Usporedba eksperimentalnih mjerenja i matematičkog modela za proračun potencijala pasivnog hlađenja u zgradi

Čurčić, Tamara

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:235:922985

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Tamara Čurčić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica: Studentica:

Doc. dr. sc. Tea Žakula Tamara Čurčić

Zagreb, 2021.

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, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Tamara Čurčić** Mat. br.: 0035208804

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba eksperimentalnih mjerenja i matematičkog modela za proračun potencijala pasivnog hlađenja u zgradi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of experimental measurements and a mathematical model for the assessment of a passive cooling potential in a building**

Opis zadatka:

Pasivno hlađenje zgrada korištenjem prirodne ventilacije prepoznato je kao metoda kojom se mogu postići značajne uštede energije uz relativno nisku početnu investiciju. Iako se zbog složenih procesa prijenosa topline i tvari preporučuje korištenje CFD analize pri projektiranju takvog sustava, CFD se zbog svoje složenosti uglavnom zamjenjuje pojednostavljenim matematičkim modelima. Cilj rada je analiza točnosti pojednostavljenih matematičkih modela za pasivno hlađenje s obzirom na eksperimentalna mjerenja u zračnom tunelu. Analizu je potrebno provesti korištenjem rezultata istraživanja: D. Golubić, W. Meile, G. Brenn, H. Kozmar. 2020. Wind-tunnel analysis of natural ventilation in a generic building in sheltered and unsheltered conditions: Impact of Reynolds number and wind direction. *Journal of Wind Engineering and Industial Aerodynamics*. Za simulaciju pasivnog hlađenja u zgradi potrebno je izraditi energijski model u računalnom programu TRNSYS® i programskom jeziku MATLAB®. Također je potrebno razviti model za analizu pasivnog hlađenja korištenjem rezultata eksperimentalnih mjerenja. Na temelju usporedbe dva modela proračuna potrebno je analizirati utjecaj greške računalnih simulacija na zaključke o potencijalu za pasivno hlađenje.

Rad treba sadržavati:

- opis modela zgrade i ulaznih podataka analize,
- opis razvijenog modela za proračun pasivnog hlađenja na temelju računalnih simulacija,
- opis razvijenog modela za proračun pasivnog hlađenja na temelju eksperimentalnih mjerenja,
- usporedbu ušteda energije za hlađenje dobivenih na temelju računalne simulacije i eksperimentalnih mjerenja,
- zaključak o utjecaju greške računalnih simulacija na proračun potencijala 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

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

Zahvaljujem se dr. sc. Tei Žakuli na izvanrednom mentorstvu tijekom izrade ovog rada, uloženom trudu i vremenu te svakom upućenom savjetu bez kojih ovaj rad ne bi izgledao ovako kako izgleda danas. Također se želim zahvaliti doktorandu Nikoli Bađunu na dostupnosti tijekom izrade ovog rada te nesebičnoj pomoći pri savladavanju svake nastale prepreke.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška i vjetar u leđa tijekom cijelog studija i prilikom izrade ovog rada.

Tamara Čurčić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA III
POPIS OZNAKA IV
SAŽETAK V
SUMMARY VI
1. UVOD 1
2. PASIVNO HLAĐENJE 2
2.1. Prirodna ventilacija 2
2.1.1. Matematički model poprečne ventilacije 4
3. ULAZNI PARAMETRI 9
3.1. Svojstva ovojnice 10
3.2. Pogonski režimi 12
3.3. Meteorološki podaci 12
3.4. Protok zraka 14
3.4.1. Eksperimentalna mjerenja 14
3.4.2. Matematički model 17
3.4.3. Usporedba protoka zraka dobivenog matematičkim modelom i eksperimentalnim mjerenjima 18
3.4.4. Izračun protoka za različite parametre strujanja vjetra 21
4. OPIS RADA U RAČUNALNOM PROGRAMU TRNSYS 22
4.1. Opis rada u TRNSYS korisničkom sučelju Simulation Studio 22
4.2. Opis rada u TRNSYS korisničkom sučelju TRNBuild 24
4.2.1. Definiranje geometrije 27
4.2.2. Definiranje pogonskih režima 29
5. REZULTATI PRORAČUNA POTENCIJALA PASIVNOG HLAĐENJA 33
5.1. Potencijal pasivnog hlađenja za izloženu zgradu 34
5.2. Potencijal pasivnog hlađenja za zaklonjenu zgradu 36
6. ZAKLJUČAK 39
LITERATURA 41

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer pasivno hlađene zgrade - Solar XXI zgrada [9]....4
Slika 2. Shema za izvod protoka zraka kroz prozor....5
Slika 3. Shema poprečne ventilacije kroz zgradu....7
Slika 4. Model generičke zgrade [4]....9
Slika 5. Temperature vanjskog zraka tijekom 2019. godine....13
Slika 6. Brzine vjetra tijekom 2019. godine....13
Slika 7. Ruža vjetrova za meteorološku postaju Zagreb - Maksimir, 2019. godina [12]....14
Slika 8. Kutevi nastrujavanja zraka pri eksperimentalnom mjerenju [4]....15
Slika 9. Konfiguracija zaklonjene zgrade pri različitim kutevima nastrujavanja [4]....15
Slika 10. Q/Q_{ref} u ovisnosti o brzini i kutu za izloženu zgradu [4]....16
Slika 11. Q/Q_{ref} u ovisnosti o kutu nastrujavanja s brzinom i udaljenosti kao parametrima, zaklonjena zgrada [4]....16
Slika 12. Usporedba rezultata matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja za izloženu zgradu....18
Slika 13. Usporedba rezultata matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja za zaklonjenu zgradu....18
Slika 14. Ovisnost protoka zraka o kutu i brzini vjetra, izložena zgrada....20
Slika 15. Ovisnost protoka zraka o kutu i brzini vjetra, zaklonjena zgrada....20
Slika 16. Početni zaslon korisničkog sučelja Simulation Studio....23
Slika 17. Prikaz korištenih komponenti unutar sučelja Simulation Studio....24
Slika 18. Početni prozor korisničkog sučelja TRNBuild....25
Slika 19. Navigacijski prozor sučelja TRNBuild....26
Slika 20. Prozor toplinske zone u sučelju TRNBuild....26
Slika 21. Definiranje novog zidnog sloja....27
Slika 22. Definiranje zida pomoću slojeva....28
Slika 23. Definiranje prozora....28
Slika 24. Definiranje sustava grijanja....29
Slika 25. Definiranje sustava hlađenja....30
Slika 26. Definiranje unutarnjih toplinskih dobitaka....30
Slika 27. Definiranje prirodne ventilacije unutar TRNBuilda....31
Slika 28. Povezivanje Type9e-2 komponente za učitavanje vrijednosti protoka zraka s Type56 komponentom....32
Slika 29. Potrebna energija za hlađenje bez pasivnog hlađenja [kWh]....33
Slika 30. Usporedba rezultata matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja pri izračunu potrebne energije za hlađenje [kWh], izložena zgrada....36
Slika 31. Usporedba rezultata matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja pri izračunu potrebne energije za hlađenje [kWh], zaklonjena zgrada....38

POPIS TABLICA

Tablica 1. Slojevi vanjskih zidova 10
Tablica 2. Slojevi ravnog krova 10
Tablica 3. Slojevi poda 10
Tablica 4. Svojstva materijala vanjske ovojnice zgrade 11
Tablica 5. Podaci za prozor na jugu 12
Tablica 6. Podaci za prozor na sjeveru 12
Tablica 7. Vrijednosti koeficijenata površinskog tlaka vjetra za izloženu zgradu [11] 17
Tablica 8. Vrijednosti koeficijenata površinskog tlaka vjetra za zaklonjenu zgradu [11] 17
Tablica 9. Potrebna energija za hlađenje bez korištenja pasivnog hlađenja 33
Tablica 10. Potrebna energija za hlađenje s uvedenom prirodnom ventilacijom, izložena zgrada 34
Tablica 11. Ušteda potrebne energije za hlađenje po mjesecima za matematički model i eksperimentalna mjerenja, izložena zgrada 35
Tablica 12. Potrebna energija za hlađenje s uvedenom prirodnom ventilacijom, zaklonjena zgrada 37
Tablica 13. Ušteda potrebne energije za hlađenje po mjesecima za matematički model i eksperimentalna mjerenja, zaklonjena zgrada 37

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
w_{vjetar}	m/s	naletna brzina vjetra
w_A, w_B	m/s	brzine strujanja vjetra u točkama A i B
g	m/s^2	ubrzanje sile teže
h_A, h_B	m	visina u točkama A i B
p_A, p_B	Pa	tlak u točkama A i B
ρ	kg/m^3	gustoća vanjskog zraka
ṁ	kg/s	maseni protok
A_A, A_B	m^2	površina poprečnog presjeka strujanja u točkama A i B
Δp	Pa	razlika tlaka između točaka A i B
$\dot{V}$, Q	m^3/s	protok zraka kroz prozor
C_d	-	koeficijent lokalnog otpora strujanja na prozoru (obično 0,65)
p_1	Pa	pretlak na ulaznom otvoru
p_3	Pa	pretlak na izlaznom otvoru
C_{p1}	-	koeficijent površinskog tlaka na strani privjetrine
C_{p3}	-	koeficijent površinskog tlaka na strani zavjetrine
Δp_1, Δp_2, Δp_3	Pa	razlika tlaka na otvorima 1, 2 i 3
V_1, V_2, V_3	m^3/s	protoci zraka na otvorima 1, 2 i 3
A_1, A_2, A_3	m^2	površina presjeka strujanja na otvorima 1, 2 i 3
ρ_1, ρ_2, ρ_3	kg/m^3	gustoća zraka na otvorima 1, 2 i 3
A_{eff}	m^2	efektivna površina strujanja
a	mm	duljina stranice modela generičke zgrade
C_l	-	koeficijent sličnosti za duljinu
c	J/kgK	specifični toplinski kapacitet
λ	W/mK	toplinska provodnost
U	W/m^2K	koeficijent prolaza topline stakla
g	-	stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje
V	m^3	volumen zgrade
Q_{sens}	kWh	potrebna energija za hlađenje
α	°	kut nastrujavanja vjetra
Q_{ref}	m^3/s	referentni protok zraka kroz zgradu
ACH	h^{-1}	broj izmjena zraka u satu

SAŽETAK

Potrebe za energijom za hlađenje u konstantnom su porastu diljem svijeta. Kako bi se smanjila potrošnja energije u sektoru zgradarstva, poželjno je implementirati metode pasivnog hlađenja u zgradama. Međutim, zbog složenosti procesa pasivnog hlađenja, točne analize mogu se dobiti korištenjem CFD računalnih simulacija, što je često neprimjenjivo u praksi. Stoga se pri projektiranju ovakvih zgrada često koristi pojednostavljeni matematički model koji je opisan u ovom radu. Svrha rada je analizirati točnost pojednostavljenog modela korištenjem eksperimentalnih mjerenja. U ovom radu analizirana je prirodna ventilacija generičke zgrade uslijed sile vjetra kao jedne od mogućih pokretačkih sila te su u sklopu njega dane jednadžbe koje predstavljaju matematički model problema. Analiza je izvršena za izloženu zgradu (npr. u ruralnom području) te za zaklonjenu zgradu (npr. u urbanom području). Rezultati dobiveni matematičkim modelom uspoređeni su s rezultatima eksperimentalnih mjerenja izvršenih u zračnom tunelu za generiranje modela atmosferskog graničnog sloja na Institutu za mehaniku fluida i prijenos topline Tehničkog sveučilišta u Grazu, Austrija. Za analizu potencijala za pasivno hlađenje te usporedbu s eksperimentalnim mjerenjima korišteni su računalni programi TRNSYS i MATLAB. Ušteda energije uslijed pasivnog hlađenja analizirana je za izloženu zgradu i za zgradu koja se nalazi u urbanoj sredini. Rezultati pokazuju da su uštede veće kod zgrade koja stoji izložena u prostoru u odnosu na zaklonjenu zgradu, što je očekivano s obzirom na manje brzine strujanja vjetra u urbanim sredinama. Rezultati također pokazuju da su uštede veće u slučaju eksperimentalnih mjerenja u odnosu na matematički model, što sugerira da pojednostavljeni matematički model u određenoj mjeri podcjenjuje potencijal pasivnog hlađenja. Međutim, razlike nisu značajne, što upućuje na zadovoljavajuću točnost pojednostavljene metode pri dizajniranju sustava pasivnog hlađenja u zgradama.

Ključne riječi: pasivno hlađenje, točnost simulacijskog modela, mjerenja u zračnom tunelu, ušteda energije

SUMMARY

Cooling energy needs constantly increase around the world and it is, therefore, urgent to implement passive cooling in buildings on a larger scale, as soon as possible, so that the total energy consumption in a building sector could be reduced. Due to the complexity of passive cooling, accurate analysis can be obtained using CFD computational simulations, which is often not applicable in practice. Consequently, a simplified mathematical model is often used when designing buildings. The objective of the paper is to analyze the accuracy of the simplified model using experimental measurements. A wind-driven natural ventilation of a generic building was analyzed in this study and the mathematical model that describes the problem is presented. Both isolated building in a rural area and a sheltered building within the urban environment were analyzed. The results obtained from the mathematical model are compared with the results from the wind-tunnel experiments that were carried out in the boundary layer wind tunnel of the Institute of Fluid Mechanics and Heat Transfer at Graz University of Technology (IFMHT-TUG), Austria. TRNSYS and MATLAB software were used for passive cooling potential analysis and comparison with experimental measurements. Energy savings were calculated for an isolated building, as well as the sheltered one. Energy savings are larger in the case of an isolated building than in the case of a sheltered one due to lower wind velocities in urban areas. Based on the results obtained from the mathematical model and the results from the wind-tunnel experiments it was concluded that the energy savings are slightly higher in the case of the experiment. In other words, the described mathematical model, to some extent, undermines passive cooling potential. It was concluded that the described mathematical model is an accurate representation of the analyzed problem.

Key words: passive cooling, simulation model accuracy, wind-tunnel measurements, energy savings

1. UVOD

Potrošnja energije u svijetu u konstantnom je porastu te sa sektorom zgradarstva kao najvećim potrošačem od iznimne je važnosti okrenuti se energetski učinkovitijim rješenjima u zgradama. Prema podacima IEA sektor zgradarstva odgovoran je za više od trećine svjetske potrošnje energije te gotovo 40% direktnih i indirektnih emisija CO_2. [1] S povećanjem dostupnosti izvora energije te općenito rastom životnog standarda diljem svijeta, javljaju se sve veće potrebe i želje za sustavima hlađenja što je danas najbrže rastući potrošač energije. Već danas korištena energija za hlađenje iznosi oko 10% ukupne svjetske potrošnje električne energije te je diljem svijeta instalirano oko 3,6 milijardi uređaja za hlađenje. [2][3] Takve brojke su zabrinjavajuće te uzimajući u obzir globalno zatopljenje i porast svjetske temperature logičan slijed je njihov daljnji porast. Kako bi se to izbjeglo te se smanjile potrebe za gradnjom novih energetskih postrojenja diljem svijeta potrebno je implementirati načine pasivnog hlađenja u zgradama.

Zbog složenosti procesa pasivnog hlađenja točne analize se mogu dobiti korištenjem računalnih CFD simulacija što je često neprimjenjivo u praksi. Stoga se pri projektiranju ovakvih zgrada često koristi pojednostavljeni matematički model koji je opisan u ovom radu. Svrha rada je analizirati točnost pojednostavljenog modela korištenjem eksperimentalnih mjerenja opisanih u znanstvenom članku: D. Golubić, W. Meile, G. Brenn, H. Kozmar. 2020. Wind-tunnel analysis of natural ventilation in a generic building in sheltered and unsheltered conditions: Impact of Reynolds number and wind direction, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. [4] Eksperiment je proveden za generičku zgradu dimenzija 200 x 200 x 200 mm pri različitim brzinama i kutovima nastrujavanja zraka te različitim okruženjima ispitivanog modela. Primjerice, analiziran je model izložen u prostoru te model zaklonjen drugim građevinama (urbana sredina), što može imati značajan utjecaj na potencijal pasivnog hlađenja. U radu je analizirana isključivo prirodna ventilacija uslijed sila vjetra (eng. *wind-driven ventilation*) te je intenzitet prirodne ventilacije mjeren na temelju broja izmjena zraka na sat (eng. *ACH - air changes per hour*).

Proces pasivnog hlađenja analiziran je u ovom radu koristeći računalne programe TRNSYS i MATLAB. Računalni program TRNSYS korišten je za dinamičku simulaciju zgrade, odnosno proračun potrebne energije za hlađenje u ovisnosti o protoku vanjskog zraka U programskom jeziku MATLAB razvijen je zatim pojednostavljeni matematički model za proračun protoka vanjskog zraka u ovisnosti o parametrima vjetra (brzina i kut nastrujavanja). MATLAB je također korišten za usporedbu rezultata dobivenih razvijenim modelom te eksperimentalnih mjerenja kako bi se izvršila njihova usporedba potencijala za pasivno hlađenje te uštedu energije.

2. PASIVNO HLAĐENJE

Pod pojmom pasivno hlađenje podrazumijevaju se razne tehnike za održavanje toplinske ugodnosti u sezoni hlađenja, bez korištenja mehaničkih sustava. Osim s gledišta financija takav način hlađenja najmanje je štetan i za okoliš jer ne iziskuje velike količine energije za pokretanje kompresora, kao glavnog potrošača u mehaničkim sustavima hlađenja. Pasivni način hlađenja temelji se na nekoliko principa: pohrani, izbjegni, ukloni te uspori. [5] Rashladnu energiju moguće je pohraniti korištenjem masivnih ploha u zgradi npr. pothlađenjem betonske jezgre. Takav način hlađenja u literaturi je poznat pod nazivom „besplatno hlađenje“ (eng. *free cooling*) koji podrazumijeva zatvorene prozore tijekom dana, a otvorene tijekom noći te akumulaciju rashladne energije u masu zgrade čime se omogućava održavanje željenih unutarnjih temperatura tijekom dana. [6] Sljedeći princip je spriječiti i usporiti prodiranje toplinske energije u zgradu korištenjem odgovarajuće izolacije te adekvatnim zasjenjenjem. Konačno, princip koji se najčešće koristi jest uklanjanje već dospjele toplinske energije prirodnom ventilacijom, što će biti opisano u sljedećem poglavlju. Sve navedene tehnike provode se kako bi se u ljetnim mjesecima temperatura prostorije održavala unutar intervala toplinske ugodnosti. Koliko će takvi procesi biti učinkoviti te isplativi uvelike ovisi o klimatskim uvjetima u kojima se promatrana zgrada nalazi. Ako se želi povećati primjenjivost pasivnog, hlađenja moguća je ugradnja manjih mehaničkih uređaja npr. aksijalnih ventilatora s vrlo niskom potrošnjom energije čime se pospješuje učinkovitost strujanja zraka. Sustavi koji kombiniraju pasivni i mehanički princip hlađenja nazivaju se hibridni sustavi. Planiranje takvog načina hlađenja dovoljno rano u procesu projektiranja zgrade omogućava maksimalno iskorištavanje dostupnih prirodnih resursa te posljedično ostvarivanje najvećih ušteda energije, a time i novca. [5]

2.1. Prirodna ventilacija

Prirodnom ventilacijom ostvaruje se izmjena zraka iz zatvorenog prostora s vanjskim zrakom kako bi se njegova kvaliteta održala unutar prihvatljivih vrijednosti. Kod prirodne ventilacije se izmjena zraka odvija bez upotrebe mehaničkih uređaja te se time kvalificira u energetski učinkovita rješenja za održavanje toplinske ugodnosti u zgradi. Ventilacija je omogućena na temelju prirodno dobivene razlike tlake uslijed sile vjetra i/ili sile uzgona. U periodima kada zgrada treba hlađenje te je istovremeno vanjska temperatura ispod temperaturne granice toplinske ugodnosti, poželjno je prirodnom ventilacijom omogućiti strujanje zraka iz hladnijeg vanjskog prostora u zgradu. Rezultat ovakvog načina hlađenja je održavanje toplinske ugodnosti bez utroška energije. Kako bi takav način hlađenja bio uspješno implementiran u zgradu, potrebno je prirodnom ventilacijom dobavljati količinu hladnijeg zraka koji bi bio dovoljan za odvođenje toplinskih dobitaka prostorije. Ta količina je obično znatno veća od same količine zraka potrebne za zadovoljavanje zahtjeva za kvalitetom unutarnjeg zraka te je iz tog razloga važno poznavati parametre koji utječu na učinkovitost prirodne ventilacije.

Jedna od dvije pokretačke sile, spomenute ranije u tekstu, kojom se postiže potrebna razlika tlakova je sila vjetra. Djelovanjem sile vjetra dolazi do stvaranja zone pretlaka na privjetrinskoj strani zgrade te zone podtlaka na zavjetrinskoj strani zgrade pretvorbom dinamičkog tlaka vjetra (brzine) u statički tlak. Uslijed nastanka takve razlike tlakova dolazi do protoka zraka kroz otvore zgrade, odnosno, kroz njezinu unutrašnjost. Intenzitet tog protoka, a samim time i učinkovitost pasivnog hlađenja prirodnom ventilacijom uvelike ovisi o orijentaciji zgrade u odnosu na smjer strujanja vjetra, njezinom okruženju te naravno veličini i položaju otvora na zgradi. Osim orijentacije prozora, vrlo važna stavka je i konstrukcija prozora o kojoj ovise gubici strujanja, a time i protok zraka. Također, izuzetno važan parametar je i površina prozora, koju je potrebno optimizirati u ovisnosti o svim relevantnim parametrima zgrade (toplinski dobici, vanjska temperatura, brzina strujanja vjetra, itd.). Upravo ovaj princip prirodne ventilacije, pogonjene silom vjetra, obrađen je eksperimentalno u okviru ranije navedenog znanstvenog rada. Povećanjem brzine nastrujavanja zraka povećava se broj izmjena zraka u prostoru, neovisno o ostalim parametrima. Broj izmjena zraka se također povećava s povećanjem razmaka između zgrada što znači da je puno manji kod okružene zgrade u odnosu na izloženu. Sve navedene parametre treba uzeti u razmatranje pri projektiranju zgrade za hlađenje prirodnom ventilacijom kako bi ono bilo što uspješnije.

Drugi princip prirodne ventilacije je korištenje sile uzgona kao pogonske sile za strujanje zraka. Taj prirodni efekt bazira se na povećanoj uzgonskoj sili toplog zraka te se još naziva efekt dimnjaka (eng. *stack effect*). Zrak u nižim razinama zgrade se zagrijava, povećanjem temperature, povećava mu se specifični volumen odnosno smanjuje mu se gustoća. Na njega tada djeluje veća uzgonska sile te odlazi u više razine zgrade, a pri tome se u nižim razinama stvara zona nižeg tlaka (podtlačna zona) koja usisava vanjski zrak kroz otvore. Što je veća razlika tlakova izvan i unutar zgrade, veći volumen zraka će biti u opticaju. Regulacijom efekta dimnjaka moguća je njegova upotreba u pasivnom hlađenju zgrada. Odgovarajućom konstrukcijom zgrade i njezinih otvora moguće je ostvariti protok zraka kojim se osiguravaju dovoljno veliki protoci za odvođenje toplinskih dobitaka te održava toplinska ugodnost u željenim granicama bez korištenja mehaničkog sustava.

Primjenom prirodne ventilacije u zgradi zajedno s ostalim načinima pasivnog hlađenja nastaju kuće u literaturi poznate pod nazivom pasivne kuće (eng. *near zero energy building).* Takve građevine adekvatnim korištenjem izolacije, iskorištavanjem topline Sunca te pasivnim hlađenjem ostvaruju uštede energije do 90%. [7] Za postojeće zgrade je proces prelaska na pasivno grijanje i hlađenje dosta složen, no pri gradnji novih zgrada takvi se sustavi mogu implementirati od samog početka gradnje te dobiti visoko učinkovite zgrade s niskom potrošnjom energije. Danas je u svijetu moguće naći dosta primjera zgrada koje uspješno koriste principe pasivnog hlađenja, a jedna od njih je *Solar XXI* zgrada u Lisabonu, Portugal, prikazana na Slici 1. Uredski prostor zgrade orijentiran je prema jugu kako bi se maksimalno iskoristilo dnevno svjetlo te grijanje sunčevim zračenjem. Radnim danima zgrada se koristi od 9 do 16 sati pa je u skladu s tim projektiran i plan ventilacije zgrade. Prirodna ventilacija je omogućena korištenjem otvora u fasadi te između unutarnjih prostora. Ovaj sustav, zajedno s prozorima na razini krova pridonosi efektu ventilacije korištenjem kombinirane sile vjetra i sile uzgona. Opisani primjer pokazuje kako je moguće drastično smanjiti potrebe za energijom u

zgradama te istovremeno održati istu ili čak višu razinu toplinske ugodnosti primjenjujući navedene principe. [8] [9]

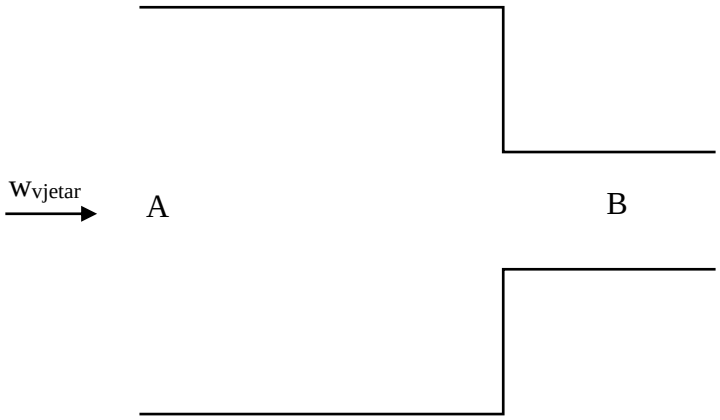


Slika 1. Primjer pasivno hlađene zgrade - Solar XXI zgrada [9]

2.1.1. Matematički model poprečne ventilacije

Pri provedbi eksperimentalnog mjerenja navedenog ranije u tekstu, u razmatranje je uzeta samo prirodna ventilacija uslijed sile vjetra. U ovom poglavlju naveden je pojednostavljeni matematički model kojim se pri projektiranju zgrada proračunava ovakav tip ventilacije. Na Slici 2. prikazana je shema uz koju se dolazi do jednadžbe za protok zraka kroz zgradu. Strujanje zraka kroz prostoriju pri ovom tipu prirodne ventilacije ostvareno je uslijed razlike tlakova u atmosferi. Prilikom djelovanja sile vjetra na strani zgrade izloženoj vjetru dolazi do nastanka pozitivne razlike tlaka između vanjskog i unutarnjeg prostora (pretlak) te na zavjetrinskoj strani zgrade stvara se negativna razlika tlaka tj. podtlačna zona. Upravo je nastanak tih zona pozitivnog i negativnog tlaka uzrok strujanju zraka kroz zgradu. Veličina koja opisuje vrijednost tlaka na pojedinoj strani zgrade naziva se koeficijent površinskog tlaka vjetra (C_p) koji se određuje mjerenjima na zgradi ili u zračnim tunelima. Vrijednost te veličine može biti pozitivna ili negativna ovisno o tome radi li se o pretlaku ili podtlaku. Uobičajene

vrijednosti koeficijenta površinskog tlaka vjetra iznose oko +0.6 na strani izloženoj vjetru, -0.5 na ravnom krovu i zavjetrinskoj strani te -0.25 na bočnim stranama.



Slika 2. Shema za izvod protoka zraka kroz prozor

Uz pretpostavljenu konstantnu temperaturu zraka, a time i gustoću te jednakost visina točaka A i B postavlja se Bernoullijeva jednadžba od točke A do točke B:

$$\frac{w_A^2}{2} + gh_A + \frac{p_A}{\rho} = \frac{w_B^2}{2} + gh_B + \frac{p_B}{\rho} \tag{1}$$

S obzirom na to da je pretpostavljena jednakost visina točaka A i B, Bernoullijeva jednadžba prelazi u sljedeći oblik:

$$\frac{w_A^2}{2} + \frac{p_A}{\rho} = \frac{w_B^2}{2} + \frac{p_B}{\rho} \tag{2}$$

Postavljanjem jednadžbe kontinuiteta $\dot{m} = \rho w A = const.$ za situaciju prikazanu na Slici 2. te uzimanjem u obzir konstantnost gustoće dobiva se sljedeći izraz za brzinu u točki A:

$$w_A = w_B \frac{A_B}{A_A} \tag{3}$$

Daljnjim uvrštavanjem jednadžbe (3) u jednadžbu (2) dobiva se konačni oblik Bernoullijeve jednadžbe

$$\frac{w_B^2}{2}\left(\frac{A_B}{A_A}\right)^2 + \frac{p_A}{\rho} = \frac{w_B^2}{2} + \frac{p_B}{\rho} \tag{4}$$

iz kojeg slijedi izraz za brzinu u točki B:

$$w_B = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho\left[1 - \left(\frac{A_B}{A_A}\right)^2\right]}} \tag{5}$$

Ako Sliku 2. prenesemo u kontekst zgrade, moguće je zamisliti da površina B predstavlja otvor na zgradi, a površina A predstavlja okoliš. Budući da je površina prozora A_B značajno manja od površine A_A slijedi zaključak da je omjer A_B/A_A približno jednak nuli. Kada se ta vrijednost uvrsti u prethodnu jednadžbu dobiva se konačni izraz za brzinu zraka u točki B:

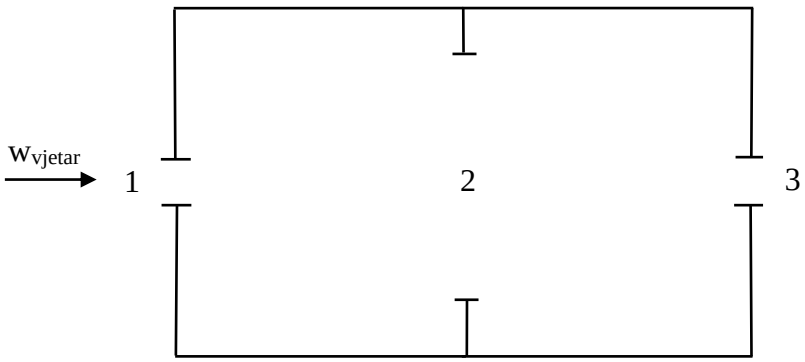
$$w_B = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{6}$$

Poznavanjem izraza za brzinu zraka kroz prozor (w_B) te površine prozora moguće je izračunati protok zraka kroz prozor kao:

$$\dot{V} = C_d A_B \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{7}$$

Pri čemu faktor C_d uzima u obzir otpor strujanju kroz otvor te mu iznos ovisi o geometriji otvora i Reynoldsovom broju, a za prozore se obično uzima C_d = 0.65.

Nakon što je izveden opći izraz za računanje volumnog protoka zraka kroz prozor potrebno je primijeniti ga na izračun poprečne ventilacije kroz zgradu, pri čemu se kreće od sheme na Slici 3. Pri tome se usvojene pretpostavke konstantne temperature pa time i gustoće te jednakost visina u presjecima 1, 2 i 3.



Slika 3. Shema poprečne ventilacije kroz zgradu

Cilj je poznavanje razlike tlaka na strani zgrade gdje se nalaze ventilacijski otvori (prozori).). Na Slici 3. je to razlika tlakova na između strane zgrade izložene vjetru te strani u zavjetrini, što je prikazano sljedećom jednadžbom:

$$(p_1 - p_3)_v = \left(C_{P1} - C_{p3}\right)\frac{\rho w_{vjetar}^2}{2} \tag{8}$$

U jednadžbi (8) javlja se veličina C_p koja predstavlja faktor površinskog tlaka vjetra, odnosno faktor kojim se u obzir uzima položaj prozora na zgradi. Faktor se najčešće dobiva eksperimentalnim mjerenjima u zračnim tunelima.

Iz jednadžbe (7) slijedi izrazi za pad tlaka u pojedinom presjeku zgrade prema Slici 3.

$$\Delta p_1 = \frac{V_1^2}{A_1^2 C_d^2}\frac{\rho_1}{2} \tag{9}$$

$$\Delta p_2 = \frac{V_2^2}{A_2^2 C_d^2}\frac{\rho_2}{2} \tag{10}$$

$$\Delta p_3 = \frac{V_3^2}{A_3^2 C_d^2}\frac{\rho_3}{2} \tag{11}$$

Na temelju usvojene pretpostavke o konstantnoj gustoći u svim otvorima zgrade iz jednadžbe kontinuiteta ($m = \rho V$) dolazi se do zaključka o jednakosti volumnih protoka:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V \tag{12}$$

Uzimajući u obzir zaključak iz prethodne jednadžbe i primjenjujući ga na jednadžbe (9) - (11) te njihovim zbrajanjem dobiva se suma padova tlaka na otvorima zgrade:

$$\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 = \frac{V^2}{C_d^2}\frac{\rho}{2}\left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \frac{1}{A_3^2}\right) \tag{13}$$

Iz jednadžbi (8) i (13) vidljiva je jednakost njihovih lijevih strana, a da bi bio zadovoljen znak jednakosti i njihove desne strane moraju biti jednake:

$$\left(C_{p1} - C_{p3}\right)\frac{\rho w_{vjetar}^2}{2} = \frac{V^2}{C_d^2}\frac{\rho}{2}\left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \frac{1}{A_3^2}\right) \tag{14}$$

Sređivanjem jednadžbe (14) slijedi izraz za računanje volumnog protoka zraka kroz zgradu za prirodnu ventilaciju uzrokovanu djelovanjem sile vjetra:

$$\dot{V} = C_d\sqrt{C_{p1} - C_{p3}}\, A_{eff} w_{vjetar} \tag{15}$$

U jednadžbi (15) se javlja pojam efektivne površine koja se računa na sljedeći način:

$$A_{eff} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \frac{1}{A_3^2}}} \tag{16}$$

Općenito efektivna površina ovisi o svim površinama kroz koje struji zrak te se za broj otvora *i* spojenih u nizu (serijski) računa na sljedeći način:

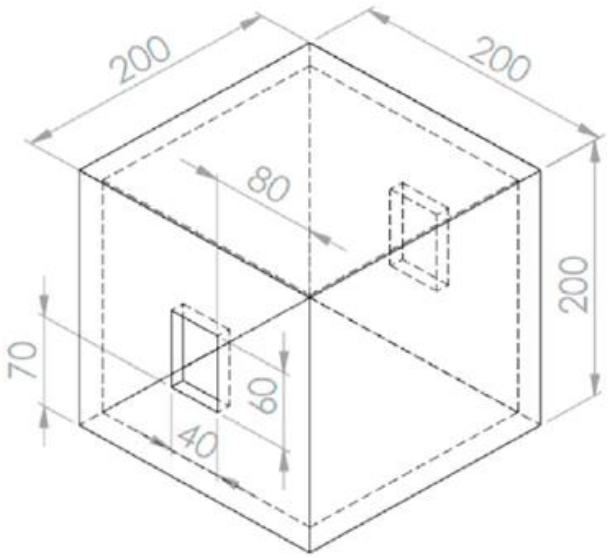
$$A_{eff} = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \frac{1}{A_i^2}}} \tag{17}$$

Iz jednadžbe (17) vidljivo je da je efektivna površina uvijek manja od najmanje površine otvora u zgradi te je posljedično efektivni otpor uvijek veći od najvećeg. Iz toga se zaključuje da ukupni otpor strujanju zraka kroz zgradu pri prirodnoj ventilaciji najviše ovisi o površini najmanjeg otvora. Ako se koeficijent lokalnog otpora strujanja C_d razlikuje među otvorima, efektivni produkt površine i koeficijenta lokalnog otpora strujanja računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$(AC_d)_{eff} = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \frac{1}{(A_i C_{di})^2}}} \tag{18}$$

3. ULAZNI PARAMETRI

Zgrada na kojoj je izvršena analiza prototip je generičke „zgrade“ nad kojom su provedena eksperimentalna mjerenja prikazana u spomenutom znanstvenom članku. Cilj eksperimenta bilo je ispitivanje broja izmjena zraka pri poprečnoj prirodnoj ventilaciji za model prikazan na Slici 4. Kao što je vidljivo, model je relativno mala kocka, duljine stranica 200 mm. Kako bi se ispitao potencijal hlađenja prirodnom ventilacijom na modelu su napravljeni otvori dimenzija 40 x 60 mm na nasuprotnim stranicama. Prilikom nastrujavanja zraka na kocku, dolazi do strujanja zraka kroz njezine otvore. Drugim riječima, postiže se određeni broj izmjena zraka u satu ovisno o ulaznim parametrima te se u konačnici postiže efekt hlađenja u slučaju da je temperatura vanjskog zraka niža od temperature u kocki.



Slika 4. Model generičke zgrade [4]

U radu provedena je usporedba računalnog modela i eksperimentalnih mjerenja za opisanu kocku, a u svrhu analize točnosti računalnog modela pri izračunu pasivnog hlađenja. Pri skaliranju korišten je koeficijent sličnosti za duljinu C_l, koji predstavlja omjer duljina odgovarajućih stranica prototipa i modela. Koeficijent se upotrebljava u svrhu preslikavanja rezultata s modela na prototip. Osim koeficijenta sličnosti za duljinu, moguća je i usporedba na temelju svih ostalih fizikalnih veličina koje se javljaju u opisanoj pojavi. U znanstvenom članku zadan je koeficijent sličnosti za duljinu $C_l = 250$ te su njegovom primjenom na model dobivene dimenzije prototipa zgrade. Analizirana zgrada tada ima dimenzije stranica 50 x 50 x 50 m i dimenzije otvora 10 x 15 m.

3.1. Svojstva ovojnice

Osim dimenzija, za modeliranje analizirane zgrade potrebno je poznavati i svojstva njezine ovojnice te pogonske režime. Kako bi simulacija te rezultati koji pokazuju potencijal pasivnog hlađenja prirodnom ventilacijom bili realni korišteni su referentni podaci za nZEB obrazovnu zgradu. Kratica nZEB stoji za zgradu gotovo nulte energije (eng. *nearly zero-energy building)*, što znači da zgrada ima vrlo visoka energetska svojstva. Generička zgrada sastoji se od 4 vanjska zida, poda, ravnog krova te 2 prozora. Svaki od tih građevinskih elemenata sastoji se od određenih slojeva s ciljem postizanja što boljih termodinamičkih svojstava. Podaci o slojevima, njihovim debljinama te potrebnim svojstvima navedenih materijala nalaze se u Tablicama 1. – 4.

Tablica 1. Slojevi vanjskih zidova

Materijal	Debljina [cm]
Armirani beton	20
Mineralna vuna	20
Polimer-cementna žbuka armirana staklenom mrežicom	0,3
Silikatna žbuka	0,2

Tablica 2. Slojevi ravnog krova

Materijal	Debljina [cm]
Armirani beton	20
Parna brana – bitumenska trake 4 mm s uloškom od Al folije	0,02
Mineralna vuna	24
Polimerna hidroizolacijska trake na bazi PIB	0,02

Tablica 3. Slojevi poda

Materijal	Debljina [cm]
Epoksi smola	0,3
Cementni estrih	6
PE folija	0,02
Stiropor EPS T	2

Stiropor EPS 150	10
Višeslojne polimer-bitumenske hidroizolacijske trake	1

Tablica 4. Svojstva materijala vanjske ovojnice zgrade

Materijal	Specifični toplinski kapacitet c [J/kgK]	Gustoća ρ [kg/m^3]	Toplinska provodnost λ [W/mK]
Armirani beton	1000	2500	2,6
Mineralna vuna	1030	50	0,035
Polimer-cementna žbuka armirana staklenom mrežicom	1000	1100	0,7
Silikatna žbuka	1050	1850	0,87
Parna brana – Bitumenska traka 4 mm s uloškom od Al folije	940	2700	203
Polimerna hidroizolacijske traka na bazi PIB	960	1600	0,26
Epoksi smola	1400	1200	0,2
Cementni estrih	1100	2000	1,6
PE folija	1250	1000	0,19
Stiropor EPS T	1260	12	0,042
Stiropor EPS 150	1260	25	0,036
Višeslojne polimer-bitumenske hidroizolacijske trake	1000	1100	0,23

Na modelu kocke, za koji je provedeno eksperimentalno mjerenje u zračnom tunelu, napravljeni su otvori na nasuprotnim stranama. Otvori na skaliranom prototipu, odnosno zgradi za koju je izvršena numerička analiza predstavljaju prozore. Pretpostavljeno je da se prozori nalaze na sjevernom i južnom pročelju zgrade jer je u Zagrebu za te orijentacije najčešći smjer vjetra. Površina otvora na modelu zauzima 6% površine zida te se primjenom koeficijenta sličnosti za duljinu C_l održava takav omjer i na prototipu. Svojstva prozora odabrana su iz baze

podataka računalnog programa TRNSYS, a na temelju referentnih podataka za nZEB zgradu. Svojstva za prozor na jugu te na sjeveru navedena su u Tablica 5. i Tablica 6.

Tablica 5. Podaci za prozor na jugu

Koeficijent prolaza topline stakla, U [W/m^{2}K]	0,7
Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, g [-]	0,407

Tablica 6. Podaci za prozor na sjeveru

Koeficijent prolaza topline stakla, U [W/m^{2}K]	1,1
Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, g [-]	0,598

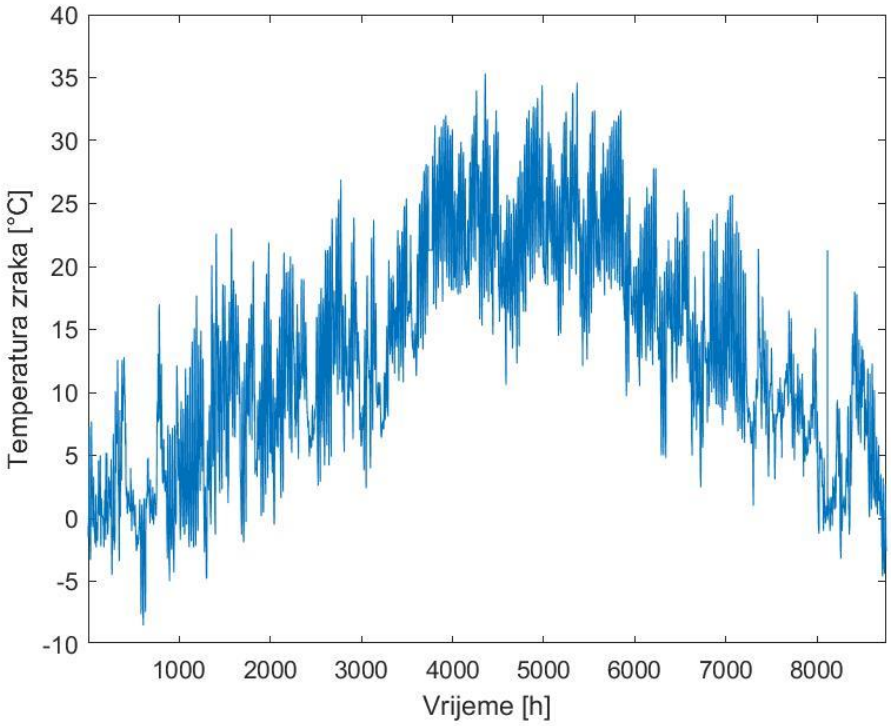
3.2. Pogonski režimi

Infiltracija za referentnu nZEB obrazovnu zgradu iznosi 0,7 h^{-1}. Međutim, kako se u slučaju analizirane zgrade radi o iznimno velikom volumenu (V = 125000 m3), takva infiltracija rezultirala bi znatnim potrebama za grijanje u zimskim mjesecima te zanemarivim potrebama za hlađenje u prijelaznim i ljetnim mjesecima. Stoga je infiltracija zanemarena u analizi, odnosno, pretpostavljena je vrijednost infiltracije od je 0 h^{-1}, kako bi se dobila realnija slika potrebne energije za grijanje i hlađenje.

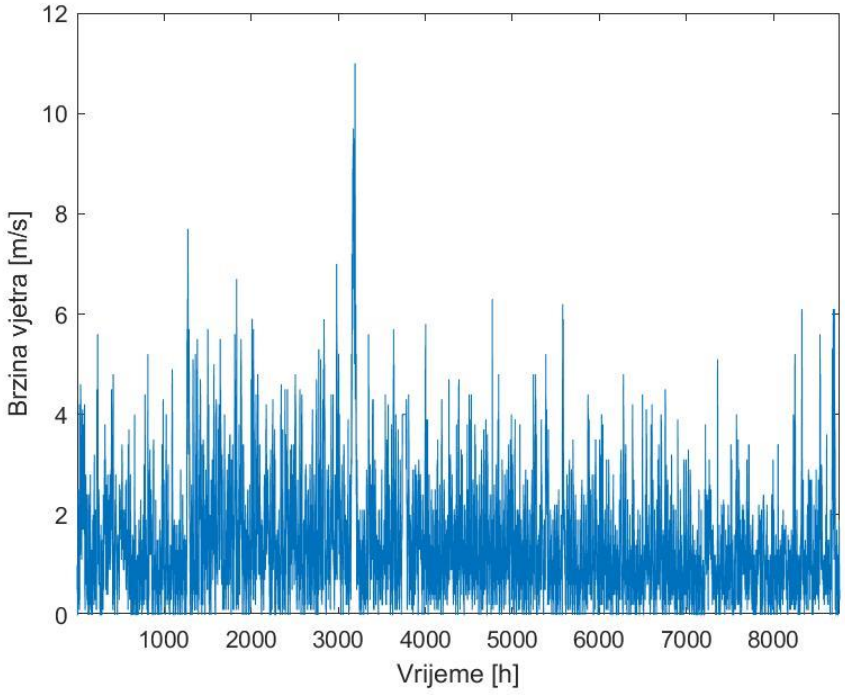
Pretpostavljeno je da se zgrada koristi 5 dana u tjednu u periodu od 6:00 do 20:00. Izvan tog vremena nema unutarnjih toplinskih dobitaka te je pretpostavljeno da su sustavi grijanja i hlađenja isključeni. Pretpostavljena vrijednost unutarnjih toplinskih dobitaka tijekom perioda korištenja zgrade je 10 W/m^{2}K, što za zgradu takvog volumena predstavlja iznimno veliku količinu toplinske energije. Postavna temperatura za hlađenje iznosi 22°C.

3.3. Meteorološki podaci

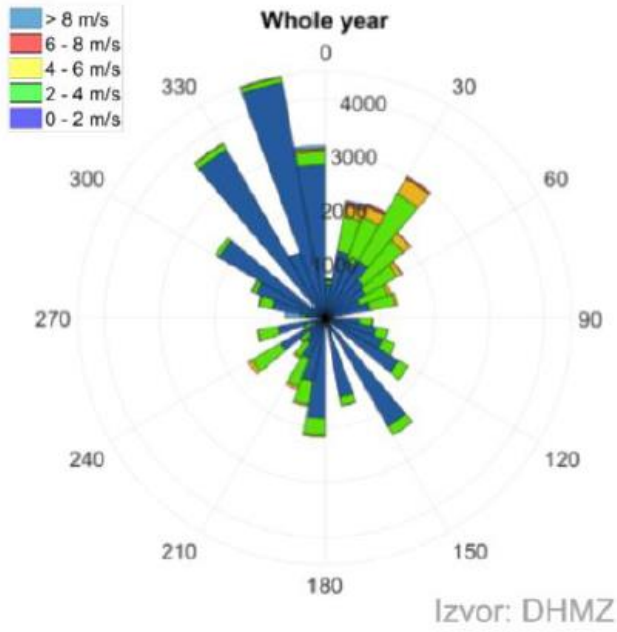
Za meteorološke podatke (relativna vlažnost, fiktivna temperatura neba i tla, kut upada Sunčevog zračenja i Sunčevo zračenje) korištene su satne vrijednosti za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb, dok su podaci o satnim vrijednostima vanjske temperature te smjera i brzine strujanja vjetra u gradu Zagrebu korišteni podaci DHMZ-a za 2019. godinu. Na Slikama 5. – 7. prikazane su redom satne vrijednosti vanjske temperature zraka, brzina strujanja vjetra te ruža vjetrova sa smjerovima nastrujavanja.



Slika 5. Temperature vanjskog zraka tijekom 2019. godine



Slika 6. Brzine vjetra tijekom 2019. godine



Slika 7. Ruža vjetrova za meteorološku postaju Zagreb - Maksimir, 2019. godina [12]

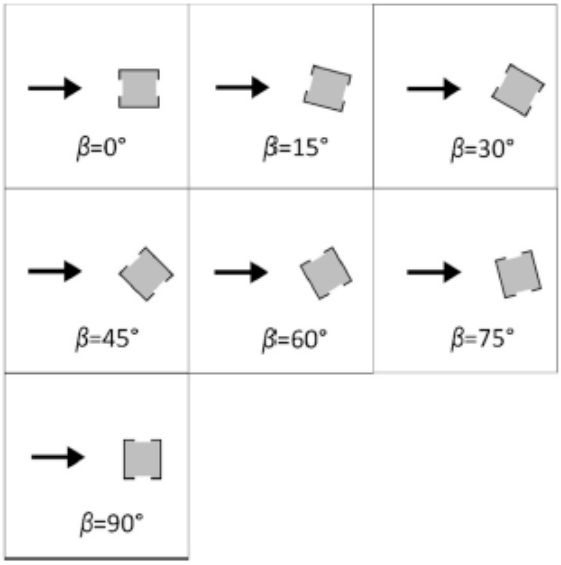
3.4. Protok zraka

Protok zraka je osnovni parametar na temelju kojeg se zaključuje o prirodnoj ventilaciji. Korištenjem programskog jezika MATLAB i pojednostavljenog modela opisanog u poglavlju 2.1.1. izračunate su vrijednosti protoka zraka za svaki sat u godini sa stvarnim vrijednostima brzina i smjerova vjetra. Proračun je proveden za dvije prostorne konfiguracije zgrade. Prva konfiguracija je izložena zgrada tj. zgrada koja stoji samostalno u prostoru, a druga konfiguracija je zaklonjena zgrada gdje je promatrana zgrada okružena drugim građevinama. Također provedena je usporedba rezultata protoka zraka za slučaj matematičkog modela i rezultata dobivenih na temelju eksperimentalnih mjerenja.

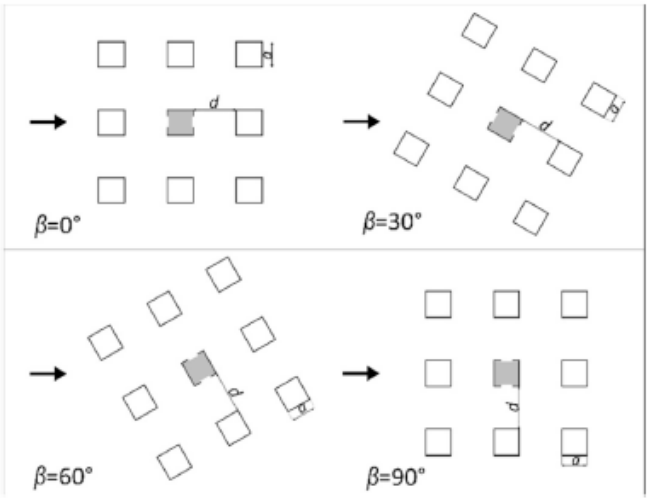
3.4.1. Eksperimentalna mjerenja

Eksperimentalna mjerenja provedena su u zračnom tunelu s implementiranim turbulentnim graničnim slojem tj. površinskim slojem. Turbulentni sloj je omogućio realan prikaz vanjskog okoliša. Eksperiment je proveden nastrujavanjem zraka na model kocke pri različitim kutevima (Slika 8.). Svako mjerenje provedeno je za 3 različite brzine: 3, 5 i 7 m/s. Kao rezultat mjerenja dobiven je podatak o broju izmjena zraka na temelju mjerenja promjene masene koncentracije CO_2 unutar kocke. Pri provođenju eksperimenta za zaštićenu zgradu, oko promatranog modela zgrade postavljeno je 8 jednakih modela u konfiguraciju 3 x 3. Mjerenje

je ponovljeno za svaku od zadanih brzina te za različite udaljenosti između modela zgrada. Također, mjerenje je provedeno za različite kuteve nastrujavanja zraka: 0, 30, 60 i 90 stupnjeva kako je prikazano na Slici 9.

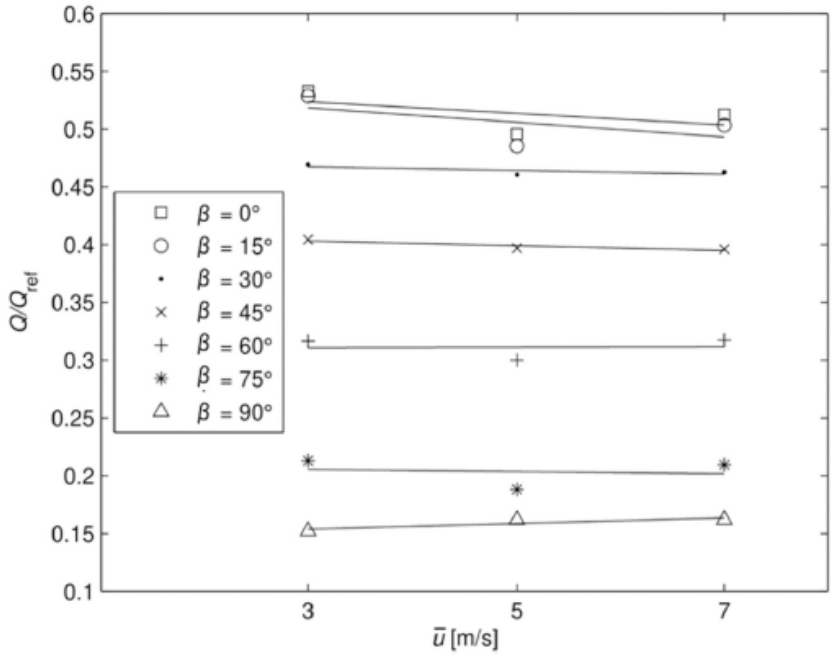


Slika 8. Kutevi nastrujavanja zraka pri eksperimentalnom mjerenju [4]

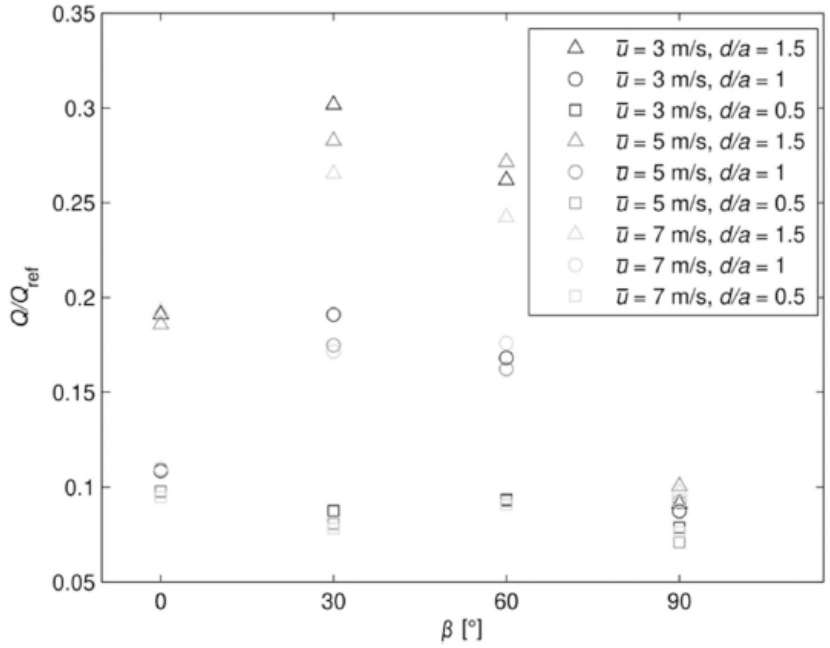


Slika 9. Konfiguracija zaklonjene zgrade pri različitim kutevima nastrujavanja [4]

S obzirom na to da su vrijednosti C_{p1} i C_{p3} poznate za vrijednosti kuteva od 0, 45 i 90 stupnjeva te je za navedene izračunat omjer Q/Q_{ref}, iz dijagrama na Slici 10. očitane su vrijednosti Q/Q_{ref} za iste te kuteve kako bi usporedba bila moguća. Za zaklonjenu zgradu poznate su vrijednosti za kuteve od 0, 30, 60 i 90 stupnjeva (Slika 11.) pa se interpolacijom došlo do vrijednosti Q/Q_{ref} za tražene kuteve. Protok zraka za slučaj kuta nastrujavanja od 90° u daljnjem proračunu jednak je nuli.



Slika 10. Q/Q_{ref} u ovisnosti o brzini i kutu za izloženu zgradu [4]



Slika 11. Q/Q_{ref} u ovisnosti o kutu nastrujavanja s brzinom i udaljenosti kao parametrima, zaklonjena zgrada [4]

3.4.2. Matematički model

Volumni protok zraka kroz zgradu za prirodnu ventilaciju uzrokovanu djelovanjem sile vjetra, kao što je slučaj ove analize, računa se prema izrazu (15). Kako bi rezultati bili usporedivi s rezultatima dobivenim eksperimentalnim mjerenjem prikazani su u obliku omjera volumnog protoka zraka i referentnog volumnog protoka zraka. Referentni protok predstavlja umnožak površine prozora te brzine nastrujavanja okomito na njega, što zapravo daje maksimalni mogući protok u danim uvjetima.

Pri analizi prirodne ventilacije uslijed sile vjetra rijetka je pojava okomitog nastrujavanja vjetra na otvor zgrade pa se tako različiti kutovi nastrujavanja vjetra na zgradu uzimaju u obzir kroz faktor površinskog tlaka vjetra koji ima različite vrijednosti ovisno o kutu nastrujavanja. Korištene vrijednosti faktora C_{p1} i C_{p3} prikazane su u Tablica 7. i Tablica 8.

Tablica 7. Vrijednosti koeficijenata površinskog tlaka vjetra za izloženu zgradu [11]

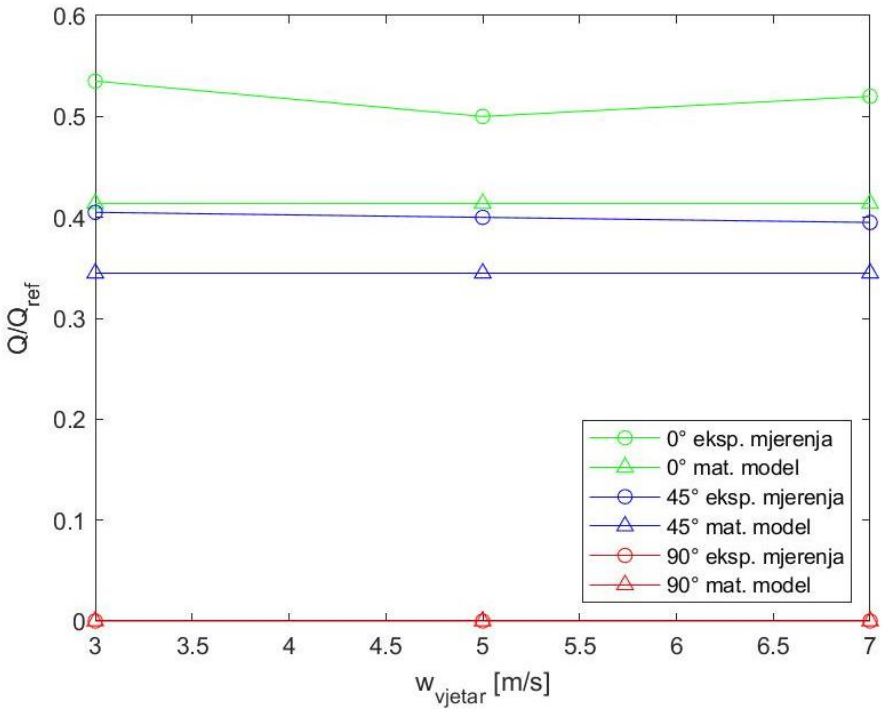
Koeficijent površinskog tlaka vjetra, C_p	Kut nastrujavanja vjetra, α [°]		
	0	45	90
C_{p1}, privjetrina	0,7	0,35	-0,5
C_{p3}, zavjetrina	-0,2	-0,4	-0,5

Tablica 8. Vrijednosti koeficijenata površinskog tlaka vjetra za zaklonjenu zgradu [11]

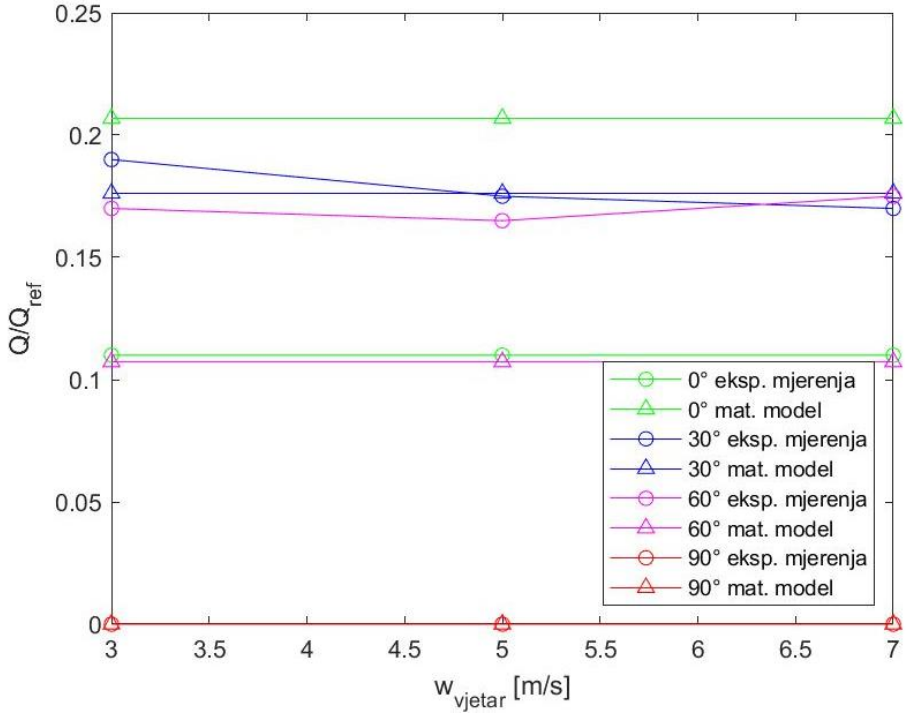
Koeficijent površinskog tlaka vjetra, C_p	Kut nastrujavanja vjetra, α [°]		
	0	45	90
C_{p1}, privjetrina	0,2	0,05	-0,25
C_{p3}, zavjetrina	-0,25	-0,3	-0,25

U tablicama su dane vrijednosti koeficijenata površinskog tlaka vjetra za kuteve 0, 45 i 90 stupnjeva te je za navedene kuteve izvršen proračun volumnog protoka zraka prema jednadžbi (15). Ulazni podaci za brzine vjetra pri izračunu protoka su upravo brzine koje su korištene pri provedbi eksperimentalnih mjerenja. Rezultat koji je u konačnici potreban za daljnju usporedbu s rezultatima eksperimenta dobiva se nakon dijeljenja vrijednosti protoka zraka s referentnim protokom pri svakoj od navedenih brzina.

3.4.3. Usporedba protoka zraka dobivenog matematičkim modelom i eksperimentalnim mjerenjima



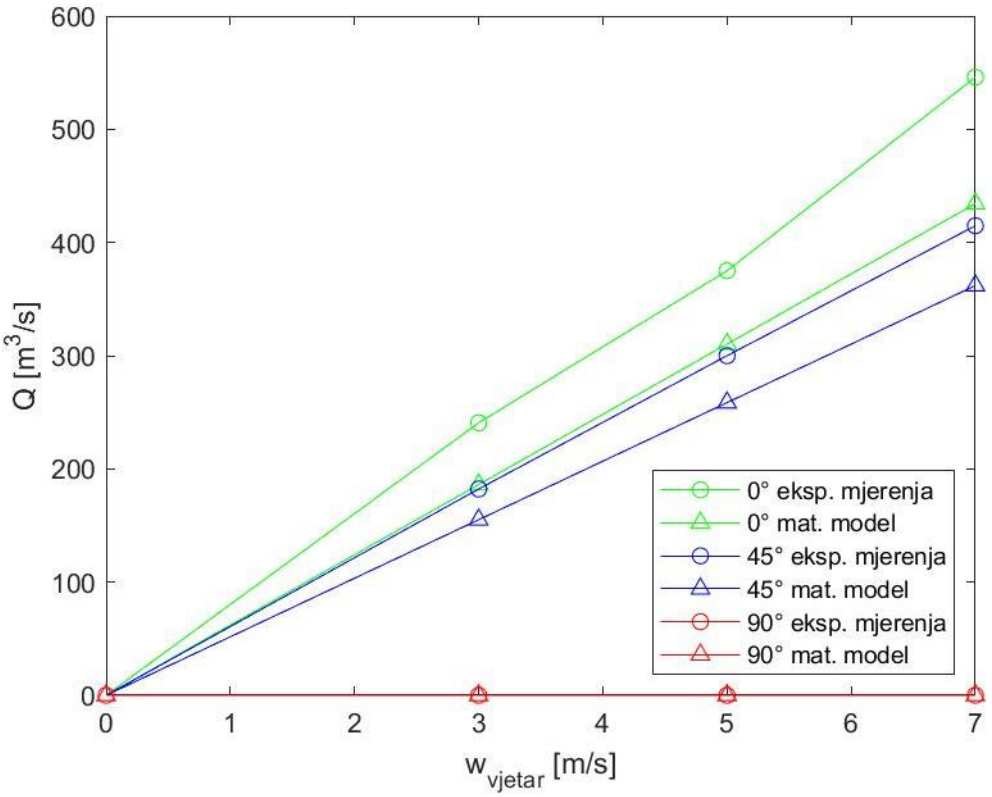
Slika 12. Usporedba rezultata matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja za izloženu zgradu



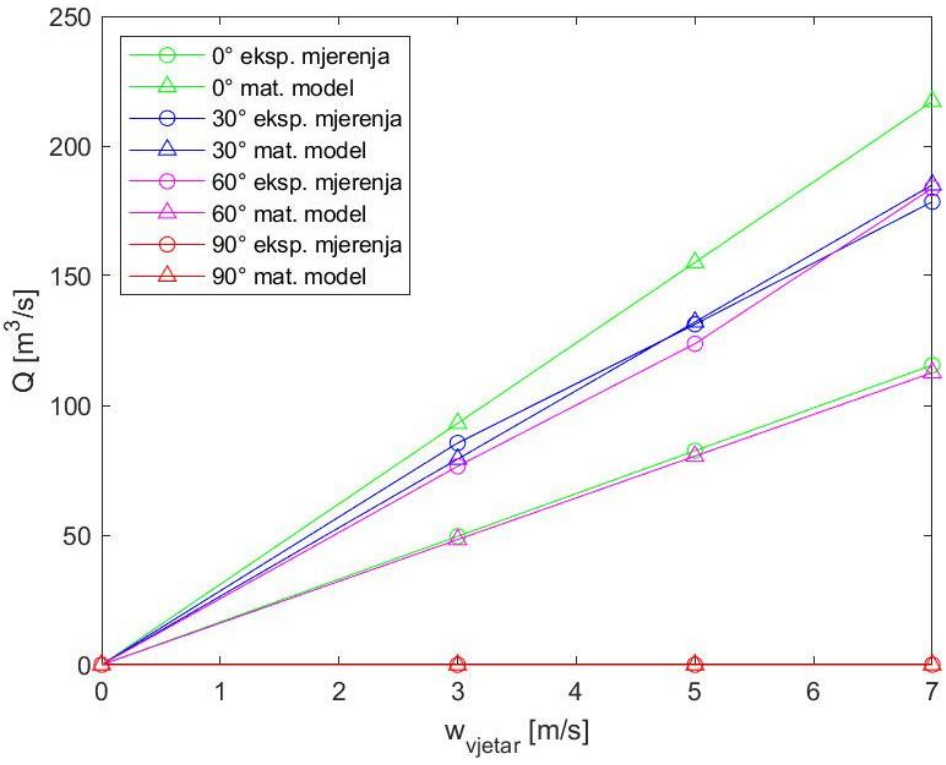
Slika 13. Usporedba rezultata matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja za zaklonjenu zgradu

Na dijagramu prikazanom na Slici 12. vidljive su razlike u rezultatima koje nastaju korištenjem opisanih jednadžbi u odnosu na provedeni eksperiment. Pri kutevima 0 i 45 stupnjeva uočen je veći protok zraka u eksperimentalnim mjerenjima u odnosu na matematički model što vodi do zaključka da je ušteda energije pasivnim hlađenjem prirodnom ventilacijom u stvarnosti veća od izračunate tj. da je proračunom poddimenzionirana. Pri provođenju eksperimenta implementiran je i turbulentni granični sloj, što u matematičkom modelu nije uzeto u obzir te je to jedan od mogućih uzroka ovakvim razlikama. Pri kutu nastrujavanja od 90° protok zraka jednak je nuli u oba slučaja što je i jedini smisleni ishod analize jer vjetar napuhuje paralelno s otvorima pa protok nije niti moguć. Također je iz dijagrama vidljiva i linearna ovisnost omjera stvarnog i referentnog protoka o brzini nastrujavanja pri eksperimentalnim mjerenjima za svaki kut nastrujavanja, no ta ovisnost nije značajna što pokazuje vrlo mali nagib pravca. Za matematički model vidljivo je da omjer stvarnog i referentnog protoka nije funkcija brzine nego samo kuta nastrujavanja, što je i pokazano provedenim proračunom. Međutim, protok ovisi o brzini nastrujavanja što je prikazano dijagramom na Slici 14. gdje je vidljiv linearni rast protoka s porastom brzine.

Iz rezultata prikazanih u dijagramu na Slici 13. teško je doći do konkretnog zaključka o razlikama u vrijednosti protoka pri korištenju matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja jer ovisno o kutu nastrujavanja razlike između njih variraju. Za kut nastrujavanja zraka na otvore od 0° vidljiva je veća vrijednost Q/Q_{ref} za slučaj korištenja matematičkog modela u odnosu na mjerenje što je obrnut slučaj od rezultata dobivenih na temelju analize izložene zgrade. Rezultati dobiveni za kut nastrujavanja zraka od 60° slažu se s rezultatima dobivenim pri analizi izložene zgrade, dakle veće vrijednosti protoka javljaju se pri eksperimentalnim mjerenjima u odnosu na korištenje matematičkog modela. Za slučaj kuta nastrujavanja od 30° javlja se posebna situacija, a to je približno poklapanje rezultata matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja. Na temelju opisanog može se doći do zaključka da je za kuteve nastrujavanja zraka manje od 30° sustav prirodne ventilacije predimenzioniran tj. uštede energije su zapravo manje nego očekivane, a za kuteve nastrujavanja veće od 60° sustav je poddimenzioniran tj. javljaju se veći protoci zraka u odnosu na izračunate te samim time su uštede veće. Očekivani rezultati javljaju se za kut nastrujavanja od 90° gdje su vrijednosti protoka jednake nuli za oba slučaja. Na dijagramu na Slici 15. prikazana je ovisnost protoka zraka kroz zaklonjenu zgradu o kutu nastrujavanja i brzini vjetra. Vidljiv je porast protoka s porastom iznosa brzine, no protoci ne dosežu vrijednosti kakve dosežu u slučaju izložene zgrade što je posljedica urbanog okruženja. Dakle, u ovom slučaju je za očekivati manje uštede potrebne energije za hlađenje nego u slučaju izložene zgrade zbog smanjenih protoka.



Slika 14. Ovisnost protoka zraka o kutu i brzini vjetra, izložena zgrada



Slika 15. Ovisnost protoka zraka o kutu i brzini vjetra, zaklonjena zgrada

Dijagramskim prikazom danim na Slici 14. i 15. potvrđena je točnost jednadžbe (15) koja za rezultat daje protok zraka u linearnoj ovisnosti o brzini vjetra. Najveći protoci zraka javljaju se pri direktnom nastrujavanju vjetra na površinu prozora, što odgovara kutu od 0 stupnjeva. Promatrajući jedan kut nastrujavanja vidljive su veće vrijednosti protoka za eksperimentalna mjerenja. Takva situacija je vrlo pogodna za proračun potencijala hlađenja prirodnom ventilacijom jer pokazuje da su protoci u realnim uvjetima čak veći nego oni izračunati jednadžbom (15). Protok zraka je naravno jednak nuli za dva slučaja: kad je brzina vjetra jednaka nuli tj. vjetra uopće nema te za slučaj nastrujavanja vjetra paralelno s otvorima na zgradi.

3.4.4. Izračun protoka za različite parametre strujanja vjetra

S obzirom na to da se vrijednosti kuteva nastrujavanja vjetra u realnim uvjetima nalaze između 0 i 360 stupnjeva te se vrijednosti brzine također razlikuju iz sata u sat (Slika 7.) potrebno je provesti postupak interpolacije poznatih podataka kako bi se došlo da traženog rješenja. Na temelju izračunatih vrijednosti protoka za kuteve 0, 45 i 90 stupnjeva te simetričnosti problema, dobivene vrijednosti moguće je prenijeti na sljedeće kuteve nastrujavanja: 135°, 180°, 225°, 270°, 315° i 360°. Na taj način obuhvaćeni su svi mogući smjerovi vjetra te je omogućena relativno jednostavna interpolacija između tih podataka korištenjem funkcije *interp2* u MATLAB-u. Funkcija *interp2* predstavlja 2-D interpolaciju tj. interpolaciju funkcije koja ovisi o dvije varijable, što su u ovom slučaju kut nastrujavanja vjetra i brzina vjetra. Konačni rezultat do kojeg je potrebno doći opisanim proračunom je protok zraka za svaki sat u godini koristeći realne vrijednosti brzina i smjerova vjetra.

S obzirom na to da postoje sati u godini kada je brzina vjetra iznad 7 m/s te u tom slučaju nije moguća provedba interpolacije, u MATLAB-u je napisan kod koji daje vrijednosti protoka za takve brzine jednake protoku za 7 m/s. Takva pretpostavka ne nosi sa sobom negativne posljedice na proračun jer brzina vjetra u Zagrebu rijetko doseže takve iznose. Što se tiče brzina manjih od 3 m/s problem je riješen jednostavnom činjenicom da je za brzinu od 0 m/s protok također jednak nuli. Na taj način obuhvaćen je interval brzina između 0 i 3 te je omogućena interpolacije za vrijednosti brzina unutar njega (što je za Zagreb najčešće i slučaj). Također za potrebe proračuna potencijala pasivnog hlađenja uveden je „sustav upravljanja“ na način da je u MATLAB-u definirana funkcija koja za temperature vanjskog zraka jednake ili više od 22°C (što je postavna temperatura za hlađenje) daje vrijednosti protoka zraka 0. Na ovaj način opisano je zapravo zatvaranje prozora kada su temperature zraka previsoke te protok takvog zraka ne može pridonijeti hlađenju zgrade. Konačni rezultat opisanog proračuna za izloženu zgradu mora biti protok zraka u kg/h za svaki sat u godini te kao takav biti ispisan u tekstualnoj datoteci koja se unosi u *Simulation Studio* kao *Input* za prirodnu ventilaciju.

4. OPIS RADA U RAČUNALNOM PROGRAMU TRNSYS

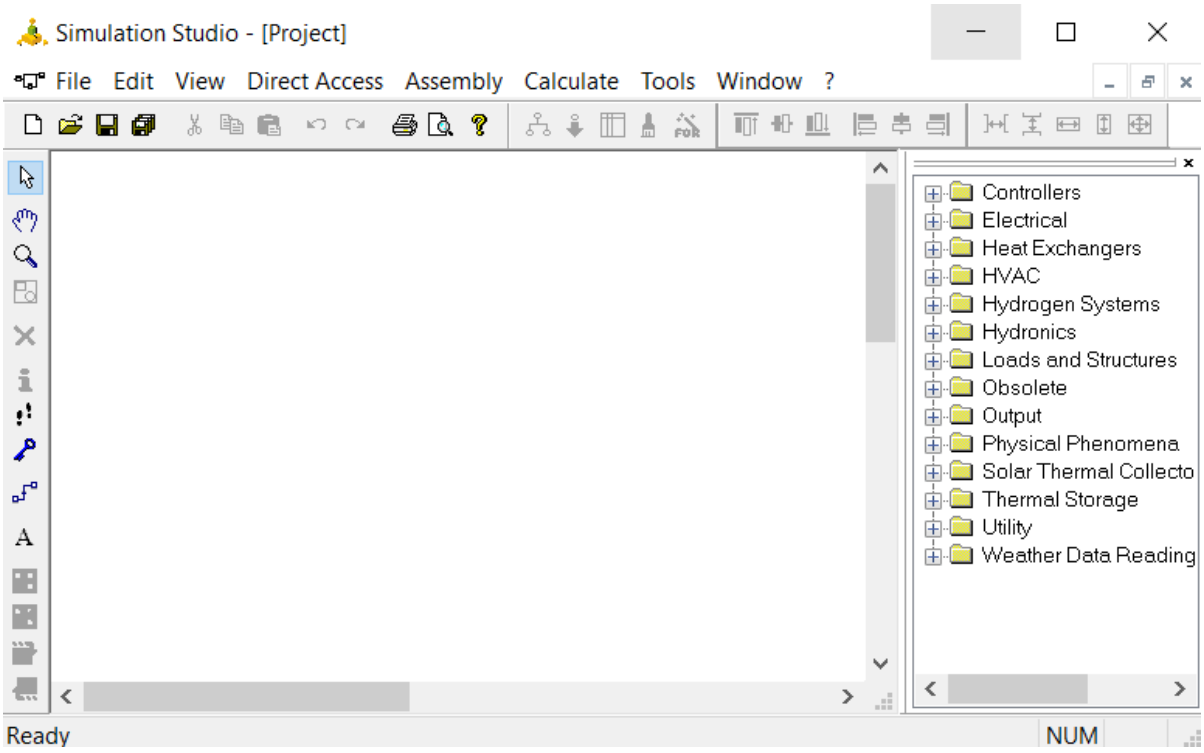
Računalni program TRNSYS (*Transient System Simulation Program*) korišten je u ovom radu za izračun potrebne energije za hlađenje analizirane zgrade, za svaki dan u godini. TRNSYS se općenito u praksi koristi za provedbu dinamičkih simulacija raznih sustava pri čemu najčešće za analizu raznih energetskih sustava (solarni sustavi, niskoenergetske zgrade, HVAC sustavi, sustavi obnovljive energije, kogeneracijski sustavi i sl.). Međutim, može biti korišten i za analizu ostalih dinamičkih sustava, kao što su prometni sustav ili određeni biološki procesi. [10]

Pri radu u računalnom programu TRNSYS koriste se dva korisnička sučelja: Simulation Studio te TRNBuild. Simulation Studio je glavno korisničko sučelje u kojem se definiraju postavke te provode dinamičke simulacije sustava. U njemu se spajaju modeli pojedinih komponenti analiziranog sustava, primjerice model koji opisuje solarni kolektor, model spremnika vode te model potrošnje tople vode. Svaka komponenta unutar sučelja Simulation Studio definirana je nazivom Type te pripadajućim brojem, pa se tako višezonska zgrada može naći pod imenom Type56. Osim spomenute komponente višezonske zgrade, u ovom radu korištena je i komponenta Type9e za čitanje tekstualnih datoteka te komponenta Type25c koja se koristi za ispis izlaznih vrijednosti u tekstualnu datoteku. Detaljniji opis navedenih komponenti te način rada u sučelju Simulation Studio nalazi se u poglavlju 4.1.

Spomenuta komponenta Type56 koristi se za provedbu dinamičke simulacije višezonske zgrade. Jedan od ulaznih parametara te komponente je datoteka koja sadrži opis svih relevantnih parametara zgrade, a koja se definira korištenjem sučelja TRNBuild. Svojstva zidova, ravnog krova, poda te prozora unose se u TRNBuild te se na taj način definira model zgrade. Osim svojstava ovojnice definiraju se i pogonski režimi grijanja i hlađenja, unutarnji toplinski dobici, infiltracija i ostali parametri. Rad u opisanom korisničkom sučelju detaljnije je opisan u poglavlju 4.2.

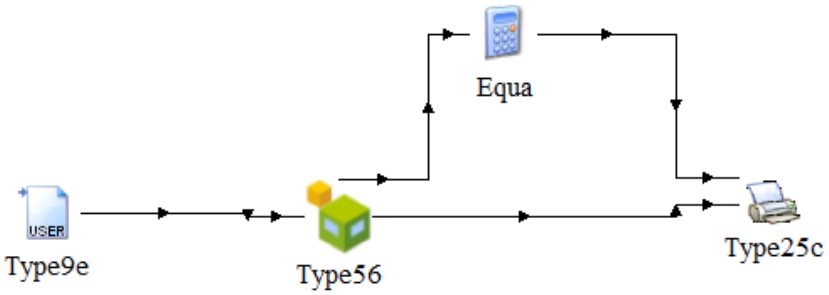
4.1. Opis rada u TRNSYS korisničkom sučelju Simulation Studio

Simulation Studio glavno je korisničko sučelje računalnog programa TRNSYS. Kao što je već rečeno, koristi se za povezivanje komponenti koje čine sustav te za njegovu simulaciju, u svrhu dobivanja željenih rezultata. Glavni izlazni podatak u ovom radu je potrebna energija za hlađenje u ovisnosti o intenzitetu prirodne ventilacije uslijed strujanja vjetra. Glavno sučelje novog projekta prikazano je na Slici 16. gdje je na desnoj strani sučelja vidljivo drvo s granama pojedinih TRNSYS komponenata, a na lijevoj strani traka s alatima. Najveći dio prozora zauzima središnji dio u kojem se spajaju pojedine komponente sustava.



Slika 16. Početni zaslon korisničkog sučelja Simulation Studio

Tijekom korištenja sučelja Simulation Studio u svrhu ovog rada upotrijebljene su i povezane tri komponente: Type9e, Type56 te Type25c kao što je prikazano na Slici 17. Povezivanje komponenti izvršeno je odabirom alata *Link* s lijeve strane korisničkog sučelja te jednostavnim spajanjem izlaza jedne komponente s ulazom druge. TRNSYS komponenta Type9e namijenjena je za čitanje tekstualnih datoteka, a do nje se dolazi preko *Utility* → *Data Readers* → *Generic Data Files* → *Expert Mode* → *Free Format* → *Type9e*. U ovom slučaju korištena je za učitavanje .dat datoteke s meteorološkim podacima te je spojena na komponentu Type56. Ta komponenta predstavlja višezonsku zgradu, a do nje se dolazi preko *Loads and Structures* → *Multi-Zone Building* → *Type56.* Predstavlja skup jednadžbi tj. funkciju ulaznih varijabli i koristi se za izračun određene izlazne varijable koje bi u ovom slučaju bile unutarnja temperatura zraka te potrebna energija za hlađenje (i grijanje). Osim meteoroloških podataka koji su spojeni na komponentu Type56 potrebni ulazni parametri su i geometrija zgrade, svojstva ovojnice te pogonski režimi koji se u komponentu učitavaju iz modela izrađenog u TRNBuild-u. Osim navedenih komponenti na Slici 17. je vidljiva i upotreba alata *Equation* radi preračunavanja mjerne jedinice izlazne varijable iz kJ/h u kWh koja predstavlja energiju. Posljednja korištena komponenta je Type25c čija je funkcija stvaranje tekstualne datoteke ekstenzije .out s vrijednostima izlaznih varijabli, a do nje se dolazi preko Output → Printer → Unformatted → No Units → Type25c. Na nju se spajaju izlazi iz Type56 te Equa jer oni predstavljaju vrijednosti koje su rezultat provedene simulacije.

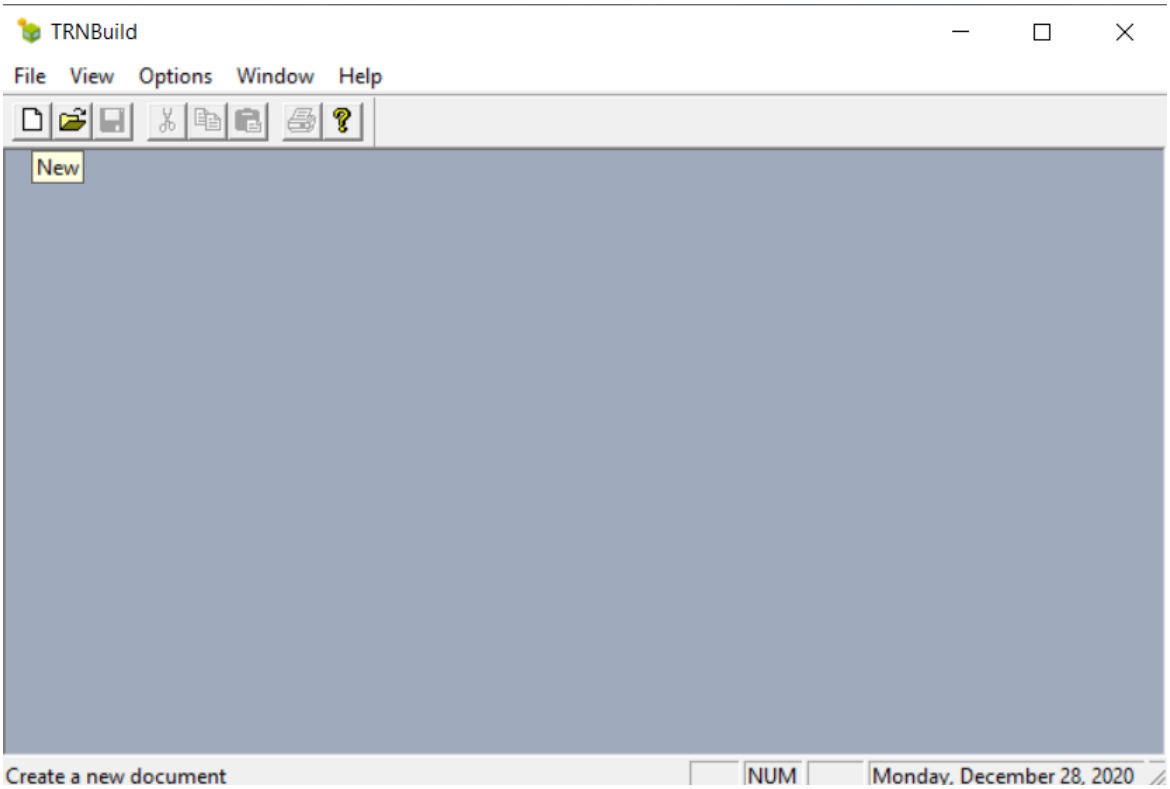


Slika 17. Prikaz korištenih komponenti unutar sučelja Simulation Studio

4.2. Opis rada u TRNSYS korisničkom sučelju TRNBuild

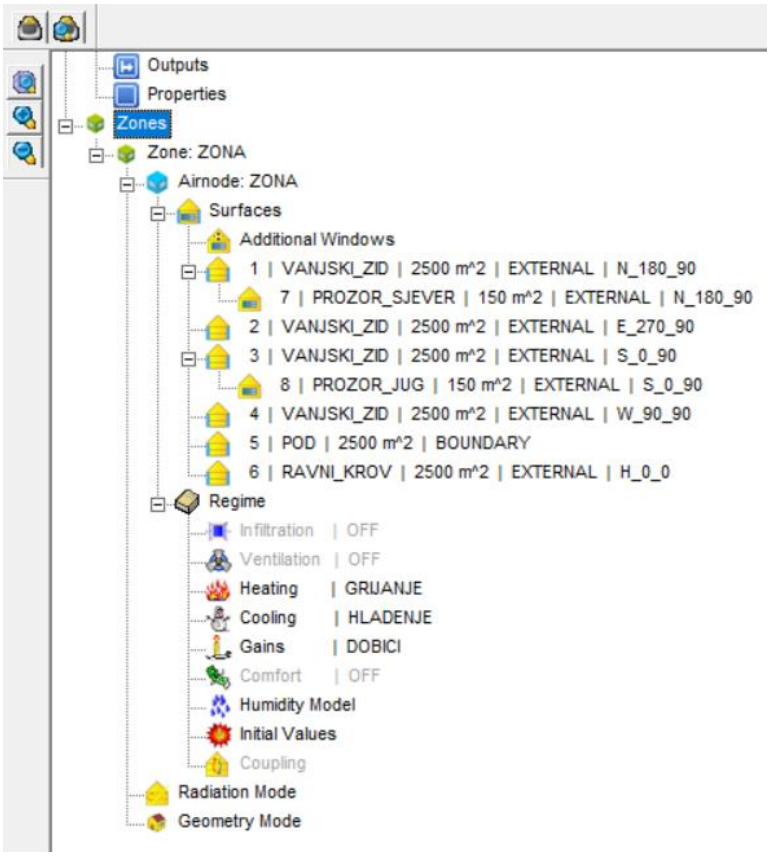
TRNBuild je korisničko sučelje unutar računalnog programa TRNSYS čija je svrha izrada energetskog modela zgrade. Unutar njega definira se geometrija zgrade, svojstva ovojnice te pogonski režimi koji će kasnije biti ulazni parametri za spomenutu komponentu Type56 unutar sučelja Simulation Studio prilikom provedbe simulacije. Izradom modela zgrade nastaje tekstualna datoteka u ASCII kodu gdje se nalaze sva relevantna geometrijska i termodinamička svojstva te pogonski režimi zgrade. Zgrada se može podijeliti na više toplinskih zona ili se može sastojati od samo jedne toplinske zone. Za svaku zonu najprije se definiraju zidovi i prozori, točnije njihove dimenzije i svojstva. Zatim je potrebno poznavati unutarnje toplinske dobitke (od ljudi, rasvjete i opreme) i karakteristike sustava grijanja, hlađenja i ventilacije te ih kao takve unijeti u TRNBuild model. U nastavku poglavlja će biti detaljnije opisan postupak izrade modela zgrade kakva je analizirana u ovom radu.

Pri pokretanju korisničkog sučelja TRNBuild otvara se početni prozor prikazan na Slici 18. Pritiskom na ikonu *New* otvara se prozor u kojem se odabire hemisfera na kojoj se objekt nalazi, u slučaju ovog rada, sjeverna hemisfera. Time je stvoren novi model višezonske zgrade.

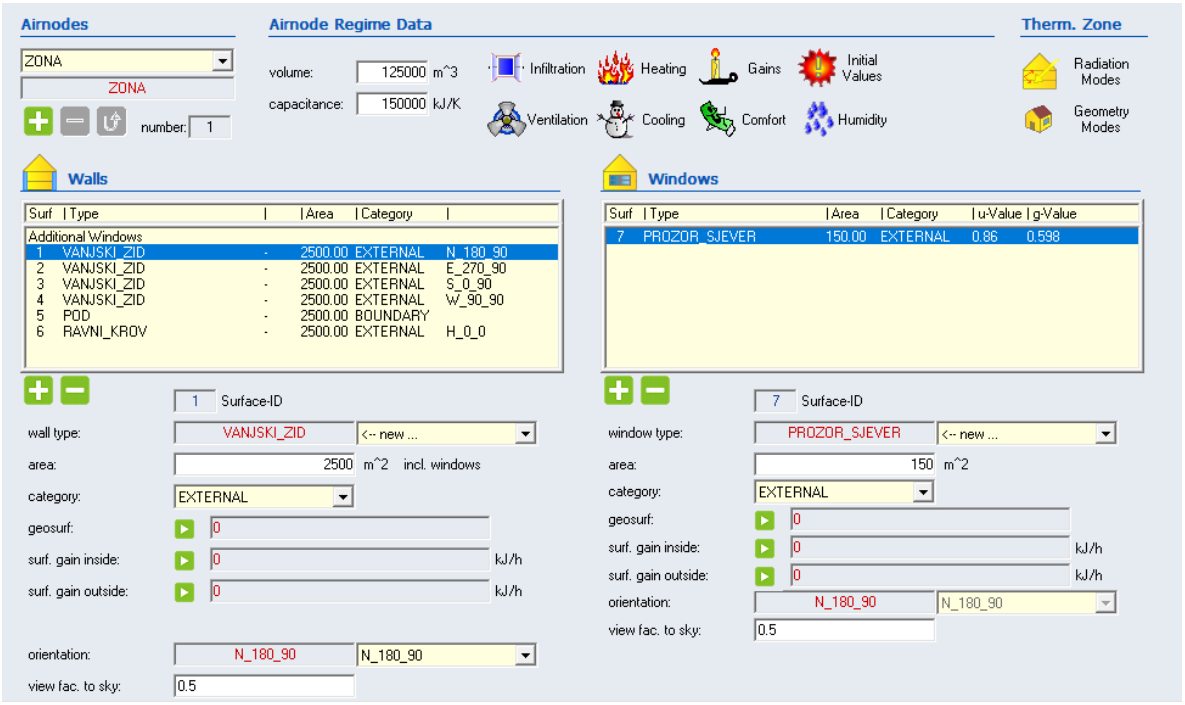


Slika 18. Početni prozor korisničkog sučelja TRNBuild

Sljedeći prozor koji se otvara prilikom izrade novog projekta je TRNBuild Navigator prozor gdje se nalaze grane projekta i zona. Navigacijski prozor modela izrađenog za potrebe analize nalazi se na Slici 19. Unutar grane *Zones* prikazane su zone modela višezonske zgrade, a u ovom slučaju prikazana je jedna zona od koje se model sastoji te njoj pripadajuće grane *Surfaces* i *Regime*. Pod granom *Surfaces* prikazane su sve definirane plohe te njima pripadajući prozori, a pod granom Regime moguće je vidjeti ili definirati pogonske režime zone kao što su grijanje, hlađenje, ventilacija, infiltracija, unutarnji toplinski dobici i slično. Klikom na *Zone* otvara se prozor na Slici 20. koji prikazuje toplinsku zonu izmodelirane zgrade s definiranim plohama i pogonskim režima.



Slika 19. Navigacijski prozor sučelja TRNBuild

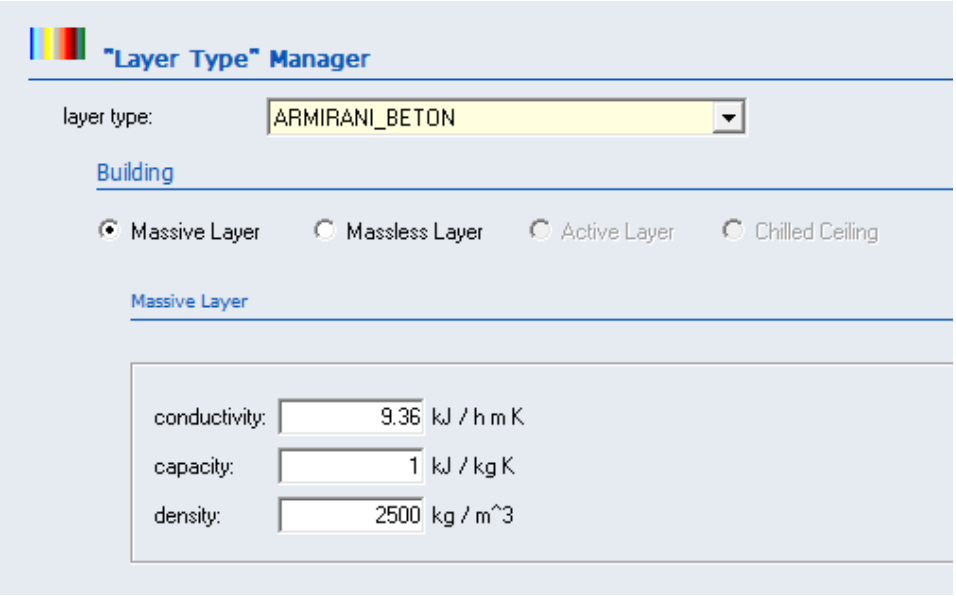


Slika 20. Prozor toplinske zone u sučelju TRNBuild

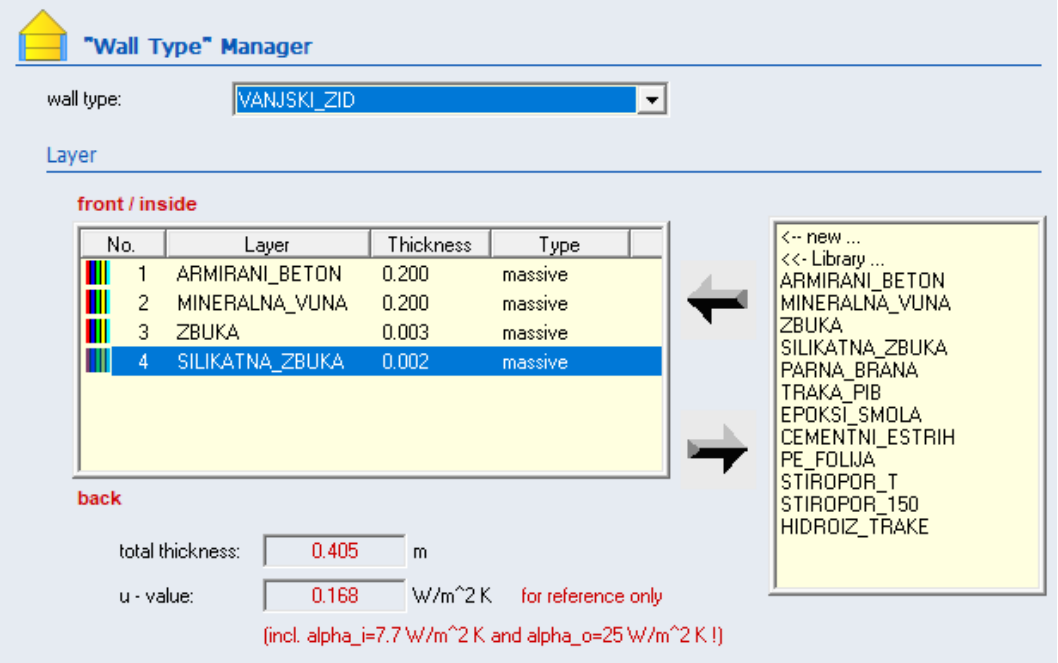
4.2.1. Definiranje geometrije

Prvi korak pri modeliranju toplinske zone je definiranje njezine geometrije tj. zidova i prozora. U slučaju ovog rada pojavljuju se dva tipa zidova: EXTERNAL i BOUNDARY. Kategorija zida EXTERNAL opisuje zid koji graniči s vanjskim okolišem, a to su u ovom slučaju svi osim poda. Pod pripada kategoriji BOUNDARY jer se opisuje pomoću nekog rubnog uvjeta. Osim tipa zida potrebno je definirati i njegovu orijentaciju prema strani svijeta te *view factor to sky*. Navedeni faktor daje informaciju o udjelu neba koji je vidljiv s površine promatranog zida te za vertikalne zidove iznosi 0,5 dok je za horizontalne (ravne) krovove jednak jedinici zbog pretpostavke da je cijelo nebo vidljivo s takve plohe.

Unutar prozora *Wall Type Manager* potrebno je definirati zidove dodavanjem pojedinih slojeva ili odabrati gotovi zid pomoću opcije *Library*. Slojevi se definiraju unutar prozora *Layer Type Manager* gdje je potrebno unijeti tražena svojstva pojedinog sloja, a to su: toplinska provodnost, specifični toplinski kapacitet, gustoća i debljina sloja koji čini promatrani zid. Definiranje novog sloja prikazano je na Slici 21. na primjeru armiranog betona te definiranje novog zida na Slici 22. na primjeru vanjskog zida.

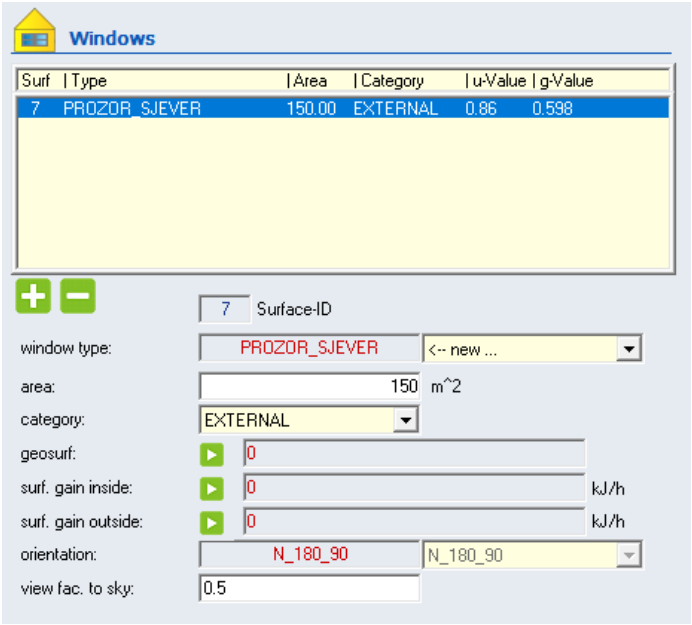


Slika 21. Definiranje novog zidnog sloja



Slika 22. Definiranje zida pomoću slojeva

Nakon potpuno definiranih zidnih slojeva i zidova potrebno je na zadana mjesta dodati prozore, a to je moguće klikom na željeni zid iz padajućeg izbornika *Walls* te klikom na tipku + ispod padajućeg izbornika *Windows*. Kao što je slučaj sa zidovima i slojevima, prozore je također moguće izabrati iz kataloga prozora ili ih samostalno definirati. U ovom radu odabrana su dva identična prozora pomoću opcije *Library* na temelju zadanih svojstava (koeficijenta prolaza topline i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja) te su smješteni na orijentaciji sjever-jug. Potrebno je još definirati njihovu površinu, a ostali parametri su već definirani za zid na kojem se prozor nalazi (Slika 23.)

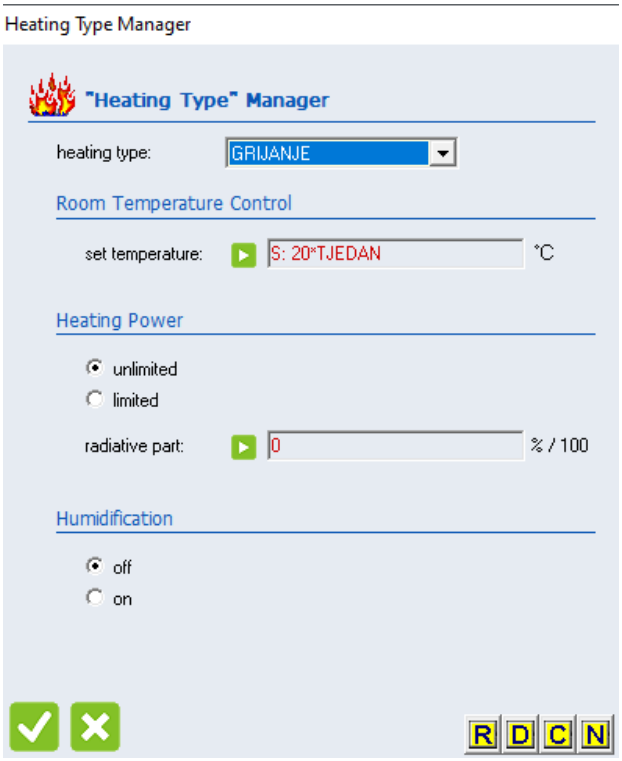


Slika 23. Definiranje prozora

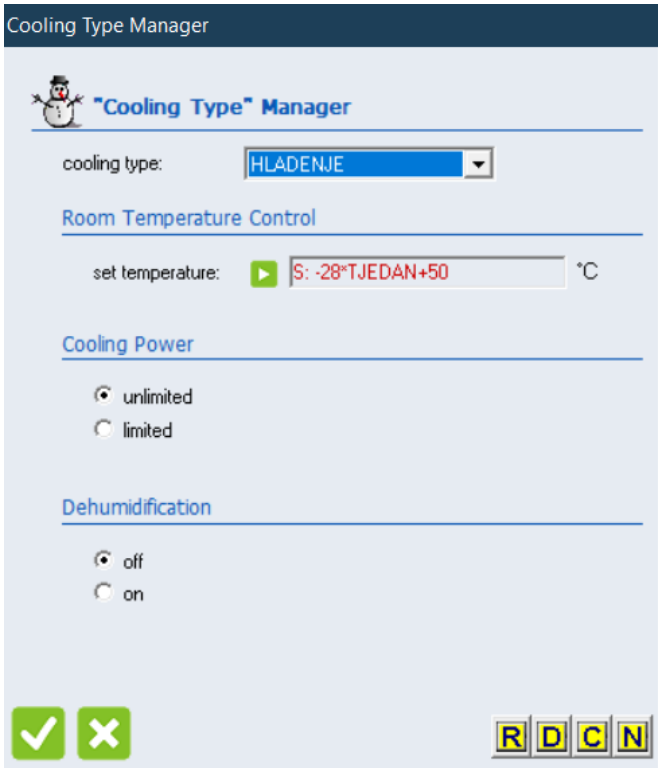
4.2.2. Definiranje pogonskih režima

Nakon definirane geometrije zgrade, točnije zidova i prozora, potrebno je definirati i pogonske režime promatrane zone. U sučelju TRNBuild moguće je opisati infiltraciju, ventilaciju, grijanje, hlađenje, unutarnje toplinske dobitke i toplinsku ugodnost. U okviru ovog rada za promatranu zonu definirani su sustavi grijanja (*Heating*) i hlađenja (*Cooling*) te unutarnji toplinski dobici (*Gains*).

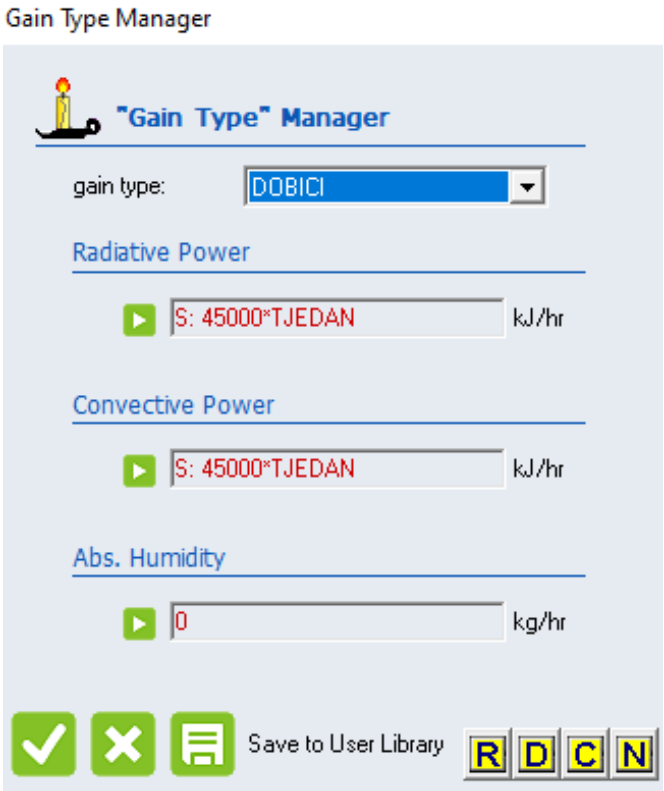
Pogonski režimi, kao i zidni slojevi i zidovi, definiraju se putem njihovih pripadajućih *Type Managera* pa se tako sustav grijanja definira unutar *Heating Type Managera* (Slika 24.), a sustav hlađenja unutar Cooling Type Managera (Slika 25.). Svi pogonski režimi zadaju se kao *Schedule* kako bi se implementirao zadani raspored korištenja zgrade. U periodima kada se zgrada ne koristi sustavi grijanja i hlađenja su isključeni, a isto tako nema ni unutarnjih toplinskih dobitaka. Pri definiranju sustava grijanja i hlađenja zadaje se postavna temperatura (*Set Temperature*) i postavna snaga sustava (*Heating Power* za grijanje i *Cooling Power* za hlađenje). Pri zadavanju unutarnjih toplinskih dobitaka u *Gain Type Manageru* potrebno je definirati posebno udio koji je zoni predan zračenjem (Radiative Power), a posebno udio koji je predan konvektivnom izmjenom topline (Convective Power). U ovom radu je pretpostavljeno da je 50% predano konvektivno, a 50% predano zračenjem kao što je vidljivo na Slici 26.



Slika 24. Definiranje sustava grijanja

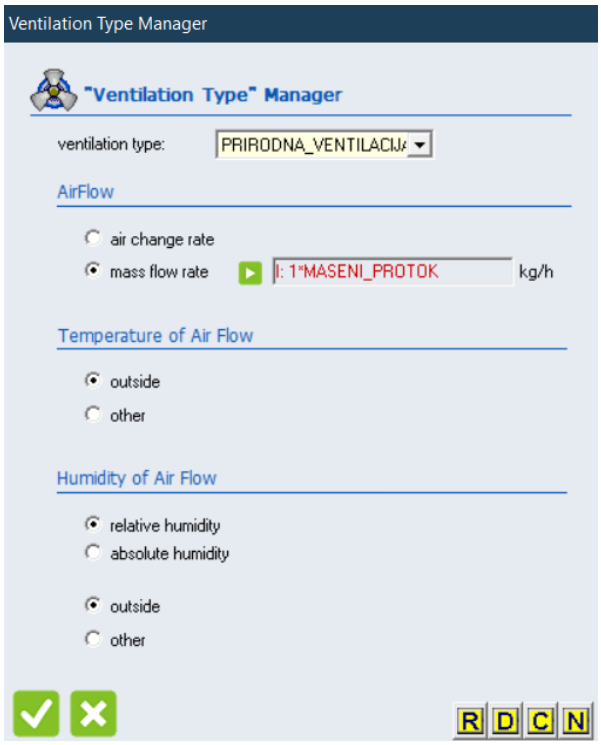


Slika 25. Definiranje sustava hlađenja



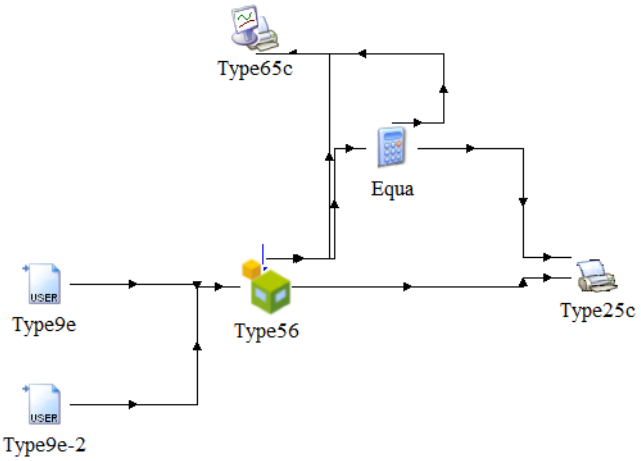
Slika 26. Definiranje unutarnjih toplinskih dobitaka

Nakon provedenog proračuna opisanog u prethodnim poglavljima poznate su vrijednosti protoka zraka kojim će se ostvarivati prirodna ventilacija promatrane zgrade te na taj način doći do ušteda u potrebnoj energiji za hlađenje u odnosu na inicijalni slučaj bez ventilacije zgrade. Potrebno je u TRNSYS korisničkom sučelju TRNBuild definirati prirodnu ventilaciju unutar *"Ventilation Type" Managera* kako je prikazano na Slici 27.



Slika 27. Definiranje prirodne ventilacije unutar TRNBuilda

Na ovaj način je prirodna ventilacija definirana masenim protokom zraka kao *Input* koji se unutar sučelja *Simulation Studio* unosi u obliku tekstualne datoteke s vrijednostima protoka za svaki sat u godini koje su dobivene opisanim proračunom u MATLAB-u. Način spajanja komponente za čitanje podataka o protocima s komponentom *Type56* u sučelju *Simulation Studio* prikazan je na Slici 28. Nakon pokretanja simulacije dobivaju se rezultati potrebne energije za grijanje i hlađenje s uvedenom prirodnom ventilacijom. Tako dobiveni rezultati uspoređuju se s rezultatima dobivenim bez ventilacije te se dolazi do vrijednosti ušteda energije. Ovaj postupak proveden je za masene protoke zraka dobivene matematičkim modelom i eksperimentalnim mjerenjima u slučaju izložene te zaklonjene zgrade. Nakon provedene simulacije koristeći računalni program TRNSYS dobiveni su traženi rezultati. Vrijednosti su poznate za svaki sat u godini te je prema potrebi moguće izračunati potrebnu energiju za pojedini mjesec ili čitavu godinu. Radi jednostavnijeg korištenja dobivenih podataka tekstualna datoteka ekstenzije .out otvorena je u MATLAB-u kao varijabla output koristeći naredbu dlmread. Iz nje su izdvojene temperature zraka te potrebna energija za hlađenje kao zasebne varijable.



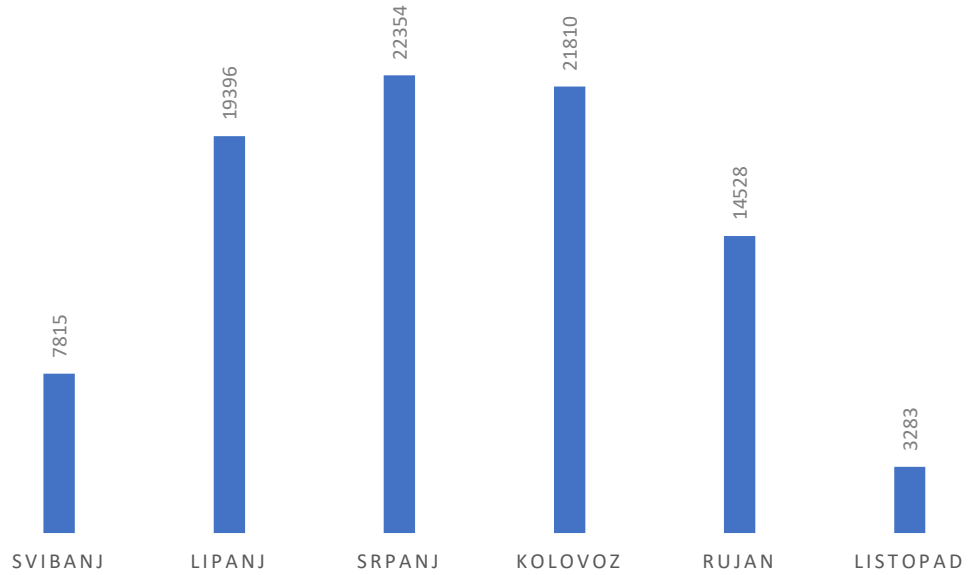
Slika 28. Povezivanje Type9e-2 komponente za učitavanje vrijednosti protoka zraka s Type56 komponentom

5. REZULTATI PRORAČUNA POTENCIJALA PASIVNOG HLAĐENJA

U ovom poglavlju opisani su rezultati provedene računalne simulacije potrebne energije za hlađenje (u TRNSYS-u) korištenjem izračunatih protoka zraka te protoka dobivenih na temelju eksperimentalnih mjerenja. Rezultati su uspoređeni sa slučajem bez prirodne ventilacije na temelju čega su dobivene uštede energije za hlađenje korištenjem prirodne ventilacije. Potrebna energija za hlađenje, bez prirodne ventilacije, po mjesecima prikazana je u Tablica 9. te u obliku dijagrama na Slici 29.

Tablica 9. Potrebna energija za hlađenje bez korištenja pasivnog hlađenja

Mjesec	Potrebna energija za hlađenje	
	[kWh]	[kWh/m^2]
Svibanj	7815	3,13
Lipanj	19396	7,76
Srpanj	22354	8,94
Kolovoz	21810	8,72
Rujan	14528	5,81
Listopad	3283	1,31



Slika 29. Potrebna energija za hlađenje bez pasivnog hlađenja [kWh]

Na temelju rezultata simulacije vidljivo je da su najveće potrebe za energijom za hlađenje tijekom najtoplijih mjeseci, srpnja i kolovoza pa je tako potrebna energija u srpnju 22354 kWh odnosno 8,94 kWh/m^2 korisne površine, a vrijednosti za kolovoz su 21810 kWh tj. 8,72 kWh/m^2 korisne površine. Iza srpnja i kolovoza prema potrebama za energijom nalazi se lipanj s 19396 kWh (7,76 kWh/m^2), nakon njega rujan s 14528 kWh (5,81 kWh/m^2) te svibanj iznosa potrebne energije 7815 kWh (3,13 kWh/m^2). Najmanje vrijednosti potrebne energije za hlađenje su u listopadu te iznosi 3283 kWh odnosno 1,31 kWh/m^2. Ukupna godišnja potrebna energija za hlađenje zgrade iznosi 89186 kWh odnosno 35,67 kWh/m^2 korisne površine.

5.1. Potencijal pasivnog hlađenja za izloženu zgradu

U ovom poglavlju bit će uspoređena potrebna energija za hlađenje za slučaj sa i bez korištenja pasivnog hlađenja. U Tablica 10. dane su vrijednosti potrebne energije za hlađenje u kWh te iste te vrijednosti izražene po površini poda, dakle u kWh/m^2 za matematički model i eksperimentalna mjerenja. Jasno se vidi da su dobivene manje vrijednosti pri korištenju podataka iz eksperimentalnih mjerenja npr. za lipanj je razlika nešto više od 1000 kWh odnosno 0,45 kWh/m^2. Vrijednosti za sve ostale mjesece koji su zanimljivi pri provođenju analize moguće je vidjeti ispod u Tablica 10. Ukupna godišnja potreba za energijom za hlađenje prema matematičkom modelu iznosi 18061 kWh odnosno 7,22 kWh/m^2, a prema eksperimentalnim mjerenjima 15523 kWh odnosno 6,22 kWh/m^2. Opisane godišnje vrijednosti daju uštedu energije od 79,75% u slučaju matematičkog modela te uštedu od 82,6% u slučaju eksperimentalnih mjerenja.

Tablica 10. Potrebna energija za hlađenje s uvedenom prirodnom ventilacijom, izložena zgrada

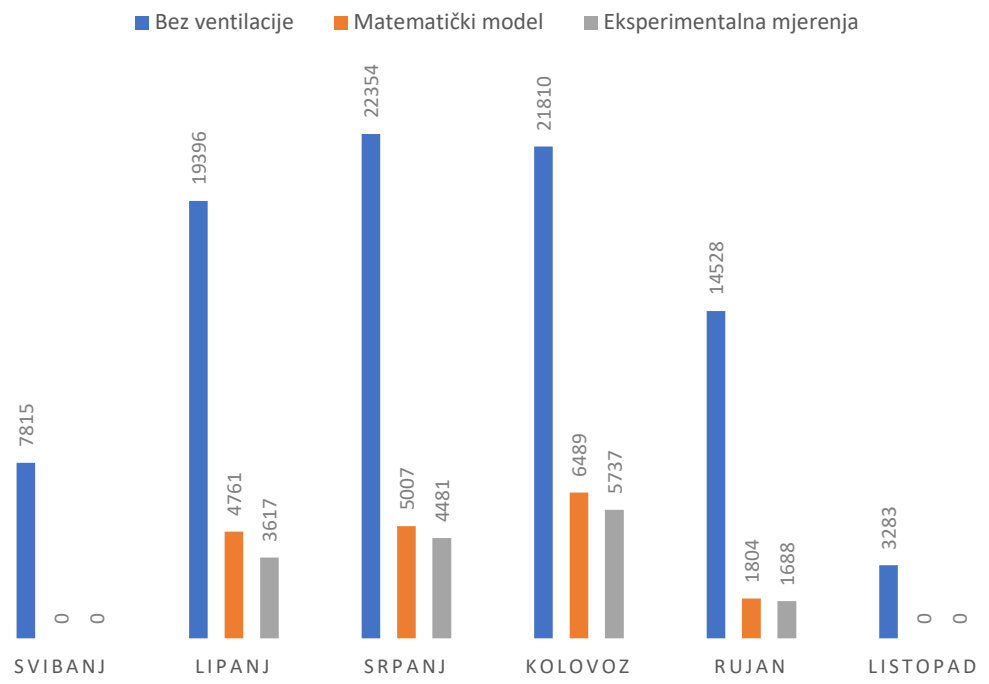
Mjesec	Potrebna energija za hlađenje			
	[kWh]		[kWh/m^2]	
	Matematički model	Eksperimentalna mjerenja	Matematički model	Eksperimentalna mjerenja
Svibanj	0	0	0	0
Lipanj	4761	3617	1,9	1,45
Srpanj	5007	4481	2	1,8
Kolovoz	6489	5737	2,6	2,3
Rujan	1804	1688	0,72	0,67
Listopad	0	0	0	0

Najjasniji uvid u rezultate provedene analize prikazan je u Tablica 11. kroz konkretne vrijednosti ušteda energije u postotcima, za svaki promatrani mjesec te usporedno za podatke dobivene iz matematičkog modela te iz eksperimentalnih mjerenja. U oba slučaju potrebe za hlađenjem iščezavaju u svibnju i listopadu, dok su za slučaj bez korištenja prirodne ventilacije ipak postojale. Najmanje uštede dobivene su u kolovozu kad su i najviše vanjske temperature zraka pa je to bilo i za očekivati s obzirom na to je u najviše sati protok bio jednak nuli (zatvoreni prozori).

Tablica 11. Ušteda potrebne energije za hlađenje po mjesecima za matematički model i eksperimentalna mjerenja, izložena zgrada

Mjesec	Ušteda energije za hlađenje [%]	
	Matematički model	Eksperimentalna mjerenja
Svibanj	100	100
Lipanj	75,5	81,4
Srpanj	77,6	80
Kolovoz	70,2	73,7
Rujan	87,6	88,4
Listopad	100	100

Za zaključak ušteda energije u izloženoj zgradi je na Slici 30. prikazan dijagram s vrijednostima ušteda po mjesecima, usporedno za slučaj bez prirodne ventilacije, s prirodnom ventilacijom na temelju rezultata iz matematičkog modela te slučaj s prirodnom ventilacijom na temelju rezultata iz eksperimenta gdje je jasno vidljiv njihov odnos te udio energije potrebne za hlađenje koju „pokrije“ prirodna ventilacija.



Slika 30. Usporedba rezultata matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja pri izračunu potrebne energije za hlađenje [kWh], izložena zgrada

5.2. Potencijal pasivnog hlađenja za zaklonjenu zgradu

Nakon provedene analize rezultata za slučaj izložene zgrade, potrebno je isto to napraviti i za drugi slučaj, a to je zaklonjena zgrada unutar urbane sredine. Vrijednosti potrebne energije i uštede po mjesecima dane su u Tablica 12. i Tablica 13. Iz podataka je vidljivo da potrebe za hlađenjem potpuno iščezavaju u svibnju i listopadu te gotovo potpuno poklapanje dobivenih vrijednosti za srpanj, kolovoz i rujan. Osim vrijednosti potrebne energije u kWh, prikazane su i izražene po površini poda u kWh/m^2. Iz tablice s danim vrijednostima ušteda u postotcima za promatrane mjesece vidljive su manje brojke nego u slučaju izložene zgrade. Najmanje postignute uštede su također u kolovozu sa samo oko 53% za oba načina izračuna. Nešto su veće u lipnju i srpnju s vrijednostima od oko 65%, osim za slučaj eksperimentalnih mjerenja u lipnju gdje se ipak javlja veća vrijednost uštede od oko 70%. U rujnu, kao jednom od prijelaznih mjeseci, uštede su ipak veće nego u slučaju „pravih“ ljetnih mjeseci pa tako iznose oko 84%. Ukupna godišnja potreba za energijom za hlađenje prema matematičkom modelu iznosi 27014 kWh odnosno 10,81 kWh/m^2, a prema eksperimentalnim mjerenjima 26177 kWh odnosno 10,47 kWh/m^2. Opisane godišnje vrijednosti daju uštedu energije od 69,71% u slučaju matematičkog modela te uštedu od 70,65% u slučaju eksperimentalnih mjerenja.

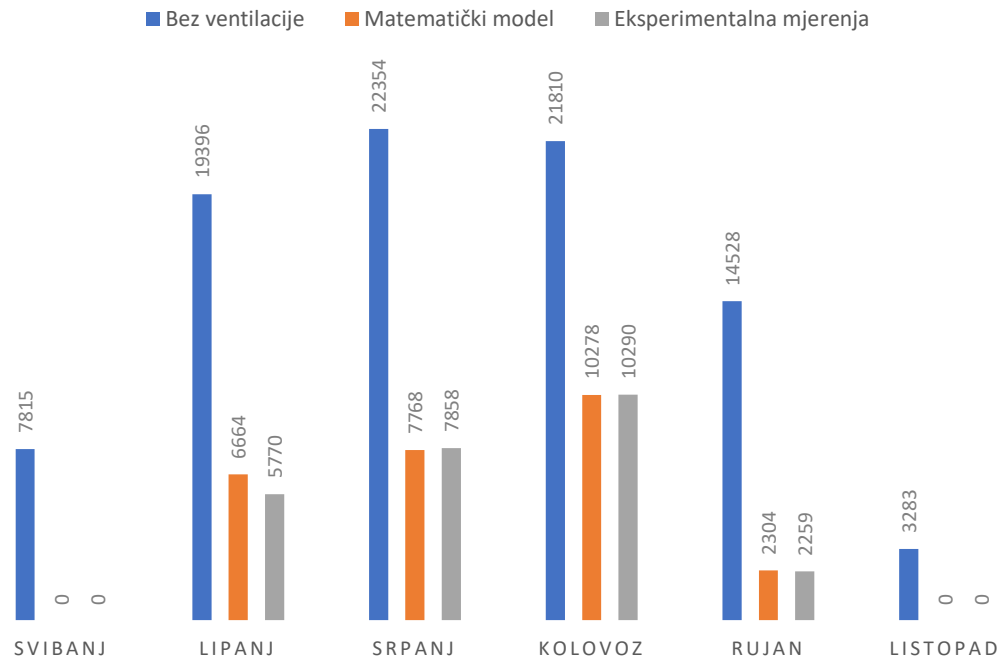
Tablica 12. Potrebna energija za hlađenje s uvedenom prirodnom ventilacijom, zaklonjena zgrada

Mjesec	Potrebna energija za hlađenje			
	[kWh]		[kWh/m^2]	
	Matematički model	Eksperimentalna mjerenja	Matematički model	Eksperimentalna mjerenja
Svibanj	0	0	0	0
Lipanj	6664	5770	2,67	2,31
Srpanj	7768	7858	3,11	3,14
Kolovoz	10278	10290	4,11	4,12
Rujan	2304	2259	0,92	0,9
Listopad	0	0	0	0

Tablica 13. Ušteda potrebne energije za hlađenje po mjesecima za matematički model i eksperimentalna mjerenja, zaklonjena zgrada

Mjesec	Ušteda energije za hlađenje [%]	
	Matematički model	Eksperimentalna mjerenja
Svibanj	100	100
Lipanj	65,64	70,25
Srpanj	65,25	64,85
Kolovoz	52,87	52,82
Rujan	84,14	84,45
Listopad	100	100

Sve što je do sad izneseno o rezultatima dobivenim na zgradi unutar urbane sredine jasno je prikazano dijagramom na Slici 31. gdje je dana direktna usporedba potrebne energije u inicijalnom slučaju bez ventilacije s oba slučaja korištenja prirodne ventilacije za hlađenje zgrade kako stoji u legendi dijagrama.



Slika 31. Usporedba rezultata matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja pri izračunu potrebne energije za hlađenje [kWh], zaklonjena zgrada

6. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada bila je usporedba matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja pri izračunu potencijala pasivnog hlađenja na modelu generičke zgrade. U radu su korišteni rezultati eksperimentalnih mjerenja unutar zračnog tunela gdje je zrak nastrujavao na umanjeni model zgrade pri različitim brzinama, kutovima nastrujavanja, te zgradom u različitim konfiguracijama (manje ili više zaklonjenom). Prethodno mjereni slučajevi su u sklopu ovog rada opisani matematičkim modelom za proračun ventilacije uslijed sile vjetra. Cilj rada bila je analiza greške matematičkog modela pri izračunu ušteda energije za hlađenje. Analiza je provedena za izloženu te zaklonjenu zgradu.

Zgrada za koju je provedena analiza u radu je uvećani model kocke nad kojom su izvršena opisana eksperimentalna mjerenja kako bi se analizirala zgrada realnih dimenzija. Takvim proporcionalnim povećanjem, odnos površine prozora i površine zida ostao je jednak kao u eksperimentu. Iako odnos površine i prozora na predstavlja optimum za pasivno hlađenje analizirane zgrade, ovakav način skaliranja omogućuje uvid u razlike između rezultata dobivenih na temelju matematičkog modela i eksperimentalnih mjerenja.

Vrijednosti potrebne energije za hlađenje dobivene su za svaki sat u godini korištenjem računalnog programa za energetsko modeliranje, TRNSYS. Unutar korisničkog sučelja *Simulation Studio* provedena je simulacija koristeći, između ostalog, komponentu *Type56* koja predstavlja model višezonske zgrade. Model zgrade za komponentu *Type56* izrađen je u drugom TRNSYS sučelju, *TRNBuild*, gdje su uneseni podaci o geometriji zgrade, svojstvima ovojnice te pogonskim režimima. Postavna temperatura za hlađenje iznosila je 22°C, a pri analizi su korišteni podaci za tipičnu meteorološku godinu u gradu Zagrebu. Za izračun smanjenja potrebne energije uslijed pasivnog hlađenja bilo je potrebno u TRNSYS-u simulirati i protok zraka kroz zgradu, odnosno prirodnu ventilaciju.

Za izračun satnih vrijednosti masenog protoka kroz zgradu tijekom cijele godine korišten je programski jezik MATLAB. Na temelju mjerenih vrijednosti protoka zraka za brzine 0, 3, 5 i 7 m/s te određene kuteva nastrujavanja zraka, interpolacijom su dobivene vrijednosti protoka zraka za svaki sat u godini. Pri tome su korišteni podaci o brzinama i smjerovima vjetra izmjereni na meteorološkoj postaji Zagreb – Maksimir, za 2019. godinu. Protok zraka zatim je izračunat korištenjem pojednostavljenog matematičkog modela opisanog u radu. Usporedbom protoka izračunatih matematičkim modelom i dobivenih iz eksperimentalnih mjerenja, zaključeno je da su eksperimentom dobivene veće vrijednosti protoka.

Provedbom simulacije u programu TRNSYS ustanovljeno je da godišnja potrebna energija za hlađenje promatrane zgrade u slučaju bez korištenja pasivnog hlađenja iznosi 89186 kWh (35,76 kWh/m^2). Najveće potrebe za hlađenjem javljaju se u mjesecima s najvišim vanjskim temperaturama zraka, a to su u lipnju, srpnju i kolovozu. U tim mjesecima su se očekivale i najmanje uštede korištenjem pasivnog hlađenja. U prijelaznim mjesecima poput svibnja i listopada gdje su potrebe za hlađenjem niske, očekivalo se potpuno iščezavanje

potreba za mehaničkim hlađenjem, što je korištenjem pasivnog hlađenja i potvrdilo. Rezultati za izloženu zgradu dobiveni matematičkim modelom daju godišnju potrebnu energiju za hlađenje od 18061 kWh (7,22 kWh/m^2), dok je taj iznos nešto manji korištenjem podataka eksperimentalnih mjerenja te iznosi 15523 kWh (6,22 kWh/m^2). Pri analizi zaklonjene zgrade, razlike između rezultata su nešto manje, te iznose 27014 kWh (10,81 kWh/m^2) za matematički model, odnosno 26177 kWh (10,47 kWh/m^2) u slučaju eksperimentalnih mjerenja.

Usporedbom potencijala pasivnog hlađenja dobivenog matematičkim modelom i eksperimentalnim mjerenjima zaključuje se da je potencijal u eksploatacijskim uvjetima nešto veći od izračunatog, što je pozitivan ishod analize u korist prirodne ventilacije. Također, uočeno je da greške matematičkog modela nisu značajne. Time je potvrđeno da su korištene jednadžbe prihvatljiva metoda pri projektiranju zgrada s pasivnim hlađenjem.

LITERATURA

[1] International Energy Agency, Buildings, https://www.iea.org/topics/buildings, 1.12.2020.

[2] International Energy Agency, The future of cooling, https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling, 1.12.2020.

[3] International Energy Agency, Press release, https://www.iea.org/news/climate-friendly-cooling-could-cut-years-of-greenhouse-gas-emissions-and-save-trillions-of-dollars, 1.12.2020.

[4] Golubić D., Meile W., Brenn G., Kozmar H.: Wind-tunnel analysis of natural ventilation in a generic building in sheltered and unsheltered conditions: Impact of Reynolds number and wind direction, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 207 (2020), 1-17

[5] Freewan A.: Advances in Passive Cooling Design: An Integrated Design Approach, Jordan University of Science and Technology, Irbid, Jordan, 2019.

[6] Pacheco-Torgal F., Granqvist C., Jelle B., Vanoli G., Bianco N., Kurnitski J.: Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting, Woodhead Publishing, 2017.

[7] Studio DOMUS, https://studio-domus.hr/niskoenergetske-i-pasivne-kuce/, 1.12.2020.

[8] Oliveira Panao M., Gonçalves H.: Solar XXI building: Proof of concept or a concept to be proved?, National Laboratory of Energy and Geology (LNEG), Estrada do Paço Lumiar, 22, 1649-038 Lisbon, Portugal, 2011.

[9] Pedro Cabrito | Isabel Diniz Arquitectos, Solar XXI, https://divisare.com/projects/316535-pedro-cabrito-isabel-diniz-arquitectos-daniel-malhao-solar-xxi, 1.12.2020.

[10] TRNSYS: Transient System Simulation Tool, http://www.trnsys.com/, 15.12.2020.

[11] Awbi H.: Ventilation of Buildings, Taylor & Francis Group, New York, 2003.

[12] DHMZ – Državni hidrometeorološki zavod, https://meteo.hr/, 1.2.2021.