

Interdisciplinarni pristup korištenju energetske modele u fazi ranog dizajna niskoenergetskih zgrada

Kušen, Vanja

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:235:032752>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-16**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vanja Kušen

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Tea Žakula, dipl. ing.

Student:

Vanja Kušen

Zagreb, 2017.

Sažetak

U ovom radu prikazan je proces projektiranja niskoenergetske poslovne zgrade na području grada Ivanca korištenjem energetskeg modeliranja i simulacija u početnim fazama dizajna zgrade. Rad je napravljen u suradnji s diplomantom arhitekture sa svrhom da se na konkretnom primjeru prikaže proces izrade projekta primjenom interdisciplinarnog pristupa. Proučavanjem postojećih primjera niskoenergetske arhitekture postavljeno je početno arhitektonsko rješenje na temelju kojeg je izrađen energetske model. Korištenjem energetske simulacija, simulacija dnevnog svjetla i pasivnog hlađenja analizirano je šest varijanti poboljšanja početnog arhitektonskog rješenja kako bi se postigao zadani cilj prema kojem potrebna specifična energija za grijanje zgrade ne prelazi 15 kWh/m²a te da je potrebna specifična energija za hlađenje manja od 20 kWh/m²a. Na temelju analiziranih varijanti razrađeno je konačno rješenje kojim je postignuta potrebna specifična energija za grijanje od 17 kWh/m²a te potrebna specifična energija za hlađenje u iznosu 17 kWh/m²a. Iako su energetske učinkovita rješenja i arhitektonski zahtjevi ponekad u suprotnosti, konačno rješenje je rezultat kompromisa koji nastoji zadovoljiti estetske kriterije, kriterije funkcionalnosti, toplinske ugodnosti korisnika i energetske učinkovitosti.

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

Vanja Kušen

Zahvala

Zahvaljujem doc. dr. sc. Tei Žakuli na mentorstvu, svim znanjima tijekom studija i izrade ovog diplomskog rada te na brojnim konzultacijama i izdvojenom vremenu. Isto tako, zahvaljujem što me uvela u novo područje energetskeg modeliranja i energetskeg simulacija.

Posebne zahvale mag. ing. Ivanu Šimiću na velikoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada te na rješavanju tehničkih problema bez čije stručnosti određene analize ne bi bile ostvarive.

Najveće zahvale iskazujem svojoj djevojci i svojoj obitelji koji su pružili maksimalnu potporu tijekom cijelog školovanja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Vanja Kušen**

Mat. br.: 0035191124

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Interdisciplinarni pristup korištenju energetskih modela u fazi ranog
dizajna niskoenergetskih zgrada**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Interdisciplinary Approach To The Use Of Energy Models In Early
Stages Of Low-Energy Building Design**

Opis zadatka:

Cilj rada je analiza i optimizacija arhitektonskog dizajna niskoenergetske zgrade korištenjem računalnih alata za energetsko modeliranje zgrada na primjeru manje uredske zgrade u gradu Ivancu. Za optimizaciju energetskih karakteristika zgrade potrebno je koristiti 3D model zgrade napravljen u računalnom programu Rhino te programe za energetsko modeliranje Ladybug, Honeybee i Coolvent. U radu je potrebno optimizirati potrebnu godišnju energiju za grijanje, hlađenje i rasvjetu analizom sljedećih parametara: a) orijentacija zgrade, b) sastav ovojnice, c) zasjenjenje i d) elementi pasivnog grijanja i hlađenja. Analiza će se odvijati kroz interdisciplinarni rad u suradnji s diplomantom s Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. U tijeku izrade rada potrebno je održati konzultacije s interdisciplinarnim panelom stručnjaka koji uključuje stručnjake iz područja arhitekture, građevine i strojarstva.

Rad treba sadržavati:

- opis početnog arhitektonskog rješenja,
- opis korištenih alata,
- opis metode i rezultata optimizacije: a) orijentacije zgrade, b) sastava ovojnice, c) zasjenjenja i d) elemenata pasivnog grijanja i hlađenja,
- usporedbu potrebne godišnje energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između početnog i konačnog (optimiziranog) arhitektonskog rješenja,
- energetski model svih analiziranih rješenja u računalnom programu Rhino.

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

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obranc:

11. svibnja 2017.

13. srpnja 2017.

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadala:

Predsjednica Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Sadržaj

Popis slika	I
Popis tablica	IV
Popis oznaka.....	V
1. Uvod.....	1
2. Energetsko modeliranje i simulacije potrošnje u višezonskoj zgradi	4
2.1 Izrada volumetrijskog modela	6
2.2 Unos geometrije u Grasshopper i zoniranje	7
2.3 Definiranje geometrije ostakljenja.....	8
2.4 Definiranje konstrukcijskih materijala	9
2.5 Vertikalno odvajanje zona	11
2.6 Definiranje međudnosa zona	11
2.7 Definiranje postavki energetske simulacije i simulacije dnevnog svjetla	14
2.8 Upravljanje rezultatima simulacija.....	15
3. Analiza varijanti dizajna zgrade	18
3.1 Meteorološki podaci.....	18
3.2 Početno arhitektonsko rješenje (PAR)	20
3.3 Varijanta 1	31
3.4 Varijanta 2	33
3.5 Varijanta 3	35
3.6 Varijanta 4.....	37

3.7 Varijanta 5	39
3.8 Varijanta 6	43
3.8.1 Rezultati simulacije prirodne ventilacije	46
4. Zaključak	51
Literatura	52
Prilog	53

Popis slika

Slika 1 Prikaz procesa projektiranja interdisciplinarnim pristupom	3
Slika 2 Proces izrade energetskog modela zgrade.....	4
Slika 3 Prikaz volumetrijskog modela	6
Slika 4 Naredba za unos geometrije	7
Slika 5 Naredba za zoniranje.....	7
Slika 6 Primjer definiranja zona.....	7
Slika 7 Naredba za modeliranje ostakljenja	8
Slika 8 Primjer modeliranja zasjenjenja.....	9
Slika 9 Primjer izrade materijala.....	10
Slika 10 Generiranje građevinske konstrukcije.....	10
Slika 11 Dodjeljivanje materijala pojedinim građevinskim konstrukcijama	11
Slika 12 Naredba odvajanja zona po katovima	11
Slika 13 Rješavanje međuodnosa zona	12
Slika 14 Rastavljanje ploha.....	13
Slika 15 Prikaz modela s definiranim ploham.....	13
Slika 16 Primjer postavke simulacije	14
Slika 17 Generiranje mreže	15
Slika 18 Postavke simulacije dnevnog svjetla.....	15
Slika 19 Očitavanje rezultata simulacije	17
Slika 20 Prikaz rezultata simulacije na 3D modelu.....	17

Slika 21 Prikaz rezultata simulacije dnevnog svjetla	17
Slika 22 Naredba za unos meteoroloških podataka.....	19
Slika 23 Lokacija planirane zgrade	20
Slika 24 Slika katastarske čestice	20
Slika 25 Odvajanje lamela zgrade radi povoljnijeg izlaganju suncu	22
Slika 26 Strujanje zraka u zimskom vrtu; ljetni režim	23
Slika 27 Strujanje zraka u zimskom vrtu; zimski režim.....	23
Slika 28 Prikaz pročelja; a) južno, b) sjeverno.....	24
Slika 29 Prikaz bočnih pročelja: a) zapadno, b) istočno	25
Slika 30 Prikaz grijanih (crveno) i negrijanih (plavo) zona; a) prizemlje, b) prvi kat, c) drugi kat	27
Slika 31 Prikaz potreba za grijanjem na 3D modelu	28
Slika 32 Prikaz potreba za hlađenjem na 3D modelu.....	29
Slika 33 Godišnja potrebna energija za grijanje, hlađenje i rasvjetu početnog arhitektonskog rješenja	29
Slika 34 Godišnja potrebna energija za grijanje, hlađenje i rasvjetu početnog arhitektonskog rješenja nakon primjene rezultata simulacije dnevnog svjetla	30
Slika 35 Sjeverno pročelje sa smanjenim ostakljenjem	31
Slika 36 Usporedba potrebnih energija za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR i Varijante 1	32
Slika 37 Usporedba potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR-a, Varijante 1 i Varijante 2.....	35
Slika 38 Južno pročelje sa smanjenim udjelom ostakljenih površina	36

Slika 39 Usporedba potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2 i Varijante 3	37
Slika 40 Usporedba potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3 i Varijante 4	38
Slika 41 Prikaz modela sa zasjenjenjem u obliku ploče duljine 1,8 m	39
Slika 42 Prikaz lamela; a) zimski režim, b) ljetni režim	40
Slika 43 Prikaz sa zasjenjenjem u obliku lamela	40
Slika 44 Utjecaj pojedinog tipa zasjenjenja na potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu	42
Slika 45 Usporedba potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3, Varijante 4 i Varijante 5	43
Slika 46 Raspodjela tlakova; a) nacrt, b) tlocrt	44
Slika 47 Načelo rada poprečne ventilacije	45
Slika 48 Potrebna energija za hlađenje primjenom pasivnog hlađenja	46
Slika 49 Usporedba meteoroloških podataka za karakterističan dan za a) srpanj, b) kolovoz. 47	
Slika 50 Usporedba meteoroloških podataka za karakterističan dan; a) svibanj, b) lipanj.	47
Slika 51 Meteorološki podaci za karakteristični dan u rujnu	48
Slika 52 Usporedba potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3, Varijante 4, Varijante 5 i Varijante 6	49
Slika 53 Potrebna energija za hlađenje sa i bez korištenja pasivnog hlađenja za karakteristični ljetni dan	49
Slika 54 Presjek konačne varijante.....	50
Slika 55 Prikaz konačne varijante	50

Popis tablica

Tablica 1 Pregled površina po namjeni	21
Tablica 2 Popis neprozirnih građevnih elemenata PAR-a.....	25
Tablica 3 Popis prozirnih građevinskih elemenata PAR-a.....	27
Tablica 4 Prikaz unutarnjih dobitaka	27
Tablica 5 Potrebna specifična energija početnog arhitektonskog rješenja.....	28
Tablica 6 Sastav kopelitnog ostakljenja	31
Tablica 7 Potrebna specifična energija Varijante 1	32
Tablica 8 Popis neprozirnih građevnih elemenata Varijante 2.....	33
Tablica 9 Potrebne specifične energije Varijante 2.....	34
Tablica 10 Potrebne specifične energije Varijante 3.....	36
Tablica 11 Popis materijala unutarnjeg ostakljenja južne fasade.....	37
Tablica 12 Potrebne specifične energije Varijante 4.....	38
Tablica 13 Potrebne specifične energije za Varijantu 5 i prvi tip zasjenjenja	40
Tablica 14 Potrebne specifične energije za varijantu 5 i drugi tip zasjenjenja; zimski režim .	41
Tablica 15 Potrebne specifične energije za Varijantu 5 i drugi tip zasjenjenja; ljetni režim ...	41
Tablica 16 Potrebne specifične energije Varijante 5 za pojedine tipove zasjenjenja.....	42
Tablica 17 Usporedba potrebnih energija za hlađenje bez i uz pasivno hlađenje.....	48

Popis oznaka

E_{rasvjeta}	[kWh/m ² a]	potrebna specifična energija za rasvjetu na godišnjoj razini
F_F	[-]	udio ostakljene površine prozora
$Q_{C,nd}$	[kWh]	potrebna energija za hlađenje
$Q_{H,nd}$	[kWh]	potrebna energija za grijanje
$Q''_{C,nd}$	[kWh/m ² a]	potrebna specifična energija za hlađenje na godišnjoj razini
$Q''_{H,nd}$	[kWh/m ² a]	potrebna specifična energija za grijanje na godišnjoj razini
R	[-]	udio vremena kada rasvjeta nije potrebna
$SHGC$	[-]	koeficijent toplinskih dobitaka od Sunca
U	[W/m ² *K]	koeficijent prolaza topline
λ	[W/m*K]	toplinska provodnost

1. Uvod

Trendovi i regulative nalažu smanjenje potrošnje energije u svim područjima, tako i u sektoru zgradarstva te se ulažu veliki napor u razvoj programskih sustava koji omogućuju i olakšavaju precizno projektiranje zgrada. Pri tome se misli na projektiranje temeljeno na rezultatima proračuna koji kao ulazne podatke koriste detaljnije podatke o svojstvima ovojnice, sustava u zgradi te mjerene meteorološke podatke koji opisuju stvarne vanjske uvjete kroz godinu za određenu lokaciju. 80-ih godina prošlog stoljeća, razvoj tehnologije omogućio je korištenje energetske modele pri projektiranju [1]. Energetsko modeliranje zgrada je metoda pomoću koje se predviđaju toplinska opterećenja i sveukupna potrošnja energije na stambenim i poslovnim zgradama. Ova metoda najčešće se koristi kod projektiranja novih zgrada, no može se koristiti i kod energetske obnove kako bi se unaprijed kvantificirali i predvidjeli utjecaji pojedinih strategija i zahvata ili je moguće uočavanje grešaka u radu postojećih sustava. U početcima, simulacijski alati zahtijevali su veoma skupa i sofisticirana računala, no razvojem računalne tehnologije omogućeno je korištenje zahtjevnih programskih alata na stolnim ili prenosivim računalima. Time se omogućila široka i česta primjena energetske simulacije.

Energetski modeli zgrada pružaju brojne i korisne informacije o primijenjenim strategijama te daju jasne slike o energetskim svojstvima zgrade, a relevantni rezultati energetske simulacije za određivanje energetske klase zgrade su: toplinska i rashladna opterećenja, električna energija potrebna za rasvjetu i električna energija za pogon uređaja i strojeva. Osim navedenih rezultata, moguće je prikazati mnoge druge parametre, kao na primjer: tokove energije kroz površine prema okolišu, potrebnu energiju za mehaničku ventilaciju, temperature zraka u prostorijama, itd. Velike koristi od rezultata simulacije imaju projektanti budući da im podaci o energetskom svojstvu zgrade pomažu u donošenju odluka o novim konceptima i promjenama koje treba primijeniti. Također, rezultati simulacije omogućuju investitoru praćenje razvoja investicije i donošenja odluka na temelju kvalitetnih informacija.

Za uspješan projekt bitna je bliska interakcija stručnjaka budući da u energetskom modeliranju postoji velika ovisnost između arhitekture, građevine, strojarstva i elektrotehnike. Ovakav pristup omogućuje bolju komunikaciju i paralelan rad, sve u svrhu postizanja zadovoljavajućih standarda pri projektiranju niskoenergetskih zgrada.

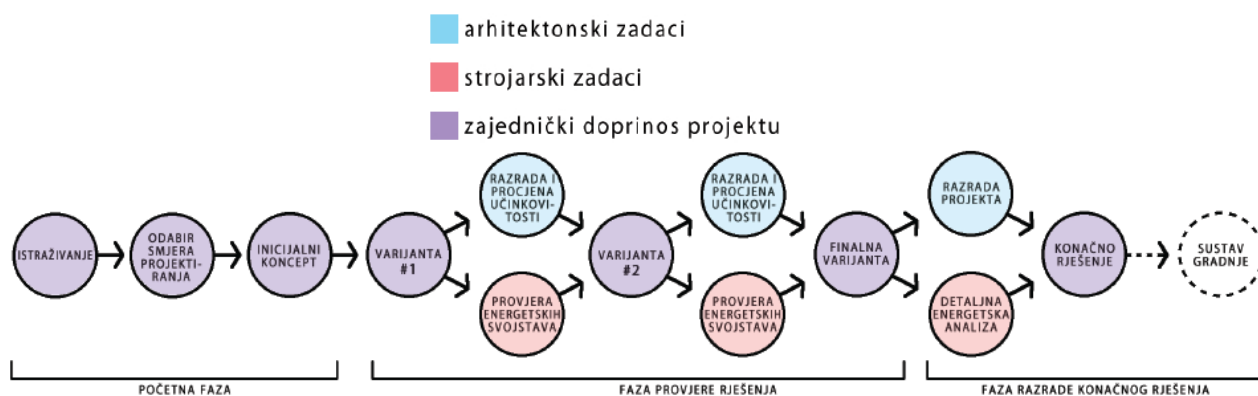
U ovom diplomskom radu prikazan je proces razvoja projekta u ranim fazama projektiranja niskoenergetskih zgrada primjenom energetskih simulacija. Cilj je prikazati i objasniti proces projektiranja niskoenergetske zgrade baziran na interdisciplinarnom pristupu i korištenju energetskog modela te optimizacijom zgrade postići energetski razred A+, tj. smanjiti potrebnu energiju za grijanje na vrijednost 15 kWh/m²a, a potrebnu energiju za hlađenje na vrijednost 20 kWh/m²a. Projektirana zgrada korisne površine 2028 m² smještena je na području grada Ivanca i poslovne je namjene. Rad je napravljen u suradnji s diplomantom arhitekture Markom Friščićem i njegovim mentorom doc. dr. sc. Mateom Bilušom.

Proces je podijeljen u tri faze: faza razvoja početnog rješenja, faza provjere početnog rješenja i iteracija te faza razrade konačnog rješenja. Prvi korak u procesu rada na ovom projektu bilo je proučavanje postojećih primjera niskoenergetske arhitekture i uočavanje primijenjenih strategija. Bitno je naglasiti da određene strategije odgovaraju pojedinom klimatskom području te da se u pravilu ne primjenjuju bez energetske opravdanosti, no ponekad su zahtijevane radi estetike od strane investitora ili arhitekta. Npr. velike ostakljene površine nisu povoljne u hladnijim klimama jer stvaraju velike toplinske gubitke u zimskom periodu godine, dok u toplim klimama nije poželjno pretjerano izoliranje vanjskih zidova budući da time raste rashladno opterećenje tijekom ljetnog perioda. Nadalje, proučavana je tradicionalna arhitektura pojedinih naroda koji su svoje nastambe veoma dobro prilagodili klimatskom području u kojem žive, a isto tako i moderna arhitektura koja pasivne strategije grijanja, hlađenja i ventilacije povezuje s mehaničkim sustavima u svrhu energetske neovisnosti zgrada. Uzevši u obzir klimatsko područje, o kojem je više rečeno u kasnijim poglavljima, odabrane su glavne strategije primijenjene prilikom projektiranja. Konačnom razradom strategija koncept prelazi u početno arhitektonsko rješenje čime završava prva faza.

Na temelju početnog arhitektonskog rješenja napravljen je energetski model za simulaciju procesa u zgradi. Model je napravljen u računalnom programu za 3D modeliranje, Rhinosceros, dok su za energetske simulacije korišteni dodaci za dotični program: Grasshopper, Honeybee, Ladybug te računalni programi EnergyPlus i CoolVent. Detalji modela i računalnog programa su objašnjeni u poglavlju 1.1. Model objedinjuje geometriju inicijalnog koncepta, odabrane materijale pojedinih građevnih elemenata, definirane zone vrijeme korištenja zgrade, broj ljudi, količinu i vrstu opreme te rasvjete. Paralelno s energetskom simulacijom napravljena je razrada i procjena učinkovitosti trenutnog arhitektonskog rješenja u pogledu sigurnosti i funkcionalnosti. Rezultati energetske simulacije

i simulacije dnevnog svjetla daju jasnu sliku o energetskim svojstvima ispitivanog modela te su na temelju istih napravljene iteracije na modelu za koje se pretpostavlja da pridonose energetske učinkovitosti. Prilikom izmjena modela od iznimne važnosti bila je bliska suradnja s arhitektom, kako uvođenje novih koncepata koji doprinose energetske učinkovitosti ne bi narušili zahtjeve za funkcionalnim i estetskim vrijednostima. S druge strane, cilj projekta je bio da dizajn zgrade bude energetski opravdan, tj. da ne narušava energetska svojstva zgrade uz zadovoljenje uvjeta toplinske ugodnosti.

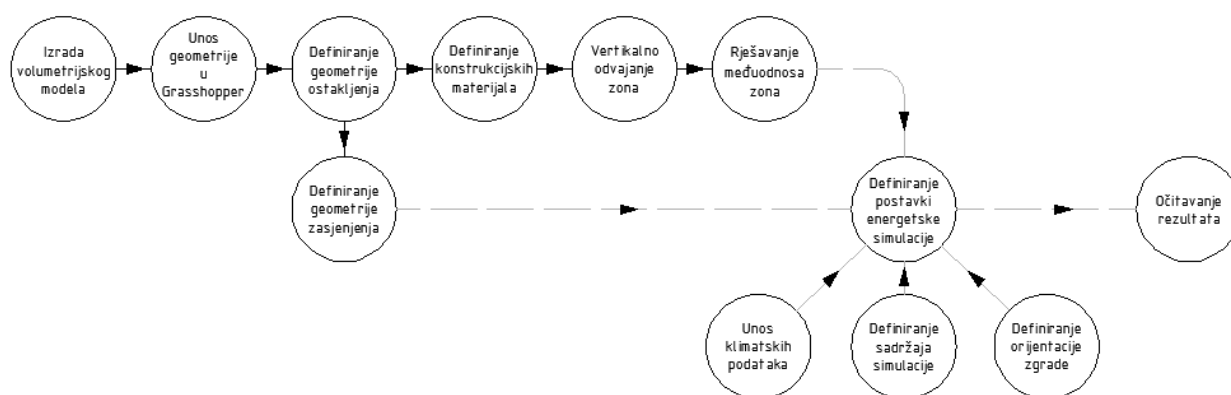
Nakon uvođenja dogovorenih izmjena u energetski model, ponovno je provedena energetska simulacija te je postupak ponavljan kroz nekoliko iteracija dok nisu postignuti zadovoljavajuća energetska svojstva zgrade, čime se zaključuje faza provjere rješenja. Nakon što je postignuta zadovoljavajuća razina kvalitete dizajna i energetskih svojstava zgrade na konačnoj varijanti su napravljena detaljnija energetska ispitivanja i arhitektonska razrada što pripada fazi razrade konačnog rješenja. Shema cjelokupnog iterativnog procesa prikazana je na slici 1.



Slika 1 Prikaz procesa projektiranja interdisciplinarnim pristupom

2. Energetsko modeliranje i simulacije potrošnje u višezonskoj zgradi

Proces izrade energetskih modela zgrade bazira se na stvaranju što preciznije slike zgrade. Programski alati za energetsko modeliranje ograničeni su u pogledu obrađenih slučajeva i izvedbi, no moguće rješenje problema su dobro osmišljene aproksimacije, čime je moguće stvoriti realističan model. Proračun za promatranu zgradu rađen je u programskom paketu za energetsko modeliranje EnergyPlus koji se povezuje s programom za 3D modeliranje Rhinosceros. Za potrebe simulacije pasivnih strategija korišten je računalni program CoolVent. Izrada modela vrši se u nekoliko koraka, a shema procesa prikazana je na slici 2.



Slika 2 Proces izrade energetskog modela zgrade

Rhinosceros je program koji se koristi za izradu geometrije zgrade na kojoj se temelji daljnja izrada energetskog modela. Osim za izradu modela korišten je za prikaz rezultata energetskih simulacija i simulacija dnevnog svjetla na 3D modelu ili u obliku dijagrama.

EnergyPlus [2] je program koji se koristi za simulaciju zgrada u svrhu modeliranja energetskih svojstava (energija za grijanje, hlađenje, ventilaciju, rasvjetu i uređaje) i ostalih pogonskih potreba (potrošnja vode). Sastavljen je od više programskih modula koji se povezuju radi proračuna energetskih potreba, a to se provodi simulacijom na način da su zgrada i modelirani toplinski sustav izložen utjecajima različitih okolišnih i pogonskih uvjeta. Jezgra simulacije je model zgrade koji se bazira na proračunu toplinske ravnoteže. Isto tako, alat primjenjuje integralne simulacije što znači da se zgrada i energetski sustav proračunavaju istovremeno. Drugim riječima, prvi korak simulacije je postavljanje termodinamičke ravnoteže za simuliranu zonu koja definira toplinske uvjete u zoni čime su određene energetske potrebe što se ponavlja kroz sve vremenske korake simulacije. Rezultati

energetskih potreba pojedine zone koriste se kao ulazni podaci za simulaciju sustava u zgradi kako bi se odredila potrošnja isporučene energije i ostali relevantni parametri.

Grasshopper je programski dodatak usko vezan uz trodimenzionalno modeliranje u Rhinoscerosu. Koristi se za povezivanje Rhinoscerosa i programa za energetske simulacije, EnergyPlus. Programski dodaci za Grasshopper, Honeybee i Ladybug, služe za pojednostavljenje korištenja EnergyPlus-a kroz lakši unos i generiranje ulaznih podataka za u energetske simulacije i simulacije dnevnog svjetla.

Ladybug [9] omogućuje učitavanje meteoroloških podataka. Meteorološki podaci su dostupni na internetskoj stranici <https://energyplus.net/weather> s koje je moguće preuzeti mapu s podacima u .epw (EnergyPlus Weather) formatu. Također, omogućuje korištenje mjerenih satnih meteoroloških podataka, projiciranje ruže vjetrova, praćenje kuta upada Sunčevih zraka ovisno o vremenskom intervalu te niz drugih okolišnih parametara koji pomažu pri orijentiranju zgrade, određivanju geometrije i ostalim parametrima pri projektiranju niskoenergetskih zgrada. Osim unosa okolišnih parametara, Ladybug se koristi za vizualizaciju rezultata simulacija u obliku grafova ili projiciranje na 3D modelima.

Honeybee [9] je programski dodatak za Grasshopper koji povezuje Grasshopper s programima za energetske simulacije i simulacije dnevnog svjetla kao što su EnergyPlus, Open Studio, Radiance i Dayism.

CoolVent [3, 4, 5, 6, 7, 8] je program koji proračunava utjecaje prirodne ventilacije, tj. pasivnog hlađenja na toplinsku ugodnost i smanjenje energetske potrebe za vrijeme korištenja zgrade ovisno o strategiji pasivnog hlađenja. Glavni ulazni podaci potrebni za proračun dijele se na:

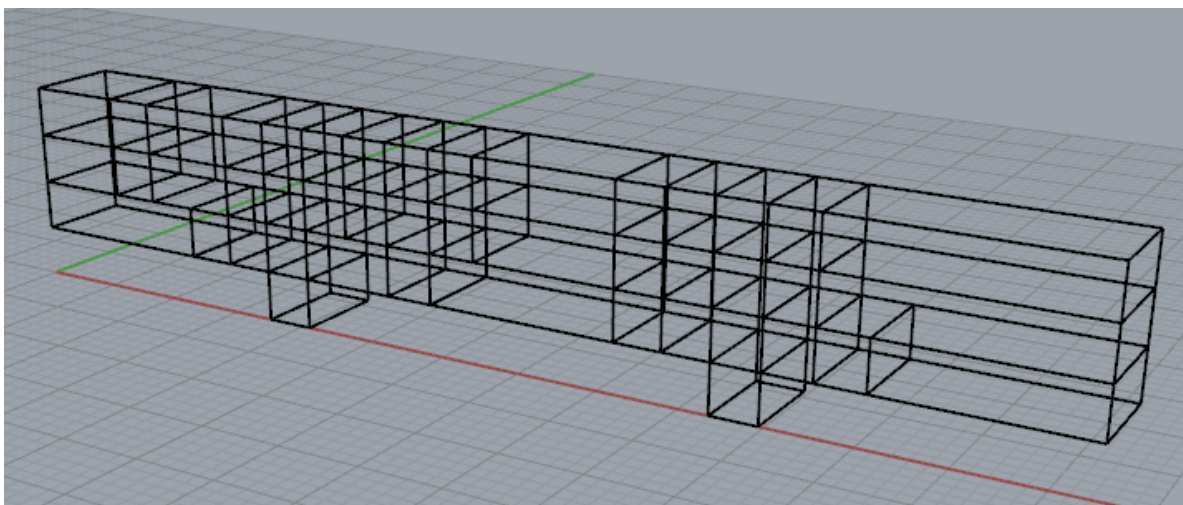
- Općenite – pružaju informaciju o lokaciji i svojstvima okolnog terena koji imaju utjecaj na strujanje zraka te o kakvom tipu simulacije se radi (stacionarni ili nestacionarni)
- Detaljne informacije o zgradi – ovim putem se definiraju unutarnji dobici za vrijeme korištenja zgrade, vrijeme korištenja zgrade, faktor smanjenja unutarnjih dobitaka izvan vremena korištenja (npr. unutarnji dobici smanje se na 20% kada ljudi ne borave u zgradi), orijentacija zgrade, dimenzije zgrade, dimenzije ostakljenih površina i otvora

- Meteorološki podaci – određuje se period godine za koji se vrši analiza, omogućuje unos meteoroloških podataka za željenu lokaciju, a proračun se vrši za karakterističan dan u mjesecu

Uz glavne ulazne podatke potrebno je definirati pasivne strategije hlađenja na način da se ovisno o temperaturi vanjskog zraka i/ili dobu dana odrede režimi otvaranja i zatvaranja prozora. Isto tako, potrebno je definirati svojstva materijala, odnosno ovojnice u kojoj se akumulira rashladni učin. Rezultati simulacije prikazuju temperature, strujanje zraka i uvjete toplinske ugodnosti u prostoriji. Iako je sučelje vizualnog tipa, moguć je ispis detaljnih podataka u obliku tekstualnih datoteka. Program koriste većinom inženjeri strojarstva i arhitekture radi boljeg shvaćanja utjecaja geometrije zgrade i vremenskih uvjeta na strujanja i temperaturu zraka u prostorijama zgrade. Ovaj program se koristio kako bi se na temelju rezultata simulacije smanjila potrebna energija za hlađenje primjenom strategije pasivnog hlađenja.

2.1 Izrada volumetrijskog modela

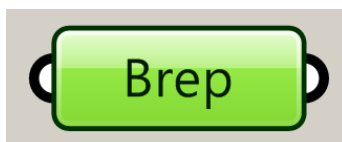
Volumetrijski model izrađuje se u Rhinoscerosu i predstavlja volumene pojedinih prostorija, odnosno zona zgrade (Slika 3). Bitno je naglasiti da je potrebno pažljivo zonirati zgradu budući da Grasshopper prepoznaje zonu kao volumen dobro izmiješanog zraka homogenih svojstva i temperature. Prema tome, zone su odabrane tako da predstavljaju pojedine prostorije dotične zgrade, čime je definirana osnovna geometrija koju je potrebno unijeti u Grasshopper.



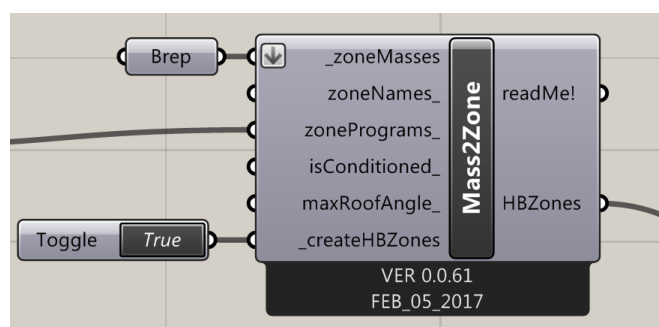
Slika 3 Prikaz volumetrijskog modela

2.2 Unos geometrije u Grasshopper i zoniranje

Kako bi se izradio energetski model zgrade, potrebno je unijeti geometrijska svojstva zgrade u Grasshopper, a ona su definirana u volumetrijskom modelu. Geometrija se uvodi u Grasshopper pomoću naredbe „brep“ (Slika 4) koja omogućava unos modela iz Rhinoscerosa.

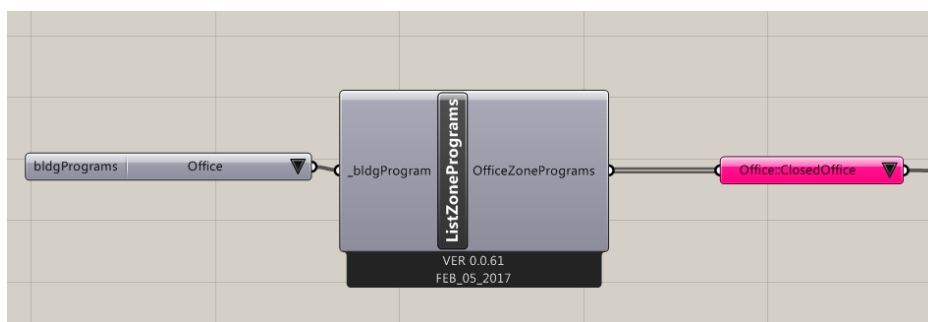


Slika 4 Naredba za unos geometrije



Slika 5 Naredba za zoniranje

Unesen model potrebno je klasificirati kao zonu pomoću naredbe „Masses2Zones“ (Slika 5) koja zatvorenu konturu pretvara iz mase u zonu čime se definiraju homogena svojstva zraka u spomenutoj zoni. Zona može predstavljati jednu ili skup prostorija u kojoj vladaju jednaka temperatura i uvjeti. Zoniranje (Slika 6) je veoma bitno budući da se u ovom koraku definiraju vrijeme korištenja i namjena zona koji utječu na potrošnju električne energije, minimalni broj izmjena zraka i temperaturne režime. Potrošnju električne energije određuje broj uređaja i rasvjetnih tijela čija su svojstva definirana samom zonom.



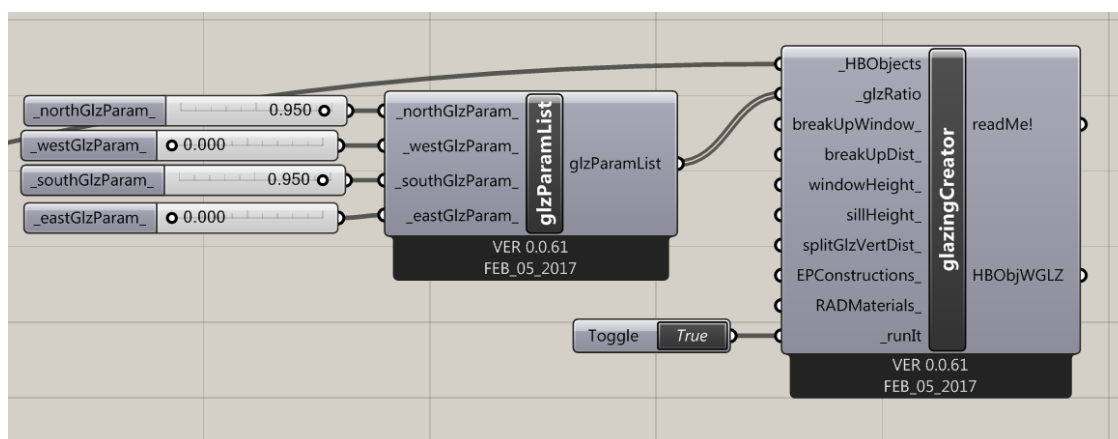
Slika 6 Primjer definiranja zona

Vrijeme korištenja je vremenski period dana kada ljudi borave u prostorima zgrade i kada moraju biti zadovoljeni uvjeti toplinske ugodnosti. Primjerice, za uredske prostore vrijeme korištenja je predviđeno od 8 do 17 sati pet dana u tjednu te su u obzir uzeti blagdani.

2.3 Definiranje geometrije ostakljenja

Prozori su građevni elementi koji propuštaju kratkovalno Sunčevo zračenje što rezultira toplinskim dobitcima u prostoru. Isto tako, u pravilu prozori imaju veći koeficijent prolaza topline od neprozirnih građevnih elemenata te često predstavljaju znatan udio ukupnih toplinskih gubitaka zgrade. Vrsta, dimenzija i oblik ostakljenja utječu na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje utjecanjem na toplinske gubitke i dobitke. Isto tako, pravilnim projektiranjem ostakljenja u interakciji akumulacijom energije u masi zgrade (npr. podovi) može se ostvariti pasivno grijanje kojim se, pogotovo za manje objekte, može pokriti značajni udio potrebne energije za grijanjem, što ovisi o klimatskom području, lokaciji, geometriji, namjeni i orijentaciji same zgrade. Također, s obzirom da zasjenjenje od okolnih zgrada može znatno utjecati na potrošnju energije pojedinih zona (npr. smanjiti toplinske dobitke od Sunčevog zračenja), pri projektiranju niskoenergetskih zgrada potrebno je obratiti pozornost na dimenzioniranje, oblik i vrstu prozora u ovisnosti o orijentaciji i smještaju zgrade u prostoru.

Ostakljenje je u korištenom računalnom programu moguće modelirati na nekoliko načina, pri čemu je u ovom projektu izvedeno je preko naredbe „Glazing creator“ (Slika 7).



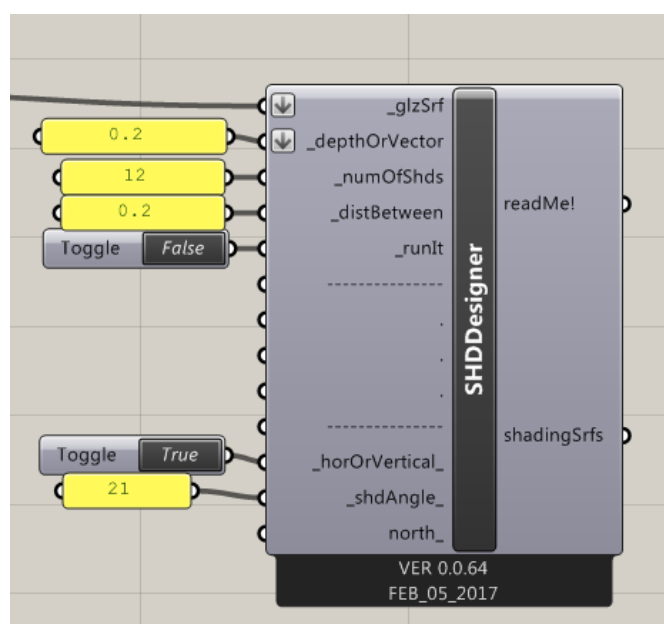
Slika 7 Naredba za modeliranje ostakljenja

Prvi korak u modeliranju ostakljenja pojedine zone je određivanje udjela ostakljenja po površini pojedinih zidova ovisno o orijentaciji, pri čemu se raspon mogućih udjela površine ostakljenja kreće se od 0 do 95%. Osim definiranja površine prozora, moguće je definirati točnu geometriju i smještaj pojedinog prozora na fasadi zgrade, što može biti vrlo bitan parametar, na primjer prilikom simulacije dnevnog svjetla u zoni (eng. daylight).

2.3.1 Definiranje geometrije zasjenjenja

Sjenila se koriste za sprječavanje toplinskih dobitaka, što nažalost, najčešće rezultira smanjenjem količine dnevnog svjetla u prostoru. Isto tako, sjenila predstavljaju otpor pri prolazu topline iz zgrade prema okolišu u zimskom periodu i veći otpor pri prolazu topline tijekom noći čime mogu utjecati na smanjenje toplinskih gubitaka. S druge strane, pravilno dimenzioniranje i orijentacija zasjenjenja može znatno smanjiti potrebe za hlađenjem u ljetnim mjesecima, no lošim dizajnom moguće je također povećati potrebe za grijanje ukoliko se spriječi upad sunčevog zračenja u prostor zgrade u zimskom periodu.

Modeliranje zasjenjenja izvodi se pomoću naredbe „Shading designer“ (Slika 8). Kao osnovna površina za modeliranje koristi se površina modeliranog ostakljenja ili naknadno izrađena posebna površina u Rhinoscerosu. Moguće je odrediti duljinu, broj, nagib i razmak između lamela te odabir horizontalne i vertikalne izvedbe.

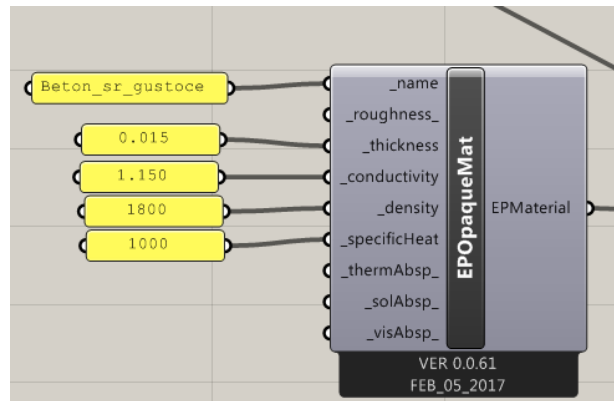


Slika 8 Primjer modeliranja zasjenjenja

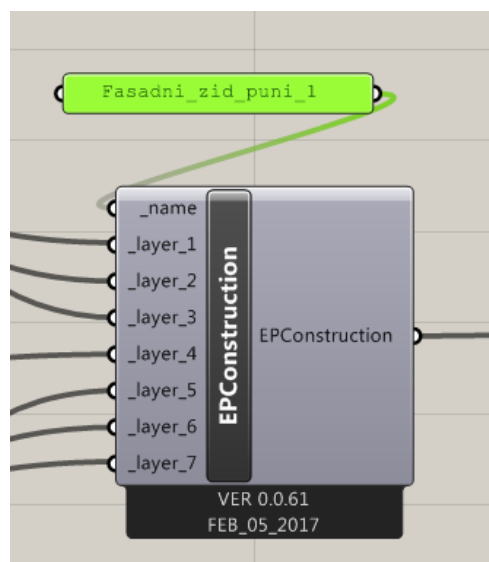
2.4 Definiranje konstrukcijskih materijala

Materijali građevinskih konstrukcija imaju velik utjecaj na energetske stanje zgrade, pri čemu projektiranje niskoenergetskih zgrada često zahtjeva korištenje skupljih, tj. kvalitetnijih materijala pri izgradnji, što povećava investicijske troškove. Međutim, pravilno odabrani materijali mogu znatno smanjiti pogonske troškove zgrade i time ostvariti ekonomsku opravdanost, odnosno povrat investicije u relativno kratkom vremenskom roku.

Uvođenjem građevinskih materijala (Slika 9) u energetske model, zidovi zona poprimaju fizikalna svojstva. Isto tako, zadavanjem optičkih svojstva utječe se na rezultate simulacije dnevnog svjetla, gdje se u obzir uzimaju refleksija ploha i difuznost. Nakon definiranja pojedinog materijala, potrebno je povezati materijale u konstrukciju (Slika 10).

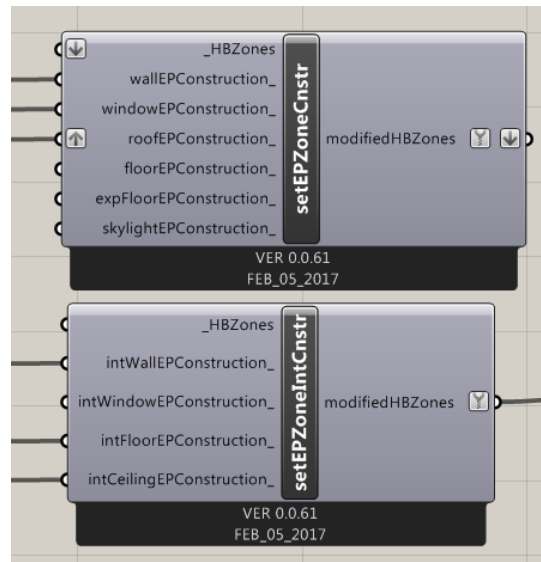


Slika 9 Primjer izrade materijala



Slika 10 Generiranje građevinske konstrukcije

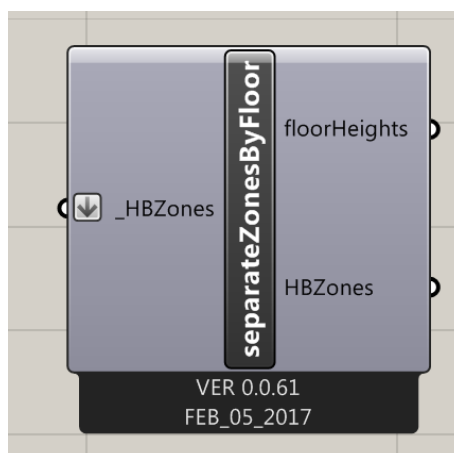
Nadalje, nakon izrade konstrukcije svih građevinskih elemenata, pomoću naredbe „set EP zone construction“ (Slika 11) dodjeljuju se svojstva građevnim elementima koji su u doticaju s okolišem, a naredbom „set EP zone interior construction“ (Slika 11) unose se svojstva građevinskih konstrukcija u unutrašnjosti zgrade.



Slika 11 Dodjeljivanje materijala pojedinim građevinskim konstrukcijama

2.5 Vertikalno odvajanje zona

Odvajanje zona po katovima je bitno za simulaciju jer se time modelira katnost zgrade, odnosno izmjena topline između zona po katovima, a vrši se naredbom „Separate zones by floor“ (Slika 12). Unosom prethodno definiranih zona sa zadanim svojstvima građevnih elemenata, naredba automatski prepoznaje visine prostorija i broj katova te ih razdvaja.



Slika 12 Naredba odvajanja zona po katovima

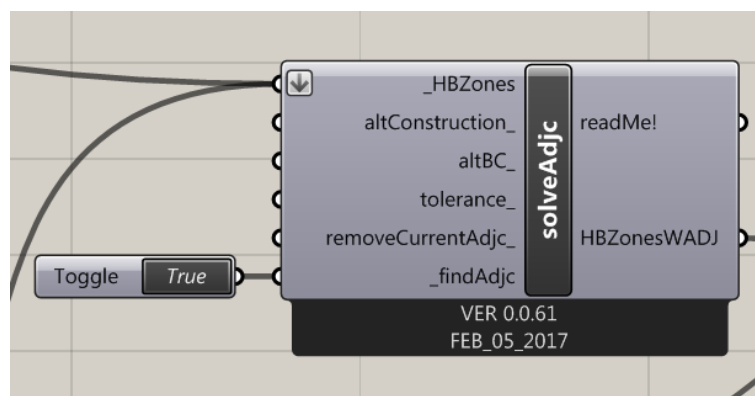
2.6 Definiranje međuodnosa zona

Naredba „Solve Adjacencies“ definira rubne uvjete i odnose između zona koje su u međusobnom kontaktu. Ovom naredbom omogućuje se pravilno definiranje pojedinih građevinskih konstrukcija čiji su materijali prethodno definirani.

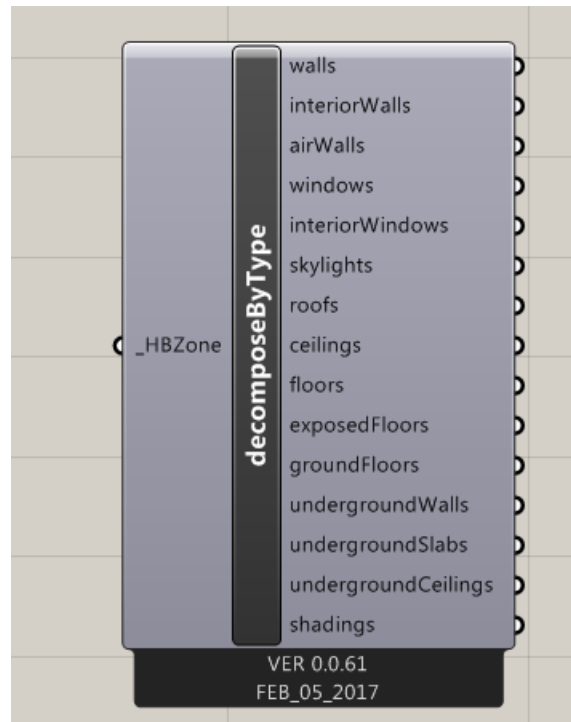
Osim samostalnog definiranja međuodnosa, moguće je ručno unijeti vrstu građevnih elemenata koje spajaju zone. Primjerice, moguće je definirati izvedbu zajedničke plohe između dvije zone kao zračni zid što znači da u spomenutim zonama vladaju isti toplinski uvjeti i svojstva. Ukoliko se odabere automatsko definiranje međuodnosa, pojedine plohe poprimaju obilježja vanjskih i unutarnjih zidova, krovova, stropova, podova, podova na tlu, izloženih podova i sve karakteristike dodijeljene su na temelju rubnih uvjeta koji se dijele na:

- Vanjski – definira plohe u dodiru s okolinom kao vanjske zidove, izložene podove, tj. dodijeljena su svojstva i materijali namijenjeni za vanjske građevne konstrukcije
- Adijabatski – nema izmjene topline između zona u dodiru ili između zone i vanjskog okoliša
- Zračni zid – iako su zone odvojene, ova pretpostavka definira zone odvojene zračnim zidom kao zone jednakih temperatura i homogenih svojstava zraka
- Pod – definira plohe koje su u dodiru s tlom i u proračun uzima temperaturu i svojstva tla

Na Slici 13 prikazana je naredba za definiranje međuodnosa zona, a na Slici 14 „decompose by type“ naredba koja omogućuje vizualizaciju pojedine vrste građevnih elemenata i služi za provjeru ispravnosti prethodne naredbe. Moguće je dodijeliti različite boje koje predstavljaju različite tipove ploha i time olakšati kontrolu.

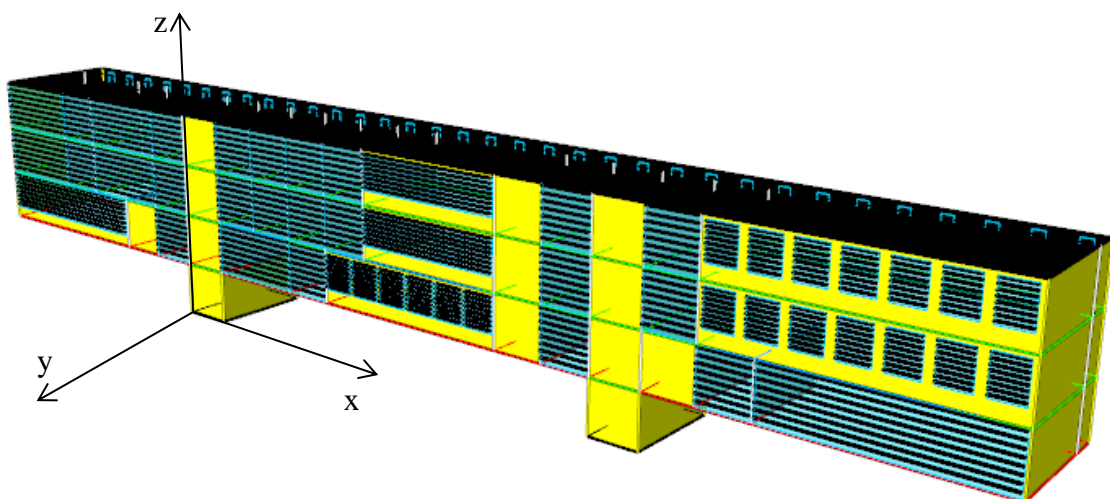


Slika 13 Rješavanje međuodnosa zona



Slika 14 Rastavljanje ploha

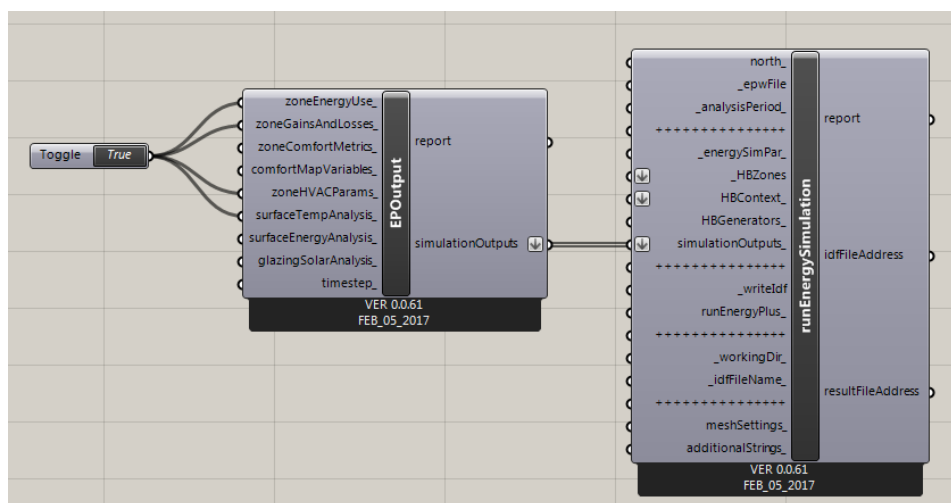
Na Slici 15 prikazane su pojedine plohe u različitim bojama. Žutom bojom označeni su vanjski zidovi, plava obilježava prozore, a crna boja krov. Time su odvojene pojedine plohe čija se svojstva razlikuju. Svi rubni uvjeti prepoznaju se automatski na temelju modela u Rhinosceros-u i njegovom položaju u koordinatnom sustavu. Plohe koje se nalaze na razini ishodišta po z-osi definirane su kao plohe u dodiru s tlom. Slično tome, sve plohe koje se nalaze negativno po z-osi smatraju se ukapanim.



Slika 15 Prikaz modela s definiranim ploham

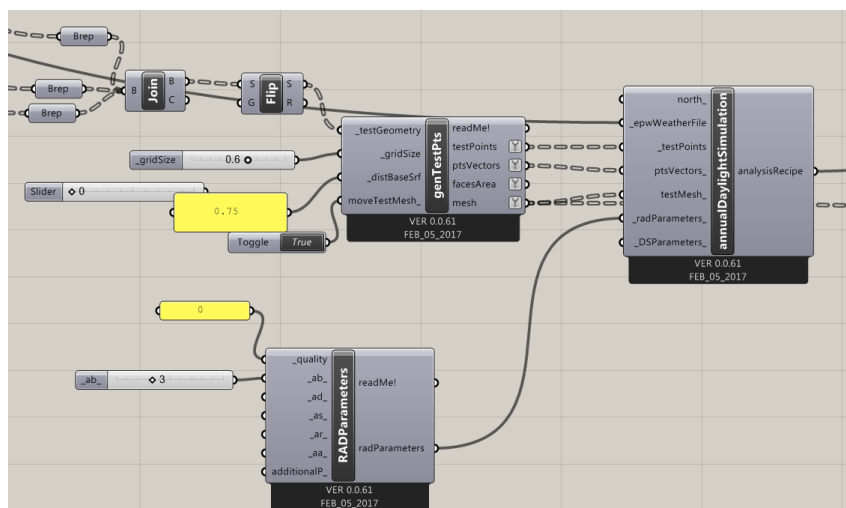
2.7 Definiranje postavki energetske simulacije i simulacije dnevnog svjetla

Dosad navedeni koraci u izradi energetske simulacije primjenjivi su za energetske simulacije te simulaciju dnevnog svjetla. Ulazni podaci u obje simulacije su definirane zone, generirano zasjenjenje, orijentacija zgrade i klimatski podaci. U postavkama simulacije definiraju se vremenski parametri simulacije, tj. vremenski korak za koji se radi proračun što može biti: za cijelu godinu, pojedini mjesec, dan, sat ili interval do minimalno 10 minuta. U ovom radu je definiran vremenski korak od jednog sata. Isto tako, potrebno je definirati izlazne podatke simulacije koji će se analizirati (Slika 16).

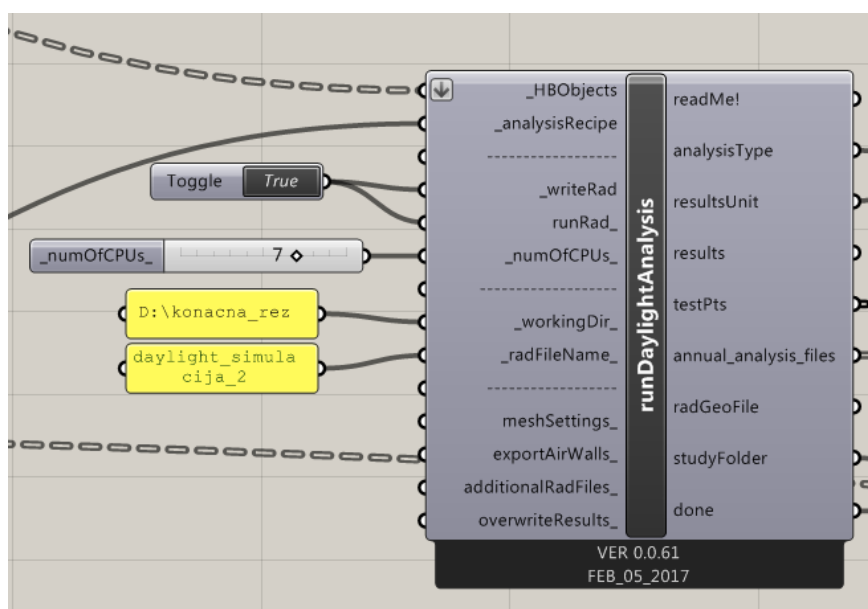


Slika 16 Primjer postavke simulacije

Za razliku od energetske simulacije, kod simulacije dnevnog svjetla potrebno je generirati ispitnu mrežu (Slika 17). Mreža se sastoji od niza povezanih točaka za koje se vrši proračun količine i intenziteta pristiglog dnevnog svjetla na plohu. Osnovna geometrija na kojoj se generira mreža su podovi energetske simulacije učitani pomoću naredbe „Brep“. Moguće je mijenjati postavke o visini na koju se mreža želi postaviti te gustoću mreže, čime se kvalitetnije opisuje raspodjela dnevnog svjetla. Mreža je u provedenoj analizi podignuta 75 cm od razine poda, odnosno u razini radnog stola, jer je bilo relevantno ispitati količinu dnevnog svjetla tijekom rada korisnika na radnim mjestima. Nakon generiranja mreže simulacija je pripravljena za pokretanje (Slika 18).



Slika 17 Generiranje mreže



Slika 18 Postavke simulacije dnevnog svjetla

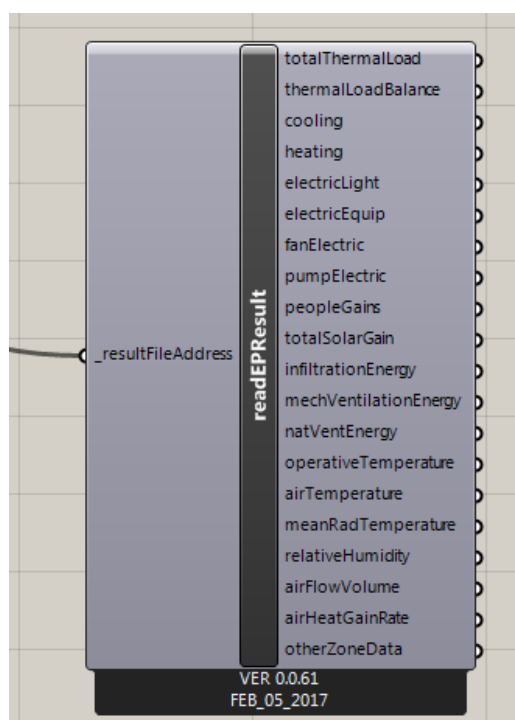
2.8 Upravljanje rezultatima simulacija

Proračun energetske potrebe zgrade u ovom radu temelji se na satnoj metodi prema matematičkom modelu u programu EnergyPlus. Prvo se provodi energetska simulacija kako bi se definirala energetska svojstva zgrade u ovisnosti o zadanim ulaznim parametrima, primjerice udjelu ostakljenja ili materijala, a potom se provodi simulacija dnevnog svjetla kako bi se pratio utjecaj iskoristivosti dnevnog svjetla na potrebnu električnu energiju za rasvjetu.

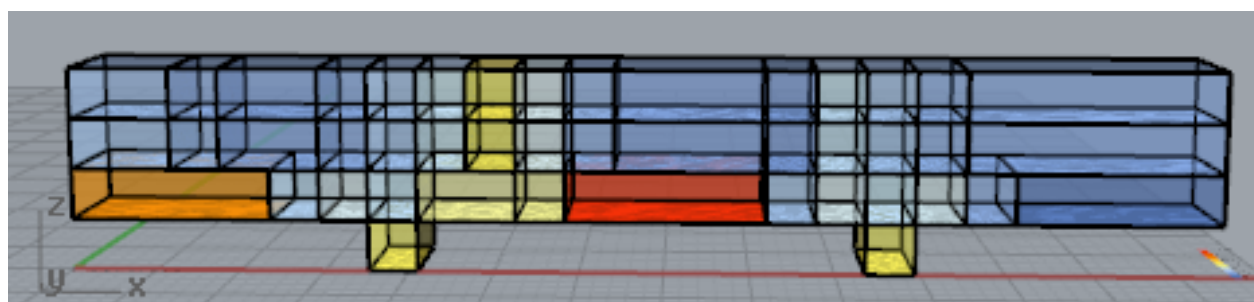
Simulacija pruža širok spektar podataka koje je moguće primijeniti u unapređenju energetske potrebe, kao na primjer energetske potrebe, toplinske gubitke i dobitke, energijski

tok kroz pojedine plohe, temperature zraka u prostoriji, relativnu vlažnost, i mnoge druge. (Slika 19). Rezultati simulacije dnevnog svjetla su skup velikog broja parametra, no referentni podaci za analizu u ovom radu su udio vremena kada nije potrebna rasvjeta tijekom vremena korištenja pojedine zone te raspodjela intenziteta svjetla u jedinici lux. Optimalni intenzitet dnevnog svjetla kreće se u rasponu od 300 do 1000 luxa, a ukoliko je vrijednost ispod raspona, potrebno je nedostatak svjetla nadomjestiti rasvjetom. Vrijednosti iznad 1000 luxa također nisu poželjne jer se definiraju kao blještavilo te je za takve slučajeve potrebno predvidjeti zasjenjenje. Rezultati obje vrste simulacija mogu biti prikazani na nekoliko načina, kao na primjer u obliku baze podataka, dijagrama ili mogu biti uklopljeni u 3D model te prikazati energetska slika pojedine zone. Prikaz rezultata na 3D modelu (Slika 20) jasno prikazuje kritične zone. Rezultati se prikazuju na sličan način kod simulacije dnevnog svjetla, ali projicirano na generiranu ispitnu mrežu (Slika 21).

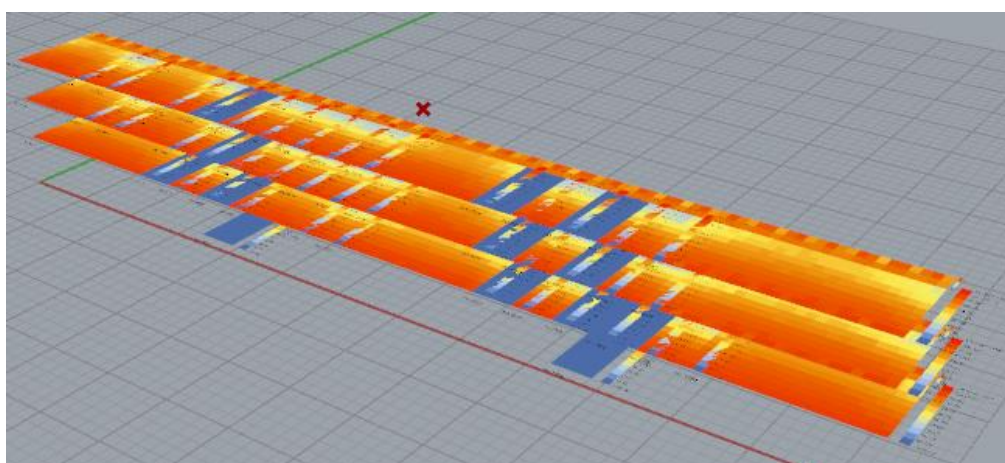
Prirodna ventilacija je način ventiliranja kod kojeg se koriste sile vjetera i/ili sila uzgona kao prirodne sile koje omogućuju strujanje zraka u prostorijama. Prirodna ventilacija se može primjenjivati za smanjenje potrošnje energije, poboljšanje kvalitete zraka i toplinske u prostoriji gdje borave ljudi. Model je izrađen u programu CoolVent u kojem se provodi simulacija prirodne ventilacije u svrhu pasivnog hlađenja. Na temelju geometrije zgrade, orijentacije, tipa strategije, unutarnjih dobitaka, vremena korištenja i meteoroloških podataka vrši se simulacija strujanja zraka i izmjene topline u zgradi te se dobivaju informacije o unutarnjim temperaturama, protoku zraka i parametrima toplinske ugodnosti za pojedine zone. Ukoliko su zadovoljeni uvjeti toplinske ugodnosti, tj. temperature zraka u zoni je između 22°C i 26°C, a apsolutna vlažnost između 0,002 i 0,015 $\text{kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{zr}}$, pretpostavljeno je da nema potrebe za mehaničkim hlađenjem. Uspoređivanjem navedenih uvjeta za svaki sat kroz godinu, procijenjen je utjecaj pasivnog hlađenja na smanjenje potreba za hlađenjem.



Slika 19 Očitavanje rezultata simulacije



Slika 20 Prikaz rezultata simulacije na 3D modelu



Slika 21 Prikaz rezultata simulacije dnevnog svjetla

3. Analiza varijanti dizajna zgrade

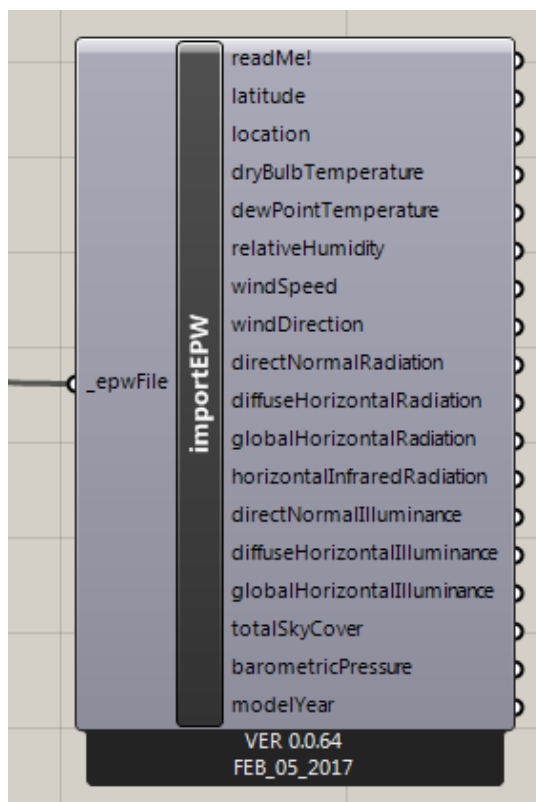
Sve analizirane varijante zgrade modelirane su i ispitane na način opisan u prethodnom poglavlju kako bi se prikazao utjecaj pojedinih promjena provedenih na modelu. Na temelju dobivenih rezultata, moguće je pratiti utjecaj pojedinih promjena parametara i strategija.

3.1 Meteorološki podaci

Kao što je već spomenuto, unos meteoroloških podataka zajedno s ostalim okolišnim parametrima domena su programskog dodatka Ladybug. Navedeni dodatak veoma je koristan prilikom prilagodbe zgrade klimatskim područjima zahvaljujući prikazu klimatskih karakteristika. Mape s meteorološkim podacima sadrže velik broj mjerenih parametara (Slika 22) kao što su:

- Temperatura suhog termometra
- Temperatura vlažnog termometra
- Relativna vlažnost
- Apsolutna vlažnost
- Smjer strujanja vjetra
- Brzina strujanja vjetra
- Specifična Sunčeva energija, itd.

Kao što je već spomenuto, meteorološki podaci kompatibilni za dotični program pohranjeni su u .epw formatu. Međutim, u programu Ladybug trenutno ne postoje satni meteorološki podaci niti za jedan grad u Republici Hrvatskoj u navedenom formatu, što predstavlja veliko ograničenje. Podaci su dostupni za sljedeće gradove u okolici RH: Ljubljana, Beograd, Sarajevo i Podgorica. Kao referentno klimatsko područje odabrana je Ljubljana budući da je predviđena lokacija uredske zgrade grad Ivanec u Varaždinskoj županiji na sjeverozapadu Hrvatske. Sve strategije primijenjene u projektu prilagođene su toj klimi budući da se strategije mijenjaju ovisno o rezultatima simulacije.



Slika 22 Naredba za unos meteoroloških podataka

Ljubljana je smještena u geografskim širinama umjerene kontinentalne klime koju karakterizira velika razlika između ljetnih i zimskih temperatura. Spomenuta razlika ljetnih i zimskih temperature otežava projektiranje niskoenergetskih zgrada budući da jak utjecaj na energetske bilancu zgrade ima Sunčevo zračenje kao i vanjska temperatura. Pri projektiranju zgrada u klimama koje u većem dijelu godine imaju niske temperature pogoduju manja ostakljenja uz dobro izolirane fasadne zidove te ostakljenja projektirana na mjestima koja su strateški pogodna za pasivne metode grijanja, kao na primjer akumulacijom Sunčevog zračenja tijekom sunčanih zimskih dana. Ovo potencijalno rješenje zimskog perioda godine, u suprotnosti je s optimalnim strategijama u ljetnom periodu kada prevladavaju vanjske temperature iznad 25°C. Naime, u ljetnom periodu bolja energetska svojstva imaju zgrade čiji zidovi nisu debelo izolirani te ostakljene površine s kvalitetno projektiranim zasjenjenjem u svrhu smanjenja dobitaka od Sunca. Uzevši u obzir spomenuta svojstva klime za koju su preuzeti meteorološki podaci, bazirane su strategije projektiranja o kojima je više rečeno u sljedećem poglavlju.

3.2 Početno arhitektonsko rješenje (PAR)

Planirana zgrada smještena je na praznoj parceli unutar građevinskog područja grada Ivanca, u sklopu Industrijske zone Ivanec - istok. Poslovne je namjene i sadrži uredske prostore i prateće sadržaje u sklopu uredske namjene. Građevna čestica oblikovana je od k.č.br. 4931, k.o. Ivanec. Površine je 5197,6 m², nepravilnog pravokutnog oblika. Građevna čestica nalazi se unutar neizgrađenog dijela građevnog područja Ivanca, prema UPU grada Ivanca namijenjenom poslovnoj namjeni (K). Maksimalna izgrađenost g.č. je 0,5, a iskoristivost 2,0. Maksimalna katnost je Po/Su+Pr+2+Pk, uz maksimalnu visinu od 12 m. Na Slikama 23 i 24 prikazana je čestica planirana za izgradnju zgrade.



Slika 23 Lokacija planirane zgrade



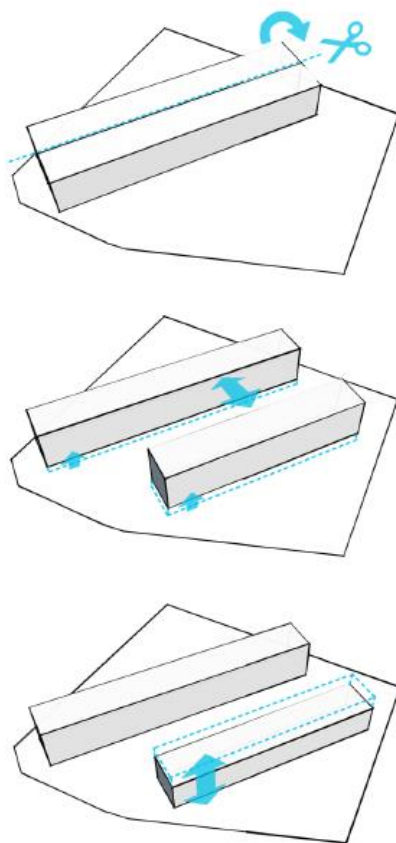
Slika 24 Slika katastarske čestice

Namjena zgrade je gospodarsko poslovna, sa sadržajima u skladu s odredbama čl. 10. UPU grada Ivanca. Unutar zgrade smješteni su uredski prostori s pratećim sadržajima poput kafića, konferencijske dvorane, ulaznog hola, zajedničkih radionica i tehničkih prostora u službi održavanja zgrade. Ukupna bruto površina zgrade je 4244 m², od toga 2700 m² u sklopu sjeverne lamele, 1500 m² u sklopu južne lamele i 44 m² u sklopu spojnog mosta. Koeficijent izgrađenosti g.č. je 0,24, a koeficijent iskoristivosti 0,82. Oblikovno, zgrada je razdijeljena u dva volumena, sjeverni volumen katnosti Su+Pr+2 i južni volumen katnosti Su+Pr+1 radi povoljnijeg izlaganju Suncu i bolje raspodjele dnevnog svjetla u prostoru, pri čemu su volumeni međusobno spojeni mostom na razini prvog kata. Prizemlje obje zgrade stupovima je odignuto od terena na maksimalnu visinu od 1,5 m. Lamele su pravilnog pravokutnog oblika i prate pružanje izgradnje zapadno od lokacije, tj. u otklonu su od približno 35° u odnosu na smjer pružanja parcele. Svrha otklona je poklapanje glavnih fasada zgrade sa kardinalnim osima što je predviđeno zbog povoljnijeg izlaganja Suncu (Slika 25). Pregled površina po namjeni prikazan je u Tablici 1.

Tablica 1 Pregled površina po namjeni

Namjena prostora	Površina [m²]
servisni prostori i komunikacije	1008,1
tehnički prostori	121,5
zajednički sadržaji	486,0
uredski prostori	1004,4
proširenja uredskih prostora i zajedničkih sadržaja	464,4
ukupno NKP zatvorenih prostora	3084,4

U pogledu energetske simulacije, južna lamela nije uzeta u obzir te su sva ispitivanja vršena na sjevernoj lameli, zbog zahtjevnosti prilagođavanja modela učestalijem preraspodjeli prostorija i promjeni namjene. Iako povezane mostom, lamele su potpuno odvojeni energetske sustavi te je za potrebe analize i prikaza procesa projektiranja, u obzir uzeta samo sjeverna lamela.

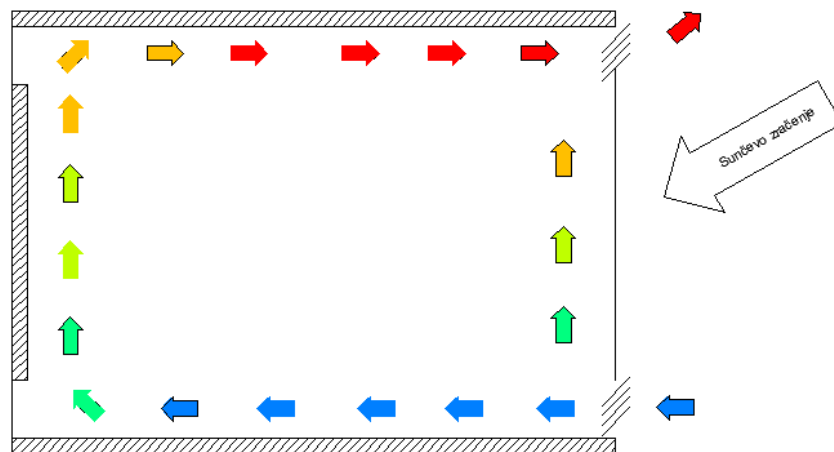


Slika 25 Odvajanje lamela zgrade radi povoljnijeg izlaganju suncu

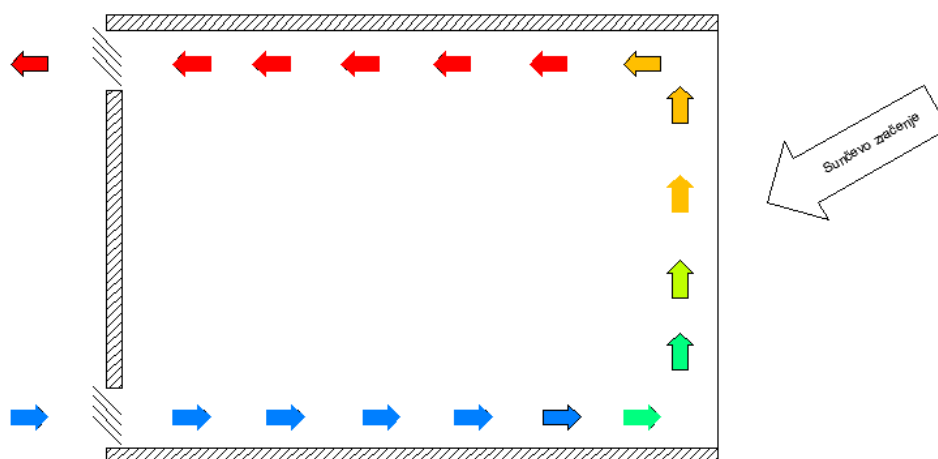
Radi boljeg iskorištavanja parcele, zgrada je podignuta za 3 m iznad razine suterena te je ispod zgrade, u suterenu predviđena izgradnja parkirališta. Iako ovakvo rješenje nije energetske opravdano budući da su prisutni toplinski gubici grijanog prostora prema vanjskom okolišu kroz relativno veliku površinu poda, ovakvo rješenje bilo je nužno zbog arhitektonskih zahtjeva. U svrhu postizanja povoljnog faktora oblika, odnosno omjera površine ovojnice i volumena zgrade, širina zgrade iznosi 70 m, a dubina 9,7 m. Razlog tome su potrebne dimenzije koje zadovoljavaju arhitektonske zahtjeve o korisnoj površini, dok je predviđena dubina procijenjena kao optimalna za potpuno osvjetljavanje ureda prirodnim dnevnim svjetlom.

Glavna energetska strategija je zimski vrt predviđen na južnoj fasadi, a koji se sastoji od dvije staklene ovojnice odvojene nenamjenskim prostorom. Stoga zimski u ovom slučaju djeluje slično fasadi s dvostrukom ovojnicom koja potencijalno može smanjiti vršna opterećenja i u sezoni grijanja i u sezoni hlađenja djelujući kao tampon zona. U zimskim mjesecima, kratkovalno Sunčevo zračenje upada u prostor zimskog vrta kroz vanjsku ovojnicu te zagrijava zrak unutar zimskog vrta. Predviđena je montaža ventilacijskih otvora koji bi se ugrađivali na unutarnju i vanjsku ovojnicu čijim bi se otvaranjem i zatvaranjem

upravljalo prema trenutnim potrebama zgrade. Ljeti se vanjski otvori zimskog vrta mogu otvoriti kako bi se omogućilo provjetravanje (Slika 26) u svrhu smanjenja temperature zraka u zimskom vrtu, dok zimi je predviđeno zatvaranje otvora u svrhu zagrijavanja zraka u prostoru zimskog vrta (Slika 27). Zagrijani zrak se pušta u grijani prostor zgrade kroz otvore na unutrašnjoj ovojnici kada je temperatura zraka u zimskom vrtu optimalna za grijanje prostora. Vanjska ovojnica na južnoj fasadi izvedena je u obliku „spider“ fasade sa 100% udjela ostakljene površine, dok je unutarnja djelomično ostakljena. Na primjer, sanitarni prostori nemaju ostakljenje kako bi se očuvala privatnost korisnika, a glavna stubišta nisu ostakljena radi obveznih protupožarnih zahtjeva. Vanjska ovojnica sastoji se od jednog sloja kaljenog stakla debljine 8 mm, a unutarnja od dvostrukog stakla debljina 8 i 6 mm. Konstrukcija prozora na sjevernoj fasadi izvedena je kao unutarnja ovojnica zimskog vrta.



Slika 26 Strujanje zraka u zimskom vrtu; ljetni režim

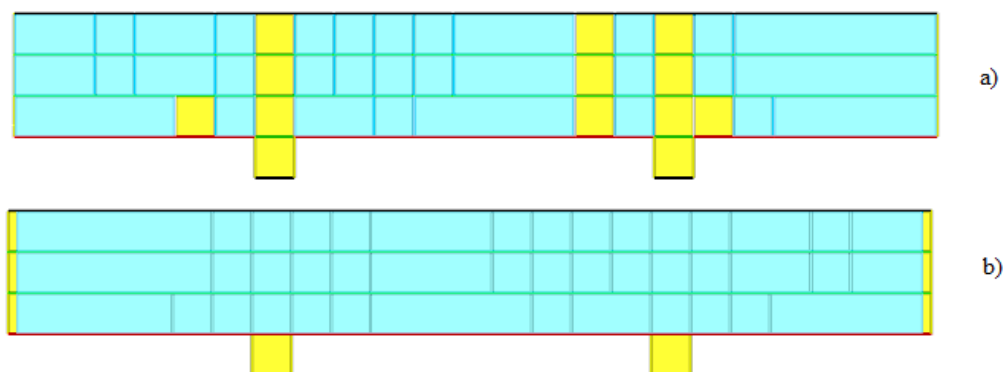


Slika 27 Strujanje zraka u zimskom vrtu; zimski režim

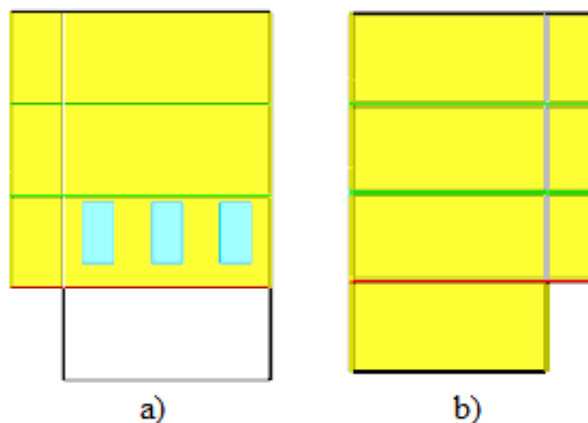
Sjeverno pročelje predstavlja orijentaciju koja nema dobitaka od Sunca budući da nema direktnog upada Sunčevog zračenja. Upravo iz tog razloga, potrebno je izolirati

sjevernu stranu zgrade i smanjiti udio ostakljenja u odnosu na južnu. S obzirom da arhitektonsko rješenje nalaže maksimalno ostakljenje sjevernog pročelja radi iskorištavanja dnevnog svjetla i estetike, u svrhu smanjenja toplinskih gubitaka izazvanih većim koeficijentima prolaza topline i velike ostakljene površine predviđena je tampon-zona na sjevernoj strani zgrade. Tampon-zona izvedena je u obliku negrijanog hodnika čime je riješena komunikacija između prostorija, ali su također onemogućeni direktni toplinski gubici grijanog prostora prema okolišu. Ovakvim rješenjem nastoje se smanjiti vršna opterećenja za pokrivanje toplinskih gubitaka kroz negrijani prostor, slično kao i korištenjem zimskog vrta. Osim hodnika, glavna stubišta također nisu grijani prostori. Grijane prostorije nemaju ostakljenja prema hodniku već su odvojene pregradnim zidom.

Istočna i zapadna fasada su zahtjevne orijentacije pri projektiranju zasjenjenja s obzirom da Sunčevo zračenje na njih pada pod nižim kutom upada. U sezoni grijanja dani su kraći, pa se javlja problem kratke izloženosti Sunčevom zračenju na istočnoj i zapadnoj strani, no veći problem je u sezoni hlađenja kada dani duže traju, a izlasci i zalasci Sunca proporcionalno tome, čime se povećavaju dobici od Sunca u prostoru. Upravo iz tih razloga, potrebno je minimizirati površine istočne i zapadne fasade čime se smanjuje utjecaj navedenih orijentacija. Stoga je istočno pročelje predviđeno kao potpuno neostakljeno, dok je na zapadu ostakljen dio konferencijske dvorane u prizemlju. U skladu s navedenim strategijama napravljen je energetska model zgrade, a pročelja su prikazana na Slikama 28 i 29.



Slika 28 Prikaz pročelja; a) južno, b) sjeverno



Slika 29 Prikaz bočnih pročelja: a) zapadno, b) istočno

Materijali su odabrani sa što manjim koeficijentom prolaza topline, a pritom se u obzir uzima modularna konstrukcija zgrade koja se izvodi montiranjem što znači da su se zahtjevi također odnosili i na jednostavnost izgradnje te transporta konstrukcija. Dakle, elementi modularnog sustava rađeni su s ciljem ekonomičnosti, brzine izvedbe i ugradnje te prilagođeni postizanju niskoenergetskih rješenja zgrade. Predviđeno je korištenje stropnih ploča su od šupljih armiranobetonskih ploča završne obloge od poliranog betona, s anti-scratch podlogama na pozicijama radnih mjesta. Podovi u hodniku predviđeni su kao tanke armirano betonske ploče položene na čeličnu konstrukciju. Podovi u zimskom vrtu izvedeni su kao čelične rešetke, kako bi se omogućilo dodatno provjetravanje međuprostora fasadnih opni. Sve podne obloge protuklizne su i u skladu s Pravilnikom o zaštiti na radu za mjesta rada.

Nadalje, udio površine ostakljenja kod „spider“ fasade u Tablici 3 naznačen kao 100%, no jedno od ograničenja pri izradi energetskog modela je modeliranje ostakljenja kod kojeg je najveći mogući udio ostakljenja postavljen na 95% zbog mogućih problema pri korištenju matematičkog modela. Materijali koji se koriste u konstrukciji građevnih elemenata prikazani su u Tablicama 2 i 3 zajedno s pripadajućim koeficijentima prolaza topline te su korišteni pri modeliranju pojedinih konstrukcija u računalnom programu.

Tablica 2 Popis neprozirnih građevnih elemenata PAR-a

Neprozirne građevinske konstrukcije			U [W/m ² K]
Fasadni zid puni			0,22
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Beton	15	1,15	
Sendvič konstrukcija drvo-kamena vuna-drvo	150	0,04	
Polietilen	0,15	0,19	
Sendvič konstrukcija drvo-kamena vuna-drvo	150	0,04	

Kišna brana	0,1	0,04	
Drvo	2,5	0,13	
Kombi ploče			0,24
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Drvolit ploče	7,5	0,14	
Mineralna vuna	135	0,035	
Drvolit ploče	7,5	0,14	
Krov			0,14
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Pune gipsane ploče	12,5	0,47	
Mineralna vuna	40	0,035	
Sloj zraka	250	1,563	
Beton srednje gustoće	120	1,35	
Armirani beton	30	2,5	
Mineralna vuna	200	0,035	
Polimerna hidroizolacijska traka na bazi PVC-a	5	0,14	
Međukatna konstrukcija			0,59
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Pune gipsane ploče	12,5	0,47	
Mineralna vuna	40	0,035	
Sloj zraka	250	1,563	
Beton srednje gustoće	120	1,35	
Armirani beton	30	2,5	
Pod			0,14
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Armirani beton	30	2,5	
Beton srednje gustoće	120	1,35	
Ekstrudirana polistirenska pjena	20	0,03	
Pune gipsane ploče	12,5	0,47	
Armirani beton	160	2,5	
Pregradni zid			0,41
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Beton srednje gustoće	15	1,15	
Sendvič konstrukcija drvo-kamena vuna-drvo	85	0,04	
Beton srednje gustoće	15	1,15	
Vanjski zid puni			0,27
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Beton srednje gustoće	25	1,15	
Sendvič konstrukcija drvo-kamena vuna-drvo	135	0,04	
Beton srednje gustoće	15	1,15	

Tablica 3 Popis prozirnih građevinskih elemenata PAR-a

Prozirne građevinske konstrukcije					
Ostakljenje prema zimskom vrtu, na sjevernoj i zapadnoj strani					
Debljina [mm]	U_{stakla} [W/m ² K]	U_{okvira} [W/m ² K]	F_F -udio ostakljenja	U [W/m ² K]	SHGC
6	1,1	2,6	0,9	1,25	0,85
Spider fasada					
Debljina [mm]	U_{stakla} [W/m ² K]	U_{okvira} [W/m ² K]	F_F -udio ostakljenja	U [W/m ² K]	SHGC
8	1,1	/	1	1,1	0,85

Temperatura zraka u prostorijama održava se između 22°C i 26°C, a kada u prostoriji ne borave ljudi temperatura u prostoriji se održava na minimalno 15°C, čime se omogućuje da temperatura zraka i zidova u zgradi ne padne prenisko kako se ne bi izazvala vršna opterećenja pri početku sljedećeg radnog dana. Grijane zone ujedno su i hladene (Slika 30).



Slika 30 Prikaz grijanih (crveno) i negrijanih (plavo) zona; a) prizemlje, b) prvi kat, c) drugi kat

Unutarnji toplinski dobitci su konstantni tijekom proračuna svih varijanti (Tablica 4), a sastoje se od toplinskih dobitaka ljudi, uređaja i rasvjete te su prisutni za vrijeme korištenja zgrade. Toplinski dobitci od rasvjete mijenjaju se s obzirom na rezultate simulacije dnevnog svjetla, a funkcija po kojoj se mijenjaju prikazana je u sljedećem poglavlju.

Tablica 4 Prikaz unutarnjih dobitaka

Unutarnji dobitci [W/m ²]	
Ljudi	5,36
Rasvjeta	4,45
Uređaji	5,05

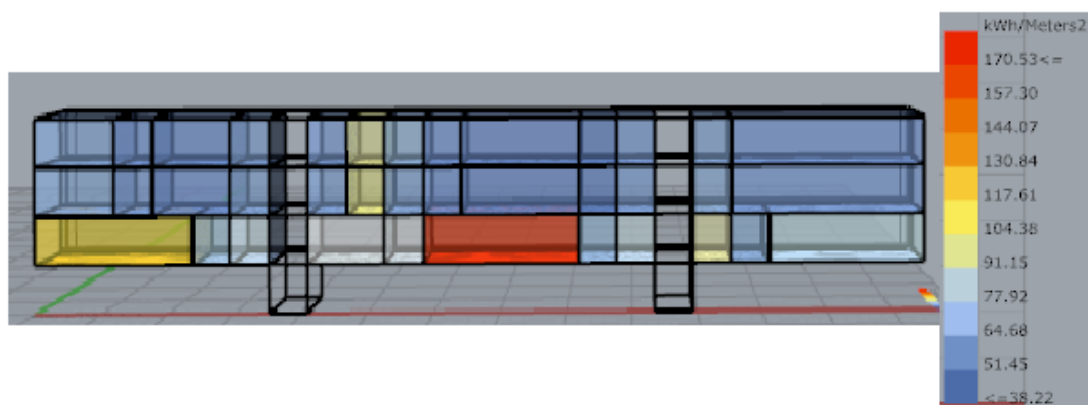
3.2.1 Rezultati energetske simulacije početnog arhitektonskog rješenja

Iako su provedeni satni proračuni potrošnje energije radi preglednijeg prikaza rezultata prikazana je godišnja potrebna energija za grijanje, hlađenje i rasvjetu, svedena na korisnu površinu zgrade (Tablica 5).

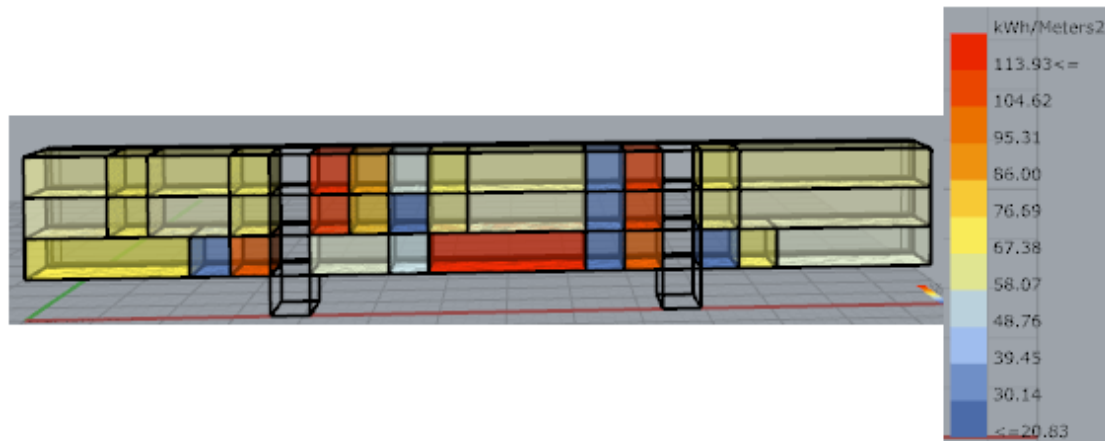
Tablica 5 Potrebna specifična energija početnog arhitektonskog rješenja

Potrebna specifična energija [kWh/m ² a]	
Grijanje ($Q''_{H,nd}$)	45
Hlađenje ($Q''_{C,nd}$)	39
Rasvjeta	39

Iz rezultata je vidljivo da potrebna energija za grijanje trostruko premašuje zadani cilj od 15 kWh/m²a, a potrebna energija za hlađenje skoro dvostruko zadani cilj od 20 kWh/m²a. Razlog tome su veliki transmisijski gubici kroz velike ostakljene površine na sjevernoj i južnoj fasadi. Slika 30 i Slika 31 na 3D energetskom modelu prikazuju godišnje potrebe za grijanjem i hlađenjem pojedinih zona, pri čemu crvena boja označava zone s najvećim potrebama, a plava zone s najmanjim potrebama. Na Slici 31 crvenom i intenzivno žutom bojom prikazani su restoran/kantina i konferencijska dvorana koji u ovom slučaju predstavljaju kritične zone za sezonu grijanja. Iz Slike 32, koja prikazuje potrebnu energiju za hlađenje pojedinih zona, vidljivo je da su potrebe za hlađenjem ujednačenije među zonama od potreba za grijanjem. Iz ujednačenosti potreba za hlađenjem može se zaključiti da je razlog tome velik udio ostakljene površine na južnoj fasadi, što za posljedicu ima velike Sunčeve dobitke koji iznose 253 kWh/m²a. Kako bi se smanjile potrebe zgrade za grijanjem, odnosno hlađenjem, potrebno je eliminirati toplinske gubitke, odnosno dobitke, primarno na kritičnim zonama.

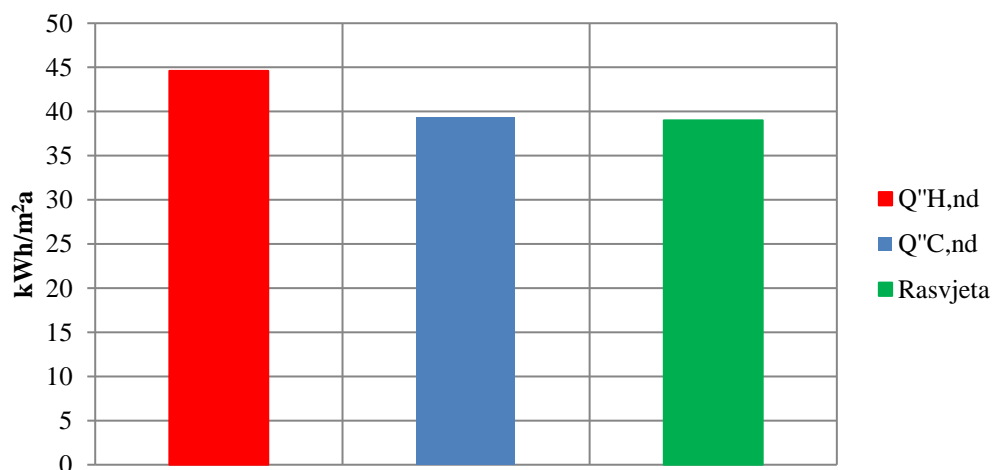


Slika 31 Prikaz potreba za grijanjem na 3D modelu



Slika 32 Prikaz potreba za hlađenjem na 3D modelu

Na Slici 33 prikazane su potrošnje energija za grijanje (crveno), hlađenje (plavo) i rasvjetu (zeleno) gdje neznatno dominira potrebna energija za grijanje. U dijagramima nije prikazana električna energija za pogon uređaja s obzirom da njihova potrošnja nije bila predmet analize ovog rada.



Slika 33 Godišnja potrebna energija za grijanje, hlađenje i rasvjetu početnog arhitektonskog rješenja

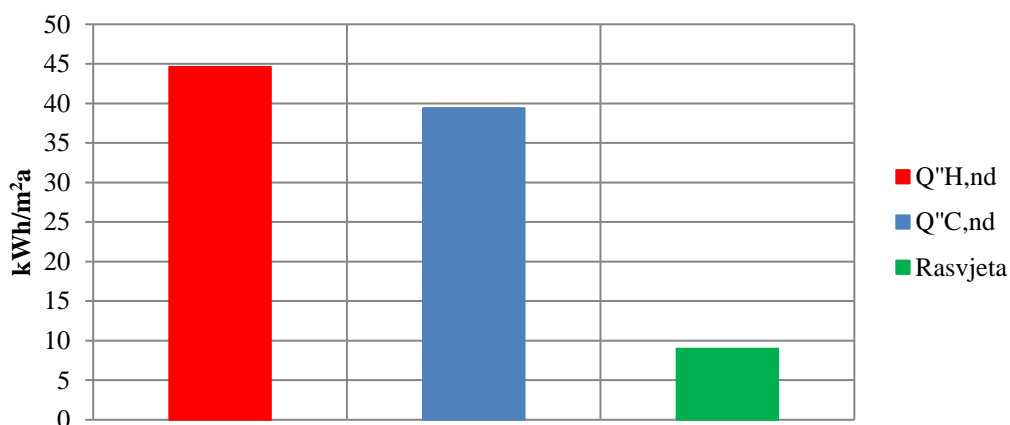
Na smanjenje potrošnje energije za rasvjetu utjecaj ima korištenje dnevnog svjetla te su potrebe električne energije za rasvjetu (rezultat energetske simulacije) umanjene za udio vremena kada rasvjeta nije potrebna (rezultat simulacije dnevnog svjetla u prostoru). Pri tome se pretpostavlja da rasvjeta nije potrebna kada je osvijetljenost dnevnim svjetlom u svim proračunatim točkama pojedine zone između 300 i 1000 luxa. Konačna potrebna energija za rasvjetu stoga je izračunata kao:

$$E_{\text{rasvjeta,konačno}} = (1 - R) * E_{\text{rasvjeta,računski}} \quad (1)$$

gdje su

$E_{rasvjeta,konačno}$	umanjena potrebna energija za rasvjetu	[kWh/m ² a]
R	udio vremena kada rasvjeta nije potrebna	[-]
$E_{rasvjeta,računski}$	potrebna energija za rasvjetu dobivena simulacijom	[kWh/m ² a]

Simulacijom dnevnog svjetla u prostoru procijenjeno je da na godišnjoj razini i promatrajući svaku pojedinu zonu, udio vremena korištenja zgrade kada nema potrebe za rasvjetom i kada je dostatno samo dnevno svjetlo iznosi 77%, odnosno da potrebna energija za rasvjetu iznosi 23% proračunate energetske simulacijom. Potrebna električna energija za rasvjetu iznosi 8,97 kWh/m²a, a konačne potrebe prikazane su na Slici 34.



Slika 34 Godišnja potrebna energija za grijanje, hlađenje i rasvjetu početnog arhitektonskog rješenja nakon primjene rezultata simulacije dnevnog svjetla

Zaključak analize:

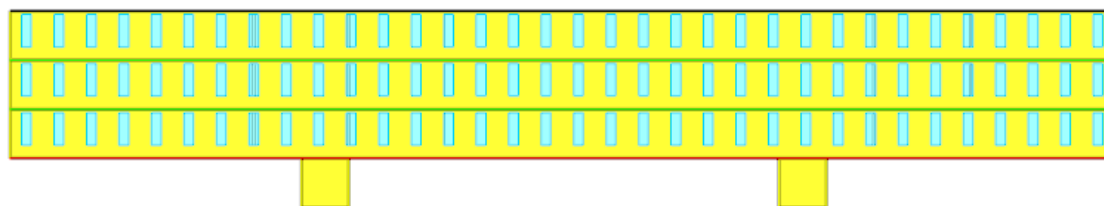
Na temelju analize rezultata početnog arhitektonskog rješenja prijedlog za smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje je smanjenje ostakljene površine kritičnih zona. Prva mjera je potpuno uklanjanje ostakljenja na zapadu te smanjenje udjela ostakljenja južne strane restorana na 60% i konferencijske dvorane na 75%. Predviđena je zamjena ostakljenja na sjevernoj fasadi s kopelitnim ostakljenjem punjenim poliesterskom vunom. Smanjenjem ostakljenih površina smanjuju se gubici topline u sezoni grijanja i dobici od Sunca u sezoni hlađenja, što ima pozitivan utjecaj na smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje. Međutim, smanjenje ostakljenih površina može imati negativan utjecaj na dnevno svjetlo u prostoru i posljedično porast električne energije za rasvjetu, što će također biti analizirano u nastavku.

3.3 Varijanta 1

Predviđene izmjene početnog arhitektonskog rješenja primijenjene su na Varijanti 1. Geometrija zgrade nije promijenjena, već je smanjen udio površine ostakljenja na južnoj te potpuno uklonjeno ostakljenje na zapadnoj fasadi čime se nastoje smanjiti toplinski gubici, ali i veliki dobici od Sunca. Isto tako, predviđena je zamjena postojećih materijala ostakljenja na sjevernoj fasadi s kopelitom uz 100% udio površine ostakljenja. Prilikom modeliranja kopelitnog ostakljenja na sjevernoj fasadi bilo je potrebno aproksimirati svojstva novog materijala zbog specifičnosti predloženog materijala i ograničenja programa. Iz tog razloga, aproksimacijom je određeno da koeficijent prolaza topline kopelitnog ostakljenja (Tablica 6) na sjevernoj fasadi odgovara koeficijentu prolaza topline sjevernog pročelja s postojećim materijalima uz udio ostakljene površine od 20% (Slika 34) te iznosi $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nadalje, bilo je potrebno aproksimirati ukupnu propusnost Sunčevog zračenja novog ostakljenja zbog mogućeg utjecaja na rezultate simulacije dnevnog svjetla. Ustanovljeno je da udio ostakljenih površina na sjevernoj fasadi od 75% dovoljno dobro aproksimira ukupnu propusnost Sunčevog zračenja kopelitnog ostakljenja. Također se pretpostavlja da aproksimacija ostakljene površine na sjevernoj fasadi neće znatno utjecati na dobitke od Sunca budući da sjeverna strana zgrade nema direktan kut upada Sunca. Svojstva ostakljenja na južnoj fasadi ostala su nepromijenjena, dok je udio ostakljenja unutarnje ovojnice je smanjen za 3%. Predloženim mjerama očekuje se smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje te udjela dnevnog svjetla što rezultira povećanjem potrebne električne energije za rasvjetu.

Tablica 6 Sastav kopelitnog ostakljenja

Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	U [W/m ² K]
Armirano staklo	6	0,44	0,7
Mineralna vuna	55	0,04	
Armirano staklo	6	0,44	



Slika 35 Sjeverno pročelje sa smanjenim ostakljenjem

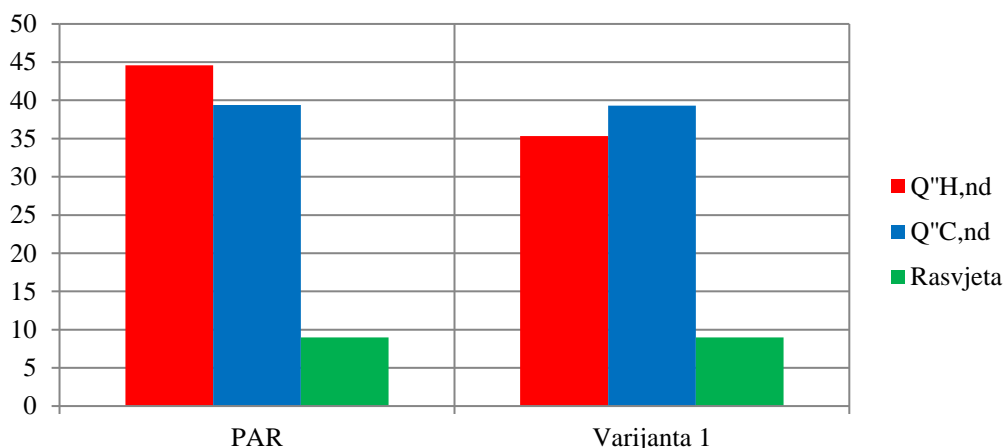
3.3.1 Rezultati simulacija Varijante 1

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 1 (Tablica 7) ukazuju na smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje. Potrebna energija za grijanje smanjena je 21% u odnosu na PAR, dok je potrebna energija za hlađenje smanjena svega 0,2% (Slika 36). Smanjenje potreba za grijanjem rezultat je značajnog smanjenja toplinskih gubitaka na sjevernoj fasadi, dok smanjenje ostakljenja na južnoj fasadi nema značajan utjecaj budući da je ukupan udio ostakljenja još uvijek relativno velik.

Tablica 7 Potrebna specifična energija Varijante 1

Potrebna specifična energija [kWh/m ² a]	
Grijanje ($Q''_{H,nd}$)	35
Hlađenje ($Q''_{C,nd}$)	39
Rasvjeta	9

Na Slici 36 se može primijetiti da je potrebna električna energija za rasvjetu jednaka kao i kod PAR-a. Stoga rezultati sugeriraju da smanjenje ostakljenja nema utjecaj na udio pokrivenosti unutarnjih prostorija dnevnim svjetlom, tj. osvijetljenost dnevnim svjetlom je zadržana unutar željenih granica jednak udio vremena kao kod PAR-a.



Slika 36 Usporedba potrebnih energija za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR i Varijante 1

Zaključak analize:

Promjena udjela ostakljenih površina na južnoj strani, potpuno uklanjanje ostakljenja na zapadnoj fasadi te promjena materijala ostakljenja na sjevernoj fasadi rezultirala je smanjenjem potrebne energije za grijanje, no utjecaj na potrebnu energiju za hlađenje je

neznatan. U svrhu smanjena ukupne potrebne energije za grijanje i hlađenje stoga je predviđena izmjena materijala neprozirnih građevnih elemenata.

3.4 Varijanta 2

Materijali u Varijanti 2 promijenjeni su prema prijedlogu arhitekta (Tablica 6). Iako je cilj smanjiti energetske potrebe, zbog arhitektonskog rješenja konstrukcije zgrade odabrani su materijali većeg koeficijenta prolaza topline (međukatna konstrukcija i pod) u odnosu na materijale korištene kod PAR, no i materijali krova manjeg koeficijenta prolaza topline, smanjenog u odnosu na PAR za 22%. Predviđeno je da povećanje U-vrijednosti međukatne konstrukcije i poda neće bitno utjecati na godišnju potrebnu energiju za grijanje i hlađenje, no smanjenjem U-vrijednosti krova očekuje se znatnije smanjenje potrebne energije za grijanje. Materijali i udjeli prozirnih građevnih elemenata ostaju nepromijenjeni kako bi se preciznije mogao pratiti utjecaj promjene materijala neprozirnih građevnih elemenata na energetska svojstva zgrade.

Tablica 8 Popis neprozirnih građevnih elemenata Varijante 2

Neprozirne građevinske konstrukcije			U [W/m ² K]
Krov			0,11
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Vlaknocementne ploče	9	0,35	
Mineralna vuna	50	0,04	
Sloj zraka	100	0,556	
Armirani beton	120	2,6	
Parna brana	1	0,19	
Ekstrudirana polistirenska pjena	240	0,03	
Šperploče vodootporne	30	0,14	
Polimerna hidroizolacijska traka na bazi PVC-a	6	0,14	
Međukatna konstrukcija			0,6
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Vlaknocementne ploče	9	0,35	
Mineralna vuna	20	0,04	
Sloj zraka	10	0,556	
Armirani beton	12	2,6	
Pod			0,2
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Vlaknocementne ploče	9	0,35	
Mineralna vuna	20	0,04	

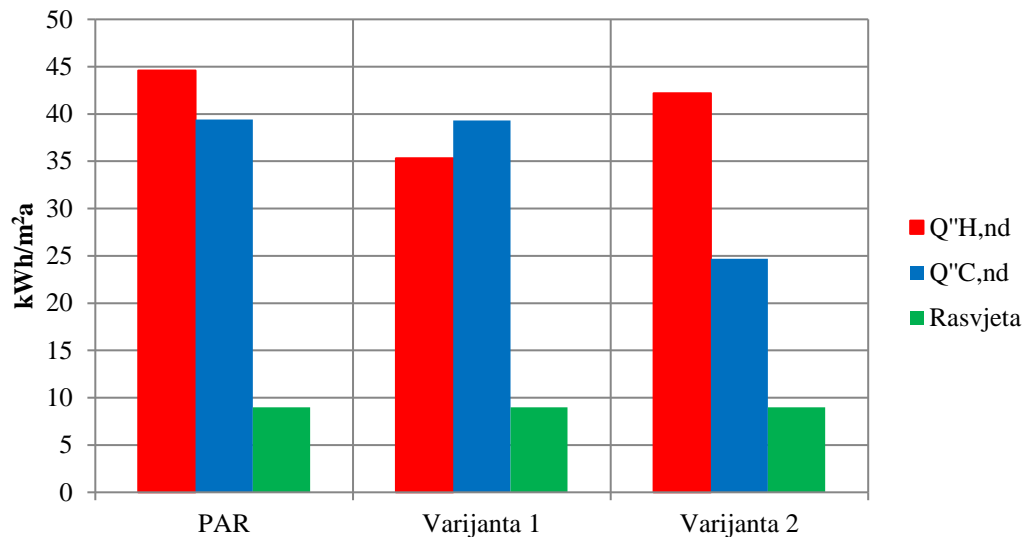
Sloj zraka	10	0,556	
Armirani beton	12	2,6	
Pregradni zid			0,4
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Vlaknocementne ploče	9	0,35	
Mineralna vuna	50	0,04	
Mineralna vuna	50	1,15	
Vlaknocementne ploče	9	0,35	
Vanjski zid puni			0,27
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Beton srednje gustoće	25	1,15	
Sendvič konstrukcija drvo-kamena vuna-drvo	135	0,04	
Beton srednje gustoće	15	1,15	
Fasadni zid puni			0,22
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Beton	15	1,15	
Sendvič konstrukcija drvo-kamena vuna-drvo	150	0,04	
Polietilen	0,15	0,19	
Sendvič konstrukcija drvo-kamena vuna-drvo	150	0,04	
Kišna brana	0,1	0,04	
Drvo	2,5	0,13	

3.4.1 Rezultati simulacija Varijante 2

Simulacijom Varijante 2 moguće je prikazati utjecaj promjene materijala neprozirnih građevnih elemenata na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Potrebna energija za grijanje porasla (Tablica 9) je 20% u odnosu na Varijantu 1 primjenom novih materijala. Iako materijali krova primijenjeni na Varijanti 2 imaju manji koeficijent prolaza topline, vidljiv je jak utjecaj povećanja U-vrijednosti kod konstrukcije poda prema garaži. Velika površina izloženog poda i povećanje koeficijenta prolaza topline u iznosu od 30% uz izloženost vanjskom okolišu rezultira velikim toplinskim gubicima. Nadalje, potrebna energija za hlađenje smanjila se 37% u odnosu na Varijantu 1 kao rezultat povećanja koeficijenta prolaza topline poda prema garaži.

Tablica 9 Potrebne specifične energije Varijante 2

Potrebna specifična energija [kWh/m ² a]	
Grijanje ($Q''_{H,nd}$)	42
Hlađenje ($Q''_{C,nd}$)	25
Rasvjeta	9



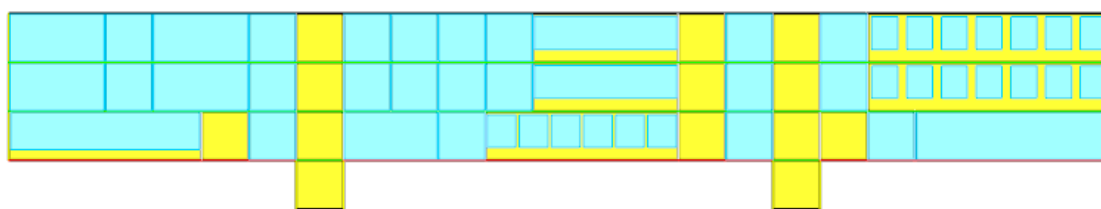
Slika 37 Usporedba potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR-a, Varijante 1 i Varijante 2

Zaključak analize:

Ukupna potrebna energija Varijante 2 za grijanje, hlađenje i rasvjetu manja je ukupne energije kod PAR i Varijante 1. Iako je prisutan porast potrebne energije za grijanjem, model ima bolja energetska svojstva promatrajući zbroj potrošnje energije za grijanje i hlađenje. S obzirom na rezultate simulacije predviđeno je dodatno smanjenje udjela ostakljenih površina na južnoj fasadi čime bi se smanjili transmisijski toplinski gubici kroz južnu fasadu u zimskom periodu, a time i dobici od Sunca, odnosno potrebna energija za hlađenje.

3.5 Varijanta 3

Udio ostakljene površine na južnoj fasadi smanjen je s 81% na 70%, što je bio donji limit postavljen od strane arhitekta. Smještaj smanjenih ostakljenih površina je u gornjem predjelu pojedine fasade (Slika 38) zbog bolje iskoristivosti dnevnog svjetla s obzirom da je zbog smanjenju ostakljenih površina očekivano smanjenje udjela dnevnog svjetla u odnosu na PAR i Varijantu 1.



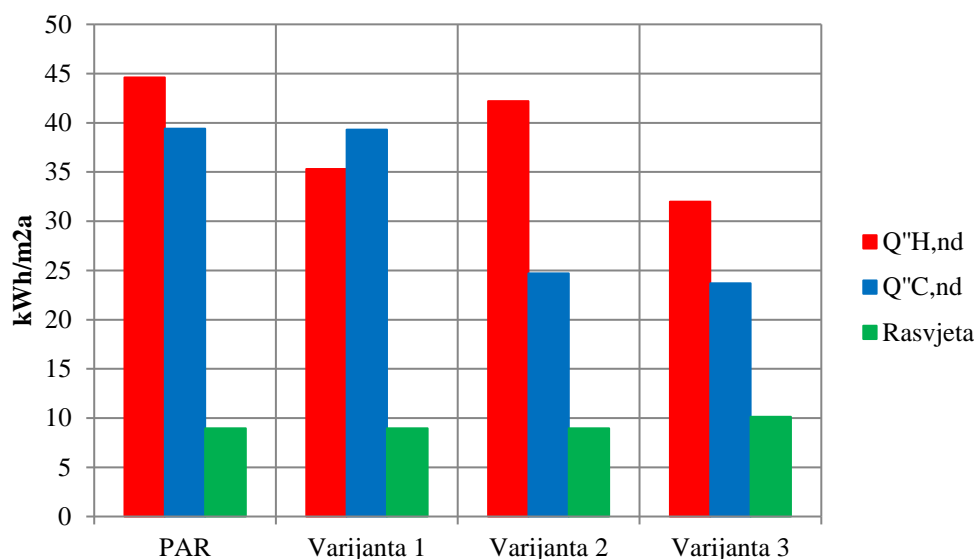
Slika 38 Južno pročelje sa smanjenim udjelom ostakljenih površina

3.5.1 Rezultati simulacija Varijante 3

Smanjenjem ostakljenja potrebna energija za grijanje smanjila se za 24% u odnosu na potrebu Varijante 2 kao rezultat smanjenja toplinskih gubitaka (Tablica 9). Iako toplinski gubici nisu izravni prema vanjskom okolišu već kroz zimski vrt prema vanjskom okolišu, velike ostakljene površine unutarnje fasade imaju značajan utjecaj na potrebnu energiju za grijanje. Potrebna energija za hlađenje smanjena je u odnosu na prethodnu Varijantu za 3%. Sličan utjecaj primijećen je kod prijelaza s PAR-a na Varijantu 1. Nadalje, udio dnevnog svjetla smanjen je u odnosu na prethodne varijante i iznosi 74% što rezultira porastom potrebne električne energije za rasvjetu. Unatoč ovom povećanju, ukupna potrebna energija varijante 3 manja je od prethodnih izvedbi za 10% što znači da smanjenje ostakljenja pozitivno utječe na energetska svojstva zgrade.

Tablica 10 Potrebne specifične energije Varijante 3

Potrebna specifična energija [kWh/m ² a]	
Grijanje ($Q''_{H,nd}$)	32
Hlađenje ($Q''_{C,nd}$)	23,7
Rasvjeta	10,14



Slika 39 Usporedba potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2 i Varijante 3

Zaključak analize:

Iako dokazan pozitivan utjecaj smanjenja udjela ostakljenih površina na energetska svojstva zgrade, daljnje smanjenje nije dopustivo zbog arhitektonskih zahtjeva već je bilo potrebno smanjiti gubitke kroz južnu fasadu primjenom drugih koncepata. Predviđena je promjena izvedbe ostakljenja vanjske ovojnice južne fasade u obliku troslojnog stakla punjenog argonom. Unatoč povećanim investicijskim troškovima dotičnog rješenja, cilj je bio smanjenje energetske potrebe zgrade.

3.6 Varijanta 4

Predviđena je konstrukcija vanjskog ostakljenja južne fasade u obliku troslojnog stakla punjenog argonom s aluminijskim distancerom ukupne debljine 44 mm (4/16/4/16/4-low-e premaz). Koeficijent prolaza topline iznosi $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, a koeficijent dobitaka Sunčevog zračenja (SHGC) $0,6$.

Tablica 11 Popis materijala unutarnjeg ostakljenja južne fasade

Prozirne građevinske konstrukcije			U [$\text{W/m}^2\text{K}$]
Vanjska ovojnica			0,6
Materijal	Debljina [mm]	λ [W/mK]	
Kaljeno staklo	4	0,81	
Argon	16	0,236	
Kaljeno staklo	4	0,81	

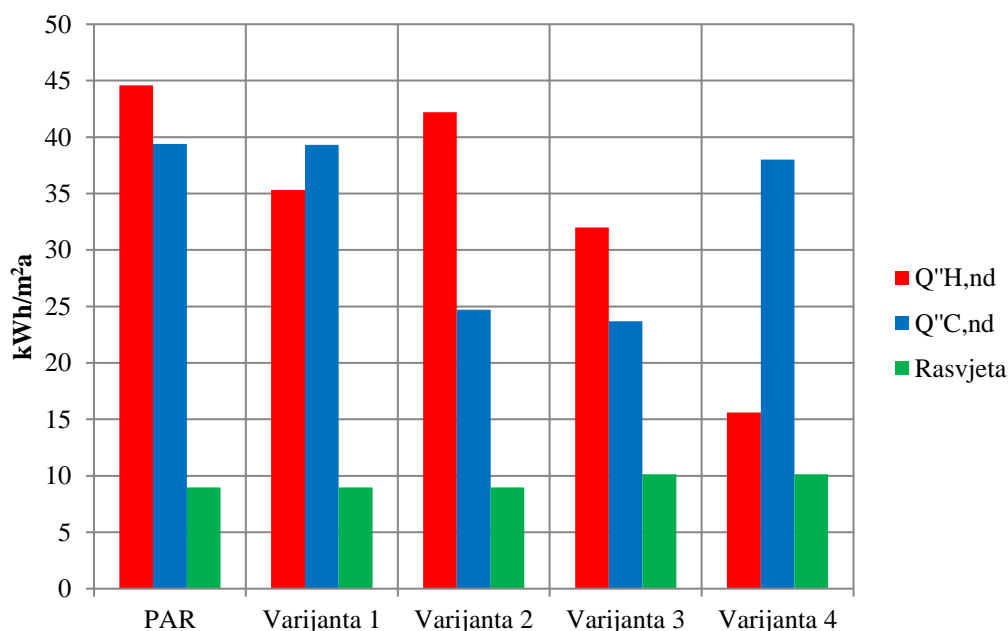
Argon	16	0,236
Kaljeno staklo s low-e premazom	4	0,81

3.6.1 Rezultati simulacija Varijante 4

Promjena ostakljenja vanjske ovojnice južne fasade rezultirala je smanjenjem potrebne energije za grijanje od 51% u odnosu na Varijantu 3 zbog smanjenja koeficijenta prolaza topline južne fasade, no porasla je potrebna energija za hlađenje za 60%. Iako se smanjenjem U-vrijednosti u ljetnom periodu smanjuju toplinski dobitci od vanjskog okoliša, analogno tome otežava se hlađenje zraka u zgradi koje je od velike važnosti u ljetnom periodu zbog unutarnjih dobitaka te još uvijek relativno velikih dobitaka od Sunca u iznosu od 129 kWh/m²a. Primjena novog materijala, nema utjecaja na udio dnevnog svjetla, a time niti na potrebnu električnu energiju za rasvjetu.

Tablica 12 Potrebne specifične energije Varijante 4

Potrebna specifična energija [kWh/m ² a]	
Grijanje ($Q''_{H,nd}$)	16
Hlađenje ($Q''_{C,nd}$)	38
Rasvjeta	10



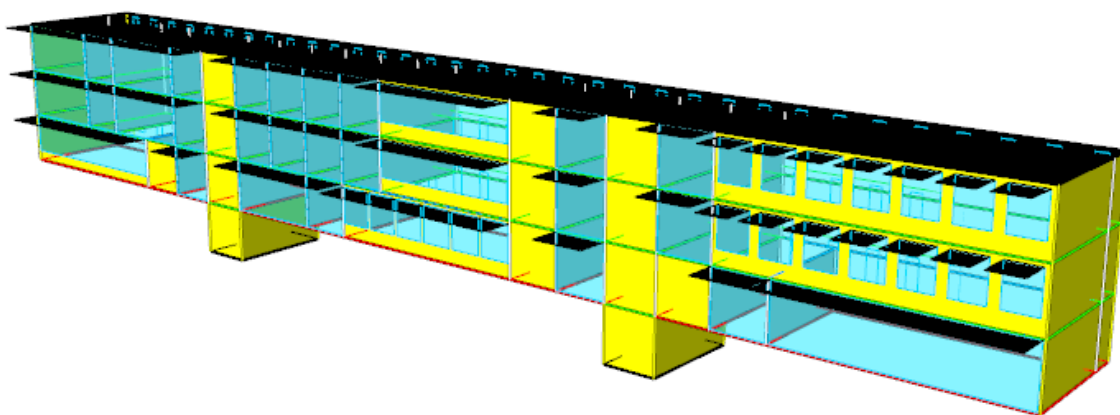
Slika 40 Usporedba potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3 i Varijante 4

Zaključak analize:

Iako je smanjena potrebna energija za grijanje blizu cilja od 15 kWh/m²a, potrebna je daljnja optimizacija zgrade kako bi se smanjila potrebna energija za hlađenje na željenih 20 kWh/m²a. Budući da su prisutni veliki toplinski dobici, a arhitektonski zahtjev ograničava daljnje smanjenje površine ostakljenja, potrebno je ugraditi zasjenjenje na vanjskoj ovojnici južne fasade.

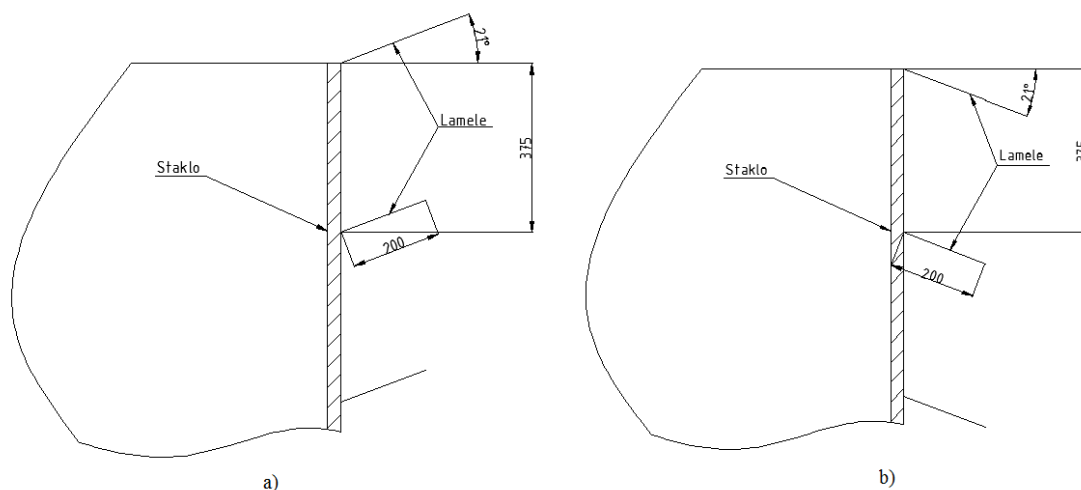
3.7 Varijanta 5

Za ovu varijantu osmišljena su dva tipa zasjenjenja. Prvi tip (Slika 41) izveden je u obliku neprozirne ploče instalirane iznad vanjske ovojnice južne fasade na svakom katu. Ploča je postavljena horizontalno, a duljina iznosi 1,8 m što je optimalno pri sprječavanju upada Sunčevih zraka u ljetnom periodu godine, dok zimi ne smanjuje udio dnevnog svjetla i dobitke od Sunca.

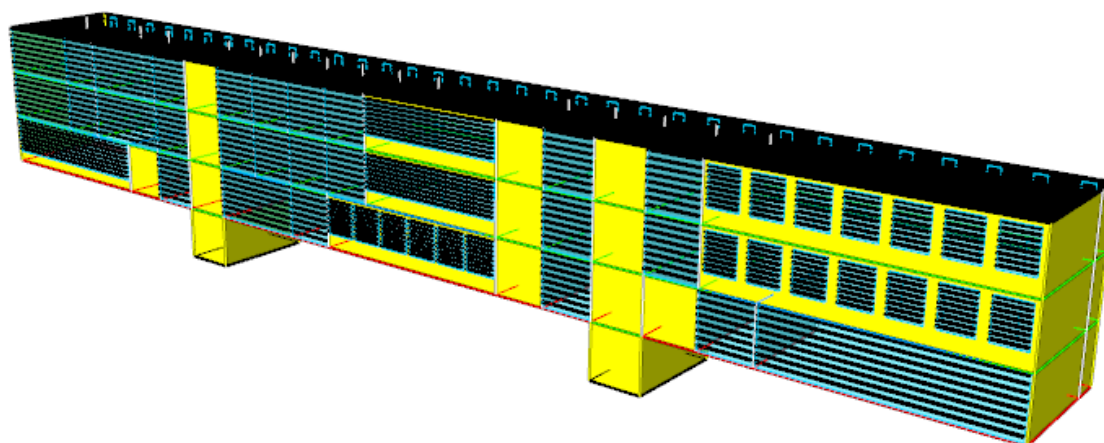


Slika 41 Prikaz modela sa zasjenjenjem u obliku ploče duljine 1,8 m

Drugi tip zasjenjenja je izveden u obliku horizontalno postavljenih osam lamela duljine 20 cm. Lamelle su međusobno razmaknute 37,5 cm, a predviđena su dva načina pozicioniranja lamela. U zimskom režimu lamelle su nagnute pod kutem od -21° (Slika 42a) u odnosu na horizontalu kako bi što manje ometale upad Sunčevog zračenja u prostorije zgrade. U ljetnom režimu lamelle su nagnute pod kutem od 21° (Slika 42b) u odnosu na horizontalu kako bi se spriječio upad Sunčevih zraka, a time smanjili toplinski dobici od Sunca. Predviđeno je znatnije smanjenje udjela dnevnog svjetla u ljetnom režimu uslijed korištenja zasjenjenja.



Slika 42 Prikaz lamela; a) zimski režim, b) ljetni režim



Slika 43 Prikaz sa zasjenjenjem u obliku lamela

3.7.1 Rezultati simulacija Varijante 5

Prema rezultatima simulacije za prvi tip zasjenjenja, potrebna energija za grijanje je povećana za 41% u odnosu na Varijantu 4 što je rezultat smanjenih dobitaka od Sunca koji iznose $111 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ za ovu varijantu. Potrebna energija za hlađenje smanjena je za 23% međutim zasjenjenje ima negativan utjecaj na udio dnevnog svjetla te dolazi do smanjenja sa 71% na 68% udjela vremena bez rasvjete u usporedbi s Varijantom 4.

Tablica 13 Potrebne specifične energije za Varijantu 5 i prvi tip zasjenjenja

Potrebna specifična energija [$\text{kWh/m}^2\text{a}$]	
Grijanje ($Q''_{H,nd}$)	22
Hlađenje ($Q''_{C,nd}$)	29

Rasvjeta	13
----------	----

Za drugi tip zasjenjenja, prvo je provedena simulacija zimskog režima s kutom nagiba lamela od -21° . Rezultati (Tablica 13) su pokazali smanjenje potrebne energije za grijanje u iznosu od 10%. Iako je smanjenje dobitaka od Sunca veće nego kod prvog tipa zasjenjenja ($106 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) potrebe za grijanjem su manje nego kod prvog tipa. Razlog smanjenju potrebne energije za grijanje u odnosu na prvi tip zasjenjenja je povećanje otpora toplinskom toku kroz južnu fasadu. Smanjenje potrebne energije za hlađenje od 3% rezultat je smanjenja dobitaka od Sunca, no dobivena je veća vrijednost u odnosu na prvi tip budući da je prisutno povećanje otpora južne fasade. Udio vremena bez rasvjete za ovu varijantu iznosi 67%.

Tablica 14 Potrebne specifične energije za varijantu 5 i drugi tip zasjenjenja; zimski režim

Potrebna specifična energija [$\text{kWh/m}^2\text{a}$]	
Grijanje ($Q''_{H,nd}$)	17
Hlađenje ($Q''_{C,nd}$)	31
Rasvjeta	13

Promjena kuta nagiba lamela od 21° u odnosu na horizontalu rezultiralo je povećanjem potrebne energije za grijanjem od 32% (Tablica 14) u odnosu na Varijantu 4, što je rezultat smanjenja dobitaka od Sunca ($78 \text{ kWh/m}^2\text{a}$). Iako smanjenje dobitaka negativno utječe na potrebnu energiju za grijanje, pozitivan utjecaj prisutan je kod potrebne energije za hlađenje uz smanjenje od 44 % u odnosu na Varijantu 4. Udio vremena bez rasvjete iznosi 62 %.

Tablica 15 Potrebne specifične energije za Varijantu 5 i drugi tip zasjenjenja; ljetni režim

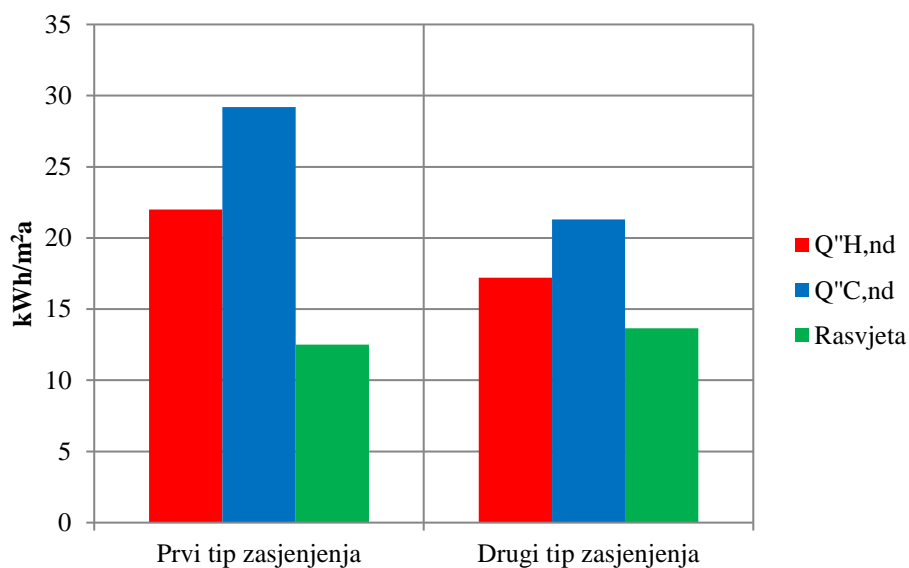
Potrebna specifična energija [$\text{kWh/m}^2\text{a}$]	
Grijanje ($Q''_{H,nd}$)	27
Hlađenje ($Q''_{C,nd}$)	21
Rasvjeta	15

S obzirom da su obje simulacije za drugi tip zasjenjenja rađene odvojeno, potrebno je uzeti u obzir potrebne energije (Tablica 15) relevantne s obzirom na godišnje doba. Stoga potrebna energija za grijanje iznosi $17 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, a potrebna energija za hlađenje $21 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Budući da je udio dnevnog svjetla različit u ta dva režima, bilo je potrebno napraviti interpolaciju. Analizom satnih rezultata ustanovljeno je da je 5144 sati potrebno grijati, a 3616 sati je potrebno hladiti zgradu. Na temelju analize unesen je broj sati pojedinog režima,

na temelju čega se mijenja kut nagiba lamela te je ponovnom simulacijom određen udio dnevnog svjetla u iznosu od 65% za cijelu godinu. Prema tome potrebna električna energija za rasvjetu iznosi 14 kWh/m²a.

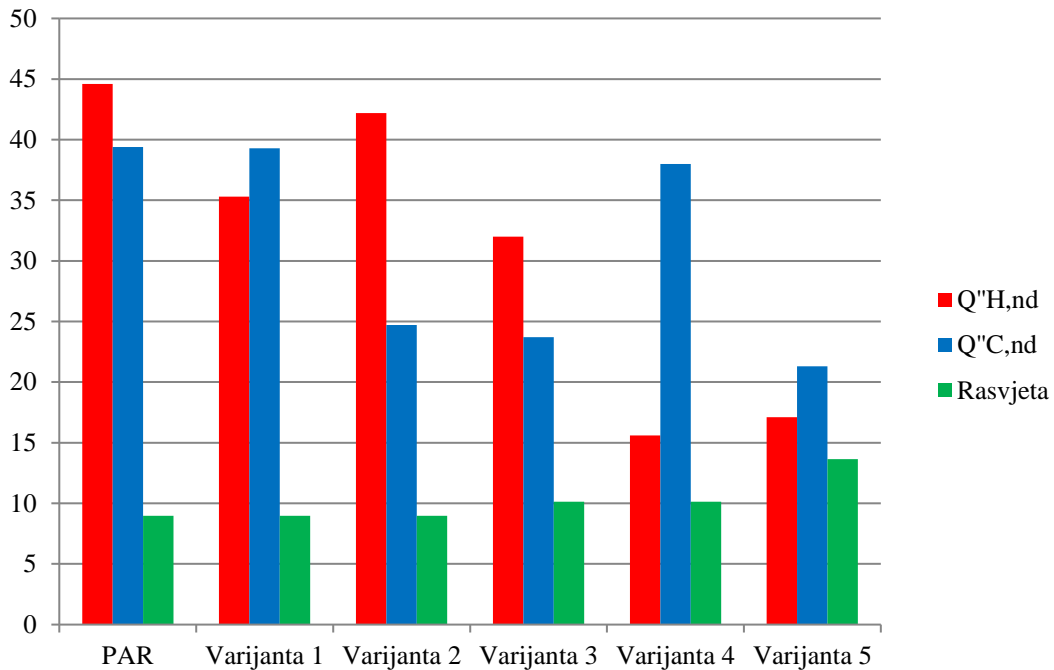
Tablica 16 Potrebne specifične energije Varijante 5 za pojedine tipove zasjenjenja

Potrebna specifična energija [kWh/m ² a]		
	Prvi tip zasjenjenja	Drugi tip zasjenjenja
Grijanje ($Q''_{H,nd}$)	22	17
Hlađenje ($Q''_{C,nd}$)	29	21
Rasvjeta	13	14



Slika 44 Utjecaj pojedinog tipa zasjenjenja na potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu

Prema rezultatima simulacija za oba tipa zasjenjenja usvojen je drugi tip zasjenjenja, te je iz rezultata vidljivo da je ukupna potreba zgrade smanjena za 29% odnosu na Varijantu 4 i 54% u odnosu na PAR (Slika 45).



Slika 45 Usporedba potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3, Varijante 4 i Varijante 5

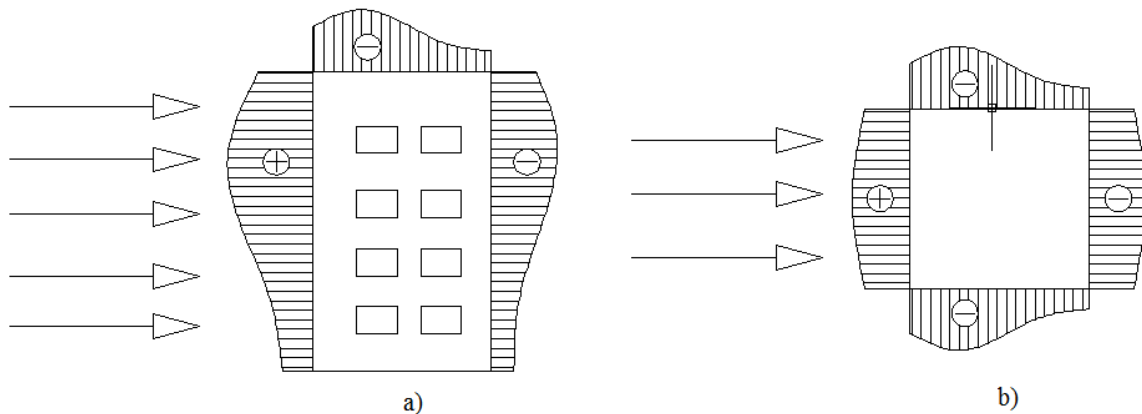
Zaključak analize:

Iako je prisutno manje povećanje potrebne energije za grijanje i potrebne električne energije za rasvjetu, smanjena je potrebna energija za hlađenje (Slika 45) u odnosu na Varijantu 4 te je ostvaren pozitivan utjecaj na energetska svojstva zgrade. Kao sljedeća mjera za smanjivanje potreba predviđeno je korištenje pasivnog hlađenja. Oblik zgrade pogodan je za poprečno ventiliranje prostora, a predloženo rješenje također predviđa korištenje prirodne ventilacije noću, odnosno prethlađenje kada ukoliko su vanjski uvjeti zadovoljavajući. Ovim načinom moguće je smanjiti potrebe za hlađenjem te vršna opterećenja u popodnevnim satima budući da su prostori u kojima borave ljudi ohlađeni prije vremena korištenja.

3.8 Varijanta 6

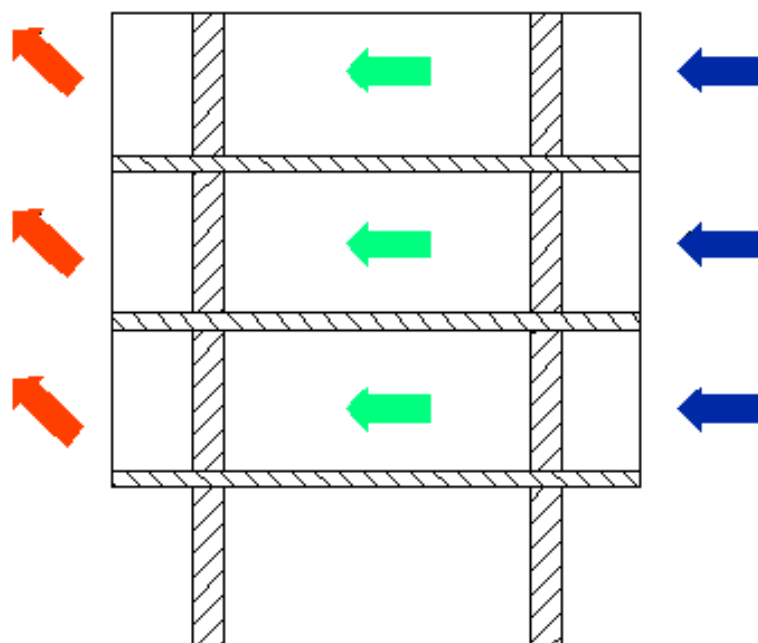
Kako bi se dodatno smanjila potrebna energija za hlađenjem predviđeno je korištenje prirodne ventilacije za prethlađenje zgrade tijekom noći i hlađenje tijekom dana ukoliko vanjski uvjeti to dozvoljavaju. U režimu noćnog hlađenja predviđeno je otvaranje prozora u 19 sati te zatvaranje u 7 sati uz dodatne uvjete da unutarnja temperatura ne padne ispod 18°C i da vanjska temperatura nije ispod 15°C te za vrijeme korištenja zgrade uvjet je da se unutarnja temperatura snizi ispod 22°C.

U ovom projektu odabrana je poprečna ventilacija s vjetrom kao pogonskom silom s obzirom na oblik zgrade budući da zgrada nije dovoljno visoka za ventiliranje na principu uzgona. Kod navedenog tipa ventilacije se prilikom nastrujavanja vjetra na fasadu zgrade stvara pretlak, a na ostalima podtlak što rezultira strujanjem zraka kroz otvore (Slika 46). Protok zraka kroz prostoriju ovisi o razlici tlaka na fasadama, korisnoj površini i padu tlaka kroz prostorije.



Slika 46 Raspodjela tlakova; a) nacrt, b) tlocrt

Namjena poprečne ventilacije u ovom projektu je ventiliranje prostorija u svrhu pasivnog hlađenja ukoliko su vanjski uvjeti zadovoljavajući. Osim tijekom dana, pasivno hlađenje predviđeno je i noću, pri čemu se otvaraju prozori te se omogućuje strujanja hladnog okolišnjeg zraka (plave strelice) kroz prostoriju (Slika 47), zrak preuzima toplinu (zelene strelice) iz prostora te zagrijan izlazi iz prostorije (crvene strelice) uslijed razlike tlaka, što rezultira prethlađenjem zgrade. Ovim načinom se snižava temperatura unutarnjih zidova, odnosno akumulira rashladni učin u zidovima i smanjuje potreba za hlađenjem za vrijeme dana.

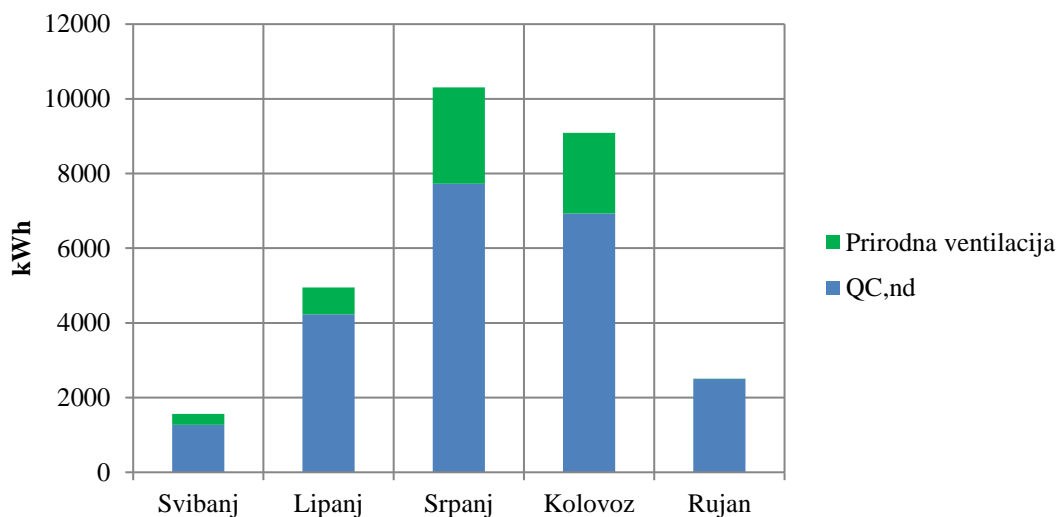


Slika 47 Načelo rada poprečne ventilacije

Simulacija prirodne ventilacije rađena je u programu CoolVent. Zgrada je podijeljena na tri sekcije, pri čemu je potrebno unijeti dimenzije pojedine sekcije. Osim dimenzija zgrade, potrebno je unijeti površinu ostakljenja koja je svedena na jedan kat, a iznosi 150 m^2 , od čega su 75 m^2 prozori koji se mogu otvarati. Nadalje, potrebno je unijeti površine unutrašnjih otvora za prestrujavanje zraka između prostora što u ovom slučaju predstavljaju otvori na pregradnim zidovima između ureda i hodnika te iznose 50 m^2 po katu. Osim potrebnih dimenzija potrebno je unijeti orijentaciju zgrade te unutarnje dobitke koji prema Varijanti 5 iznose 22 W/m^2 uključivo dobitke od Sunca. Iako program ima mogućnost proračuna dobitaka od Sunca, oni su u ovom proračunu izostavljeni budući da bi se u tom slučaju zanemarilo zasjenjenje postavljeno na južnoj fasadi. Određeno je vrijeme korištenja zgrade od 8 do 17 sati, uvjeti toplinske ugodnosti postavljeni su kao i u prethodnim simulacijama. Simulacija je provedena za mjesec kada postoji potreba za hlađenjem, odnosno od početka svibnja do kraja rujna. Problem se javlja prilikom unosa meteoroloških podataka budući da program ne provodi simulaciju za grad Ljubljano. Uzevši u obzir, vanjske temperature, ružu vjetrova i brzinu vjetrova, na temelju sličnosti je za provođenje simulacije odabran grad Graz.

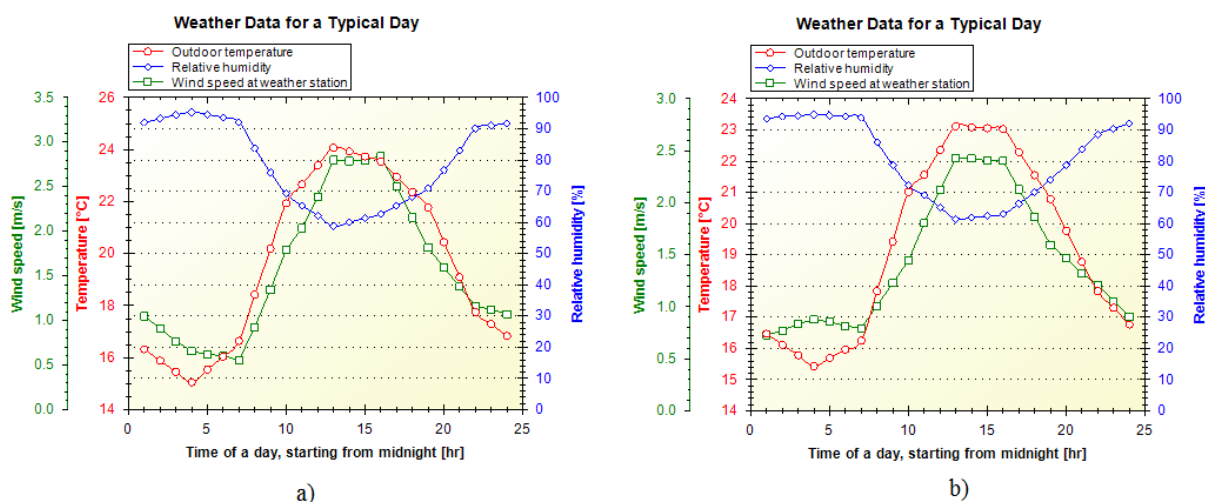
3.8.1 Rezultati simulacije prirodne ventilacije

Rezultati simulacije u CoolVent-u procjenjuju unutrašnje temperature po sekcijama zgrade s vremenskim korakom od 15 min za karakterističan dan u mjesecu, pri čemu se sekcije zgrade ponešto razlikuju od energetskih modela simulacija rađenih u Grasshopper-u. Stoga su unutrašnje temperature dobivene CoolVent-om uprosječene po zonama i za svaki sat u sezoni hlađenja. Na temelju željenih temperatura u prostorijama analizirani su utjecaji prirodne ventilacije i noćnog hlađenja na potrebnu energiju za hlađenje. Ukoliko je temperatura u zonama između 22 i 26 °C, a apsolutna vlažnost između 0,002 i 0,015 $\text{kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{zr}}$, nema potreba za mehaničkim hlađenjem. Procjena je napravljena za svaki sat u sezoni hlađenja te prikazana po mjesecima na Slici 48.



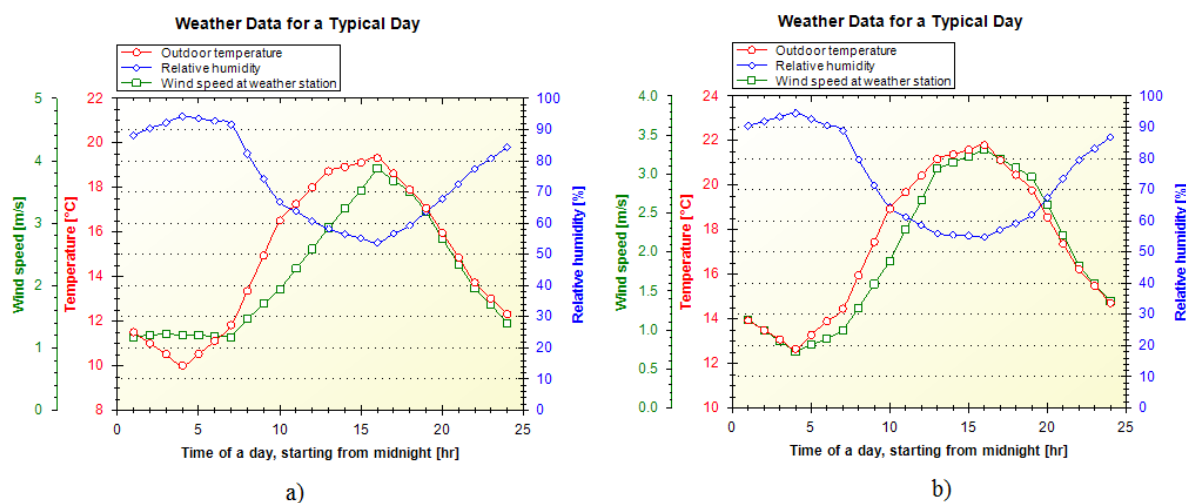
Slika 48 Potrebna energija za hlađenje primjenom pasivnog hlađenja

Najveće smanjenje potrebne energije za hlađenje prisutno je u srpnju i kolovozu iako su u tim mjesecima najmanje brzine strujanja vjetra, pretežito sa sjeverne, sjeverozapadne i južne strane svijeta. Međutim, postoje znatne razlike u vanjskoj temperaturi između dana i noći, što rezultira učinkovitim podhlađenjem i smanjenjem potrošnje energije za hlađenje (Slika 49).



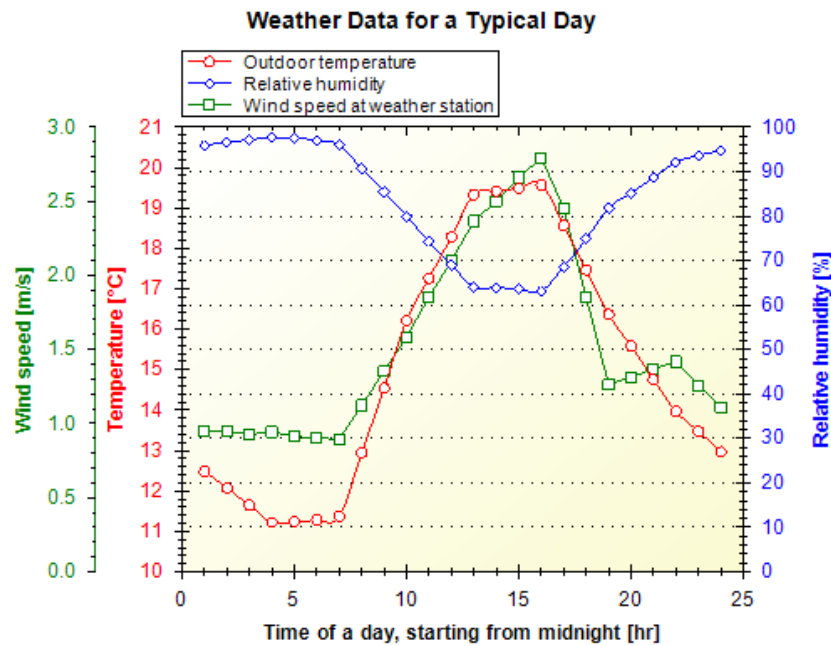
Slika 49 Usporedba meteoroloških podataka za karakterističan dan za a) srpanj, b) kolovoz

Iako je trend smanjenja potrebne energije veći u toplijim mjesecima, u lipnju su manje uštede nego u svibnju što je rezultat manjih brzina strujanja vjetra te orijentacije vjetra (Slika 50). U svibnju su izraženi južni, jugoistočni i jugozapadni vjetar, dok su u lipnju dominantni istočni i južni vjetar. Budući da su otvori smješteni na južnoj i sjevernoj fasadi, pogodnije orijentacije vjetra su u svibnju, ali su i brzine strujanja veće.



Slika 50 Usporedba meteoroloških podataka za karakterističan dan; a) svibanj, b) lipanj.

U rujnu su prisutne najmanje uštede radi nepovoljne orijentacije i manje učestalosti pojave vjetra uz niske brzine strujanja. Isto tako, relativna vlažnosti je visoka (Slika 51), što ima nepovoljan na toplinsku ugodnost.

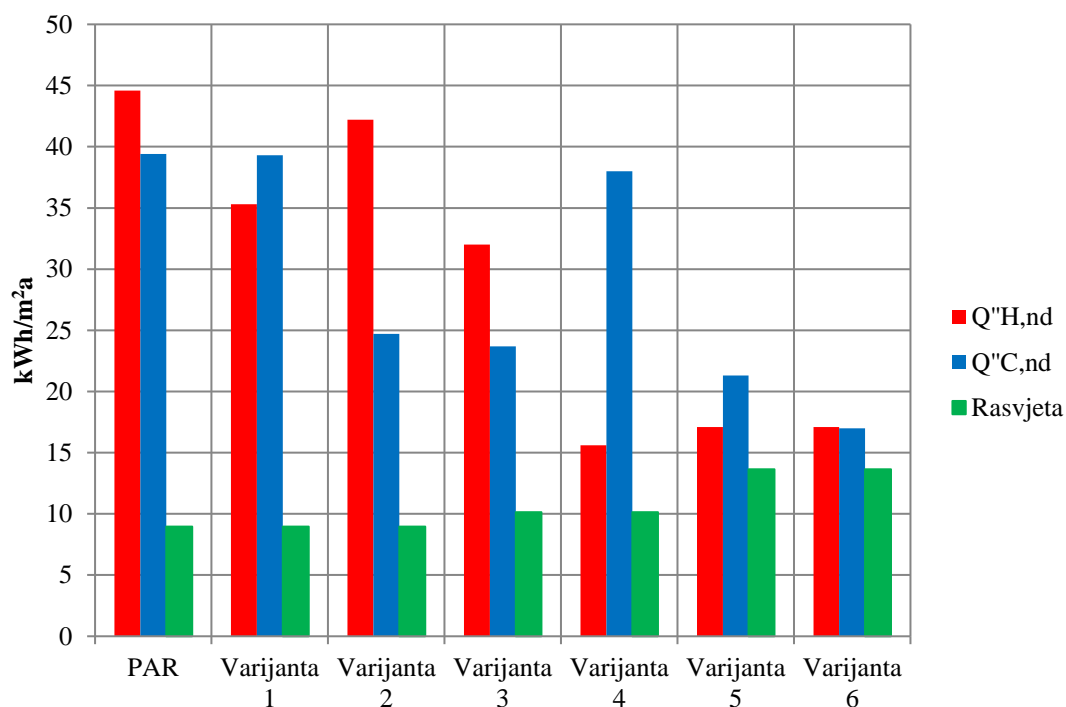


Slika 51 Meteorološki podaci za karakteristični dan u rujnu

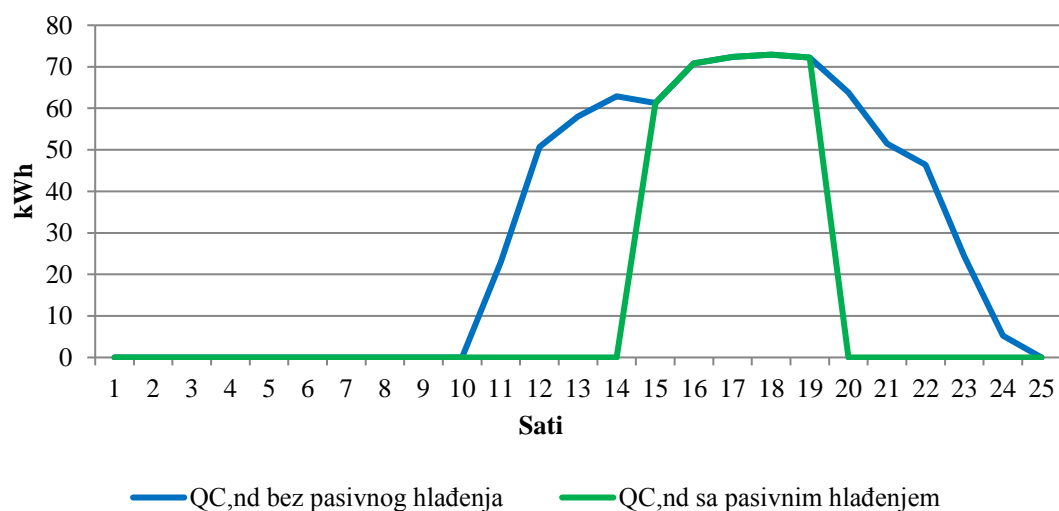
Procijenjeno je smanjenje ukupne potrebne energije za hlađenje od 20% (Tablica 17) ukoliko se primjeni pasivno hlađenje čime se potrebna specifična energija za hlađenje smanjuje na 17 kWh/m²a (Slika 52), odnosno ispod ciljne vrijednosti od 20 kWh/m²a. Potrebe su umanjene na način da su analizirane predviđene unutarnje temperature dobivene simulacijom CoolVent-a. Ukoliko su unutarnje temperature između 22°C i 26°C te ako je relativna apsolutna vlažnost između 0,002 i 0,015 kg_{vlaže}/kg_{zr}, procijenjeno je da nema potrebe za hlađenjem zgrade (Slika 53). Usporedba je napravljena za svaki sat u sezoni hlađenja, iako je bitno napomenuti da je simulacija u CoolVent-u rađena pod pretpostavkom da je svaki dan u mjesecu jednak tipičnom danu, što unosi određenu razinu pogreške u rezultate analize.

Tablica 17 Usporedba potrebnih energija za hlađenje bez i uz pasivno hlađenje

Mjesec	Potrebna energija za hlađenje bez pasivnog hlađenja [kWh]	Potrebna energija za hlađenje uz pasivno hlađenje [kWh]	Ušteda
Svibanj	1562	1269	18,80%
Lipanj	4945	4227	14,50%
Srpanj	10308	7724	25,10%
Kolovoz	9091	6925	23,80%
Rujan	2508	2494	0,60%
suma	28414	22638	20,30%
Q ^{"C,nd} [kWh/m ² a]	21,3	17	20,3%



Slika 52 Usporedba potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3, Varijante 4, Varijante 5 i Varijante 6



Slika 53 Potrebna energija za hlađenje sa i bez korištenja pasivnog hlađenja za karakteristični ljetni dan

Zaključak analize:

S obzirom da je pasivnim hlađenjem moguće postići značajne uštede energije, ova strategija može predstavljati veliku prednost pri projektiranju niskoenergetskih zgrada. Također, primjenom noćnog hlađenja, moguće je smanjiti i odgoditi vršna opterećenja akumuliranjem rashladnog učina u zidovima. Međutim, kako bi pasivno hlađenje bilo učinkovitije, pri projektiranju veličine i smještaja otvora na fasadama potrebno je uzeti u obzir smjer i brzinu strujanja vjetra.



Slika 54 Presjek konačne varijante



Slika 55 Prikaz konačne varijante

4. Zaključak

U ovom radu prikazane su faze projektiranja niskoenergetskih zgrada korištenjem energetskog modeliranja u suradnji s diplomantom arhitekture. U svrhu prikaza procesa, projektirana je poslovna zgrada na području grada Ivanca. Prvi korak u početnoj fazi bila je analiza postojećih primjera niskoenergetske arhitekture te je analizirana primjena pasivnih strategija i ostalih elemenata koji pridonose energetskoj učinkovitosti. Na temelju klimatskih karakteristika odabrane su strategije koje su se primijenile na zgradu te odredile početni smjer projektiranja. Kombinacijom računalnih programa Rhinosceros, Grasshopper, Honeybee i Ladybug napravljen je energetski model te su provedene simulacije za šest iteracija, odnosno varijanti rješenja. Opisani su utjecaji primjene pojedinih koncepata kao što su: smanjenje ostakljenih površina na fasadi, promjena materijala građevnih elemenata, primjena zasjenjenja i pasivnog hlađenja. Pri tome su rezultati simulacija korišteni za prikaz energetskih potreba zgrada i odabir sljedeće iteracije, odnosno koncepta arhitektonskog rješenja. Potrebna energija za grijanje konačne varijante iznosi $17 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ te je smanjena u odnosu na početno arhitektonsko rješenje za 62% što je veoma blizu cilja od $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Potrebna energija za hlađenje koja iznosi $17 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ smanjena je u odnosu na početno arhitektonsko rješenje za 56% što je manje od ciljne vrijednosti od $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

Iako računalni programi korišteni u ovom radu za izradu energetskih modela zahtijevaju širok spektar ulaznih podataka te imaju određena ograničenja pri modeliranju, u radu je pokazano da se korištenjem računalnih simulacija u početnim fazama projektiranja omogućuje se učinkovito projektiranje niskoenergetskih zgrada te ispitivanje različitih koncepata arhitektonskog rješenja.

Literatura

- [1] Emily M. Ryan, Thomas F. Sanquist: Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions, Boston, Seattle, 2012.
- [2] Crawley, D. B., Pedersen, C. O., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C.: EnergyPlus: Energy Simulation Program, ASHRAE Journal, 42:49–56, 2000.
- [3] Yuan, J.: Transition Dynamics Between the Multiple Steady States in Natural Ventilation Systems: From Theories to Applications in Optimal Controls, Doktorska disertacija, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [4] Menchaca-Brandan, M. A., Glicksman, L. R.: Coolvent: A Multizone Airflow and Thermal Analysis Simulator for Natural Ventilation in Buildings, Proceedings of SimBuild: Third National Conference of IBPSA-USA, Berkley, California, pp. 1 – 8, 2008.
- [5] Rich, R. E.: Expansion and User Study of CoolVent: Inclusion of Thermal Comfort Models in an Early-design Natural Ventilation Tool. Magistarski rad, Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [6] Menchaca-Brandan, M. A., Ray, S. D., Glicksman, L. R.: Design of Practical Hybrid Ventilation Building in Central Tokyo, ASHRAE Transactions, 118(1):567–574, 2012.
- [7] Menchaca Brandan, M. A.: Study of Airflow and Thermal Stratification in Naturally Ventilated Rooms. Doktorska disertacija, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [8] Ray, S. D.: Modeling Buoyancy-driven Airflow in Ventilation Shafts, Doktorska disertacija, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [9] Roudsari, M. S., Pak, M.: Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design, Proceedings of the 13th International IBPSA Conference, Lyon, Francuska, 2013.

Prilog

1 CD-R