

Utjecaj klimatskih promjena na učinkovitost pasivnog hlađenja zgrade

Đukanović, Ena

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:790714>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-22**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ena Đukanović

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Student:

Ena Đukanović

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu i navedenu literaturu.

Zahvaljujem doc. dr. sc. Tei Žakuli na prihvaćanju mentorstva, povjerenju te izdvojenom vremenu za kontinuirano praćenje izrade zadatka te asistentu Nikoli Bađunu koji je detaljno objasnio rješenje svakog problema koji se pojavio tijekom izrade ovog rada.

Posebne zahvale roditeljima, sestri Tihani, Antoniju Merkašu, Domagoju Rade i ostalim prijateljima koji su mi bili podrška tijekom studija.

Ena Đukanović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ena Đukanović** Mat. br.: 0035212167

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj klimatskih promjena na učinkovitost pasivnog hlađenja zgrade**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The effect of climate change on the efficiency of passive cooling of a building**

Opis zadatka:

Cilj rada je analizirati u kojoj mjeri povećanje temperature uslijed klimatskih promjena utječe na potencijal pasivnog hlađenja zgrade, odnosno, na uštede energije za hlađenje koje se mogu ostvariti takvim sustavom. Analizu pasivnog hlađenja provesti za dvije učionice zgrade Tehničke škole Ruđer Bošković u Zagrebu koja je trenutno u fazi projektiranja prema standardu za zgrade gotovo nulte potrošnje energije. Za geometriju zgrade koristiti podatke prema idejnom arhitektonskom rješenju. Dinamičku simulaciju pasivnog hlađenja zgrade u ovisnosti o utjecajnim parametrima provesti korištenjem računalnog programa TRNSYS® i programskog jezika MATLAB®. U svrhu analize porasta temperature, proračun ušteda energije za hlađenje potrebno je provesti na temelju podataka za tipičnu meteorološku godinu u Zagrebu i također na temelju meteoroloških podataka Državnog hidrometeorološkog zavoda za 2019. godinu.

Rad treba sadržavati:

- opis modela i ulaznih parametara simulacije,
- usporedbu meteoroloških podataka za tipičnu i stvarnu (2019.) meteorološku godinu,
- rezultate o uštedi energije korištenjem pasivnog hlađenja za tipičnu i stvarnu (2019.) meteorološku godinu,
- analizu utjecaja povećanja temperature na učinkovitost pasivnog hlađenja.

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

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

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

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

Zadatak zadala:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| POPIS SLIKA | 3 |
| POPIS TABLICA..... | 5 |
| POPIS OZNAKA | 6 |
| SAŽETAK..... | 8 |
| SUMMARY | 9 |
| 1 UVOD..... | 10 |
| 2 PASIVNO HLAĐENJE | 11 |
| 2.1 Prirodna ventilacija | 11 |
| 2.1.1 Primjer korištenja prirodne ventilacije u životinjskom svijetu | 12 |
| 2.1.2 Primjer korištenja prirodne ventilacije u zgradarstvu | 14 |
| 3 OPIS ZGRADE | 17 |
| 3.1 Građevinski opis zgrade..... | 19 |
| 3.2 Ostali parametri potrebni za modeliranje zgrade | 20 |
| 4 MATEMATIČKI MODEL POPREČNE VENTILACIJE | 21 |
| 4.1 Opis strujanja vjetra | 21 |
| 4.2 Fizikalni model ventilacije uslijed sile vjetra | 22 |
| 5 UTJECAJ KLIMATSKIH PROMJENA NA TEMPERATURU VANJSKOG ZRAKA. 28 | |
| 6 METODA IZRAČUNA POTREBNE ENERGIJE ZA HLAĐENJE ZGRADE | 32 |
| 6.1 Opis rada u korisničkom sučelju TRNBuild | 32 |
| 6.1.1 Potrebni podatci prije inicijalizacije projekta | 32 |
| 6.1.2 Definiranje zidova..... | 35 |
| 6.1.3 Definiranje prozora | 37 |
| 6.1.4 Raspored | 38 |
| 6.1.5 Infiltracija..... | 39 |
| 6.1.6 Režim hlađenja..... | 40 |
| 6.1.7 Unutarnji dobitci | 40 |
| 6.1.8 Dodatno definirane stavke za slučaj prirodne ventilacije | 41 |
| 6.2 Provođenje simulacija u sučelju Simulation Studio..... | 44 |
| 6.2.1 Simulacija bez pasivnog hlađenja | 44 |
| 6.2.2 Simulacija pasivnog hlađenja | 46 |
| 6.3 Izračun protoka zraka uslijed prirodne ventilacije u programskom jeziku MATLAB | |
| 48 | |
| 7 MATEMATIČKI OPIS RAČUNALNOG MODELA ZGRADE..... | 50 |
| 7.1 Definiranje toplinske zone | 50 |
| 7.2 Konvektivni toplinski tok..... | 50 |
| 7.3 Sparivanje..... | 51 |
| 7.4 Toplinski tok izmijenjen zračenjem | 51 |
| 7.5 Model izmjene topline prozora i zidova | 52 |
| 7.6 Dugovalno zračenje pomoću star network modela | 55 |
| 7.7 Raspodjela Sunčevog zračenja | 57 |
| 7.8 Infiltracija i ventilacija | 57 |
| 7.9 Grijanje i hlađenje | 58 |

| | |
|---|----|
| 7.10 Model prozora | 59 |
| 8 REZULTATI ANALIZE POTENCIJALA PASIVNOG HLAĐENJA | 61 |
| 8.1 Potrebna energija hlađenja bez i s korištenjem prirodne ventilacije..... | 61 |
| 8.2 Utjecaj povećanja temperature na učinkovitost pasivnog hlađenja | 66 |
| 8.3 Iskoristivost prirodne ventilacije u ovisnosti o postavljenoj temperaturi prostora | 67 |
| 9 ZAKLJUČAK..... | 70 |
| LITERATURA..... | 71 |
| PRILOZI..... | 72 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Prikaz termitnjaka [3] | 13 |
| Slika 2. | Promjena temperature u termitnjaku kroz dan [4]..... | 13 |
| Slika 3. | Udio CO ₂ u termitnjaku kroz dan [4] | 14 |
| Slika 4. | Windcatcher [1] | 15 |
| Slika 5. | Shema koja prikazuje prirodnu ventilaciju u zgradi Eastgate u Harareu [6]..... | 16 |
| Slika 6. | Pročelje tehničke škole Ruđer Bošković [7] | 17 |
| Slika 7. | Tlocrt analiziranog dijela Tehničke škole Ruđer Bošković [7]..... | 18 |
| Slika 8. | Promjena brzine vjetra kroz vrijeme [8]..... | 21 |
| Slika 9. | Profil brzine vjetra [8] | 22 |
| Slika 10. | Pomoćni prikaz za izvod protoka zraka kroz prozor [9] | 23 |
| Slika 11. | Strujanje zraka oko građevine [10] | 25 |
| Slika 12. | Pomoćni prikaz za izvod poprečnog strujanja [9] | 25 |
| Slika 13. | Spektar apsorpcije infracrvenog zračenja atmosferskih plinova [12] | 28 |
| Slika 14. | Prikaz promjene temperature i solarnog zračenja [11]..... | 29 |
| Slika 15. | Usporedba vanjskih temperatura u sezoni hlađenja za tipičnu meteorološku godinu te 2019. godinu | 31 |
| Slika 16. | Određivanje Zemljine hemisfere i strana svijeta | 33 |
| Slika 17. | Definiranje svojstava | 33 |
| Slika 18. | Prozor za inicijalizaciju projekta | 34 |
| Slika 19. | Opis zone | 35 |
| Slika 20. | Definiranje sloja zida..... | 36 |
| Slika 21. | Kreiranje novog zida | 37 |
| Slika 22. | Odabir prozora..... | 38 |
| Slika 23. | Definiranje rasporeda | 39 |
| Slika 24. | Zadavanje infiltracije..... | 39 |
| Slika 25. | Režim hlađenja | 40 |
| Slika 26. | Unos unutarnjih dobitaka | 41 |
| Slika 27. | Shema struja zraka..... | 42 |
| Slika 28. | Definiranje ventilacije | 43 |
| Slika 29. | Definiranje protoka zraka uslijed prirodne ventilacije | 44 |
| Slika 30. | Simulacija za slučaj bez prirodne ventilacije | 46 |
| Slika 31. | Simulacija za slučaj s prirodnom ventilacijom..... | 46 |
| Slika 32. | Povezivanje komponenti za pasivno hlađenje..... | 47 |
| Slika 33. | Pseudokod za izračun protoka | 49 |
| Slika 34. | Toplinska ravnoteža toplinske zone [14]..... | 50 |
| Slika 35. | Poprečna ventilacija [14]..... | 51 |
| Slika 36. | Kružna ventilacija [14]..... | 51 |
| Slika 37. | Toplinski tokovi i temperature na površini zida [14] | 52 |
| Slika 38. | Stvarni zid i model crne kutije [14]..... | 54 |
| Slika 39. | Model prozora korištenog u jednadžbi energijske bilance [14] | 54 |
| Slika 40. | Star network model zone s tri površine [14] | 56 |
| Slika 41. | Postavljanje temperature | 59 |
| Slika 42. | Izmjena topline u prozoru [14]..... | 60 |
| Slika 43. | Usporedba energija za hlađenje TMG | 62 |
| Slika 44. | Usporedba potrebne energija za hlađenje za 2019. godinu | 63 |
| Slika 45. | Uštede energije za hlađenje uslijed pasivnog hlađenja | 64 |
| Slika 46. | Prikaz potrebne energije za hlađenje za južnu zonu..... | 65 |
| Slika 47. | Prikaz potrebne energije za hlađenje za sjevernu zonu | 65 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 48. | Usporedba potrebne energije za hlađenje za sve analizirane slučajeve | 66 |
| Slika 49. | Uštede energije hlađenja uslijed prirodne ventilacije u ovisnosti o postavnoj temperaturi unutarnjeg prostora | 69 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Svojstva vanjskog zida | 19 |
| Tablica 2. Svojstva međukatnih zidova..... | 19 |
| Tablica 3. Svojstva pregradnih zidova | 20 |
| Tablica 4. Svojstva prozora | 20 |
| Tablica 5. Parametri zgrade..... | 20 |
| Tablica 6. Ulazni podatci za TRNBuild | 45 |
| Tablica 7. Potrebna energija za hlađenje u kWh | 61 |
| Tablica 8. Potrebna energija za hlađenje u kWh/m ² | 62 |
| Tablica 9. Potrebna energija za hlađenje po zonama | 64 |
| Tablica 10. Potrebna energija za hlađenje u TMG i 2019. godini prije i nakon primjene PV | 68 |
| Tablica 11. Uštede energije za hlađenje uslijed prirodne ventilacije u ovisnosti o postavljenoj temperaturi u prostoriji..... | 68 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|--------------------------------------|-------------------|--|
| $V(t)$ | m/s | Trenutna brzina vjetra |
| \bar{V} | m/s | Osrednjena brzina vjetra |
| $v(t)$ | m/s | Fluktuirajuća komponenta |
| T_0 | s | vremenski interval u promatranja promjene brzine vjetra |
| \bar{V}_r | m/s | Srednja brzina vjetra na referentnoj visini |
| c, a | - | Faktori koji ovise o području u kojem se nalazi zgrada |
| H | m | Visina na kojoj se nalaze otvori |
| w_A, w_B | m/s | Brzine u točkama A i B |
| p_A, p_B | Pa | Tlakovi u točkama A i B |
| h_A, h_B | m | Visine u točkama A i B |
| ρ | kg/m ³ | Gustoća fluida |
| g | m/s ² | Gravitacijska sila |
| A_A, A_B | m ² | Površine poprečnog profila strujanja u točkama A i B |
| Δp | Pa | Razlika tlaka |
| \dot{V} zraka | m ³ /s | Volumen zraka |
| C_d | - | Koeficijent lokalnog otpora strujanju |
| p_1 | Pa | Tlak na strani zgrade izloženoj vjetru |
| p_3 | Pa | Tlak na zavjetrinskoj strani zgrade |
| C_{p1} | - | Faktor površinskog tlaka na strani zgrade izloženoj vjetru |
| C_{p3} | - | faktor površinskog tlaka na zavjetrinskoj strani zgrade |
| $\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3$ | Pa | Padovi tlaka na otvorima 1, 2, 3 |
| $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3$ | m ³ /s | Protoci zraka na presjecima 1, 2 i 3 |
| A_1, A_2, A_3 | m ² | Površina otvora na presjecima 1, 2 i 3 |
| ρ_1, ρ_2, ρ_3 | kg/m ³ | Gustoće zraka na presjecima 1, 2, 3 |
| A_{eff} | m ² | Efektivna površina |
| \dot{Q}_i | W | Ukupni konvektivni toplinski tok zone |
| $\dot{Q}_{surf,i}$ | W | Konvektivni toplinsko opterećenje od unutrašnjih površina |
| $\dot{Q}_{vent,i}$ | W | Ventilacijsko toplinsko opterećenje |
| $\dot{Q}_{inf,i}$ | W | Infiltracijsko toplinsko opterećenje |
| $\dot{Q}_{g,c,i}$ | W | Unutarnji konvektivni dobitci |
| $\dot{Q}_{cplg,i}$ | W | Konvektivno opterećenje od susjednih prostora |
| $\dot{Q}_{solar,i}$ | W | dio sunčevog zračenja koje ulazi kroz prozor i biva odmah pretvoreno u konvektivno opterećenje zraka |
| $\dot{Q}_{ISHCCI,i}$ | W | Dio sunčevog zračenja koje su apsorbirale plohe u prostoriji i nakon toga predale zraku konvektivnim putem |
| $\dot{Q}_{r,wi}$ | kJ/h | Toplinski tok izmijenjen zračenjem prema zidovima i prozorima u zoni |
| $\dot{Q}_{g,r,i,wi}$ | kJ/h | Toplinski tok zračenja od unutarnjih izvora prema površini zida |

| | | |
|-----------------------|---------------------------------|--|
| $\dot{Q}_{sol,wi}$ | kJ/h | Solarno opterećenje zida dobiveno kroz prozor |
| $\dot{Q}_{long,wi}$ | kJ/h | Izmjena dugovalnog zračenja između promatranog zida i ostalih zidova te prozora u prostoriji |
| $\dot{Q}_{wall-gain}$ | kJ/h | Toplinski tok kroz zid definiran od strane korisnika |
| $S_{s,o}$ | W/m ² | Toplinski tok zračenja apsorbiran na vanjskoj površini zida |
| $S_{s,i}$ | W/m ² | Toplinski tok zračenja apsorbiran na unutarnjoj površini zida |
| $\dot{q}_{c,s,o}$ | W/m ² | Konvektivni toplinski tok od okoliša prema vanjskoj površini zida |
| $\dot{q}_{c,s,i}$ | W/m ² | Konvektivni toplinski tok od unutarnje površine zida prema zoni |
| $\dot{q}_{s,o}$ | W/m ² | Toplinski tok od vanjske površine zida uslijed provođenja |
| $\dot{q}_{s,i}$ | W/m ² | Toplinski tok od unutrašnje površine zida uslijed provođenja |
| $\dot{q}_{r,s,o}$ | W/m ² | Toplinski tok reflektiranog zračenja s vanjske površine zida |
| $\dot{q}_{r,s,i}$ | W/m ² | Toplinski tok reflektiranog zračenja sa svih površina prema zoni |
| $T_{a,s}$ | °C | Temperatura vanjskog zraka |
| T_i | °C | Temperatura unutarnjeg zraka |
| $T_{s,o}$ | °C | Temperatura zida na vanjskoj površini |
| $T_{s,i}$ | °C | Temperatura zida na unutarnjoj površini |
| $R_{STAR,i}$ | K/W | Zamišljeni otpor prijelaza topline star network modela |
| T_{star} | K | Zamišljena temperatura star network modela |
| T_i | K | Temperatura prostora |
| $\dot{q}_{comb,s,i}$ | W/m ² | Kombinirani toplinski tok zračenja i konvekcije |
| $R_{equiv,i}$ | K/W | Ekvivalentni otpor prijelaza topline zračenja i konvekcije |
| $A_{s,i}$ | m ² | Promatrana površina unutar zone |
| $\dot{q}_{comb,s,i}$ | W/m ² | Kombinirani toplinski tok zračenja i konvekcije |
| σ | W/m ² K ⁴ | Stephan-Boltzmannova konstanta |
| $\varepsilon_{s,o}$ | - | Emisijski faktor vanjske površine |
| T_{fsky} | K | Zamišljena temperatura neba |
| $f_{s,sky}$ | - | Faktor vidljivosti neba od promatrane površine |
| T_{sgrd} | K | Fiktivna temperatura zemlje koja se koristi za izmjenu dugovalnog zračenja |
| $f_{solar,i}$ | - | Solar to air faktor |
| $I_{trans,dif,i}$ | W | Difuzno Sunčevo zračenje koje se prenosi kroz sve vanjske prozore |
| $I_{trans,dif,i}$ | W | Direktno Sunčevo zračenje koje se prenosi kroz sve vanjske prozore |
| $\dot{m}_{inf,i}$ | kg/s | Maseni protok zraka koji ulazi u zonu uslijed infiltracije |
| $\dot{m}_{v,k,i}$ | kg/s | Maseni protok zraka koji ulazi u zonu uslijed ventilacije |
| C_p | J/kgK | Specifični toplinski kapacitet zraka |
| $T_{v,k}$ | K | Temperatura zraka koji ulazi u prostor putem ventilacije |

SAŽETAK

Kako je zgradarstvo sektor koji čini 40% ukupne potrošnje energije u svijetu, provode se brojne mjere i poticaji kako bi se taj iznos smanjio. Kao posljedica toga, sve češće se za zgrade u umjerenim klimama razmatra primjena sustava pasivnog hlađenja. U ovom radu analiziran je potencijal za smanjenje energije za hlađenje zgrade korištenjem prirodne ventilacije, odnosno pasivnog hlađenja, na primjeru dviju učionica Tehničke škole Ruđer Bošković. Analiza je provedena za tipičnu meteorološku godinu te za meteorološke uvjete u 2019. godini, kako bi se analizirao utjecaj globalnog zatopljenja na potencijal za pasivno hlađenje u gradu Zagrebu. Za analizu potencijala pasivnog hlađenja korišteni su računalni programi TRNSYS[®] i MATLAB[®].

Pomoću računalnog programa TRNSYS[®] napravljena je simulacija potrebne energije za hlađenje pod pretpostavkom hlađenja prostora za vrijeme korištenja zgrade od 6:00 do 20:00 sati isključivo radnim danima te uz postavku maksimalne temperature u prostoriji od 25°C kojom su postižu zahtjevi toplinske ugodnosti. Izračunata je godišnja potrebna energija za hlađenje u iznosu od 12,5 kWh/m² za referentnu meteorološku godinu te 15,4 kWh/m² za 2019. godinu. Kao sljedeći korak su za svaki sat u godini pomoću računalnog programa MATLAB[®] izračunati protoci zraka koje je moguće ostvariti pomoću prirodne ventilacije. Konačno, na temelju izračunatih protoka vanjskog zraka te računalne simulacije u TRNSYS[®]-u dobivena je godišnja potreba za hlađenjem nakon primjene sustava pasivnog hlađenja. Ona iznosi 0,9 kWh/m² za referentnu meteorološku godinu te 3,9 kWh/m² za 2019. godinu. Primjenom pasivnog sustava hlađenja, dobiva se smanjenje energije za hlađenje od 94,4% za referentnu meteorološku godinu i smanjenje od 81,9% za 2019. godinu.

Na temelju analize meteoroloških podataka pokazano je da su vanjske temperature zraka tijekom cijele godine više u 2019. godini u odnosu na tipičnu meteorološku godinu. Prosječna temperatura u 2019. godinu u sezoni hlađenja iznosi 22,9°C, a u tipičnoj meteorološkoj godini 20,3°C što čini razliku od 2,6°C. Više temperature u 2019. godini ujedno su i objašnjenje zbog čega su uštede energije korištenjem pasivnog sustava hlađenja 2019. godine manje nego u referentnoj meteorološkoj godini.

Ključne riječi: pasivno hlađenje, prirodna ventilacija, ušteda energije, klimatske promjene

SUMMARY

Since the building sector in the developed countries accounts for 40% of the total energy consumption, numerous measures and incentives are being implemented to reduce this amount. Consequently, there is an increased interest for the use of passive cooling systems for buildings in temperate climates. In this work, the potential for the reduction of cooling energy using the natural ventilation, i.e., passive cooling, is analyzed on the example of two classrooms in the Technical School Ruđer Bošković. The analysis was conducted for a typical meteorological year and for the meteorological conditions in year 2019. The intent was to analyze the impact of global warming on the potential for passive cooling in Zagreb. Computer programs TRNSYS[®] and MATLAB[®] have been used to analyze the passive cooling potential.

Using the computer program TRNSYS[®], a simulation of the energy needs for cooling was performed under the assumption that the building is used from 6:00 to 20:00 during weekdays. The set-point temperature of 25°C has been specified, which meets the thermal comfort requirements. As a result, the annual energy need for cooling was calculated as 12.47 kWh/m² for the typical meteorological year and 15.43 kWh/m² for 2019. As the next step, air flows that can be achieved with the natural ventilation have been calculated using the computer program MATLAB[®] for each hour of the year. Finally, based on the calculated air flows of the ambient air and the computer simulation in TRNSYS[®], the annual cooling needs after applying the passive cooling system have been obtained. They are 0.9 kWh/m² for the reference meteorological year and 3.9 kWh/m² for 2019. By utilizing the passive cooling system, a cooling energy reduction of 94.4% is obtained for the reference meteorological year and a reduction of 81.9% for 2019.

Based on the analysis of the meteorological data, it has been shown that outdoor air temperatures throughout the year were higher in 2019 than in the typical meteorological year. The average temperature for the cooling season of 2019 was 22.9°C, while it was 20.3°C for the typical meteorological year, which makes a difference of 2.6°C. Higher temperatures in 2019 are the reason for a reduced potential of passive cooling compared to the typical meteorological year.

Key words: passive cooling, natural ventilation, energy saving, climate change

1 UVOD

Primarna svrha ventilacijskih sustava je pružiti zadovoljavajuću kvalitetu zraka u prostorima u kojima borave ljudi. Međutim, primjenom prirodne ventilacije moguće je također i pasivno hladiti prostor, što će biti opisano kasnije u poglavlju. Postizanje odgovarajuće mikroklike bitno je da bi se osigurala ugodnost ljudi koji borave u tom prostoru, ali kao posljedicu ima utrošak energije za pogon termotehničkih sustava. Konvencionalne tehnologije hlađenja neprestano se poboljšavaju u vidu smanjenja potrebne energije za pogon i povećanje učinkovitosti, no njima ipak nije moguće istovremeno zadovoljiti visoke standarde toplinske ugodnosti korisnika i smanjiti potrošnju energije na željenu razinu. Zato se kao rješenje javlja zamjena aktivnog (mehaničkog) hlađenja s pasivnim hlađenjem u pogodnim klimatskim uvjetima.

Jedan od načina pasivnog hlađenja podrazumijeva korištenje prirodne ventilacije, a kojom se koriste prirodne pokretačke sile; sile vjetra i sila uzgona. Ovi mehanizmi detaljnije su obrađeni u Poglavlju 2. Pasivno hlađenje ima značajan potencijal u umjerenj klimi gdje prevladavaju veće brzine vjetra i primjetne dnevne temperaturne razlike, a koje osiguravaju dovoljan rashladni učin. U ovom radu također je istražen utjecaj klimatskih promjena na potencijal pasivnog hlađenja osiguranim poprečnom ventilacijom uslijed sile vjetra. Utjecaj klimatskih promjena analiziran je usporedbom meteoroloških podataka za referentnu godinu te 2019. godinu, a detaljnije se opisuje u Poglavlju 5.

U okviru rada analizirane su dvije učionice Tehničke škole Ruđer Bošković čije su geometrija te radni parametri potrebni za modeliranje dani u Poglavlju 3. Model učionica napravljen je u računalnom programu TRNSYS u svrhu dobivanja potrebne energije za hlađenje za svaki sat u godini. S obzirom da u ovom radu nije definiran rashladni sustav, hlađenje se provodilo pod pretpostavkom da je rashladni sustav neograničenog kapaciteta. Analizom su dobivene i unutarnje temperature prostorija koje su se iskoristile pri izradi algoritma u programskom jeziku MATLAB. Algoritmom su izračunati protoci zraka koji ulaze u prostor otvaranjem prozora za pogodnog vremena, odnosno kada je temperatura vanjskog zraka niža od temperature u učionicama. Iznosi protoka su uneseni u TRNSYS te su dobivene vrijednosti potrebne energije za hlađenje nakon primjene pasivnog hlađenja. Dobivene vrijednosti energije su uspoređene na kraju rada kako bi se utvrdila ušteda energije primjenom pasivnog hlađenja.

2 PASIVNO HLAĐENJE

Pasivnim hlađenjem smatraju se sve metode hlađenja kojima se osigurava hlađenje prostora bez potrošnje električne energije. Metode pasivnog hlađenja mogu se grupirati u tri glavne kategorije: na preventivne metode kojima je cilj spriječiti vanjske i unutarnje toplinske dobitke, na metode kojima se uklanjaju toplinski dobitci iz prostora te na metode kojima se pohranjuje energija za rashlađivanje prostora. [1]

Smanjenje toplinskih dobitaka uslijed Sunčevog zračenja postiže se uz pravilno projektiran sustav zasjenjivanja i korištenjem prozora s malim stupnjem propuštanja Sunčevog zračenja. Smanjenju toplinskih dobitaka može doprinijeti i odgovarajući faktor oblika (omjer volumena i površine zgrade) te raspored prostorija unutar zgrade.

Sljedeća metoda, uklanjanje toplinskih dobitaka unutar prostora može se ostvariti na dva načina. Jedan način je primjena adijabatskog hlađenja koje se ostvaruje postavljanjem veće vodene površine unutar prostora. Zrak koji struji iznad vodene površine predaje svoju toplinu vodi što uzrokuje isparavanje. Prilikom isparavanja vode, smanjuje se temperatura zraka u prostoriji, ali posljedično se povećava njegova vlažnost. Drugi način uklanjanja toplinskih dobitaka tijekom dana je puštanjem vanjskog zraka niže temperature od temperature prostora. To se hlađenje postiže primjenom prirodne ventilacije.

Prirodnom ventilacijom moguće je i pohraniti rashladnu energiju. U ovom slučaju se prirodnom ventilacijom ostvaruje noćno hlađenje prostora poznato kao i *free-cooling*. Kako se danju u ovojnici zgrade akumulira toplinska energija, potrebno je noću, kada su temperature vanjskog zraka niže, otvoriti prozore kako bi ovojnica, ali i namještaj unutar zgrade mogli akumulirati što više rashladne energije. Time se osigurava da strukturni elementi zgrade mogu akumulirati više toplinske energije idućega dana čime se odgađa zagrijavanje zraka unutar prostora. Pasivno hlađenje korištenjem prirodne ventilacije predmet je ovog rada te je detaljno upisano u sljedećem poglavlju.

2.1 Prirodna ventilacija

Ventilacija u zgradarstvu podrazumijeva dovođenje vanjskog zraka u prostor unutar zgrade kako bi se omogućilo disanje ljudi. Međutim, korištenjem prirodne ventilacije, osim dovođenja svježeg zraka za disanje, može se osigurati i hlađenje prostora. U tom slučaju potrebne količine zraka su znatno veće nego kod zadovoljavanja samih higijenskih zahtjeva jer se mora osigurati dovoljan toplinski tok zraka koji na sebe može primiti toplinske dobitke unutar prostora.

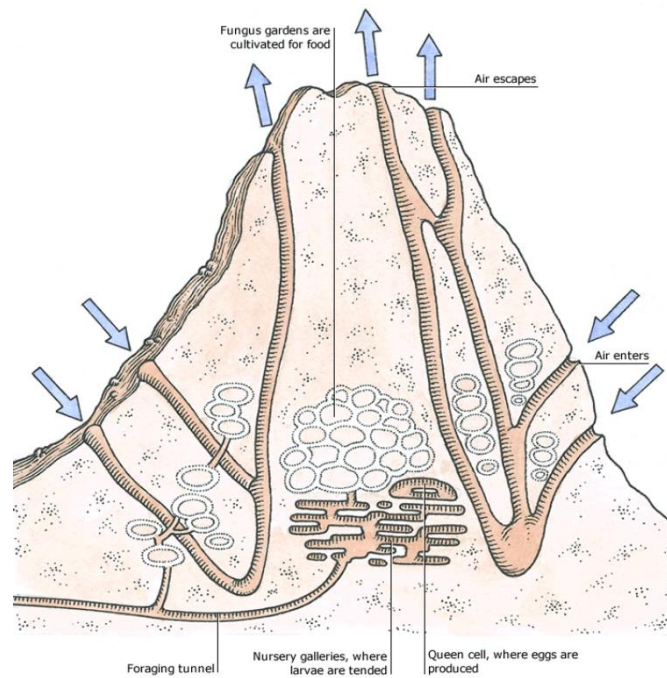
Prirodna ventilacija je pojam koji se koristi da bi se opisalo uklanjanje topline unutar zgrade

zahvaljujući fizikalnim svojstvima zraka. Prirodna ventilacija može se ostvariti razlikom tlaka pomoću sile vjetra, sile uzgona ili njihovom kombinacijom. Razlika tlaka pomoću sile uzgona ostvaruje se zbog temperaturne stratifikacije. Temperatura zraka se s povećanjem visine linearno povećava, a jednako tako se smanjuje i gustoća zraka što dovodi do razlike tlaka između nižih i viših dijelova zgrade. Međutim, kako bi se ostvarilo strujanje uslijed uzgonske sile potrebna je značajna temperaturna razlika pa je taj mehanizam primjenjiv samo u jako visokim prostorima. Pri korištenju sile vjetra javlja se razlika tlaka između strane zgrade izložene vjetru te zavjetrinske strane. Nastrujavanjem zraka na izloženu stranu zgrade dinamički tlak nastao uslijed brzine vjetra pretvara se u statički tlak, dok se na zavjetrinskoj strani stvara podtlak uslijed vrtloženja. Iznos pretlaka i podtlaka ovisi o geometriji zgrade, a detaljno objašnjenje te proračun mehanizma strujanja uslijed sile vjetra nalazi se u Poglavlju 4.

Da bi prirodna ventilacija bila učinkovita, arhitektura zgrade mora biti u skladu s prirodnim silama kako bi se postigla što bolja učinkovitost; to uključuje odgovarajući raspored prozora na zgradi, njihovu površinu te raspored prostora unutar same zgrade. Zgrade bi također trebale biti projektirane da u potpunosti iskoriste prevladavajuće prirodne sile: vjetar, temperaturu vanjskog zraka i Sunčevu svjetlost, obuhvaćajući arhitektonske elemente kao što su atriji, tornjevi i toplinska masa zgrade.

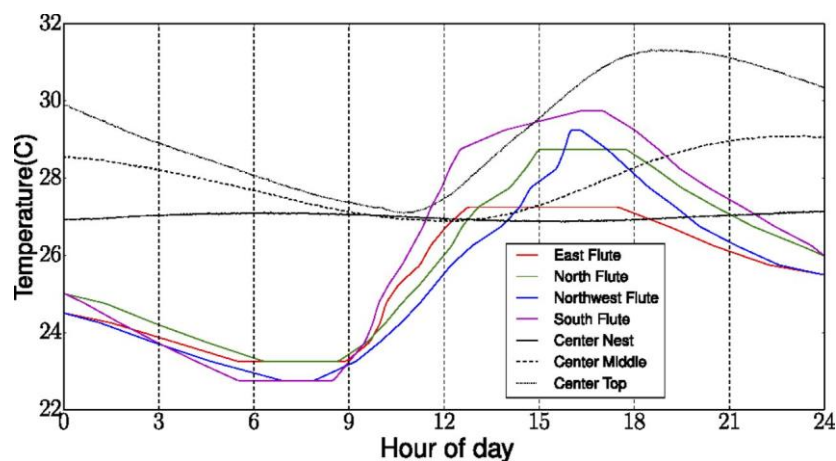
2.1.1 Primjer korištenja prirodne ventilacije u životinjskom svijetu

Učinkovita upotreba prirodne ventilacije održiva je strategija za postizanje energetski učinkovitih zgrada, ali je njome teško upravljati budući da je protok zraka sporadičan, ovisan o trenutnim uvjetima te potencijalno veći ili manji od onoga koji je stvarno potreban u danom trenutku. Stoga, pružanje adekvatnih rješenja prirodne ventilacije za zgrade zahtijeva daljnja proučavanja na uspješnim primjerima. Mnogi takvi primjeri mogu se pronaći u prirodi. Jedan od zanimljivih primjera u prirodi je termitnjak koji uspijeva održati svoju temperaturu približno konstantnom unatoč visokim temperaturnim oscilacijama između noći i dana. Prirodna ventilacija u termitnjacima ima dvije funkcije: izbaciti ustajali zrak s visokom koncentracijom CO₂ i odvesti višak topline dovođenjem hladnog i svježeg zraka. [2] Shematski prikaz termitnjaka prikazan je na Slici 1.



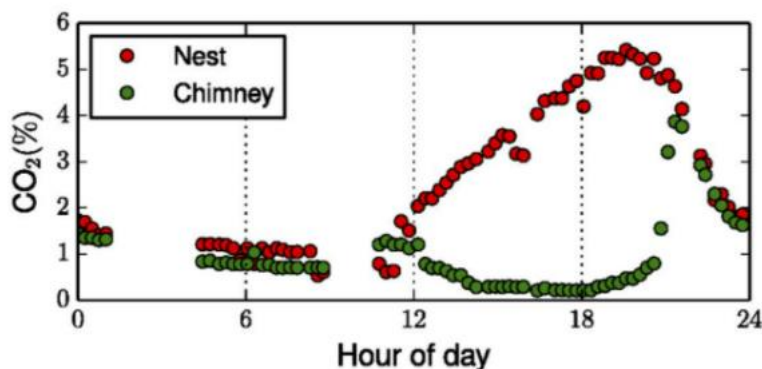
Slika 1. Prikaz termitnjaka [3]

Mjerenjem dnevnih oscilacija protoka kroz površinske kanale termitnjaka vrste *Odontotermes obesus*, prikazano je da integracija geometrije, heterogene toplinske mase i poroznog materijala gradnje omogućuje termitnjacima korištenje dnevne oscilacije temperature okoline za ventilaciju. Tanki vanjski kanali brže se zagrijavaju tijekom dana u odnosu na dublje dimnjake, potiskujući zrak niz dimnjak, s obrnutom situacijom noću čime osiguravaju približno konstantnu temperaturu u gnijezdu kao što je prikazano na Slici 2. [4]



Slika 2. Promjena temperature u termitnjaku kroz dan [4]

Na Slici 3 prikazana je promjena CO₂ u gnijezdu i dimnjaku termitnjaka. Tijekom dana, kada su protoci zraka relativno mali, CO₂ se postupno nakuplja do gotovo 6% u gnijezdu i pada na 1% u dimnjaku. Noću, kada su konvektivni tokovi veliki, postiže se relativno niska razina CO₂ unutar cijelog gnijezda. CO₂ se osim konvekcijom, djelomično oslobađa mehanizmom difuzije zraka kroz porozni materijal termitnjaka, pri čemu bi za cjelokupnu izmjenu zraka tim putem trebalo 4 dana. [4]



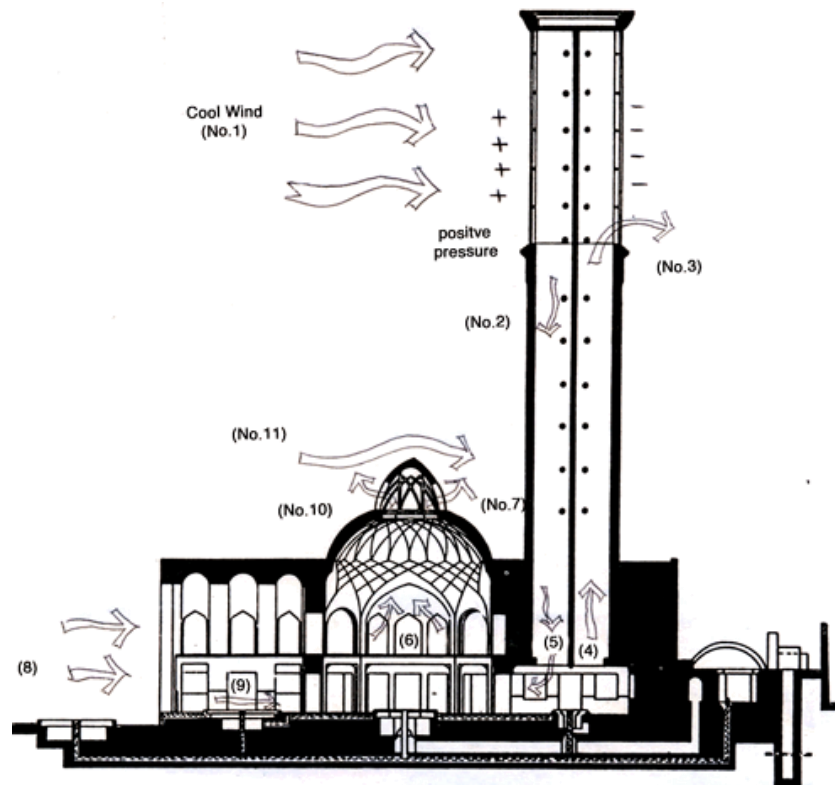
Slika 3. Udio CO₂ u termitnjaku kroz dan [4]

Većinski dio izmjene zraka odvija se konvektivnim putem zbog gradijenta temperature prisutnom u termitnjaku. Zagrijavanjem zraka, širi se njegov volumen, što uzrokuje smanjenje gustoće. Ventilacija uslijed efekta uzgona rezultat je razlika u gustoći zraka, u ovom slučaju gustoćama zraka u gnijezdu i onog pri vrhu dimnjaka. Uzgonski efekt pospješuje i razlika u visini što objašnjava visine termitnjaka i do 10 metara iznad tla, iako životinje borave ispod tla. [4]

2.1.2 Primjer korištenja prirodne ventilacije u zgradarstvu

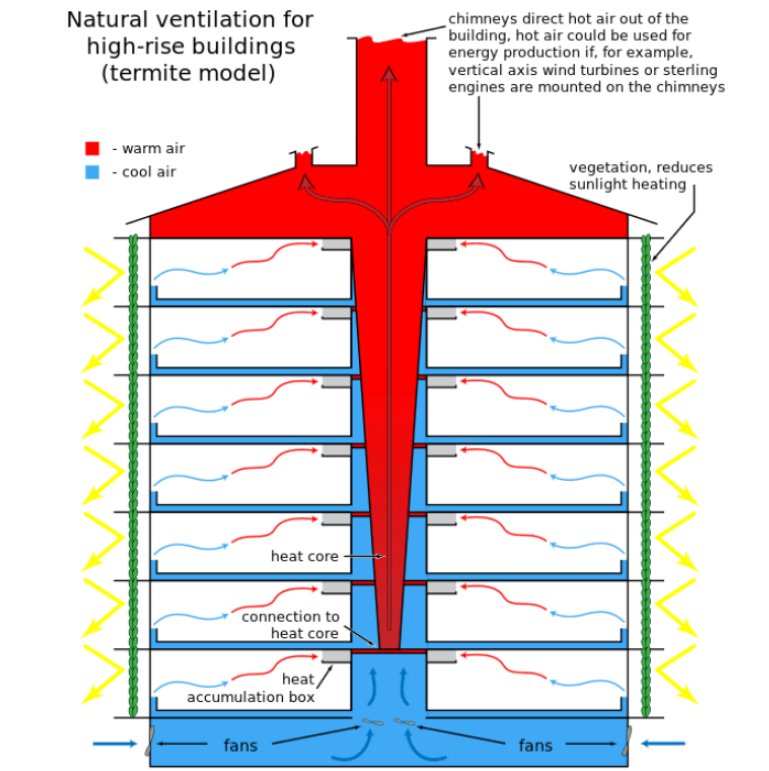
Jedna od najranije zabilježenih primjena prirodne ventilacije su hvatači zraka, eng. *windcatcher* na području današnjeg Irana, a koji datiraju iz 4000.g.pr.Kr. Principi na kojima se temelji rad *windcatchera* su sila uzgona i sila vjetra. Na strani tornja na koju udara vjetar stvara se pretlak, a na suprotnoj strani je podtlak. Kao rezultat, svježi zrak ulazi kroz privjetrinsku stranu, a vrući ustajali zrak u zatvorenom nastoji se pomaknuti prema području negativnog tlaka na zavjetrinskoj strani. Učinak uzgona sekundarni je mehanizam u izmjeni zraka, točnije njegov utjecaj povećava protok zraka za 24% [5]. Temelji se na razlici gustoće svježeg i unutarnjeg zraka zbog temperaturnih razlika. Hlađenje se u iranskim građevinama nerijetko pospješuje

strujanjem vjetra nad vodenim površinama, čime se iskorištava potencijal i evaporativnog hlađenja u suhim klimama.



Slika 4. Windcatcher [1]

Jedan od najpoznatijih primjera pasivnog hlađenja modernog doba je shopping centar u Zimbabwe-u shematski prikazan na Slici 5. Zgrada je ujedno i primjer biomimikrije u arhitekturi jer su se tijekom izgradnje primijenila načela izmjene topline proučavana kod termitnjaka. Materijali zgrade imaju visok toplinski kapacitet što omogućuje dobru akumulaciju energije. U prizemlju su postavljeni ventilatori koji usisavaju zrak u zgradu, koji imaju jako malu potrošnju električne energije, a povećavaju učinkovitost prirodne ventilacije. Kako je u prethodnom poglavlju navedeno da se prirodnom ventilacijom smatraju sustavi koji nemaju potrošnju električne energije, ovaj sustav bilo bi točnije klasificirati u hibridnu ventilaciju, iako su svi ostali dijelovi sustava pasivni. Razni otvori u cijeloj zgradi dodatno omogućuju pasivni unutarnji protok zraka kojeg pokreću vanjski vjetrovi. Toplina se iz ureda i trgovina na nižim katovima podiže prema otvorenim krovnim dimnjacima gdje topli zrak izlazi van u okoliš.

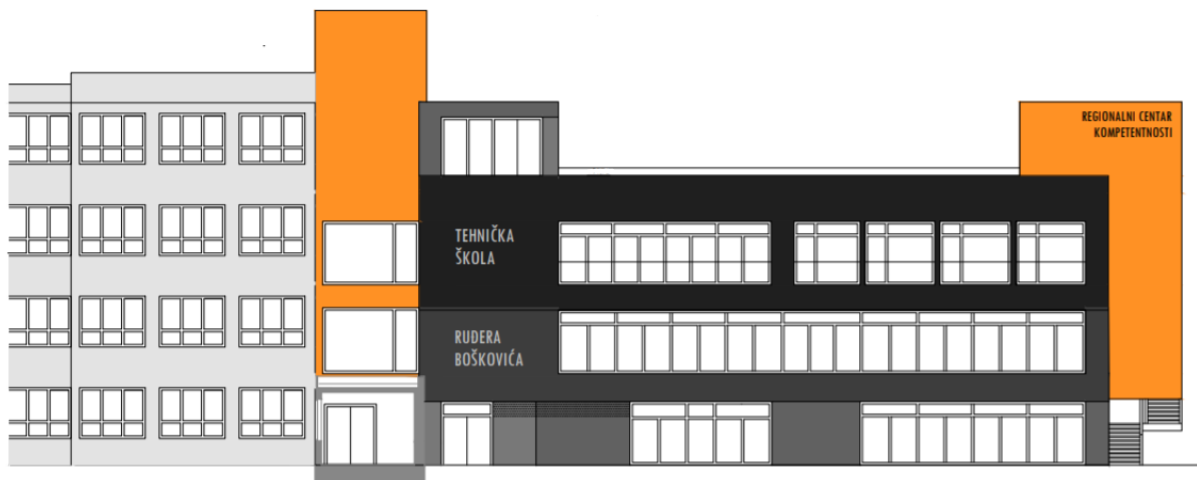


Slika 5. Shema koja prikazuje prirodnu ventilaciju u zgradi Eastgate u Harareu [6]

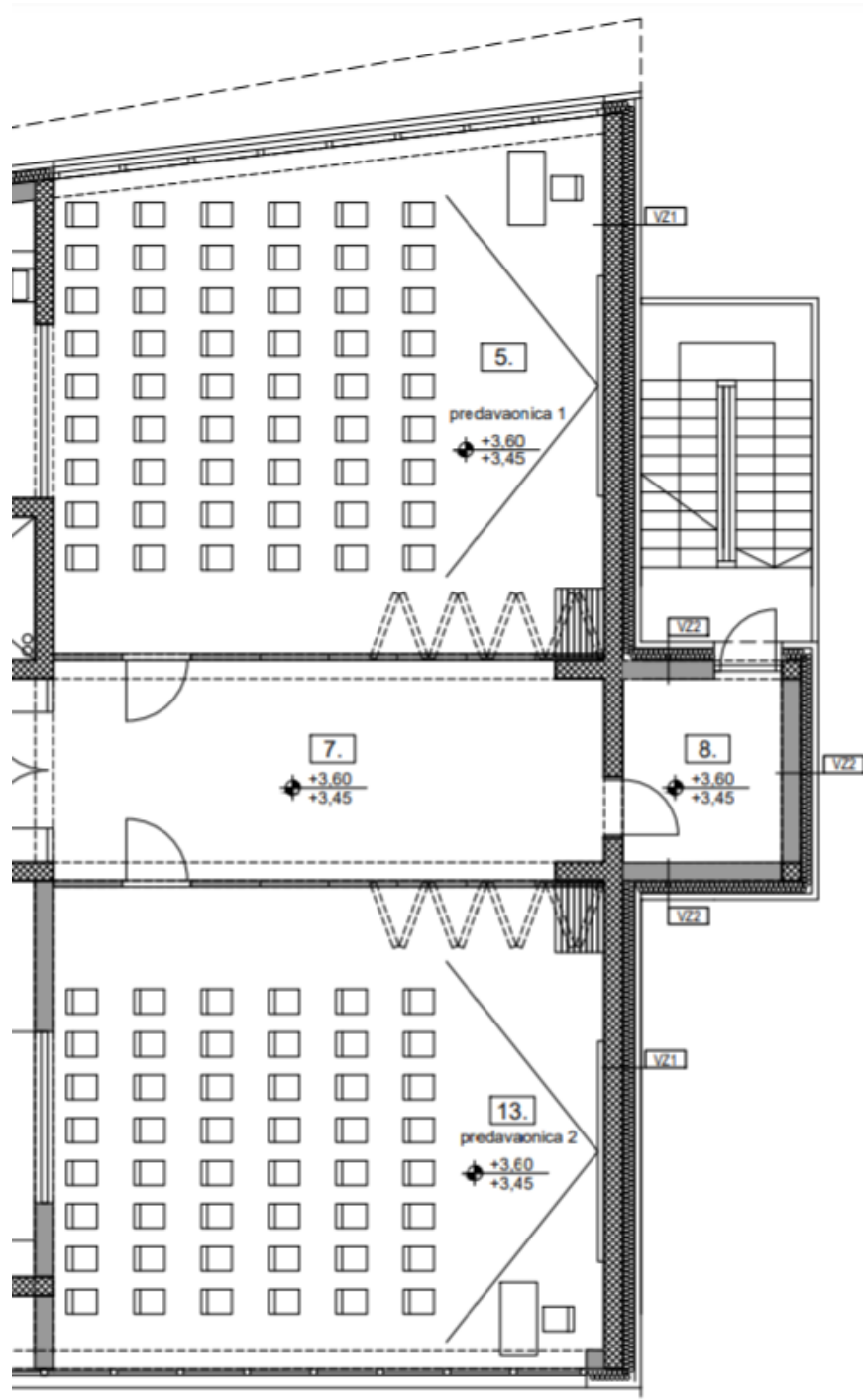
Iako se u modernoj arhitekturi češće pronalaze primjeri hibridne ventilacije, u ovom radu proučavati će se isključivo pasivno hlađenje uslijed sile vjetra. Ono je ostvareno poprečnim strujanjem vjetra čiji je matematički model opisan u Poglavlju 4.

3 OPIS ZGRADE

Analiza pasivnog hlađenja u ovom radu provodi se nad dvjema učionicama Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu koje se nalaze na 1. katu. Zgrada u kojoj se učionice nalaze prikazana je na Slici 6. Svaka prostorija obuhvaćena je kao jedna toplinska zona, što znači da su u zadatku ukupno tri zone: Predavaonica 1, Hodnik koji dijeli učionice i Predavaonica 2. Predavaonica 1 vanjskim je zidom na kojem su postavljeni prozori okrenuta sjeveru, dok se kod predavaonice 2 prozori nalaze na južnoj strani. Na Slici 7 prikazan je tlocrt promatranog prostora.



Slika 6. Pročelje tehničke škole Ruđer Bošković [7]



Slika 7. Tlocrt analiziranog dijela Tehničke škole Ruder Bošković [7]

3.1 Građevinski opis zgrade

Kako bi se izračunao prijenos topline između zgrade i okoliša potrebno je poznavati građevinske materijale koji su korišteni prilikom izgradnje. U nastavku su opisani sastav i termodinamička svojstva zidova i prozora za referentnu nZEB zgradu obrazovne ustanove u kontinentalnoj klimi.

Vanjski zidovi izrađeni su od armiranog betona debljine 20 cm i obloženi su mineralnom vunom iste debljine, polimerom debljine 0,3 cm i silikatnom žbukom debljine 0,2 cm. Termodinamička svojstva materijala koji su sastavni dio zida prikazana su u Tablici 1.

Tablica 1. Svojstva vanjskog zida

| Sloj | Materijal | d [cm] | c_p [J/kgK] | ρ [kg/m ³] | λ [W/mK] |
|------|--|----------|---------------|-----------------------------|------------------|
| 1 | Armironi beton | 20 | 1000 | 2500 | 2,6 |
| 2 | Mineralna vuna | 20 | 1030 | 50 | 0,035 |
| 3 | Polimer-cementna žbuka armirana staklenom mrežicom | 0,3 | 1000 | 1100 | 0,7 |
| 4 | Silikatna žbuka | 0,2 | 1050 | 1850 | 0,87 |

Strop i pod, tj. međukatni zidovi istih su slojeva na svim katovima. Međukatni zid sastoji se od epoksi smole debljine 0,3 cm, cementnog estriha 6 cm, PE folije od 0,02 cm te stiropora debljine 2 i 4 cm. Termodinamička svojstva materijala koji su sastavni dio zida prikazana su u Tablici 2.

Tablica 2. Svojstva međukatnih zidova

| Sloj | Materijal | d [cm] | c_p [J/kgK] | ρ [kg/m ³] | λ [W/mK] |
|------|------------------|----------|---------------|-----------------------------|------------------|
| 1 | Epoksi smola | 0,3 | 1400 | 1200 | 0,2 |
| 2 | Cementni estrih | 6 | 1100 | 2000 | 1,6 |
| 3 | PE folija | 0,02 | 1250 | 1000 | 0,19 |
| 4 | Stiropor EPS T | 2 | 1260 | 12 | 0,042 |
| 5 | Stiropor EPS 150 | 4 | 1260 | 15 | 0,036 |
| 6 | Armironi beton | 20 | 1000 | 2500 | 2,6 |

Pregradni zidovi unutar zgrade izgrađeni su od armiranog betona debljine 20 cm. Termodinamička svojstva armiranog betona koji je korišten prikazana su u Tablici 3. Na zgradu su postavljene dvije vrste prozora, jedna vrsta prozora korištena je za južno pročelje, dok su za ostala pročelja korišteni drugi prozori. Termodinamička svojstva prozora prikazana su u Tablici 4.

Tablica 3. Svojstva pregradnih zidova

| Sloj | Materijal | d [cm] | c_p [J/kgK] | ρ [kg/m ³] | λ [W/mK] |
|------|----------------|----------|---------------|-----------------------------|------------------|
| 1 | Armirani beton | 20 | 1000 | 2500 | 2,6 |

Tablica 4. Svojstva prozora

| Vrsta prozora | R [m ² K/W] | U [W/m ² K] | g [-] |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|---------|
| Prozor na jugu | 1,429 | 0,7 | 0,407 |
| Prozor na sjeveru | 0,909 | 1,1 | 0,598 |

3.2 Ostali parametri potrebni za modeliranje zgrade

Osim građevinskih podataka, bitno je poznavati očekivani raspored korištenja zgrade i pogonske režime kako bi se mogla proračunati očekivana potrošnja energije pri stvarnom korištenju zgrade. Pretpostavka je da će se u školi boraviti ukupno 12 sati, od 6:00 do 20:00, pri čemu je pretpostavljeno da unutarnji dobitci od ljudi i opreme u učionicama iznose 10 W/m². Pretpostavljeno je da hodniku nema toplinskih dobitaka, što je također slučaj za sve prostorije van pretpostavljenog vremena boravka. Postavna temperatura hlađenja je 25°C, a svi navedeni podatci pregledno su prikazani u Tablici 5.

Tablica 5. Parametri zgrade

| | |
|--|---------------------|
| Infiltracija | 0,7 h ⁻¹ |
| Raspored korištenja zgrade | 6:00 – 20:00 |
| Postavljena temperatura hlađenja | 25°C |
| Unutarnji dobitci za vrijeme korištenja zgrade | 10 W/m ² |
| Unutarnji dobitci kada se zgrada ne koristi | 0 W/m ² |

4 MATEMATIČKI MODEL POPREČNE VENTILACIJE

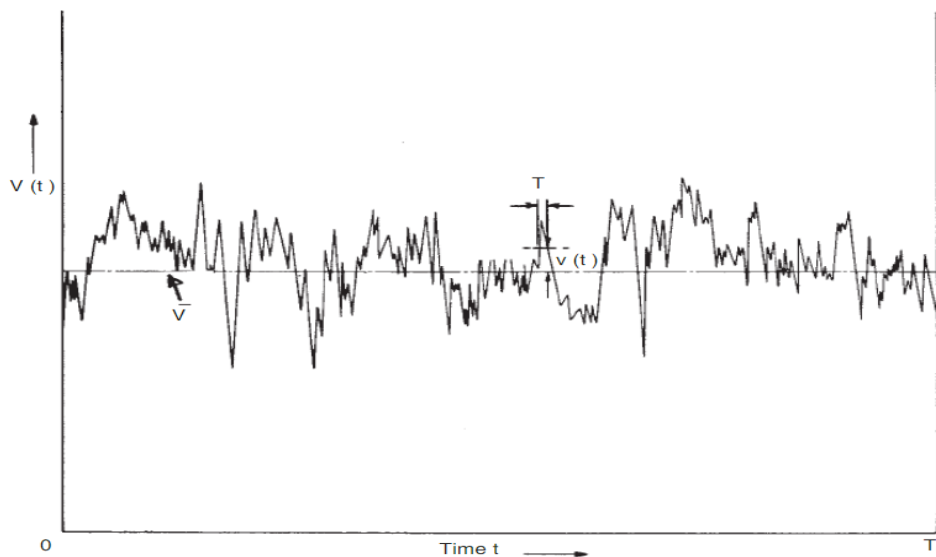
4.1 Opis strujanja vjetra

Protok vjetra vrlo je složen fenomen kojim upravljaju brojne varijable kao što su: rotacija Zemlje, temperaturne razlike između oceana i kopna te polarnog i tropskog zraka, zemljopisni položaj i krajolik. Prirodni vjetar je vrlo promjenjiv, turbulentan i njegova brzina varira s visinom nad zemljom zbog postojanja graničnog sloja atmosfere. Uz turbulentnu prirodu vjetra, turbulenciju u donjem dijelu atmosferskog graničnog sloja dodatno generiraju i prizemne prepreke i toplinske struje. Trenutna brzina vjetra V mijenja se s vremenom kako je prikazano prema Slici 8. Kao i u svakom turbulentnom strujanju, brzina vjetra u točki može se zapisati kao zbroj srednje vremenske vrijednosti i fluktuirajuće komponente [8] :

$$V(t) = \bar{V} + v(t) \quad (1)$$

pri čemu su

| | |
|-----------|--------------------------------|
| $V(t)$ | trenutna brzina vjetra [m/s] |
| \bar{V} | osrednjena brzina vjetra [m/s] |
| $v(t)$ | fluktuirajuća komponenta [m/s] |



Slika 8. Promjena brzine vjetra kroz vrijeme [8]

U inženjerskoj praksi radi pojednostavljenja se koristi osrednjena brzina vjetra \bar{V} , dobivena integracijom trenutne brzine vjetra tijekom željenog vremenskog razdoblja T_0 :

$$\bar{V} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} V(t) dt \quad (2)$$

pri čemu je :

T_0 vremenski interval u kojem se promatra promjena brzine vjetra [s]

Srednje brzine vjetra \bar{V} izmjerene na meteorološkim postajama koje se nalaze na otvorenom i na visini od 10 m, a obično su uprosječene u intervalima u razmaku 1h. Iako se srednja brzina vjetra povećava s visinom od tla do određene visine (određene debljinom graničnog sloja) kao što je prikazano na Slici 9, turbulencija opada povećanjem visine. Za izračun brzine vjetra na željenoj visini koristi se izraz:

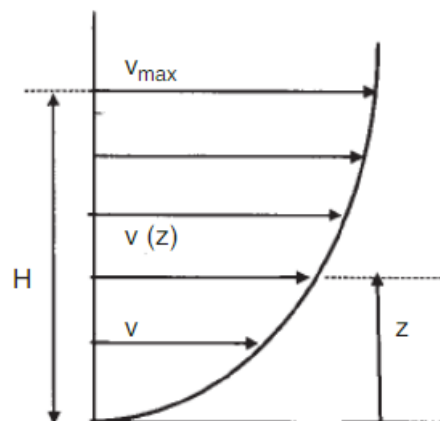
$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_r} = cH^a \quad (3)$$

pri čemu su :

\bar{V}_r srednja brzina vjetra na referentnoj visini [m/s]

c, a faktori koji ovise o području u kojem se nalazi zgrada [–]

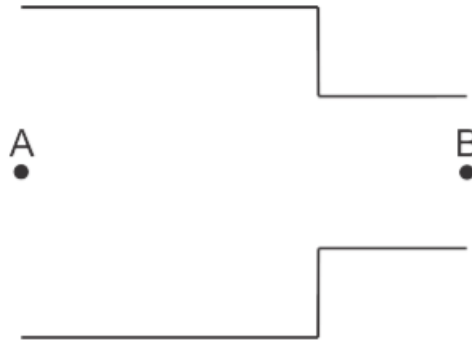
H visina na kojoj se nalaze otvori [m]



Slika 9. Profil brzine vjetra [8]

4.2 Fizikalni model ventilacije uslijed sile vjetra

Za izračun protoka zraka kroz prozor postavlja se Bernoullijeva jednadžba za čiji će izvod poslužiti Slika 10. Radi pojednostavljenja izraza, početne pretpostavke su da je temperatura vanjskog zraka jednaka temperaturi prostora u blizini prozora, a samim time je jednaka i gustoća zraka. Također, Bernoullijeva jednadžba postavlja se između točaka na istoj visini [9].



Slika 10. Pomoćni prikaz za izvod protoka zraka kroz prozor [9]

Pretpostavke:

- $T = \text{konst.} \rightarrow \rho = \text{konst.}$
- $h_A = h_B = h$

Postavlja se Bernoullijeva jednačba od toče A do toče B :

$$\frac{w_A^2}{2g} + \frac{p_A}{\rho g} + h_A = \frac{w_B^2}{2g} + \frac{p_B}{\rho g} + h_B \quad (4)$$

pri čemu su:

| | |
|------------|--|
| w_A, w_B | brzina fluida u točkama A i B [m/s] |
| p_A, p_B | tlak u točkama A i B [Pa] |
| h_A, h_B | visine na kojima se nalaze točke A i B [m] |
| ρ | gustoća fluida [kg/m ³] |
| g | gravitacijska sila [m/s ²] |

Primjenom pretpostavke da se točke A i B nalaze na istoj visini dobiva se sljedeći izraz :

$$\frac{w_A^2}{2} + \frac{p_A}{\rho} = \frac{w_B^2}{2} + \frac{p_B}{\rho} \quad (5)$$

Postavljanjem jednačbe kontinuiteta za nestlačivi fluid izražava se brzina fluida u točki A :

$$w_A = w_B \frac{A_B}{A_A} \quad (6)$$

pri čemu su:

| | |
|------------|---|
| A_A, A_B | površine poprečnog profila strujanja fluida u točkama A i B [m ²] |
|------------|---|

Uvrštavanjem izraza za brzinu u točki A u Bernoullijevu jednadžbu, jednadžba prelazi u novi oblik:

$$\frac{w_B^2}{2} \left(\frac{A_B}{A_A}\right)^2 + \frac{p_A}{\rho} = \frac{w_B^2}{2} + \frac{p_B}{\rho} \quad (7)$$

Čijim se sređivanjem izražava brzina u točki B :

$$w_B = \sqrt{\frac{2(p_A - p_B)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_B}{A_A}\right)^2\right]}} \quad [m/s] \quad (8)$$

Kako bi se jednadžba dodatno pojednostavila, uvodi se pretpostavka da je površina stranice zgrade na kojoj se nalazi prozor mnogo veća od površine samog prozora, odnosno $A_B = A_{\text{prozor}} \ll A_A$. Iz toga se može zaključiti da je A_B/A_A približno jednak nuli i da jednadžba prelazi u sljedeći oblik [9]:

$$w_B = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [m/s] \quad (9)$$

pri čemu je:

Δp razlika tlaka između točaka A i B [Pa]

Uvrštavanjem izraza za brzinu (9) u jednadžbu za računanje volumnog protoka, dobiva se izraz za volumni protok zraka :

$$\dot{V} \text{ zraka} = A_B w_B = A_B \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [m^3/s] \quad (10)$$

pri čemu je:

$\dot{V} \text{ zraka}$ volumen zraka koji struji kroz prozor [m^3/s]

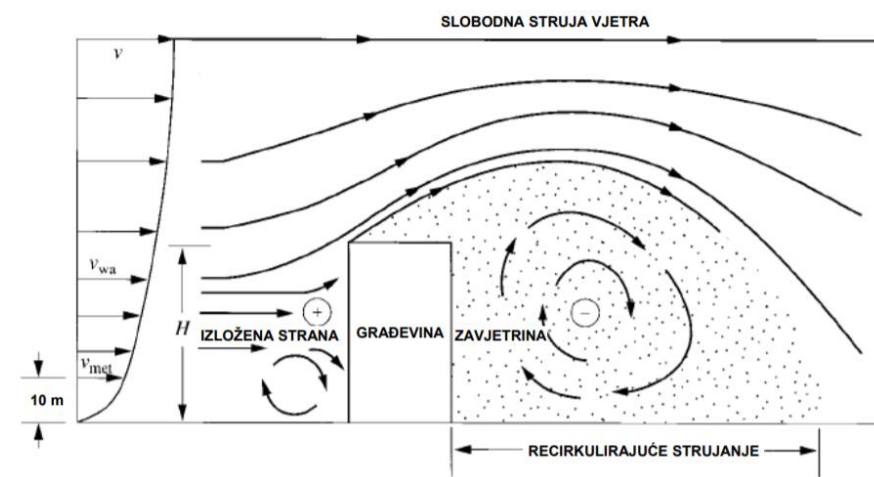
Kako bi se dobio točniji rezultat, potrebo je uzeti i koeficijent lokalnog otpora strujanju C_d , a čiji iznos ovisi o geometriji otvora i Reynoldsovom broju. Vrijednost koeficijenta nalazi se u rasponu od 0 do 1, a najčešće iznosi 0,65. Njegovim uvrštavanjem dobiva se korigirana jednadžba za protok struje zraka [9]:

$$\dot{V} \text{ zraka} = C_d A_B \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [m^3/s] \quad (11)$$

pri čemu je:

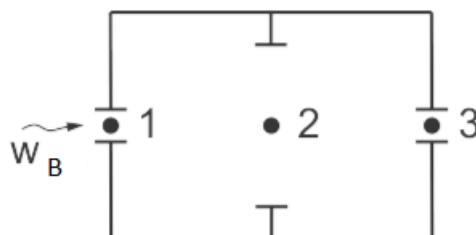
C_d koeficijent lokalnog otpora strujanju (najčešće 0,65) [–]

Raspored tlaka na zgradi određen je orijentacijom zgrade u odnosu na prevladavajući smjer vjetra, kao i njezinom geometrijom. Lice zgrade okrenuto prema smjeru puhanja vjetra podvrgnuto je pozitivnom tlaku vjetra (tlak na tom mjestu veći je od statičkog tlaka vjetra) kao rezultat udara vjetra, dok su krov i zavjetrina podvrgnuti negativnom tlaku vjetra zbog odvajanja graničnog sloja od površine na oštrim rubovima koji spajaju krov i vjetroviti zid. Koeficijenti tlaka na bočnim stranama mogu biti pozitivni ili negativni, ovisno o nagibu s obzirom na smjer puhanja vjetra. Prosječne vrijednosti koeficijenta površinskog tlaka vjetra C_p su oko +0,6 na strani izloženoj vjetru, oko -0,5 na zavjetrini i ravnom krovu, te -0,25 na bočnim stranama. [8]



Slika 11. Strujanje zraka oko građevine [10]

Sljedeći korak je određivanje protoka zraka kroz zgradu. Izvod poprečnog protoka zraka prikazan je pomoću Slike 12.



Slika 12. Pomoćni prikaz za izvod poprečnog strujanja [9]

Dinamički tlakovi na strani zgrade izloženoj vjetri i zavjetrini mogu se zapisati kao :

$$p_1 = C_{p1} \frac{\rho w_B^2}{2} \quad (12)$$

$$p_3 = C_{p3} \frac{\rho w_B^2}{2} \quad (13)$$

pri čemu je :

p_1 tlak na strani zgrade izloženoj vjetru [Pa]

p_3 tlak na zavjetrinskoj strani zgrade [Pa]

C_{p1} faktor površinskog tlaka vjetra na strani zgrade izloženoj vjetru [-]

C_{p3} faktor površinskog tlaka vjetra na zavjetrini [-]

w_B brzina vjetra [m/s]

ρ gustoća zraka [kg/m³]

Strujanje zraka posljedica je gradijenta tlaka, tj. uzrokovano je razlikom tlakova na strani zgrade izloženoj vjetri i u zavjetrini, pa se pogonska sila vjetra može zapisati :

$$(p_1 - p_3)_v = (C_{p1} - C_{p3}) \frac{\rho w_{vjetar}^2}{2} \quad (14)$$

pri čemu je :

C_{p1}, C_{p3} faktor površinskog tlaka vjetra kojim se u obzir uzima položaj prozora na zgradi [-]

Padovi tlaka na otvorima 1, 2 i 3 mogu se prikazati koristeći jednadžbu (10) za protok zraka pomoću koje je izražena brzina te umetnuta u jednadžbu (14) čime dobivamo :

$$\Delta p_1 = \frac{\dot{V}_1^2}{A_1^2 C_d^2} \frac{\rho_1}{2} \quad (15)$$

$$\Delta p_2 = \frac{\dot{V}_2^2}{A_2^2 C_d^2} \frac{\rho_2}{2} \quad (16)$$

$$\Delta p_3 = \frac{\dot{V}_3^2}{A_3^2 C_d^2} \frac{\rho_3}{2} \quad (17)$$

pri čemu su:

$\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3$ padovi tlaka na otvorima 1, 2 i 3 [Pa]

$\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3$ protoci zraka na presjecima 1, 2 i 3 [m/s]

| | |
|--------------------------|---|
| A_1, A_2, A_3 | površina otvora na presjecima 1, 2 i 3 [m ²] |
| ρ_1, ρ_2, ρ_3 | gustoće zraka na presjecima 1, 2 i 3 [kg/m ³] |

Primjenom pretpostavki o nestlačivom strujanju ($\rho_1=\rho_2=\rho_3$) i jednadžbe kontinuiteta ($V_1=V_2=V_3$) te zbrajanjem padova tlaka na otvorima, dobiva se :

$$\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 = \frac{\dot{V}^2 \rho}{C_d^2 2} \left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \frac{1}{A_3^2} \right) \quad (18)$$

Izjednačavanjem jednadžbi (14) i (18) slijedi jednakost :

$$(C_{p1} - C_{p2}) \frac{\rho w_B}{2} = \frac{\dot{V}^2 \rho}{C_d^2 2} \left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \frac{1}{A_3^2} \right) \quad (19)$$

Izlučivanjem protoka zraka V iz jednadžbe dobije se konačni izraz za računanje protoka zraka kroz zgradu za prirodnu ventilaciju uzrokovanu djelovanjem sile vjetra :

$$\dot{V} = C_d \sqrt{C_{p1} - C_{p3}} A_{eff} w_B \quad (20)$$

pri čemu je :

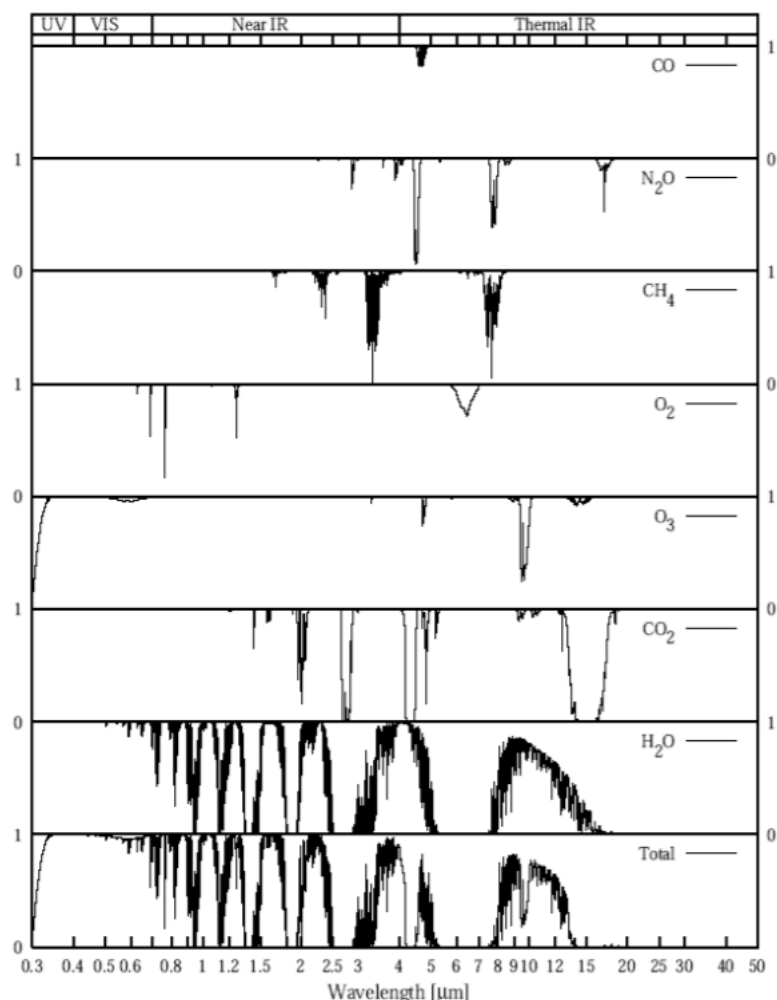
A_{eff} efektivna površina [m²]

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{A_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{A_3}\right)^2}} \quad (21)$$

Iz jednadžbe (21) vidi se da efektivna površina najviše ovisi o najmanjoj površini otvora obzirom da najmanji otvor pruža najveći otpor strujanju. Efektivna površina je iznosom uvijek manja od površine najmanjeg otvora.

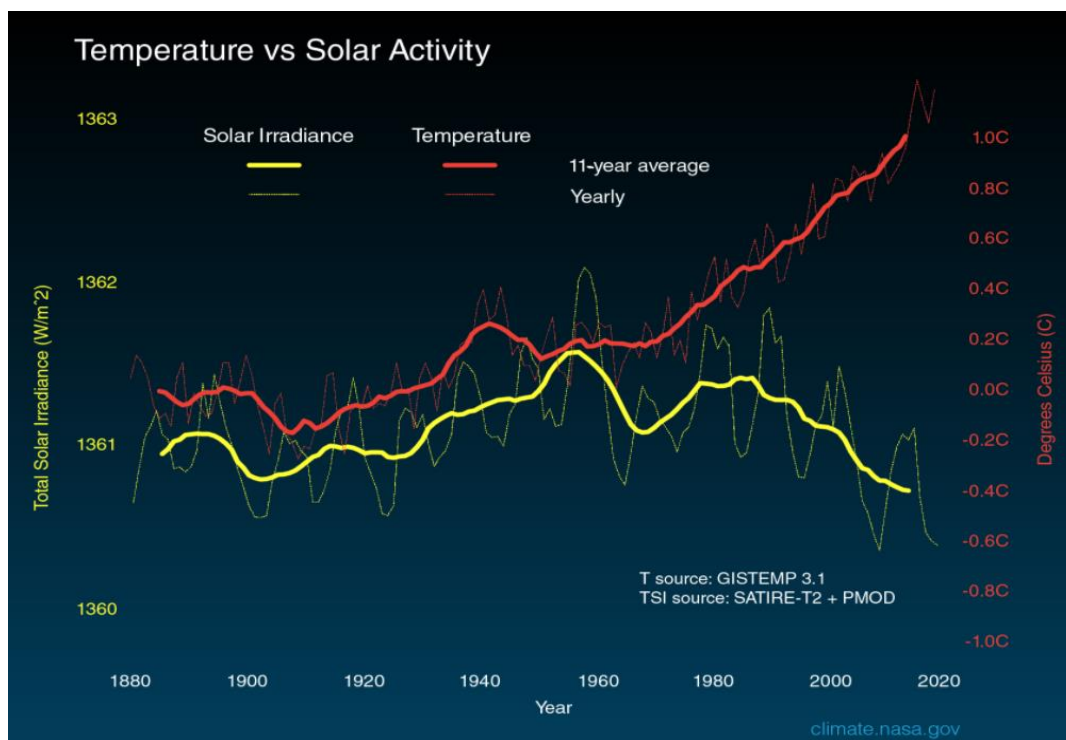
5 UTJECAJ KLIMATSKIH PROMJENA NA TEMPERATURU VANJSKOG ZRAKA

Zemljina atmosfera se većinskim dijelom sastoji od dušika (78,08%) i kisika (20,95%) koji ne apsorbiraju solarno i infracrveno zračenje, dok preostalih gotovo 1 % većinom čini argon, a ostatak su vodena para, ugljikov dioksid, metan, neon i drugi. Glavne molekule koje mogu apsorbirati infracrveno zračenje su CO₂ i vodena para, jer je njihov spektar apsorpcije infracrvenog zračenja najširi što se može vidjeti na Slici 13. Nakon što ti plinovi apsorbiraju energiju, pola emitiraju natrag na Zemlju, a drugu polovicu emitiraju u svemir, zarobivši dio topline u atmosferi. Ovo zadržavanje topline nazivamo efektom staklenika. Zbog efekta staklenika kojeg stvaraju navedeni plinovi, prosječna temperatura Zemlje je oko 15 °C, što nam omogućuje život. No zbog izgaranja fosilnih goriva, došlo je do povišene koncentracije tih istih plinova što je uzrokovalo prekomjerno zagrijavanje Zemlje, te je prosječna temperatura Zemlje od 20. stoljeća narasla za 1 °C. [11]



Slika 13. Spektar apsorpcije infracrvenog zračenja atmosferskih plinova [12]

Kada se uprosječi energija tijekom godine, količina dolaznog Sunčevog zračenja uravnotežena je s količinom izlazne energije emitirane sa Zemlje. Ta se ravnoteža naziva Zemljinom ravnotežom energije ili zračenja. Relativno male promjene u količini stakleničkih plinova u Zemljinoj atmosferi mogu uvelike promijeniti tu ravnotežu između ulaznog i odlaznog zračenja. Zemlja se zatim zagrijava ili hladi kako bi se vratila ravnoteža zračenja na vrhu atmosfere. Tijekom proteklih 800 000 godina koncentracija stakleničkih plinova bila je 200-280 PPM-a (*parts per milion*), ali u prošlom stoljeću ona je skočila na više od 400 PPM-a potaknuta ljudskim aktivnostima poput spaljivanja fosilnih goriva. Veće koncentracije stakleničkih plinova uzrokuju zarobljavanje dodatne topline i porast globalnih temperatura.



Slika 14. Prikaz promjene temperature i solarnog zračenja [11]

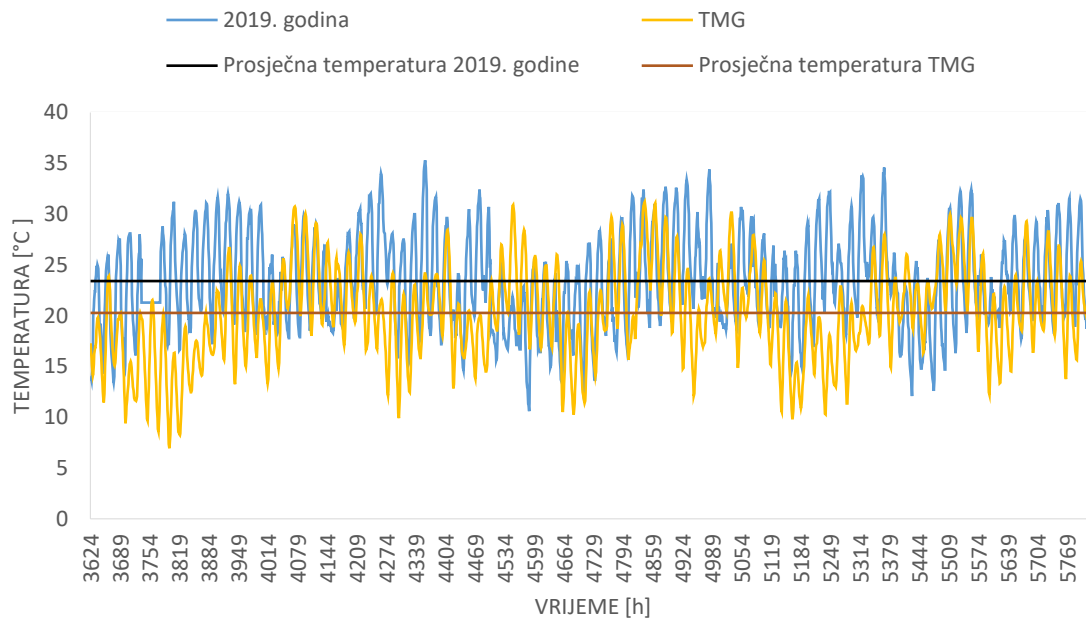
Kako bi znanstvenici bili sigurni da samo Sunce nije odgovorno za porast temperatura proteklih godina, niz satelita od 1978. godine mjerio je energiju koja dolazi direktno od strane Sunca. Grafički prikaz podataka može se vidjeti na Slici 14. Crvena linija prikazuje globalne promjene površinske temperature dok žuta linija prikazuje Sunčevu energiju koju prima Zemlja u W/m^2 . Tankim linijama je prikazano godišnje stanje, dok debele linije prikazuju uprosječeno stanje u razdobljima od 11 godina kako bi se lakše uočila promjena. Količina Sunčeve energije

koju Zemlja prima pratila je Sunčev prirodni 11-godišnji ciklus malih uspona i padova bez neto povećanja od 1950-ih. U istom je razdoblju globalna temperatura naglo porasla. Dolazi se do zaključka da Sunce nije prouzročilo promatrani trend globalnog zagrijavanja temperature tijekom posljednjih pola stoljeća.

S obzirom da je europski građevinski sektor odgovoran za oko 40% ukupne potrošnje primarne energije, a samim time i za povećanje emisije dimnih plinova, Europska je unija 2002. godine donijela Direktivu o energetske učinkovitosti zgrada u cilju smanjena potrošne energije u zgradama [13]. Jedno od rješenja za smanjenje energije za vrijeme ljetnih mjeseci, a koje nema negativnih učinaka na okoliš, jest prirodna ventilacija. Da bi se prirodna ventilacija mogla primijeniti, bitne su pogodne temperature vanjskog okoliša, odnosno, potrebno je da temperatura zraka bude nekoliko stupnjeva niža od temperature koja se u prostoru želi postići. U praksi to znači da svi periodi s temperaturama ispod 25°C (granica toplinske ugodnosti) imaju potencijal za primjenu pasivnog hlađenja primjenom prirodne ventilacije.

Koliko je potencijal prirodne ventilacije narušen zbog utjecaja klimatskih promjena, proučit će se u ovom radu usporedivši temperature tipične meteorološke godine i 2019. godine u gradu Zagrebu za svaki sati u godini. Meteorološki podatci za 2019. godinu izmjereni su na postaji Zagreb-Maksimir, dok su podatci za tipičnu meteorološku godinu uprosječene vrijednosti temperatura zadnjih 30 godina u gradu Zagrebu. Kako smjer i brzina vjetera ne bi utjecali na rezultate analize, za izračun 2019. godine i tipične meteorološke godine korišteni su podatci vjetera zabilježeni 2019. godine na meteorološkoj postaji Zagreb-Maksimir.

Na Slici 15 prikazane su temperature za svaki sat 2019. godine i tipične meteorološke godine (TMG) u sezoni hlađenja. Prosječna temperatura 2019. godine u tom vremenskom periodu iznosi 22,9 °C dok je za tipičnu meteorološku godinu 20,3°C, a što čini razliku od 2,6°C. Niže temperature kroz cijelu tipičnu meteorološku godinu očekivane su zbog uprosječenih temperatura. Tim postupkom najtopliji sati u godini iščeznu uslijed zbrajanja s manje toplim satima drugih godina. Analizom podataka utvrđeno je da 2019. godine u sezoni hlađenja 846 sati bilo temperature više od 25°C, dok je u tipičnoj meteorološkoj godini taj broj iznosio 378 sati. Kako je ukupan broj sati u sezoni hlađenja 3672, dobiveno je da je u 2019. godini 76,9% sati u sezoni hlađenja niže temperature od 25°C, dok je u tipičnoj meteorološkoj godini taj postotak 89,7%. Ovaj podatak također ukazuje na činjenicu da postoji veliki potencijal za primjenu pasivnog hlađenja u gradu Zagrebu.



Slika 15. Usporedba vanjskih temperatura u sezoni hlađenja za tipičnu meteorološku godinu te 2019. godinu

6 METODA IZRAČUNA POTREBNE ENERGIJE ZA HLAĐENJE ZGRADE

Prvi korak pri simuliranju energije potrebne za hlađenje prostora je određivanje geometrije prostora te postavljanje radnih parametara kao što su željena temperatura prostora, toplinska opterećenja od ljudi i od opreme, vrijeme korištenja zgrade te ostali parametri koji su opisani u daljnjim podpoglavljima. Sve navedeno obuhvaćeno je energijskim modelom višezonske zgrade, koji se oblikuje u korisničkom sučelju TRNBuild, programa TRNSYS. Nakon izrade modela višezonske zgrade, dobiva se datoteka koja se koristi za izradu simulacije u drugom korisničkom sučelju Simulation Studio. Rezultati dobiveni simulacijom, proizlaze iz matematičkih modela opisanih u Poglavlju 7.

6.1 Opis rada u korisničkom sučelju TRNBuild

TRNBuild je korisničko sučelje koje omogućuje modeliranje toplinskog opterećenja zgrade podijeljene u toplinske zone. Zbog složenosti višezonske zgrade parametri komponente Type56 nisu definirani izravno u ulaznoj datoteci TRNSYS-a. Umjesto toga, dodjeljuje se takozvana datoteka zgrade (*.BUI) koja sadrži potrebne podatke. TRNBuild je razvijen kao jednostavan alat za stvaranje BUI datoteke koja se nakon toga učitava u sučelju Simulation Studio pri izradi simulacije.

6.1.1 Potrebni podatci prije inicijalizacije projekta

Kao prvi korak izrade modela zgrade, odabire se na kojoj Zemljinoj hemisferi se nalazi promatrana građevina. Nakon toga se definiraju položaji strana svijeta kojima će kasnije biti dodijeljeni odgovarajući zidovi zgrade. Ovaj korak prikazan je na Slici 16. Idućim korakom upisuju se svojstva zraka kao što su gustoća, tlak, specifični toplinski kapacitet te ostale konstante potrebne za izračun prijelaza topline koje se mogu vidjeti na Slici 17.

Project

title: Ruder Boskovic
description: Završni rad
created by: Ena
address: UNDEFINEDS
city: Zagreb

Comments

Orientations

| No | Orientation | Calculation | Used by Surf... |
|----|-------------|-------------|----------------------|
| 1 | N_180_90 | - | 25, 31, 32, 33... |
| 2 | E_270_90 | - | 2, 20, 26 |
| 3 | S_0_90 | - | 3, 7, 8, 9, 10, 1... |
| 4 | W_90_90 | - | - |
| 5 | H_0_0 | - | - |

Hemisphere

For the standard data format of orientations the location of the building has to be defined.

Northern hemisphere Southern hemisphere

Miscellaneous

Properties Inputs Outputs

Slika 16. Određivanje Zemljine hemisfere i strana svijeta

Properties

General

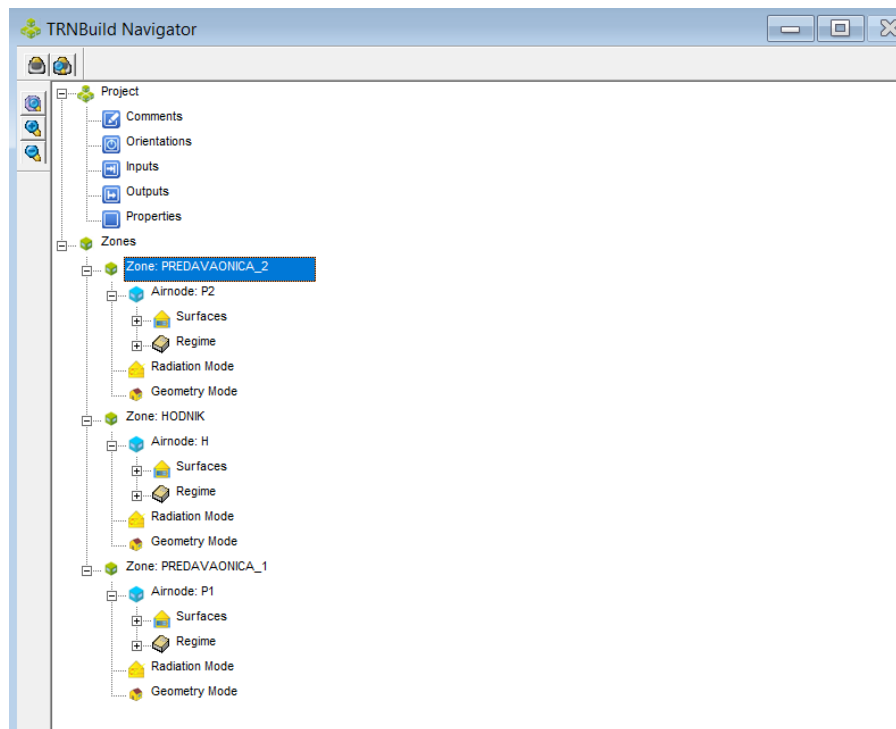
density of air: kg / m³
specific heat of air: kJ / kg K
pressure of air: Pa
heat of vaporization of water: kJ / kg
Stefan Boltzmann Constant: kJ / h m² K⁴
approx. average surface temp.: K

Parameters for internal calculation of heat transfer coefficients

constant heated floor, if (T_{surf}floor-T_{air}floor) > 0: kJ / m² K
exponent heated floor, if (T_{surf}floor-T_{air}floor) > 0: -
constant chilled floor, if (T_{surf}floor-T_{air}floor) < 0: kJ / m² K
exponent chilled floor, if (T_{surf}floor-T_{air}floor) < 0: -
constant heated ceiling, if (T_{surf}ceiling-T_{air}ceiling) > 0: kJ / m² K
exponent heated ceiling, if (T_{surf}ceiling-T_{air}ceiling) > 0: -
constant chilled ceiling, if (T_{surf}ceiling-T_{air}ceiling) < 0: kJ / m² K
exponent chilled ceiling, if (T_{surf}ceiling-T_{air}ceiling) < 0: -
constant vertical surface: kJ / m² K
exponent vertical surface: -

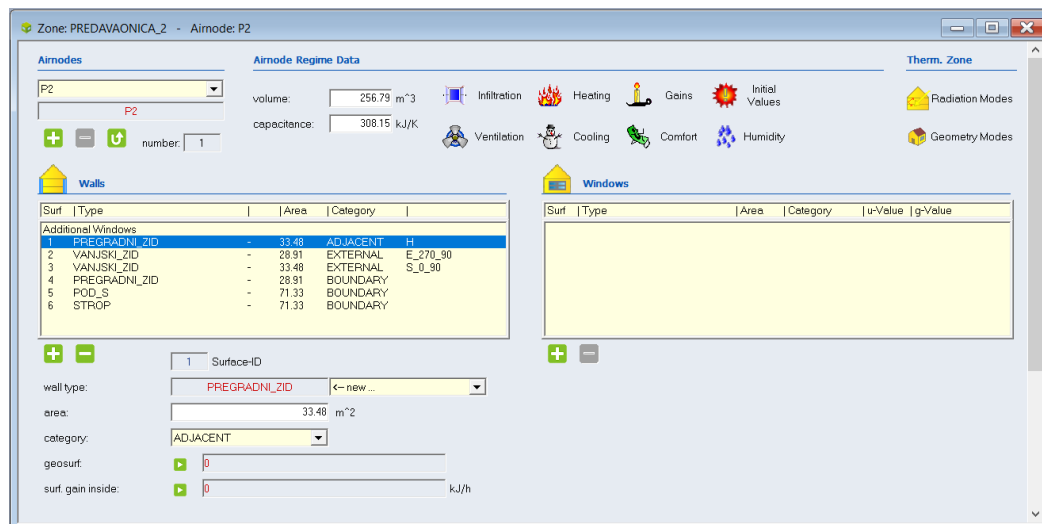
Slika 17. Definiranje svojstava

Po završetku definiranja navedenih svojstava otvara se prozor za inicijalizaciju projekta. U njemu su definirane zone prema opisu u poglavlju 3; predavaonica 1, predavaonica 2 i hodnik. Za svaku zonu prikazana je i grana *surfaces* unutar koje se mogu vidjeti svi prozori i zidovi dok se pod granom *regime* prikazuju režimi grijanja, hlađenja, infiltracije i ventilacije. Na Slici 18 prikazane su razgranate komponente unutar zona, a modeliranje toplinske zone unutar sučelja TRNBuild prikazat će se pomoću zone Predavaonice 2.



Slika 18. Prozor za inicijalizaciju projekta

Svaka zona definirana je volumenom, toplinskim kapacitetom, zidovima i pogonskim režimima. Navedeni parametri definiraju se u prozoru koji je prikazan na Slici 19.



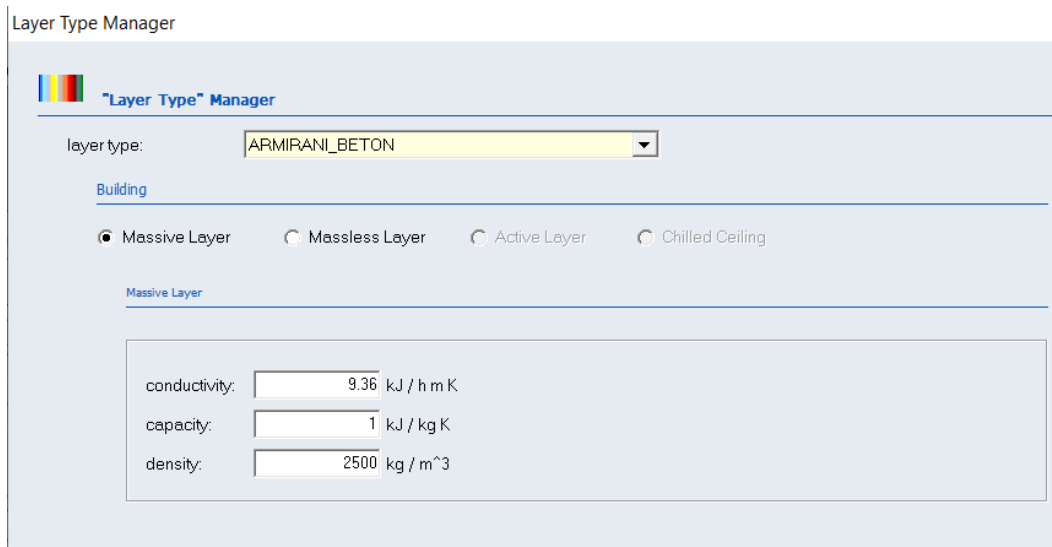
Slika 19. Opis zone

6.1.2 Definiranje zidova

Informacije o zidovima unutar zone prikazuju se u lijevom donjem dijelu kartice. Ovdje korisnik može dodavati, brisati ili uređivati zidove unutar zone. Upisuje se površina zida uključujući i površinu prozora koji se nalaze na zidu, te se bira njegova pripadajuća kategorija između četiri ponuđene:

| | |
|----------|---|
| EXTERNAL | zid koji graniči s vanjskim okolišem |
| INTERNAL | zid koji se nalazi unutar zone |
| ADJECENT | zid koji graniči s dvije zone |
| BOUNDARY | zid kojem je pridijeljen neki rubni uvjet |

Pri definiranju novog zida potrebno je odrediti i GEOSURF faktor koji predstavlja raspodjelu direktnog Sunčevog zračenja. U ovom zadatku ostavljena je zadana vrijednost 0 kojom se Sunčevo zračenje raspoređuje kao i difuzno, ovisno o omjeru površina. Za svaki zid je potrebno odabrati i *view factor to the sky* koji govori koji je dio nebeske hemisfere vidljiv s promatranog zida; obično se za horizontalni zid se uzima vrijednost 0.5, za pod 0, a za strop 1. Vrijednost se koristi kao težinski faktor između "tla" i temperature neba za izmjenu dugovalnog zračenja. Zid se može odabrati pod postavkom *wall type* tako da se izabere već postojeći zid iz TRNSYS baze podataka, a može se kreirati i novi zid klikom na gumb *new* čime se otvara novi prozor prikazan na Slici 21. Pri odabiru novog zida potrebno je definirati slojeve koji se nalaze u zidu tako da im se odrede gustoća, toplinski kapacitet i provodljivost kao što je vidljivo na Slici 20.

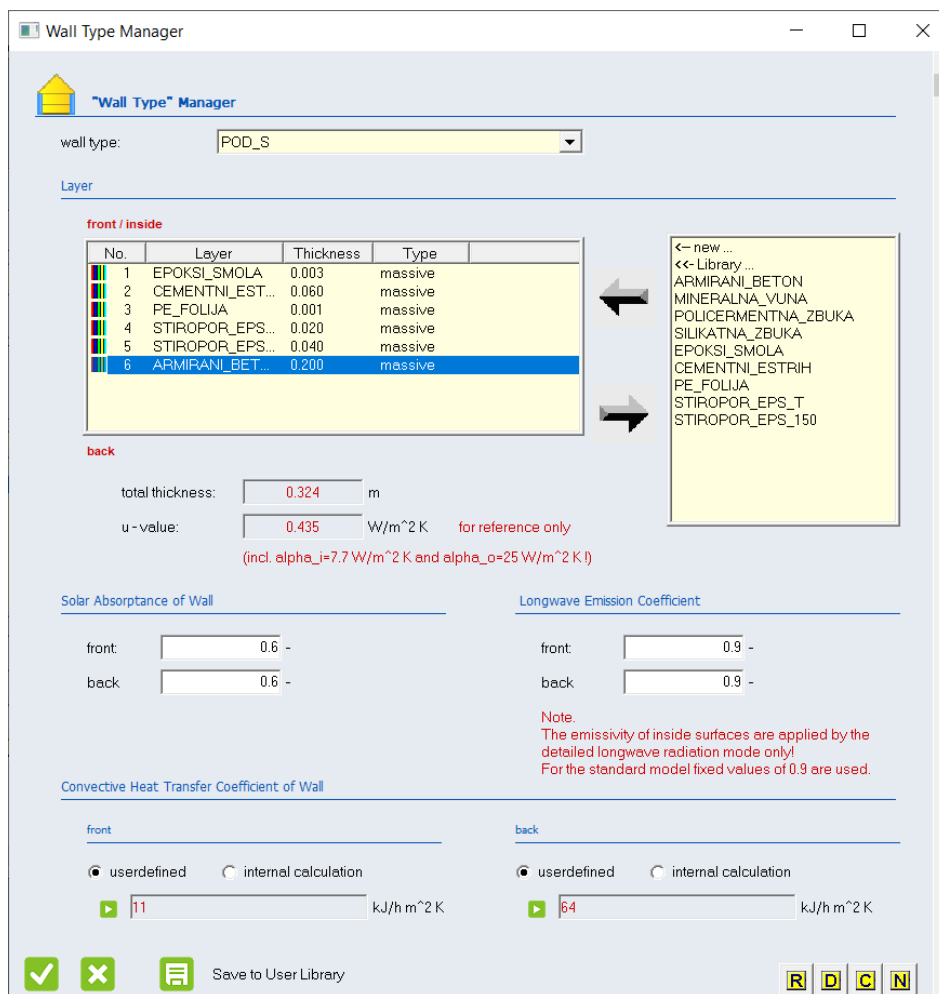


Slika 20. Definiranje sloja zida

Za konačno definiranje novog sloja postoje 4 mogućnosti odabira :

| | |
|----------------|--|
| MASSIVE LAYER | slojevi s uračunatom toplinskom masom |
| MASSLESS LAYER | vrlo tanki slojevi gdje se toplinska masa može zanemariti |
| ACTIVE LAYER | slojevi koji se koriste za podno grijanje ili hlađenje |
| CHILLED LAYER | rashlađena stropna ploča odvojena od ostatka zida zbog izolacije |

U okviru ovog rada svi slojevi definirani su kao MASSIVE LAYER.

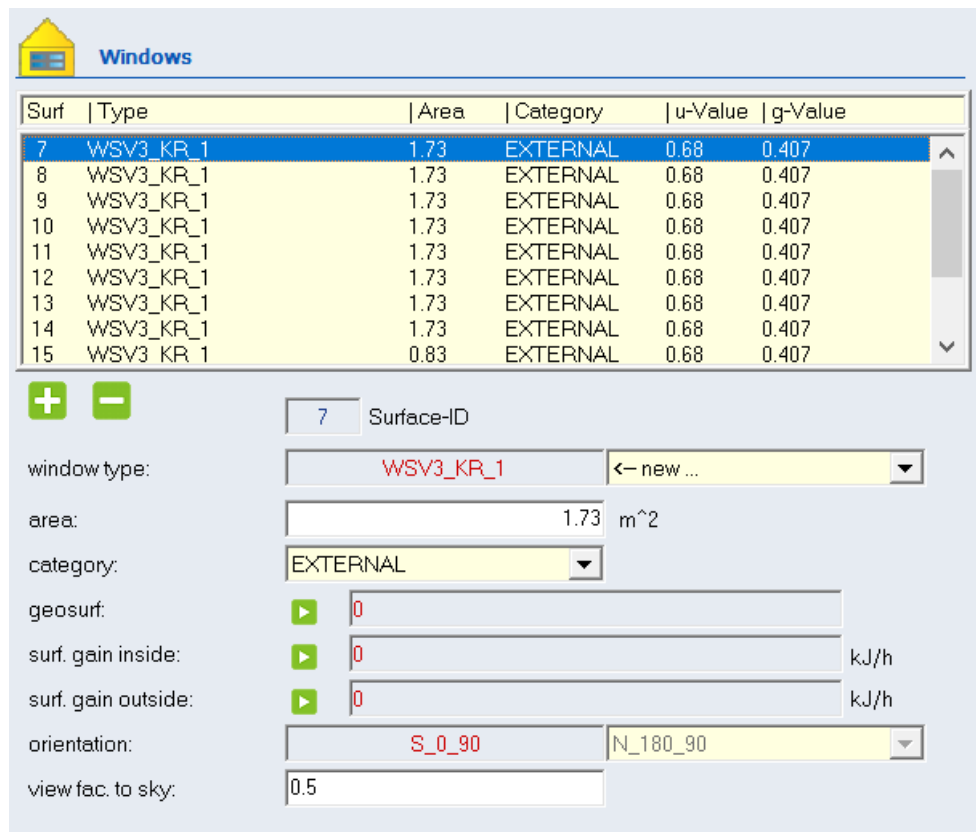


Slika 21. Kreiranje novog zida

Za izračun prijelaza topline potrebno je definirati koeficijente konvektivnog prijelaza topline. Uobičajeno je uzeti vrijednost $3,06 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ($11 \text{ kJ/h m}^2 \text{ K}$) za unutarnju površinu i $17,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ($64 \text{ kJ/h m}^2 \text{ K}$) za vanjsku površinu. Definirani su i koeficijenti apsorpcije Sunčevog zračenja čija je vrijednost za glatke površine svjetlije boje 0.6.

6.1.3 Definiranje prozora

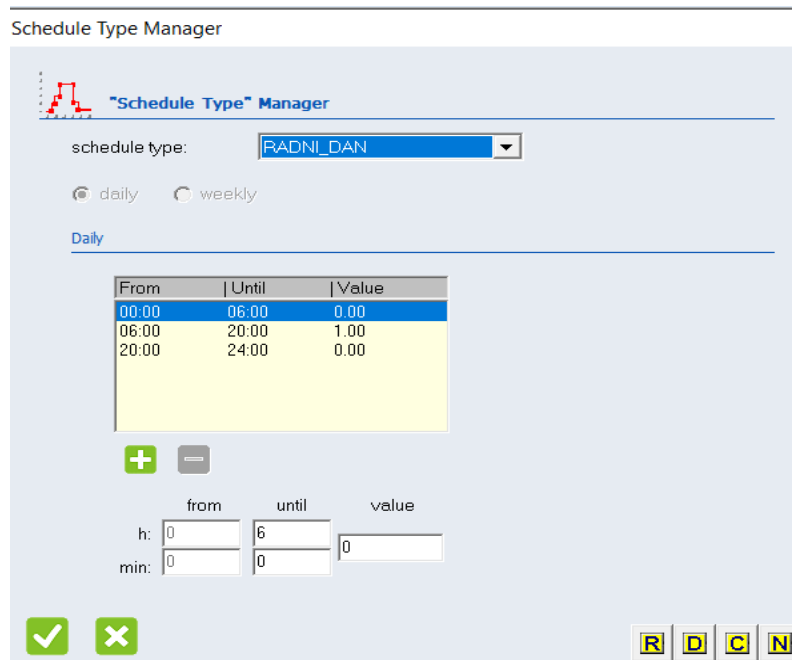
Prozor se dodaje tipkom + koja se nalazi ispod desnog okvira za pregled prozora. Odabir prozora vrši se u izborniku *window type*, a odgovarajući prozor moguće je pronaći u TRNSYS bazi podataka. Svaki prozor opisan je stupnjem propuštanja Sunčevog zračenja (g-value) i koeficijentom prolaza topline (U-value). Upisana površina prozora automatski će biti oduzeta od površine zida, a kategorija prozora skupa s orijentacijom dodjeljuje se od strane programa tako da bude istovjetna sa zidom na kojem za prozor nalazi. Prikaz definiranja prozora vidljiv je na Slici 22.



Slika 22. Odabir prozora

6.1.4 Raspored

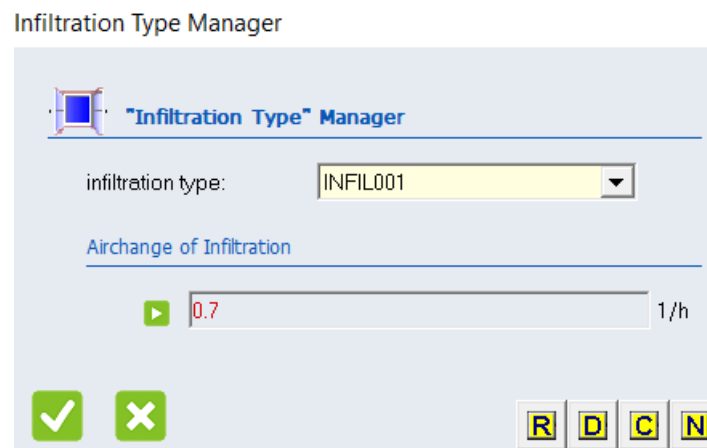
Kako sustav ne treba raditi svaki sat u godini, već samo radnim danima u periodu od 6:00 do 20:00 u *Schedule Type Manageru* se definiraju dva tipa rasporeda; za radni dan kada sustav radi po već navedenom načinu te za vikend kada je sustav isključen. Prikaz definiranja rasporeda za radni dan vidi se na Slici 23.



Slika 23. Definiranje rasporeda

6.1.5 Infiltracija

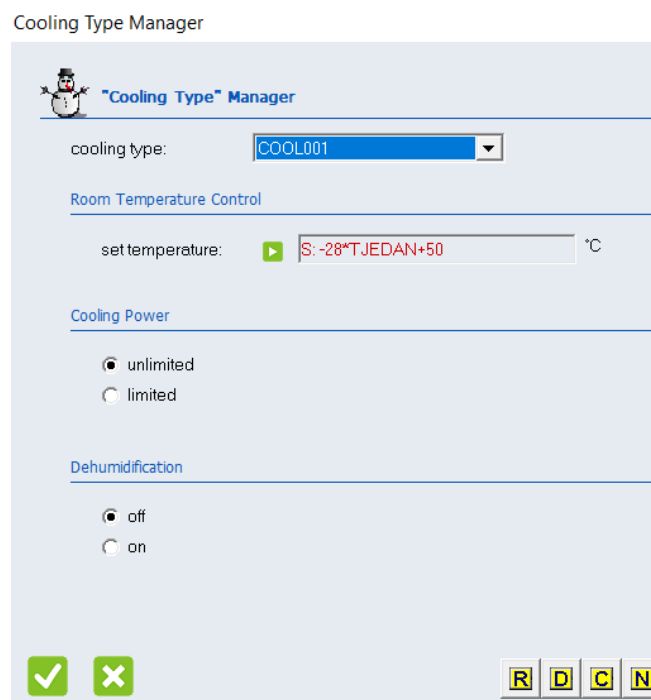
Infiltracija označava dotok vanjskog zraka u zonu kroz zazore i definirana je brojem izmjena zraka u satu. U ovom radu izabrana je konstantna vrijednost od $0,7 \text{ h}^{-1}$. Prikaz zadavanja infiltracije može se vidjeti na Slici 24.



Slika 24. Zadavanje infiltracije

6.1.6 Režim hlađenja

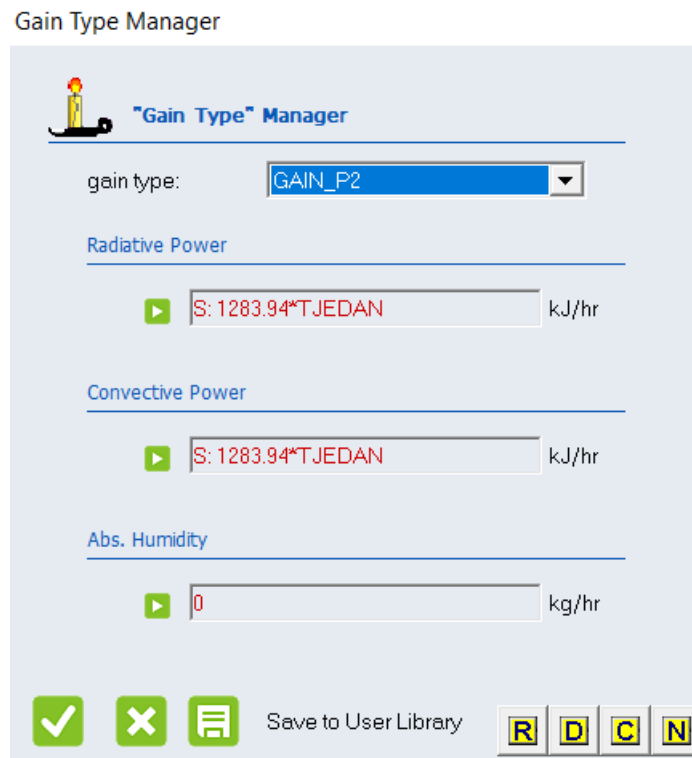
Prema istraživanjima toplinske ugodnosti preporučena gornja granica unutarnje temperature u režimu hlađenja iznosi 25°C pa je u okviru ovog rada odabrana ta vrijednost za svaku zonu kako bi se dobila najveća moguća iskoristivost pasivnog hlađenja. S obzirom da se prostor škole planira hladiti samo za vrijeme nastave, hlađenje je definirano putem rasporeda koji je objašnjen u prethodnom poglavlju. S obzirom da nije definirana oprema koja će se koristiti u školi, pretpostavlja se da je snaga uređaja za hlađenje beskonačna, tj. da su svi toplinski dobitci pokriveni unutar jednog intervala od 1h. Prikaz režima hlađenja može se vidjeti na Slici 25.



Slika 25. Režim hlađenja

6.1.7 Unutarnji dobitci

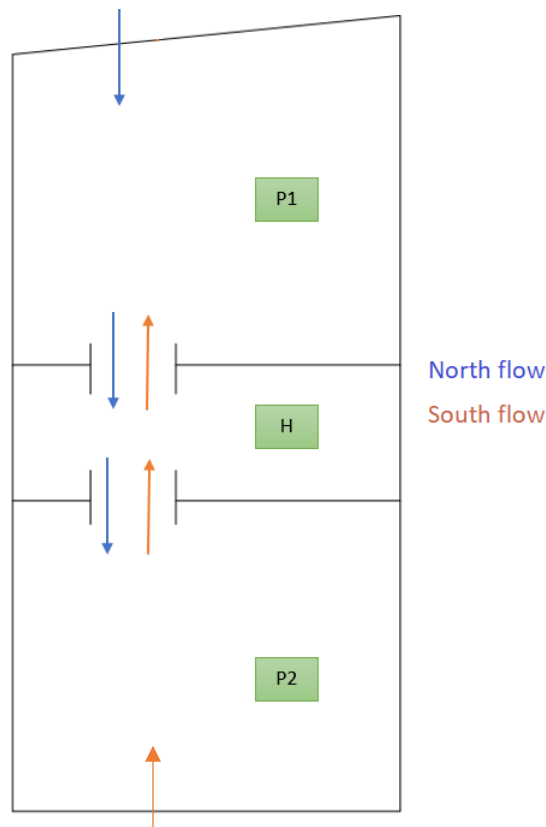
Unutarnji dobitci topline od ljudi i uređaja definiraju se pod opcijom GAINS. Da bi se pojednostavilo definiranje uobičajenih unutarnjih dobitaka poput osoba, računala i umjetne rasvjete, postoje predefinirane vrijednosti energije za navedene stavke. Korisnik može odabrati željenu stavku iz padajućeg izbornika i klikom na *scale* odrediti količinu. Za ovaj zadatak dan je parametar unutarnjih dobitka zgrade u iznosu od 10 W/m² pa su se unutarnji dobitci dobili množenjem koeficijenta s površinom prostorije. Pretpostavljeno je da se toplina od unutarnjih izvora predaje jednakim dijelom zračenjem i kao i konvekcijom. Unutarnji dobitci definirani su samo za vrijeme boravka ljudi, tj. za vrijeme nastave što je isti raspored kao i za režim hlađenja. Unos unutarnjih dobitaka prikazan je Slici 26.



Slika 26. Unos unutarnjih dobitaka

6.1.8 Dodatno definirane stavke za slučaj prirodne ventilacije

Po završetku ovih stavki završeno je definiranje prostora za prvi slučaj, tj. za simulaciju kojom se dobiva potrebna energija za hlađenje bez korištenja prirodne ventilacije. No, kako bi dobili potrebnu energiju nakon implementacije sustava prirodne ventilacije, potrebno je definirati dodatne parametre koji daju informacije o strujanju zraka unutar prostora.

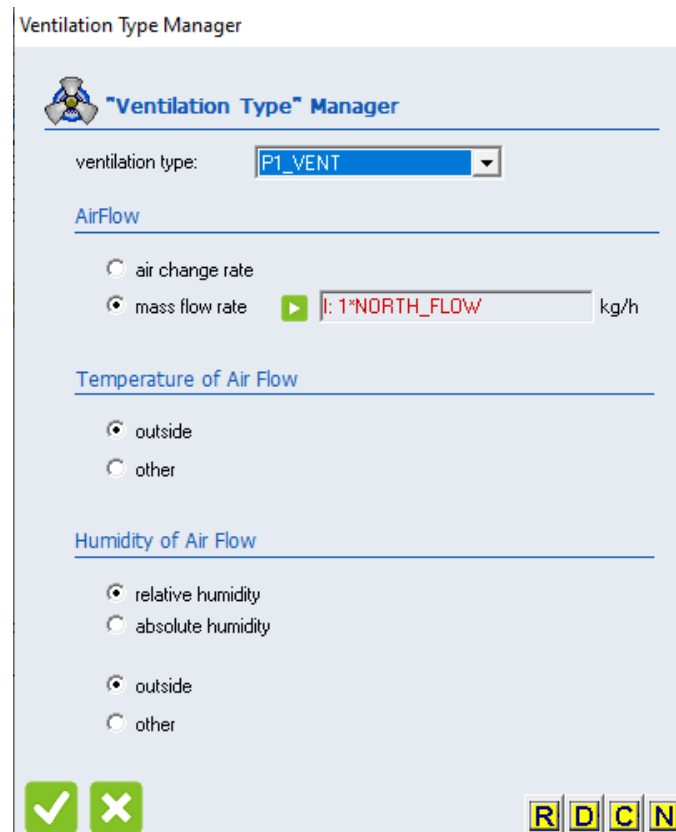


Slika 27. Shema struja zraka

Na Slici 27 prikazana su dva slučaja strujanja zraka kroz zgradu; zrak koji dolazi u prostor kroz prozore sa sjeverne strane prikazan crvenom bojom, i zrak koji dolazi s južne strane prikazan plavom bojom. Bitno je ustanoviti s koje strane dolazi vanjski zrak u zgradu jer se toplina koju zrak može primiti, smanjuje sa svakim sljedećim prijelazom zraka u novu prostoriju. Primjerice, kada vanjski zrak ulazi sa sjeverne strane, program računa iznos toplinskog toka kojeg zrak iz prostorije P2 preda vanjskom zraku kako bi se postigla željena temperatura prostora od 25 °C. U tom procesu, temperatura vanjskog zraka se povećava, te on na ulazu u novu prostoriju H ima veću temperaturu nego kada je ušao u zgradu. Tako se sa svakom sljedećom prostorijom smanjuje temperaturna razlika vanjskog i unutarnjeg zraka, čime se postiže manje učinkovit prijenos topline, tj. lošije hlađenje prostorije. Smjerovi strujanja vjetra, kao i maseni protoci, određeni su algoritmom napravljenom u MATLAB-u, opisanom kasnije.

6.1.8.1 Ventilacija

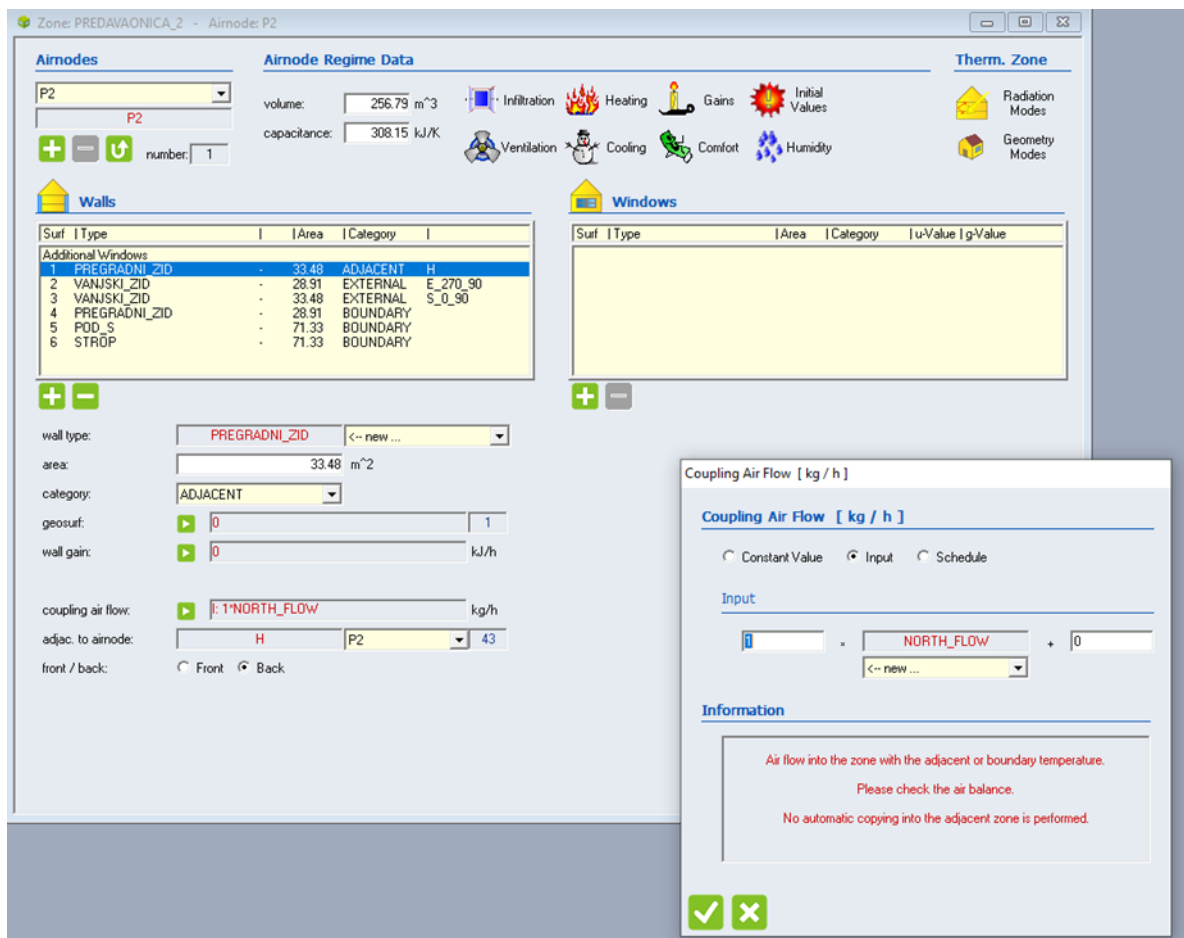
Za slučaj kada se u zgradi proučava utjecaj prirodne ventilacije, potrebno je definirati *Ventilation Type Manager*. Postavljaju se dva tipa ventilacije, jedan kada zrak dolazi s južne strane, a drugi kada dolazi sa sjeverne. Prikaz definiranja ventilacije za zrak koji dolazi sa sjeverne strane prikazan je na Slici 28. U oba slučaja zrak koji ulazi u prostoriju je temperature vanjskog zraka.



Slika 28. Definiranje ventilacije

6.1.8.2 Coupling air flow

Kako bi se znao redoslijed prostorija kojima zrak struji, potrebno je vratiti se na definiranje zidova. Zidovi koji su opisani kao ADJACENT (oni koji graniče sa dvjema zonama) imaju kategoriju *coupling air flow*. Odabire se opcija *input*, koja služi za povezivanje s vanjskom datotekom koja ima ispisan protok zraka za svaki sat u godini. Sjeverni tok zraka ulazi u hodnik kroz zid koji graniči sa zonom Predavaonica 1, a nakon toga zrak prelazi u Predavaonicu 2 kroz zid koji graniči sa zonom hodnik. Južni tok zraka ulazi u hodnik kroz zid koji graniči s Predavaonicom 2 i nakon toga odlazi u Predavaonicu 1 kroz zid koji graniči s hodnikom. Prikaz definiranja sjevernog toka zraka koji ulazi u Predavaonicu 2 prikazan je na Slici 29.



Slika 29. Definiranje protoka zraka uslijed prirodne ventilacije

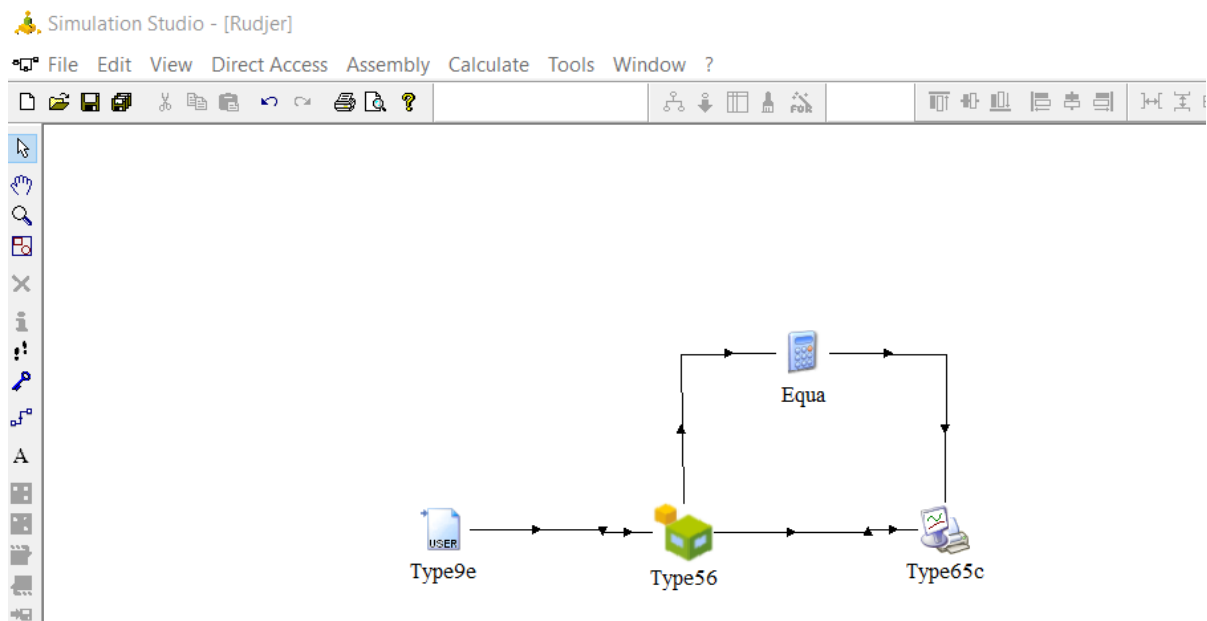
6.2 Provođenje simulacija u sučelju Simulation Studio

6.2.1 Simulacija bez pasivnog hlađenja

Kada je zgrada definirana u TRNBuildu, njena datoteka se može učitati u Simulation Studiu pomoću komponente Type 56. Ona se sastoji od 22 ulazna podatka koja se povezuju s vremenskim podacima sadržanim u komponenti Type9e koji su prikazani u Tablici 6. Type 56 za kraj se povezuje s komponentom Type65c koja služi za ispis podataka, tj. temperatura i potrebna energija za hlađenje definiranih zona. Simulacija se provodi unutar 8760 sati, tj. unutar jedne godine za meteorološke podatke u Zagrebu tipične meteorološke godine i 2019. godine. Model simulacije kojim se dobiva energija za hlađenje prije primjene pasivnog hlađenja prikazan je na Slici 30.

Tablica 6. Ulazni podatci za TRNBuild

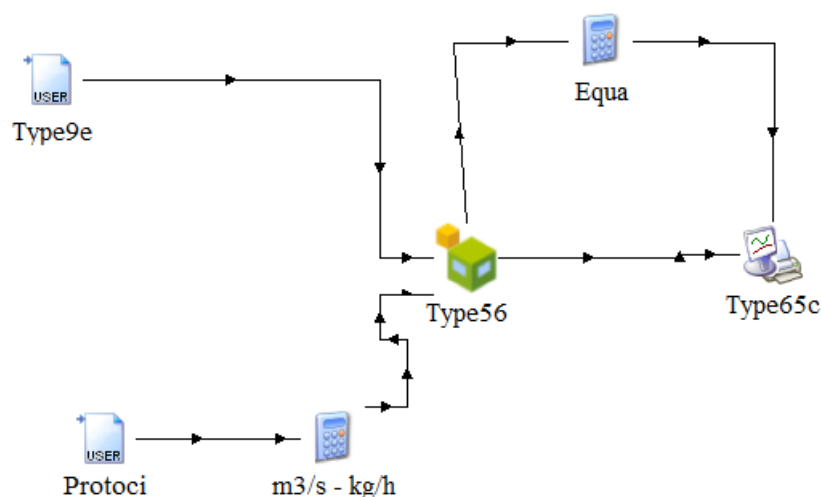
| | | |
|----|--------|--|
| 1 | TAMB | Temperatura vanjskog zraka |
| 2 | RELHUM | Relativna vlažnost vanjskog zraka |
| 3 | TSKY | Temperatura neba |
| 4 | TSGRD | Temperatura zemlje |
| 5 | AZEN | Zenit Sunca |
| 6 | AAZM | Azimut Sunca |
| 7 | IT_N | Ukupno Sunčevo zračenje na sjevernu plohu |
| 8 | IT_E | Ukupno Sunčevo zračenje na istočnu plohu |
| 9 | IT_S | Ukupno Sunčevo zračenje na južnu plohu |
| 10 | IT_W | Ukupno Sunčevo zračenje na zapadnu plohu |
| 11 | IT_H_0 | Ukupno Sunčevo zračenje na horizontalne površine |
| 12 | IB_N | Direktno Sunčevo zračenje na sjevernu plohu |
| 13 | IB_E | Direktno Sunčevo zračenje na istočnu plohu |
| 14 | IB_S | Direktno Sunčevo zračenje na južnu plohu |
| 15 | IB_W | Direktno Sunčevo zračenje na zapadnu plohu |
| 16 | IB_H | Direktno Sunčevo zračenje na horizontalne površine |
| 17 | AI_N | Upadni kut Sunca na sjeverne površine |
| 18 | AI_E | Upadni kut Sunca na istočne površine |
| 19 | AI_S | Upadni kut Sunca na južne površine |
| 20 | AI_W | Upadni kut Sunca na zapadne površine |
| 21 | AI_H | Upadni kut Sunca na horizontalne površine |
| 22 | GRDREF | Faktor refleksije tla |



Slika 30. Simulacija za slučaj bez prirodne ventilacije

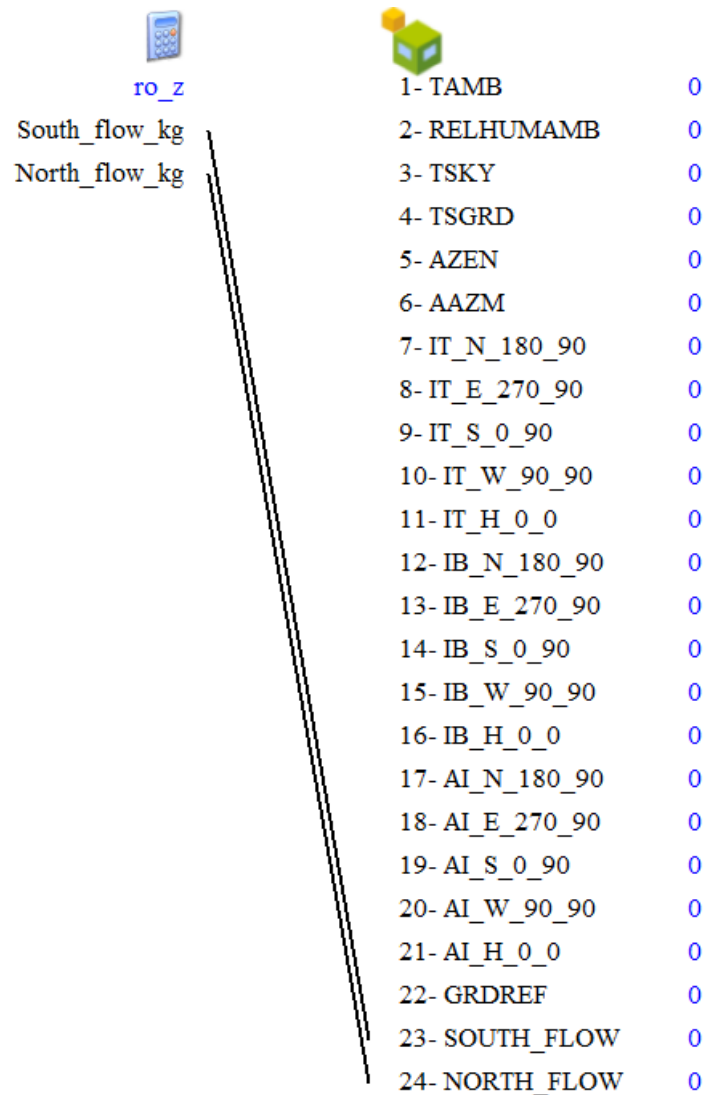
6.2.2 Simulacija pasivnog hlađenja

Za simulaciju pasivnog hlađenja dodaje se dodatna komponenta Type 9e u koju je učitana datoteka s protocima zraka za svaki sat u godini. Datoteka je dobivena proračunom u MATLAB-u opisanom u Poglavlju 6.3. S obzirom da su rezultati u MATLAB-u računati u jedinici m/s, dodana je i komponenta koja preračunava protok u kg/h s obzirom da je ta jedinica definirana u TRNBuildu.



Slika 31. Simulacija za slučaj s prirodnom ventilacijom

Vanjsku datoteku u kojoj su upisani protoci zraka i njihov smjer, potrebno je povezati s korisničkim sučeljem TRNBuild. Na Slici 32 prikazano je povezivanje vanjske datoteke s odgovarajućim ulaznim podacima unutar TRNBuild-a.

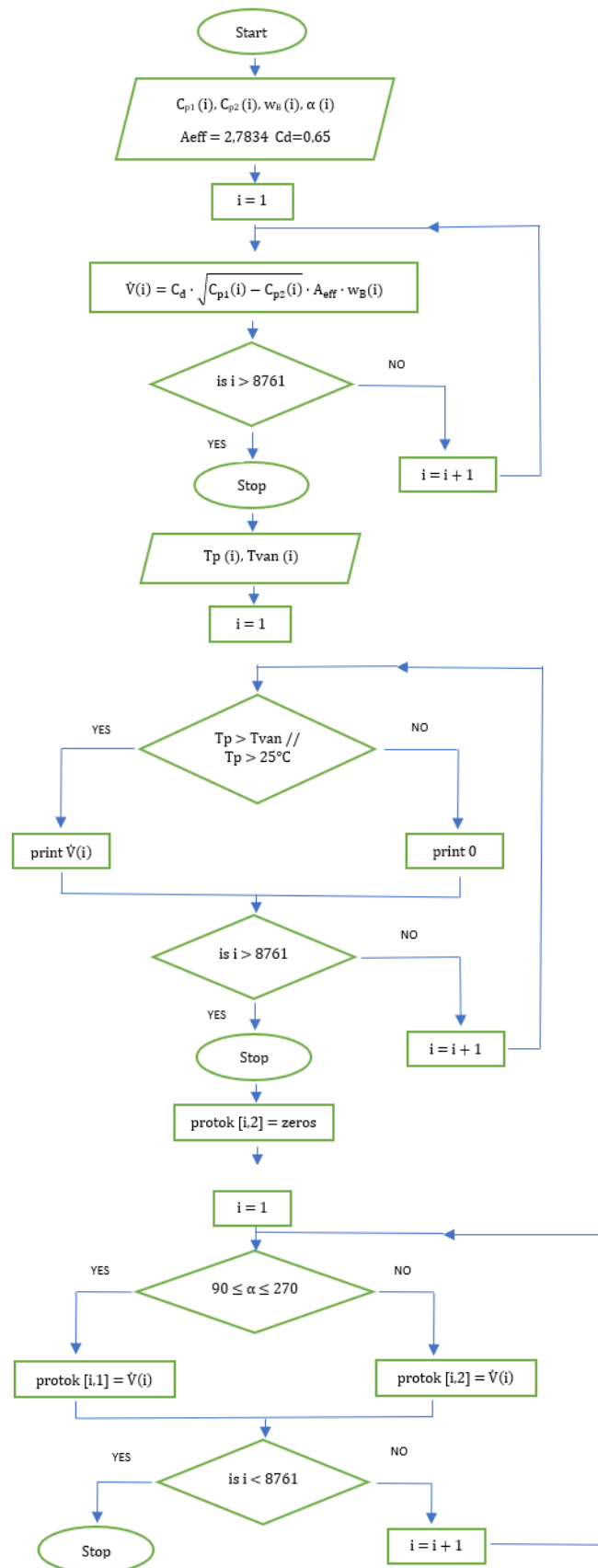


Slika 32. Povezivanje komponenti za pasivno hlađenje

6.3 Izračun protoka zraka uslijed prirodne ventilacije u programskom jeziku MATLAB

Pomoću izraza opisanih u Poglavlju 4. razvijen je algoritam pomoću kojeg su ispisani protoci zraka za svaki dan u godini. Ovisno o kutu nstrujavanja, protoci su podijeljeni u dva stupca; sjeverni i južni protok. Algoritam je razvijen na način da ručana protok zraka ukoliko je temperatura vanjskog okoliša manja od temperature unutar prostora, a ujedno i manja od 25°C što je gornja granica toplinske ugodnosti. U suprotnom je pretpostavljeno da nema protoka zraka.

Kako je u podacima Državnog hidrometeorološkog zavoda dan i smjer strujanja vjetra, protoci su podijeljeni u dva stupca. U prvom stupcu su postavljeni protoci zraka koji su ušli kroz predavaonicu 1, sa sjeverne strane, dok su u drugom stupcu protoci zraka koji su ušli u predavaonicu 2, s južne strane. Kao što je opisano u poglavlju 6.1.8, bitno je poznavati smjer ulaza zraka jer sa svakom sljedećom prostorijom u koju zrak uđe, smanjuje temperaturna razlika vanjskog i unutarnjeg zraka. Time se postiže manje učinkovit prijenos topline, odnosno lošije hlađenje prostorije. Prikaz pseudokoda izrađenog algoritma vidljiv je na Slici 33.



Slika 33. Pseudokod za izračun protoka

7 MATEMATIČKI OPIS RAČUNALNOG MODELA ZGRADE

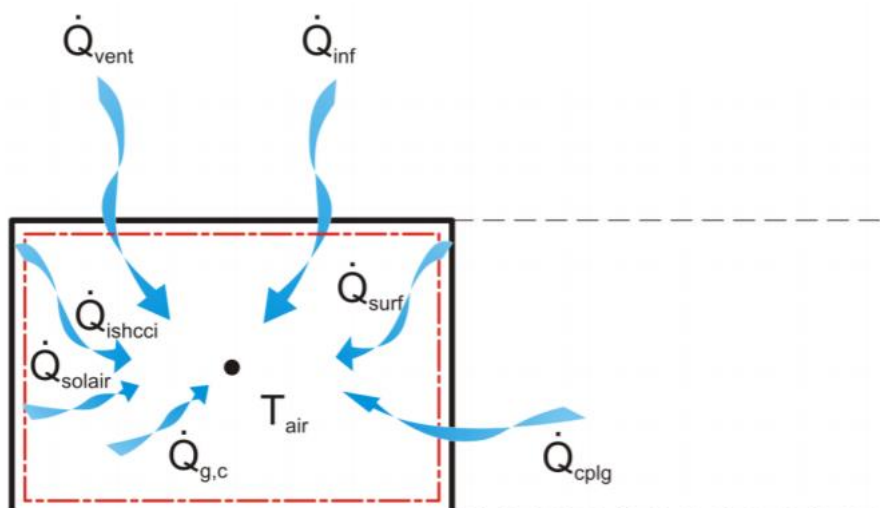
Računalni model zgrade izrađen je pomoću komponente Type56 u TRNSYS-u. Type56 temelji se na energijskoj bilanci sustava i omogućava dinamičku simulaciju višezonske zgrade. U daljnjim podpoglavljima ukratko će se opisati matematička načela programa pomoću kojih su izračunate toplinske bilance u promatranom prostoru, te su dobivene potrebne energije za hlađenje prostora.

7.1 Definiranje toplinske zone

Svaka toplinska zona definirana je kao jedan *air node* (volumen zraka). On zapravo predstavlja toplinski kapacitet zraka unutar zone. U ovom radu je svaka prostorija definirana kao zasebna zona, no kod simulacija zgrada s velikim brojem prostorija, radi jednostavnijeg unošenja podataka, koristi se zoniranje; tj. grupiranje više prostorija sličnih toplinskih opterećenja kao jedne zone. U tom slučaju bi *air node* obuhvaćao toplinski kapacitet zraka unutar svih prostorija definirane zone. U pravilu jedna zona ima jedan *air node*, no iznimke su jako visoki prostori kod kojih je značajna temperaturna razlika zraka između poda i stropa. Kako su promatrane učionice standardne visine, svaka prostorija ima samo jedan *air node*.

7.2 Konvektivni toplinski tok

Konvektivni toplinski tok definiran je pomoću svih toplinskih dobitaka u prostoriji. Toplinski tokovi shematski prikazani su Slici 34 te su zbrojeni u jednadžbi (22).



Slika 34. Toplinska ravnoteža toplinske zone [14]

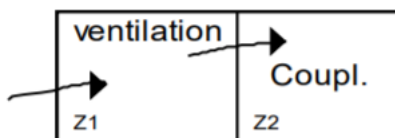
$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{solar,i} + \dot{Q}_{ISHCCI,i} \quad [W] \quad (22)$$

pri čemu su :

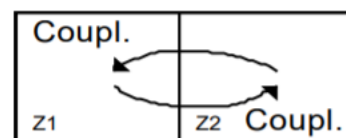
| | |
|----------------------|--|
| $\dot{Q}_{surf,i}$ | konvektivno toplinsko opterećenje od unutrašnjih površina [W] |
| $\dot{Q}_{vent,i}$ | ventilacijsko toplinsko opterećenje [W] |
| $\dot{Q}_{inf,i}$ | infiltracijsko toplinsko opterećenje [W] |
| $\dot{Q}_{g,c,i}$ | unutarnji konvektivni dobitci (ljudi, oprema) [W] |
| $\dot{Q}_{cplg,i}$ | konvektivno toplinsko opterećenje od susjednih prostora [W] |
| $\dot{Q}_{solar,i}$ | dio sunčevog zračenja koje ulazi kroz prozor i biva odmah pretvoreno u konvektivno opterećenje zraka [W] |
| $\dot{Q}_{ISHCCI,i}$ | dio sunčevog zračenja koje su apsorbirale plohe u prostoriji i nakon toga predale zraku konvektivnim putem [W] |

7.3 Sparivanje

Coupling (sparivanje) je stavka koja omogućuje definiranje protoka, a samim time i toplinskog toka zraka kojeg jedna toplinska zona primi od druge. Definira se na način da primjerice zona Z1 preda definirani protok zraka zoni Z2 kao što je prikazano na slikama 35 i 36. No korisnik onda sam treba definirati prima li zona Z1 jednak protok zraka od zone Z2 u čijem slučaju se modelira kružna ventilacija, prikazana na Slici 36. Drugi slučaj je da zrak u zoni Z1 bude nadomješten vanjskim zrakom čime se modelira poprečna ventilacija prikazana na Slici 35. Taj odabir se vrši u postavkama *adjacent airnode* (susjednog volumena zraka) i korisniku se omogućuje odabir modeliranja poprečne ventilacije ili kružne ventilacije.



Slika 35. Poprečna ventilacija [14]



Slika 36. Kružna ventilacija [14]

7.4 Toplinski tok izmijenjen zračenjem

Zidovi i prozori unutar zone zračenjem izmjenjuju toplinske tokove uslijed različitih izvora. Oni se objedinjuju u jedan toplinski tok zračenja koji j prikazan jednadžbom :

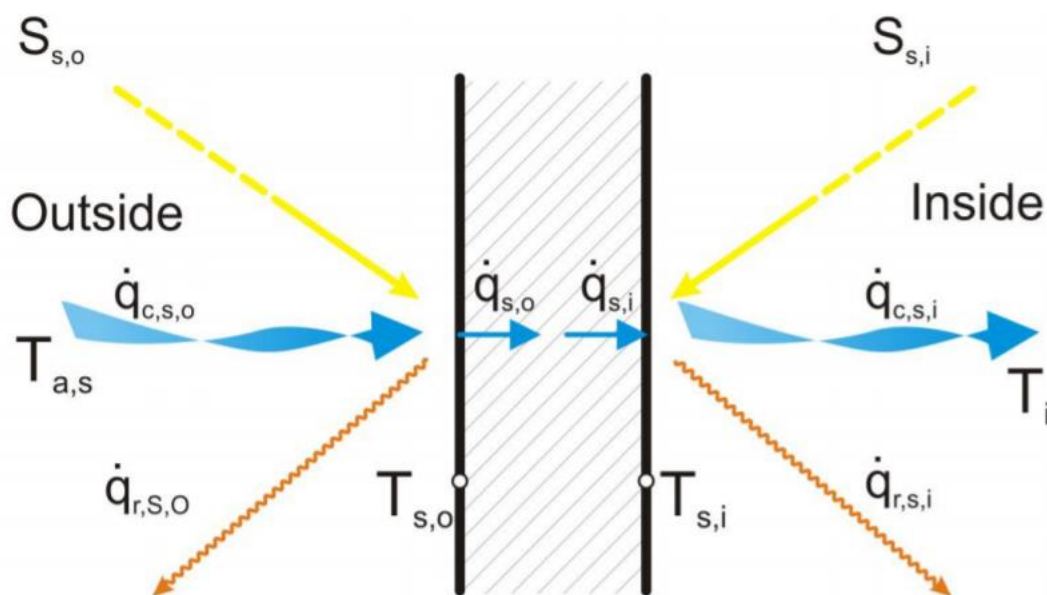
$$\dot{Q}_{r,wi} = \dot{Q}_{g,r,i,wi} + \dot{Q}_{sol,wi} + \dot{Q}_{long,wi} + \dot{Q}_{wall-gain} \quad (23)$$

Pri čemu je :

- $\dot{Q}_{g,r,i,wi}$ toplinski tok zračenjem od unutarnjih izvora prema površini zida [W]
 $\dot{Q}_{sol,wi}$ solarno opterećenje zida dobiveno kroz prozor [W]
 $\dot{Q}_{long,wi}$ izmjena dugovalnog zračenja između promatranog zida i ostalih zidova te prozora u prostoriji [W]
 $\dot{Q}_{wall-gain}$ toplinski tok kroz zid definiran od strane korisnika [W]

7.5 Model izmjene topline prozora i zidova

Kako bi se u modelu uračunala toplina akumulirana prvenstveno u zidovima, potrebno je poznavati toplinski tok koji im je predan, ali i toplinski tok kojeg su i oni sami predali zoni i okolini. Toplinski tokovi i temperature karakteristične za svaki zid i prozor prikazane su na Slici 37.



Slika 37. Toplinski tokovi i temperature na površini zida [14]

Objašnjenje prikazanih veličina na modelu je sljedeće :

- $S_{s,o}$ toplinski tok zračenjem apsorbiran na vanjskoj površini zida (solarni dobitci) [W/m²]
 $S_{s,i}$ toplinski tok zračenjem apsorbiran na unutarnjoj površini zida (solarni dobitci i dobitci zračenja) [W/m²]

| | |
|-------------------|---|
| $\dot{q}_{c,s,o}$ | konvektivni toplinski tok od okoliša prema vanjskoj površini zida [W/m ²] |
| $\dot{q}_{c,s,i}$ | konvektivni toplinski tok od unutarnje površine zida prema zoni [W/m ²] |
| $\dot{q}_{s,o}$ | toplinski tok od vanjske površine zida uslijed provođenja [W/m ²] |
| $\dot{q}_{s,i}$ | toplinski tok od unutrašnje površine zida uslijed provođenja [W/m ²] |
| $\dot{q}_{r,s,o}$ | toplinski tok reflektiranog zračenja s vanjske površine zida [W/m ²] |
| $\dot{q}_{r,s,i}$ | toplinski tok reflektiranog zračenja sa svih površina prema zoni [W/m ²] |
| $T_{a,s}$ | temperatura vanjskog zraka [°C] |
| T_i | temperatura unutarnjeg zraka [°C] |
| $T_{s,o}$ | temperatura zida na vanjskoj površini [°C] |
| $T_{s,i}$ | temperatura zida na unutarnjoj površini [°C] |

Zidovi su modelirani prema prijenosnim funkcijama Mitalasa i Arseneaulta. Za bilo koji zid, provodljivost topline za vanjsku i za unutarnju stranu prikazana je sljedećim jednadžbama:

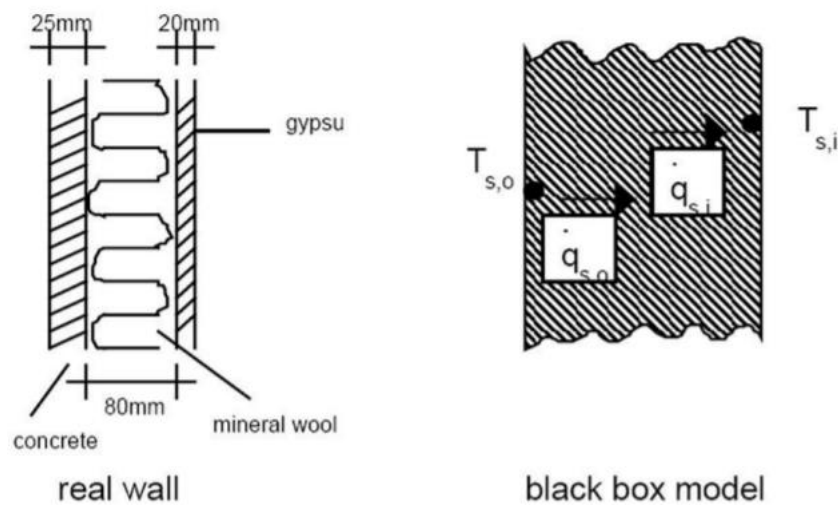
$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{cs}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{ds}} d_s^k q_{s,i}^k \quad (24)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{as}} a_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{ds}} d_s^k q_{s,o}^k \quad (25)$$

Jednadžbe se postavljaju u vremenskom periodu jednakog razmaka. Faktor k odnosi se na pojam u vremenskom nizu; trenutno vrijeme je k=0, a prethodno vrijeme je k=1. Vremenska baza na kojoj se temelje izračuni, tj. broj koraka u prošlosti određena je od strane korisnika unutar opisa u TRNBUILD-u, a ovisi o masivnosti promatranog zida. Koeficijenti a, b, c i d određeni su unutar sučelja TRNBuild pomoću z-prijenosne funkcije, a ovise o sastavu zidova. [14] Jednadžbe (24) i (25) ne daju jednake rezultate obzirom da je u obzir uzeta i akumulacija topline unutar zidova.

Metoda prijenosne bazirana je na 'toplinskoj povijesti' zida, pri čemu se zid se smatra crnom kutijom. Na Slici 38 prikazan je usporedba stvarnog zida te zida modeliranog kao crna kutija. Ukoliko je zid težak s velikom toplinskom masom, potreban broj vremenskih koraka je k < 20. Ako je vremenska baza razmatranog zida veća od vremenske konstante, zaustavlja se izračun

koeficijenta preko matrice. Stoga se takav "tanki" zid može zamijeniti definicijom otpora zanemarujući toplinsku masu.

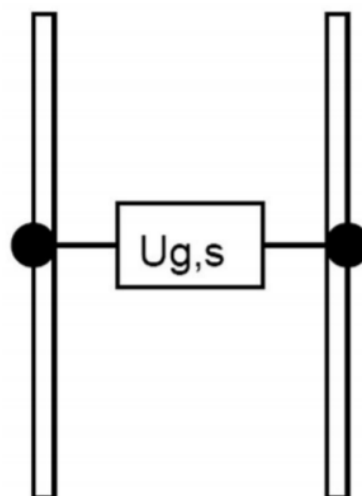


Slika 38. Stvarni zid i model crne kutije [14]

Prozori se smatraju vanjskim zidom bez toplinske mase, što znači da ne akumuliraju toplinsku energiju, djelomično su transparentni na solarno, ali netransparentni na dugovalne unutarnje dobitke. Smatra se da se dugovalna apsorpcija javlja samo na površini. Prema definiciji prozora (da su bez toplinske mase) vrijedi :

$$a_s^0 = b_s^0 = c_s^0 = d_s^0 = U_{g,s} \quad (26)$$

$$a_s^k = b_s^k = c_s^k = d_s^k = 0 \text{ za } k > 0 \quad (27)$$



Slika 39. Model prozora korištenog u jednadžbi energijske bilance [14]

7.6 Dugovalno zračenje pomoću star network modela

Dugovalno zračenje opisano je *star network* metodom. Metoda je ograničena time da zona može imati samo jedan *air node*, tj. volumen zraka. Koristi se fiktivni volumen zraka temperature T_{star} za razmatranje paralelnog dugovalnog zračenja između ploha u prostoru i konvektivnog toplinskog toka na zrak pomoću kojeg se dobiva i otpor prijelaza topline :

$$R_{STAR,i} = f(\alpha_i, A_{surf,i}) = \frac{1}{Q_{surf,i}} (T_{star} - T_i) \quad (28)$$

pri čemu su :

$R_{STAR,i}$ zamišljeni otpor prijelaza topline star network modela [K/W]

T_{star} zamišljena temperatura star network modela [K]

T_i temperatura prostora [K]

Za dobivanje apsorpcijskih faktora između površina uspoređuju se omjeri površina unutar zone. Metoda se koristi za izraz kombiniranog toplinskog toka konvekcije i zračenja unutarnjih površina zone :

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \dot{q}_{c,s,i} + \dot{q}_{r,s,i} \quad (29)$$

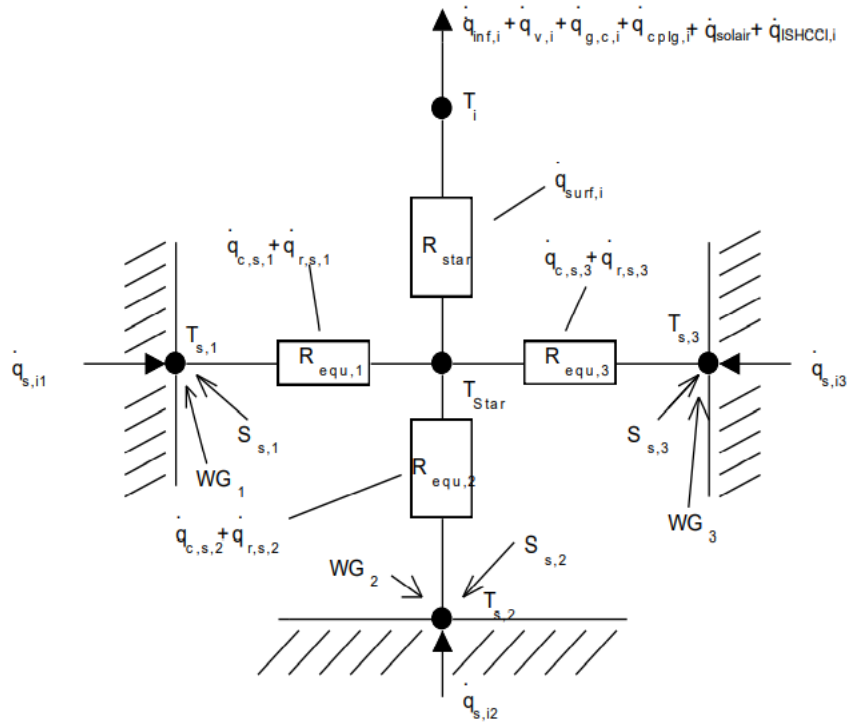
$$\dot{q}_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equiv,i} A_{s,i}} (T_{s,i} - T_{star}) \quad (30)$$

Pri čemu je :

$\dot{q}_{comb,s,i}$ kombinirani toplinski tok zračenja i konvekcije [W/m²]

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

$A_{s,i}$ promatrana površina unutar zone [m²]



Slika 40. Star network model zone s tri površine [14]

Za opis dugovalnog zračenja na vanjskim površinama koristi se temperatura neba T_{sky} koja se unosi kao ulazni podatak u Type56, vidni faktor prema nebu $f_{s,sky}$, fiktivna temperatura zemlje i vidni faktor svake vanjske površine $(1 - f_{s,sky})$. Ukupni toplinski tok s vanjske površine prikazan je jednadžbom :

$$\dot{q}_{comb,s,o} = \dot{q}_{c,s,o} - \dot{q}_{r,s,o} \quad (31)$$

pri čemu su :

$\dot{q}_{comb,s,o}$ kombinirani toplinski tok zračenja i konvekcije na vanjskoj površini [W/m^2]

$\dot{q}_{c,s,o}$ konvektivni toplinski tok na vanjskoj površini [W/m^2]

$\dot{q}_{r,s,o}$ toplinski tok zračenja na vanjskoj površini [W/m^2]

Konvektivni toplinski tok opisan je jednadžbom :

$$\dot{q}_{c,s,o} = h_{conv,s,o}(T_{a,s} - T_{s,o}) \quad (32)$$

pri čemu su :

$h_{conv,s,o}$ koeficijent konvektivnog prijelaza topline [W/m^2K]

$T_{a,s}$ temperatura vanjskog zraka [K]

Jednadžba koja opisuje toplinski tok zračenja je :

$$\dot{q}_{r,s,o} = \sigma \varepsilon_{s,o} (T_{s,o}^4 - T_{fsky}^4) \quad (33)$$

pri čemu su :

σ Stephan-Boltzmannova konstanta [$\text{W/m}^2\text{K}^4$]

$\varepsilon_{s,o}$ emisijski faktor vanjske površine [-]

T_{fsky} zamišljena temperatura neba [K]

$$T_{fsky} = (1 - f_{s,sky}) \cdot T_{sgrad} - f_{s,sky} \cdot T_{sky} \quad (34)$$

$f_{s,sky}$ faktor koji govori koliki dio neba je vidljiv od strane promatrane površine (za vodoravan zid uzima se 0.5, a za strop 1) [-]

T_{sgrad} fiktivna temperatura zemlje koja se koristi za izmjenu dugovalnog zračenja [K]

T_{sky} temperatura neba [K]

7.7 Raspodjela Sunčevog zračenja

Dio Sunčevog zračenja koje ulazi kroz prozor u zonu i odmah je pretvoren u konvektivni dobitak zraka u zoni prikazan sljedećom jednadžbom:

$$Q_{solar,i} = f_{solar,i} \cdot (I_{trans,dif,i} + I_{trans,dif,i}) \quad (35)$$

pri čemu su :

$f_{solar,i}$ udio Sunčevog zračenja koje je odmah pretvoreno u konvektivni toplinski dobitak zone [-]

$I_{trans,dif,i}$ difuzno Sunčevo zračenje koje se prenosi kroz sve vanjske prozore [W]

$I_{trans,dif,i}$ direktno Sunčevo zračenje koje se prenosi kroz sve vanjske prozore [W]

Preostalo Sunčevo zračenje raspoređuje se prema koeficijentima raspodjele 'GEOSURF' definiranim u opisu zgrade. Te su vrijednosti faktori raspodjele koji se odnose na ukupno Sunčevo zračenje koje ulazi u zonu i nisu povezani s površinom. Zbroj GEOSURF vrijednosti u svim trenucima treba iznositi 1. Ako su vrijednosti GEOSURF-a za sve površine zone postavljene na nulu, svo izravno solarno zračenje koje ulazi u zonu tretira se kao difuzno zračenje. [7]

7.8 Infiltracija i ventilacija

Infiltracija i ventilacija razmatraju se kroz broj izmjena na sat za svaki zračni čvor. Maseni protok je umnožak volumena zone, gustoće zraka i broja izmjena zraka. Infiltracija je

propuštanje vanjskog zraka zbog nesavršene konstrukcije ili poroznosti građevinskog materijala dok je ventilacija prisilna dobava zraka varijabilne temperature. Pretpostavlja se da jednaka količina zraka koja uđe u zonu, i izlazi iz zone :

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{m}_{inf,i} C_p (T_a - T_i) \quad (36)$$

$$\dot{Q}_{v,i} = \dot{m}_{v,k,i} C_p (T_{v,k} - T_i) \quad (37)$$

pri čemu su:

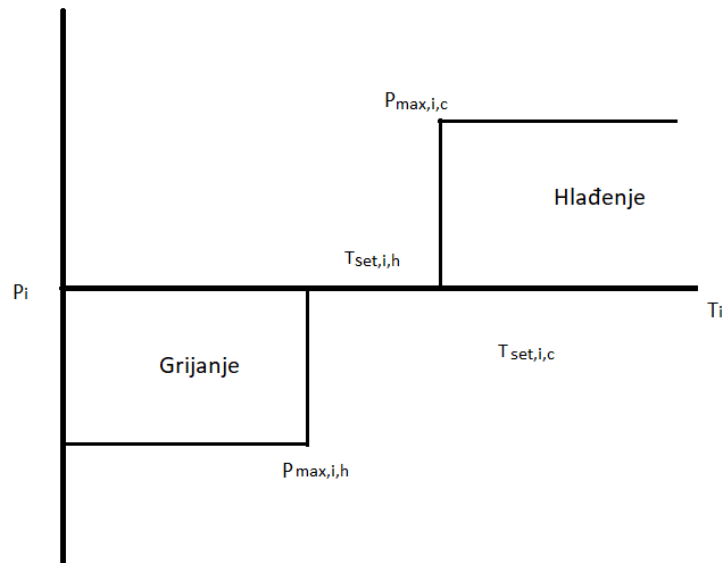
| | |
|-------------------|---|
| $\dot{m}_{inf,i}$ | maseni protok zraka koji ulazi u zonu uslijed infiltracije [kg/s] |
| $\dot{m}_{v,k,i}$ | maseni protok zraka koji ulazi u zonu uslijed ventilacije [kg/s] |
| C_p | specifični toplinski kapacitet zraka [J/kgK] |
| T_a | temperatura vanjskog zraka [K] |
| T_i | temperatura unutarnjeg zraka [K] |
| $T_{v,k}$ | temperatura zraka koji ulazi u prostor putem ventilacije [K] |

7.9 Grijanje i hlađenje

Energija potrebna za grijanje ili hlađenje izravno je povezana s temperaturom zraka u zoni, a opisuje se pomoću Slike 41. Temperatura zraka u zoni konstantno se mijenja, te slobodno pluta po x osi unutar definiranog područja toplinske ugodnosti gdje je snaga nula. U zoni su postavljene temperature zraka nakon kojih se pali sustav grijanja ($T_{set,h}$), tj. ispod kojih se pali sustav hlađenja ($T_{set,c}$), a raspon temperatura između njih je područje toplinske ugodnosti.

Ukoliko je na kraju vremenskog koraka temperatura zraka izvan područja toplinske ugodnosti; $T < T_{set,h}$ primjenjuje se maksimalna snaga sustava za grijanje, tj. ako je $T > T_{set,c}$ primjenjuje se maksimalna snaga sustava za hlađenje dok temperatura zraka unutar zone ne dosegne T_{set} . Ako je potrebna snaga unutar vremenskog koraka veća od navedene maksimalne, tada se maksimalna snaga sustava primjenjuje i u idućem vremenskom koraku, tj. dok se ne dosegne T_{set} , a temperatura zone nakon toga ponovno slobodno pluta u području temperaturne ugodnosti. Objašnjenje parametra korištenih u prikazu za postavljanje temperature prostora su sljedeće:

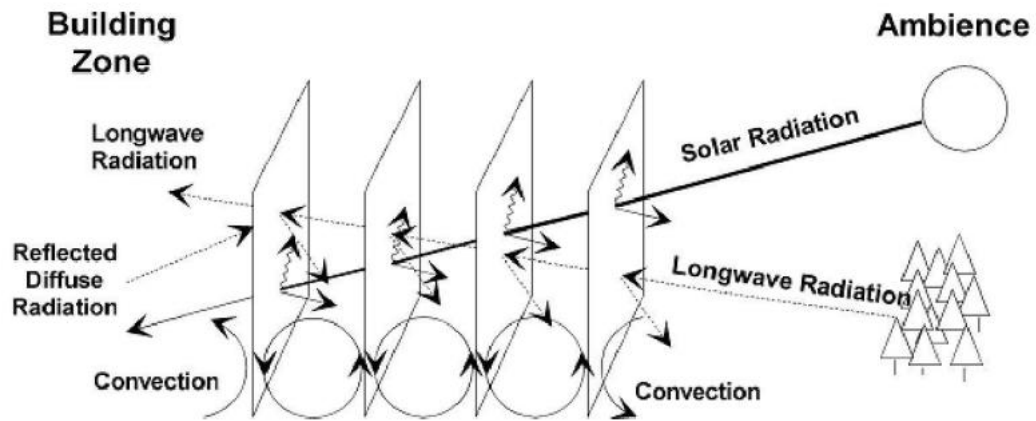
| | |
|-------------|--|
| P_i | Snaga potrebna za grijanje ili hlađenje zone |
| $P_{max,i}$ | Maksimalna snaga grijanja ili hlađenja |
| $T_{set,i}$ | Postavljena temperatura za grijanje ili hlađenje |



Slika 41. Postavljanje temperature

7.10 Model prozora

Detaljan model prozora preuzet je iz programa WINDOW 4.1 Lawrence Berkeleya i inkorporiran je u Type56. Model omogućuje detaljno računanje transmisije, refleksije i apsorpcije zračenja za prozor do 6 okna. Svako okno definirano je svojom temperaturom. Unutarnje okno povezano je sa zonom pomoću star network modela dok je vanjsko okno izmjenjuje konvektivni toplinski tok s vanjskim zrakom i dugovalnom izmjenom zračenja s fiktivnom temperaturom nema T_{fsky} . Toplinski kapacitet okvira, prozorskih okana i plinskih ispuna između okana je zanemaren. Svako ostakljenje apsorbira i reflektira dio dolaznog sunčevog zračenja, ovisno o materijalu ostakljenja i upadnom kutu. U programu WINDOW 4.1, detaljni proračun refleksije između pojedinih stakala i apsorpcije te transmisije svakog okna izvodi se hemisferno za difuzno zračenje u koracima od 10° upadnog kuta za izravno Sunčevo zračenje. Zajedno s toplinskim svojstvima plinskih ispuna, vodljivošću i emisijskim faktorom stakla, program WINDOW 4.1 zapisuje optičke podatke za prozor u ASCII datoteku prilikom izvođenja simulacija. [14] Shematski prikaz izmjene topline prozora sa zonom i vanjskim okolišem prikazan je na Slici 42.



Slika 42. Izmjena topline u prozoru [14]

8 REZULTATI ANALIZE POTENCIJALA PASIVNOG HLAĐENJA

8.1 Potrebna energija hlađenja bez i s korištenjem prirodne ventilacije

Rezultati provedene simulacije u računalnom programu TRNSYS su potrebna energija za hlađenje 2019. godine i tipične meteorološke godine prije, te nakon primjene prirodne ventilacije. Potrebna energija simulirana je za prostor dviju učionica Tehničke škole Ruđer Bošković te hodnika između njih. U Tablici 7. prikazani su rezultati po mjesecima u jedinici kWh. Potrebna energija za hlađenje za tipičnu meteorološku godinu iznosi 2451 kWh, a nakon primjene prirodne ventilacije ona iznosi 137 kWh. Iste vrijednosti za 2019. godinu redom iznose 3072 kWh i 555 kWh. Valja napomenuti, kako bi prikaz podataka u tablici bio pregledniji, oznaka PV stoji za prirodnu ventilaciju.

Tablica 7. Potrebna energija za hlađenje u kWh

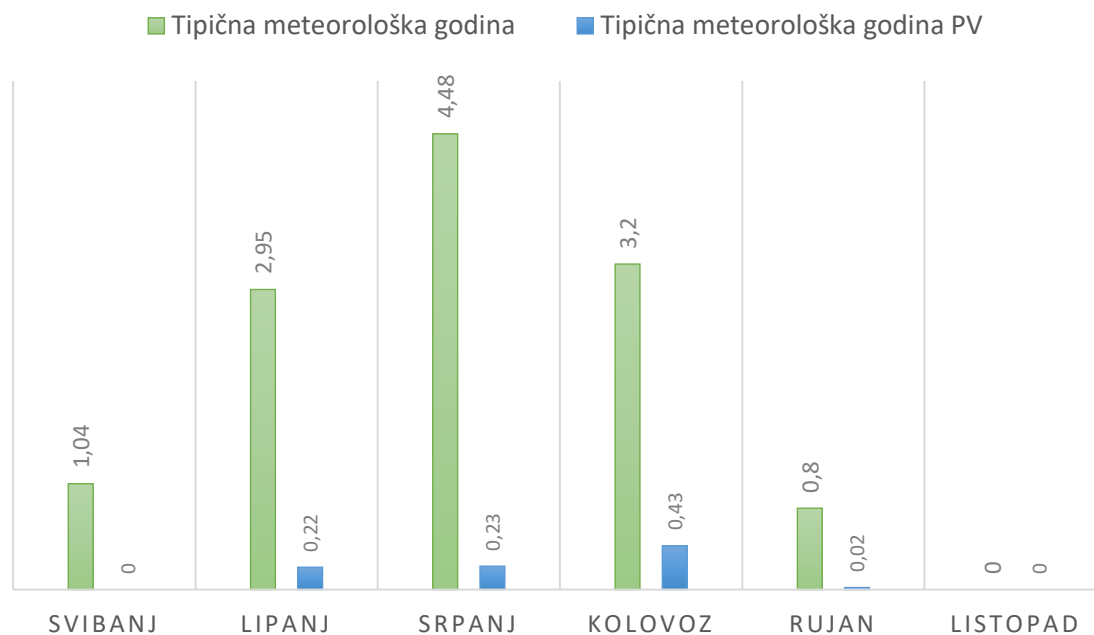
| Mjesec | Potrebna energija za hlađenje [kWh] | | | |
|----------|-------------------------------------|------|--------------|-------|
| | Tipična meteorološka godina | | 2019. godina | |
| | Bez PV | S PV | Bez PV | S PV |
| Svibanj | 168,4 | 0 | 0 | 0 |
| Lipanj | 511,6 | 44,9 | 890,3 | 178,4 |
| Srpanj | 802,1 | 34,7 | 919,8 | 172,7 |
| Kolovoz | 711,9 | 55,6 | 992,0 | 203,1 |
| Rujan | 257,2 | 1,9 | 223,2 | 1,3 |
| Listopad | 0,1 | 0 | 47,06 | 0 |
| Σ | 2451,4 | 137 | 3072,4 | 555,2 |

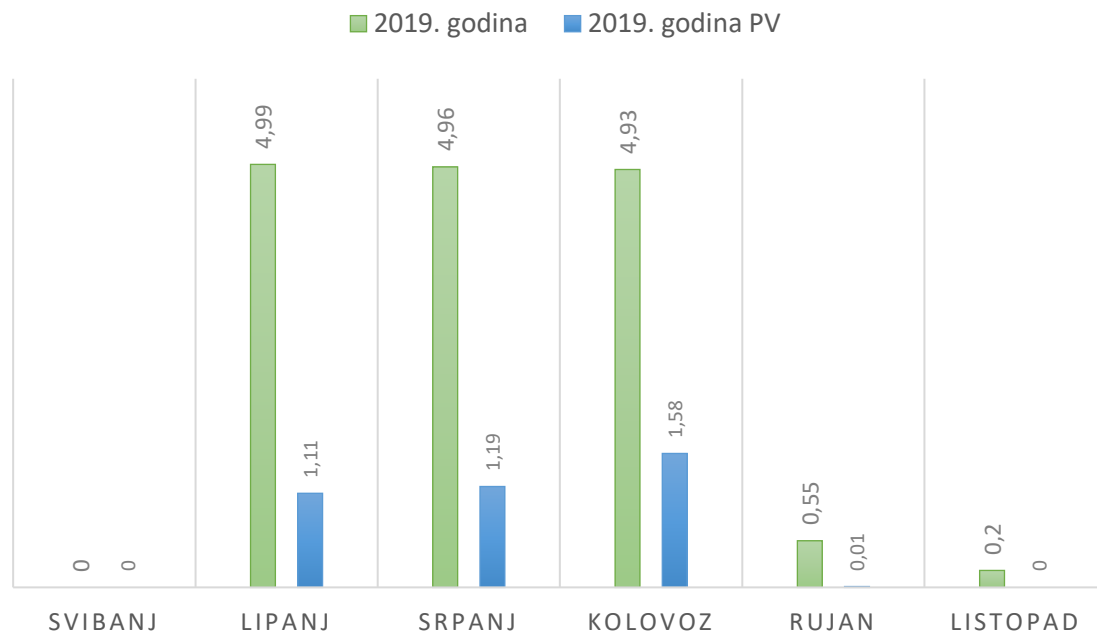
Vrijednosti su potom iskazane u jedinici kWh/m² kako bi se rezultati mogli lakše usporediti s drugim prostorima različitih površina. Pa je tako potrebna energija za hlađenje za tipičnu meteorološku godinu 12,5 kWh/m², a nakon primjene prirodne ventilacije iznosi 0,9 kWh/m². Iste vrijednosti za 2019. godinu redom iznose 15,4 kWh/m² i 3,9 kWh/m². Rezultati potrebne energije za hlađenje po mjesecima prikazani su u Tablici 8.

Tablica 8. Potrebna energija za hlađenje u kWh/m²

| Mjesec | Potrebna energija za hlađenje [kWh/m ²] | | | |
|----------|---|------|--------------|------|
| | Tipična meteorološka godina | | 2019. godina | |
| | Bez PV | S PV | Bez PV | S PV |
| Svibanj | 1,04 | 0 | 0 | 0 |
| Lipanj | 2,95 | 0,22 | 4,99 | 1,11 |
| Srpanj | 4,48 | 0,23 | 4,96 | 1,19 |
| Kolovoz | 3,20 | 0,43 | 4,93 | 1,58 |
| Rujan | 0,80 | 0,02 | 0,55 | 0,01 |
| Listopad | 0 | 0 | 0,20 | 0 |
| Σ | 12,47 | 0,9 | 15,43 | 3,89 |

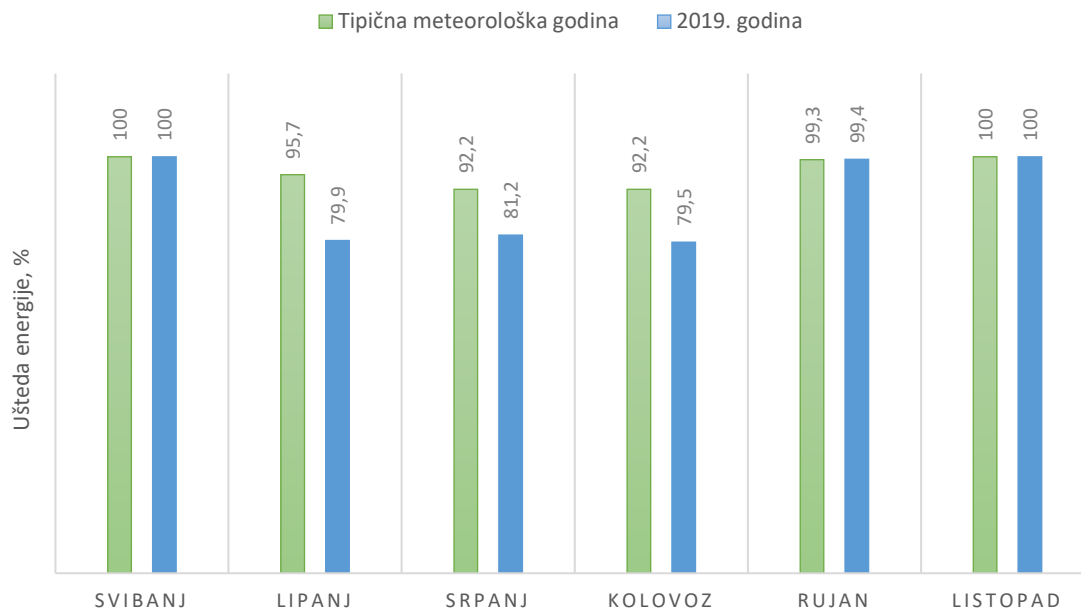
Potom je potrebna energija za hlađenje prije i nakon primjene PV prikazana grafički za tipičnu meteorološku godinu (TMG) na Slici 43, a za 2019. godinu na Slici 44. Iz slika se jasno vidi da je najveća potreba za hlađenjem tijekom mjeseci s najvišom temperaturom vanjskog zraka; lipnja, srpnja i kolovoza, dok se u mjesecima: srpanj, rujana i listopada gotovo sva energija za hlađenje može zadovoljiti korištenjem prirodne ventilacije.

**Slika 43. Usporedba energija za hlađenje TMG**



Slika 44. Usporedba potrebne energija za hlađenje za 2019. godinu

Učinkovitost prirodne ventilacije najjasnije je vidljiva kroz uštede energije za hlađenje nakon njene primjene. Na Slici 45 grafički su prikazane uštede energije za TMG i 2019. godinu u svim mjesecima kada je bila potrebna energija za hlađenje. Kolovoz kao najtopliji mjesec u oba slučaja ima najmanje uštede, pa se tako primjenom PV u TMG postiže ušteta od 92% dok se u 2019. godini postiže ušteta od 79,5% potrebne energije za hlađenje. Ukupna ušteta energije za hlađenje primjenom PV za TMG iznosi 82% dok je ušteta energije za hlađenje u 2019. godini 94%. Iako su u svibnju, rujnu i listopadu prirodnom ventilacijom pokrivena sve potrebe za hlađenjem, ukupna ušteta energije za hlađenje ne razlikuje se mnogo od uštede u najtoplijem mjesecu. Razlog tome su značajno niže potrebe energije za hlađenje prije primjene PV u navedenim mjesecima u usporedbi s tri najtoplija mjeseca, što je vidljivo u ranije prikazanoj Tablici 8.



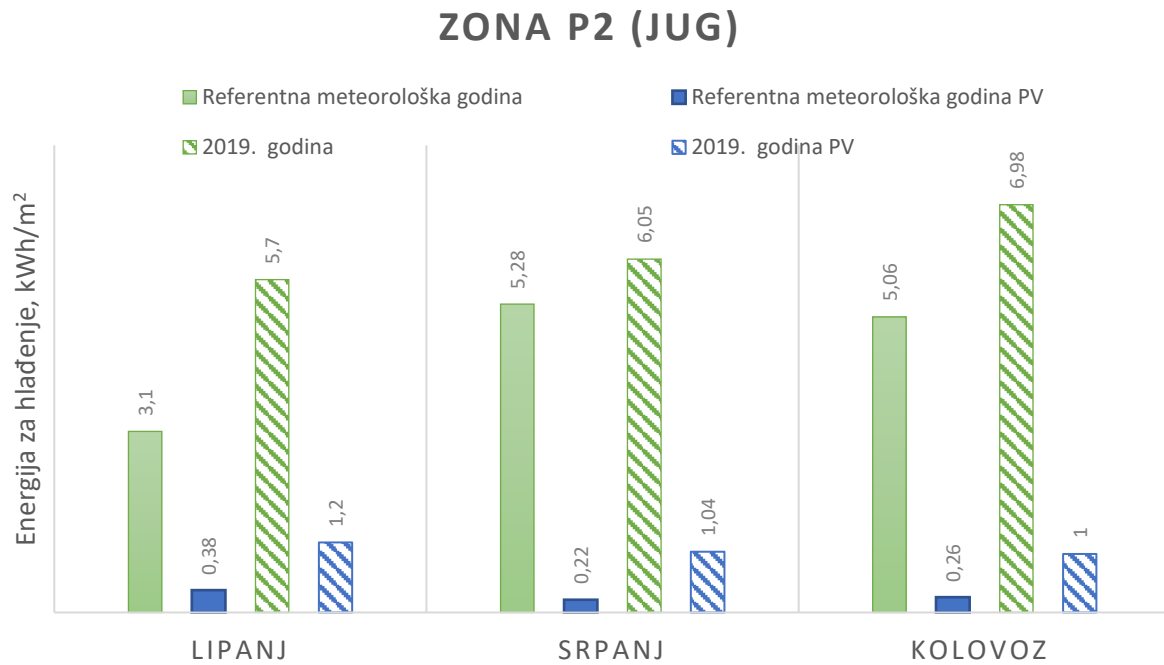
Slika 45. Uštede energije za hlađenje uslijed pasivnog hlađenja

Usporedbom potrebne energije za hlađenje zona, rezultati ukazuju na veću potrebnu energiju za hlađenje za zonu čiji su prozori smješteni na južnoj strani, odnosno za Predavaonicu 2, nego što je potrebna energija za zonu smještenu na sjevernoj strani, odnosno za Predavaonicu 1. Za tipičnu meteorološku godinu energija za hlađenje južne zone iznosi 17 kWh/m^2 , a za 2019. godinu $21,7 \text{ kWh/m}^2$ dok su rezultati za sjevernu zonu referentne meteorološke godine $12,5 \text{ kWh/m}^2$, a za 2019. godinu $15,4 \text{ kWh/m}^2$. Svi rezultati su iskazani za slučaj bez prirodne ventilacije. Takvi rezultati su očekivani, s obzirom da je južna zona više opterećena Sunčevim zračenjem, te ima i veće toplinske dobitke. Rezultati hlađenja po zonama mogu se vidjeti u Tablici 9.

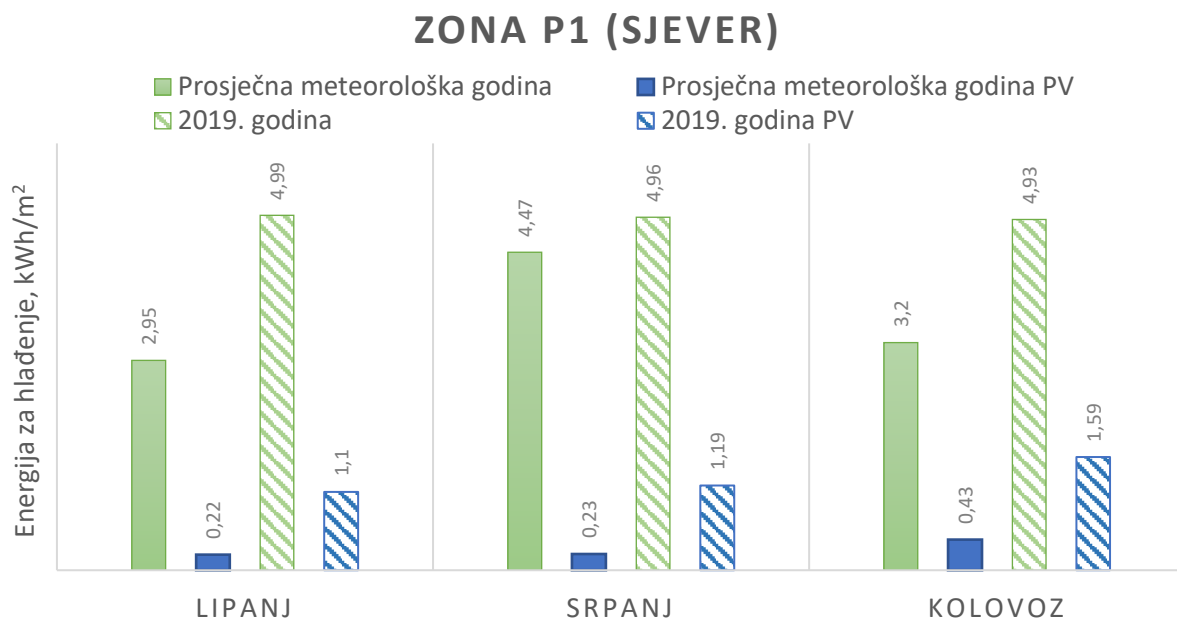
Tablica 9. Potrebna energija za hlađenje po zonama

| Zona | Potrebna energija za hlađenje [kWh/m^2] | | | |
|---------|--|------|--------------|------|
| | Tipična meteorološka godina | | 2019. godina | |
| | Bez PV | S PV | Bez PV | S PV |
| Zona P2 | 16,97 | 0,86 | 21,7 | 3,25 |
| Zona P1 | 12,47 | 0,9 | 15,43 | 3,89 |

Kako bi se vidjele promjene potrebne energije hlađenja za južnu i sjevernu zonu, grafički su prikazane vrijednosti hlađenja za tri najopterećenija mjeseca. Za južnu zonu prikaz je na Slici 46, a za sjevernu na Slici 47.



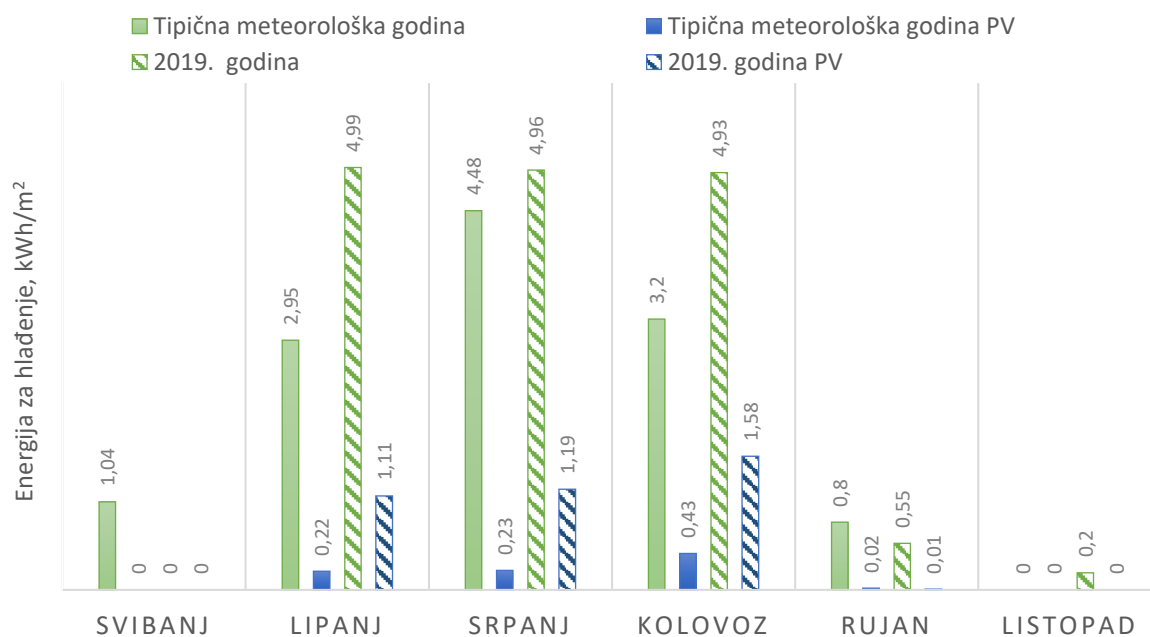
Slika 46. Prikaz potrebne energije za hlađenje za južnu zonu



Slika 47. Prikaz potrebne energije za hlađenje za sjevernu zonu

8.2 Utjecaj povećanja temperature na učinkovitost pasivnog hlađenja

Analizom meteoroloških podataka za TMG i 2019. godinu u Poglavlju 5 pokazano je da su u 2019. godini temperature vanjskog zraka kroz cijelu godinu više nego u TMG. Dodatnom analizom najtoplijeg mjeseca u godini, kolovoza, za oba slučaja izračunate su srednje dnevne i noćne temperature vanjskog zraka. U TMG dobivena je srednja dnevna temperatura od 20°C, dok je srednja noćna temperatura iznosa 18,5°C. U 2019. godini ti su iznosi redom 24,8°C i 19,6°C. Povećanjem vanjske temperature zraka danju, povećavaju se toplinski dobitci što rezultira povećanjem potrebne energije za hlađenje prostora. Tako je potrebna energija za hlađenje prije primjene PV tijekom svih mjeseci veća u 2019. godini nego u TMG, što se može vidjeti na Slici 48. Povećanje vanjske temperature zraka noću ne utječe na potrebnu energiju hlađenja prije primjene PV jer u noćnim satima nema toplinskih dobitaka u prostoru, a temperature zraka u oba su slučaja tada su znatno niže od postavne temperature od 25°C. Ali zato se povećanjem temperature vanjskog zraka u noćnim satima smanjuje akumulirana rashladna energija u ovojnici zgrade uslijed *free-coolinga*. Kako su u 2019. godini temperature vanjskog zraka veće kroz cijeli dan u usporedbi s TMG, u 2019. godini smanjena je akumulirana rashladna energija te je povećana potrebna energija za hlađenje. To je ujedno razlog nelinearnog povećanja energije za hlađenje u 2019. godini za slučaj primjene PV u usporedbi s TMG, odnosno razlog smanjenja učinkovitosti PV u 2019. godini.



Slika 48. Usporedba potrebne energije za hlađenje za sve analizirane slučajeve

Povećanjem temperature vanjskog zraka smanjuje se akumulirana rashladna energija u ovojnici zgrade, a ujedno se povećavaja potrebna energija za hlađenje. S povećanjem temperature vanjskog zraka dolazi do smanjenja učinkovitosti prirodne ventilacije. To je najjasnije vidljivo kroz manje uštede energije za hlađenje u 2019. godini u usporedbi s TMG koje su prikazane ranije na Slici 45. Povećanjem srednje temperature zraka u sezoni hlađenje od 2,6°C u 2019. godini, godišnje uštede energije smanjene su za 12,5% u usporedbi s TMG.

8.3 Iskoristivost prirodne ventilacije u ovisnosti o postavnoj temperaturi prostora

Kroz rad se analizirala potrebna energija za hlađenje pri postavnoj temperaturi unutarnjeg prostora od 25°C koja je gornja granica toplinske ugodnosti, a u svrhu maksimalne iskoristivosti pasivnog hlađenja. Međutim, određeni postotak ljudi smatra temperaturu unutarnjeg zraka od 25°C neugodnom, te bi se odlučio za postavljanje niže temperature unutarnjeg zraka. Kako bi se pokazala promjena iskoristivosti prirodne ventilacije u ovisnosti o željenoj temperaturi unutar prostorije, provedene su dodatne simulacije učionica Tehničke škole Ruđer Bošković pomoću kojih je dobivena potrebna energija za hlađenje pri postavnim temperaturama unutarnjeg zraka od 21°C do 25°C. U Tablici 10 prikazane su potrebne energije za hlađenje u TMG i 2019. godini prije i nakon primjene prirodne ventilacije za temperature u prostoru od 21°C do 25°C. Rezultati ukazuju da potrebna energija za hlađenje značajno raste pri smanjenju temperature zraka u prostoru. Smanjenjem temperature zraka za 1°C, potrebna energija za hlađenje u prosjeku raste za 16,5% u tipičnoj meteorološkoj godini, dok taj porast za 2019. godinu iznosi 14,5%.

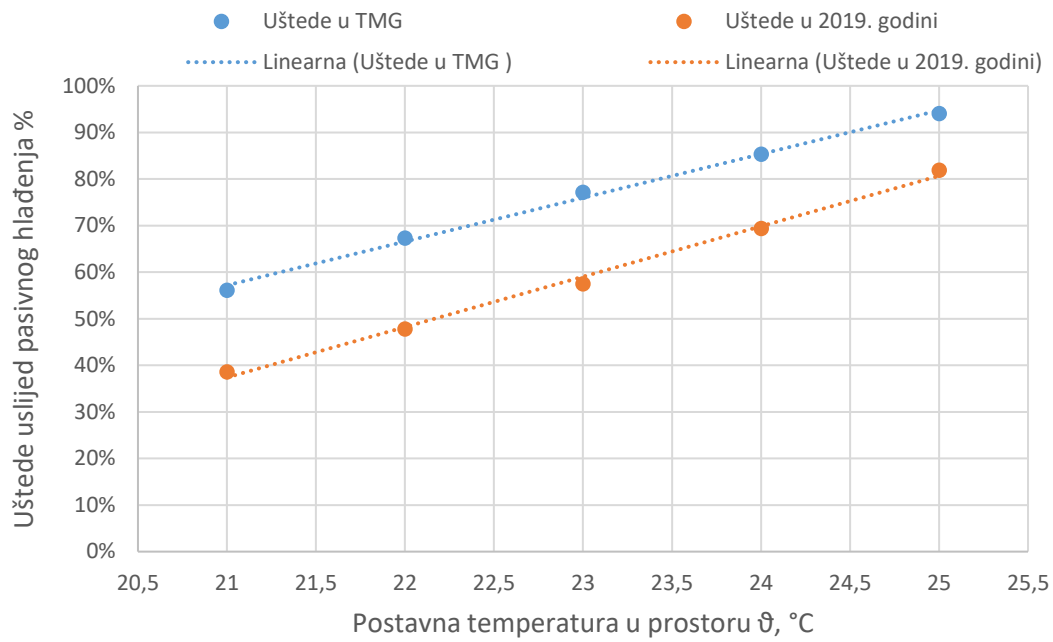
Tablica 10. Potrebne energija za hlađenje u TMG i 2019. godini prije i nakon primjene PV

| Postavljena temperatura prostora | Potrebna energija za hlađenje [kWh/m ²] | | | |
|----------------------------------|---|------|--------------|-------|
| | Tipična meteorološka godina | | 2019. godina | |
| | Bez PV | S PV | Bez PV | S PV |
| 21 °C | 25,73 | 11,3 | 28,93 | 17,76 |
| 22 °C | 21,8 | 7,13 | 24,86 | 12,98 |
| 23 °C | 18,29 | 4,18 | 21,38 | 9,10 |
| 24 °C | 15,21 | 2,23 | 18,34 | 5,61 |
| 25 °C | 12,47 | 0,9 | 15,43 | 3,89 |

Najjasnija razlika učinkovitosti pasivnog hlađenja između tipične meteorološke godine i 2019. godine pri različitim temperaturama unutar prostora vidljiva je kroz udjele uštedene energije za hlađenje nakon primjene sustava prirodne ventilacije. Tako su u Tablici 11 prikazane iskoristivosti pasivnog hlađenja za TMG i za 2019. godinu pri temperaturama prostora od 21°C do 25°C. Dobivene vrijednosti su potom prikazane na Slici 49 iz koje je jasno vidljivo da ušteda energija za hlađenje uslijed prirodne ventilacije i u tipičnoj meteorološkoj godini i u 2019. godini linearno pada s postavljanjem niže temperature unutar prostora.

Tablica 11. Uštede energije za hlađenje uslijed prirodne ventilacije u ovisnosti o postavljenoj temperaturi u prostoriji

| Postavljena temperatura u prostoriji ϑ [°C] | Uštede u tipičnoj meteorološkoj godini (TMG) | Uštede u 2019. godini |
|---|--|-----------------------|
| 21 | 56,08% | 38,59% |
| 22 | 67,28% | 47,80% |
| 23 | 77,12% | 57,46% |
| 24 | 85,32% | 69,37% |
| 25 | 94,40% | 81,90% |



Slika 49. Uštede energije hlađenja uslijed prirodne ventilacije u ovisnosti o postavnoj temperaturi unutarnjeg prostora

9 ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada bila je utvrditi utjecaj klimatskih promjena na potencijal pasivnog hlađenja zgrade korištenjem prirodne ventilacije. Za usporedbu su se koristili satni podatci tipične meteorološke godine i 2019. godine za područje grada Zagreba. Iz analize meteoroloških podataka vidljivo je da su temperature zraka 2019. godine veće nego što su za tipičnu meteorološku godinu. Prosječna temperatura zraka tipične meteorološke godine za sezonu hlađenja iznosi 20,3 °C dok je za 2019. godinu ona 22,9 °C, što čini razliku od 2,6 °C.

Analiza je provedena za dvije učionice Tehničke škole Ruđer Bošković koje dijeli hodnik. Pri analizi je korišten računalni program TRNSYS za simulaciju potrebne energije za hlađenje za svaki sat u godini. Simulacije su provedene za slučaj prije implementacije sustava prirodne ventilacije, te za slučaj primjene prirodne ventilacije. Za potrebe druge simulacije također je korišten i programski jezik MATLAB pomoću kojeg je napravljen algoritam za izračun protoka zraka koji ulazi u prostor pri otvaranju prozora, odnosno, kada je temperatura vanjskog zraka niža od postavne temperature prostora. Protoci zraka uslijed prirodne ventilacije su za svaki sat u godini izračunati primjenom pojednostavljenog modela za poprečnu ventilaciju te satnih meteoroloških podataka za grad Zagreb za 2019 godinu.

Rezultati analize ukazuju da za postavnu temperaturu prostora od 25°C potrebna energija za hlađenje iznosi 12,5 kWh/m² za tipičnu meteorološku godinu, te 15,4 kWh/m² za 2019. godinu. Primjenom prirodne ventilacije te vrijednosti su smanjene na 0,89 kWh/m² za tipičnu meteorološku godinu, odnosno na 3,9 kWh/m² za 2019. godinu. Drugim riječima, prirodnom ventilacijom se u tipičnoj meteorološkoj godini pokriva 94,4% potreba za hlađenjem, a u 2019. godini 81,9% potreba.

Iako je učinkovitost pasivnog hlađenja u oba slučaja iznimno visoka, primjećuje se znatno smanjenje potencijala (12,5%) za primjenu ovakvog sustava, a uslijed klimatskih promjena. Također se nameće zaključak da referentna meteorološka godina nije uvijek najbolji odabir pri procjenama potrošnje energije, te da bi se pri korištenju tih meteoroloških podataka trebao uvrstiti korekcijski faktor kako bi rezultati odgovarali trenutnim vremenskim uvjetima.

Kako bi se utvrdilo postoji li trend smanjenja potencijala pasivnog hlađenja, ili je 2019. jedina godina u kojoj su se pojavila značajnija odstupanja u odnosu na tipičnu meteorološku godinu, poželjno bi bilo ponoviti simulacije prikazane u ovom radu za nekoliko zadnjih godina.

LITERATURA

- [1] Tong Y., Clementis Croome D.: Natural Ventilation in Built Environment, Encyclopedia of Sustainability Science and Technology (pp.6865-6896), 2012.
- [2] Abaeian H., Madani R., Bahramian A.: Ventilation in Termite Mound : New Solution for Follow in Architecture, International Journal of Scientific Engineering and Technology Volume No. 6, Issue No. 7, 250-254, 2017.
- [3] Internet stranica [Back to basic](#) [17.05.2021.]
- [4] Hunter King, Samuel Ocko, L. Mahadevan: Termite mounds harness diurnal temperature oscillations for ventilation, National Academy of Sciences 2015.
- [5] A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment; Renewable & Sustainable Energy Reviews 2016.
- [6] Internet stranica [Ask nature](#) [17.05.2021.]
- [7] Prof.dr.sc Ljubomir Mišćević: Rekonstrukcija i dogradnja Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu, Sveučilište u Zagrebu, 2019.
- [8] Awbi H.: Ventilation of Buildings, Taylor & Francis Group, New York, 2003
- [9] Doc. dr.sc. Tea Žakula; Skripta: *Klimatizacija, Prirodna ventilacija*
- [10] Prof.dr.sc. Igor Balen: Skripta; *Klimatizacija, Sustavi ventilacije-prirodna i prisilna ventilacija*
- [11] Internet stranica [Nasa climate change](#) [17.05.2021.]
- [12] Rothman L.S. et al., The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, V100, 533-572, 2009.
- [13] Hviid ,C.H.: Building integrated passive ventilation systems, Technical University of Denmark, 2010.
- [14] TRNSYS 17 Documentation: Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild (Volume 5). Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2012.

PRILOZI

Prilog I. Uštede energije na pasivnom hlađenju

Prilog II. Kod algoritma u MATLAB-u

Prilog I. Uštede energije na pasivnom hlađenju

| Mjesec | Ušteda energije na pasivnom hlađenju [%] | |
|----------|--|--------------|
| | Prosječna meteorološka godina | 2019. godina |
| Svibanj | 100 | 100 |
| Lipanj | 95,7 | 79,9 |
| Srpanj | 92,2 | 81,2 |
| Kolovoz | 92,2 | 79,5 |
| Rujan | 99,3 | 99,4 |
| Listopad | 100 | 100 |
| Σ | 94,4 | 81,9 |

Prilog II. Kod algoritma u MATLAB-u

```

function [ output_args ] = Protok( input_args )

ime_datoteke =
'Meteorological_data_Zagreb_Maksimir_2019_2.dat'
M_vanjski = csvread(ime_datoteke);
alpha_ZG = M_vanjski(:,3); % satne vrijednosti smjera vjetra
za ZG
u_vjetar = M_vanjski(:,2); % satne vrijednosti brzine vjetra u
ZG

ime_datoteke = 'Weather_data_2019_TRNSYS_Zagreb.dat'
M_van = csvread(ime_datoteke);
T_vani = M_van(:,1); % satne vanjske temperature u ZG

Cp_tablica_zid1 = [0.7, 0.35, -0.5, -0.4, -0.2, -0.4, -0.5,
0.35, 0.7]; % Cp za zid 1
Cp_tablica_zid2 = [-0.2, -0.4, -0.5, 0.35, 0.7, 0.35, -0.5, -
0.4, -0.2]; % Cp za zid 2

alpha_tablica = [0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315, 360]; %
smjer vjetra iz tablice

for i = 1:length(alpha_ZG);
    Cp_zid1(i) = interp1(alpha_tablica, Cp_tablica_zid1,
alpha_ZG(i));
    Cp_1 = Cp_zid1';
    Cp_zid2(i) = interp1(alpha_tablica, Cp_tablica_zid2,
alpha_ZG(i));
    Cp_2 = Cp_zid2';
end

C = sqrt((Cp_1 - Cp_2).^2); %konstanta se mora kvadrirati jer u
slučaju promjene strujanja vjetra prvi C je negativan
Cd = 0.65; %koeficijent za prozor
Aeff = Efektivna_povrsina ( 6.384, 5, 5, 6.384); % Aeff=
2.7834
Protok_zraka = sqrt(C).*u_vjetar * Cd * Aeff; %svi protoci
vjetra u satu u ZG koji mogu strujati u zgradu

ime_datoteke = 'Ruder_prije.plt'
M_unutar = csvread(ime_datoteke);
Q_predavaonica = M_unutar(:,5);
T_unutra = M_unutar(:,2);

Bez_grijanja = zeros(length(u_vjetar),1);

```

```
% fprintf('Q_predavaonica: %d\n', length(Q_predavaonica));
% fprintf('T_unutra: %d\n', length(T_unutra));
% fprintf('T_vani: %d\n', length(T_vani));
% fprintf('alpha_ZG: %d\n', length(alpha_ZG));

for i = 1:length(Q_predavaonica);
    toplina = Q_predavaonica (i);
    if (toplina > 0 && T_unutra (i) > T_vani (i) ) || (toplina
== 0 && T_unutra (i) > T_vani (i) && T_vani (i) > 13 )
        Bez_grijanja(i,1) = Protok_zraka (i);
    end
end

Protok_zraka_1 = zeros(length(u_vjetar), 2); %protoci
raspoređeni u dva stupca ovisno o strani strujanja vjetra

for i = 1:length(alpha_ZG)
    kut = alpha_ZG (i);
    if (kut > 90 && kut < 270)
        % lijevo
        Protok_zraka_1(i, 1) = Bez_grijanja (i);
    else
        % desno
        Protok_zraka_1(i, 2) = Bez_grijanja (i);
    end
end

%xlswrite('rez.xlsx', Protok_zraka_1);
csvwrite('2protok.dat', Protok_zraka_1);

disp ('gotov')
end
```