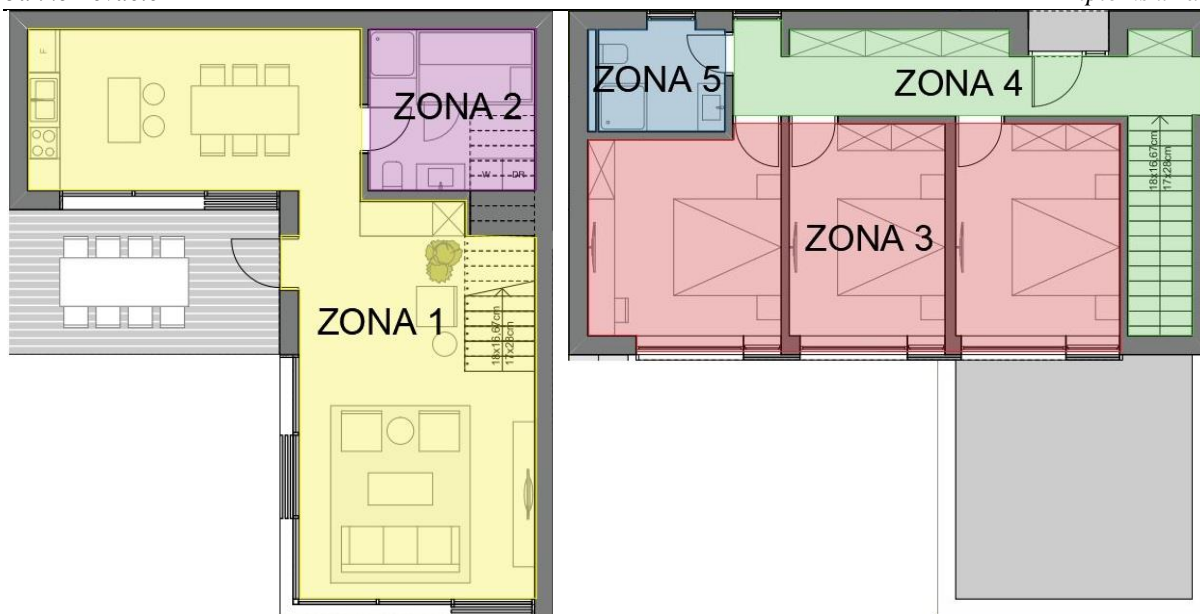
Ovojnica zgrade podrazumijeva obodne dijelove zgrade koji dijele unutarnji prostor od vanjskoga. Vanjsku ovojnicu analizirane zgrade čine vanjski zidovi, ravni i kosi krov, podovi, vrata te ostakljene površine. Površine i orijentacije elemenata vanjske ovojnice prikazani su u Tablica 3.

Tablica 3. Površine i orijentacije elemenata vanjske ovojnice zgrade

| Element | Površina [m ²] | | | | |
|---|----------------------------|---------------|--------------|---------------|----------------|
| | SI | JI | JZ | SZ | UKUPNO |
| Vanjski zid u prizemlju prema okolini (VZp) | 20,940 | 19,651 | 25,260 | 36,559 | 102,410 |
| Vanjski zid u suterenu prema okolini (VZs) | 14,840 | 11,017 | 17,610 | | 43,467 |
| Prozor (P) | 2,400 | 17,600 | | 4,000 | 24,000 |
| Staklena stijena (SS) | | 23,250 | 12,550 | | 35,800 |
| Zid prema tlu (ZpT) | 24,880 | | 5,040 | 31,972 | 61,892 |
| Vanjska vrata (VV) | | | 2,600 | 3,300 | 5,900 |
| Kosi krov (KK) | | 40,723 | | 40,723 | 81,445 |
| UKUPNO | 63,06 | 112,24 | 63,06 | 116,55 | 354,914 |
| Pod na tlu (PnT) | 76,561 | | | | 76,561 |
| Pod prema vanjskom zraku (PpV) | 26,279 | | | | 26,279 |
| Ravni krov (RK) | 24,990 | | | | 24,990 |
| UKUPNO | | | | | 482,744 |

2.1.3. Zone zgrade

Toplinska zona (*eng. thermal zone*) je cjelina unutar zgrade koja se sastoji od jednog ili više prostora sličnih karakteristika, a odvojena je od ostatka zgrade građevinskim elementima. Kuća je podijeljena na pet zona sukladno njihovoj namjeni [Slika 3.]. Zone se razlikuju prema postavnim (*eng. setpoint*) temperaturama u sezoni grijanja $T_{set,H}$ i broju izmjena zraka [Tablica 4.]. U suterenu dnevna soba i kuhinja zajedno čine jednu zonu (Zona 1) te kupaona suterena predstavlja drugu (Zona 2). U prizemlju jednu zonu čine zajedno tri spavaće sobe (Zona 3), dok ostale dvije zone predstavljaju hodnik (Zona 4) i kupaona prizemlja (Zona 5). Postavna temperatura u sezoni hlađenja za sve zone iznosi 26 °C. Grijanje i hlađenje svih zona izvedeno je podnim registrima, dok su u Zonama 1 i 3 dodatno postavljeni ventilokonvektori.



Slika 3. Podjela prizemlja (lijevo) i suterena (desno) na zone

Tablica 4. Podjela prostora na zone

| Zona | Etaža | Prostorije | $T_{set,H}$ [°C] | Infiltracija [h^{-1}] |
|------|-----------|--|------------------|---------------------------|
| 1 | Suteren | dnevna boravak kuhinja | 22 | 1,5 |
| 2 | Suteren | kupaona 1 | 24 | 1,5 |
| 3 | Prizemlje | spavaća soba 1 spavaća soba 2 spavaća soba 3 | 22 | 1 |
| 4 | Prizemlje | hodnik | 20 | 0,5 |
| 5 | Prizemlje | kupaona 2 prizemlje | 22 | 1,5 |

2.1.4. Koeficijenti prolaza topline

Vanjsku ovojnicu zgrade, pregradne zidove i međukatne konstrukcije čine različiti elementi koji se sastoje od određenih građevinskih slojeva. Tablica 5. prikazuje koeficijente prolaza topline neprozirnih elemenata vanjske ovojnice zgrade, pregradnih zidova te međukatne konstrukcije. Tablica 6. prikazuje koeficijente prolaza topline staklenih površina. Sastav građevinskih elemenata u tablicama prikazan je iznutra prema van.

Tablica 5. Koeficijenti prolaza topline neprozirnih elemenata zgrade

| Element | Sastav | Debljina [cm] | Gustoća [kg/m ³] | Toplinska vodljivost [W/mK] | Specifični toplinski kapacitet [J/kgK] |
|--|--|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|
| Vanjski zid u prizemlju prema okolini (VZp) | Vapneno-cementna žbuka | 2 | 1800 | 1 | 1000 |
| | Šuplji blokovi od gline | 19 | 1000 | 0,45 | 900 |
| | Polimerno-cementno ljepilo | 0,5 | - | - | - |
| | Izolacija ekspanzirani polistiren (EPS) | 8 | 21 | 0,037 | 1260 |
| | Polimerno-cementno ljepilo | 0,3 | - | - | - |
| | Tekstilno staklena mrežica | - | - | - | - |
| | Polimerno-cementno ljepilo | 0,2 | - | - | - |
| | Impregnirajući pretpremaz | - | - | - | - |
| Silikatna žbuka | 2 | 1800 | 0,9 | 1000 | |
| Vanjski zid u suterenu prema okolini (VZs) | Vapneno-cementna žbuka | 2 | 1800 | 1 | 1000 |
| | Armirani beton | 20 | 2500 | 2,6 | 1000 |
| | Polimerno-cementno ljepilo | 0,5 | - | - | - |
| | Izolacija ekspanzirani polistiren (EPS) | 8 | 21 | 0,037 | 1260 |
| | Polimerno-cementno ljepilo | 0,3 | - | - | - |
| | Tekstilno staklena mrežica | - | - | - | - |
| | Polimerno-cementno ljepilo | 0,2 | - | - | - |
| | Impregnirajući pretpremaz | - | - | - | - |
| Silikatna žbuka | 2 | 1800 | 0,9 | 1000 | |
| Zid prema tlu (ZpT) | Vapneno-cementna žbuka | 2 | 1800 | 1 | 1000 |
| | Armirani beton | 20 | 2500 | 2,6 | 1000 |
| | Hidroizolacija | 1 | 1100 | 0,23 | 1000 |

| | | | | | |
|--------------------------------|---|-------|----------|-----------|----------|
| | Izolacija ekstrudirana polistirenska pjena (XPS) | 10 | 50 | 0,04 | 1450 |
| Pod na tlu (PnT) | Keramičke pločice/parket | 2 | 2300/700 | 1,30/0,18 | 840/1600 |
| | Armirano cementni estrih | 6 | 2000 | 1,6 | 1100 |
| | Polietilenska folija | 0,015 | 1000 | 0,19 | 1250 |
| | Izolacija ekstrudirana polistirenska pjena (XPS) | 5 | 50 | 0,04 | 1450 |
| | Izolacija ekspanzirani polistiren (EPS) | 2 | 21 | 0,037 | 1260 |
| | Hidroizolacija | 1 | 1.100 | 0,23 | 1000 |
| | Armirani beton | 15 | 2.500 | 2,6 | 1000 |
| | Tucanik/šljunak | 15 | 1.700 | 0,81 | 1000 |
| Pod prema vanjskom zraku (PpV) | Parket | 2 | 700 | 0,18 | 1600 |
| | Armirano cementni estrih | 6 | 2.000 | 1,6 | 1100 |
| | Polietilenska folija | 0,015 | 1.000 | 0,19 | 1250 |
| | Elastificirani polistiren (EPS) | 3,5 | 30 | 0,042 | 1260 |
| | AB tlačna ploča | 6 | 2.500 | 2,6 | 1000 |
| | Blok ispuna | 14 | 500 | 0,3 | 1000 |
| | Izolacija ekspanzirani polistiren (EPS) | 8 | 21 | 0,037 | 1260 |
| | Hidroizolacija | 1 | 1100 | 0,23 | 1000 |
| | Prvi sloj građevinskog ljepila s armaturnom mrežicom | 0,3 | - | - | - |
| | Drugi sloj građevinskog ljepila s armaturnom mrežicom | 0,2 | - | - | - |
| | Impregnirani pretpremaz | - | - | - | - |
| | Silikatna žbuka | 2 | 1800 | 0,9 | 1000 |
| Kosi krov (KK) | Vapneno-cementna žbuka | 2 | 1800 | 1 | 1000 |
| | Armirani beton | 12 | 2500 | 2,6 | 1000 |
| | Izolacija ekspanzirani polistiren (EPS) | 12 | 21 | 0,037 | 1260 |
| | Zrak | 5 | - | - | - |

| | | | | | |
|-----------------------------------|--|-------|------|-------|------|
| | Daščana oplata | 2,4 | 650 | 0,13 | 1700 |
| | Paropropusna pričuvna hidroizolacija | 0,2 | - | - | - |
| | Kontra letve/zrak 3x5 cm | 3 | - | - | - |
| | Drvene gredice 5x8 cm | 5 | - | - | - |
| | Posebna žbuka | 6 | - | - | - |
| Ravni Krov (RK) | Vapneno-cementna žbuka | 2 | 1800 | 1 | 1000 |
| | AB tlačna ploča | 6 | 2500 | 2,6 | 1000 |
| | Blok ispuna | 14 | 500 | 0,3 | 1000 |
| | Parna brana | - | - | - | - |
| | Izolacija ekspanzirani polistiren (EPS) | 12 | 21 | 0,037 | 1260 |
| | Hidroizolacija | 1 | 1100 | 0,23 | 1000 |
| | Geotekstil | - | - | - | - |
| | Armirani cementni estrih | 4 | 2000 | 1,6 | 1100 |
| | Mrazootporne keramičke pločice u ljepilu | 1,5 | 2300 | 1,3 | 840 |
| Međukatna konstrukcija (MK) | Parket | 2 | 700 | 0,18 | 1600 |
| | Armirano cementni estrih | 6 | 2000 | 1,6 | 1100 |
| | Polietilenska folija | 0,015 | 1000 | 0,19 | 1250 |
| | Elastificirani polistiren (EPS) | 3,1 | 21 | 0,037 | 1260 |
| | AB tlačna ploča | 6 | 2500 | 2,6 | 1000 |
| | Blok ispuna | 14 | 500 | 0,3 | 1000 |
| | Vapneno-cementna žbuka | 2 | 1800 | 1 | 1000 |
| Pregradni zidovi (PZ) | Knauf zid s izolacijom | 15 | - | - | - |
| Vanjska vrata (VV) | Neprozirna vanjska drvena vrata | 5 | 700 | 0,18 | 1600 |

Tablica 6. Koeficijenti prolaza topline prozirnih elemenata vanjske ovojnice zgrade

| Element | Sastav | g_{\perp} [-] | F_c [-] | Koef. prolaza topline stakla U_g [W/m ² K] | Koef. prolaza topline prozora U_w [W/m ² K] |
|--|--|--------------------|--------------|---|--|
| Prozori (P); Staklene stijene (SS) | Aluminijski okvir, antracit boje, dvostruko izolirajuće staklo 4/16/4 s jednim staklom niske emisije (Low-E obloga) s napravom za zaštitu od sunčeva zračenja s vanjske strane (škure) | 0,6 | 0,3 | 1,1 | 1,4 |

Prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 128/115) stupanj propuštanja ukupne sunčeve energije kroz ostakljenje kod okomitog upada zračenja g_{\perp} iznosi 0,6 za dvostruko izolirajuće staklo s jednim staklom niske emisije (Low-E obloga). Faktor umanjenja naprave za zaštitu od sunčeva zračenja F_c iznosi 1 kada naprava ne postoji, a za žaluzine, rolete, škure i grilje iznosi 0,3. Koeficijenti prolaza topline elemenata vanjske ovojnice, pregradnih zidova i staklenih površina zgrade te zakonom dopuštene vrijednosti prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 128/15) za proračunsko područje Malog Lošinja prikazani su u Tablica 7.

Tablica 7. Koeficijenti prolaza topline elemenata vanjske ovojnice zgrade

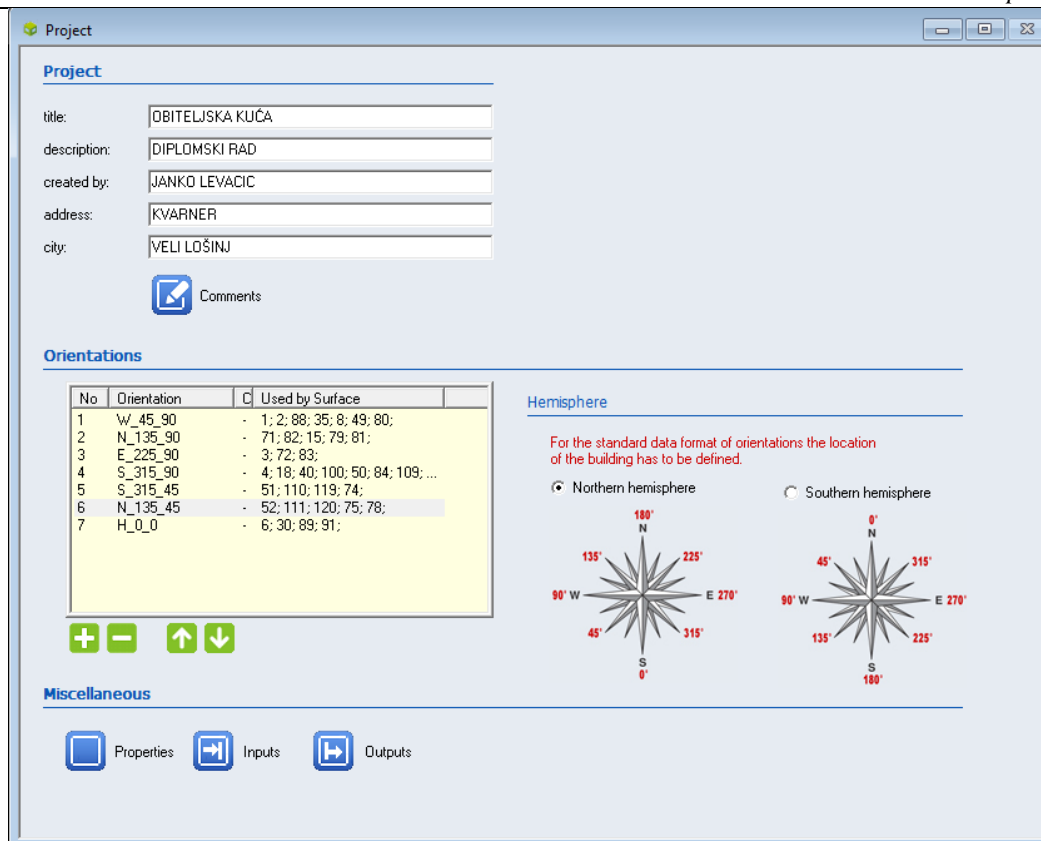
| Element | Koeficijent prolaza topline [W/m ² K] | Zakonom dopušteni koef. prolaza topline [W/m ² K] |
|---|---|---|
| Vanjski zid prema okolini u prizemlju (VZp) | 0,358 | 0,45 |
| Vanjski zid prema okolini u suterenu (VZs) | 0,408 | 0,45 |
| Zid prema tlu (ZpT) | 0,356 | 0,50 |
| Pod na tlu (PnT) – keramika | 0,435 | 0,50 |
| Pod na tlu (PnT) – parket | 0,417 | 0,50 |
| Stropovi iznad vanjskog zraka (PpV) | 0,258 | 0,30 |

| | | |
|-----------------------------|-------|------|
| Kosi krov (KK) | 0,273 | 0,30 |
| Ravni krov (RK) | 0,250 | 0,30 |
| Međukatna konstrukcija (MK) | 0,600 | 0,80 |
| Pregradni zidovi (PZ) | 0,407 | - |
| Vanjska vrata (VV) | 2,233 | 2,40 |
| Staklene stijene (SS) | 1,400 | 1,80 |
| Prozori (P) | 1,400 | 1,80 |
| Staklo prozora | 1,100 | 1,40 |

2.2. Opis rada u korisničkom sučelju TRNBuild

TRNBuild je sučelje računalnog programa TRNSYS za izradu energetskog modela višezonske zgrade. Pomoću njega moguće je izraditi datoteku u kojoj su opisana sva relevantna geometrijska i fizikalna svojstva zgrade. Zgrada se može podijeliti na više toplinskih zona za koje se zatim definiraju svojstva zidova i prozora, unutarnji toplinski dobici te karakteristike sustava grijanja, hlađenja i ventilacije. Korisnik određuje ulazne (*Input*) i izlazne varijable (*Output*) bitne za simulaciju. Nastala datoteka je tekstualna datoteka u ASCII kodu koju, prilikom simulacije u TRNSYS korisničkom sučelju Simulation Studio, koristi TRNSYS komponenta Type 56, odnosno model višezonske zgrade. Type 56 se potom unutar sučelja Simulation Studio povezuje preko ulaznih i izlaznih varijabli s drugim komponentama [2].

Nakon stvaranja nove datoteke modela višezonske zgrade u korisničkom sučelju TRNBuild, prvi korak je definiranje orijentacije zgrade. Odabire se Zemljina polutka na kojoj se zgrada nalazi te se definiraju strane svijeta ploha vanjske ovojnice zgrade. Strane svijeta definiraju se preko azimuta i nagiba plohe u odnosu na vertikalnu. Tako primjerice za vertikalni jugozapadni zid azimut iznosi 45° , a nagib plohe 90° [Slika 4.]. Osim podataka o orijentaciji, preko osnovnog prozora moguće je upravljati s pojedinim konstantama (*Properties*) te ulaznim i izlaznim varijablama (*Inputs*, *Outputs*) korištenim u daljnjim simulacijama.



Slika 4. TRNBuild – prozor inicijalizacije projekta

Prilikom pokretanja, osim prozora s osnovnim informacijama, otvara se navigacijski prozor (*TRNBuild Navigator*). Preko njega su u razgranatoj formi prikazani svi važni podaci o zonama. Također je moguće upravljati ulaznim i izlaznim varijablama, svojstvima i orijentacijama. Grana sa zonama prikazuje pojedine zone modela višezonske zgrade te je preko nje moguće upravljati zidovima i prozorima te režimima poput grijanja, hlađenja, infiltracije, toplinskih dobitaka i slično. Klikom na pojedinu zonu otvara se prozor te zone (*The Zone Window*) koji sadrži sve informacije o zoni [Slika 5]. Unutar njega potrebno je definirati volumen zone, a potom plohe i ostale podatke.

Airnodes

Airnode Regime Data

volume: 139.02 m³
 capacitance: 166.82 kJ/K
 ref. floor area: 1 m²

Therm. Zone

Walls, floors, ceilings, roofs (Total number: 19)

| surf-ID | surf-type | construction-type | area | category |
|---------|-----------|-------------------|-------|----------|
| 1 | WALL | VZS | 5.91 | EXTERNAL |
| 2 | WALL | VZS | 17.64 | EXTERNAL |
| 3 | WALL | VZS | 14.84 | EXTERNAL |
| 4 | WALL | VZS | 18.36 | EXTERNAL |
| 5 | WALL | PNT_KERAMIKA | 24.21 | BOUNDARY |
| 6 | WALL | RK | 24.99 | EXTERNAL |
| 9 | WALL | PZ | 8.78 | ADJACENT |
| 11 | WALL | ZPT | 2.21 | ADJACENT |

Windows (Total number: 3)

| surf-ID | surf-type | construction-type | area | category | u-Value | g-Value |
|---------|-----------|-------------------|-------|----------|---------|---------|
| 18 | WINDOW | SS_DNEVNA | 12.15 | EXTERNAL | 1.06 | 0.626 |

Surface 4 Properties:

surface-ID: 4
 surface-type: wall
 construction-type: VZS
 area: 18.36 m² incl. windows
 category: EXTERNAL
 geosurf: 0
 surf. gain inside: 0 kJ/h
 surf. gain outside: 0 kJ/h
 orientation: S_315_90
 view fac. to sky: 0.5
 external shad. factor: 0

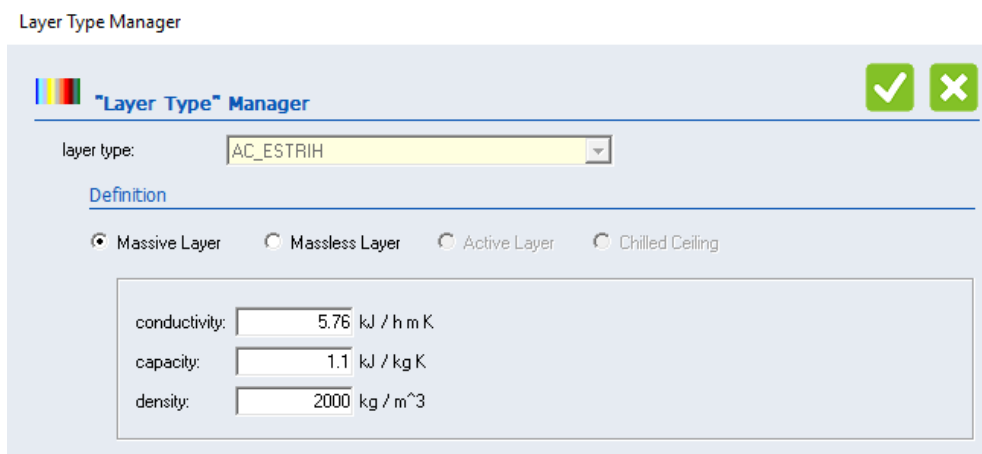
Surface 18 Properties:

surface-ID: 18
 surface-type: window
 construction-type: SS_DNEVNA
 area: 12.15 m²
 category: EXTERNAL
 geosurf: 0
 surf. gain inside: 0 kJ/h
 surf. gain outside: 0 kJ/h
 orientation: S_315_90
 view fac. to sky: 0.5
 internal shad. factor: 0
 external shad. factor: 1.1 ZASJENJENJE

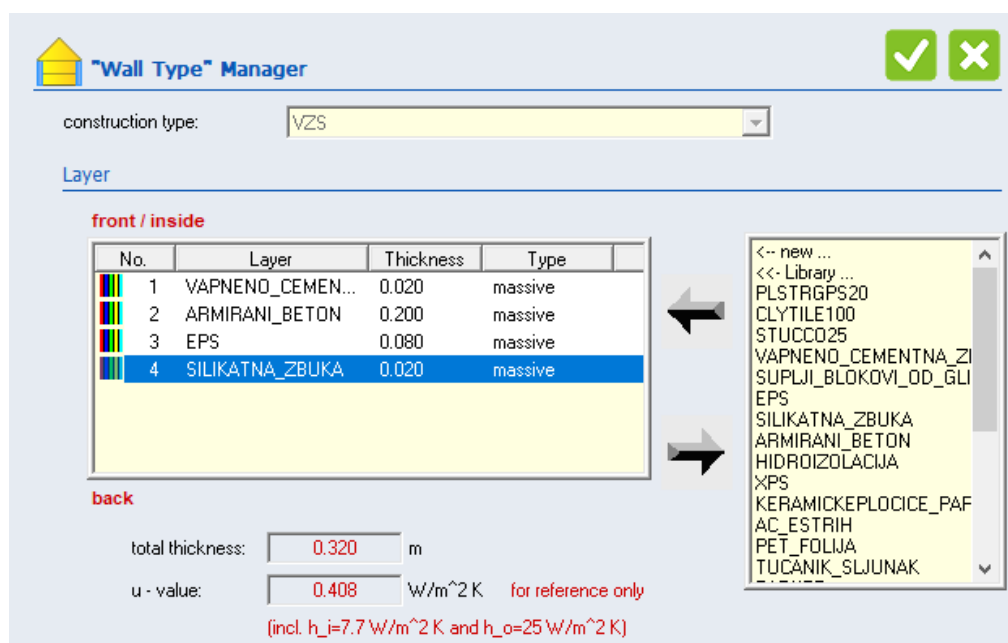
Slika 5. TRNBuild – prozor zone

2.2.1. Definiranje zidova

Za početak je potrebno definirati tip zida pomoću padajućeg izbornika *Wall type*. Tip zida moguće je odabrati iz kataloga unutar samog programa ili definirati novi zid. Kako bi se mogli kreirati vlastiti zidovi prema Tablica 7. potrebno je definirati slojeve sa svojstvima [Tablica 5.]. Slojevi se definiraju pomoću opcije “*Layer Type*“ *Manager* upisivanjem toplinske vodljivosti, specifičnog toplinskog kapaciteta i gustoće [Slika 6]. Nakon što se definiraju pojedini slojevi, zid se kreira pomoću opcije “*Wall Type*“ *Manager* [Slika 7]. Program na temelju odabranih slojeva računa ukupnu debljinu zida te koeficijent prolaza topline (*u-value*). Za izračun koeficijenta prolaza topline pretpostavlja se koeficijent prijelaza topline 7,7 W/(m²K) s unutarnje te 25 W/(m²K) s vanjske strane zida.



Slika 6. TRNBuild – definiranje slojeva zida



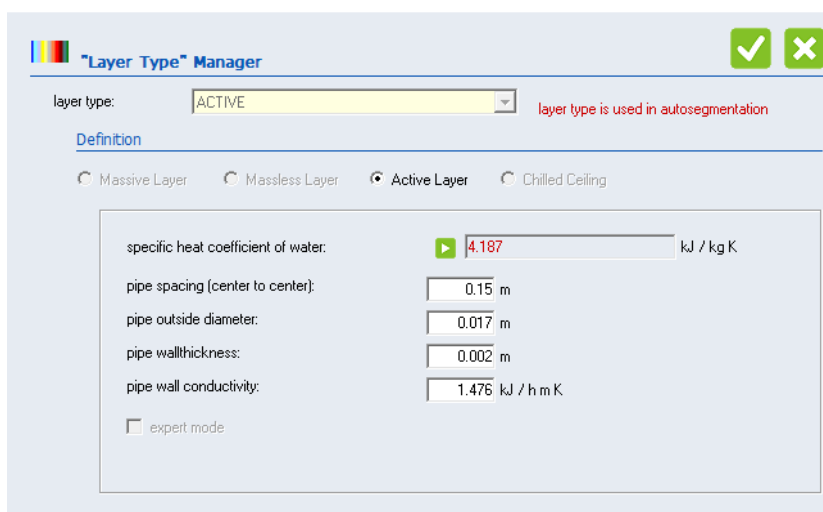
Slika 7. TRNBuild – kreiranje zida

Nakon odabira vrste zida upisuje se površina istog te se odabire jedna od četiri moguće kategorije. Kategorije zidova su sljedeće: EXTERNAL, INTERNAL, ADJACENT i BOUNDARY. Kategorija EXTERNAL odnosi se na zidove koji graniče s vanjskim okolišem. INTERNAL zidovi se nalaze unutar same zone te su s obje strane izloženi istim uvjetima. To su primjerice pregradni zidovi spavaćih soba koje zajedno čine jednu zonu. ADJACENT zidovi graniče s drugom toplinskom zonom, npr. međukatna konstrukcija. Zidovi kategorije BOUNDARY definirani su nekim rubnim uvjetom. Zidovi takvog tipa rađeni u sklopu ovog rada izloženi su tlu za koje se pretpostavlja konstantna temperatura od 15 °C tijekom cijele

godine. Za svaki zid potrebno je odabrati orijentaciju prema strani svijeta te faktor vidljivosti neba (eng. *view factor to the sky*) kojim se definira udio neba vidljivog s površine promatranog zida. Za vertikalne zidove taj faktor iznosi 0,5, ako nema nikakvih prepreka izmjeni topline zračenjem s nebom, a za horizontalne krovove jednak je jedinici, s obzirom da se pretpostavlja kako je cijelo nebo vidljivo s horizontalne plohe.

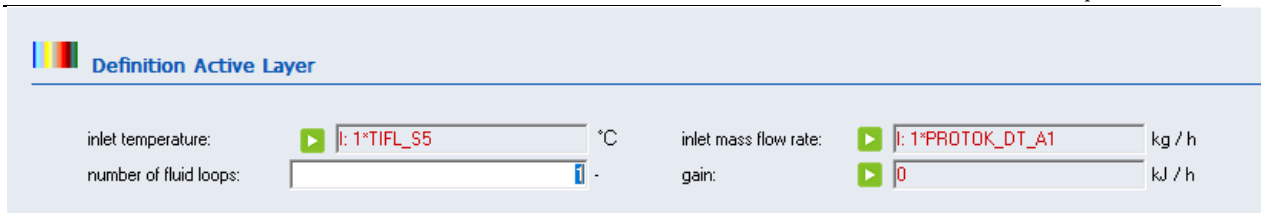
2.2.2. Definiranje aktivnog sloja

Obiteljska kuća, za koju se radi energetski model, za grijanje i hlađenje zona koristi podne registre kroz koje struji ogrjevna, odnosno rashladna voda. Kako bi se moglo modelirati podno grijanje, odnosno hlađenje, potrebno je definirati aktivne slojeve (*Active Layer*) koji sadrže cijevne registre. Definiranje aktivnog sloja vrši se također pomoću opcije “*Layer Type*“ *Manager* [Slika 8]. Unutar ove opcije potrebno je upisati razmak između cijevi, vanjski promjer, debljinu stijenke te toplinsku vodljivost cijevi. Korištene su cijevi od umreženog polietilena (PE-X) promjera 17 mm, debljine stijenke 2 mm te razmaka među njima od 150 mm. Toplinska vodljivost cijevi iznosi 0,41 W/mK.



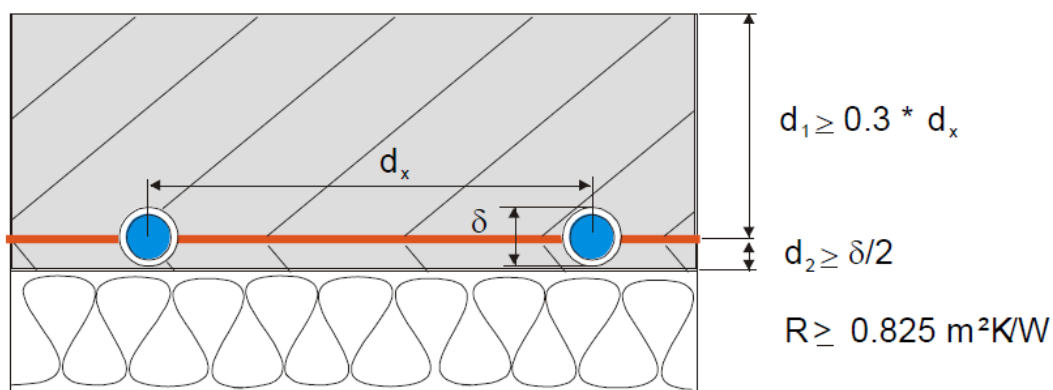
Slika 8. TRNBuild – definiranje aktivnog sloja

Nakon kreiranja aktivnog sloja pomoću opcije “*Layer Type*“ *Manager* potrebno je definirati ulaznu temperaturu i protok, broj petlji te eventualne toplinske dobitke [Slika 9]. Ulazne temperature i protoci pojedinih zona definirani su kao ulazne varijable (*Inputs*) dobivene povezivanjem s drugim komponentama unutar sučelja Simulation Studio što će biti detaljnije objašnjeno u nadolazećim poglavljima.



Slika 9. TRNBuild – specificiranje aktivnog sloja

Kako bi se u programu definiralo podno grijanje i hlađenje potrebno je zadovoljiti određene uvjete [Slika 10]. Debljina sloja iznad aktivnog d_1 mora minimalno iznositi tri udaljenosti razmaka između cijevi d_x . Definiranjem aktivnog sloja automatski se stvara sloj identičan sloju iznad aktivnog. Debljina tog sloja d_2 mora minimalno iznositi pola vanjskog promjera cijevi δ . Toplinski otpor R izolacijskog sloja koji se potom postavlja mora minimalno iznositi $0.825 \text{ m}^2\text{K/W}$.



Slika 10. Zid s aktivnim slojem za podno grijanje i hlađenje [2]

2.2.3. Definiranje prozora

Prozori se, poput zidova, prije odabira moraju prethodno definirati pomoću opcije “Window Type“ Manager ili ga je moguće odabrati iz ponuđenog kataloga. Za potrebe ovog rada odabrani su prozori s dvostrukim izolirajućim staklom 4/16/4 s jednim staklom niske emisije (Low-E obloga) čije vrijednosti odgovaraju Tablica 6.

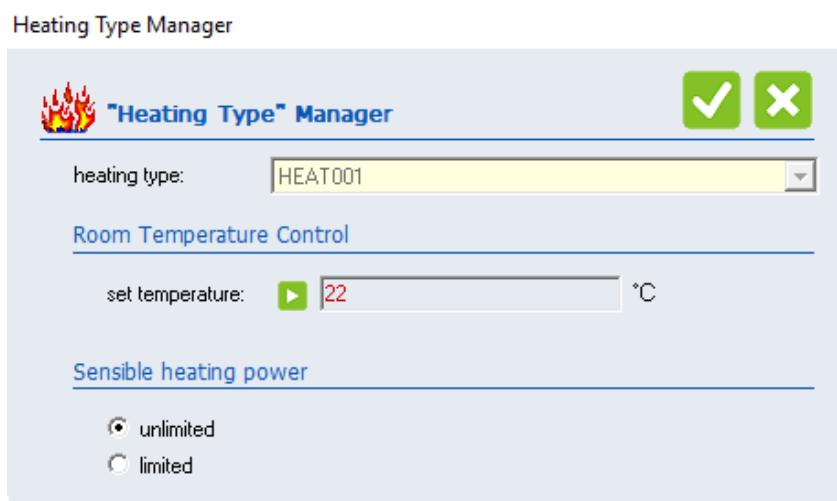
2.2.4. Infiltracija zraka

Infiltracija zraka se pomoću opcije “*Infiltration Type*“ *Manager* unosi za pojedine zone kao konstantna vrijednost ili ulazna varijabla. U analiziranoj zgrade regulira se infiltracija zraka u zone te se u komponentu Type 56 unosi u obliku ulazne varijable [Poglavlje 3.4.6.].

2.2.5. Grijanje i hlađenje

Grijanje se definira u opciji “*Heating Type*“ *Manager* gdje se unose postavne temperature i snage grijanja za pojedinu zonu. Tip grijanja se ne koristi, ako je izvan Type 56 definiran termotehnički sustav. S obzirom kako se energetska model višezonske zgrade koristi za dinamičku simulaciju termotehničkog sustava, ova opcija ostaje isključena. Temperature u zonama su izlazne varijable koje se mijenjaju u svakom trenutku simulacije, a ogrjevna snaga se dobiva od ogrjevnog medija čija se temperatura i protok unose kao ulazne varijable što je detaljnije opisno u Poglavlju 3. Isto vrijedi i za hlađenje koje se definira u opciji “*Cooling Type*“ *Manager*.

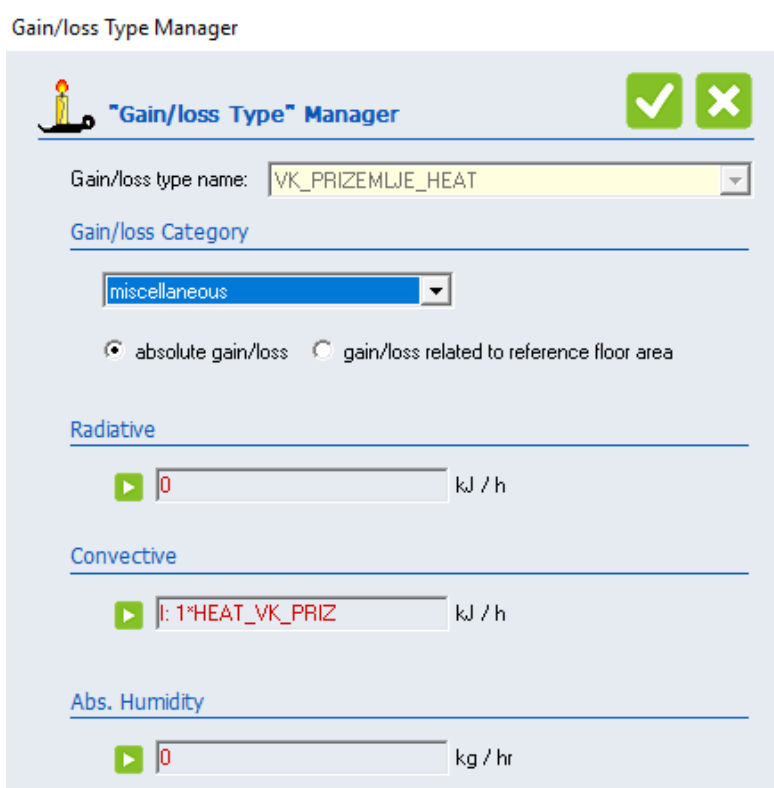
U svrhu simulacija godišnjih potreba za ogrjevnom i rashladnom energijom te simulacija maksimalnih snaga grijanja i hlađenja u “*Heating Type*“ *Manager* unose se postavne temperature zona prema Tablica 4. [Slika 11.], dok se u “*Cooling Type*“ *Manager* unosi za sve zone postavna temperatura 26 °C. Na taj način moguće je simulacijama ustanoviti godišnje energije te maksimalne snage potrebne za održavanje zadanih postavnih temperatura u zonama što je detaljnije opisno u Poglavlju 4.



Slika 11. TRNBuild – grijanje

2.2.6. Unutarnji toplinski dobitci

Unutarnji toplinski dobitci od ljudi, opreme i rasvjete su zanemareni u sklopu ovog rada. U svrhu izrade dinamičkog energetskog modela termotehničkog sustava potrebno je izmijenjenu toplinu između vode koja struji ventilokonvektorima i zraka prostorije unesti kao ulaznu varijablu unutarnjih toplinskih dobitaka. U sučelju Simulation studio iz komponente ventilokonvektora (Type 600), komponenta višezonske zgrade Type 56 prima *Input* o izmijenjenoj energiji, a kao *Output* šalje informaciju u Type 600 o stanju zraka u prostoriji. Pomoću opcije “Gain Type“ Manager definirana je izmijenjena toplinska i rashladna energija kao *Input* za zone koje sadrže ventilokonvektore [Slika 12.].



Slika 12. TRNBuild – definiranje unutarnjih toplinskih dobitaka

2.3. Matematički model višezonske zgrade – Type 56 [2]

Type 56 je TRNSYS komponenta koja omogućuje simulaciju nestacionarnih toplinskih tokova unutar višezonske zgrade. Komponenta se temelji na modelu energetskih bilanci koje se postavljaju za volumen zraka pojedine definirane zone te za sve unutarnje i vanjske površine. Toplinska zona u komponenti Type 56 određena je volumenom i toplinskim kapacitetom zraka zone.

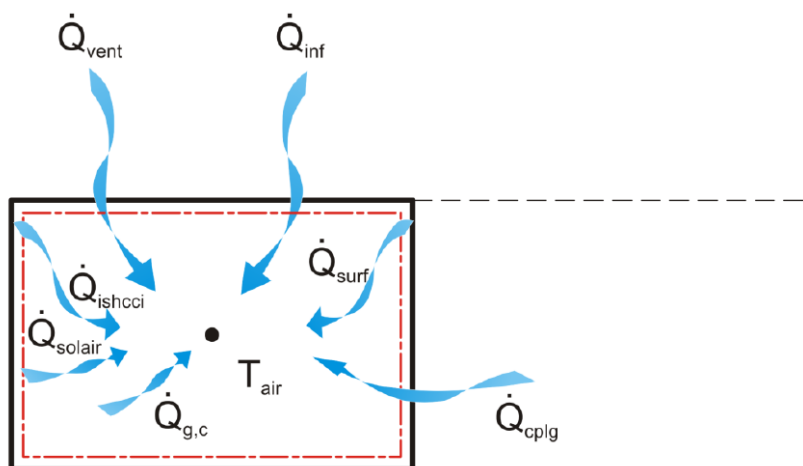
2.3.1. Konvektivni toplinski tok u zonu

Ukupni konvektivni toplinski tok predan zoni [Slika 13.] definiran je jednačbom:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{solar,i} + \dot{Q}_{ISHCCI,i} \quad [W] \quad (1)$$

gdje je:

- $\dot{Q}_{surf,i}$ konvektivni toplinski dobitak od unutarnjih površina zone [W]
- $\dot{Q}_{inf,i}$ infiltracijski dobitci zone [W]
- $\dot{Q}_{vent,i}$ ventilacijski dobitci zone [W]
- $\dot{Q}_{g,c,i}$ unutarnji konvektivni dobitci zone [W]
- $\dot{Q}_{cplg,i}$ toplinski dobitci uslijed strujanja zraka iz susjedne zone ili zadanog rubnog uvjeta [W]
- $\dot{Q}_{solar,i}$ dio Sunčevog zračenja koji ulazi u zonu kroz vanjske prozore te trenutno prelazi u konvektivne toplinske dobitke zone [W]
- $\dot{Q}_{ISHCCI,i}$ apsorbirano Sunčevo zračenje na unutarnjim zasjenjenjima zone koje prelazi u konvektivne toplinske dobitke zone [W]



Slika 13. Toplinska bilanca zraka zone [2]

2.3.2. Toplinski tok izmijenjen zračenjem prema zidovima unutar zone

Toplinski tok zračenjem prema zidovima unutar zone definiran je jednadžbom:

$$\dot{Q}_{r,w_i} = \dot{Q}_{g,r,i,w_i} + \dot{Q}_{sol,w_i} + \dot{Q}_{long,w_i} + \dot{Q}_{wall-gain} \quad [W] \quad (2)$$

pri čemu su:

\dot{Q}_{g,r,i,w_i} toplinski tok zračenjem prema zidu od unutarnjih izvora [W]

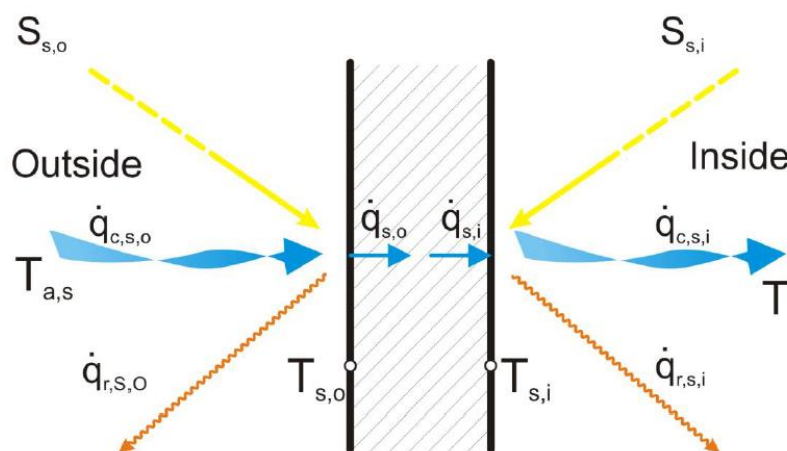
\dot{Q}_{sol,w_i} dobici od Sunca za zid [W]

\dot{Q}_{long,w_i} izmjena topline zračenjem između promatranog zida i ostalih ploha [W]

$\dot{Q}_{wall-gain}$ toplinski tok predan zidu, zadan od strane korisnika [W]

2.3.3. Model prolaza topline kroz zidove i prozore

Toplinski tok i temperature koje karakteriziraju izmjenu topline između zone i vanjskog okoliša odvijaju se konvekcijom, provođenjem i zračenjem preko vanjskog zida [Slika 14]. Prozor se toplinski smatra vanjskim zidom bez termalne mase, djelomično propusnim za solarne dobitke, ali nepropustan za unutarnje dobitke dugovalnim zračenjem.



Slika 14. Toplinski tokovi i temperature na vanjskoj i unutarnjoj strani zida [2]

Oznake korištene na slici su sljedeće:

$S_{s,i}$ toplinski tok zračenjem apsorbiran na unutarnjoj površini – uključuje dobitke od Sunca i dobitke dugovalnim zračenjem [W/m^2]

$S_{s,o}$ toplinski tok zračenjem apsorbiran na vanjskoj površini – uključuje samo dobitke od Sunca [W/m^2]

$\dot{q}_{r,s,i}$ toplinski tok izmijenjen zračenjem sa svim ostalim površinama zone [W/m^2]

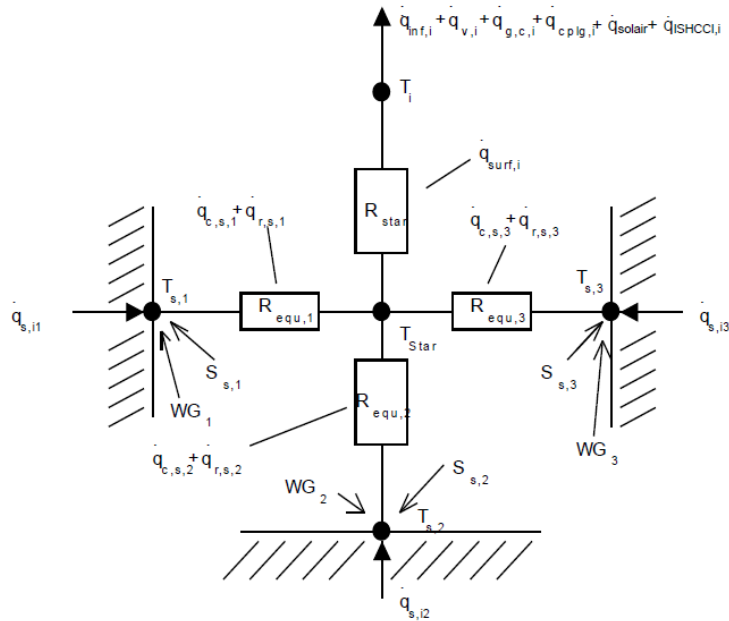
| | |
|-------------------|---|
| $\dot{q}_{r,s,o}$ | toplinski tok izmijenjen zračenjem sa svim površinama izvan zone [W/m^2] |
| $\dot{q}_{c,s,i}$ | konvektivni toplinski tok s unutarnje površine na zrak u zoni [W/m^2] |
| $\dot{q}_{c,s,o}$ | konvektivni toplinski tok s vanjskog zraka na vanjsku površinu [W/m^2] |
| $\dot{q}_{s,i}$ | toplinski tok od zida na unutarnjoj površini uslijed provođenja [W/m^2] |
| $\dot{q}_{s,o}$ | toplinski tok u zid s vanjske površine uslijed provođenja [W/m^2] |
| $T_{s,i}$ | temperatura unutarnje površine [$^{\circ}\text{C}$] |
| $T_{s,o}$ | temperatura vanjske površine [$^{\circ}\text{C}$] |

2.3.3.1. Star network model

Star network model je matematički model korišten unutar komponente Type 56 [Slika 15]. Služi za simulaciju izmjene topline između ploha i zraka unutar zone. Modelom se aproksimira izmjena topline dugovalnim zračenjem između ploha unutar zone te prijenos topline konvekcijom s površina na zrak zone. Model koristi fiktivnu temperaturu T_{star} i fiktivni otpor prijelazu topline R_{star} kojim obuhvaća paralelno toplinski tok konvekcijom s površina zidova na zrak te zračenjem na druge zidove i prozore (3).

$$R_{star,i} = \frac{1}{\dot{Q}_{surf,i}} (T_{star} - T_i) \quad [\text{K/W}] \quad (3)$$

| | |
|--------------|--|
| $R_{star,i}$ | fiktivni otpor prijelazu topline star network modela [K/W] |
| T_{star} | fiktivna temperatura star network modela [K] |
| T_i | temperatura zraka u zoni [K] |



Slika 15. Star network model [2]

Za svaku površinu zone određuje se ekvivalentni otpor prijelazu topline zračenjem i konvekcijom $R_{equiv,i}$. Izračunati ekvivalentni otpori koriste se za izračun kombiniranog toplinskog toka zračenjem i konvekcijom (5). Ukupni toplinski tok s unutarnje površine zone je suma toplinskih tokova zračenjem i konvekcijom s pojedine površine:

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \dot{q}_{c,s,i} + \dot{q}_{r,s,i} \quad [\text{W/m}^2] \quad (4)$$

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equiv,i} A_{s,i}} (T_{s,i} - T_{star}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (5)$$

$\dot{q}_{comb,s,i}$ kombinirani toplinski tok zračenjem i konvekcijom s unutarnjih površina zone $[\text{W/m}^2]$

$A_{s,i}$ površina promatrane unutarnje plohe $[\text{m}^2]$

$R_{equiv,i}$ ekvivalentni otpor prijelazu topline zračenjem i konvekcijom $[\text{K/W}]$

Na vanjskim površinama zone toplina se konvektivno izmjenjuje s vanjskim zrakom te dugovalnim zračenjem s nebom i tlom. Dok jednađbe (4) i (5) vrijede za unutarnje površine, jednađbe koje slijede vrijede za vanjske površine. Ukupni toplinski tok na vanjsku površinu zida jednak je razlici konvektivnog toplinskog toka sa zraka te toplinskog toka zračenjem s površine:

$$\dot{q}_{comb,s,o} = \dot{q}_{c,s,o} - \dot{q}_{r,soi} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6)$$

Konvektivni prijelaz topline na vanjskoj površini zida jednak je:

$$\dot{q}_{c,s,o} = \alpha_{s,o}(T_{a,s} - T_{s,o}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (7)$$

gdje je:

$\alpha_{s,o}$ koeficijent prijelaza topline na vanjskoj površini zida [$\text{W/m}^2\text{K}$]

$T_{a,s}$ temperatura vanjskog zraka [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{s,o}$ temperatura vanjske površine zida [$^{\circ}\text{C}$]

Za vanjske površine zidova, izmjena topline dugovalnim zračenjem na vanjskoj površini eksplicitno je definirana temperaturom neba T_{sky} i faktorom vidljivosti neba $f_{s,sky}$ (eng. *view factor to the sky*) te fiktivnom temperaturom tla T_{sgrd} i faktorom pogleda ($1 - f_{s,sky}$) (eng. *view factor*). Tim dvjema temperaturama se, prema jednadžbi (8), računa fiktivna temperatura T_{fsky} korištena za izračun topline izmijenjene dugovalnim zračenjem, prema jednadžbi (9), između vanjske površine zida te neba i tla.

$$T_{fsky} = (1 - f_{s,sky}) \cdot T_{sgrd} - f_{s,sky} \cdot T_{sky} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8)$$

$$\dot{q}_{r,s,o} = \sigma \cdot \varepsilon_{s,o} \cdot (T_{s,o}^4 - T_{fsky}^4) \quad [\text{W/m}^2] \quad (9)$$

T_{fsky} fiktivna temperatura neba [$^{\circ}\text{C}$]

T_{sgrd} temperatura tla [$^{\circ}\text{C}$]

T_{sky} temperatura neba

$f_{s,sky}$ faktor vidljivosti neba [-]

σ Stefan – Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

$\varepsilon_{s,o}$ dugovalna emisivnost vanjske površine zida [-]

Energetske bilance na unutrašnjim i vanjskim površinama opisane su sljedećim jednadžbama:

$$\dot{q}_{s,i} = \dot{q}_{comb,s,i} + S_{s,i} + Wallgain \quad [W/m^2] \quad (10)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \dot{q}_{comb,s,o} + S_{s,o} \quad [W/m^2] \quad (11)$$

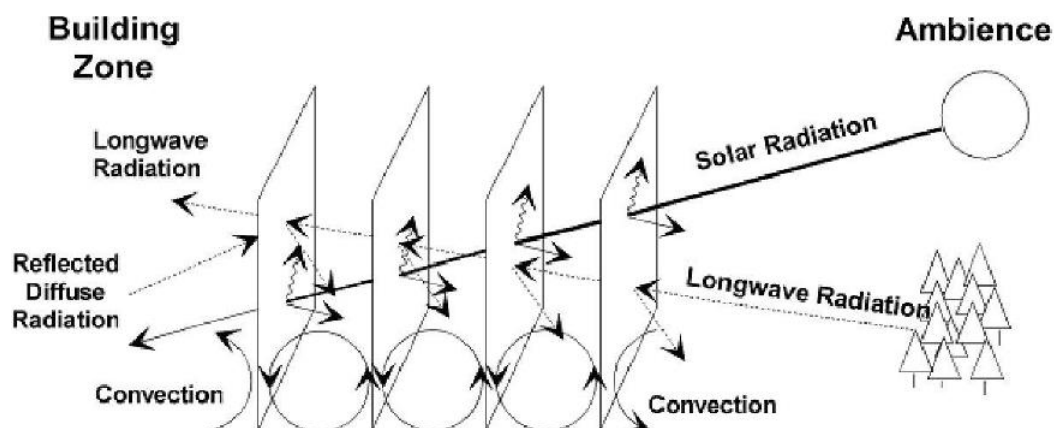
Član $S_{s,i}$ u jednadžbi (10) predstavlja zajedno sunčevo zračenje i dugovalno zračenje od objekata poput ljudi i namještaja koji se nalaze u zoni. Član $S_{s,o}$ u jednadžbi (11) predstavlja isključivo sunčevo zračenje na vanjsku površinu zida. Član *Wallgain* predstavlja dodatni toplinski tok prema zidu kojeg definira korisnik.

2.3.4. Optički i toplinski model prozora

U komponentu Type 56 ukomponiran je detaljan model prozora koji koristi program WINDOW 4.1, razvijen u laboratoriju Lawrence Berkeley u SAD-u. Program računa propusnost, refleksiju i apsorpciju Sunčevog zračenja za prozor koji se može sastojati od najviše šest slojeva stakla te do pet različitih slojeva plina između.

Svaki sloj stakla ima svoj temperaturni čvor, a unutrašnji sloj je povezan *star network* modelom sa T_{star} temperaturom. Vanjsko staklo povezano je putem konvektivne izmjene topline s temperaturom vanjskog zraka $T_{a,o}$ te putem izmjene topline dugovalnim zračenjem s fiktivnom temperaturom neba T_{sky} . Model zanemaruje toplinske kapacitete prozorskog okvira te plinovite ispune između slojeva stakla.

Za svako staklo prozora računa se temperatura uzimajući u obzir propusnost, apsorpciju i refleksiju direktnog i difuznog sunčevog zračenja, kratkovalnog difuznog zračenja, zračenja reflektiranog od zidova zone ili unutarnjeg zasjenjenja te izmjenu topline konvekcijom, provođenjem i dugovalnim zračenjem između pojedinih stakala i s unutarnjim i vanjskim prostorom [Slika 16.].



Slika 16. Detaljan model prozora [2]

3. OPIS MODELA TERMOTEHNIČKOG SUSTAVA

Analizirana stambena zgrada sastoji se od dvije etaže s pet grijanih, odnosno hlađenih zona. U zgradi je predviđeni sustav centralnog toplovodnog niskotemperaturnog grijanja te hlađenja s dizalicom topline zrak-voda kao izvorom ogrjevnog, odnosno rashladnog učina. Kao ogrjevna/rashladna tijela predviđeni su podni cijevni registri i ventilokonvektori. Podni registri služe za grijanje/hlađenje svih zona, dok su ventilokonvektori namijenjeni za zonu koju čine dnevni boravak i kuhinja te zonu spavaćih soba. Dizalicom topline, osim zona zgrade, grije se voda vanjskog bazena te se tijekom cijele godine zagrijava potrošna topla voda. Energetski model termotehničkog sustava i pripadajuće regulacije kreiran je u sučelju Simulation Studio računalnog programa TRNSYS pomoću kojega su provedene simulacije na godišnjoj razini.

3.1. Tehnički opis termotehničkog sustava

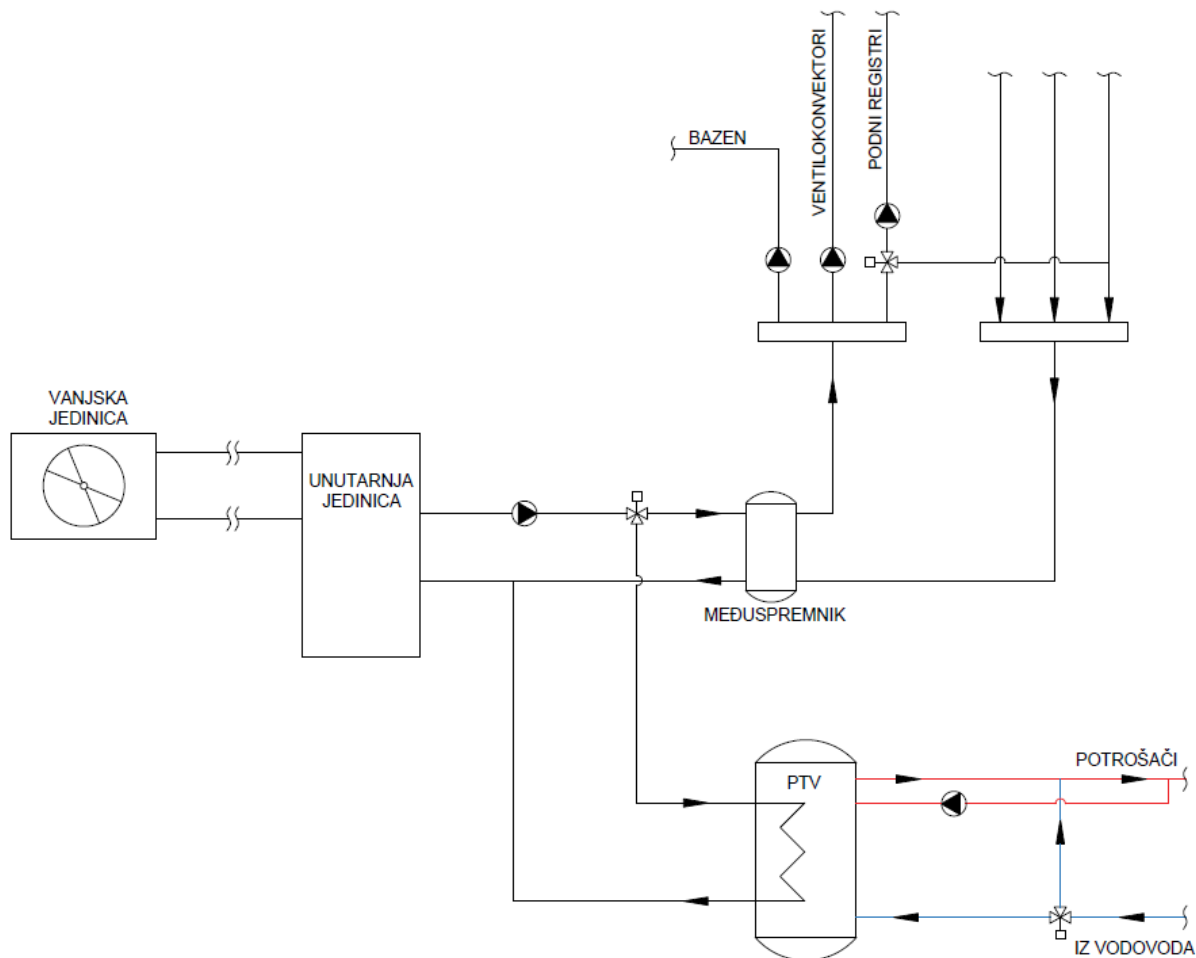
U zgradi se koristi dizalica topline Daikin Altherma s odvojenom vanjskom i unutarnjom jedinicom (Split sustav). Model korištene vanjske jedinice je ERLQ011CW1, a model unutarnje EH VX11S26CB9W [Slika 17.]. Dizalica topline pomoću vanjske jedinice izmjenjuje toplinu između zraka i radne tvar R-410A koju transportira do izmjenjivača topline u unutarnjoj jedinici preko kojeg vrši izmjenu topline s vodom pritom ju zagrijavajući, odnosno hladeći. Nazivni toplinski učin u radnoj točki A7/W45 pri $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ iznosi 11 kW (temperatura vanjskog zraka $7 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura polaza vode $45 \text{ }^\circ\text{C}$, porast temperature vode za $5 \text{ }^\circ\text{C}$ na kondenzatoru). Nazivni rashladni učin u radnoj točki A35/W7 pri $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ iznosi 11,7 kW (temperatura vanjskog zraka $35 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura polaza vode $7 \text{ }^\circ\text{C}$, pad temperature vode za $5 \text{ }^\circ\text{C}$ na isparivaču) [3].

Unutarnja jedinica dizalice topline dolazi s integriranim spremnikom PTV-a volumena 300 litara. U spremniku se nalazi izmjenjivač topline sa spiralnim bakrenim cijevima. Ogrjevna voda struji kroz cijevi izmjenjivača te preko njih predaje toplinu PTV-u. Površina za izmjenu topline iznosi $3,5 \text{ m}^2$. Između cjevovoda tople vode i svježje vode iz vodovoda ugrađuje se troputni miješajući ventil kojim se sprječava postizanje previsoke temperature PTV-a. Također se ugrađuje recirkulacijski vod s pumpom kroz kojeg voda struji kako ne bi postojala vremenska zadržka pri dobavi tople vode prema potrošačima.



Slika 17. Daikin Altherma unutarnja [4] i vanjska jedinica [3]

Uz dizalicu topline ugrađuje se međuspremnik ogrjevnne/rashladne vode volumena 100 litara. Međuspremnik razdvaja hidraulički krug zgrade na primarni krug (dizalica topline – međuspremnik) i sekundarni krug (međuspremnik – krug potrošača). Svrha međuspremnika je, osim akumulacije topline, smanjenje učestalosti uključivanja kompresora dizalice topline. Cirkulaciju vode u primarnom krugu omogućuje cirkulacijska pumpa tvornički ugrađena u dizalicu topline. U sekundarnom krugu su preko razdjelnika i sabirnika odvojene tri grupe potrošača. Svaka grupa potrošača u svom hidrauličkom krugu ima jednu cirkulacijsku pumpu koja omogućuje dobavu vode od međuspremnika do potrošača. Slika 18. prikazuje pojednostavljenu shemu modeliranog sustava grijanja i hlađenja dizalicom topline. U svrhu prikaza toka ogrjevnne/rashladne vode spremnik PTV-a prikazan je izvan unutarnje jedinice dizalice topline.



Slika 18. Pojednostavljena shema sustava proizvodnje energije za grijanje i hlađenje

Potrošače podijeljene u tri hidraulička kruga čine podno grijanje/hlađenje, ventilokonvektori te vanjski bazen. U krugu podnog grijanja/hlađenja, nakon cirkulacijske pumpe, ugrađen je troputni mješajući ventil koji služi za postizanje projektne temperature polaza podnog hlađenja za vrijeme sezone hlađenja. Temperatura podnog hlađenja se regulira kako ne bi pala ispod 18 °C čime bi došlo do opasnosti od kondenzacije vlage na podovima prostorija. U prostorijama je predviđeni sustav s podnim registrima u mokroj izvedbi s PE-X cijevima. Cijevi dimenzija Ø17x2 se polažu u podlogu od EPS-a. Cijevi polaza odnosno povrata spajaju se na razdjelnik odnosno sabirnik podnog grijanja koji se smješta u razdjelni ormarić.

Ventilokonvektori (eng. *fan coil*) su uređaji koji se sastoje od izmjenjivača topline i ventilatora ugrađenih u jedno kućište. Izmjenjivač je izveden kao cijevni s lamelama unutar kojeg struji ogrjevna/rashladna voda. Ventilatorom se ostvaruje prisilno strujanje zraka iz prostorije preko izmjenjivačkih ploha. Korišteni su ventilokonvektori Daikin FWP-AT [Slika

19.]. U suterenu se nalazi ventilokonvektor većeg kapaciteta, model FWP07AT, kojim se zajedno griju odnosno hlade dnevni boravak i kuhinja. Nazivni rashladni učin ovog modela pri temperaturi polaza/povrata 7/12 °C te protoku rashladne vode 1111 kg/h iznosi 6,47 kW. U prizemlju se nalaze tri ventilokonvektora manjeg kapaciteta, model FWP02AT, smješteni po jedan u svaku spavaću sobu. Nazivni rashladni učin pojedinog ventilokonvektora pri temperaturama polaza/povrata 7/12 °C te protoku rashladne vode 448 kg/h iznosi 2,61 kW [5].



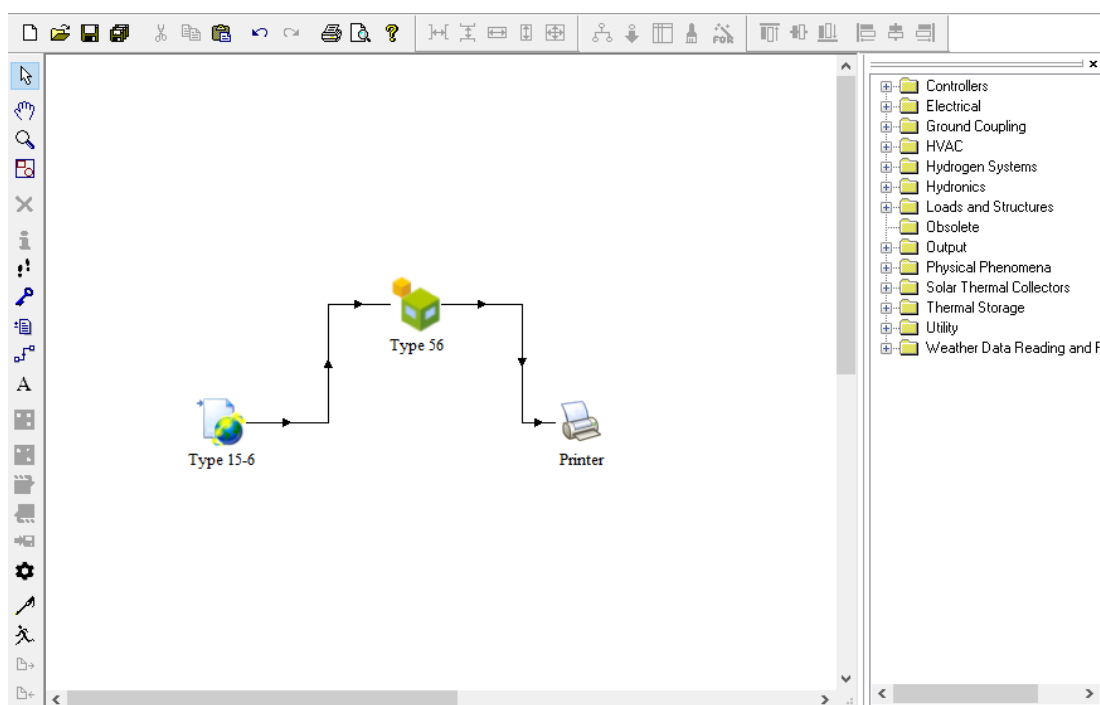
Slika 19. Daikin FWP-AT ventilokonvektor [5]

Ogrjevna voda u cirkulacijskom krugu bazena prolazi kroz protustrujni izmjenjivač topline preko kojeg predaje toplinu bazenskoj vodi. Bazenska voda pomoću cirkulacijske pumpe prolazi kroz protustrujni izmjenjivač topline te se po potrebi, ovisno o temperaturi, dodatno zagrijava električnim grijačem.

3.2. Model termotehničkog sustava u računalnom programu TRNSYS

3.2.1. Opis rada u korisničkom sučelju TRNSYS Simulation Studio

Simulacije koje se provode računalnim programom TRNSYS postavljaju se u glavnom korisničkom sučelju Simulation Studio. Sučelje omogućuje povezivanje različitih komponenata te pokretanje simulacije rada sustava. Svaka komponenta definira se parametrima te ulaznim i izlaznim varijablama preko kojih se povezuje s drugim komponentama. Komponente simulacije odabiru se iz baze prethodno definiranih komponenti te se potom prema potrebi korisnika modificiraju [6]. Slika 20. prikazuje sučelje Simulation Studio s jednostavnim primjerom simulacije godišnje potrebne energije za grijanje zgrade detaljnije opisanom u Poglavlju 4. Desno na slici prikazana je baza definiranih komponenti, dok su na radnoj površini sučelja prikazane korištene komponente simulacije. Izlazne varijable iz komponente *Type 15-6* koja predstavlja meteorološke podatke grada Trsta služe kao ulazne varijable komponenti višestambene zgrade *Type 56*. Na taj način komponenta višestambene zgrade poprima potrebne informacije o stanju zraku, sunčevom zračenju i sl. kako bi provedena simulacija bila što preciznija. Izlazne varijable višestambene zgrade, poput temperatura zraka u zonama te potrebe za toplinskom energijom, povezane su na printer koji u obliku tekstualne datoteke pohranjuje podatke simulacije u željenom vremenskom koraku. Prethodno svakoj simulaciji potrebno je u postavkama definirati vremenski korak po kojemu program vrši kalkulacije te vremenski interval u kojem se odvija simulacija.



Slika 20. Sučelje Simulation Studio

3.2.2. Dinamički energetski model termotehničkog sustava

Komponente u sučelju Simulation Studio računalnog programa TRNSYS povezuju se međusobno na način prikazan u prethodnom poglavlju. Svaka komponenta u programu predstavlja pojedini element sustava kao i druge alate koji određuju termofizikalna svojstva, obavljaju linearnu regresiju, interpoliraju vanjske podatkovne datoteke i sl. Modeli su napravljeni tako da je moguće modificirati pojedinu komponentu u bilo kojem trenutku promjenom parametara ili kreirati novu komponentu te je integrirati u sustav. Tablica 8. prikazuje sve komponente korištene prilikom simulacija u sklopu ovoga rada. Detaljni matematički opis pojedinih komponenti uz navedene parametre prikazan je u Poglavlju 3.3.

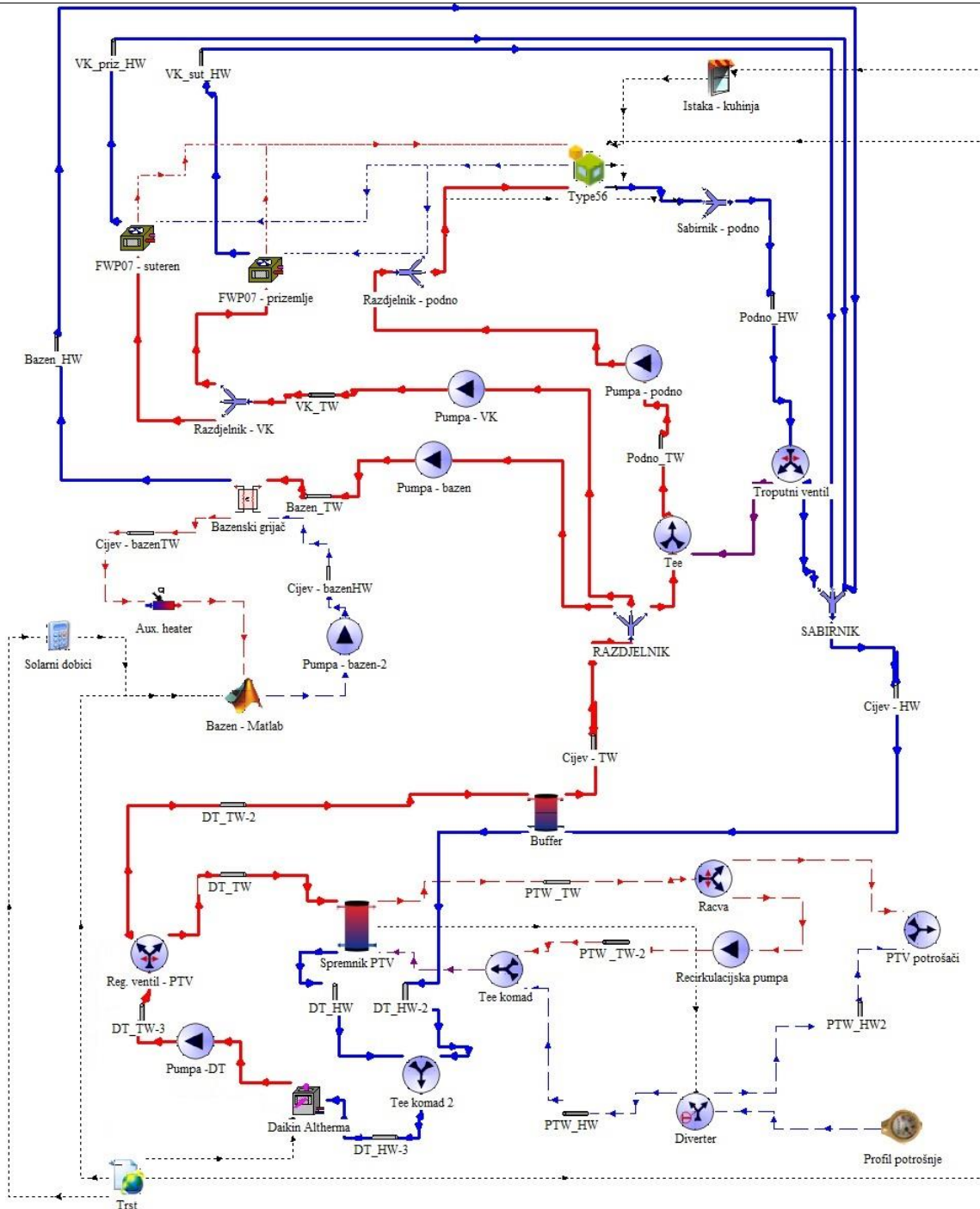
Tablica 8. Korištene komponente u simulacijama

| TRNSYS Komponenta | Opis |
|-------------------|----------------------------------|
| Type 56 | Višezonska zgrada |
| Type 15-6 | Meteorološki podaci – Meteoronom |
| Type 25e | Pisač |
| Type 941 | Dizalica topline |
| Type 600 | Ventilokonvektor |
| Type 534 | Spremnik PTV |
| Type 4 | Međuspremnik |
| Type 3 | Cirkulacijska pumpa |
| Type 91 | Izmjenjivač topline |
| Type 647 | Razdjelnik |
| Type 649 | Sabirnik |
| Type 31 | Cjevovod |
| Type 11f | Razdjelni ventil |
| Type 11h | T-komad |
| Type 11b | Termoregulacijski ventil |
| Type 2 | Diferencijalni regulator |
| Type 23 | PID regulator |
| Type 108 | Sobni termostat |

| | |
|----------|----------------------------|
| Type 6 | Pomoćni grijač |
| Type 155 | MATLAB datoteka |
| Type 34 | Zasjenjenje od bočnog zida |
| Type 14 | Kalendar; Profil PTV-a |

Slika 21. prikazuje model termotehničkog sustava analizirane stambene zgrade bez pripadajuće regulacije, dok se prikaz kompletnog modela nalazi u Prilogu II. Modeli pojedinih regulacijskih krugova te pripadajući opisi detaljnije su predloženi u Poglavlju 3.4. Dizalica topline ulazne varijable o vremenskim podacima poput stanja vanjskog zraka, sunčevog zračenja i temperature tla prima iz komponente Meteoronom (Type 15-6). Meteorološki podaci korišteni su za grad Trst, s obzirom kako je od dostupnih gradova po klimatskim uvjetima najbliži području Kvarnera. Dizalica topline varijablu protoka ogrjevnog/rashladne vode te njene temperature predaje komponenti cirkulacijske pumpe u obliku ulazne varijable. Pumpa konstantnog protoka povezana je s komponentom cjevovoda koja predstavlja polazni vod primarnog cirkulacijskog kruga. Svi cjevovodi sustava modelirani su komponentom Type 31 koja prima ulaznu varijablu protoka i temperature vode te ih kao izlazne varijable šalje komponenti s kojom je povezana. Razdjelni ventil povezan je s međuspremnikom i spremnikom PTV-a kojima, ovisno o potrebama za grijanje PTV [Poglavlje 3.4.1.], propušta vodu iz dizalice topline. Iako je spremnik PTV-a u stvarnosti integrirana komponenta dizalice topline, u programu se modelira kao zasebni element. Povratni cjevovodi iz međuspremnika i spremnika PTV-a povezani su T-komadom putem kojega se voda vraća u dizalicu topline.

Ogrjevna voda iz dizalice topline predaje toplinu potrošnoj toploj vodi u spremniku PTV-a. Zagrijani PTV putem cjevovoda dolazi do razdjelnog ventila koji dio vode odvaja prema miješajućem ventilu potrošača, a dio prema recirkulacijskom vodu, ovisno o trenutnoj potrošnji. U cirkulacijskom krugu PTV-a nalazi se termoregulacijski ventil kojim se ograničava previsoka temperatura vode prema potrošačima. Termoregulacijski ventil na temelju ulaznih varijabla prima informaciju o trenutnoj potrošnji i temperaturi tople vode na izlazu iz spremnika te sprječava prekoračenje postavne temperatura PTV-a tako što dio hladne vode iz vodovoda propušta prema miješajućem ventilu, a ostatak prema spremniku.



Slika 21. TRNSYS model termotehničkog sustava bez pripadajuće regulacije

Grupe potrošača odvojene su razdjelnikom koji prima ulaznu varijablu protoka i temperature vode iz međuspremnik te sabirnikom koji izlaznu varijablu ohlađene/zagrijane vode šalje preko cjevovoda natrag u međuspremnik. Iz razdjelnika se, ovisno o potrebama pojedinog potrošača, protok odvaja prema pumpama bazena, ventilokonvektora i podnog grijanja/hlađenja. Pumpa bazena konstantnog je protoka te se ovisno o potrebama isključuje i

uključuje, namirujući pritom potrebe potrošača. Pumpe podnog grijanja i ventilokonvektora modelirane su kao pumpe varijabilnog protoka što je detaljnije opisano u Poglavlju 3.4.1. Model zgrade prima ulazne varijable protoka i temperature vode koja iz razdjelnika podnog grijanja ustružava u cijevne registre pojedinih zona. Iz modela ventilokonvektora, model višezonske zgrade prima ulaznu varijablu topline izmijenjene između ogrjevnog/rashladnog vode i zraka zone. Ventilokonvektori primaju izlazne varijable temperature i relativne vlažnosti zraka zone iz modela zgrade. Po jedan model ventilokonvektora povezan je s prizemljem i suteranom. Ventilokonvektor prizemlja modeliran je kao tri ventilokonvektora manjeg kapaciteta s obzirom kako zonu čine tri spavaće sobe. Model zgrade još prima ulazne varijable stanja zraka i sunčevog zračenja iz meteoroloških podataka te ulazne varijable zasjenjenja određene površine vanjske ovojnice zgrade. Izlazne varijable protoka i temperature ohlađene/zagrijane vode iz podnih cijevnih registra modela zgrade prima sabirnik podnog grijanja/hlađenja. U povratni cjevovod postavljen je model razdjelnog ventila koji je povezan s T-komadom i sabirnikom. Tim modelima simulira se rad troputnog miješajućeg ventila kojim se regulira temperatura polaza rashladne vode u sezoni hlađenja radi sprječavanja kondenzacije vlage na podovima zona.

Cirkulacijska pumpa hidrauličkog kruga bazena povezana je s protustrujnim izmjenjivačem topline preko kojeg predaje toplinu bazenskoj vodi. Ulazne varijable izmjenjivača topline su protoci i temperature ogrjevnog vode te bazenske vode. Bazenska voda prolazi preko pomoćnog električnog grijača koji se uključuje ovisno o temperaturi vode u bazenu. Pomoćni grijač povezan je s MATLAB komponentom koja simulira promjenu temperature u bazenu. Ulazne varijable MATLAB komponente su stanje zraka i sunčevo zračenje iz meteoroloških podataka te protok i temperatura bazenske vode iz pomoćnog grijača. Izlazna varijabla temperature vode u bazenu MATLAB komponente povezan je s cirkulacijskom pumpom konstantnog protoka.

3.3. Matematički opis modela komponenti sustava

3.3.1. Dizalica topline – Type 941 [7]

Komponenta Type 941 predstavlja model dizalice topline zrak-voda. Dizalica topline hladi/grije protok vode odbacujući toplinu (režim hlađenja) ili apsorbirajući toplinu (režim grijanja) od vanjskoga zraka. Model se temelji na kataloškim podacima o učinku i snazi dizalice topline kao funkciji temperature i protoka vode na ulazu u dizalicu topline te protoka zraka. Ovaj model, za razliku od Type 917, zanemaruje promjenu vlažnosti zraka na vanjskoj jedinici dizalice topline. U simulacijama gdje je vanjski izmjenjivač topline izložen ambijentalnim uvjetima, promjena vlažnosti vanjskog zraka može se zanemariti. U situacijama gdje se zračna strana dizalice topline nalazi u kondicioniranom prostoru potrebno je koristiti model koji ne zanemaruje promjenu vlažnosti zraka. Model ima mogućnost korištenja pomoćnog električnog grijača za situacije kada učin dizalice topline nije dovoljan za pokrivanje toplinskih potreba potrošača. Pomoćni grijač se kontrolira pomoću vanjskog inputa. Parametri korišteni prilikom modeliranja dizalice topline u opsegu ovoga rada prikazani su sljedećom tablicom:

Tablica 9. Parametri komponente dizalice topline

| Parametar | Vrijednost | Mjerna jedinica |
|--|------------|-------------------|
| Snaga ventilatora | 70 | W |
| Protok zraka | 5400 | m ³ /h |
| Nazivni rashladni učin | 11,7 | kW |
| Snaga dizalice topline u režimu hlađenja | 4,31 | kW |
| Nazivni ogrjevnii učin | 11,0 | kW |
| Snaga dizalice topline u režimu grijanja | 3,1 | kW |
| Snaga pomoćnog grijača | - | kW |

3.3.1.1. Type 941 – režim grijanja

U režimu grijanja model interpolacijama određuje učin i snagu dizalice topline kao funkcije temperature i protoka povrata vode te protoka zraka. Komponenta omogućuje opcionalno modeliranje pregrijača (eng. *desuperheater*) za zagrijavanje sekundarnog toka poput potrošne tople vode. *Desuperheater* se prilikom simulacija korištene dizalice topline ne

koristi. Toplina predana vodi preko kondenzatora te toplina isparavanja računaju se prema sljedećim jednadžbama:

$$\dot{q}_{cond} = \dot{q}_{cap,h} - \dot{q}_{dhw} \quad [\text{W}] \quad (12)$$

$$\dot{q}_{evap} = \dot{q}_{cond} + \dot{q}_{dhw} - \dot{P}_{comp} \quad [\text{W}] \quad (13)$$

gdje je:

| | |
|-------------------|--|
| \dot{q}_{cond} | toplina kondenzacije [W] |
| $\dot{q}_{cap,h}$ | ogrjevni učin dizalice topline [W] |
| \dot{q}_{dhw} | toplina predana toku PTV-a preko <i>desuperheatera</i> [W] |
| \dot{q}_{evap} | toplina isparavanja [W] |
| \dot{P}_{comp} | snaga kompresora [W] |

Ako je pomoćni električni grijač uključen, tada se njegov ukupni učin predaje protoku vode. Neovisno o tome je li pomoćni grijač uključen, temperatura ogrjevne vode na izlazu iz dizalice topline opisana je jednadžbom:

$$T_{liq,out} = T_{liq,in} + \frac{\dot{q}_{cond} + \dot{q}_{aux}}{\dot{m}_{liq} C_{p,liq}} \quad [\text{K}] \quad (14)$$

gdje je:

| | |
|-----------------|---|
| $T_{liq,out}$ | temperatura vode na izlazu dizalice topline [K] |
| $T_{liq,in}$ | temperatura vode na ulazu dizalice topline [K] |
| \dot{q}_{aux} | učin pomoćnog električnog grijača [W] |
| \dot{m}_{liq} | maseni protok ogrjevne vode [kg/h] |
| $C_{p,liq}$ | specifični toplinski kapacitet vode [kJ/(kgK)] |

Faktor grijanja COP_h (eng. *coefficient of performance*) i faktor hlađenja dizalice topline EER_h (eng. *energy efficiency ratio*) u režimu grijanja računaju se prema jednadžbama:

$$COP_h = \frac{\dot{q}_{cond} + \dot{q}_{aux}}{\dot{P}_{comp} + \dot{P}_{blower} + \dot{P}_{aux}} \quad (15)$$

$$EER_h = 3.414 \cdot COP_h \quad (16)$$

gdje su:

| | |
|--------------------|--|
| COP_h | faktor grijanja dizalice topline u režimu grijanja [-] |
| EER_h | faktor hlađenja dizalice topline u režimu grijanja [-] |
| \dot{P}_{blower} | snaga ventilatora vanjske jedinice [W] |
| \dot{P}_{aux} | snaga pomoćnog grijača [W] |

3.3.1.2. Type 941 – režim hlađenja

U režimu hlađenja, izmjenjivač topline preko kojega voda predaje toplinu radnoj tvari dizalice topline ima funkciju isparivača, a izmjenjivač topline vanjske jedinice ima funkciju kondenzatora. Prema tome jednadžbe topline kondenzacije i isparavanja te temperature rashladne vode na izlazu iz dizalice topline glase:

$$\dot{q}_{cond} = \dot{q}_{cap,c} - \dot{q}_{dhw} + \dot{P}_{comp} \quad [W] \quad (17)$$

$$\dot{q}_{evap} = \dot{q}_{cap,c} \quad [W] \quad (18)$$

$$T_{liq,out} = T_{liq,in} + \frac{\dot{q}_{evap}}{\dot{m}_{liq} C_{p,liq}} \quad [K] \quad (19)$$

gdje je:

$\dot{q}_{cap,c}$ rashladni učin dizalice topline [W]

Faktor grijanja COP_c (eng. *coefficient of performance*) i faktor hlađenja dizalice topline EER_c (eng. *energy efficiency ratio*) u režimu hlađenja računaju se prema jednadžbama:

$$COP_c = \frac{\dot{q}_{cond}}{\dot{P}_{comp} + \dot{P}_{blower}} \quad (20)$$

$$EER_c = 3.414 \cdot COP_c \quad (21)$$

3.3.2. Ventilokonvektori – Type 600

Ventilokonvektori simulirane stambene zgrade smješteni su u dvije zone. U suterenu se nalazi ventilokonvektor većeg kapaciteta, dok se u spavaćim sobama prizemlja nalaze tri

ventilokonvektora manjih kapaciteta. Ventilokonvektori prizemlja za potrebe simulacija modelirani su kao jedna komponenta. Model na temelju ulaznih varijabli temperature i protoka radnog fluida te temperature i relativne vlažnosti zraka empirijski računa toplinu predanu zraku te izlaznu temperaturu radnog fluida. Parametri modela ventilokonvektora prikazani su sljedećim tablicama:

Tablica 10. Parametri modela ventilokonvektora suterena

| Parametar | Vrijednost | Mjerna jedinica |
|---------------------------|------------|-----------------|
| Nazivni protok zraka | 960 | kg/h |
| Nazivna snaga ventilatora | 80 | W |
| Efikasnost motora | 0,9 | - |
| Protok radnog fluida | 1111 | kg/h |

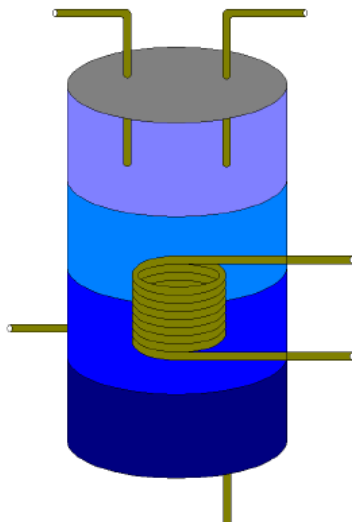
Tablica 11. Parametri modela ventilokonvektora prizemlja

| Parametar | Vrijednost | Mjerna jedinica |
|---------------------------|------------|-----------------|
| Nazivni protok zraka | 1440 | kg/h |
| Nazivna snaga ventilatora | 139,2 | W |
| Efikasnost motora | 0,9 | - |
| Protok radnog fluida | 1344 | kg/h |

3.3.3. Spremnik PTV-a – Type 534 [8]

Komponenta Type 534 modelira vertikalni cilindrični akumulacijski spremnik konstantnog volumena fluida s uronjenim izmjenjivačem topline. Spremnik je po visini podijeljen na segmente jednakih volumena koji predstavljaju slojeve fluida homogene temperature čime je modelirana temperaturna stratifikacija unutar spremnika [Slika 22.]. Svaki segment je u toplinskoj interakciji sa susjednim segmentima i s vanjskim okolišem. Interakcija između segmenata modelira se provođenjem topline te strujanjem fluida uslijed temperaturne inverzije ili ustrojavanjem fluida u ulazni priključak. Toplina s okolišem izmjenjuje se uslijed toplinskih gubitaka definiranih koeficijentom gubitaka svedenim na površinu stijenke, geometrijom spremnika i temperaturnom razlikom segmenta i okoline.

Komponentom Type 534 moguće je definirati četiri tipa izmjenjivača topline,; horizontalni cijevni izmjenjivač, vertikalni cijevni izmjenjivač, serpentinasti izmjenjivač te spiralni cijevni izmjenjivač topline. Model izmjena topline komponente Type 534 prikazani su jednadžbama (28) do (27).



Slika 22. Shematski prikaz stratifikacijskog spremnika [8]

Izmjena topline između izmjenjivača topline te vode u spremniku odvija se prirodnom konvekcijom. Ukupni koeficijent prolaza topline prikazan je jednadžbom:

$$\frac{n}{UA} = \frac{1}{\alpha_o A_o} + R_w + \frac{1}{\alpha_i A_i} \quad (22)$$

gdje je:

| | |
|------------|--|
| A_i | unutarnja površina segmenta cijevi izmjenjivača topline [m ²] |
| A_o | vanjska površina segmenta cijevi izmjenjivača topline [m ²] |
| n | broj cijevi izmjenjivača topline [-] |
| UA | ukupni koeficijent prolaza topline [W/K] |
| R_w | toplinski otpor stijenke cijevi [(m ² K)/W] |
| α_i | koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi [W/(m ² K)] |
| α_o | koeficijent prijelaza topline s vanjske strane cijevi [W/(m ² K)] |

Koristeći se ukupni koeficijentom prolaza topline izmjenjivača dolazi se do jednadžba izmjene topline izmjenjivača s vodom u spremniku te s vanjskim okolišem:

$$Q_{hx} = UA(T_{tank} - T_{hx}) \quad [W] \quad (23)$$

$$Q_{env} = UA(T_{tank} - T_{env}) \quad [W] \quad (24)$$

gdje je:

| | |
|------------|---------------------------------------|
| T_{env} | temperatura okoline [°C] |
| T_{hx} | temperatura izmjenjivača topline [°C] |
| T_{tank} | temperatura vode u spremniku [°C] |

Toplina između segmenata spremnika odvija se kondukcijom što je prikazano jednadžbom:

$$Q_{cond,j} = \frac{\lambda_j A_j (T_j - T_{j+1})}{L_{cond,j}} + \frac{\lambda_{j-1} A_{j-1} (T_j - T_{j-1})}{L_{cond,j-1}} \quad [W] \quad (25)$$

gdje je:

| | |
|-----------------|--|
| A_j | površina izmjene topline između j -tog segmenta i segmenta ispod [m ²] |
| A_{j-1} | površina izmjene topline između j -tog segmenta i segmenta iznad [m ²] |
| $L_{cond,j}$ | visinska razlika između središta segmenta i središta segmenta ispod [m] |
| $L_{cond,j-1}$ | visinska razlika između središta segmenta i središta segmenta iznad [m] |
| T_j | temperatura fluida promatranog segmenta [°C] |
| T_{j+1} | temperatura segmenta spremnika ispod promatranog segmenta [°C] |
| T_{j-1} | temperatura segmenta spremnika iznad promatranog segmenta [°C] |
| λ_j | koeficijent toplinske vodljivosti promatranog segmenta određen prema srednjoj temperaturi promatranog segmenta i segmenta ispod [W/(mK)] |
| λ_{j-1} | koeficijent toplinske vodljivosti promatranog segmenta određen prema srednjoj temperaturi promatranog segmenta i segmenta iznad [W/(mK)] |

Unutar komponente mogu se definirati više različitih mlazova fluida koji ulaze i izlaze iz spremnika. Kod definiranja parametara modela potrebno je odrediti lokaciju ulaznog i izlaznog priključka. Za svaki ulaz treba biti definiran odgovarajući izlaz pri čemu su njihovi maseni protoci jednaki. Pretpostavka modela je da se fluid koji ulazi u spremnik potpuno

miješa s fluidom segmenta gdje se nalazi ulazni priključak. Postupak se ponavlja do čvora u kojem je smješten izlazni priključak. Temperatura na izlazu iz spremnika biti će jednaka srednjoj temperaturi segmenta gdje se nalazi izlazni priključak. Izmjena topline uslijed strujanja između segmenata u spremniku računa se prema jednadžbi:

$$Q_{flow,i,j} = f_{in,j} \cdot \dot{m}_{in} Cp T_{in} + \dot{m}_{in,j-1} Cp T_{j-1} + \dot{m}_{in,j+1} Cp T_{j+1} - \dot{m}_{push} Cp T_j \quad [W] \quad (26)$$

gdje je:

| | |
|--------------------|--|
| $f_{in,j}$ | udio masenog protoka fluida u spremnik koji ulazi u promatrani segment [-] |
| \dot{m}_{in} | maseni protok fluida koji ulazi u spremnik [kg/h] |
| $\dot{m}_{in,j-1}$ | maseni protok fluida između promatranog segmenta i segmenta iznad [kg/h] |
| $\dot{m}_{in,j+1}$ | maseni protok fluida između promatranog segmenta i segmenta ispod [kg/h] |
| \dot{m}_{push} | maseni protok fluida koji izlazi iz spremnika [kg/h] |
| T_{in} | temperatura fluida koji ulazi u spremnik [°C] |

Uslijed pogona termotehničkog sustava, unutar spremnika PTV-a može se javiti temperaturna inverzija između segmenata. Miješanje uzrokovano silom uzgona računa se na način da se izračunaju temperature svih segmenata te se na kraju koraka simulacije izmiješa fluid između segmenata gdje postoji temperaturna inverzija. Izmjena topline miješanjem između segmenata računa se prema jednadžbi:

$$Q_{mix,j} = \dot{m}_j Cp_j (T_j - T_{j+1}) + \dot{m}_{j-1} Cp_{j-1} (T_j - T_{j-1}) \quad [W] \quad (27)$$

gdje je:

| | |
|-----------------|---|
| \dot{m}_j | maseni protok uslijed miješanja fluida promatranog segmenta i segmenta ispod [kg/h] |
| \dot{m}_{j-1} | maseni protok uslijed miješanja fluida promatranog segmenta i segmenta ispod [kg/h] |

Spremnik PTV-a simuliranog termotehničkog sustava modeliran je prema parametrima iz sljedeće tablice:

Tablica 12. Parametri komponente spremnika PTV-a

| Parametar | Vrijednost | Mjerna jedinica |
|--|------------|----------------------|
| Volumen spremnika | 0,3 | m ³ |
| Broj segmenata | 10 | - |
| Unutarnji promjer cijevi izmjenjivača | 28,4 | mm |
| Vanjski promjer cijevi izmjenjivača | 33,6 | mm |
| Duljina cijevi izmjenjivača | 33,16 | m |
| Toplinska vodljivost cijevi izmjenjivača | 370 | W/(mK) |
| Koeficijent prolaza topline spremnika | 0,5 | W/(m ² K) |

3.3.4. Međuspremnik – Type 4 [9]

Type 4 predstavlja model stratificiranog spremnika fluida. Termofizikalna svojstva spremnika modeliraju se pod pretpostavkom postojanja N ($N \leq 100$) potpuno izmiješanih i volumno jednakih segmenata. Stupanj stratifikacije određen je vrijednošću N . Ako N iznosi 1, tada se spremnik modelira kao spremnik s potpuno izmiješanim fluidom, odnosno bez efekta stratifikacije. Maseni protok iz dizalice topline \dot{m}_h temperature T_h ulazi u spremnik, izmjenjuje toplinu s masenim protokom hidrauličkog kruga potrošača \dot{m}_L temperature T_L i vodom u spremniku. Protok dizalice topline poprima temperaturu donjeg segmenta T_N , dok protok vode potrošača poprima temperaturu gornjeg segmenta T_1 [Slika 23.]. Maseni protok iz dizalice topline koji ulazi u spremnik jednak je masenom protoku koji izlazi prema dizalici topline, što isto vrijedi i za maseni protok kruga potrošača. Toplinski tokovi i unutarnja promjena energije u spremniku prikazani su jednadžbama (28) do (31).

$$Q_{env} = \sum_{i=1}^N UA_i (T_i - T_{env}) \quad [\text{W}] \quad (28)$$

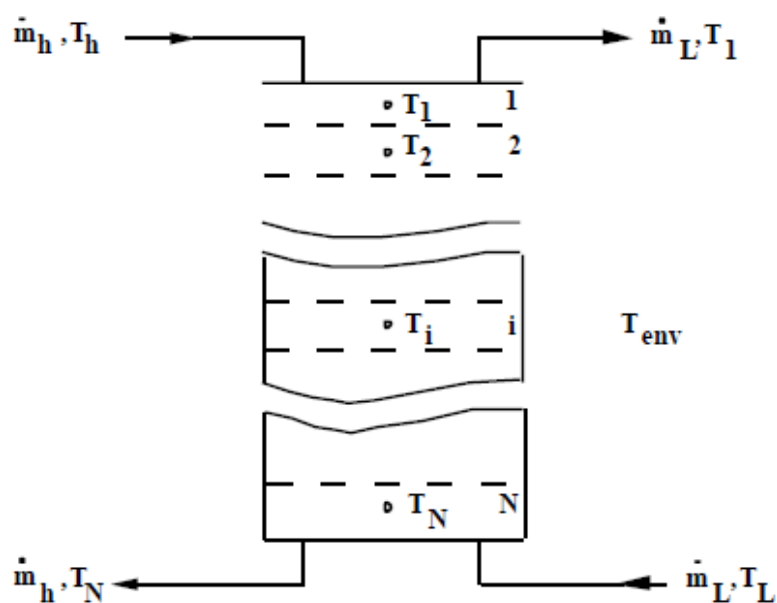
$$Q_S = \dot{m}_L C p_f (T_1 - T_L) \quad [\text{W}] \quad (29)$$

$$Q_{in} = \dot{m}_h C p_f (T_h - T_N) \quad [\text{W}] \quad (30)$$

$$\Delta E = \frac{V \rho_f C p_f}{N} \left[\sum_{i=1}^N T_i - \sum_{i=1}^N T_i |_{t=TIME\ 0} \right] \quad [\text{W}] \quad (31)$$

pri čemu su:

| | |
|-------------|---|
| A_i | površina i-tog segmenta [m^2] |
| Cp_f | specifični toplinski kapacitet fluida [$kJ/(kgK)$] |
| ΔE | promjena unutarnje energije spremnika [W] |
| \dot{m}_h | maseni protok fluida kruga izvora topline [kg/h] |
| \dot{m}_L | maseni protok fluida na strani potrošača [kg/h] |
| N | broj segmenata [-] |
| Q_{env} | toplinski gubici prema okolišu [W] |
| Q_{in} | toplinski tok predan fluidom kruga izvora topline [W] |
| Q_S | toplinski tok predan fluidu kruga potrošača [W] |
| T_1 | temperatura gornjeg segmenta [K] |
| T_{env} | temperatura okoline [K] |
| T_h | temperatura fluida kruga izvora topline na ulazu u spremnik [K] |
| T_i | temperatura okoline [K] |
| T_L | temperatura fluida kruga potrošača na ulazu u spremnik [K] |
| T_N | temperatura donjeg segmenta [K] |
| U_i | koeficijent prolaza topline i-tog segmenta [$W/(m^2K)$] |
| V | volumen spremnika |
| ρ_f | gustoća fluida |



Slika 23. Stratificirani spremnik tekućine [9]

Međuizmjenjivač korišten u termotehničkom sustavu analizirane zgrade modeliran je prema sljedećim parametrima:

Tablica 13. Parametri komponente međuizmjenjivača

| Parametar | Vrijednost | Mjerna jedinica |
|-----------------------------|------------|----------------------|
| Volumen spremnika | 100 | l |
| Broj segmenata | 1 | - |
| Koeficijent prolaza topline | 0,83 | W/(m ² K) |
| Snaga pomoćnog grijača | 0 | kW |

3.3.5. MATLAB komponenta bazena – Type 155

Komponenta Type 155 funkcionira tako što ulazne varijable šalje u program MATLAB gdje se odvija simulacija te se izlazne varijable šalju natrag u TRNSYS. Ulazne varijable te komponente koje ih šalju u Type 155 prikazane su u Tablica 14., dok su korišteni parametri prikazani u Tablica 15.

Tablica 14. Ulazne varijable komponente Type 155

| TRNSYS Komponenta | Opis | Ulazna varijabla | Mjerna jedinica |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|------------------|
| Type 15-6 | Meteorološki podaci | Temperatura vanjskog zraka | °C |
| Type 15-6 | Meteorološki podaci | Efektivna temperatura neba | °C |
| Type 15-6 | Meteorološki podaci | Ukupno horizontalno zračenje | W/m ² |
| Type 15-6 | Meteorološki podaci | Ukupno zračenje na okomitu plohu | W/m ² |
| Type 15-6 | Meteorološki podaci | Apsolutna vlažnost vanjskog zraka | kg/kg |
| Type 6 | Pomoćni grijač | Protok bazenske vode | kg/s |
| Type 6 | Pomoćni grijač | Temperatura vode na izlazu iz grijača | °C |

Tablica 15. Parametri komponente Type 155

| Parametar | Mjerna jedinica | Vrijednost |
|---|------------------------|------------------------------------|
| Temperatura svježe vode | 12 | °C |
| Temperatura tla | 15 | °C |
| Horizontalna površina vode bazena | 21 | m ² |
| Vertikalna površina vode bazena | 9,45 | m ² |
| Površina zidova bazena | 49,56 | m ² |
| Volumen vode bazena | 28,35 | m ³ |
| Emisivnost vode | 0,96 | - |
| Stefan-Boltzmann konstanta | $5,6704 \cdot 10^{-8}$ | W/(m ² K ⁴) |
| Specifični toplinski kapacitet vode | 4,19 | kJ/(kgK) |
| Specifična toplota isparavanja vode | 2500 | kJ/kg |
| Gustoća vode | 1000 | kg/ m ³ |
| Koeficijent apsorpcije sunčevog zračenja | 0,85 | - |
| Koeficijent prijelaza topline s vode na zrak | 3,5 | W/(m ² K) |
| Koeficijent prolaza topline kroz stijenku bazena u zemlju | 0,32 | W/(m ² K) |

Temperatura vode u bazenu je izlazna varijabla komponente Type 155 koju MATLAB povratno šalje u TRNSYS. Unutar MATLAB-a temperatura vode računa se u svakom vremenskom koraku prema jednadžbama (32) do (40). Masa ishlapjele vode s površine bazena prikazana je sljedećom jednadžbom [10]:

$$\dot{m}_{ish} = \varepsilon_{ish} (A_{hor} + A_{ver})(p_s + p_d) \quad [\text{kg/h}] \quad (32)$$

gdje je:

A_{hor} horizontalna površina vode bazena [m²]

A_{ver} vertikalna površina vode bazena [m²]

p_s tlak zasićenja vodene pare [hPa]

p_d parcijalni tlak vodene pare [hPa]

ε_{ish} koeficijent ishlapljivanja [kg/(hPa·m²·h)]

Sljedeća jednačba prikazuje toplinsku bilancu bazena:

$$Q_{bazen} = Q_{sol} + Q_{izmj} + Q_{aux} - Q_{tlo} - Q_{zr} - Q_{sky} - Q_{ish} \quad [W] \quad (33)$$

gdje je:

| | |
|------------|---|
| Q_{sol} | toplinski dobici apsorbacijom sunčevog zračenja [W] |
| Q_{izmj} | toplinski tok ogrjevne vode predan preko izmjenjivača topline (Type 91) [W] |
| Q_{aux} | toplinski tok pomoćnog električnog grijača (Type 6) [W] |
| Q_{tlo} | toplinski gubici u zemlju kondukcijom kroz stijenke bazena [W] |
| Q_{zr} | konvektivni toplinski gubici prema zraku [W] |
| Q_{sky} | toplinski gubici zračenjem prema nebu [W] |
| Q_{ish} | toplinski gubici ishlapljivanjem vode s površine bazena [W] |

Toplinski dobici apsorbacijom sunčevog zračenja:

$$Q_{sol} = \gamma(G_{t,hor}A_{hor} + G_{t,ver}A_{ver}) \quad [W] \quad (34)$$

gdje je:

| | |
|-------------|--|
| γ | koeficijent apsorbacije sunčevog zračenja [-] |
| $G_{t,hor}$ | ukupno horizontalno sunčevo zračenje [W/m^2] |
| $G_{t,ver}$ | ukupno sunčevo zračenje na okomitu plohu [W/m^2] |

Toplinski tok ogrjevne vode predan preko izmjenjivača topline:

$$Q_{izmj} = \dot{m}_{bv}c_w(T_{bv,out} - T_{bv}) \quad [W] \quad (35)$$

gdje je:

| | |
|----------------|--|
| \dot{m}_{bv} | maseni protok bazenske vode [kg/s] |
| c_w | specifični toplinski kapacitet vode [kJ/(kgK)] |
| T_{bv} | temperatura bazenske vode (na ulazu izmjenjivača topline) [°C] |
| $T_{bv,out}$ | temperatura bazenske vode na izlazu izmjenjivača topline [°C] |

Toplinski gubici u zemlju kondukcijom kroz stijenke bazena:

$$Q_{tlo} = (UA)_{zid} \cdot (T_{bv} - T_{tlo}) \quad [\text{W}] \quad (36)$$

gdje je:

| | |
|-----------|---|
| A_{zid} | površina zidova bazena [m^2] |
| U_{zid} | koeficijent prolaza topline kroz stijenku bazena u zemlju [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] |
| T_{tlo} | temperatura tla [$^{\circ}\text{C}$] |

Toplinski gubici konvekcijom prema okolišnom zraku:

$$Q_{zr} = \alpha_{zr}(A_{hor} + A_{ver}) \cdot (T_{bv} - T_{zr}) \quad [\text{W}] \quad (37)$$

gdje je:

| | |
|---------------|--|
| T_{zr} | temperatura vanjskog zraka [$^{\circ}\text{C}$] |
| α_{zr} | koeficijent prijelaza topline s vode na zrak [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] |

Toplinski gubici zračenjem prema nebu:

$$Q_{sky} = \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot A_{hor} \cdot \left[(T_{bv} + 273,15)^4 - (T_{sky} + 273,15)^4 \right] \quad [\text{W}] \quad (38)$$

gdje je:

| | |
|-----------------|--|
| T_{sky} | efektivna temperatura neba [$^{\circ}\text{C}$] |
| ε_w | emisivnost vode [-] |
| σ | Stefan-Boltzmann konstanta [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$] |

Toplinski gubici uslijed ishlapljivanja vode s površine bazena izračunati su pomoću jednadžbe (32). Toplinske gubitke uslijed ishlapljivanja čine latentni gubici (prvi član) i osjetni gubici (drugi član) što je prikazano sljedećom jednadžbom:

$$Q_{ish} = \dot{m}_{ish} \cdot \frac{r}{3,6} + \frac{\dot{m}_{ish} c_w (T_{bv} - T_{svj})}{3,6} \quad [\text{W}] \quad (39)$$

gdje je:

| | |
|-----------|---|
| r | specifična toplina isparavanja vode [kJ/kg] |
| T_{svj} | temperatura svježije vode [$^{\circ}\text{C}$] |

MATLAB simulacijom temperaturu bazenske vode računa u svakom koraku simulacije na temelju temperature iz prethodnog koraka te izračunate toplinske bilance bazena što je pojednostavnjeno prikazano sljedećom jednažbom:

$$T_{bv,i} = \frac{Q_{bazen}}{\rho V c_w} + T_{bv,i-1} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (40)$$

gdje je:

| | |
|--------------|--|
| $T_{bv,i}$ | temperatura vode u i-tom koraku simulacije [$^{\circ}\text{C}$] |
| $T_{bv,i-1}$ | temperatura vode u prethodnom koraku simulacije [$^{\circ}\text{C}$] |
| ρ | gustoća vode [kg/m^3] |
| V | volumen vode u bazenu [m^3] |

3.3.6. Izmjenjivač topline – Type 91 [9]

Komponenta Type 91 predstavlja pojednostavnjeni model protustrujnog izmjenjivača topline s konstantnom efikasnošću. Model u kalkulacijama ne koristi koeficijent prolaza topline površine izmjenjivača, već izmijenjeni toplinski tok računa pomoću konstantne efikasnosti unesene u obliku parametra. Uz efikasnost izmjenjivača topline ε , kao parametri modela unose se specifični toplinski kapaciteti fluida na strani izvora topline te potrošača. Ulazne varijable modela su temperature i protoci tih fluida na ulazu izmjenjivača. Prilikom simulacija u sklopu ovoga rada korištena je efikasnost izmjenjivača topline vrijednosti 0,8.

Model pri izračunu izmijenjenog toplinskog toka koristi pristup minimalnog kapaciteta. Prvo model određuje minimalni toplinski kapacitet C_{min} kojeg koristi za izračun maksimalnog toplinskog toka Q_{max} te koristeći se definiranom efikasnošću računa izmijenjeni toplinski tok između dva fluida Q_T . U konačnici se izračunavaju temperature na izlazima izmjenjivača [Slika 24.]. Minimalni kapacitet je manja vrijednost toplinskih kapaciteta ogrjevnog fluida i fluida na strani potrošača:

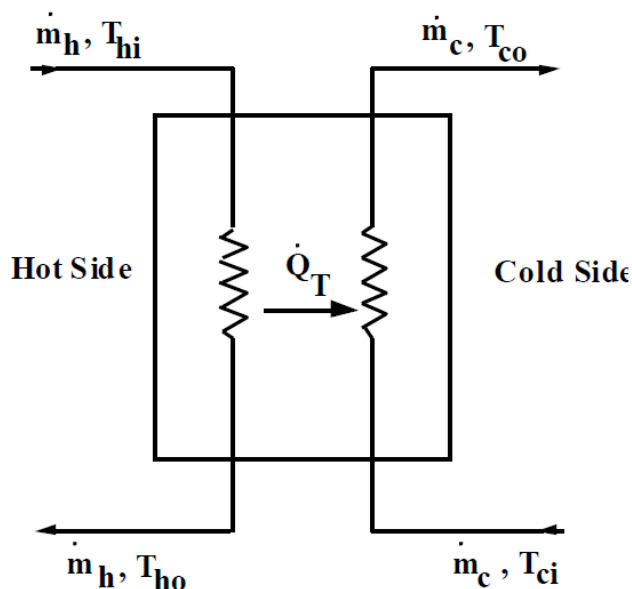
$$C_c = \dot{m}_c \cdot Cp_c \quad [\text{kJ}/\text{K}] \quad (41)$$

$$C_h = \dot{m}_h \cdot Cp_h \quad [\text{kJ}/\text{K}] \quad (42)$$

gdje je:

| | |
|-------|---|
| C_c | toplinski kapacitet fluida na strani potrošača [kJ/K] |
|-------|---|

| | |
|-------------|---|
| C_h | toplinski kapacitet fluida na strani izvora topline [kJ/K] |
| C_{p_c} | specifični toplinski kapacitet fluida na strani potrošača [kJ/(kgK)] |
| C_{p_h} | specifični toplinski kapacitet fluida na strani izvora topline [kJ/(kgK)] |
| \dot{m}_c | masa fluida na strani potrošača [kg/s] |
| \dot{m}_h | masa fluida na strani potrošača [kg/s] |



Slika 24. Shema komponente Type 91 [9]

Maksimalni mogući te stvarni toplinski tok računaju se prema jednadžbama:

$$Q_{max} = C_{min} \cdot (T_{hi} - T_{ci}) \quad [\text{W}] \quad (43)$$

$$Q_T = \varepsilon \cdot Q_{max} \quad [\text{W}] \quad (44)$$

gdje je:

| | |
|---------------|---|
| C_{min} | minimalna vrijednost toplinskog kapaciteta [kJ/K] |
| T_{ci} | temperatura vode potrošača na izlazu izmjenjivača [°C] |
| T_{hi} | temperatura vode izvora topline na izlazu izmjenjivača [°C] |
| ε | efikasnost izmjenjivača topline [-] |
| Q_{max} | maksimalni mogući toplinski tok [W] |
| Q_T | stvarni toplinski tok [W] |

U simuliranom sustavu s obje strane izmjenjivača topline struji voda, dok je maseni protok bazenske vode \dot{m}_c veći od protoka ogrjevnice vode \dot{m}_h te parametarski zadana efikasnost ε iznosi 0,8. Prema tome jednadžba (44) poprima oblik:

$$Q_T = 0,8 \cdot \dot{m}_h c_{p_w} \cdot (T_{hi} - T_{ci}) \quad [\text{W}] \quad (45)$$

Izlazne temperature iz izmjenjivača topline predstavljaju izlazne varijable komponente Type 91 te se računaju prema jednadžbama:

$$T_{ho} = T_{hi} - \left(\frac{Q_T}{C_h} \right) \quad [^\circ\text{C}] \quad (46)$$

$$T_{co} = T_{ci} + \left(\frac{Q_T}{C_c} \right) \quad [^\circ\text{C}] \quad (47)$$

3.3.7. Cirkulacijska pumpa – Type 3 [9]

Ovaj model računa maseni protok koristeći ulaznu varijablu kontrolne funkcije i parametarski zadan maksimalan protok. Snaga pumpe se računa kao linearna funkcija masenog protoka, a postoji mogućnost korisnički zadane funkcijske veze između protoka i snage. Model također računa udio snage pretvoren u toplinski tok predan fluidu.

Osim maksimalnog protoka pumpe, parametarski se zadaju podaci o maksimalnoj snazi pumpe, specifičnom toplinskom kapacitetu fluida i udjelu snage pumpe pretvorenom u toplinski tok. Ulazne varijable modela su temperatura fluida na usisu, kontrolna funkcija pumpe te protok fluida koji služi samo kao provjera konvergencije modela. Kontrolna funkcija može poprimati vrijednost od 0 do 1. Maseni protok i snaga pumpe računaju se prema sljedećoj jednadžbi:

$$\dot{m}_o = \gamma \cdot \dot{m}_{max} \quad [\text{kg/h}] \quad (48)$$

$$P = \gamma \cdot P_{max} \quad [\text{W}] \quad (49)$$

gdje je:

\dot{m}_o izlazni protok pumpe [kg/h]

\dot{m}_{max} maskimalni protok pumpe [kg/h]

| | |
|-----------|------------------------------|
| P | snaga pumpe [W] |
| P_{max} | maksimalna snaga pumpe [W] |
| γ | kontrolna funkcija pumpe [-] |

Uslijed toplinskog toka predanog fluidu dolazi do povećanja temperature fluida pa je temperatura na izlazu iz pumpe jednaka:

$$T_o = T_i + \left(\frac{P \cdot f_{par}}{\dot{m}_o \cdot Cp} \right) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (50)$$

gdje je:

| | |
|-----------|--|
| Cp | specifični toplinski kapacitet fluida [kJ/(kgK)] |
| f_{par} | udio snage pumpe pretvoren u toplinski tok [-] |
| T_i | temperatura na ulazu pumpe [$^{\circ}\text{C}$] |
| T_o | temperatura na izlazu pumpe [$^{\circ}\text{C}$] |

U sklopu ovoga rada pumpe podnog grijanja/hlađenja te ventilokonvektora modelirane su kao pumpe varijabilnog protoka, dok su ostale modelirane kao pumpe konstantnog protoka. Pumpe varijabilnog protoka primaju vanjsku ulaznu varijablu γ kojom se kontrolira maseni protok vode. Kod drugih pumpa kontrolna funkcija iznosi 1 kada je pumpa u pogonu, odnosno 0 kada nije. Parametri korištenih modela pumpa prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 16. Parametri komponenti Type 3

| Parametar | \dot{m}_{max} | P_{max} | f_{par} |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Pumpa | [kg/h] | [W] | [-] |
| Dizalica topline | 2016 | 80 | 0,05 |
| Recirkulacija PTV-a | 100 | 10 | 0,05 |
| Podni registri | 1500 | 80 | 0,05 |
| Ventilokonvektori | 2455 | 80 | 0,05 |
| Bazen | 1000 | 80 | 0,05 |
| Bazenska voda | 1500 | 80 | 0,05 |

3.3.8. Cjevovod – Type 31 [9]

Komponenta Type 31 modelira ponašanje fluida u cjevovodu koristeći varijabilne veličine segmenata fluida. Ulazni fluid pomiče položaj izlaznog segmenta. Masa novog segmenta jednaka je umnošku masenog protoka i vremenskog koraka simulacije. Izlaz iz cijevi tako predstavlja mješavinu elemenata „izguranih“ iz cjevovoda ulaznim protokom.

Koncept funkcioniranja modela Type 31 prikazan je na primjeru cjevovoda duljine L inicijalno sadržanog od tri segmenta različitih temperatura T_1 , T_2 i T_3 te duljina X_1 , X_2 i X_3 [Slika 25.a]. U jednom vremenskom koraku simulacije Δt , masa fluida ulazi u cjevovod stvarajući novi segment temperature T_i [Slika 25.b]. Iz cjevovoda izlazi masa fluida jednaka masi fluida koji ulazi. Segment temperature T_3 i dio segmenta temperature T_2 izlaze iz cjevovoda, čime nastaje novi profil [Slika 25.c]. Iz energetske bilance trećeg segmenta dobiva se izlazna temperatura fluida T_o jednadžbe:

$$\dot{m}\Delta t(T_o - T_2) = M_3(T_3 - T_2) \quad (51)$$

$$T_o = \frac{M_3T_3 + (\dot{m}\Delta t - M_3)T_2}{\dot{m}\Delta t} \quad [^\circ\text{C}] \quad (52)$$

gdje je:

| | |
|------------|---|
| \dot{m} | maseni protok fluida [kg/h] |
| M_3 | masa fluida u trećem segmentu [kg] |
| Δt | vremenski korak simulacije [h] |
| T_o | temperatura fluida na izlazu iz cjevovoda [$^\circ\text{C}$] |
| T_3 | temperatura fluida u trećem segmentu cjevovoda [$^\circ\text{C}$] |

Sljedeće jednadžbe opisuju promjenu toplinskog toka uslijed strujanja fluida kroz cjevovod (53), izmjenu topline s okolinom (54) te promjenu unutarnje energije fluida u cjevovodu (55):

$$Q_{in_out} = \dot{m}Cp(T_o - T_i) \quad [\text{W}] \quad (53)$$

$$Q_{env,j} = (UA)_j \cdot (T_j - T_{env}) \quad [\text{W}] \quad (54)$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{MCp(\bar{T}_f - \bar{T}_{f,t-\Delta t})}{\Delta t} = Q_{in_out} - \sum_{j=1}^k Q_{env,j} \quad [W] \quad (55)$$

gdje je:

C_p specifični toplinski kapacitet fluida u cijevi [kJ/(kgK)]

ΔE promjena unutarnje energije fluida u cijevi [kJ]

M masa fluida u cijevi [kg]

T_{env} temperatura okoline [°C]

\bar{T}_f prosječna temperatura fluida na kraju trenutnog vremenskog koraka [°C]

$\bar{T}_{f,t-\Delta t}$ prosječna temperatura fluida na kraju prethodnog vremenskog koraka [°C]

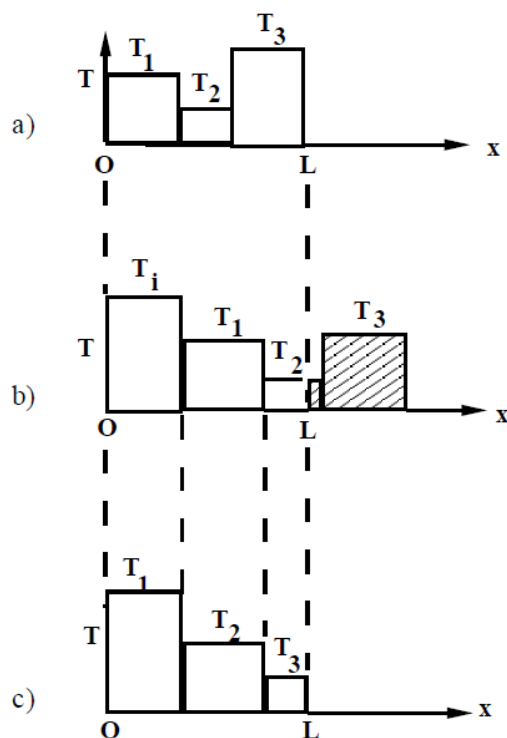
T_i temperatura fluida na ulazu u cijev [°C]

T_j temperatura fluida u j-tom segmentu [°C]

$(UA)_j$ prolaz topline kroz stijenku j-tog segmenta [W/m²]

$Q_{env,j}$ toplinski gubitak j-tog segmenta prema okolini [W]

Q_{in_out} promjena toplinskog toka uslijed strujanja fluida [W]



Slika 25. Protok fluida kroz cjevovod [9]

3.3.9. Armatura

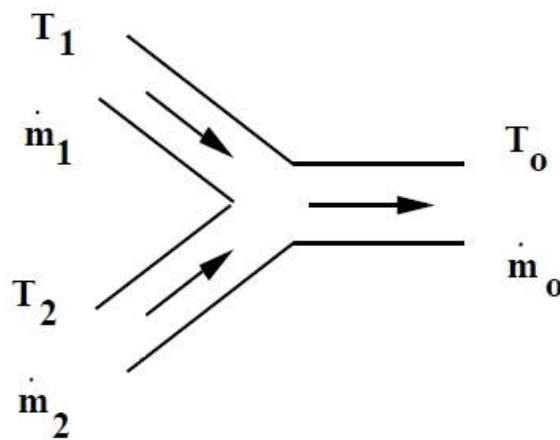
Komponente Type 11 predstavljaju modele T-komada te razdjelnih, miješajućih i termoregulacijskih ventila. Modeli komponente Type 11 ograničeni su na dva ulaza, odnosno izlaza ventila. Komponente Type 647 i Type 649 imaju mogućnost modeliranja do sto ulaza, odnosno izlaza te se oni koriste za modeliranje razdjelnika i sabinika hidrauličkog kruga potrošača.

3.3.9.1. T-komad – Type 11h [9]

T-komad u potpunosti miješa dva toka istoga fluida različitih temperatura koja u njega ulaze. Ulazne varijable modela su temperature T_1 , T_2 i protoci \dot{m}_1 i \dot{m}_2 dvaju toka istoga fluida, dok su izlazne varijable temperatura T_o i protok \dot{m}_o na izlazu [Slika 26]. Iz bilance tokova energije dobiva se temperatura T_o .

$$\dot{m}_o = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad [\text{kg/h}] \quad (56)$$

$$T_o = \frac{\dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2}{\dot{m}_o} \quad [^\circ\text{C}] \quad (57)$$



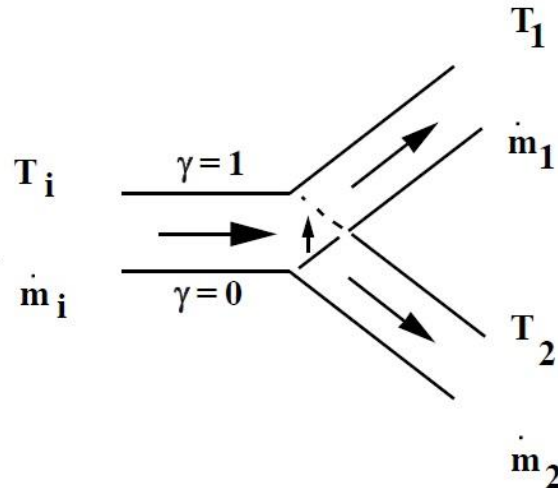
Slika 26. Model T-komada

3.3.9.2. Razdjelni ventil – Type 11f [9]

Komponenta razdjelnog ventila modelira razdvajanje protoka fluida na dva različita toka u ovisnosti o kontrolnom signalu γ . Ulazne varijable modela su temperatura T_i i protok \dot{m}_i na ulazu u ventil te kontrolni signal γ . Izlazne temperature T_1 , T_2 jednake su ulaznoj temperaturi, a maseni protoci računaju se prema jednadžbama [Slika 27.]:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_i \cdot (1 - \gamma) \quad [\text{kg/h}] \quad (58)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_i \cdot \gamma \quad [\text{kg/h}] \quad (59)$$



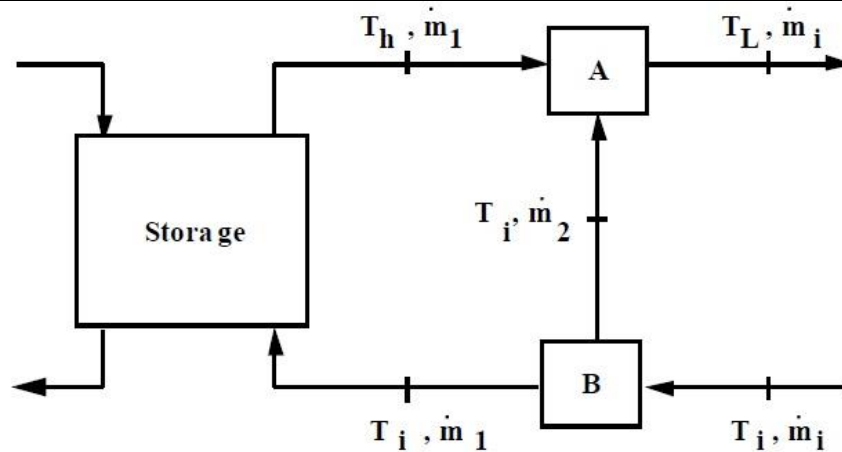
Slika 27. Model razdjelnog ventila

3.3.9.3. Termoregulacijski ventil – Type 11b [9]

Model termoregulacijskog ventila funkcionira na principu razdjelnog ventila [Slika 27.]. Razlika je u tome što se kontrolni signal ne dovodi u obliku vanjske varijable, već ga model Type 11b računa kao funkciju temperature fluida na ulazu u ventil T_i , postavne temperature T_{set} i temperature izvora topline T_h . Postavna temperatura T_{set} predstavlja graničnu temperaturu ispod koje se mora držati protok iz izvora topline. Model prati temperaturu izvora topline T_h te, ako je veća od postavne temperature, izračunava kontrolni signal γ koji definira protoke prema jednadžbama (58) i (59). Kontrolni signal računa se prema jednadžbi:

$$\gamma = \frac{(T_{set} - T_i)}{(T_h - T_i)} \quad (60)$$

Primjer na Slika 28. prikazuje koncept rada modela Type 11b. U termoregulacijski ventil B ulazi hladna voda temperature T_i i protoka \dot{m}_i . Ako temperatura iz spremnika T_h prelazi vrijednost postavne temperature T_{set} , ovisno o izračunatom kontrolnom signalu protok \dot{m}_2 se odvaja prema mješalištu A.



Slika 28. Primjer termoregulacijskog ventila [9]

3.3.9.4. Razdjelnik – Type 647 [7]

Model razdjelnika, Type 647, radi na principu modela razdjelnog ventila Type 11f samo što se protok fluida može razdvajati na maksimalno sto grana. Ulazna varijabla f_i predstavlja udio pojedinog izlaznog protoka u odnosu na protok na ulazu u razdjelnik \dot{m}_{in} . Koristeći se ulaznom varijablom f_i pojedini izlazni protok \dot{m}_i računa se prema jednadžbi:

$$\dot{m}_i = f_i \cdot \dot{m}_{in} \quad [\text{kg/h}] \quad (61)$$

3.3.9.5. Sabirnik – Type 649 [7]

Model sabirnika, Type 649, radi na principu modela T-komada Type 11b samo što izlazni protok može biti mješavina do sto ulaznih protoka. Izlazni protok \dot{m}_o čini suma svih ulaznih protoka, dok se izlazna temperatura T_o računa iz energetske bilance prema jednadžbi:

$$T_o \dot{m}_o = \sum_{i=0}^{n \text{ ulaza}} \dot{m}_i T_{in,i} \quad (62)$$

3.3.10. Diferencijalni regulator – Type 2 [9]

Model diferencijalnog regulatora generira izlazni kontrolni signal γ_o čije vrijednost iznosi 0 ili 1. Vrijednost kontrolnog signala je funkcija razlike između gornje i donje ulazne temperature, T_H i T_L , u usporedbi s gornjom i donjom temperaturnom razlikom, ΔT_H i ΔT_L .

Nova vrijednost γ_o ovisi o trenutnoj vrijednosti kontrolnog signala γ_i . Model regulatora najčešće se koristi tako da je izlazna varijabla γ_o povezana s ulaznom varijablom γ_i čime se postiže efekt histereze [Slika 29.]. Vrijednost izlaznog kontrolnog signala γ_o određuje se prema jednadžbama, ako je regulator prethodno uključen:

$$\gamma_i = 1 \text{ i } \Delta T_L \leq (T_H - T_L); \quad \gamma_o = 1 \quad (63)$$

$$\gamma_i = 1 \text{ i } \Delta T_L > (T_H - T_L); \quad \gamma_o = 0 \quad (64)$$

te, ako je regulator prethodno isključen:

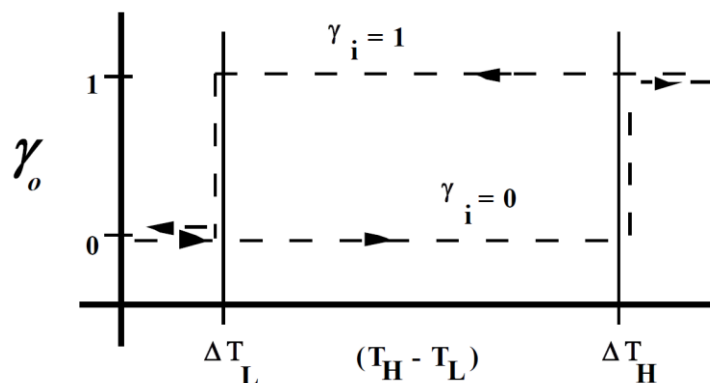
$$\gamma_i = 0 \text{ i } \Delta T_H \leq (T_H - T_L); \quad \gamma_o = 1 \quad (65)$$

$$\gamma_i = 0 \text{ i } \Delta T_H > (T_H - T_L); \quad \gamma_o = 0 \quad (66)$$

gdje je:

| | |
|--------------|----------------------------------|
| T_H | gornja ulazna temperatura [°C] |
| T_L | donja ulazna temperatura [°C] |
| ΔT_H | gornja temperaturna razlika [°C] |
| ΔT_L | donja temperaturna razlika [°C] |
| γ_i | ulazni kontrolni signal [-] |
| γ_o | izlazni kontrolni signal [-] |

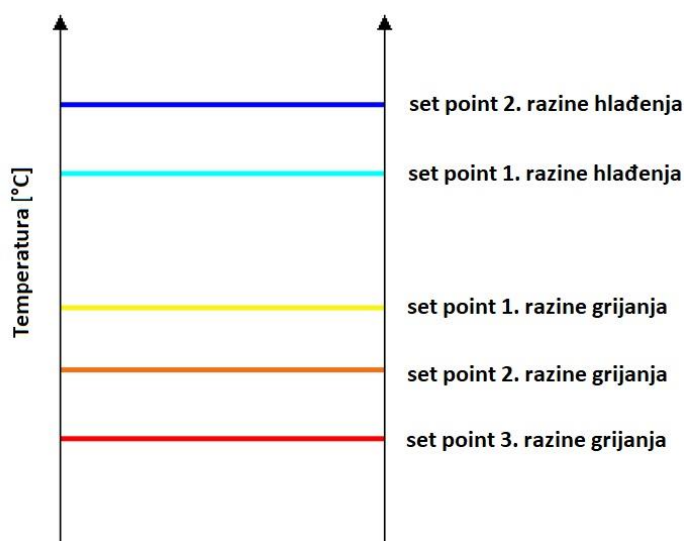
Neovisno o temperaturnim granicama, vrijednost izlaznog kontrolnog signala biti će 0, ako se pređe gornji granični uvjet (eng. *high limit cut-out*). Uvjet se prelazi kada određena temperatura koja se prati T_{in} pređe neku zadanu maksimalnu vrijednost T_{max} te se regulator iz sigurnosnih razloga isključuje.



Slika 29. Funkcija diferencijalnog regulatora [9]

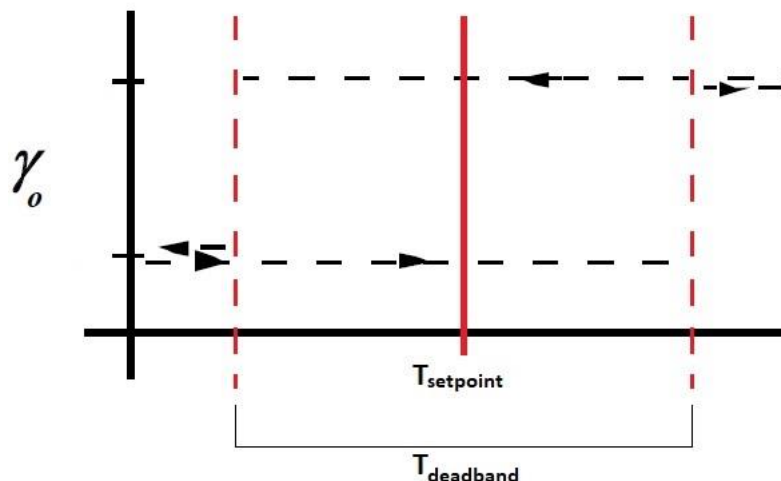
3.3.11. Sobni termostat – Type 108 [9]

Komponenta Type 108 modelira sobni termostat s pet razina koji generira pet izlaznih kontrolnih signala od kojih se tri koriste za kontrolu grijanja u termotehničkom sustavu, a dva za kontrolu hlađenja. Razina modela može predstavljati određeni režim rada toplinskog izvora ili može predstavljati rad pojedine opreme. Primjerice, u sklopu ovoga rada, na prvoj razini grijanja/hlađenja uključuje se cirkulacija vode kroz podne registre, dok druga razina paralelno uključuje cirkulaciju kroz ventilokonvektore. Za funkcioniranje modela Type 108, korisnik mora definirati tri postavne temperature (eng. *set point*) grijanja i dvije hlađenja [Slika 30.]. Postavne temperature definirane su kao ulazne varijable modela s obzirom kako mogu varirati s vremenom.



Slika 30. Temperaturne razine sobnog termostata

Model sobnog termostata sadrži efekt histereze kako ne bi došlo do previše učestalog paljenja i gašenja opreme. Parametarski se definira temperaturna razlika koja predstavlja „mrtvu zonu“ (eng. *dead band*) prikazanu na Slika 31. isprekidanim linijama. Tako će primjerice u režimu grijanja oprema ostati ugašena sve dok temperatura sobe ne padne ispod donje *dead band* granice. Jednom kada se uključi, oprema će ostati upaljena sve dok temperatura sobe ne pređe gornju *dead band* granicu.

Slika 31. *Dead band* temperaturna razlika

U modelu termotehničkog sustava kreiranom u sklopu ovoga rada, svaka od pet zona sadrži sobni termostat s različitim postavnim temperaturama T_{set} pojedinih razina grijanja i hlađenja. Postavne temperature unose se kao vanjske varijable kako bi se mogle s vremenom mijenjati. U sezoni grijanja postavne temperature noću niže su od onih danju, dok su u sezoni hlađenja noću više nego danju. U svim zonama *dead band* temperatura iznosi 2 °C. Tablica 17. prikazuje postavne temperature danju/noću po zonama [Tablica 4].

Tablica 17. Postavne temperature komponenata Type 108

| | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| set point 1. razine grijanja [°C] | 22 / 20 | 24 / 22 | 22 / 20 | 21 / 19 | 24 / 22 |
| set point 2. razine grijanja [°C] | 20 / 19 | - | 20 / 19 | - | - |
| set point 3. razine grijanja [°C] | - | - | - | - | - |
| set point 1. razine hlađenja [°C] | 25 / 27 | 26 / 28 | 25 / 27 | 26 / 28 | 26 / 28 |
| set point 2. razine hlađenja [°C] | 27 / 28 | - | 27 / 28 | - | - |

3.3.12. PID regulator – Type 23 [9]

Komponenta Type 23 modelira ponašanje Proporcionalnoga, Integralnog i Derivacijskog (PID) regulatora. Modelom se računa izlazni kontrolni signal kojim se kontrolna varijabla održava na postavnoj vrijednosti. Kontrolni signal se računa množenjem regulacijskog odstupanja s konstantom (P-djelovanje) čemu se pribraja vrijednost

proporcionalna integralu regulacijskog odstupanja (I-djelovanje) te vrijednost proporcionalna integralu regulacijskog odstupanja (D-djelovanje). PID algoritam prikazan je jednadžbom:

$$v(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) = P + I + D \quad (67)$$

gdje je:

| | |
|-------|--|
| v | kontrolna varijable prije primjene ograničenja |
| e | regulacijsko odstupanje |
| K | konstanta regulatora |
| T_i | integralno vrijeme [h] |
| T_d | derivacijskog vrijeme [h] |

3.3.13. Pomoćni grijač – Type 6 [9]

Komponenta pomoćnog grijača Type 6 povećava temperaturu protoka fluida koristeći unutarnju kontrolu samog modela, vanjsku kontrolu ili oboje. Uključivanjem grijača fluidu se predaje toplinski tok manji ili jednak maksimalnom toplinskom toku Q_{max} . Model sam kontrolira uključivanje grijača kada je temperatura fluida na ulazu manja od postavne temperature T_{set} , dok se izvana može upravljati kontrolnim signalom γ koji se unosi u obliku ulazne varijable. Izlazna temperatura T_o dobiva se iz toplinske bilance pomoćnog grijača prema sljedećim jednadžbama:

$$Q_{aux} = Q_{fluid} + Q_{env} \quad [\text{W}] \quad (68)$$

$$Q_{aux} = Q_{max}\eta \quad [\text{W}] \quad (69)$$

$$Q_{fluid} = \dot{m}Cp(T_o - T_i) \quad [\text{W}] \quad (70)$$

$$Q_{env} = UA(\bar{T} - T_{env}) \quad [\text{W}] \quad (71)$$

$$T_o = \frac{Q_{max}\eta + \dot{m}Cp_f T_i - UA(\bar{T} - T_{env})}{\dot{m}Cp_f} \quad [^\circ\text{C}] \quad (72)$$

gdje je:

| | |
|-------------|--|
| Cp_f | specifični toplinski kapacitet fluida [kJ/(kgK)] |
| \dot{m} | maseni protok fluida [kg/h] |
| T_{env} | temperatura okoline [°C] |
| T_i | temperatura fluida na ulazu [°C] |
| T_o | temperatura fluida na izlazu [°C] |
| \bar{T} | aritmetička srednja temperatura grijača $(T_o+T_i)/2$ [°C] |
| Q_{aux} | toplinski tok pomoćnog grijača [W] |
| Q_{env} | toplinski gubici prema okolišu [W] |
| Q_{fluid} | toplinski tok predan fluidu [W] |
| Q_{max} | maksimalni toplinski tok pomoćnog grijača [W] |
| η | efikasnost pomoćnog grijača [-] |

U ovome radu korišten je pomoćni električni grijač za zagrijavanje bazenske vode zadane maksimalne snage Q_{max} 12 kW. S obzirom kako je grijač električni, efikasnost η iznosi 1 te su gubici prema okolišu zanemareni. Pritom jednadžba (72) poprima sljedeći oblik:

$$T_o = \frac{Q_{max} + \dot{m}Cp_w T_i}{\dot{m}Cp_w} \quad [^\circ\text{C}] \quad (73)$$

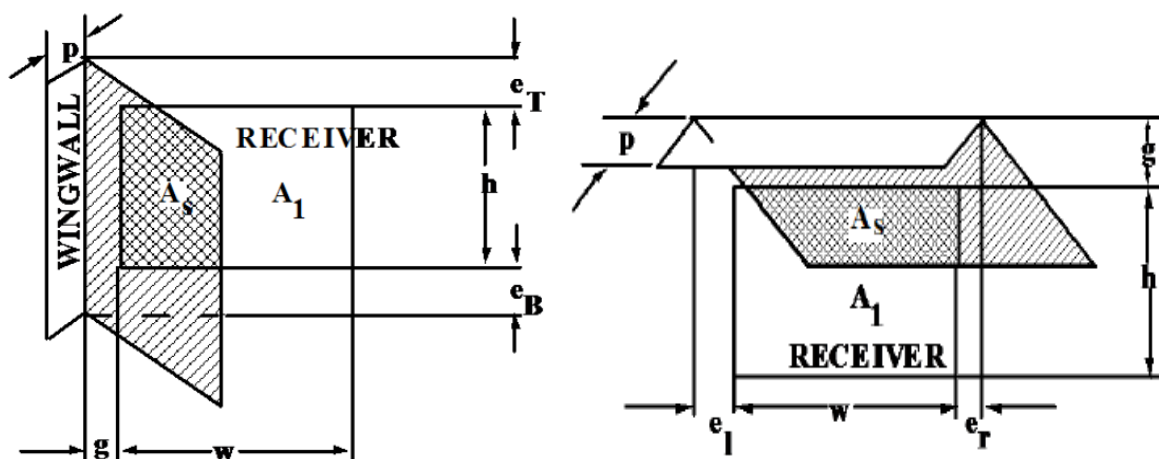
3.3.14. Zasjenjenje od bočnog zida – Type 3 [9]

Komponenta Type 34 modelira zasjenjenje plohe od krova, nadstrešnice ili bočnoga zida. Ukupno sunčevo zračenje na zasjenjenu plohu sastoji se od direktne, difuzne i reflektirane komponente. Komponente sunčevog zračenje se uz azimut i zenit Sunca te upadni kut zračenja unose u model kao ulazne varijable dobivene iz komponente meteoroloških podataka Type 15-6. Parametri potrebni za izračun izlaznih varijabli su podaci o površini plohe te položaju zida ili krova koji radi sjenu [Slika 32.]. Model računa zračenje na zasjenjenu plohu prema jednadžbi (74). Faktor f_i predstavlja omjer površine plohe izložene direktnom zračenju i ukupne površine plohe, dok faktore F_{A-S} i F_{A-G} tijekom simulacije model računa numeričkom integracijom.

$$(I_T)_S = I_{bT}f_i + I_{dT}F_{A-S} + I_d\rho_gF_{A-G} \quad (74)$$

gdje je:

- $(I_T)_S$ prosječno sunčevo zračenje na zasjenjenu plohu [$\text{kJ}/(\text{hm}^2)$]
 I_{bT} komponenta direktnog sunčevog zračenja na zasjenjenu plohu [$\text{kJ}/(\text{hm}^2)$]
 I_{dT} komponenta difuznog sunčevog zračenja na zasjenjenu plohu [$\text{kJ}/(\text{hm}^2)$]
 I_d komponenta reflektiranog sunčevog zračenja na zasjenjenu plohu [$\text{kJ}/(\text{hm}^2)$]
 ρ_g koeficijent refleksije difuznog zračenja od zemlje [-]
 f_i udio površine plohe izložene direktnom zračenju [-]
 F_{A-S} faktor vidljivosti neba zasjenjene plohe [-]
 F_{A-G} faktor vidljivosti tla zasjenjene plohe [-]



Slika 32. Zasjenjenje od krova ili bočnog zida [9]

Za simulacije u sklopu ovoga rada potrebno je izlazne varijable prosječnog i direktnog sunčevog zračenja na zasjenjenu plohu te upadnog kut zračenja povezati s komponentom višezonske zgrade. Zasjenjena ploha je jugoistočni zid kuhinje u suterenu kojemu zasjenjenje rade gornja etaža te bočni zid dnevne sobe. Tablica 18. prikazuje parametre potrebne za izračun izlaznih varijabli.

Tablica 18. Parametri komponente Type 34

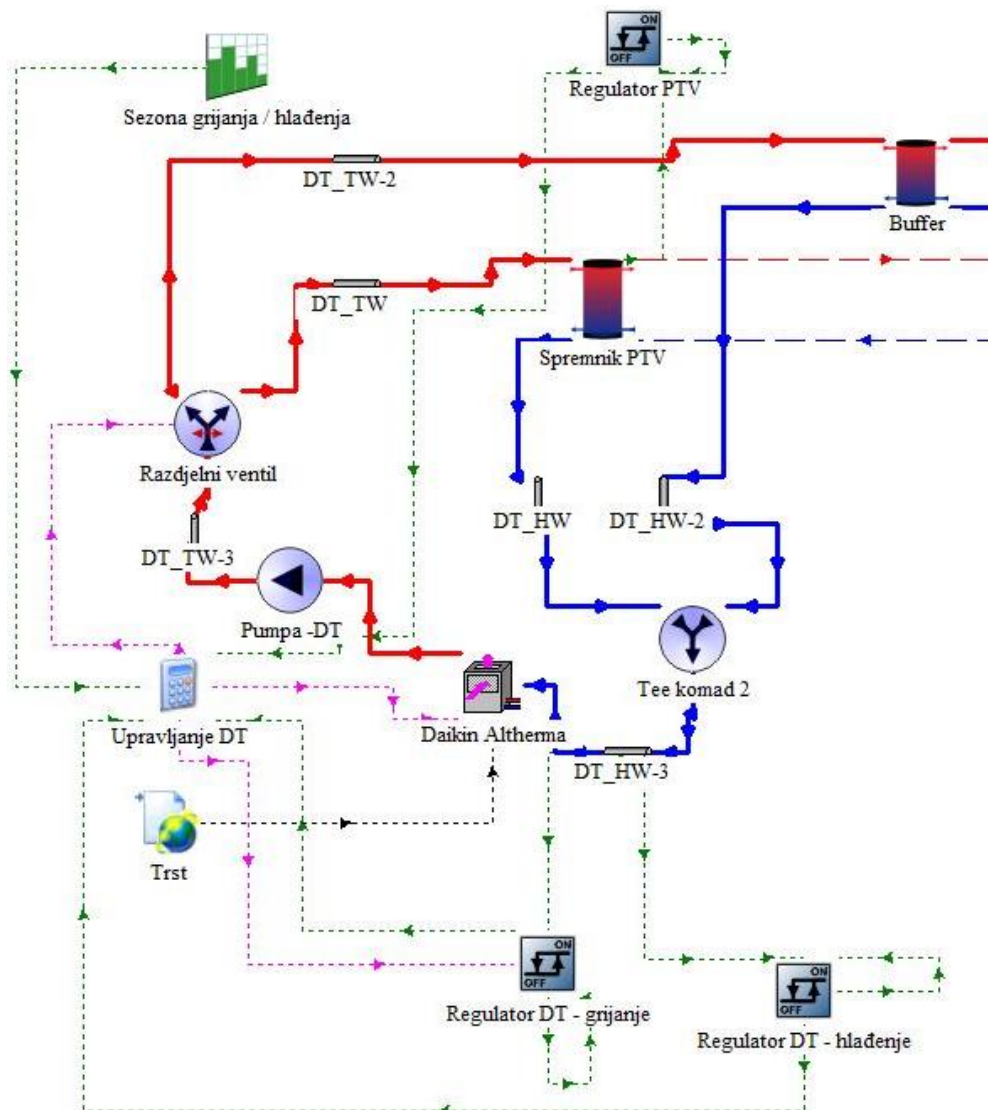
| Parametar | Vrijednost | Mjerna jedinica |
|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Širina zida | 5,05 | m |
| Visina zida | 3,15 | m |
| Duljina kata iznad zida | 3 | m |
| Lijeva ekstenzija kata | 1,95 | m |
| Duljina bočnog zida | 7,8 | m |
| Azimut zida | 315 | ° |

3.4. Model regulacije termotehničkog sustava

U sljedećem poglavlju prikazana je izvedba regulacije pojedinih cirkulacijskih krugova modeliranog termotehničkog sustava te regulacija infiltracije zraka i zasjenjenja prozornih površina.

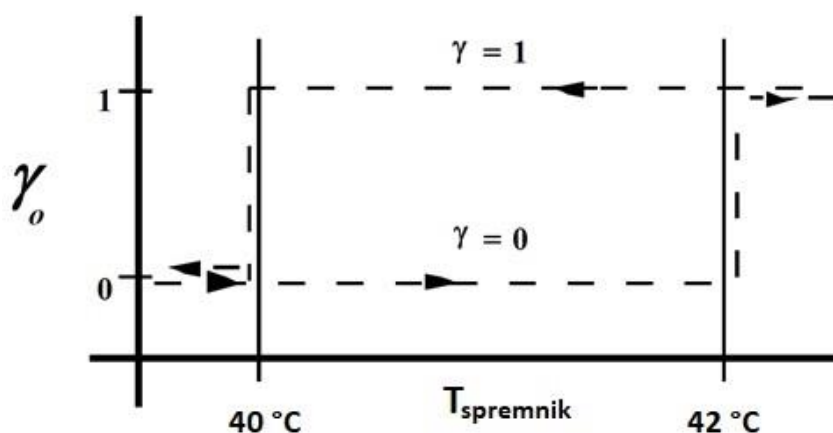
3.4.1. Regulacija dizalice topline

Slika 33. prikazuje TRNSYS model cirkulacijskog kruga dizalice topline s pripadajućim komponentama regulacije. Osim prethodno opisanih komponenti cirkulacijskog kruga dizalice topline, za simulaciju realnog upravljanja dizalicom topline korišteni su modeli diferencijalnog regulatora Type 2 i kalendara sezone grijanja/hlađenja Type 14 te komponenta za upravljanje kontrolnih signala (*Upravljanje DT*).



Slika 33. Model regulacije cirkulacijskog kruga dizalice topline

Komponentom Type 2 modelirani su diferencijalni regulatori temperature u spremniku PTV-a te temperature povrata vode u dizalicu topline. Diferencijalni regulator temperature spremnika napravljen je na način da se temperatura u spremniku održava između 40 i 42 °C. Kada kontrolirana temperatura padne ispod 40 °C kontrolni signal γ poprima vrijednost 0, što u ovom slučaju predstavlja potrebu za toplinskom energijom. Vrijednost kontrolnog signala iznosi 0 sve dok temperatura u spremniku ne pređe 42 °C kada poprima vrijednost 1, što predstavlja namirenu potrebu za toplinskom energijom. Vrijednost kontrolnog signala iznosi 1 sve dok ponovno temperatura spremnika ne padne ispod 40 °C [Slika 34.]. Ovim diferencijalnim regulatorom upravlja se također i razdjelnim ventilom. Kada regulator signalizira uključivanje dizalice topline ($\gamma = 0$), protok vode se propušta prema spremniku PTV-a, dok se u suprotnome ($\gamma = 1$), sav protok propušta prema međuspremniku.



Slika 34. Diferencijalni regulator PTV-a

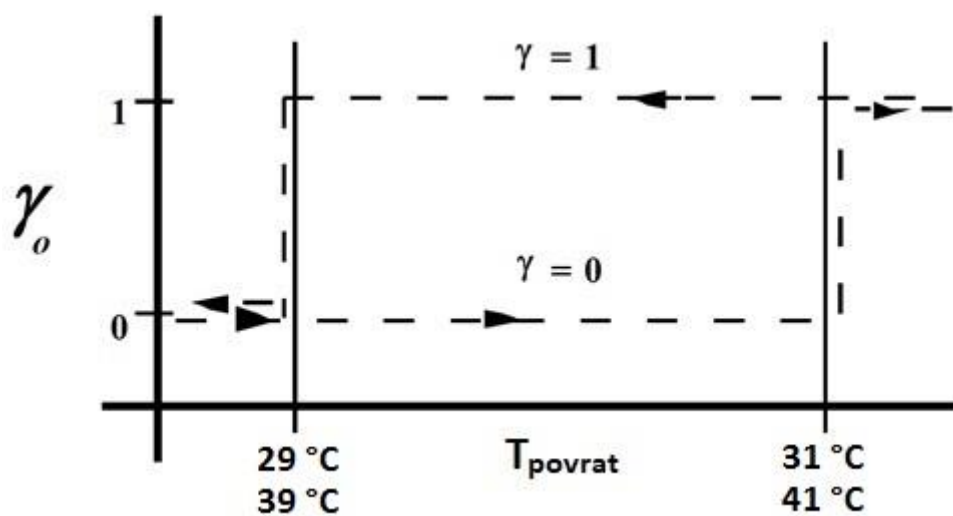
Diferencijalni regulatori temperature povrata vode u dizalicu topline funkcioniraju na isti način kao prethodno opisani regulator. Pomoću njih se temperatura povrata vode održava unutar određenih granica, ovisno o režimu rada dizalice topline. Dizalica topline radi u tri režima o kojima ovise temperature polaza/povrata vode:

- grijanje: 35/30 °C
- priprema PTV-a: 45/40 °C
- hlađenje: 7/12 °C

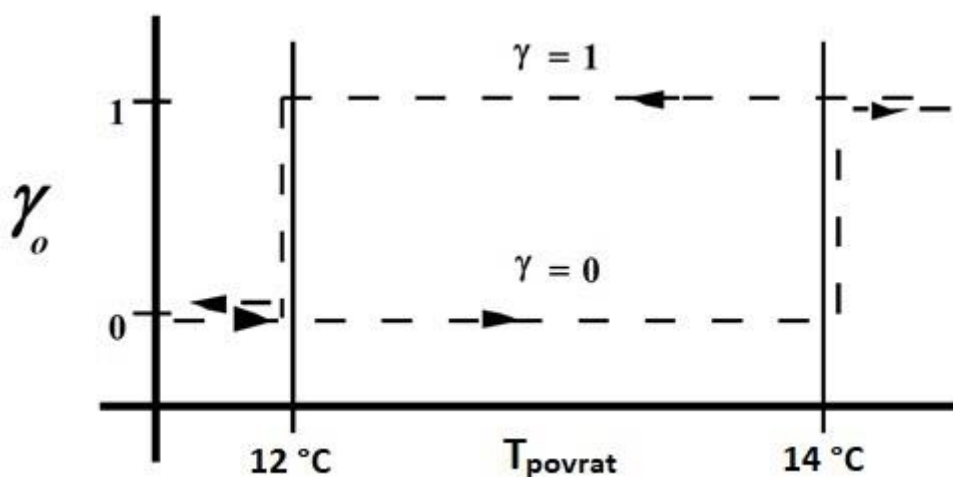
U režimu grijanja temperatura povrata vode održava se između 29 i 31 °C, u režimu pripreme PTV-a između 39 i 41 °C te u režimu hlađenja između 12 i 14 °C. Prolaskom kroz dizalicu topline voda se grije ili hladi za 5 °C. Diferencijalni regulator za režime grijanja i pripreme PTV-a prima ulazne varijable gornje i donje temperaturne granice iz upravljačke komponente.

Tamo je funkcijama opisano kako se gornja i donja temperaturna granica mijenja ovisno o

režimu rada dizalice topline [Slika 35.]. Kada kontrolirana temperatura padne ispod $29\text{ }^{\circ}\text{C}$, odnosno $39\text{ }^{\circ}\text{C}$, kontrolni signal γ diferencijalnog regulatora za režime grijanja poprima vrijednost 0 što signalizira potrebu za uključivanjem dizalice topline. Kada temperatura poraste iznad $31\text{ }^{\circ}\text{C}$, odnosno $41\text{ }^{\circ}\text{C}$, kontrolni signal γ poprima vrijednost 1 te se dizalica topline isključuje. Diferencijalni regulator za režim hlađenja funkcionira na istom principu samo što se dizalici topline signalizira uključivanje kada kontrolni signal iznosi 1, a isključivanje kada poprimi vrijednost 0 [Slika 36.].

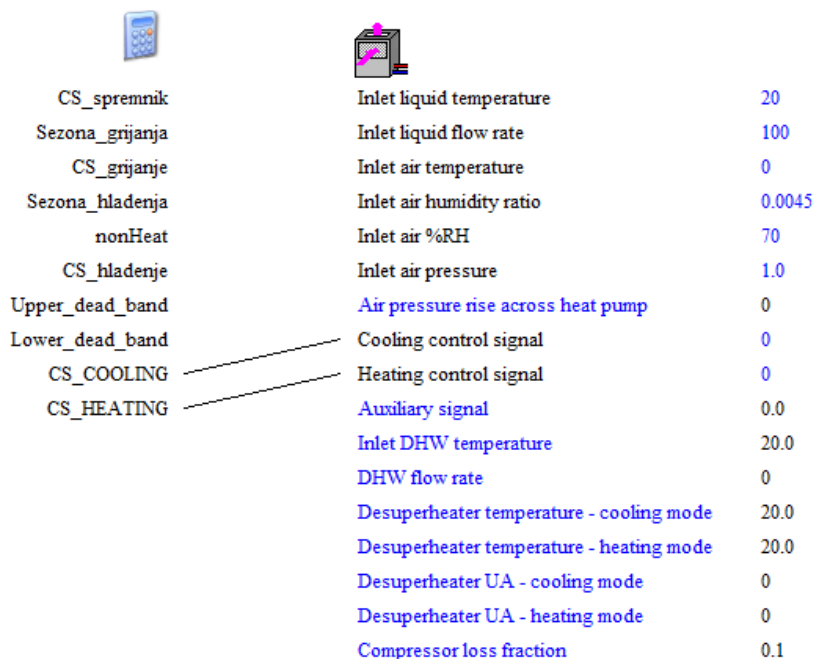


Slika 35. Diferencijalni regulator temperature povrata u režimu grijanja/pripreme PTV-a



Slika 36. Diferencijalni regulator temperature povrata u režimu hlađenja

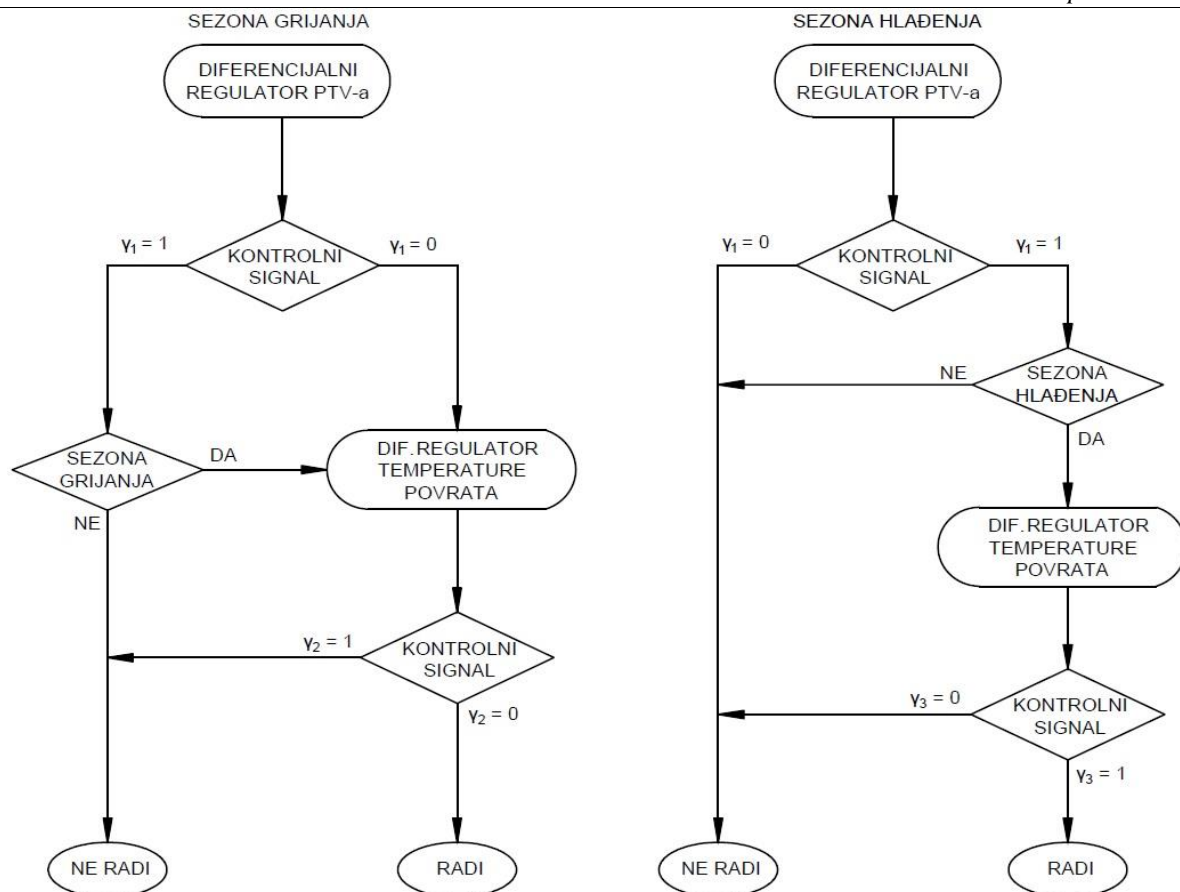
Kontrolni varijable iz diferencijalnih regulatora povezane su s komponentom za upravljanje u kojoj se preko kreiranih funkcijskih veza dobivaju kontrolni signali grijanja i hlađenja komponente dizalice topline Type 941 [Slika 37.]. Postavke regulacije dizalice topline razlikuju se ovisno o sezoni grijanja, odnosno hlađenja. Sezona hlađenja traje od početka svibnja do kraja rujna, dok preostali mjeseci predstavljaju sezonu grijanja.



| | | |
|-----------------|--|--------|
| CS_spremnik | Inlet liquid temperature | 20 |
| Sezona_grijanja | Inlet liquid flow rate | 100 |
| CS_grijanje | Inlet air temperature | 0 |
| Sezona_hlađenja | Inlet air humidity ratio | 0.0045 |
| nonHeat | Inlet air %RH | 70 |
| CS_hlađenje | Inlet air pressure | 1.0 |
| Upper_dead_band | Air pressure rise across heat pump | 0 |
| Lower_dead_band | Cooling control signal | 0 |
| CS_COOLING | Heating control signal | 0 |
| CS_HEATING | Auxiliary signal | 0.0 |
| | Inlet DHW temperature | 20.0 |
| | DHW flow rate | 0 |
| | Desuperheater temperature - cooling mode | 20.0 |
| | Desuperheater temperature - heating mode | 20.0 |
| | Desuperheater UA - cooling mode | 0 |
| | Desuperheater UA - heating mode | 0 |
| | Compressor loss fraction | 0.1 |

Slika 37. Povezivanje kontrolnih signala grijanja i hlađenja s Type 941

Slika 38. prikazuje dijagram toka regulacije dizalice topline u režimu grijanja. Neovisno o sezoni, prioritet dizalice topline je zagrijavanje vode u svrhu pripreme PTV-a. Uvijek kada regulator temperature u spremniku signalizira potrebu za toplinom ($\gamma_1 = 0$), te kada je temperatura povrata vode ispod donje granične vrijednosti 39 °C ($\gamma_2 = 0$) [Slika 35.], uključit će se dizalica topline u režimu grijanja. Kada nema potrebe za zagrijavanjem PTV-a ($\gamma_1 = 1$), a traje sezona grijanja, diferencijalni regulator kontrolira temperaturu povrata te, ako je ona ispod granične vrijednosti 29 °C ($\gamma_2 = 0$), dizalica topline se uključuje. Uključivanje režima hlađenja moguće je samo za vrijeme sezone hlađenja kada nema potrebe za zagrijavanjem PTV-a ($\gamma_1 = 1$). Dizalica topline će se uključiti u režimu hlađenja kada temperatura povrata vode poraste iznad gornje granične vrijednosti 14 °C ($\gamma_3 = 1$) [Slika 36.].



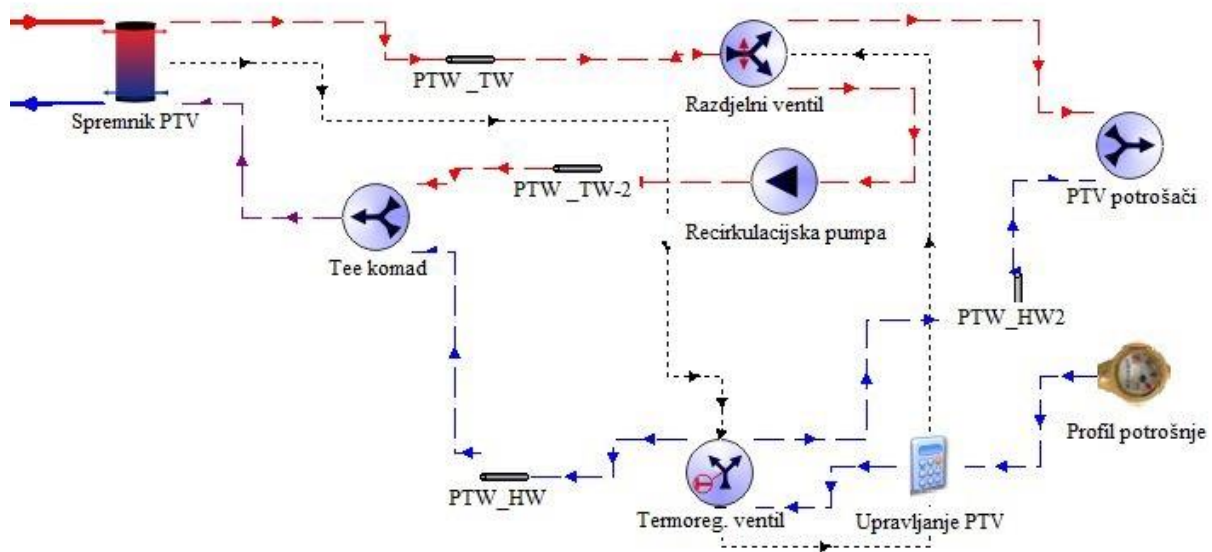
Slika 38. Dijagram toka regulacije dizalice topline u režimu grijanja (lijevo) i hlađenja (desno)

3.4.2. Regulacija kruga potrošne tople vode

Slika 39. prikazuje TRNSYS model cirkulacijskog kruga PTV-a. Regulacija kruga PTV-a simulira se pomoću upravljačke komponente (Upravljanje PTV). Ona prosljeđuje varijablu o protoku svježje vode iz vodovoda te upravlja radom termoregulacijskog ventila i razdjelnog ventila. Dnevni profil potrošnje PTV-a [Tablica 19.] odgovara dobavi svježje vode u sustav.

Tablica 19. Dnevni profil potrošnje PTV-a

| Vrijeme u danu [h] | Protok [kg/h] | Vrijeme u danu [h] | Protok [kg/h] |
|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| 0 - 7 | 0 | 13 - 14 | 100 |
| 7 - 8 | 160 | 14 - 20 | 0 |
| 8 - 9 | 30 | 20 - 21 | 200 |
| 9 - 12 | 0 | 21 - 22 | 130 |
| 12 - 13 | 30 | 22 - 24 | 0 |



Slika 39. Model regulacije cirkulacijskog kruga PTV-a

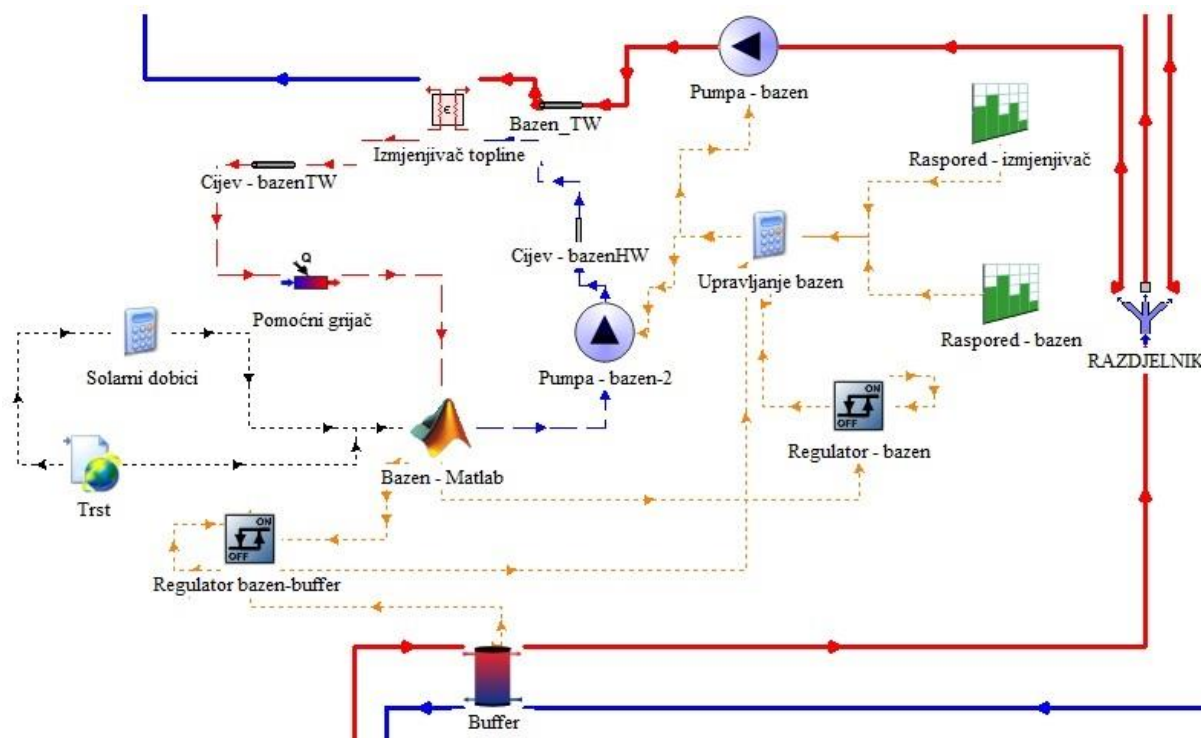
Termoregulacijski ventil održava temperaturu na potrošačima ispod postavne temperature 45 °C. Komponenta prati temperaturu na izlazu iz spremnika te prema jednadžbi (60) generira kontrolni signal kojim izračunava, prema jednadžbama (58) i (59), protoke prema spremniku i miješajućem ventilu potrošača. Recirkulacijska pumpa konstantnog protoka 100 kg/h služi kako ne bi postojala vremenska zadržka pri dobavi tople vode te je ona stalno u pogonu. U spremnik tako u svakom koraku simulacije ulazi protok recirkulacijske pumpe uvećan za protok propušten kroz termoregulacijski ventil, dok ista količina vode iz njega izlazi prema potrošačima. Razdjelni ventil prema potrošačima propušta protok \dot{m}_{PTV} prema dnevnom profilu potrošnje [Tablica 19.], dok kroz recirkulacijski vod propušta protok \dot{m}_{REC} definiran pumpom. Komponenta računa protoke prema jednadžbama (58) i (59) pri čemu je kontrolni signal unutar upravljačke komponente matematički opisan jednadžbom:

$$\gamma = \frac{\dot{m}_{PTV}}{\dot{m}_{PTV} + \dot{m}_{REC}} \quad (75)$$

3.4.3. Regulacija kruga bazena

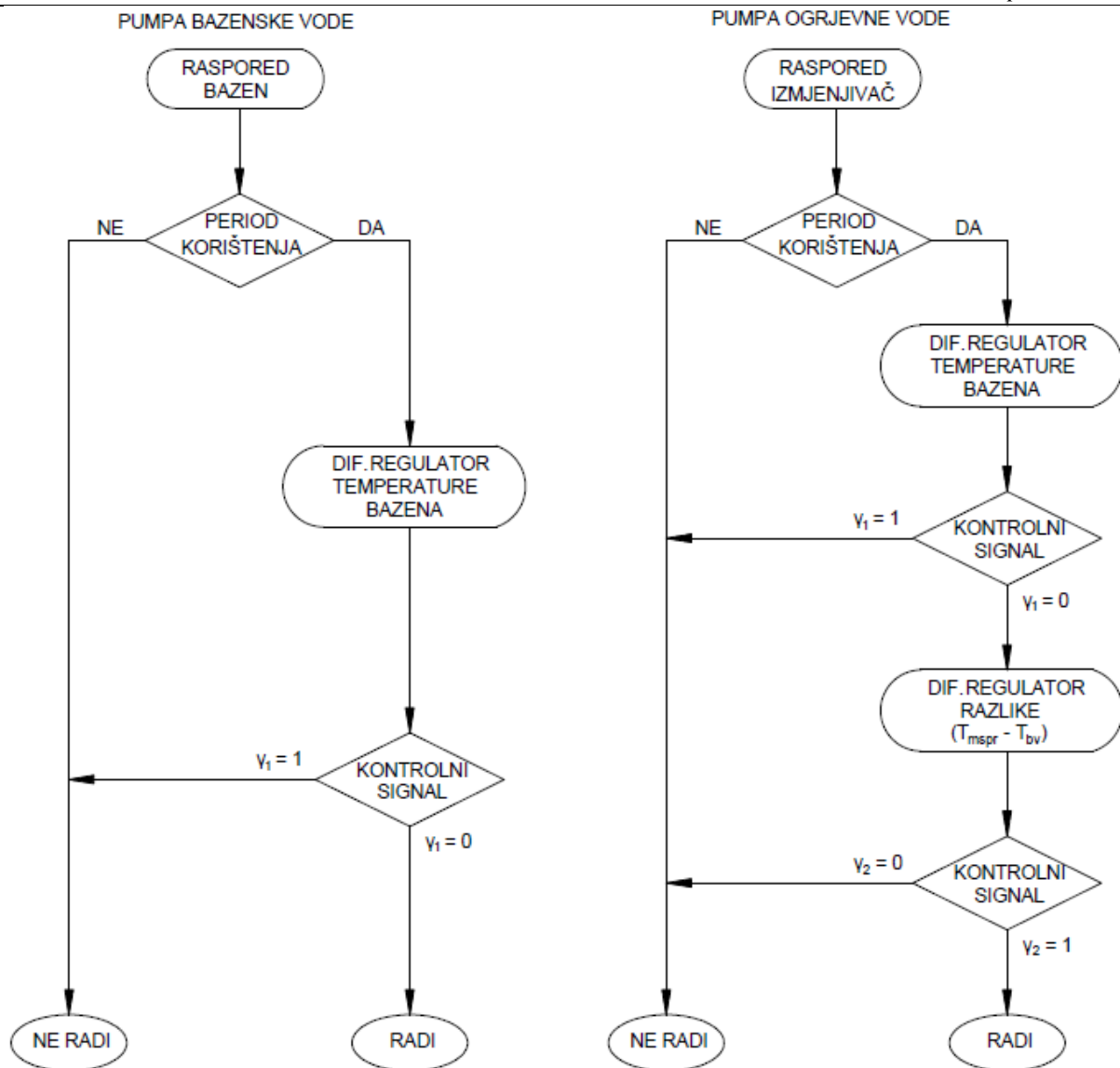
Slika 40. prikazuje model cirkulacijskog kruga bazena s pripadajućim komponentama regulacije. Cirkulacijska pumpa (*Pumpa – bazen*) definira protok ogrjevnice vode [Tablica 16.] koja struji iz međuspremnik kroz razdjelnik te nakon pumpe prolazi kroz izmjenjivač topline

preko kojega predaje toplinu bazenskoj vodi. Izlaskom iz izmjenjivača topline, ohlađena vodi struji do sabirnika gdje se miješa s ohlađenom vodom iz sustava grijanja te se vraća nazad u međuspremnik. Pumpa bazenske vode tjera vodu iz bazena prema izmjenjivaču topline iz kojega struji kroz pomoćni grijač koji se po potrebi uključuje te se zagrijana vraća u bazen. Radom cirkulacijskih pumpi upravlja se iz upravljačke komponente (*Upravljanje bazen*) na temelju kontrolnih signala iz diferencijalnih regulatora te mjesečnih rasporeda [Slika 41].



Slika 40. Model regulacije cirkulacijskog kruga bazena

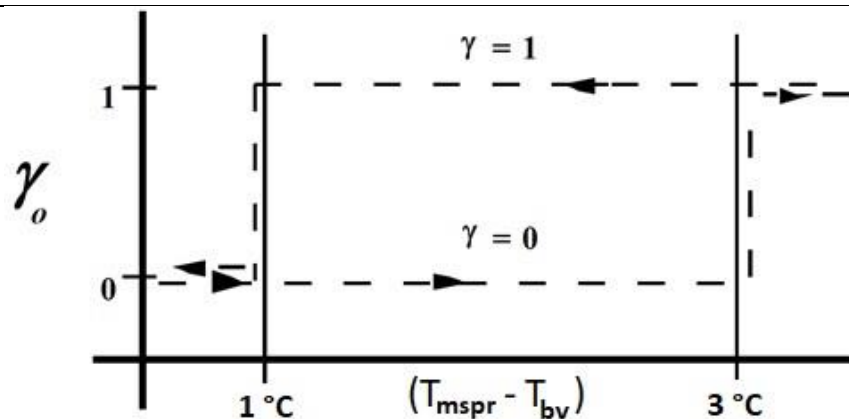
Određeno je kako će bazen biti otvoren za korištenje od početka travnja do kraja studenog što je definirano komponentom *Raspored – bazen*. U tom periodu pumpa bazenske vode radi kada diferencijalni regulator signalizira preisku temperaturu bazenske vode. Rasporedom je definirano kako pumpa ogrjevnne vode ne radi tijekom sezone hlađenja. Tijekom sezone grijanja pumpa također radi ovisno o regulatoru temperature bazenske vode. Kao dodatnu mjeru kontrole pumpe ogrjevnne vode koristi se diferencijalni regulator temperaturene razlike vode međuspremnika i vode bazena. Njime se izbjegava strujanje hladnije vode iz međuspremnika nego što je voda u bazenu što bi rezultiralo toplinskim gubicima na izmjenjivaču topline.



Slika 41. Dijagram toka regulacije pumpe bazenske vode (lijevo) i pumpe ogrjevne vode (desno)

Diferencijalni regulator temperature vode bazena funkcionira poput onih korištenih u regulaciji dizalice topline (Poglavlje 3.4.1.). Regulatorom se održava temperatura vode između temperaturnih granica. Kada temperatura vode padne ispod donje granice od $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ kontrolni signal γ_1 iznosi 0 te se šalje informacija o potrebi za uključivanjem pumpe. Nakon što temperatura poraste iznad $28,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ obustavlja se rad pumpe ($\gamma_1 = 1$).

Dodatni diferencijalni regulator prati razliku temperatura vode međuspremnika T_{mspr} i bazenske vode T_{bv} . Kada ta razlika padne ispod $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, regulator isključuje rad pumpe ($\gamma_2 = 0$). Nakon što temperaturna razlike poraste iznad $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pumpa se ponovno uključuje ($\gamma_2 = 1$) te nastavlja raditi sve dok ponovno razlika ne padne ispod $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Slika 42.].

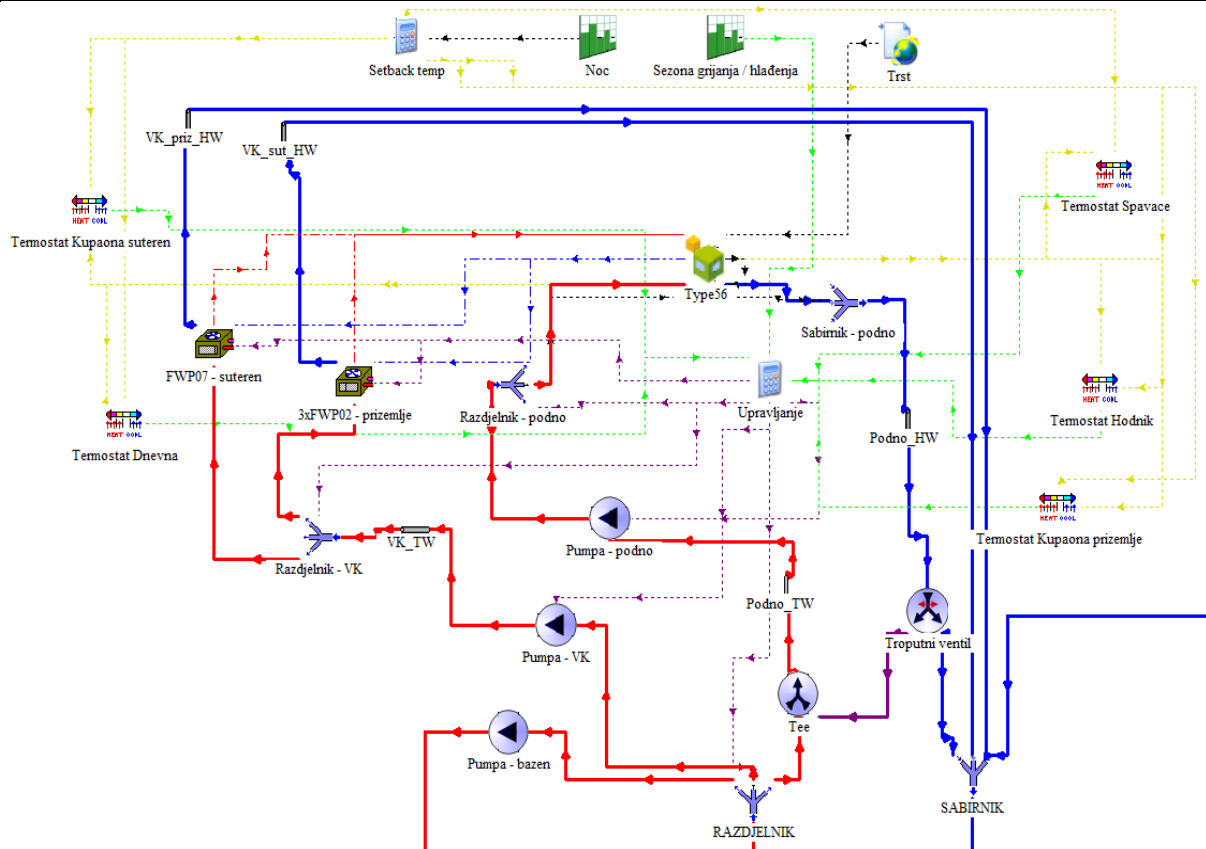


Slika 42. Diferencijalni regulator temperaturene razlike vode međuspremnik i vode bazena

3.4.4. Regulacija kruga grijanja i hlađenja zgrade

U svakoj od pet zona stambene zgrade nalazi se po jedan sobni termostat. Njima se diktira rad pumpi podnog grijanja/hlađenja i ventilokonvektora. U izradi modela termotehničkog sustava korišteni su sobni termostati s pet razina [Poglavlje 3.3.11.]. Pomoću upravljačke komponente (*Upravljanje*) modeliran je rad regulacije cirkulacijskog kruga grijanja i hlađenja stambene zgrade [Slika 43.]. Unutar komponente matematički je opisano upravljanje radom pumpi podnog grijanja/hlađenja te ventilokonvektora na temelju kontrolnih signala iz sobnih termostata. U komponenti upravljanja također je matematički opisano propuštanje vode kroz razdjelnike, što se u stvarnosti odvija uslijed razlike tlakova.

Sobni termostati zone dnevne sobe i kuhinje te zone spavaćih soba rade na dvije razine grijanja i dvije razine hlađenja, dok u ostalim zonama rade na jednoj razini. Postavne temperature svake razine unose se kao vanjske varijable s obzirom da se razlikuju u ovisnosti o dobu dana [Tablica 17.]. U svim zonama *dead band* temperatura iznosi 2 °C. Kada temperatura zraka u zoni padne ispod (sezona grijanja) odnosno poraste iznad (sezona hlađenja) postavne temperature prve razine sobnog termostata, u upravljačku komponentu se šalje kontrolni signal koji utječe na rad pumpe podnog grijanja/hlađenja. Ako temperatura zraka zone pređe postavne temperature druge razine termostata, upravljačka komponenta prima kontrolni signal koji utječe na rad pumpe ventilokonvektora. Tako se do određene postavne temperature grije i hladi samo podnim registrima, a kada temperatura padne ispod ili poraste iznad postavne temperature druge razine uključuju se u rad i ventilokonvektori.



Slika 43. Model regulacije cirkulacijskog kruga grijanja i hlađenja zgrade

Svaka zona ima definiran protok fluida kroz cijevne registre koji predstavlja određeni udio r_i maksimalnog protoka pumpe \dot{m}_{max} [Tablica 20.]. Protok cirkulacijske pumpe \dot{m}_o računa se prema jednadžbi (48) gdje je kontrolni signal pumpe podnog grijanja γ_{pod} jednak sumi umnožaka udjela r_i te kontrolnog signala prve razine pojedinog sobnog termostata $\gamma_{1,i}$.

Tablica 20. Protoci vode kroz podne registre pojedinih zona

| | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Protok vode \dot{m}_i [kg/h] | 690 | 100 | 440 | 195 | 75 |
| Udio maksimalnog protoka r_i [-] | 0,46 | 0,067 | 0,293 | 0,13 | 0,05 |

$$\gamma_{pod} = \sum_{i=1}^5 r_i \cdot \gamma_{1,i} \quad (76)$$

$$\dot{m}_{pod,o} = \gamma_{pod} \cdot \dot{m}_{pod,max} \quad [\text{kg/h}] \quad (77)$$

Izlazni protoci iz razdjelnika prema podnim registrima pojedine zone računaju se prema jednadžbi (61). U razdjelnik ulazi protok iz pumpe \dot{m}_o , a ulaznom varijablom f_i iz upravljačke komponente određuje se izlazni protok prema pojedinoj zoni $\dot{m}_{o,i}$.

$$f_i = \frac{r_i \cdot \gamma_{1,i}}{\gamma_{pod}} \quad (78)$$

$$\dot{m}_{o,i} = f_i \cdot \dot{m}_{pod,o} \quad [\text{kg/h}] \quad (79)$$

Protok cirkulacijske pumpe ventilokonvektora računa se na način kao i protok pumpe podnog grijanja/hlađenja. Kontrolni signal pumpe ventilokonvektora γ_{vk} računa se kao umnožak udjela udjela r_i [Tablica 21.] te kontrolnog signala druge razine pojedinog sobnog termostata $\gamma_{2,i}$. Izlazni protoci iz razdjelnika prema ventilokonvektorima računaju se na temelju ulazne varijable f_i iz upravljačke komponente i dobivenog protoka pumpe ventilokonvektora.

Tablica 21. Protoci vode kroz ventilokonvektore

| | Suteren (VK 1) | Prizemlje (VK 2) |
|--|----------------|------------------|
| Protok vode \dot{m}_i [kg/h] | 1111 | 1344 |
| Udio maksimalnog protoka r_i [-] | 0,4525 | 0,5475 |

$$\gamma_{VK} = \sum_{i=1}^2 r_i \cdot \gamma_{2,i} \quad (80)$$

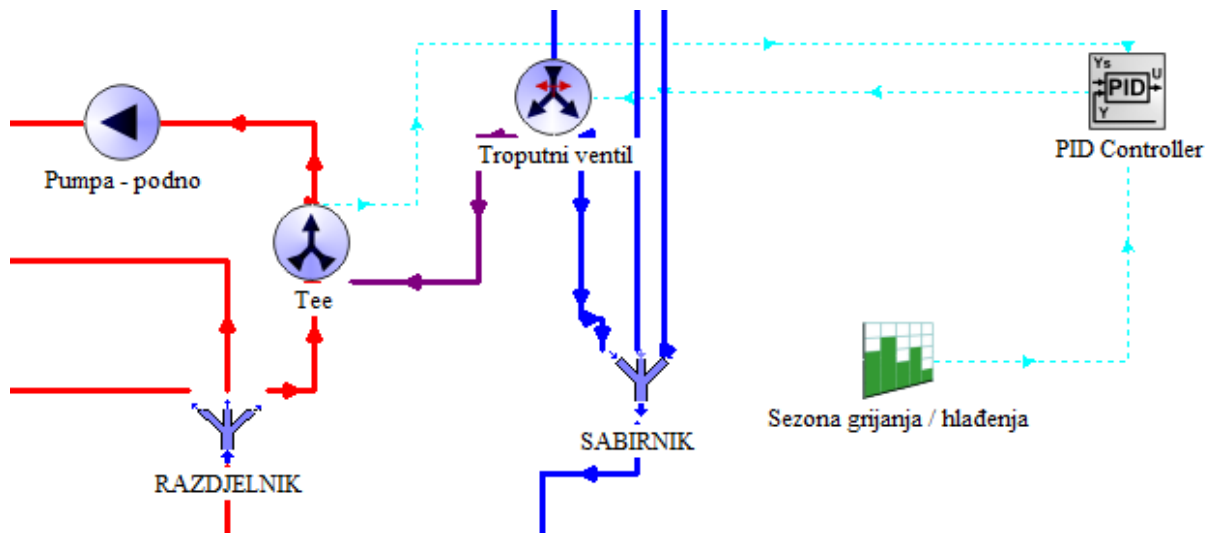
$$\dot{m}_{VK,o} = \gamma_{VK} \cdot \dot{m}_{VK,max} \quad [\text{kg/h}] \quad (81)$$

$$f_i = \frac{r_i \cdot \gamma_{2,i}}{\gamma_{VK}} \quad (82)$$

$$\dot{m}_{o,i} = f_i \cdot \dot{m}_{VK,o} \quad [\text{kg/h}] \quad (83)$$

3.4.5. Regulacija troputnog ventila

Kako bi se u sezoni hlađenja spriječila kondenzacija vlage na podu, potrebno je regulirati temperaturu rashladne vode u krugu podnog hlađenja. Regulacija temperature vode prema pumpi podnog hlađenja vrši se korištenjem komponente PID regulatora Type 23 [Slika 44.].



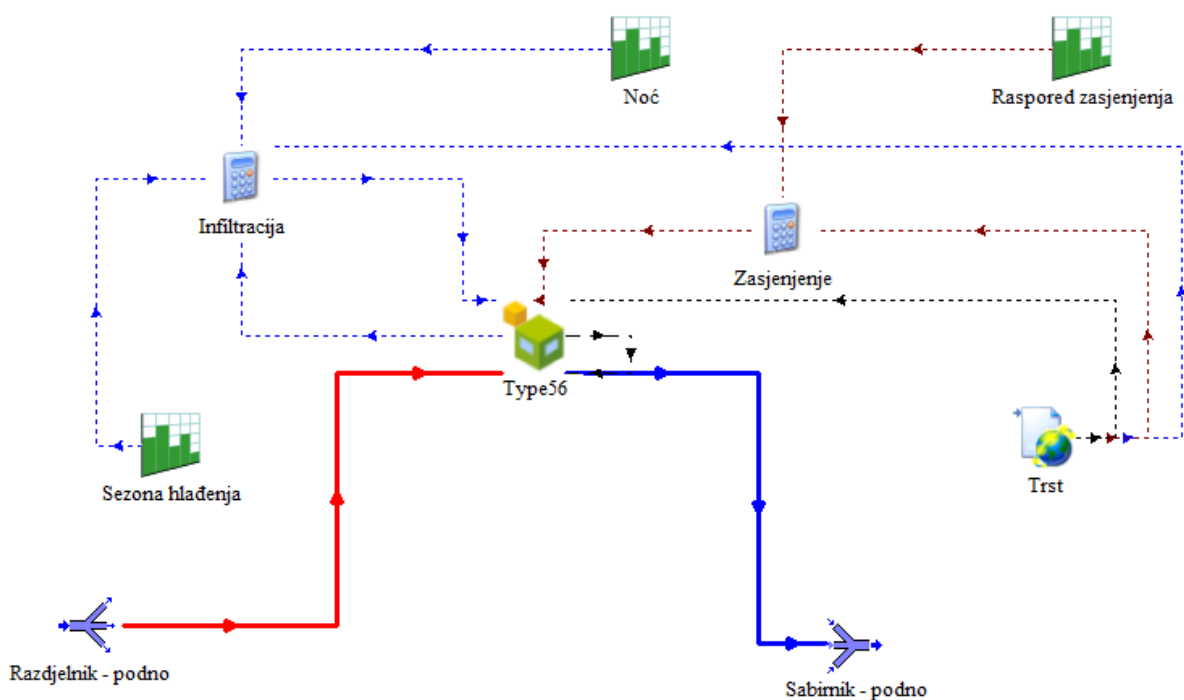
Slika 44. Model regulacije troputnog ventila

Regulatorom se rashladna voda održava na postavnoj temperaturi 18 °C. Komponenta regulatora na temelju ulaznih varijabli prema jednadžbi (67) računa kontrolni signal γ kojim upravlja protokom povratne zagrijane vode iz sustava podnog hlađenja. Komponenta troputnog ventila na temelju kontrolnog signala prema jednadžbama (58) i (59) računa protok vode koji se kroz obilazni vod (eng. *bypass*) odvaja prema polazu rashladne vode. Nakon miješanja s hladnim protokom, voda poprima temperaturu 18 °C. PID regulator povezan je s komponentom kalendara kako bi kontrolirao temperaturu vode isključivo u sezoni hlađenja. Konstanta regulatora K iznosi 0,01, integralno vrijeme T_i iznosi 1 min (0,0167 h), dok se derivacijska komponenta regulatora ne koristi. Pritom jednadžba modela Type 23 poprima oblik:

$$\gamma(t) = 0,01 \left(e(t) + \frac{1}{0,0167} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (84)$$

3.4.6. Regulacija infiltracije zraka i zasjenjenja prozora

U sezoni hlađenja te u prijelaznim razdobljima između sezona upadno sunčevo zračenje može znatno utjecati na toplinsko opterećenje zgrade. Kako bi se smanjila vršna potrošnja energije za hlađenje potrebno je osigurati zasjenjenje staklenih površina radi smanjenja upadnog sunčevog zračenja. Po noći je korisno povećati izmjenu zraka u zonama kako bi se zgrada ohladila. Slika 45. prikazuje model regulacije infiltracije zraka te zasjenjenja staklenih površina ovojnice zgrade.



Slika 45. Model regulacije infiltracije zraka i zasjenjenja prozora

Komponentama kalendara određena su vremenska razdoblja kada se vrše regulacije infiltracije i zasjenjenja te je definiran noćni period kada se odvija veća izmjena zraka. Regulacija je logičkim funkcijama opisana unutar upravljačkih komponenta *Infiltracija* i *Zasjenjenje*.

Upravljačka komponenta infiltracije prima ulazne varijable razdoblja korištenja (iz komponenta *Sezona hlađenja* i *Noć*), temperature zraka u zonama (iz komponente Type 56) i temperature vanjskog zraka (iz komponente Type 15-6). Prema tim ulaznim varijablama se određuje infiltracija zraka pojedine zone. U sezoni grijanja konstantne su vrijednosti infiltracije zraka po zonama [Tablica 4]. Tijekom sezone hlađenja, koja traje od početka svibnja do kraja rujna, infiltracija zraka u zonama 1 i 3 poprima veće vrijednosti preko noći,

uz uvjet da je temperatura vanjskog zraka manja od onoga u zoni [Tablica 22.]. Preko dana infiltracija zraka u pojedine zone ima definiranu stalnu vrijednost, dok po noći, kada je temperatura zraka zone manja od temperature vanjskog zraka, poprima veće vrijednosti

Tablica 22. Infiltracija zraka po zonama u sezoni hlađenja

| | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Infiltracija – dan [h⁻¹] | 1,5 | 1,5 | 1 | 0,5 | 1,5 |
| Infiltracija – noć [h⁻¹] | 2,5 | 1,5 | 2,5 | 0,5 | 1,5 |

Upravljačka komponenta zasjenjenja prima ulazne varijable razdoblja korištenja (iz komponente *Raspored zasjenjenja*) te ukupnog sunčevog zračenja (iz komponente Type 15-6). Temeljem ulaznih varijabli određuje kada će se zasjenjenjem prekriti staklene površine ovojnice zgrade. U definiranom periodu od početka travanja do početka listopada, kada ukupno sunčevo zračenje iznosi 500 W/m² ili više, prozori će se zaštititi vanjskim zasjenjenjem. Komponenta višezonske zgrade Type 56 prima ulaznu varijablu faktora zasjenjenja (eng. *shading factor*) iz upravljačke komponente. Kada je ukupno sunčevo zračenje veće od 500 W/m², faktor zasjenjenja iznosi 0,5.

4. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJA

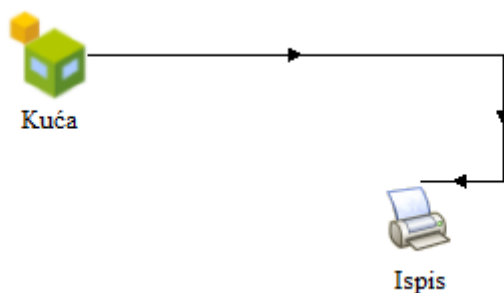
U ovom poglavlju provedena je analiza podataka prikupljenih simulacijama. Ustanovljena je maksimalna potrebna snaga grijanja i hlađenja, određena je godišnja potrošnja energije za grijanje i hlađenje te su ispitani utjecaji regulacije sustava grijanja i hlađenja na potrošnju energije.

4.1. Maksimalna potrebna snaga za grijanje

Maksimalna potrebna snaga za grijanje određuje se za projektnu temperaturu vanjskog zraka $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, bez uzimanja u obzir utjecaja sunčevog zračenja. U komponenti višezonske zgrade Type 56 unose se postavne temperature zona u režimu grijanja i infiltracije zraka [Tablica 4.] te se simulacijom u programu TRNSYS utvrđuje potreba za toplinskom energijom svake zone. U sučelju Simulation Studio komponenta višezonske zgrade povezana je samo s komponentom za ispis podataka [Slika 46.]. Simulacijom je utvrđena maksimalna potrebna snaga grijanja iznosa 7,85 kW. Maksimalna potrebna snaga grijanja po zonama prikazana je u Tablica 23. S obzirom kako na maksimalnu potrebnu snagu hlađenja osim vanjske temperature zraka utječu dobici od sunčevog zračenja, za njezino određivanje potrebno je provesti simulaciju na godišnjoj razini [Poglavlje 4.2.3.].

Tablica 23. Maksimalna potrebna snaga grijanja po zonama

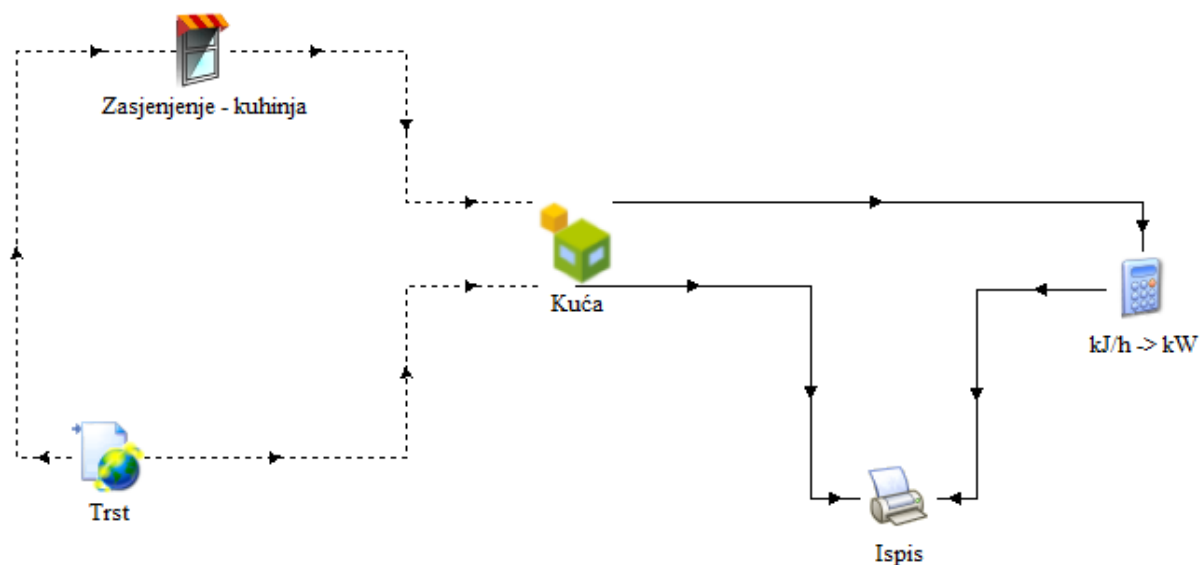
| | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 |
|----------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| Snaga grijanja [kW] | 3,61 | 0,49 | 2,32 | 0,93 | 0,50 |
| Ukupno [kW] | 7,85 | | | | |



Slika 46. Simulacija maksimalne snage grijanja

4.2. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje

Simulacijama su na satnoj razini utvrđene godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje višezonske zgrade. U proračunu se uzimaju u obzir meteorološki podaci koji se iz komponente Type 15-6 kao ulazne varijable unose u komponentu višezonske zgrade. Također je u obzir uzeta zaklonjenost vanjskog jugoistočnog zida kuhinje od Sunca zbog geometrije zgrade. Komponentom Type 3 (*Zasjenjenje – kuhinja*) modelirano je zasjenjenje jugoistočnog kuhinjskog zida od bočnog zida i gornje etaže. Slika 47. prikazuje TRNSYS model kojim su izračunate godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje.



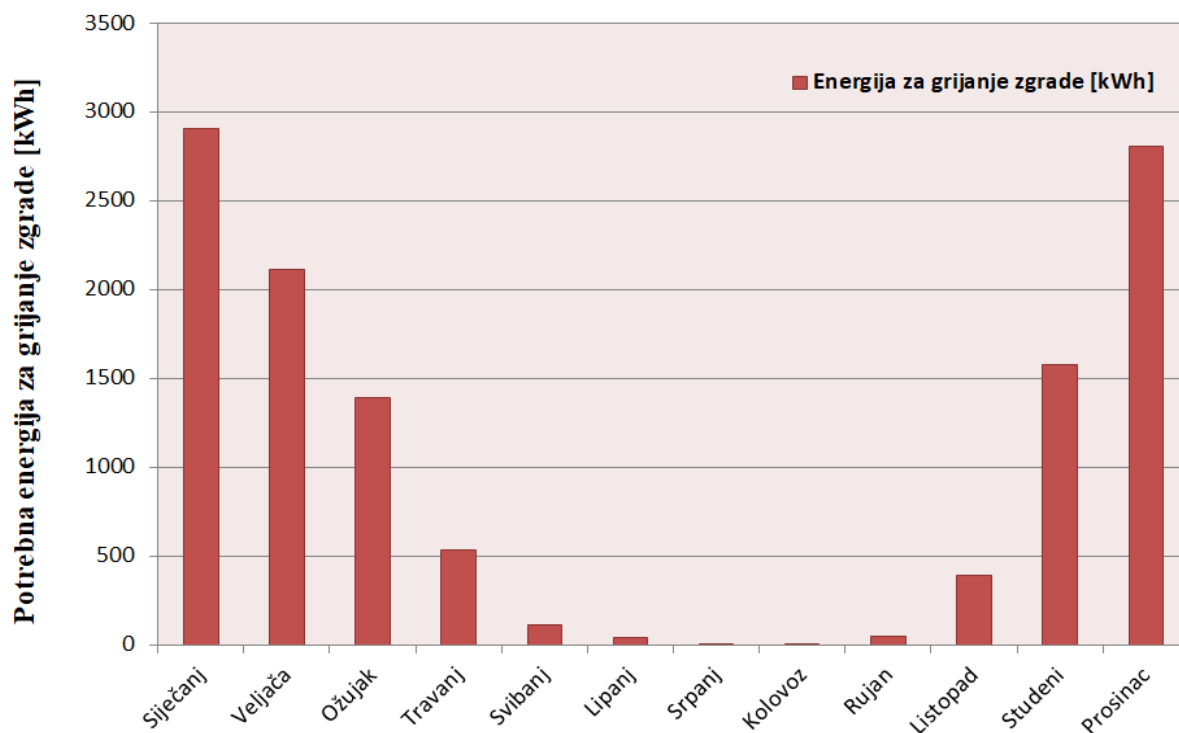
Slika 47. Simulacija godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje

4.2.1. Godišnja potrebna energija za grijanje

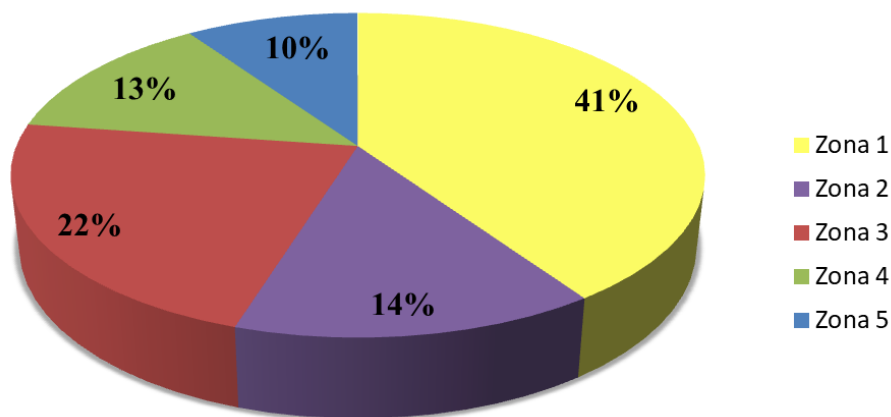
Simulacijom je utvrđeno kako je potrebno 11936 kWh toplinske energije godišnje kako bi se u zonama održale definirane postavne temperature. Tablica 24. prikazuje izračunate potrebne energije za grijanje pojedinih zona na mjesečnoj i godišnjoj razini, što je prikazano i grafički [Slika 48.]. Tortni grafikon prikazuje udjele godišnje potrebe za toplinskom energijom pojedinih zona [Slika 49.].

Tablica 24. Potrebna energija za grijanje po mjesecima u kWh

| | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 | Ukupno |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Siječanj | 1261,4 | 268,3 | 740,7 | 397,1 | 240,4 | 2907,8 |
| Veljača | 874,2 | 232 | 502,2 | 310,7 | 195 | 2114,2 |
| Ožujak | 555,7 | 224,8 | 258,6 | 195,1 | 158,8 | 1393,1 |
| Travanj | 180 | 175,7 | 69,5 | 31,7 | 78,0 | 534,8 |
| Svibanj | 0 | 102,7 | 0 | 0,1 | 6,6 | 109,3 |
| Lipanj | 0 | 40,6 | 0 | 0 | 0 | 40,6 |
| Srpanj | 0 | 5,7 | 0 | 0 | 0 | 5,7 |
| Kolovoz | 0 | 3,9 | 0 | 0 | 0 | 3,9 |
| Rujan | 0 | 43,9 | 0 | 0 | 1,5 | 45,4 |
| Listopad | 109,4 | 146,7 | 36,1 | 28,2 | 71,7 | 392,2 |
| Studeni | 623,8 | 216,3 | 332,1 | 238,8 | 170,3 | 1581,3 |
| Prosinac | 1223,2 | 254,7 | 737,6 | 368,3 | 223,9 | 2807,7 |
| GODIŠNJE | 4828 | 1715 | 2677 | 1570 | 1146 | 11936 |



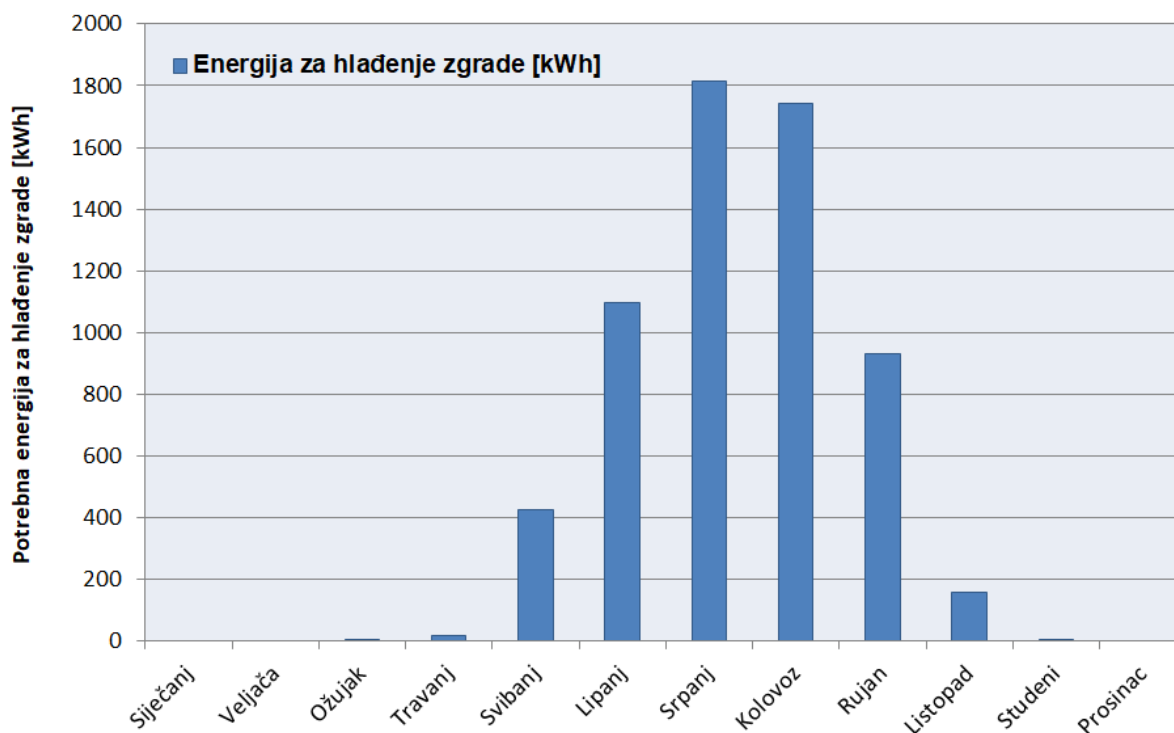
Slika 48. Potrebna energija za grijanje zgrade po mjesecima



Slika 49. Udio godišnje energije potrebne za grijanje po zonama

4.2.2. Godišnja potrebna energija za hlađenje

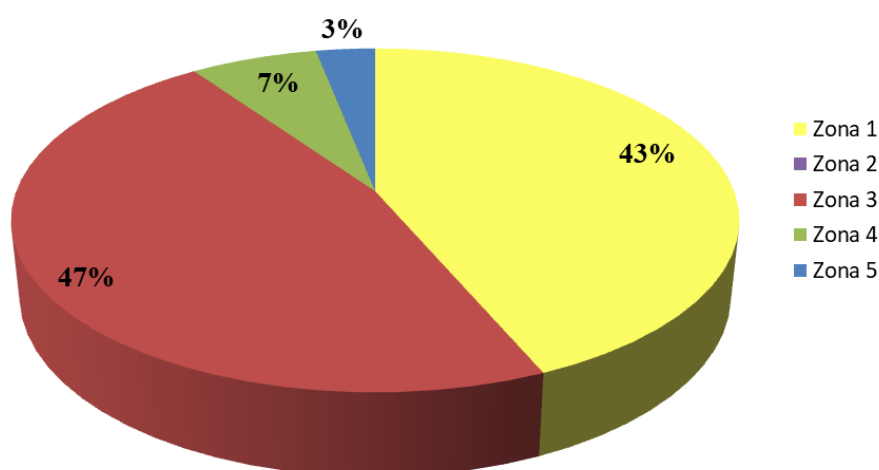
Simulacijom je utvrđeno kako je potrebno 6185 kWh rashladne energije godišnje kako bi se održavala temperatura zraka u zonama oko 26 °C. Tablica 25. prikazuje izračunate potrebne energije za hlađenje pojedinih zona na mjesečnoj i godišnjoj razini, što je prikazano i grafički [Slika 50.]. Tortni grafikon [Slika 51.] prikazuje udjele godišnje potrebe za rashladnom energijom pojedinih zona.



Slika 50. Potrebna energija za hlađenje zgrade po mjesecima

Tablica 25. Potrebna energija za hlađenje po mjesecima u kWh

| | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 | Ukupno |
|-----------------|-------------|----------|-------------|------------|------------|-------------|
| Siječanj | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Veljača | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ožujak | 0 | 0 | 1,2 | 0 | 0 | 1,2 |
| Travanj | 1,6 | 0 | 18,1 | 0 | 0 | 19,7 |
| Svibanj | 159,3 | 0 | 259,4 | 2,5 | 3,7 | 424,9 |
| Lipanj | 462,0 | 0 | 506,5 | 84,1 | 42,6 | 1095,1 |
| Srpanj | 794,9 | 0 | 772,5 | 172,2 | 74,4 | 1814 |
| Kolovoz | 788,5 | 0 | 763,2 | 129,7 | 59,3 | 1740,6 |
| Rujan | 419,4 | 0 | 476,9 | 23,3 | 11,3 | 930,9 |
| Listopad | 66,2 | 0 | 91,7 | 0 | 0 | 157,9 |
| Studeni | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,5 |
| Prosinac | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| GODIŠNJE | 2692 | 0 | 2890 | 412 | 191 | 6185 |



Slika 51. Udio godišnje energije potrebne za hlađenje po zonama

4.2.3. Maksimalna potrebna snaga za hlađenje

Simulacijom je utvrđeno kako maksimalna potrebna snaga za hlađenje zgrade iznosi 7,02 kW. Prema simulaciji, maksimalna snaga za grijanje potrebna je 19. kolovoza pri čemu je potreban rashladni učin po zonama prikazan u sljedećoj tablici.

Tablica 26. Maksimalna potrebna snaga hlađenja po zonama

| | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 |
|----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Snaga hlađenja [kW] | 3,09 | 0,00 | 3,38 | 0,40 | 0,16 |
| Ukupno [kW] | 7,02 | | | | |

4.3. Godišnja potrošnja energija za grijanje i hlađenje

Simulacijom rada termotehničkog sustava u programu TRNSYS dobiveni su podaci o proizvedenoj toplinskoj i rashladnoj energiji dizalicom topline te podaci o utrošenoj električnoj energiji potrebnoj za rad sustava. Pritom je analiziran rad pojedinih komponenti sustava grijanja i hlađenja stambene zgrade, pripreme PTV-a te grijanja bazenske vode. Kompletan model termotehničkog sustava u programu TRNSYS Simulation Studio prikazan je u Prilogu II. Tablica 27. prikazuje rezultate simulacije godišnjeg rada termotehničkog sustava u programu TRNSYS. Vremenski korak simulacije iznosi 1 min. Prikazana je proizvedena toplinska i rashladna energija dizalicom topline, utrošena električna energija za rad dizalice topline, pumpi i ventilatora sustava grijanja i hlađenja te električna energija potrebna za grijanje i cirkulaciju bazenske vode. Sve energije su iskazane u kWh.

Tablica 27. Rezultati simulacije godišnjeg rada termotehničkog sustava obiteljske kuće

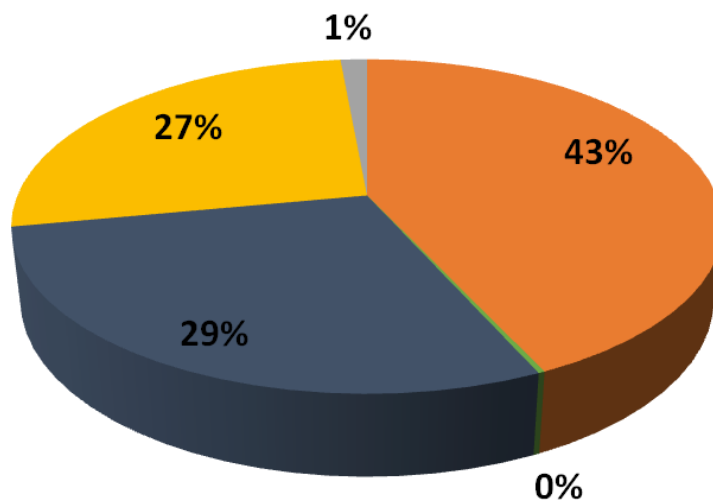
| | Toplinska energija – DT | Rashladna energija – DT | Električna energija – DT | Električna energija – pumpe i ventilatori | Električna energija – bazen |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---|-----------------------------|
| Siječanj | 3671,8 | 0 | 1076,9 | 124,1 | 0 |
| Veljača | 2765 | 0 | 788 | 107,1 | 0 |
| Ožujak | 2159,4 | 0 | 585,9 | 116,5 | 0 |
| Travanj | 3715,2 | 0 | 893,3 | 99,1 | 6782,8 |
| Svibanj | 721,4 | 307,7 | 272,7 | 67 | 6772,5 |
| Lipanj | 698,1 | 882,1 | 443,4 | 79,6 | 4809,2 |
| Srpanj | 721,7 | 1575 | 678,9 | 93,1 | 3814,9 |
| Kolovoz | 722,2 | 1523,3 | 661,2 | 93,1 | 4244,6 |
| Rujan | 698,7 | 816,7 | 420,5 | 77,4 | 5995,3 |
| Listopad | 3282,4 | 0 | 755,2 | 99,6 | 7063 |
| Studeni | 5451,8 | 0 | 1393,3 | 112,7 | 7540,7 |
| Prosinac | 3554,8 | 0 | 994,1 | 124,8 | 0 |
| GODIŠNJE | 28163 | 5105 | 8964 | 1194 | 47023 |

Simulacijom je dobiveno kako dizalica topline godišnje proizvede 28163 kWh toplinske energije koja se koristi za grijanje zgrade, pripremu PTV-a te zagrijavanje bazenske vode, dok se dio energije gubi prilikom transporta kroz cijevi i spremnike [Slika 52.]. Tijekom sezone hlađenja dizalica topline proizvodi 5105 kWh rashladne energije [Slika 53.]. Za pogon sustava grijanja i hlađenja, što uključuje snagu potrebnu za pogon dizalice topline, cirkulacijskih pumpi i ventilatora ventilokonvektora, potrebno je godišnje ukupno 10158 kWh električne energije. Bazen se primarno grije električnim grijačem, dok dizalica topline služi kako bi se smanjila potrošnja električne energije. Električna energija utrošena na zagrijavanje vode i pogon cirkulacijskih pumpi bazenskog kruga iznosi 47023 kWh. Tablica 28. prikazuje simulacijom dobivene rezultate izmijenjene topline preko podnog grijanja/hlađenja, ventilokonvektora i izmjenjivača topline bazena te onoga u spremniku tople vode.

Tablica 28. Izmijenjene toplinske energije preko pojedinih komponenti sustava

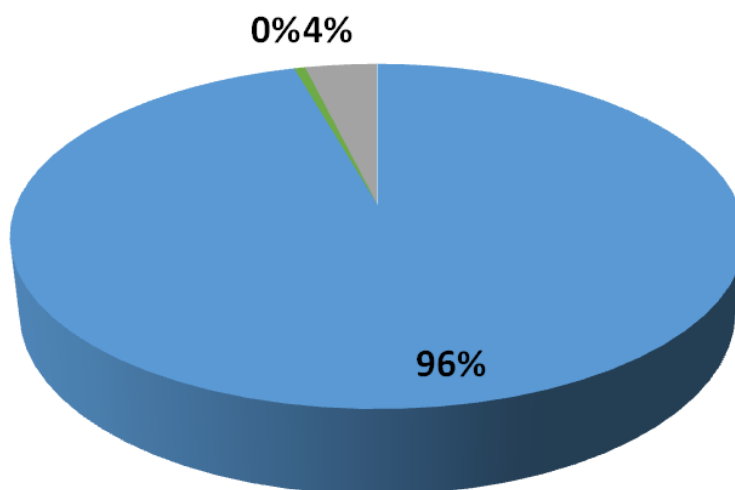
| | Podno grijanje [kWh] | Podno hlađenje [kWh] | VK – grijanje [kWh] | VK – hlađenje [kWh] | PTV [kWh] | Bazen - izmjenjivač [kWh] |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|--|
| Siječanj | 2898,9 | 0 | 31,1 | 0 | 697,4 | 0 |
| Veljača | 2110,6 | 0 | 5,7 | 0 | 619 | 0 |
| Ožujak | 1453,1 | 0 | 1,1 | 0 | 685,2 | 0 |
| Travanj | 708,7 | 0 | 0 | 0 | 663,3 | 2316,8 |
| Svibanj | 0 | 265,8 | 0 | 0 | 685,4 | 0 |
| Lipanj | 0 | 844,8 | 0 | 0 | 663 | 0 |
| Srpanj | 0 | 1531,7 | 0 | 5,2 | 685,2 | 0 |
| Kolovoz | 0 | 1469,1 | 0 | 15,4 | 685,3 | 0 |
| Rujan | 0 | 769,7 | 0 | 8,8 | 663,2 | 0 |
| Listopad | 554,5 | 0 | 0 | 0 | 685,2 | 2024,3 |
| Studeni | 1604,3 | 0 | 0,9 | 0 | 663,3 | 3134,8 |
| Prosinac | 2799 | 0 | 32,4 | 0 | 685,3 | 0 |
| GODIŠNJE | 12129 | 4881 | 71 | 29 | 8081 | 7476 |

Podno grijanje Ventilokonvektori PTV Bazen Gubici



Slika 52. Potrošnja proizvedene toplinske energije dizalicom topline

Podno hlađenje Ventilokonvektori Gubici



Slika 53. Potrošnja proizvedene rashladne

Iz rezultata prikazanih tablicom i grafikonima uočava se kako se ventilokonvektori u odnosu na sustav podnog grijanja i hlađenja gotovo ne koriste što je rezultat optimalnih postavaka regulacije termotehničkog sustava. Sljedeće tablice prikazuju toplinsku, odnosno rashladnu energiju, predanu zraku pojedinih zona podnim registrima.

Tablica 29. Toplinska energija predana podnim grijanjem pojedinim zonama

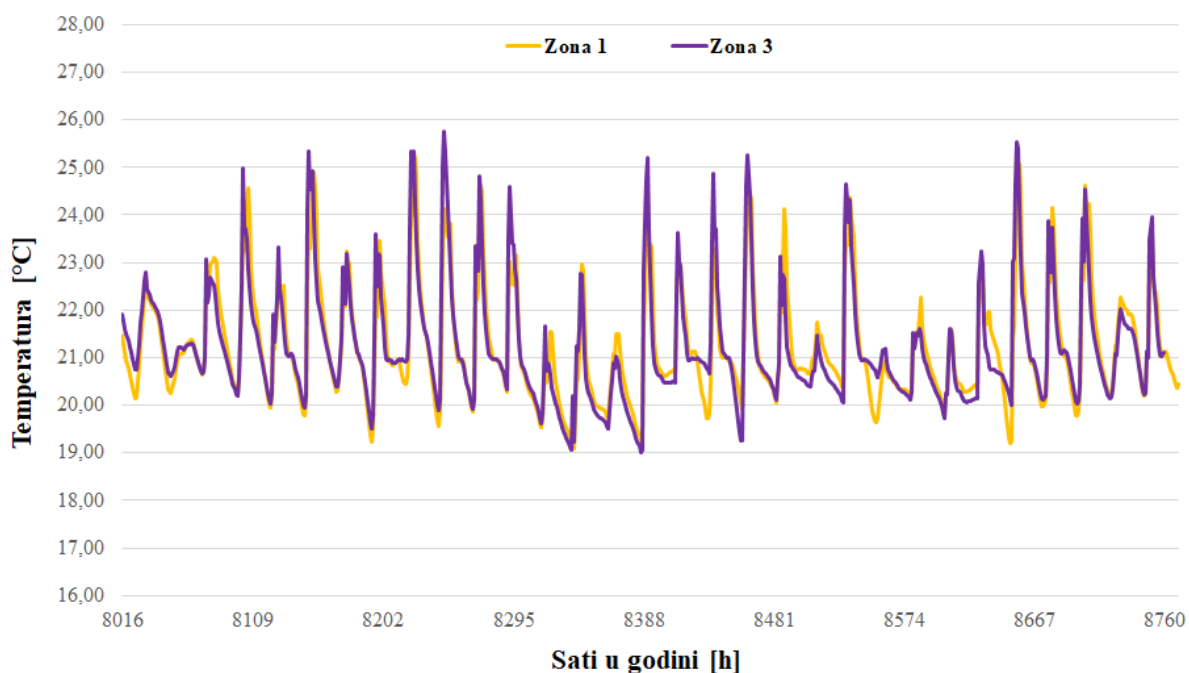
| | Zona 1 [kWh] | Zona 2 [kWh] | Zona 3 [kWh] | Zona 4 [kWh] | Zona 5 [kWh] |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Siječanj | 1238,8 | 239,4 | 768,6 | 477,2 | 174,9 |
| Veljača | 861,4 | 198,7 | 512,6 | 389,5 | 148,3 |
| Ožujak | 560 | 204,1 | 267,7 | 284,7 | 136,5 |
| Travanj | 279,3 | 176,6 | 96,7 | 77,1 | 78,9 |
| Listopad | 172,2 | 169,5 | 65,7 | 68,6 | 78,5 |
| Studeni | 618,6 | 192,3 | 346,2 | 312,7 | 134,5 |
| Prosinac | 1196,3 | 221,4 | 760 | 451,3 | 170,1 |
| GODIŠNJE | 4927 | 1402 | 2818 | 2061 | 922 |

Tablica 30. Rashladna energija predana podnim hlađenjem pojedinim zonama

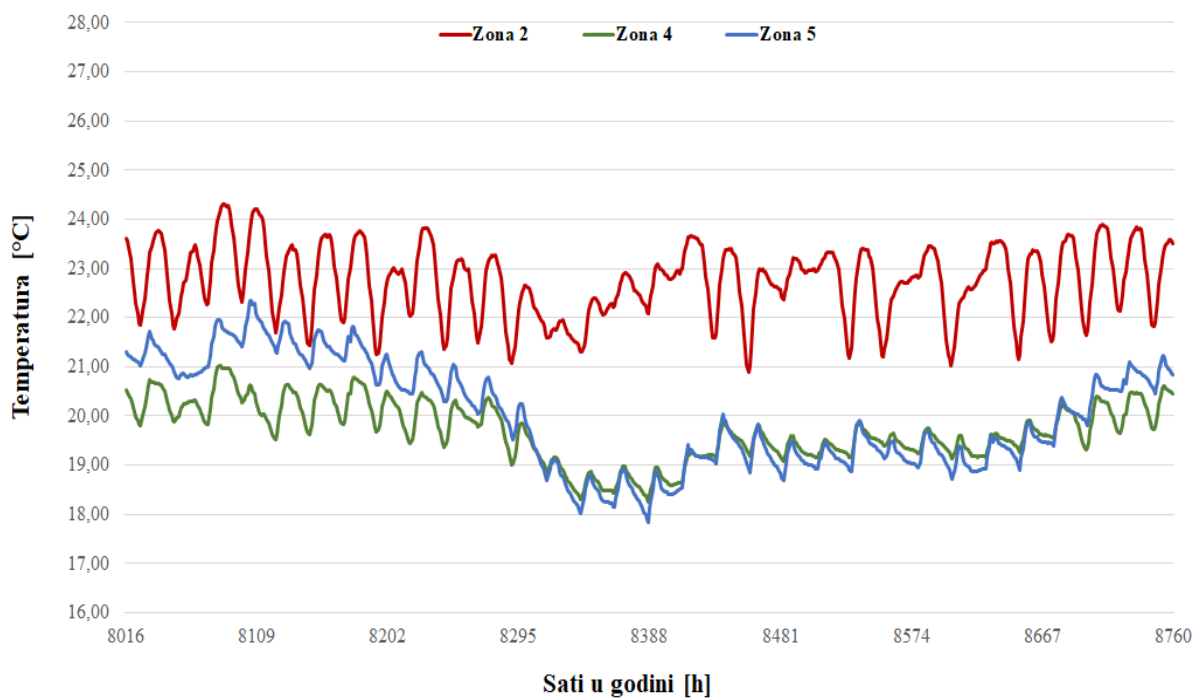
| | Zona 1 [kWh] | Zona 2 [kWh] | Zona 3 [kWh] | Zona 4 [kWh] | Zona 5 [kWh] |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Svibanj | 98,1 | 0 | 164,7 | 0 | 3 |
| Lipanj | 346,8 | 0 | 392,8 | 62 | 43,2 |
| Srpanj | 665 | 0 | 625,2 | 166,3 | 75,3 |
| Kolovoz | 670,9 | 0 | 624,7 | 111,9 | 61,7 |
| Rujan | 349,6 | 0 | 400,2 | 8,4 | 11,5 |
| GODIŠNJE | 2130 | 0 | 2208 | 349 | 195 |

Proizvedenom toplinskom energijom dizalice topline održava se tijekom cijele godine temperatura PTV-a na potrošačima pri temperaturi oko 40 °C. Za vrijeme sezone grijanja toplina se troši kako bi se u zonama održavale postavne temperature zraka [Tablica 17.] te temperatura vode u bazenu oko 28 °C. Tijekom sezone hlađenja dizalicom topline proizvodi se rashladna energija potrebna za održavanje temperature zraka u zonama oko 26 °C. U tom periodu se temperatura bazenske vode održava električnim grijačem, dok se za potrebe zagrijavanja PTV-a uključuje režim grijanja dizalice topline. Grafovima su prikazane oscilacije održanih temperatura pojedinih potrošača u referentnim razdobljima sezone

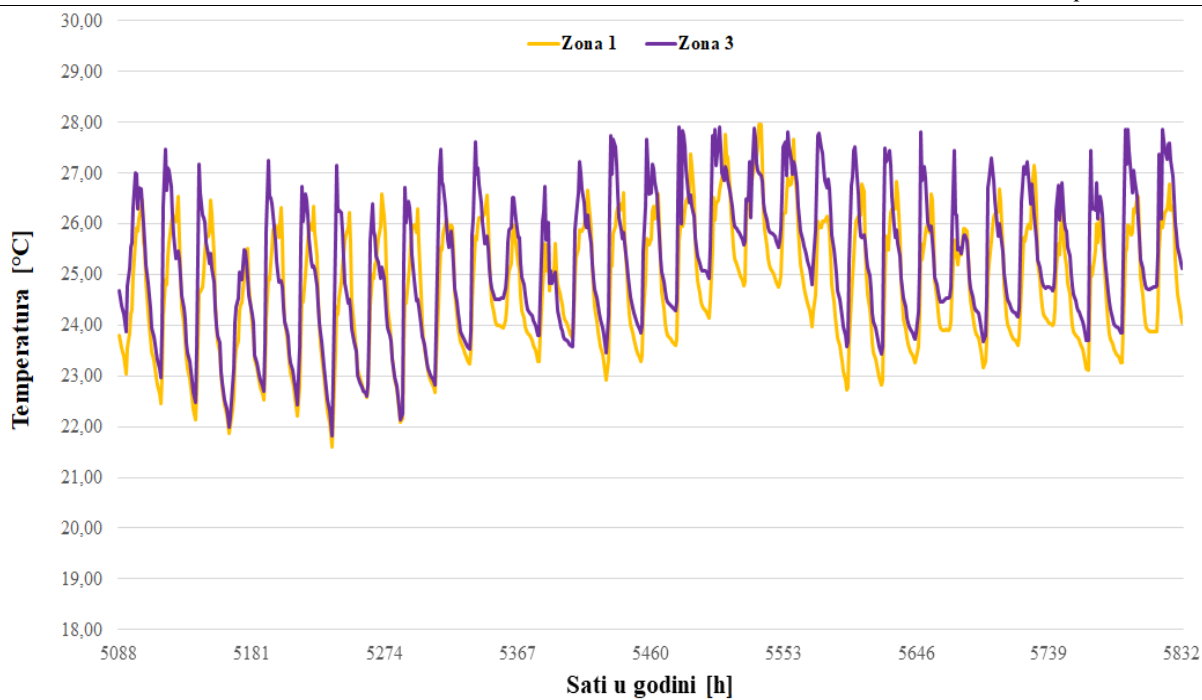
grijanja i sezone hlađenja. Prosinac predstavlja referentni mjesec sezone grijanja, dok kolovoz predstavlja referentni mjesec sezone hlađenja.



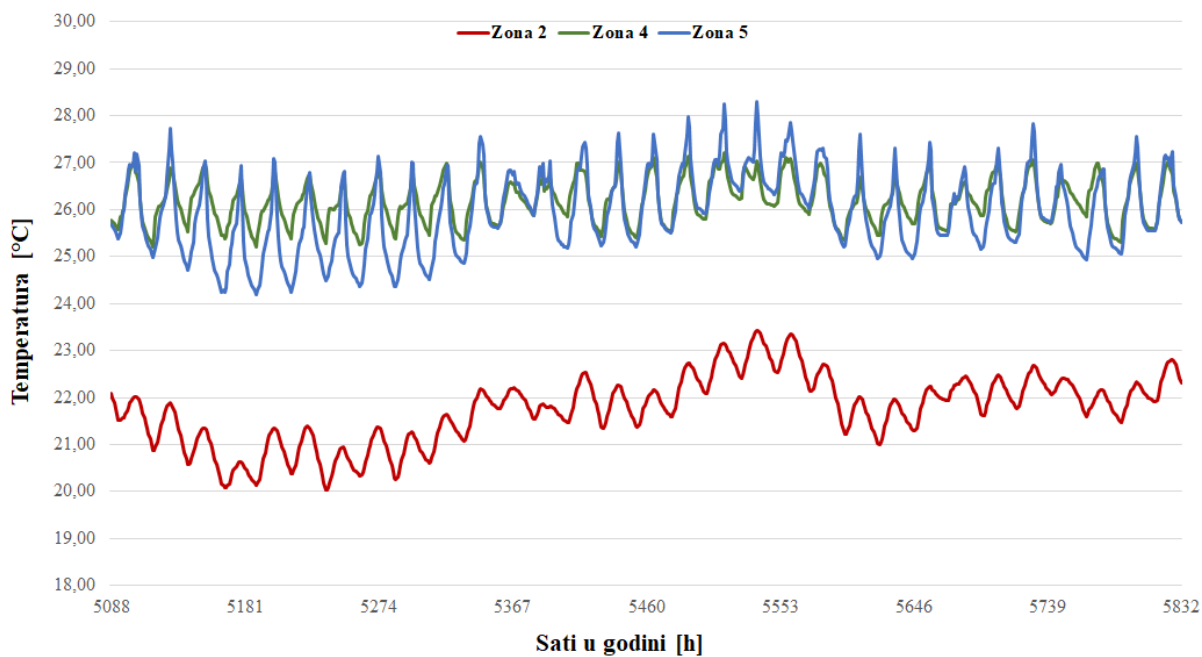
Slika 54. Temperature zraka u sezoni grijanja – Zona 1 i 3



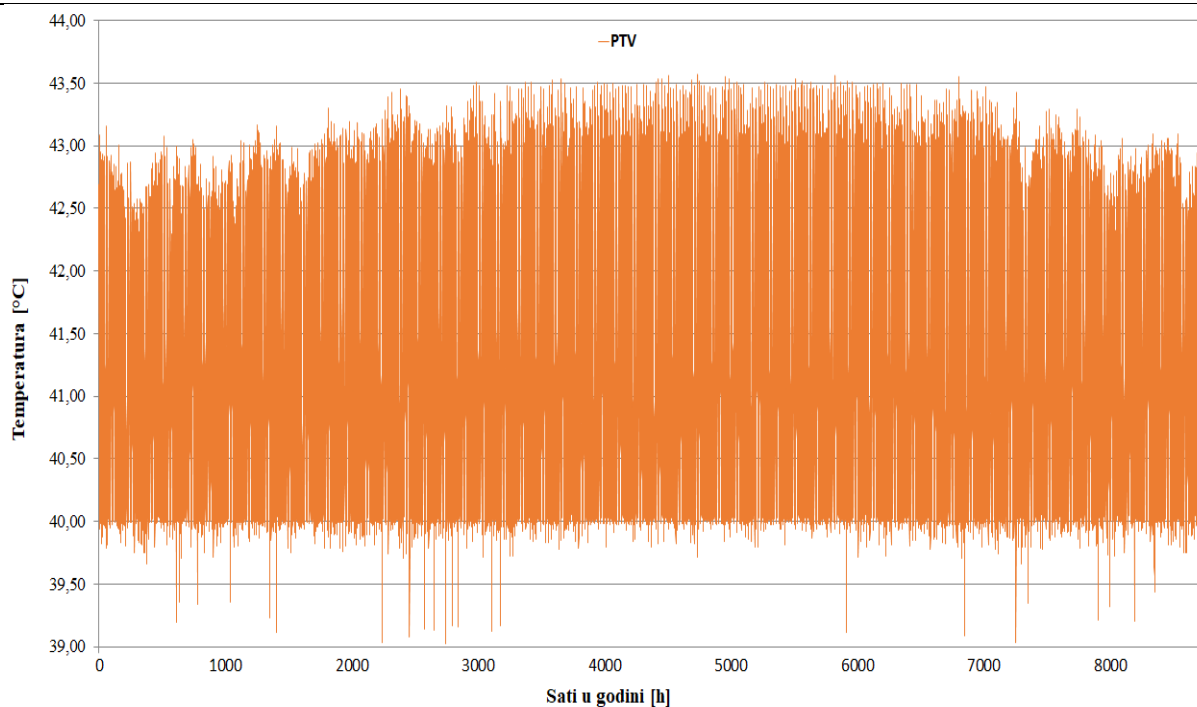
Slika 55. Temperature zraka u sezoni grijanja – Zona 2, 4 i 5



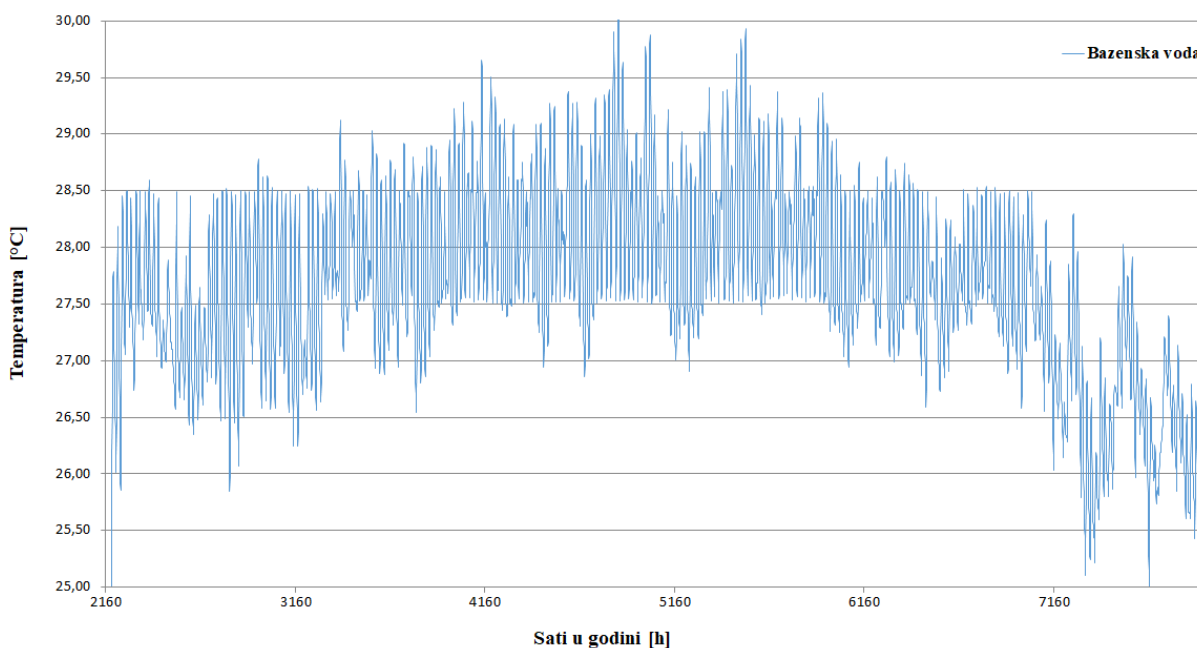
Slika 56. Temperature zraka zona u sezoni hlađenja – Zona 1 i 3



Slika 57. Temperature zraka zona u sezoni hlađenja – Zona 2, 4 i 5



Slika 58. Temperatura PTV-a na potrošačima tijekom cijele godine



Slika 59. Temperatura bazenske vode u periodu korištenja

Slika 54. i Slika 55. pokazuju temperature zraka u zonama za vrijeme sezone grijanja. Temperature uglavnom osciliraju oko zadanih postavnih temperatura. U zonama 1 i 3 koje se griju podnim registrima i ventilokonvektorima javljaju se skokovi iznad granica postavnih temperatura zbog inertnosti podnog grijanja i toplinskih dobitaka od upadnog sunčevog

zračenja. Iz grafičkog prikaza te usporedbom podataka o toplinskim potrebama zona [Tablica 24.] i predanim toplinskim energijama podnim grijanjem [Tablica 29.] uočava se nedostatak instaliranog kapaciteta u kupaonici prizemlja. Zbog male površine podnog grijanja moguće je dodatno cijevne registre ugraditi u zid. Slika 56. i Slika 57. prikazuju temperature zraka u zonama tijekom sezone hlađenja. Kupaona suterena nema toplinskih dobitaka od sunčevog zračenja te se vanjski zidovi nalaze ukopani u zemlju zbog čega nema potreba za hlađenjem. Temperatura PTV-a [Slika 58.] se tijekom cijele godine održava između potrebnih granica što je primarna zadaća termotehničkog sustava. Simulacijama je pokazano kako se temperatura bazenske vode [Slika 59.] može održavati iznad 25 °C do kraja studenog.

4.4. Utjecaj načina regulacije termotehničkog sustava na potrošnju energije za grijanje i hlađenje

U ovom poglavlju analizirani su rezultati simulacija rada termotehničkog sustava s različitim postavkama regulacije. Prikazan je utjecaj zasjenjenja prozora te infiltracija zraka na vršna toplinska opterećenja ljeti te utjecaj promjena postavka pojedinih regulatora na potrošnju energije.

4.4.1. Utjecaj regulacije zasjenjenja

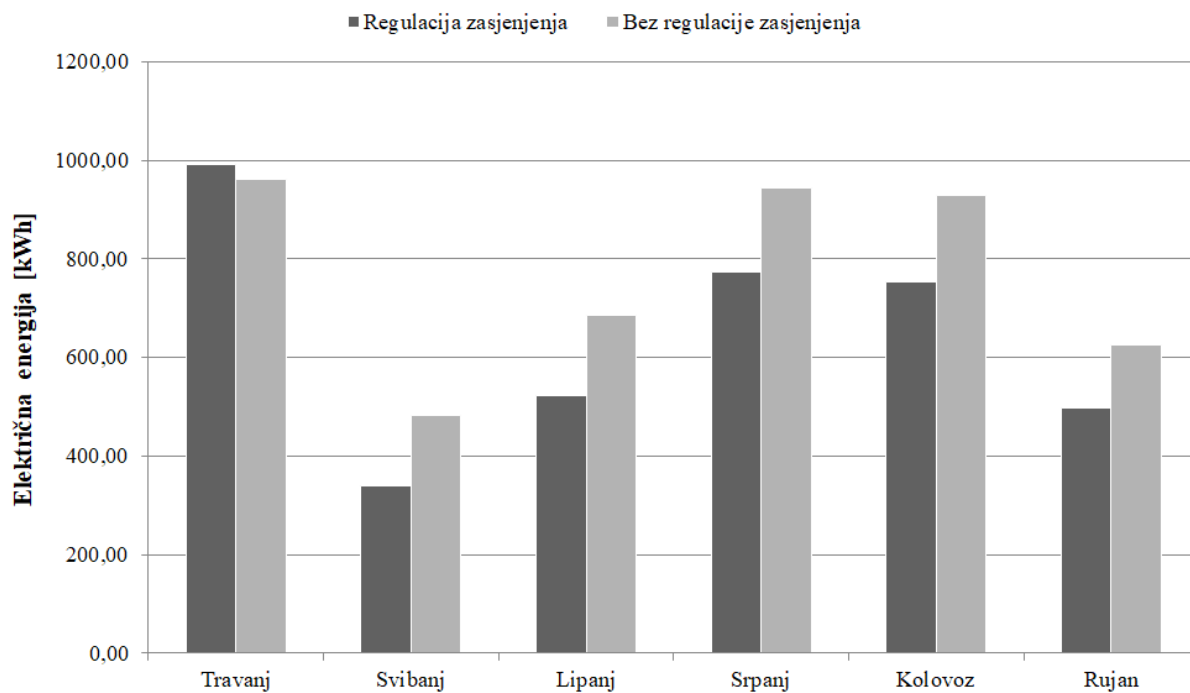
Regulacija zasjenjenja prozora primjenjuje se od početka travnja do početka listopada kako bi se u sezoni grijanja smanjila potreba za rashladnom energijom te kako bi se potkraj sezone grijanja smanjile previsoke temperature uslijed povećanog sunčevog zračenja. Ukoliko se zasjenjenje prozora ne bi primjenjivalo potrošnja energije bi se povećala. Rezultati simulacije rada sustava bez zasjenjenja prozora prikazani su sljedećom tablicom.

Tablica 31. Rezultati simulacije rada sustava bez regulacije zasjenjenja

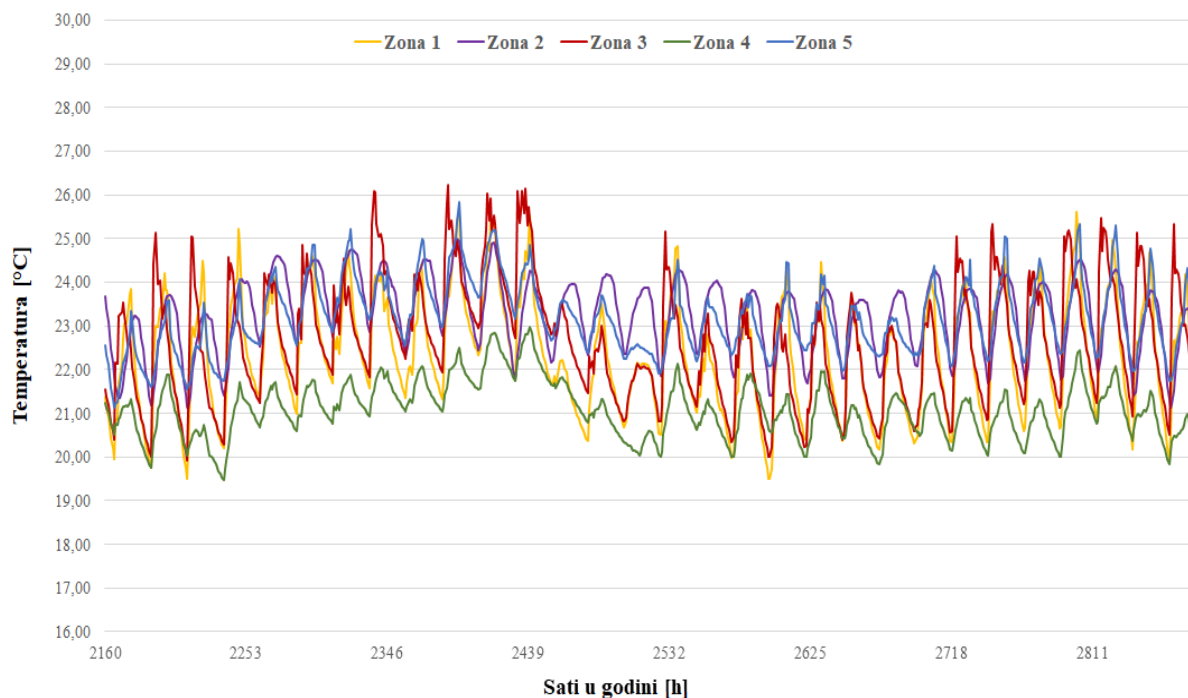
| | Toplinska energija – DT [kWh] | Rashladna energija – DT [kWh] | Električna energija – DT [kWh] | El. energija – pumpe i ventilatori [kWh] |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Travanj | 3584,5 | 0 | 862,7 | 98,2 |
| Svibanj | 721,6 | 757 | 406,8 | 76,4 |
| Lipanj | 697,7 | 1388,8 | 597 | 87,7 |
| Srpanj | 721,2 | 2076,3 | 836,2 | 108,1 |
| Kolovoz | 721,7 | 2024,8 | 819,3 | 109,7 |
| Rujan | 698,7 | 1204,2 | 538,2 | 88,2 |
| UKUPNO | 7145 | 7451 | 4060 | 568 |

Dizalica topline proizvodi 2346 kWh više rashladne energije u odnosu na rad s regulacijom zasjenjenja pri čemu se ukupna potrošnja električne energije za pogon sustava dizalice topline u sezoni hlađenja povećala za 19,3 %. Slika 60. prikazuje usporedbu potrošnje električne energije rada sustava dizalice topline s regulacijom zasjenjenja i bez nje u razdoblju od travnja do rujna. U travnju, kada još traje sezona grijanja, smanjila se potreba za toplinskom energijom za 131 kWh. Iako je smanjena potreba za toplinskom energijom, u travnju dolazi do previsoke temperature zraka u zonama uzrokovane sunčevim zračenjem.

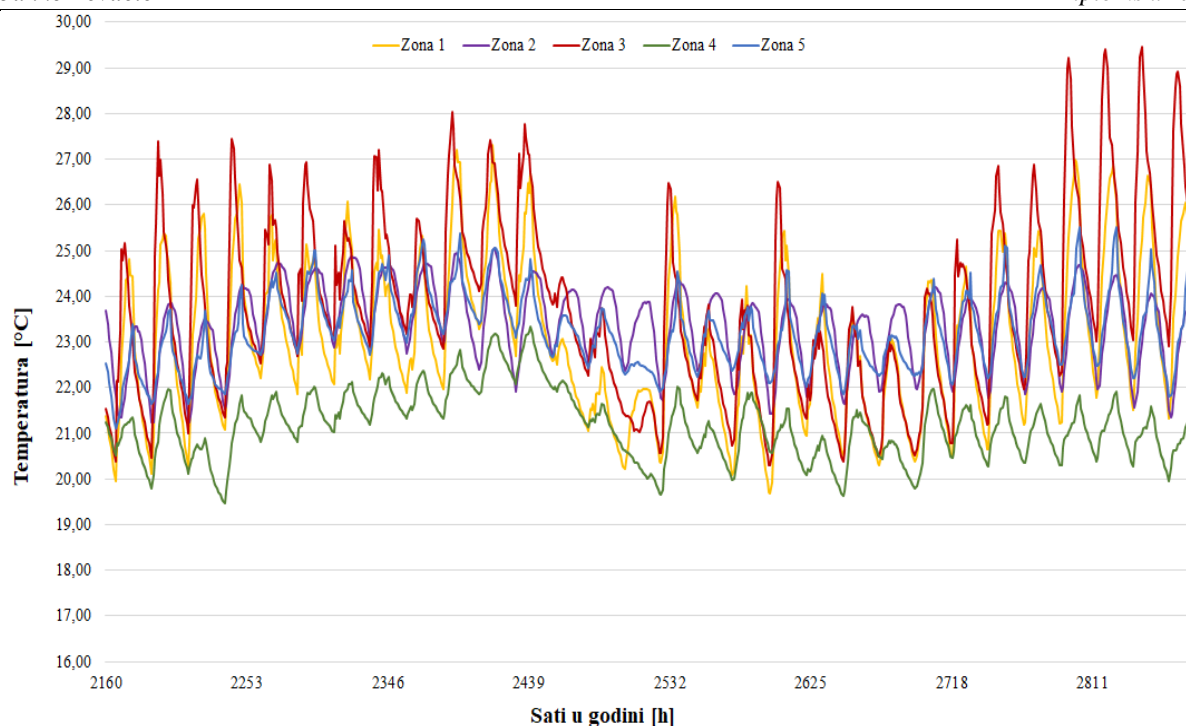
Sljedećim grafovima prikazana je razlika u temperaturama zraka zona kada sustav radi s regulacijom zasjenjenja [Slika 61.] i bez nje [Slika 62.].



Slika 60. Potrošnja električne energije za pogon sustava s regulacijom zasjenjenja i bez



Slika 61. Temperature zraka zona u travnju – regulacija zasjenjenja



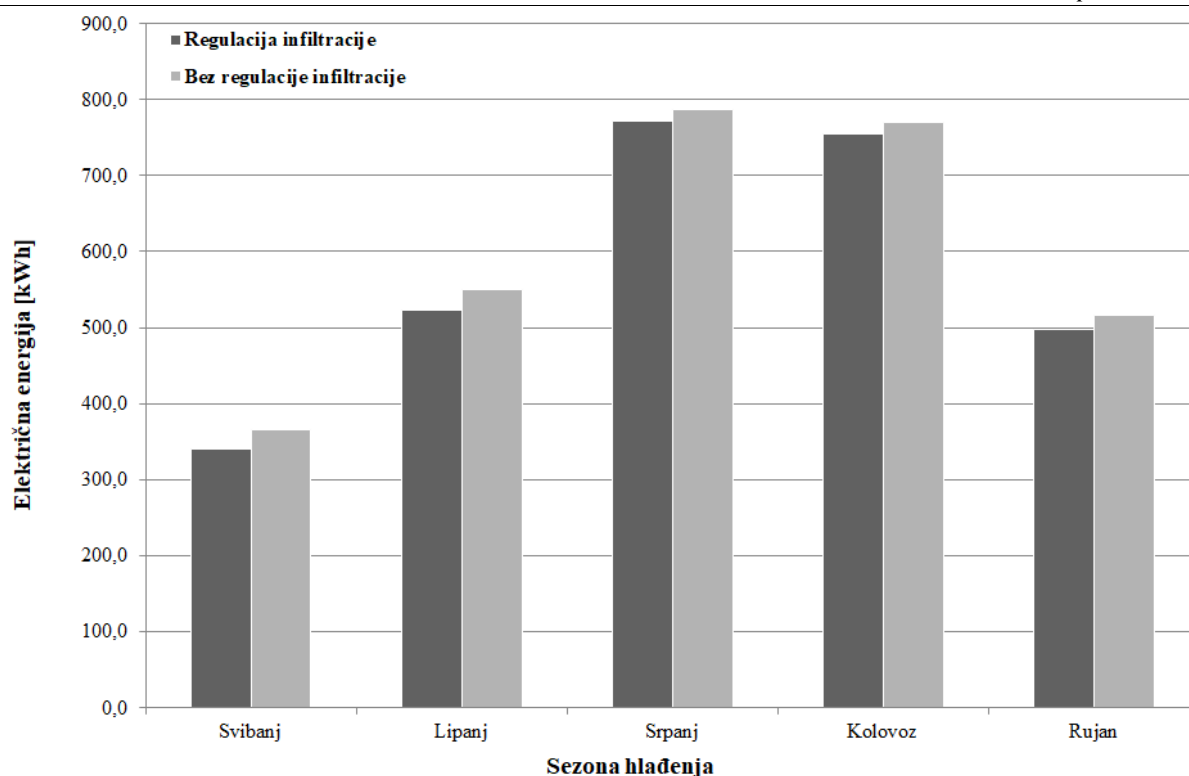
Slika 62. Temperature zraka zona u travnju – bez regulacije zasjenjenja

4.4.2. Utjecaj regulacije infiltracije

Regulacija infiltracije zraka koristi se tijekom sezone hlađenja kako bi se zgrada preko noći ohladila čime se rasterećuje rad dizalice topline. Tablica 32. prikazuje rezultate simulacije rada sustava bez regulacije infiltracije zraka. Dizalica topline u ovom slučaju tijekom sezone hlađenja proizvodi 302 kWh, odnosno 6 % više rashladne energije pri čemu bi se potrošnja električne energije za pogon sustava hlađenja povećala za 3,5 % [Slika 63.].

Tablica 32. Rezultati simulacije rada sustava bez regulacije infiltracije

| | Rashladna energija – DT [kWh] | Električna energija – DT [kWh] | El. energija – pumpe i ventilatori [kWh] |
|------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|
| Svibanj | 386 | 296 | 67 |
| Lipanj | 964,3 | 468,3 | 79,6 |
| Srpanj | 1617 | 692,5 | 93,1 |
| Kolovoz | 1567,3 | 675 | 93,1 |
| Rujan | 872,7 | 437,4 | 77,4 |
| Sezona hlađenja | 5407 | 2569 | 418 |



Slika 63. Potrošnja električne energije za pogon sustava s regulacijom infiltracije i bez

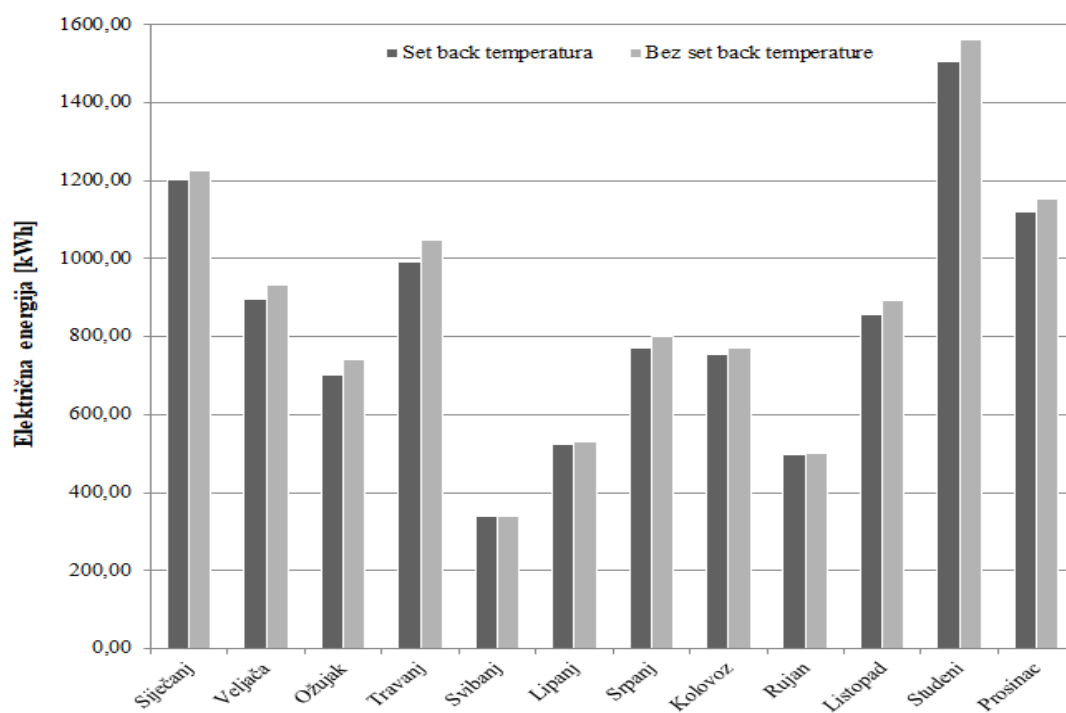
4.4.3. Utjecaj „set back“ temperature

Set back temperatura označava temperaturnu granicu definiranu za period kada je smanjena potreba za toplinskom ugodnošću, u ovom slučaju noću. Zbog toga su na termostatima definirane postavne temperature u sezonama grijanja i hlađenja koje se razlikuju ovisno o tome je li dan ili noć. *Set back* temperatura iznosi 2 °C što znači da su postavne temperature u sezoni grijanja za 2 °C manje noću nego danju, odnosno da su u sezoni hlađenja za 2 °C više. Tablica 33. prikazuje rezultate simulacije godišnje proizvedene toplinske i rashladne energije dizalicom topline te potrošnju električne energije. Svi rezultati prikazani su u kWh.

Slika 64. prikazuje potrošnju električne energije za pogon sustava dizalice topline na mjesečnoj razini sa i bez postavka *set back* temperature. Dizalica topline proizvodi 932 kWh toplinske i 95 kWh rashladne energije više ovakvim načinom rada što rezultira povećanjem potrošnje električne energije za rad sustava grijanja i hlađenja od 338 kWh godišnje, odnosno povećanjem od 3,3%.

Tablica 33. Rezultati simulacije godišnjeg rada termotehničkog sustava bez *set back* postavka

| | Toplinska energija – DT [kWh] | Rashladna energija – DT [kWh] | Električna energija – DT [kWh] | El. energija – pumpe i ventilatori [kWh] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|
| Siječanj | 3763,8 | 0 | 1102,2 | 122,6 |
| Veljača | 2902,5 | 0 | 828,3 | 104,8 |
| Ožujak | 2300 | 0 | 625,6 | 116,1 |
| Travanj | 3872,1 | 0 | 938,2 | 109,1 |
| Svibanj | 721,3 | 306,8 | 272,4 | 67,3 |
| Lipanj | 698,1 | 891,5 | 446,3 | 84,1 |
| Srpanj | 721,7 | 1632,5 | 695,8 | 104,2 |
| Kolovoz | 721,7 | 1551,8 | 670,2 | 99,5 |
| Rujan | 698,2 | 817,3 | 420,5 | 78,5 |
| Listopad | 3400 | 0 | 785,8 | 107,3 |
| Studeni | 5655,2 | 0 | 1446,5 | 116 |
| Prosinac | 3669,6 | 0 | 1020,5 | 133,4 |
| GODIŠNJE | 29124 | 5200 | 9252 | 1243 |

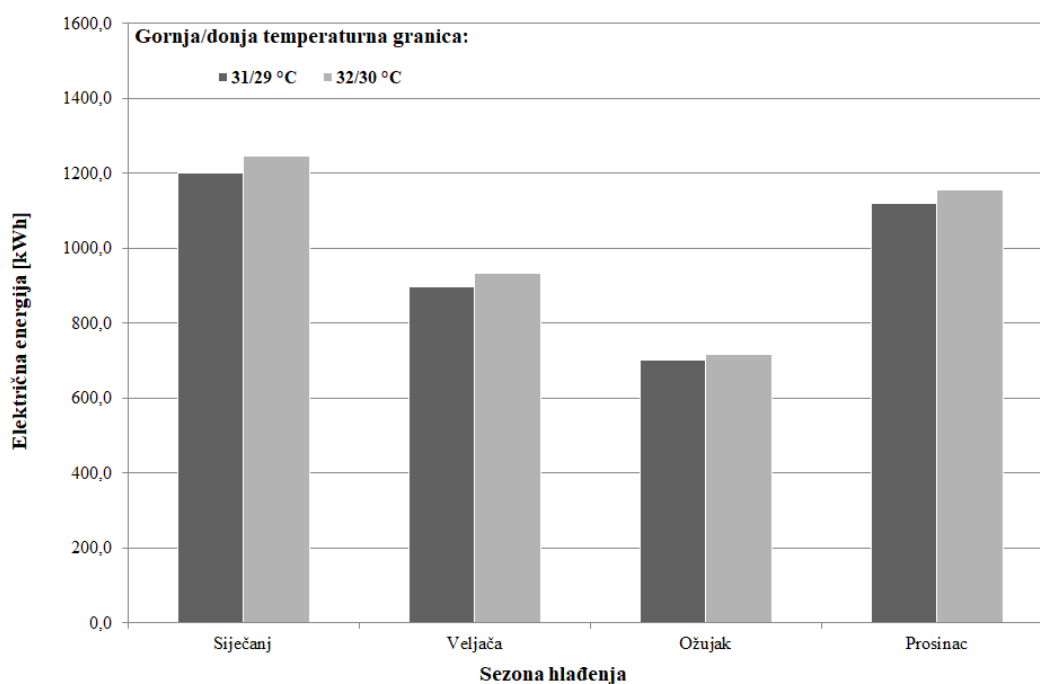
Slika 64. Potrošnja električne energije za pogon sustava sa/bez *set back* temperature

4.4.4. Utjecaj regulacije temperature povrata u dizalicu topline

Diferencijalnim regulatorom održava se tijekom sezone grijanja temperatura povrata vode u dizalicu topline na približno 30 °C, kako je objašnjeno u Poglavlju 3.4.1. Kada bi se temperaturne granice na diferencijalnom regulatoru pomaknule tako da u režimu grijanja gornja granica iznosi 32 °C, a donja 30 °C, dizalica topline proizvodila bi više toplinske energije pri čemu bi se povećala potrošnja električne energije. Tablica 34. prikazuje rezultate dobivene simulacijom rada sustava u sezoni grijanja kada bazen nije u uporabi. Dizalica topline ovakvim radom u tom potroši 130 kWh električne energije više, odnosno potrošnja poraste za 3,3 %.

Tablica 34. Rezultati simulacije proizvodnje toplinske energije pri višoj temperaturi povrata

| | Toplinska energija – DT [kWh] | Električna energija – DT [kWh] | Električna energija – pumpe i ventilatori [kWh] |
|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| Siječanj | 3762,8 | 1127,7 | 116,9 |
| Veljača | 2837,2 | 827,4 | 105,1 |
| Ožujak | 2190,9 | 601,3 | 113,3 |
| Prosinac | 3635,3 | 1037,2 | 118,3 |
| Ukupno | 12426 | 3594 | 454 |



Slika 65. Potrošnja električne energije za pogon sustava ovisno regulaciji temperature povrata

5. ZAKLJUČAK

Svrha ovoga rada bila je sastavljanje dinamičkog energetskog modela obiteljske kuće i termotehničkog sustava te provedba analize rada sustava s ciljem optimizacije potrošnje energije. Korištenjem računalnog paketa programa TRNSYS kreiran je energetski model zgrade, svih komponenta termotehničkog sustava i pripadajuće regulacije te su provedene dinamičke simulacije rada sustava na godišnjoj razini. Izračunate su maksimalne potrebne snage grijanja i hlađenja zgrade, godišnje potrebe za toplinskom i rashladnom energijom te godišnja potrošnja energije potrebne za pogon kompletnog termotehničkog sustava. Računalne simulacije provedene su na minutnoj razini za tipičnu meteorološku godinu grada Trsta, što najviše odgovara klimatskom području Kvarnera gdje se obiteljska kuća nalazi.

Kao izvor toplinske i rashladne energije koristi se dizalica topline zrak-voda kojom se grije i hladi kuća, vrši priprema potrošne tople vode te zagrijava voda vanjskog bazena. Dizalica topline radi u tri temperaturna režima: grijanje, hlađenje i priprema tople vode. Režim hlađenja koristi se u sezoni koja traje od početka svibnja do kraja rujna, dok se režim grijanja koristi u preostalim mjesecima. Dizalica topline uključuje režim pripreme tople vode kroz cijelu godinu, ovisno o potrebama potrošača.

Simulacijama je utvrđeno kako maksimalna snaga potrebna za grijanje zgrade u projektnim uvjetima iznosi 7,85 kW, dok maksimalna snaga potrebna za hlađenje iznosi 7,02 kW. Provođenjem simulacija rada termotehničkog sustava odabrane su postavke regulacije sustava kojima se optimizira potrošnja energije potrebne za grijanje i hlađenje. Dizalica topline s optimalnim postavkama regulacije proizvodi 28163 kWh toplinske energije godišnje za potrebe grijanja zgrade, pripremu tople vode i zagrijavanje vode bazena te 5105 kWh rashladne energije. Za pogon dizalice topline i sustava grijanja i hlađenja izračunata je potrošnja od 10158 kWh električne energije godišnje. Ogrjevna voda iz dizalice topline služi kao pomoćni izvor topline bazenskoj vodi, dok se ona primarno zagrijava električnim grijačem. Za potrebe simulacija pretpostavljeno je korištenje bazena od početka travnja do kraja studenog te je za to razdoblje izračunata potrošnja 47023 kWh električne energije za pogon sustava grijanja bazenske vode.

Analizom simulacija prikazana je važnost regulacije zasjenjenja prozirnih površina vanjske ovojnice zgrade, infiltracije zraka u kuću te odabira drugih postavki regulacije. Najveći utjecaj u smanjenju godišnje potrošnje električne energije ima regulacija zasjenjenja

prozora vanjske ovojnice zgrade. Ukoliko se regulacija zasjenjenja ne bi koristila, dizalica topline bi proizvela 2346 kWh rashladne energije više, što bi rezultiralo porastom ukupne potrošnje električne energije od 19,3 %. Povećanom infiltracijom zraka preko noći u razdoblju sezone hlađenja zgrada se hladi te se preko dana smanjuje potreba za radom dizalice topline. Bez regulacije infiltracije zraka povećala proizvodnja rashladne energije za 302 kWh pri čemu bi potrošnja električne energije za pogon sustava hlađenja porasla za 3,5 %. Analizom je ustanovljeno kako se, korištenjem *set back* temperature u postavkama termostata, na godišnjoj razini smanji potreba za 932 kWh toplinske i 95 kWh rashladne energije. Kada se *set back* temperatura ne bi koristila, potrošnja električne energije za pogon sustava grijanja i hlađenja povećala bi se za 3,3 % godišnje.

Simulacije su pokazale kako se podnim registrima u kupaonici prizemlja (Zona 5), pri temperaturnom režimu dizalice topline 30/35 °C, ne predaje dovoljno topline za postizanje postavnih temperatura tijekom sezone grijanja. Razlog tome je premala površina poda kupaonice. Ugradnjom cijevnih registara u zid kupaonice povećao bi se ostvarivi toplinski učin te bi bilo moguće održati postavne temperature zone.

Načinjeni energetska model kreiran u programu TRNSYS može poslužiti kao podloga brojnim budućim projektima sličnoga tipa. Relativno jednostavnom promjenom parametara i varijabli pojedinih komponenata sustava moguće je model prilagoditi mnogim različitim zgradama i sustavima proizvodnje energije.

LITERATURA

- [1] TRNSYS 17, Volume 1, Getting Started, University of Winsconsin – Madison, 2012
- [2] TRNSYS 17, Volume 5, Multizone Building modeling with Type 56 and TRNBuild, University of Winsconsin – Madison, 2012.
- [3] Daikin ERLQ-CW1, Heating Technical Data
- [4] Daikin Altherma EHVH-CB, EHVX-CB low temperature split, Heating Technical Data
- [5] Daikin FWP-AT Concealed ceiling unit, Applied Systems Technical Data
- [6] TRNSYS 17, Volume 2, Using the Simulation Studio, University of Winsconsin-Madison, 2012
- [7] TESSLibs 17, Volume 6, HVAC Library Mathematical Reference, Thermal Energy System Specialists, LLC of Madison, Wisconsin, USA, 2012
- [8] TESSLibs 17, Volume 11, Storage Tank Library Mathematical Reference, Thermal Energy System Specialists, LLC of Madison, Wisconsin, USA, 2012
- [9] TRNSYS 17, Volume 4, Mathematical Reference, University of Wisconsin – Madison, 2012.
- [10] Recknagel, Šprenger, Šramek, Čeperković; Grejanje i klimatizacija, Vrnjačka Banja, 2004.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. TRNSYS model kompletnog termotehničkog sustava

II. TRNSYS model kompletnog termotehničkog sustava

