

Procjena potencijala energetske obnove gradskih kvartova

Hajsok, Lucija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:271163>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Lucija Hajsok

Zagreb, 2022. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Tea Žakula, dipl. ing.

Student:

Lucija Hajsok

Zagreb, 2022. godina

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

Zahvaljujem se mentorici, izv. prof. dr. sc. Tei Žakuli na prihvaćanju mentorstva, povjerenju, savjetima, pomoći i podršci tijekom izrade i pisanja diplomskog rada. Hvala na pruženom znanju i velikoj motivaciji.

Hvala mojim roditeljima na ljubavi, razumijevanju i neizmjerne podršci. Posebno hvala bratu Luki na pomoći tijekom studiranja.

Hvala mojim prijateljima i kolegama na pomoći, prihvaćanju i predivnim uspomnama.

Lucija Hajsok



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, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodostrojarški

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Lucija Hajsok**

JMBAG: 0035214294

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Procjena potencijala energetske obnove gradskih kvartova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Assessment of the energy renovation potential for urban neighbourhoods**

Opis zadatka:

S ciljem optimizacije sustava te smanjenja potrošnje energije razvijeni su brojni računalni alati koji omogućuju energijsko modeliranje pojedinačnih zgrada. Međutim, naglim porastom urbanizacije pojavila se potreba za modeliranjem cijelih kvartova i gradova, a sa svrhom analize rasvjete, mobilnosti, sadržane i isporučene energije. Primjer je računalni program UMI (eng. *Urban Modeling Interface*) razvijen na Massachusetts Institute of Technology-u, a koji omogućuje upravo ovakve analize. Cilj rada je provesti analizu potencijala energetske obnove za naselje Trnsko u Novom Zagrebu korištenjem spomenutog računalnog programa. Potrebno je provesti energetske analize postojećih zgrada te analizirati utjecaj toplinskih svojstava ovojnice na potrošnju energije pojedinih zgrada i cijelog naselja. Također je potrebno provesti analizu točnosti pojednostavljenih UMI modela na primjeru jedne modelirane zgrade. Analizu točnosti provesti korištenjem dinamičkih simulacija u računalnom programu TRNSYS.

Rad treba sadržavati:

- opis analiziranih zgrada,
- opis razvijenog energijskog modela u računalnom programu UMI,
- usporedbu rezultata TRNSYS i UMI simulacija na primjeru jedne zgrade,
- analizu utjecaja toplinskih svojstava ovojnice na potrošnju energije naselja Trnsko.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

5. svibnja 2022.

7. srpnja 2022.

18. – 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv.prof.dr.sc. Tea Žakula

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. Uvod	1
2. Naselje Trnsko prije energetske obnove.....	2
2.1. Karakteristike objekata obrazovne namjene	3
2.2. Karakteristike objekata stambene namjene.....	7
2.3. Karakteristike objekata maloprodajne namjene	11
3. Naselje Trnsko nakon energetske obnove	13
4. Izrada energijskog modela u računalnom programu UMI.....	16
4.1. Izrada predloška	19
4.2. Analiza gustoće rasporeda objekata (eng. <i>Site Analysis Module</i>).....	26
4.3. Analiza prirodnog osvjetljenja (eng. <i>Daylighting</i>)	26
4.4. Analiza potrebne i isporučene energije (eng. <i>Energy Module</i>).....	28
4.5. Analiza emisije stakleničkih plinova (eng. <i>Life Cycle</i>).....	30
4.6. Analiza prohodnosti (eng. <i>Mobility</i>)	32
4.7. Analiza sustava daljinskog grijanja i hlađenja (eng. <i>District Energy</i>).....	33
5. Modeliranje naselja Trnsko u računalnom programu <i>Rhinoceros 7</i>	35
6. Analiza točnosti UMI-a za proračun potrošnje energije.....	38
6.1. <i>Osnovna škola Trnsko</i>	38

6.2. Ulazni parametri za simulaciju godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje u TRNSYS-u.....	38
6.3. Meteorološki podaci.....	42
6.4. Ulazni parametri za simulaciju godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje u UMI-u	43
6.5. Usporedba rezultata TRNSYS-a i UMI-a	44
6.6. Utjecaj zasjenjenja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje.....	45
7. Analiza potencijala energetske obnove ovojnice.....	50
8. Ekonomska analiza energetske obnove za stambene zgrade.....	54
9. Zaključak	57
LITERATURA.....	59

POPIS SLIKA

Slika 1.	Karta gradske četvrti Novi Zagreb- zapad [2].....	2
Slika 2.	Prikaz naselja Trnsko [3].....	3
Slika 3.	Južno pročelje <i>Osnovne škole Trnsko</i>	4
Slika 4.	<i>Zgrada Dječjeg vrtića Trnsko</i>	6
Slika 5.	Stambena zgrada tip Bartolić i pripadajući tlocrt.....	8
Slika 6.	Stambena zgrada tip Tučkorić i pripadajući tlocrt	8
Slika 7.	Stambena zgrada tip Volta i pripadajući tlocrt.....	8
Slika 8.	Prikaz objekta maloprodajne namjene	11
Slika 9.	Korisničko sučelje programa <i>Rhinoceros 7</i>	16
Slika 10.	Osnovne postavke računalnog alata UMI u sklopu kartice <i>Building</i>	17
Slika 11.	Stilovi objekta u sklopu UMI-ja kojima se definira svaka ploha ili volumen.....	18
Slika 12.	Osnovne postavke računalnog alata UMI u sklopu kartice <i>Modules</i>	18
Slika 13.	Prikaz mogućih simulacija u UMI-u	19
Slika 14.	Prikaz definiranja svojstava materijala u sklopu kartice <i>Materials</i>	20
Slika 15.	Prikaz definiranja debljine slojeva zidova u sklopu kartice <i>Constructions</i>	20
Slika 16.	Prikaz definiranja dnevnog rasporeda korištenja u sklopu kartice <i>Schedules</i>	21
Slika 17.	Prikaz definiranja tjednog rasporeda korištenja u sklopu kartice <i>Schedules</i>	21
Slika 18.	Prikaz definiranja godišnjeg rasporeda korištenja u sklopu kartice <i>Schedules</i>	22
Slika 19.	Prikaz definiranja unutarnjih dobitaka u sklopu kartice <i>Loads</i> (lijevo) i građevinskih elemenata u sklopu kartice <i>Constructions</i> (desno)	22
Slika 20.	Prikaz definiranja parametara za prozore u sklopu kartice <i>Windows</i>	23
Slika 21.	Prikaz definiranja pogonskih režima (kartice <i>Conditioning</i> i <i>Ventilation</i>)	23
Slika 22.	Prikaz definiranja PTV-a u sklopu kartice <i>Domestic Hot Water</i>	24
Slika 23.	Definiranje zone na primjeru stambene zgrade u sklopu kartice <i>Zones</i>	24
Slika 24.	Prikaz definiranja objekta u sklopu kartice <i>Building Templates</i>	25
Slika 25.	Primjer provedene analize osvjetljenja [14].....	27
Slika 26.	Primjer mogućnosti korištenja analize osvjetljenja za analizu toplinske ugodnosti dijela grada u Bostonu [14]	27

Slika 27.	Geometrijsko modeliranje zgrade u sklopu <i>Shoebox</i> modela [16].....	29
Slika 28.	Prikaz formiranja 8 senzora za mjerenje sunčevog zračenja u sklopu <i>Shoebox</i> modela[16].....	29
Slika 29.	Prikaz vrsta emisija kroz vijek trajanja zgrade [17].....	30
Slika 30.	Ulazni parametri za primjenu <i>Life Cycle</i> modela.....	31
Slika 31.	Primjer primjena analize <i>Mobility</i> [14].....	32
Slika 32.	Shema daljinskog sustava grijanja/hlađenja [18].....	33
Slika 33.	Mogućnosti ulaznih parametra za analizu daljinskog grijanja i hlađenja [19].....	34
Slika 34.	3D model naselja Trnsko u računalnom programu <i>Rhinoceros 7</i>	36
Slika 35.	Prikaz sortiranja objekata naselja Trnsko prema različitoj vrsti primijenjenog predloška.....	37
Slika 36.	Zgrada <i>OŠ Trnsko</i> korištena za analizu točnosti UMI simulacija potrošnje energije.....	38
Slika 37.	Prikaz toplinskog zoniranja prizemlja <i>OŠ Trnsko</i>	40
Slika 38.	Prikaz toplinskog zoniranja 1. kata <i>OŠ Trnsko</i>	40
Slika 39.	Prikaz korisničkog sučelja TRNBuild na primjeru modela <i>OŠ Trnsko</i>	41
Slika 40.	Prikaz povezivanja komponenti simulacije u korisničkom sučelju Simulation Studio.....	41
Slika 41.	Satne vrijednosti vanjske temperature za grad Zagreb.....	42
Slika 42.	Model <i>OŠ Trnsko</i> u računalnom programu <i>Rhinoceros 7</i>	43
Slika 43.	Mjesečna potrebna energija za grijanje i hlađenje (MWh) za <i>OŠ Trnsko</i>	44
Slika 44.	Prikaz analize dnevnog osvjetljenja za <i>OŠ Trnsko</i> za kompaktni model.....	45
Slika 45.	Tlocrtni prikaz analize dnevnog osvjetljenja za <i>OŠ Trnsko</i> za model odvojenih volumena.....	46
Slika 46.	Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje u UMI-u za <i>OŠ Trnsko</i> (kompaktan model i model odvojenih volumena).....	47
Slika 47.	Mjesečna potrebna energija za grijanje i hlađenje u UMI-u i TRNSYS-u za <i>OŠ Trnsko</i> (model odvojenih volumena).....	47
Slika 48.	Stambena zgrada Trnsko 24 [9].....	48
Slika 49.	Stambena zgrada Trnsko 24 u sklopu modeliranog naselja Trnsko.....	48

Slika 50.	Utjecaj susjednih zgrada na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje stambene zgrade Trnsko 24	49
Slika 51.	Ukupna potrebna energija za naselje Trnsko za različite mjere energetske obnove ovojnice	51
Slika 52.	Ukupna isporučena električna energija za naselje Trnsko za različite mjere energetske obnove ovojnice	52
Slika 53.	Usporedba rezultata godišnje potrebne energije (TRNSYS i UMI) za različite mjere energetske obnove za <i>OŠ Trnsko</i>	53

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sastav zidova za objekte obrazovne namjene prije energetske obnove	4
Tablica 2. Ulazni podaci za <i>OŠ Trnsko</i>	6
Tablica 3. Ulazni podaci za <i>DV Trnsko</i>	7
Tablica 4. Sastav zidova za objekte stambene namjene prije energetske obnove.....	9
Tablica 5. Ulazni podaci za objekte stambene namjene.....	10
Tablica 6. Sastav vanjskog zida za objekte maloprodajne namjene prije energetske obnove	11
Tablica 7. Ulazni podaci za objekte maloprodaje namjene.....	12
Tablica 8. Svojstva ovojnice zgrada nakon energetske obnove	13
Tablica 9. Koeficijenti prolaza topline prije energetske obnove, nakon energetske obnove te maksimalni dopušteni prema <i>Tehničkom propisu</i> [4]	15
Tablica 10. Popis toplinskih zona za <i>OŠ Trnsko</i>	39
Tablica 11. Potrebna ukupna energija	44
Tablica 12. Promatrani slučajevi za analizu ukupne potrebne i isporučene energije.....	50
Tablica 13. Ukupna potrebna energija za naselje Trnsko za različite mjere energetske obnove ovojnice	51
Tablica 14. Koeficijent prolaza topline vanjskog zida za različite debljine izolacije	54
Tablica 15. Cijena kamene vune za različite debljine izolacije	55
Tablica 16. Potrebna i isporučena energija za različite debljine izolacije vanjskog zida	55
Tablica 17. Ekonomska analiza obnove stambenih zgrada za različite debljine izolacije.....	55

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d	cm	debljina zida
c_p	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet
ρ	kg/m ³	gustoća
λ	W/(mK)	toplinska provodnost
U	W/(m ² K)	koeficijent prolaza topline
g	-	stupanj propuštanja sunčevog zračenja kroz ostakljenje

SAŽETAK

U radu je provedena analiza potencijala energetske obnove naselja Trnsko u Novom Zagrebu. Naselje je modelirano u računalnom programu *Rhinoceros 3D*, a primjenom računalnog programa UMI (eng. *Urban Modeling Interface*) simulirana je potrebna i isporučena energija za postojeće stanje zgrada te nakon primjene mjera energetske obnove. Budući da je UMI namijenjen za modeliranje većih cjelina, glavni cilj energijskih analiza je brzo provođenje simulacija uz prihvatljivu točnost rezultata. Kako bi se utvrdilo koliko uvedena pojednostavljenja utječu na rezultate, napravljena je usporedba rezultata potrebne i isporučene energije za objekt *Osnove škole Trnsko* korištenjem računalnih programa UMI te TRNSYS. S ciljem određivanja optimalne debljine toplinske izolacije i perioda povrata investicije, provedena je ekonomska analiza za stambene zgrade za različite debljine izolacije vanjskog zida.

S obzirom da UMI omogućuje 3D modeliranje cijelog grada, dobiveno odstupanje u točnosti rezultata unutar 20% za potrebnu energiju za grijanje i hlađenje u usporedbi s TRNSYS-om smatra se prihvatljivim. Nakon izmjene toplinskih svojstava ovojnice, koje uključuje dodatak izolacije vanjskog zida i krova te zamjenu jednoslojnih prozora s dvoslojnim moguće je ostvariti smanjenje potrebne, odnosno isporučene energije za grijanje u iznosu od 74%, a smanjenje rashladne energije za 7%. Provedbom ekonomske analize za različite debljine izolacije vanjskog zida, određena je optimalna debljina izolacije 14 cm, a period povrata investicije iznosi 31,7 godina.

Ključne riječi: energijsko modeliranje gradova, energetska obnova, računalne simulacije

SUMMARY

In this study an assessment of the energy renovation potential was analyzed for Trnsko, a neighbourhood in the city of Zagreb. The settlement model was designed by *Rhinoceros 3D* computer program, after which the energy simulation was done using *The Urban Modeling Interface* (UMI) that provides various energy analyses. UMI was used to calculate the amount of required and delivered energy for the existing building condition as well as after the implementation of energy renovation measures. Since UMI is intended for large unit modeling, the main goal of energy analyses is a fast simulation performance with acceptable result accuracy. In order to evaluate the reliability of UMI, additional energy simulation was done in TRNSYS software for *Elementary School Trnsko*. With the aim of determining the optimal thermal insulation thickness and the investment return period, an economic analysis was conducted for residential buildings in Trnsko, taking into account different thicknesses of external wall insulation.

The obtained deviation in the accuracy of the results is 20% for the required energy for heating and cooling compared to TRNSYS. This is considered acceptable in relation to the advantages of urban modeling possibilities. After changing the thermal properties of the layer, which included the insulation of external walls and roofs as well as a window replacement, the delivered energy for heating decreased by 74%, while the delivered energy for cooling decreased by 7%. By conducting an economic analysis for different thicknesses of the insulation of the outer wall, results show that the optimal thickness of the insulation is 14 cm for which the investment return period is 31,7 years.

Key words: urban modeling interface, energy renovation potential, computer simulation

1. Uvod

Dinamičke simulacije, čiji je razvoj i korištenje u posljednje vrijeme u velikom porastu, omogućuju razne analize poput analize toplinske ugodnosti te potrošnje energije zgrada. Veliki potencijal korištenja dinamičkih simulacija je u projektiranju i modeliranju kvartova, no zbog složenosti problema i nedostatka vremena njihov potencijal nije još u potpunosti iskorišten. Upravo s ciljem povezivanja struka, pojavili su se BIM računalni alati (eng. *building information model*) koji omogućuju rad na projektu svih struka, uključujući građevinu, arhitekturu, strojarstvo i elektrotehniku. Jedan od BIM alata je i *Rhinoceros 7* u sklopu kojeg je modelirano i naselje Trnsko, dok su energijske analize naselja Trnsko u Zagrebu provedene korištenjem računalnog programa UMI (eng. *urban modelling interface*). Energijski model zgrada, naselja ili čak cijelih gradova razvijen u računalnom programu UMI omogućuje provođenje brojnih analiza, poput izračuna potrebne, isporučene i sadržane energije, analize daljinskog grijanja i hlađenja te analize osvjetljenosti i mobilnosti.

Cilj rada je provesti energijske analize postojećih zgrada u naselju Trnsko u Novom Zagrebu te analizirati utjecaj promjene toplinskih svojstava ovojnice na potrošnju energije pojedinih zgrada i cijelog naselja. Stoga je napravljena analiza potrebne i isporučene energije za grijanje i hlađenje za postojeći slučaj, zatim za slučaj koji uključuje promjenu toplinskih svojstava zidova te konačno za slučaj koji podrazumijeva promjenu svojstava cijele ovojnice, odnosno zidova i prozora. Kako bi se odredila optimalna debljina izolacije i izračunao povrat investicije, za zgrade stambene namjene napravljena je ekonomska analiza za različite debljine izolacije vanjskog zida.

Budući da se računalni program UMI koristi za modeliranje većih cjelina, prilikom izrade modela uvode se određena pojednostavljena čija je glavna svrha smanjenje trajanje simulacija. S ciljem analize utjecaja uvedenih pojednostavljena na točnost izračuna potrošnje energije, dodatno je provedena dinamička simulacija u računalnom programu TRNSYS. Usporedba rezultata TRNSYS i UMI simulacija provedena je za *Osnovnu školu Trnsko* za postojeće stanje te stanje nakon energetske obnove. U radu je također analiziran utjecaj zasjenjenja pojedinih volumena zgrada na ukupnu potrošnju energije zgrade, odnosno utjecaj zasjenjenja koji je posljedica prostornog rasporeda samih objekata u naselju.

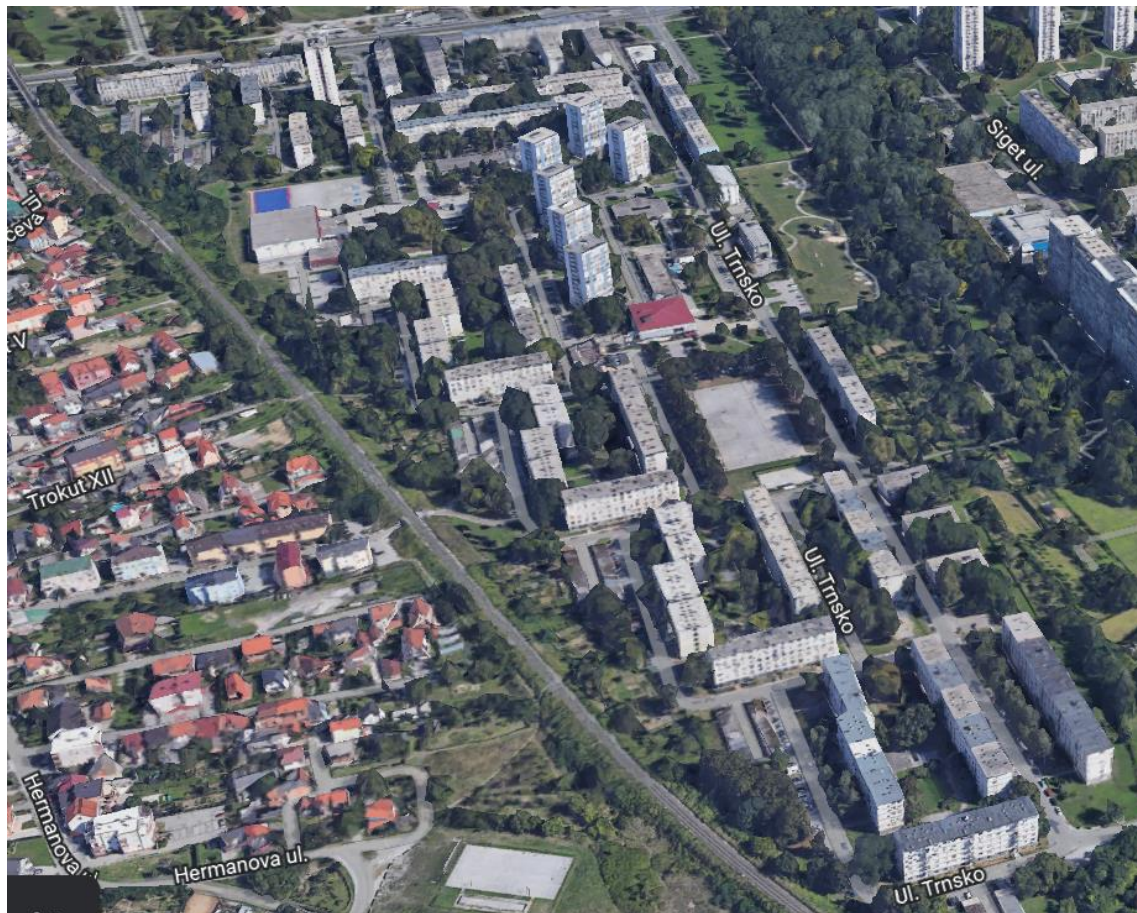
2. Naselje Trnsko prije energetske obnove

Naselje Trnsko pripada gradskoj četvrti Novi Zagreb - zapad (Slika 1), a omeđuje ga naselje Kajzerica sa sjevera, Siget s istoka, Savski gaj sa zapada te Sveta Klara s juga. Trnsko je jedno od prvih naselja Novog Zagreba, sagrađeno tijekom 1960-ih godina, a prema popisu stanovništva iz 2011. godine ima 5 331 stanovnika [1].



Slika 1. Karta gradske četvrti Novi Zagreb- zapad [2]

Analiza potencijala energetske obnove naselja Trnsko (Slika 2) provedena je za sve zgrade, pri čemu je zanemarena činjenica da je za neke zgrade u stvarnosti već provedena energetska obnova. Budući da je takvih zgrada malo, u radu je zanemarena obnova te je pretpostavljeno da su karakteristike zgrada jednake karakteristikama prilikom same izgradnje. Kasnijom analizom, promatra se utjecaj promjene i poboljšanja svojstava toplinske ovojnice na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje.



Slika 2. Prikaz naselja Trnsko [3]

2.1. Karakteristike objekata obrazovne namjene

Dio naselja Trnsko čine objekti obrazovne namjene *Osnova škola Trnsko* (Slika 3) te sportska dvorana, a u blizini škole nalazi se i *Dječji vrtić Trnsko*. Prema *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* [4] sportski objekti spadaju u posebnu kategoriju, no budući da je sportska dvorana u sklopu škole, pretpostavlja se da su stil gradnje, pogonski režimi te raspored korištenja jednaki kao i za nastavnički dio škole.



Slika 3. Južno pročelje Osnovne škole Trnsko

Škola je izgrađena u skeletno armirano betonskoj konstrukciji [5]. Pregradni zidovi napravljeni su od šupljih betonskih blokova, a zabatni zidovi ispunjeni su granuliranom opekam i s unutarnje strane dodanim slojem prešane trske. Ravni krovovi izvedeni su s hidroizolacijom te toplinskom izolacijom (Tablica 1).

Tablica 1. Sastav zidova za objekte obrazovne namjene prije energetske obnove

Vanjski zid					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	prešana trska	0,099	350	1000	0,05
2	šuplji beton	0,7	1000	1000	0,2
3	cementna žbuka	1,6	2000	1000	0,02
$U = 1,04 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Unutarnji zid					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	šuplji beton	0,70	1000	1000	0,2
$U = 2,19 \text{ W/m}^2\text{K}$					

Međukatna konstrukcija					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	cementni estrih	1,6	2000	1100	0,02
2	armirani beton	2,6	2500	1000	0,2
$U = 3,855 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Krov					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	armirani beton	2,6	2500	1000	2,6
2	beton-srednje gustoće	1,65	2200	1000	1,65
3	polimerna hidroizolacijska traka na bazi PVC-a	0,14	1200	1000	0,14
$U = 3,503 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Prozor					
U -vrijednost [W/m ² K]		5,68			
g -vrijednost [-]		0,855			

Osim geometrijskih podataka, pri izradi energijskog modela potrebno je definirati i postavne temperature grijanja i hlađenja. Tjedni raspored korištenja za grijanje i hlađenje uzima u obzir da škola od ponedjeljka do petka radi od 6:00 h do 20:00 h, a vikendom ne radi. Primijenjen je i godišnji raspored korištenja, koji uzima u obzir da škola tijekom srpnja i kolovoza ne radi. Unutarnji toplinski dobici iznose 6 W/m^2 , dok broj izmjena zraka infiltracijom iznosi $0,7 \text{ h}^{-1}$, a Tablica 2 daje sažeti pregled svih ulaznih podataka.

Tablica 2. Ulazni podaci za OŠ Trnsko

Parametri		Dnevni raspored	Tjedni raspored	Godišnji raspored
Unutarnji dobici	6 W/m ²	8:00 – 20:00	pon – pet	1.9. – 1.7.
Postavna temperature sustava grijanja	20°C	6:00 – 20:00	pon – pet	1.10. – 1.5.
Postavna temperature sustava hlađenja	22°C	6:00 – 20:00	pon – pet	1.9. – 1.10. 1.5. – 1.7.
Infiltracija	0,7 h ⁻¹	8:00 – 20:00	pon – pet	1.9. – 1.7.

U analizama za *Dječji vrtić Trnsko* (Slika 4) pretpostavljene su iste karakteristike zidova i prozora kao i za *OŠ Trnsko*. Međutim, pretpostavljeno je da vrtić radi tijekom cijele godine (Tablica 3). Specifično za vrtić postavna temperatura za režim grijanja iznosi 22°C [4].



Slika 4. Zgrada Dječjeg vrtića Trnsko

Tablica 3. Ulazni podaci za DV Trnsko

Parametri		Dnevni raspored	Tjedni raspored	Godišnji raspored
Unutarnji dobici	6 W/m ²	7:00 – 18:00	pon – pet	1.1. – 31.12.
Postavna temperature sustava grijanja	22°C	5:00 – 18:00	pon – pet	1.10. – 1.5.
Postavna temperature sustava hlađenja	22°C	5:00 – 18:00	pon – pet	1.5. – 10.1.
Infiltracija	0,7 h ⁻¹	7:00 – 18:00	pon – pet	1.1. – 31.12.

2.2. Karakteristike objekata stambene namjene

Najveći dio objekata u naselju Trnsko namijenjeno je stanovanju, a uključuje 32 horizontalna stambena bloka i nebodera od 16 katova orijentacije sjever-jug, odnosno istok-zapad. Naselje karakterizira i 6 zgrada identičnih geometrijskih i fizikalnih svojstava, od čega se svaka sastoji od 13 katova koje orijentiranih sjeverozapadno-jugoistočno [6].

Kao odraz sustavne gradnje na području Novog Zagreba tijekom druge polovice 20. stoljeća, stambene zgrade u Trnskom dijele se na tri osnovna tipa zgrada: tip Volta, tip Bartolić te tip Tučkorić. Zgrade tipa Bartolić (Slika 5) karakterizira tipičan tlocrt koji obuhvaća tri dvosobna (u središtu), dva trosobna i jedan jednosobni stan. Tip Tučkorić (Slika 6) sadrži jednosobne i dvosobne stanove povezane u niz, a tlocrt tipa Volta (Slika 7) sadrži 3 dvosobna stana. Osim po tipičnom tlocrtu, tipovi zgrada razlikuju se i u gradnji, odnosno sastavu zidova. Tip Volta i tip Tučkorić karakterizira nosiva konstrukcija od nosivih zidova od betonskih blokova debljine 20 cm, dok se za tip Bartolić nosiva konstrukcija sastoji od opeke debljine 38 cm [7, 8].



Slika 5. Stambena zgrada tip Bartolić i pripadajući tlocrt



Slika 6. Stambena zgrada tip Tučkorić i pripadajući tlocrt



Slika 7. Stambena zgrada tip Volta i pripadajući tlocrt

Zbog nedostatka podataka vezanih uz svojstva i sastav zidova, oni su preuzeti iz različitih izvora. Na temelju projektne dokumentacije za energetska obnova [9, 10], zaključuje se o sastavu zidova nebodera. Budući da je za tipove Volta i Tučkorić te nebodere karakteristična armirano–betonska građa, pretpostavljeno je da one imaju isti sastav zidova prikazan u Tablica

4 kao Stambena zgrada 1. Tip Bartolić specifičan je zbog nosive konstrukcije od opeke te on predstavlja tip Stambena zgrada 2. Za zgrade za koje nije pronađena dokumentacija o tipu gradnje, pretpostavljena su svojstva zidova kao za Stambenu zgradu 1. Svojstva slojeva zidova, uključujući specifični toplinski kapacitet, gustoću, toplinsku provodnost te debljinu sloja prikazana su u Tablici 4. Za sve zgrade je za postojeće stanje pretpostavljen jednoslojni prozor koeficijenta prolaza topline $U = 5,68 \text{ W/m}^2\text{K}$, te stupanj propuštanja sunčevog zračenja, $g = 0,855$.

Tablica 4. Sastav zidova za objekte stambene namjene prije energetske obnove

Vanjski zid (Stambena zgrada 1)					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	cementna žbuka	1,6	2000	1000	0,02
2	armirani beton	2,6	2500	1000	0,2
3	cementna žbuka	1,6	2000	1000	0,02
$U = 3,678 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Vanjski zid (Stambena zgrada 2)					
1	cementna žbuka	1,6	2000	1000	0,02
2	opeka	0,81	1800	1000	0,38
3	cementna žbuka	1,6	2000	1000	0,02
$U = 1,506 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Unutarnji zid					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	porobeton	0,19	600	1000	0,07
2	armirani beton	2,6	1000	2500	0,2
$U = 1,625 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Međukatna konstrukcija					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	cementni estrih	1,6	2000	1100	0,02
2	armirani beton	2,6	2500	1000	0,2
$U = 3,855 \text{ W/m}^2\text{K}$					

Krov					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	armirani beton	2,6	2500	1000	2,6
2	beton-srednje gustoće	1,65	2200	1000	1,65
3	polimerna hidroizolacijska traka na bazi PVC-a	0,14	1200	1000	0,14
$U = 3,503 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Prozor					
U - vrijednost [W/m ² K]		5,68			
g - vrijednost [-]		0,855			

Pretpostavlja se da sezona grijanja traje od listopada do travnja, a sezona hlađenja traje od svibnja do rujna. Za unutarnje dobitke i infiltraciju primijenjen je cjelogodišnji raspored korištenja prema [4], a kako prikazuje Tablica 5.

Tablica 5. Ulazni podaci za objekte stambene namjene

Parametri		Dnevni raspored	Tjedni raspored	Godišnji raspored
Unutarnji dobitci	5 W/m ²	8:00 – 22:00	pon – ned	1.1. – 31.12.
Postavna temperature sustava grijanja	20°C	6:00 – 22:00	pon – ned	1.10. – 1.5.
Postavna temperature sustava hlađenja	22°C	6:00 – 22:00	pon – ned	1.5. – 1.10.
Infiltracija	0,7 h ⁻¹	8:00 – 22:00	pon – ned	1.1. – 31.12.

2.3. Karakteristike objekata maloprodajne namjene

Osim stambenih i obrazovnih objekata, u samom središtu naselja nalaze se ugostiteljski i trgovački objekti (Slika 8). Oni predstavljaju zasebni tip objekta s drukčijim karakteristikama, a sastav vanjskih zidova određen je na temelju dostupnih podataka o gradnji maloprodajnih objekata do 1970-ih godina [11]. Sastav vanjskog zida prikazan je u Tablica 6, a ostala svojstva zidova jednaka su kao i za objekte stambene namjene. U odnosu na stambenu i obrazovnu namjenu, maloprodaja se razlikuje drukčijim dnevnim, tjednim i godišnjim rasporedom korištenja, a svi ulazni parametri prikazani su u Tablica 7.

Tablica 6. Sastav vanjskog zida za objekte maloprodajne namjene prije energetske obnove

Vanjski zid					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	cementna žbuka	1,6	2000	1000	0,02
2	puna opeka	0,81	1800	1000	0,38



Slika 8. Prikaz objekta maloprodajne namjene

Tablica 7. Ulazni podaci za objekte maloprodaje namjene

Glavni parametri		Dnevni raspored	Tjedni raspored	Godišnji raspored
Unutarnji dobici	5 W/m ²	8:00 – 21:00	pon – sub	1.1. – 31.12.
Postavna temperature sustava grijanja	20°C	6:00 – 21:00	pon – sub	1.10. – 1.5.
Postavna temperature sustava hlađenja	22°C	6:00 – 21:00	pon – sub	1.5. – 1.10.
Infiltracija	0,7 h ⁻¹	8:00 – 21:00	pon – sub	1.1. – 31.12.

3. Naselje Trnsko nakon energetske obnove

U prethodnom poglavlju prikazana su svojstva zidova i prozora za sve namjene prije energetske obnove. Kako bi se analizirao potencijal naselja Trnsko za energetska obnova, provedena je analiza potrebne energije za grijanje i hlađenje nakon rekonstrukcije zidova i zamjene prozora. Kompletna energetska obnova naselja Trnsko obuhvaća dodatak izolacije, odnosno izmjenu sastava vanjskog zida i krova uz zamjenu jednoslojnih prozora s dvoslojnim, a mjere energetske obnove preuzete su iz [10] (Tablica 8). Osim kompletne energetske obnove, napravljena je i analiza koja uključuje izmjenu sastava vanjskog zida i krova, no uz zadržavanje jednoslojnih prozora.

Tablica 8. Svojstva ovojnice zgrada nakon energetske obnove

Vanjski zid (Stambena zgrada 1)					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	cementna žbuka	1,6	2000	1000	0,02
2	armirani beton	2,6	2500	1000	0,2
3	mineralna vuna	0,036	200	1000	0,14
4	polimerna žbuka	0,7	1100	1000	0,005
5	silikonska žbuka	0,87	1775	1050	0,003
$U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Vanjski zid (Stambena zgrada 2)					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	cementna žbuka	1,6	2000	1000	0,02
2	puna opeka od gline	0,81	1800	1000	0,38
3	mineralna vuna	0,036	200	1000	0,14
4	polimerna žbuka	0,7	1100	1000	0,005
5	silikonska žbuka	0,87	1775	1050	0,003
$U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$					

Vanjski zid (Škola, vrtić)					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	prešana trska	0,099	350	1000	0,05
2	šuplji beton	0,7	1000	1000	0,2
3	mineralna vuna	0,036	200	1000	0,14
4	polimerna žbuka	0,7	1100	1000	0,005
5	silikonska žbuka	0,87	1775	1050	0,003
$U = 0,206 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Vanjski zid (Maloprodaja)					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	cementna žbuka	1,6	2000	1000	0,02
2	puna opeka	0,81	1800	1000	0,38
3	mineralna vuna	0,036	200	1000	0,14
4	polimerna žbuka	0,7	1100	1000	0,005
5	silikonska žbuka	0,87	1775	1050	0,003
$U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Krov					
Sloj	Materijal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
1	armirani beton	2,6	2500	1000	0,2
2	beton-srednje gustoće	1,65	2200	1000	0,04
3	polimerna hidroizolacijska traka na bazi PVC-a	0,14	1200	1000	0,002
4	ekstrudirana polistirenska pjena (XPS)	0,03	25	1450	0,14
$U = 0,227 \text{ W/m}^2\text{K}$					
Prozor					
U -vrijednost [W/m ² K]		1,4			
g -vrijednost [-]		0,589			

Prilikom promjene energetske svojstva toplinske ovojnice, u obzir su uzeta ograničenja koja propisuje *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinsko zaštiti u*

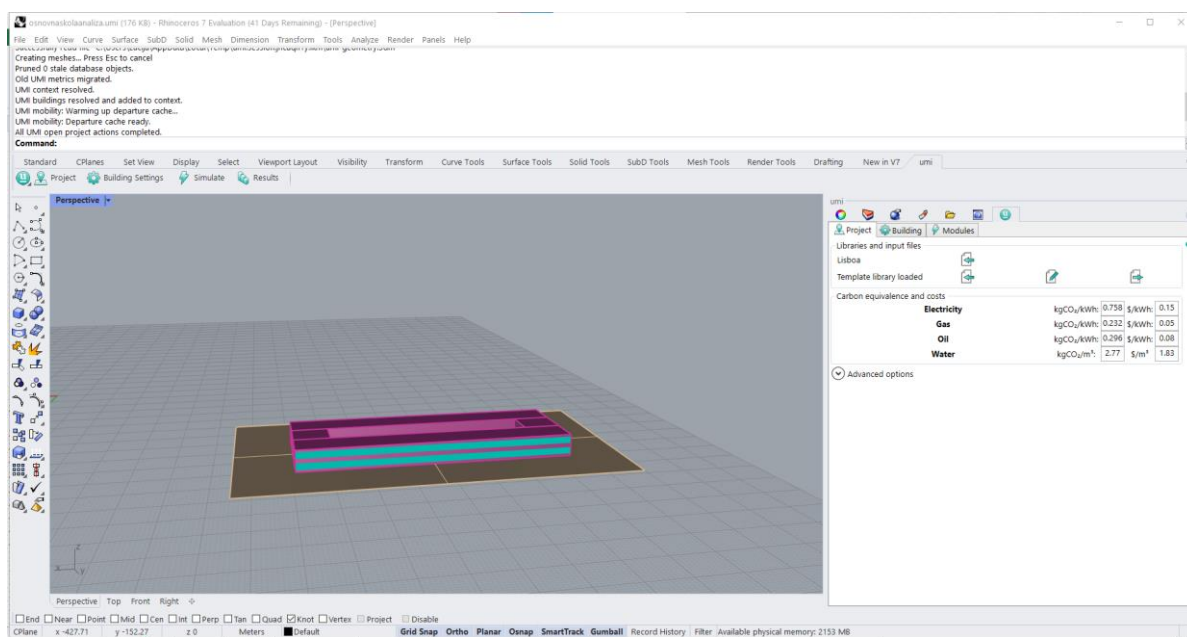
zgradama [4]. Najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaza topline nakon rekonstrukcije određuju se za unutarnju projektnu temperaturu za grijanje veću od 18°C, a srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca za grad Zagreb, postaju Maksimir iznosi -12,8°C [12]. Tablica 9 prikazuje izračunate koeficijente prolaza topline vanjskog zida te prozora prije i nakon kompletne energetske obnove te maksimalne dopuštene vrijednosti prema Propisu.

Tablica 9. Koeficijenti prolaza topline prije energetske obnove, nakon energetske obnove te maksimalni dopušteni prema Tehničkom propisu [4]

Koeficijent prolaza topline, U [W/m²K]			
Građevni dio	Prije energetske obnove	Poslije energetske obnove	Maksimalni dopušteni
Vanjski zid – škola/ vrtić	1,04	0,21	0,3
Vanjski zid – stambena zgrada 1	3,68	0,24	0,3
Vanjski zid – stambena zgrada 2	1,51	0,22	0,3
Vanjski zid – maloprodaja	1,51	0,22	0,3
Prozori	5,6	1,40	1,6
Ravni i kosi krov	3,5	0,23	0,25

4. Izrada energijskog modela u računalnom programu UMI

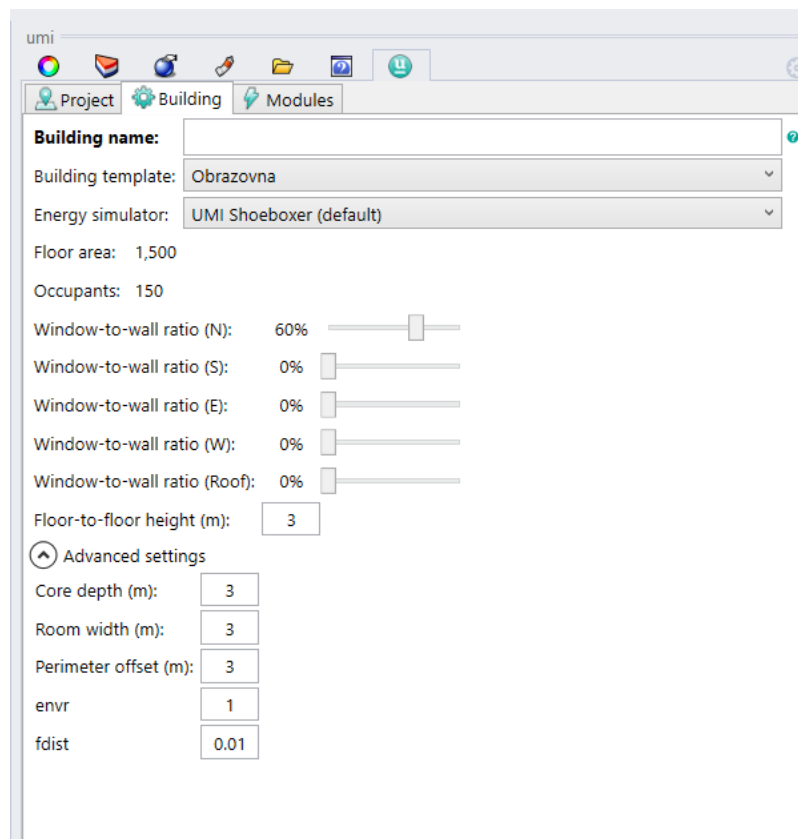
Modeliranje naselja i gradova složeno je i zahtjevno, a korištenje računalnih programa za pojedinačno modeliranje zgrada pokazuje brojne nedostatke, poput nemogućnosti modeliranja utjecaja zasjenjenja jednog objekta na drugi te sustava daljinskog grijanja i hlađenja. S ciljem razvoja programa koji su pogodniji za modeliranje gradova, razvijaju se brojni alati koji omogućuju brže izvođenje simulacija uz prihvatljivu točnost. Jedan od primjera je i računalni program UMI (eng. *Urban Modeling Interface*), razvijen na Massachusetts Institute of Technology-u (SAD), a koristi se kao dodatak (eng. *plug-in*) računalnom programu za BIM modeliranje, *Rhinoceros 7*.



Slika 9. Korisničko sučelje programa *Rhinoceros 7*

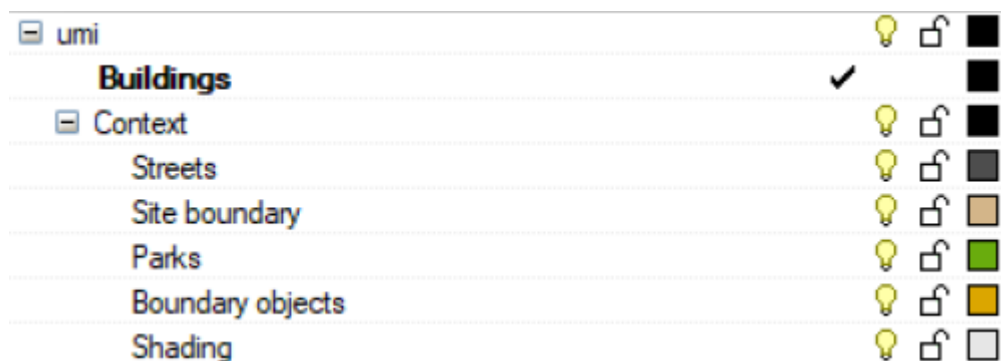
Slika 9 prikazuje korisničko sučelje programa *Rhinoceros 7*, a s desne strane prikazan je dodatak UMI. Prilikom izrade modela, početni je korak odabir lokacije s ciljem definiranja meteoroloških podataka. Na kartici *Project*, postoji mogućnost učitavanja predložaka (eng. *template library*), a osim izrade predloška, moguće je definirati cijene energenata te u dodatnim postavkama omogućiti generiranje satnih godišnjih rezultata.

Na kartici *Building* (Slika 10) potrebno je imenovati svaki objekt te mu dodijeliti predložak. Osim toga za svaku stranu svijeta, potrebno je definirati pokrivenost zida prozorima, *WWR* (eng. *window to wall ratio*), visinu između katova te dodatne opcije za provedbu simulacije.



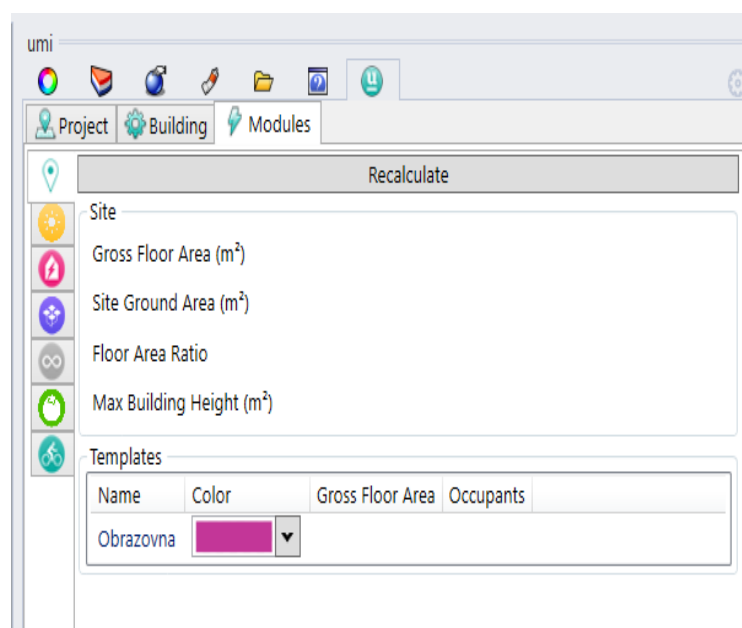
Slika 10. Osnovne postavke računalnog alata UMI u sklopu kartice *Building*

Svaki objekt potrebno je definirati već gotovim stilovima geometrije koje se primjenjuju u UMI-u (Slika 11). Primjerice, objekt ili površina definiraju se kao zgrada (eng. *Building*), za potrebe primjene modula *Mobility* potrebno je definirati ulice (eng. *Street*) i zelene površine (eng. *Parks*), za određivanje gustoće raspodjele objekata potrebno je definirati površinu na kojoj se građevinski objekti nalaze (eng. *Ground*). Za primjenu energetske simulacije, sve objekte koje imaju svrhu zasjenjenja, a nisu u kontaktu s promatranom zgradom, potrebno je tako i definirati (eng. *Shading*). Također, postoje objekti kojima je moguće dodijeliti adijabatski rubni uvjet (eng. *Boundary object*), a za njih se ne provode simulacije.



Slika 11. Stilovi objekta u sklopu UMI-ja kojima se definira svaka ploha ili volumen

Na karici *Modules* prikazani su različiti razvijeni moduli pomoću kojih je moguće provesti simulacije i analize (Slika 12). U radu su korišteni moduli koji omogućuju izračun faktora *FAR* (eng. *Floor area ratio*) koji predstavlja odnos ukupne površine na kojoj se objekt nalazi te same površine promatranog objekta, prikaz osvjetljenja (eng. *Daylighting*) i izračun potrebne, odnosno isporučene energije (eng. *Energy*). Osim toga postoje i analize za izračun sadržane energije te emisije CO_2 (eng. *Lifecycle*), primjenu sustava daljinskog grijanja i hlađenja (eng. *District Energy*) te analize mobilnosti (eng. *Mobility*) i potrošnje hrane (eng. *Harvest*). Slika 13 prikazuje značenje ikona, odnosno imena modula, u sklopu kartice *Modules*.



Slika 12. Osnovne postavke računalnog alata UMI u sklopu kartice *Modules*

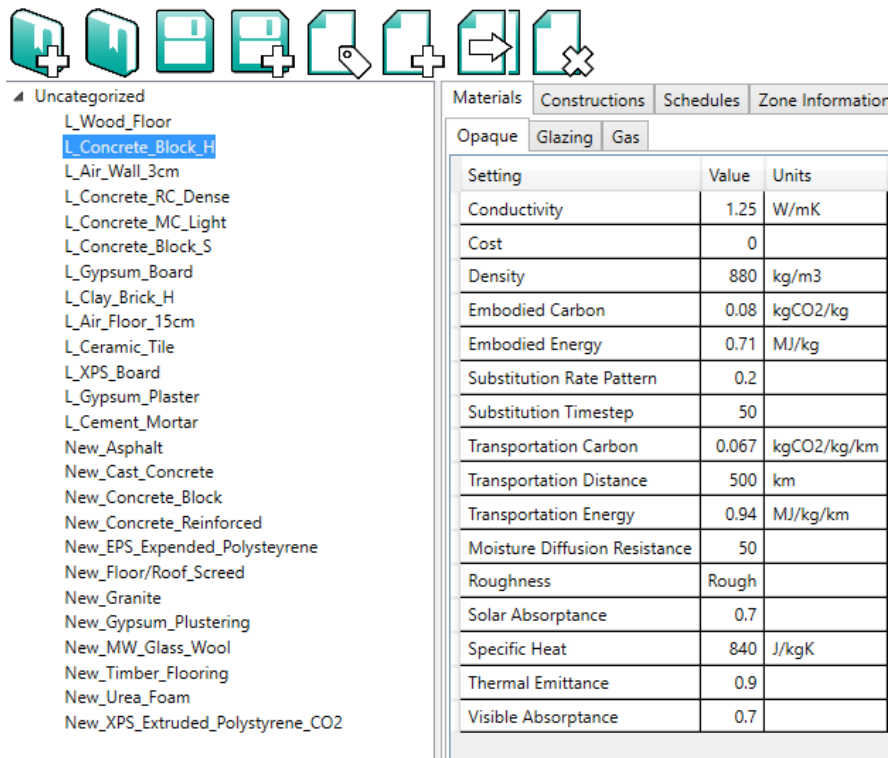


Slika 13. Prikaz mogućih simulacija u UMI-u

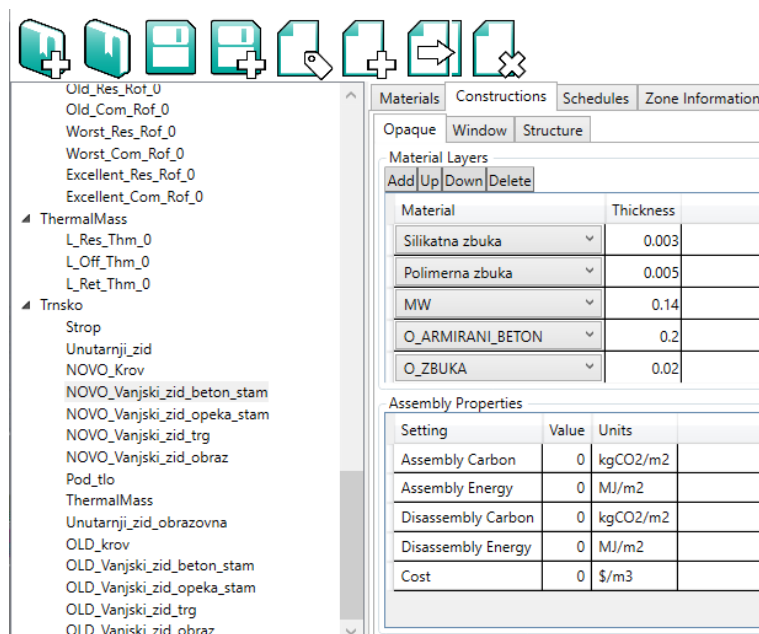
4.1. Izrada predloška

Nakon što se zgrada geometrijski definira, potrebno je odrediti i ostale karakteristike poput materijala, pogonskih režima i rasporeda korištenja. Iako na razini grada postoji mnogo različitih svojstava i karakteristika pojedinih zgrada, cilj modeliranja je grupirati ih u slične cjeline te pojednostaviti model. Sučelje u kojem se izrađuje predložak (eng. *Template library*) prikazano je na Slika 14.

Koristeći izbornik *Materials* (Slika 14), potrebno je unijeti sve materijale, odnosno slojeve i svojstva zidova i ostakljenja. Specifično, potrebno je definirati toplinsku provodnost, specifični toplinski kapacitet i gustoću, a pomoću izbornika *Constructions* (Slika 15) definira se i debljina pojedinih slojeva zidova. Osim navedenih svojstava koja su potrebna za izračun koeficijenta prolaza topline, moguće je i definirati vrijednost parametara *Embodied Carbon* i *Embodied Energy*. Vrijednost parametra *Embodied Carbon* predstavlja emisije stakleničkih plinova, a *Embodied Energy* predstavlja potrošnju goriva [13], a u Poglavlju 4.5. detaljniji je opis navedenih parametra.

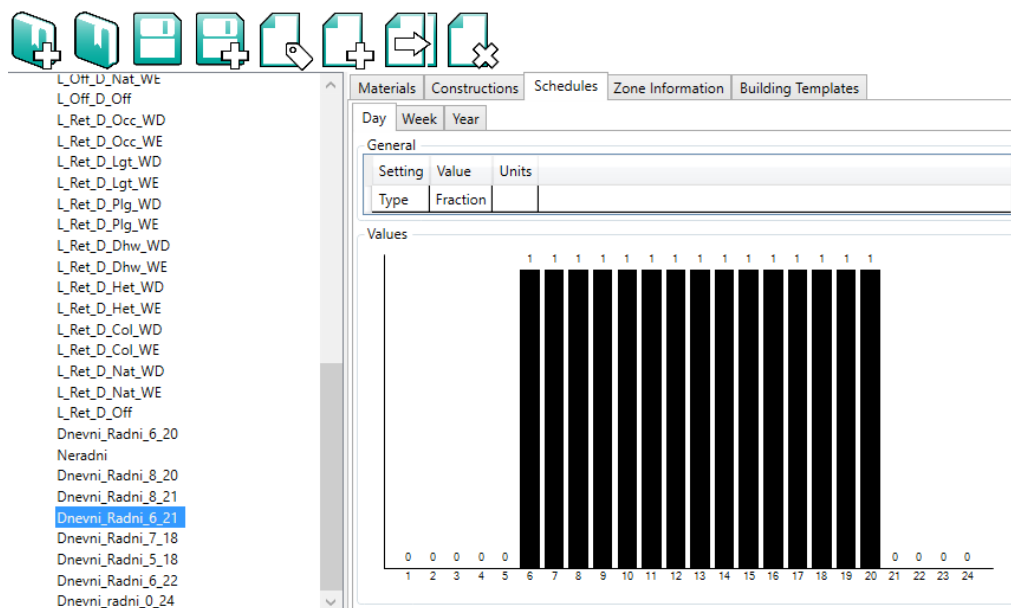


Slika 14. Prikaz definiranja svojstava materijala u sklopu kartice Materials

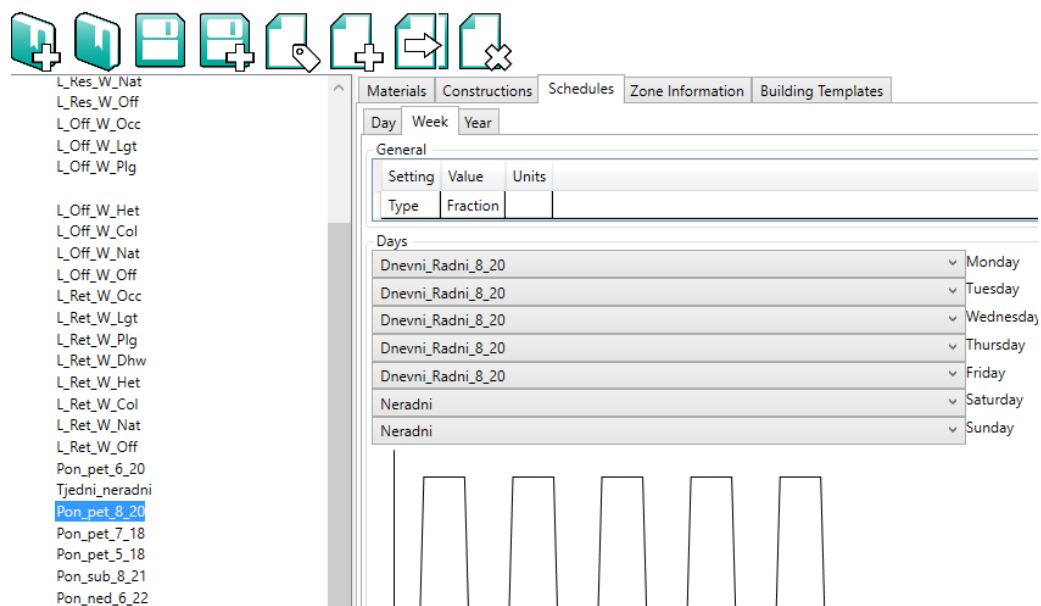


Slika 15. Prikaz definiranja debljine slojeva zidova u sklopu kartice Constructions

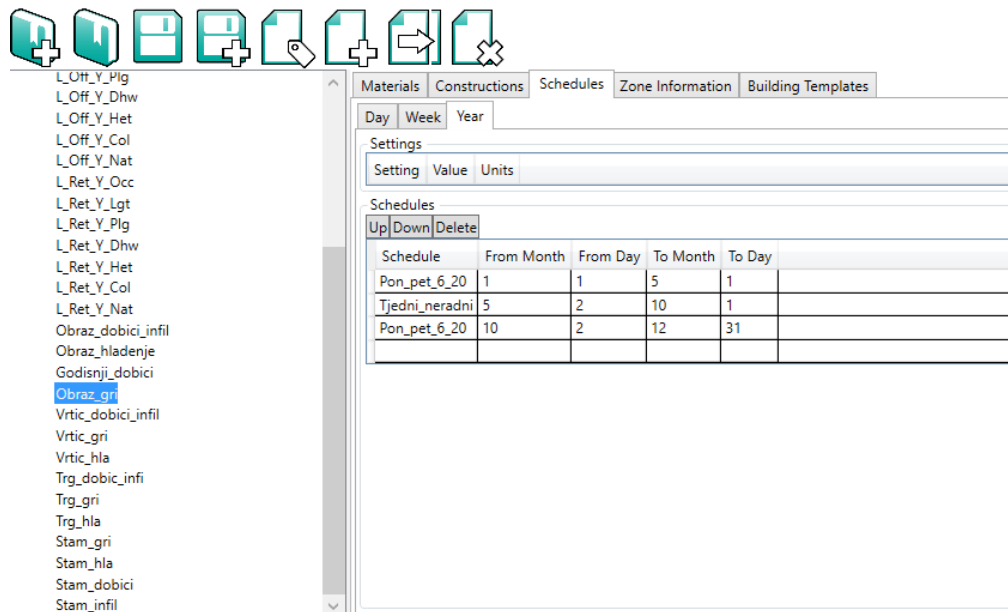
U izborniku *Schedule* moguće je definirati dnevne rasporede korištenja (Slika 16), na temelju kojih se formira tjedni raspored. Prikaz tipičnog tjednog rasporeda prikazan je na Slika 17, a godišnji raspored korištenja na Slika 18.



Slika 16. Prikaz definiranja dnevnog rasporeda korištenja u sklopu kartice Schedules

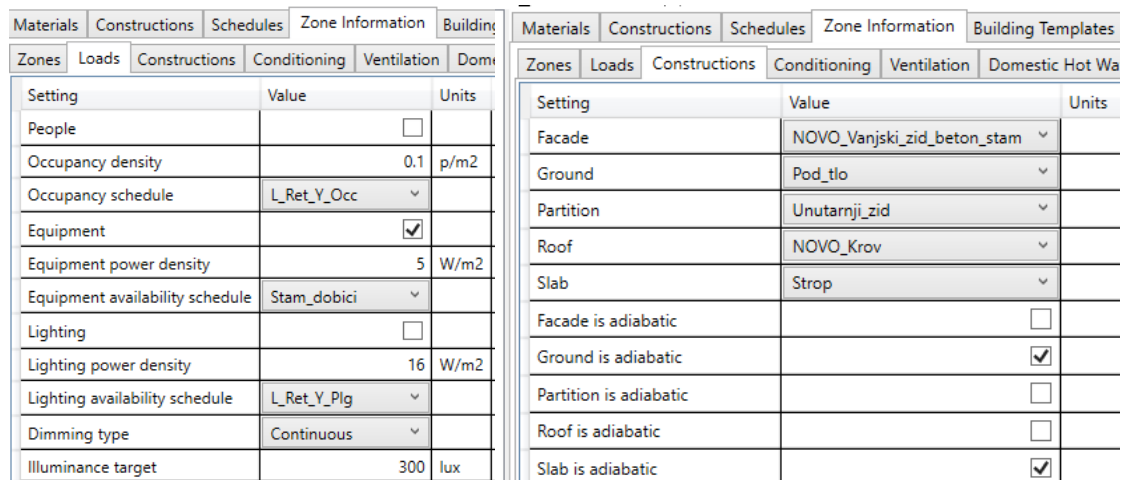


Slika 17. Prikaz definiranja tjednog rasporeda korištenja u sklopu kartice Schedules



Slika 18. Prikaz definiranja godišnjeg rasporeda korištenja u sklopu kartice Schedules

U sklopu izbornika *Zone Information* definiraju se unutarnji dobici, a dijele se na ljude, opremu i rasvjetu pri čemu je potrebno definirati godišnji raspored korištenja (Slika 19). Prethodno definirane zidove potrebno je dodijeliti određenoj fasadi, podu, unutarnjim zidovima, stropu te krovu, a postoji i mogućnosti da se pojedina ploha modelira adijabatski, odnosno bez izmjene topline. Karakteristike prozora, uključujući tip, zasjenjenje te korisne površine prozora, definiraju se u izborniku *Windows* (Slika 20).



Slika 19. Prikaz definiranja unutarnjih dobitaka u sklopu kartice Loads (lijevo) i građevinskih elemenata u sklopu kartice Constructions (desno)

Materials		Constructions		Schedules		Zone Information		Building Templates	
Zones		Loads		Constructions		Conditioning		Ventilation	
Domestic Hot Water		Windows							
Setting	Value	Units							
Type	External								
Construction	Prozor u=1.4								
Operable area	0.8								
Shading is used	<input type="checkbox"/>								
Shading system availability schedule	L_Ret_Y_Occ								
Shading system setpoint	0.5	W/m2							
Shading system transmittance	0.5								
Shading system type	ExteriorShade								
Zone mixing	<input type="checkbox"/>								
Zone mixing availability schedule	L_Ret_Y_Occ								
Zone mixing delta temperature	2								
Zone mixing flow rate	0.001	m3/2							
Virtual partition	<input type="checkbox"/>								
Airflow network discharge coefficient	0.65								
Airflow network temperature setpoint	20	degC							

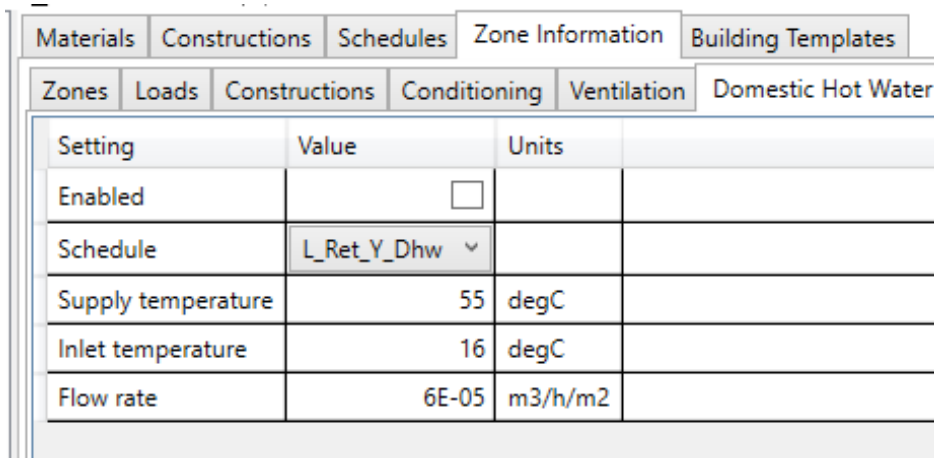
Slika 20. Prikaz definiranja parametara za prozore u sklopu kartice Windows

U izborniku *Conditioning* potrebno je definirati uvjete za grijanje, hlađenje i mehaničku ventilaciju, a izbornik *Ventilation* omogućuje postavke infiltracije i prirodne ventilacije. Svi parametri koje je moguće unijeti prikazani su na Slika 21. Kako bi se u potpunosti definirala potrošnja tople vode (PTV-a), potrebno je unijeti protok vode, temperaturu polaza vode, ulaznu temperaturu te raspored korištenja (Slika 22).

Materials		Constructions		Schedules		Zone Information		Buildi	
Zones		Loads		Constructions		Conditioning		Ventilation	
Dom									
Setting	Value	Units							
Heating	<input checked="" type="checkbox"/>								
Heating setpoint	20	degC							
Heating schedule	Stam_gri								
Heating limit type	NoLimit								
Max heating capacity	100	W/m2							
Max heat flow	100	m3/s/m2							
Heating CoP	1								
Cooling	<input checked="" type="checkbox"/>								
Cooling setpoint	22	degC							
Cooling schedule	Stam_hla								
Cooling limit type	NoLimit								
Max cooling capacity	100	W/m2							
Max cool flow	100	m3/s/m2							
Cooling CoP	1								
Mechanical ventilation	<input type="checkbox"/>								

Materials		Constructions		Schedules		Zone Information		Buildin	
Zones		Loads		Constructions		Conditioning		Ventilation	
Dom									
Setting	Value	Units							
Infiltration	<input checked="" type="checkbox"/>								
Infiltration rate	0.7	ACH							
Natural ventilation	<input type="checkbox"/>								
Nat vent min outdoor air temp	0	degC							
Nat vent max outdoor air temp	30	degC							
Nat vent max rel humidity	90								
Nat vent schedule	L_Res_Y_Col								
Nat vent zone temperature setpoint	18	degC							
Scheduled ventilation	<input type="checkbox"/>								
Scheduled ventilation ACH	0.6	ACH							
Scheduled ventilation schedule	L_Res_Y_Dhw								
Scheduled ventilation setpoint	18	degC							
Buoyancy	<input type="checkbox"/>								
Wind	<input type="checkbox"/>								
Afn	<input type="checkbox"/>								

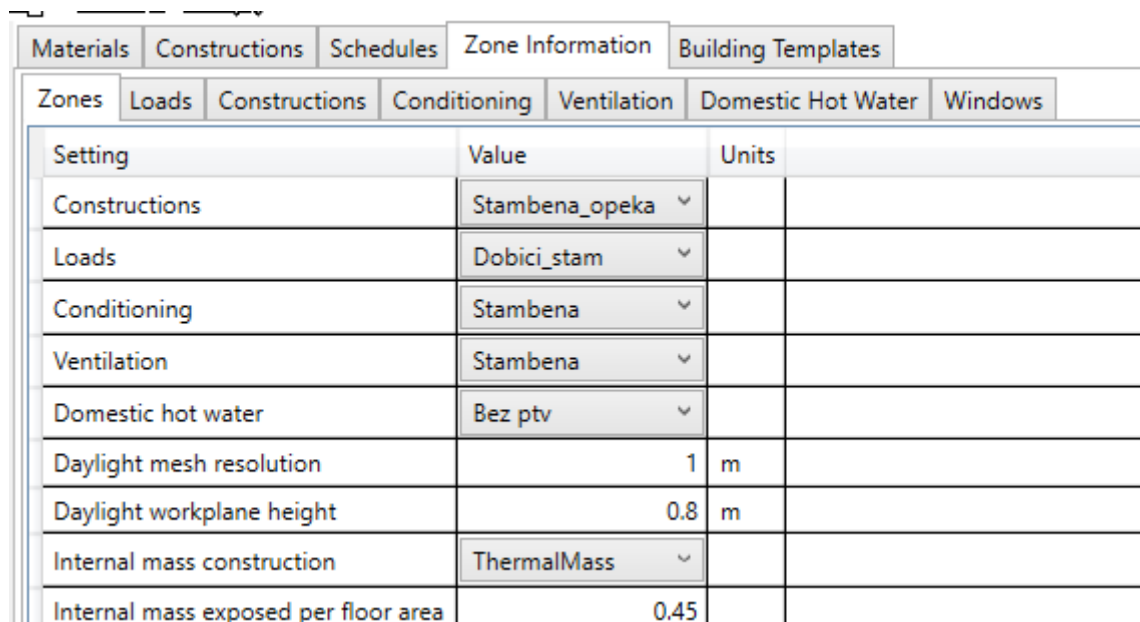
Slika 21. Prikaz definiranja pogonskih režima (kartice *Conditioning* i *Ventilation*)



Setting	Value	Units
Enabled	<input type="checkbox"/>	
Schedule	L_Ret_Y_Dhw	
Supply temperature	55	degC
Inlet temperature	16	degC
Flow rate	6E-05	m3/h/m2

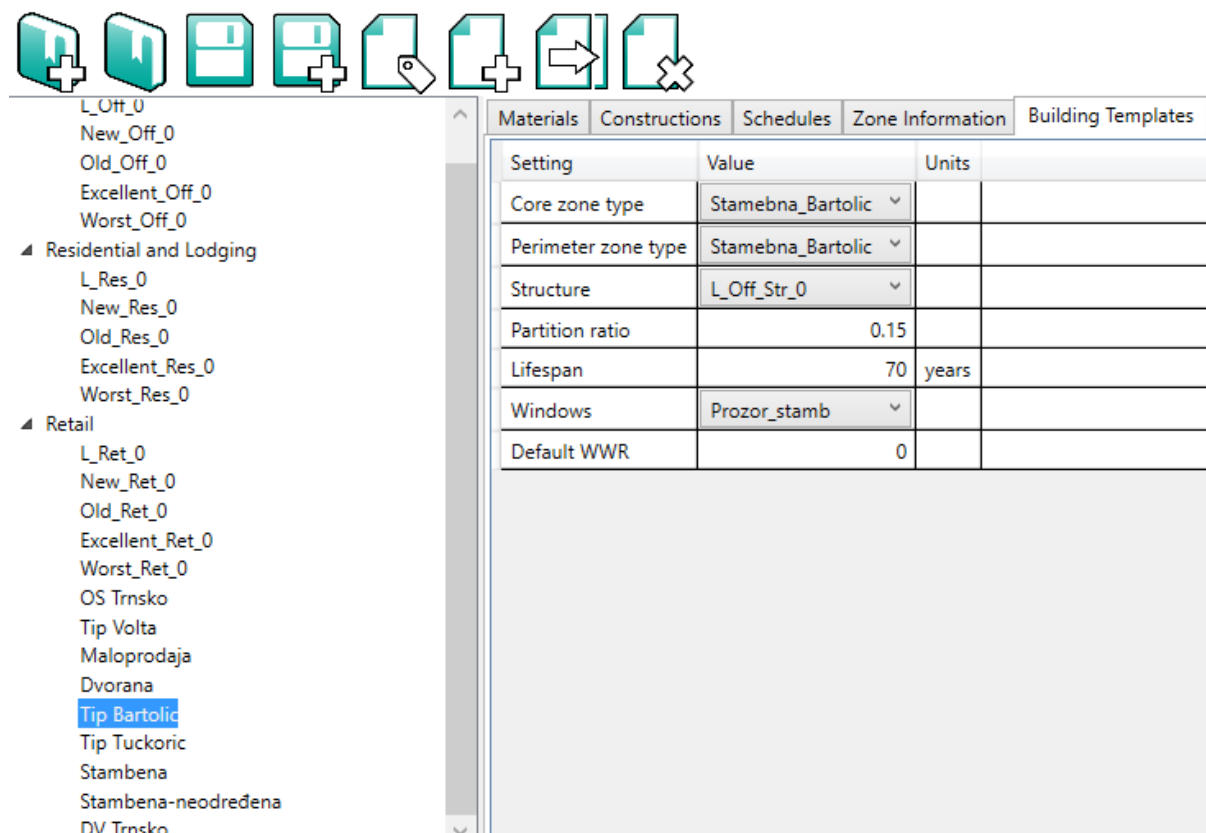
Slika 22. Prikaz definiranja PTV-a u sklopu kartice Domestic Hot Water

Jednu zonu čine sve prethodno definirane karakteristike, a Slika 23 prikazuje primjer definiranog predloška stambene zgrade. Slika 24 prikazuje posljednju definiciju jednog objekta, u sklopu kartice *Building Template*. Svaki objekt moguće je podijeliti na dvije zone, *Core* i *Perimeter* s pripadajućim *Zone Information* predloškom. U sklopu ove kartice potrebno je unijeti parametar *Lifespan* koji daje podatak o očekivanom životnom vijeku objekta.



Setting	Value	Units
Constructions	Stambena_opeka	
Loads	Dobici_stam	
Conditioning	Stambena	
Ventilation	Stambena	
Domestic hot water	Bez ptv	
Daylight mesh resolution	1	m
Daylight workplane height	0.8	m
Internal mass construction	ThermalMass	
Internal mass exposed per floor area	0.45	

Slika 23. Definiranje zone na primjeru stambene zgrade u sklopu kartice Zones



Slika 24. Prikaz definiranja objekta u sklopu kartice Building Templates

Ako u zgradi postoje zone koje imaju različite temperature, u stvarnosti između njih dolazi do izmjene topline. Međutim, UMI modelom to nije moguće uzeti u obzir, jer jedan predložak (eng. *template*) predstavlja jednu zgradu. Rješenje tog problema bilo bi modeliranje zasebne zone, kao zasebnog volumena, no time bi se detaljizirao model te umanjila primarna svrha pojednostavljenog modeliranja gradova. Također, za analize koji bi prikazivale raspodjelu protoka zraka potrebne su detaljnije CFD analize koje nisu moguće korištenjem UMI-a, a i najčešće nisu primjerene u ranoj fazi dizajniranja/projektiranja naselja [13].

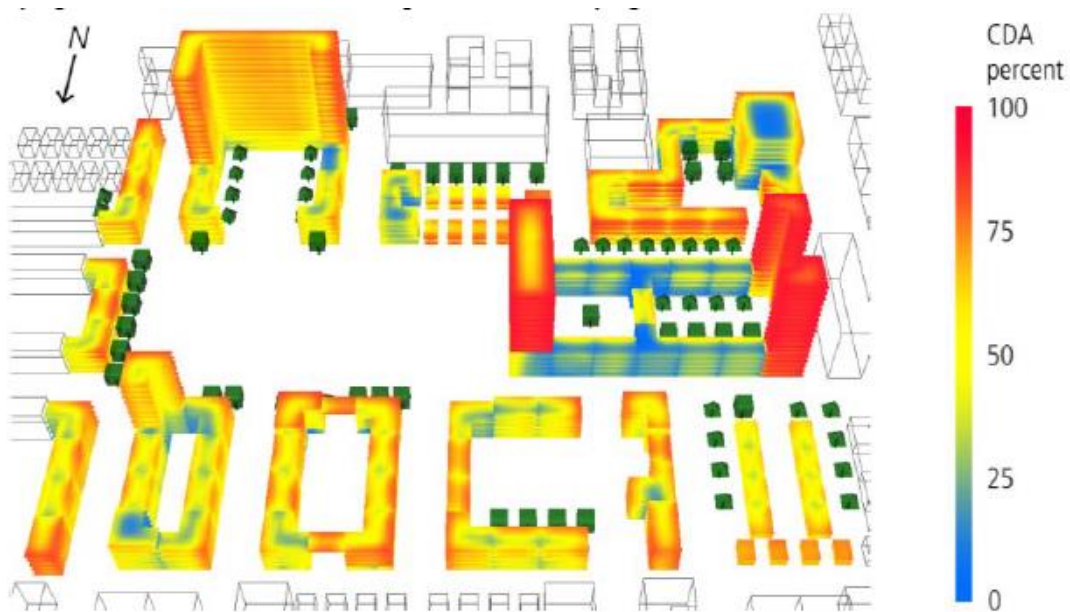
S obzirom da dinamičke simulacije naselja imaju vrlo važnu ulogu u ranoj fazi projektiranja, odnosno gradnje, tada ti podaci nisu toliko relevantni te se oni tijekom kasnije faze projektiranja mogu detaljnije redefinirati. Stoga je vrlo važno pravilno grupirati objekte te im dodijeliti zajedničke karakteristike kako bi se smanjila složenost energijskog modela i trajanje simulacije.

4.2. Analiza gustoće rasporeda objekata (eng. *Site Analysis Module*)

Za svaku zgradu moguće je izračunati faktor *FAR* (eng. *Floor area ratio*) koji predstavlja odnos ukupne površine na kojoj se objekt nalazi te same površine promatranog objekta. Prvi kriterij koji je potrebno primijeniti je postavljen stil zgrade na *Building*, a svakoj zgradi potrebno je definirati *floor-to-floor height* vrijednost. Drugi uvjet koji mora biti ispunjen za provedbu simulacije je definiranje zatvorene, ravne površine, dodijeljenog stila *Ground*, koja predstavlja površinu na kojoj se nalaze objekti.

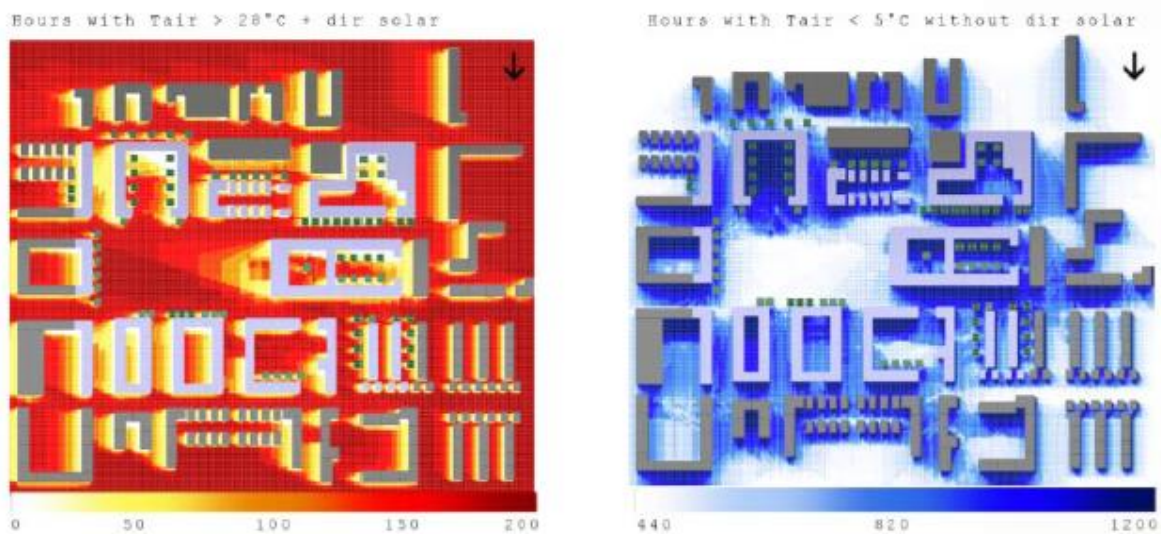
4.3. Analiza prirodnog osvjetljenja (eng. *Daylighting*)

Korištenjem alata *Urban Daylight*, UMI izračunava godišnju dnevnu osvjetljenost za svaki kat zgrade [14]. Analiza je potpuno automatizirana te osim parametara kojima se definira i energijski model, ne zahtijeva dodatne ulazne vrijednosti. Za analizu osvjetljenja korišten je računalni alat *Daysim* koji na temelju vanjskih senzora izračunava satne vrijednosti zračenja. Vanjske vrijednosti zračenja se tada zamjenjuju mrežom unutarnjih senzora koji definiraju doprinos pojedinog segmenta pročelja razini osvjetljenja interijera. Na taj način moguće je analizirati satnu raspodjelu razine osvjetljenja građevine proizvoljnog oblika te se na temelju dobivenih rezultata zaključiti o optimalnom rasporedu prostorija prema njihovoj namjeni i potrebi za osvjetljenjem. Rezultat osvjetljenja moguće je prikazati pomoću parametra *DA* (eng. *daylight autonomy*) i *CDA* (eng. *continuous daylight autonomy*) (Slika 25). Parametar *DA* odnosi se na udio zauzetog vremena u godini kada je željena razina osvjetljenja postignuta samo s prirodnom svjetlošću. Faktor *CDA* odnosi se na udio vremena u godini kada se djelomično ostvaruje željena razina. Korištenjem UMI-a nije moguće modelirati unutarnji prostor, stoga se, unutar sučelja programa *Rhinoceros 7*, za detaljnije analize osvjetljenja može koristiti računalni alat *DIVA*.



Slika 25. Primjer provedene analize osvjetljenja [14]

Iako je model za analizu toplinske ugodnosti još u razvoju te ne uzima u obzir srednju temperaturu zračenja i zanemaruje lokalne vjetrove, iz rezultata simulacije moguće je donositi zaključke o dijelovima grada koji će imati višu ili nižu temperaturu od željene te u ranoj fazi primijeniti rješenja koja će smanjiti neželjene efekte. Slika 26 prikazuje mogućnost analize toplinske ugodnosti za dio grada u Bostonu.



Slika 26. Primjer mogućnosti korištenja analize osvjetljenja za analizu toplinske ugodnosti dijela grada u Bostonu [14]

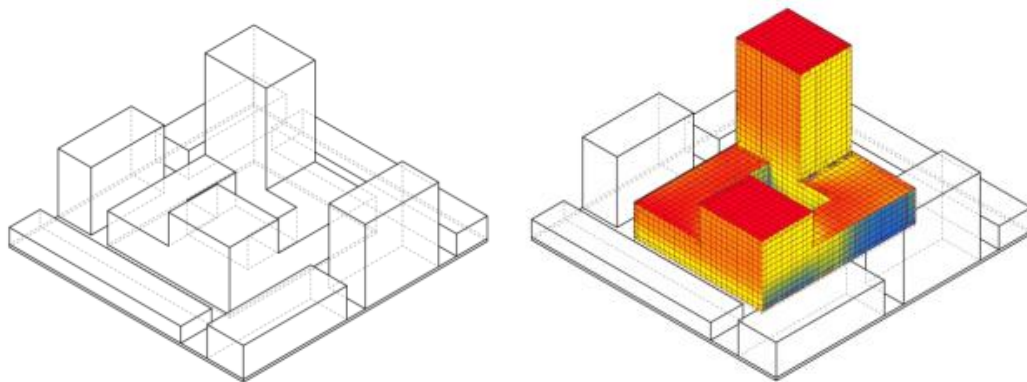
Kako model uzima u obzir međudjelovanje drugih zgrada te prikazuje zasjenjenje i osvjetljenje, ove analize mogu biti vrlo korisne u ranoj fazi projektiranja. Na temelju različitih karakteristika zgrada, moguće je utvrditi optimalan smještaj objekata prema namjeni te osigurati dovoljno svjetla, a pri tome smanjiti potrošnju električne energije za rasvjetu, grijanje i hlađenje.

4.4. Analiza potrebne i isporučene energije (eng. *Energy Module*)

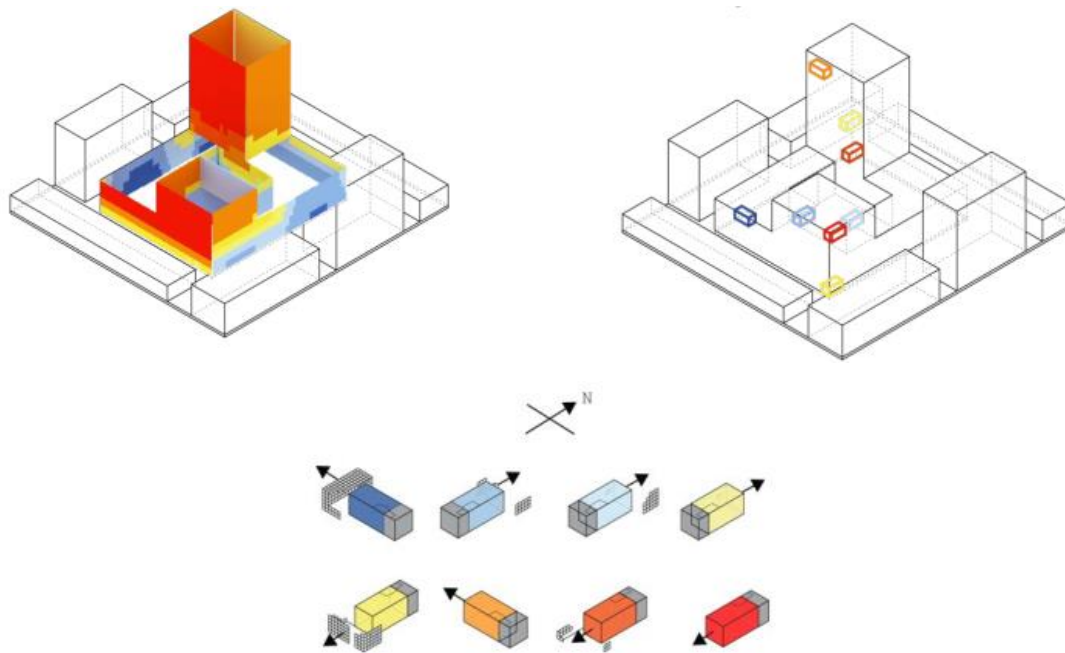
Modeliranje samog naselja vrlo je složen proces te ukoliko bi se modeliranje provodilo detaljno za svaku zgradu, simulacije bi bile vrlo složene, a time bi i njihovo izvođenje trajalo iznimno dugo. Za modeliranje pojedinačnih zgrada u praksi se, najčešće koriste modeli *EnergyPlus* i ISO 13790. *EnergyPlus* i TRNSYS primjer su detaljnog modela *bottom-up* pristupa koji zahtijeva veću razinu detalja, a ISO 13790 je karakterističan pojednostavljeni model koji uz smanjenu točnost, omogućava brže provođenje analize [15].

S ciljem da se model kvarta, naselja ili grada što više pojednostavi, a da se prilikom toga uzrokuje što manja pogreška u rezultatima razvijen je model *Shoebox* koji omogućuje izvođenje simulacija do 28 puta brže, što predstavlja izniman potencijal za veće modele [16]. *Shoebox* predstavlja algoritam koji sortira fasade različitih svojstava na temelju upada sunčevog zračenja te ih grupira u segmente. Svaki *shoebox* sastoji se od dvije toplinske zone, glavne (eng. *core*) i granične zonu (eng. *perimetar*). Na taj način stvara se poveznica između geometrijskog i energijskog modela, a omogućuje jednostavan unos geometrije te brze i reprezentativne rezultate simulacije. S ciljem smanjenja složenosti problema i vremena trajanja simulacije uobičajeno toplinsko zoniranje zgrade svodi se na grupiranje nekoliko prostorija, koje imaju iste ili slične karakteristike, u zajedničku zonu.

Samo modeliranje može se izvesti kao jedan volumen (eng. *box*) koji predstavlja jednu zgradu ili više volumena koji predstavljaju jednu zgradu (Slika 27). Ukoliko se koristi jedan volumen za zgradu, potrebno je definirati visinu kata, prilikom čega se stvara fiktivni presjek na kojem se smještaju senzori za mjerenje sunčevog zračenja, a svaki senzor predstavlja jednu fasadu [16]. Slika 28 prikazuje kako se na temelju zračenja formiralo 8 senzora koji se smještaju na srednjoj udaljenosti sunčevog upada zračenja.



Slika 27. Geometrijsko modeliranje zgrade u sklopu Shoebox modela [16]

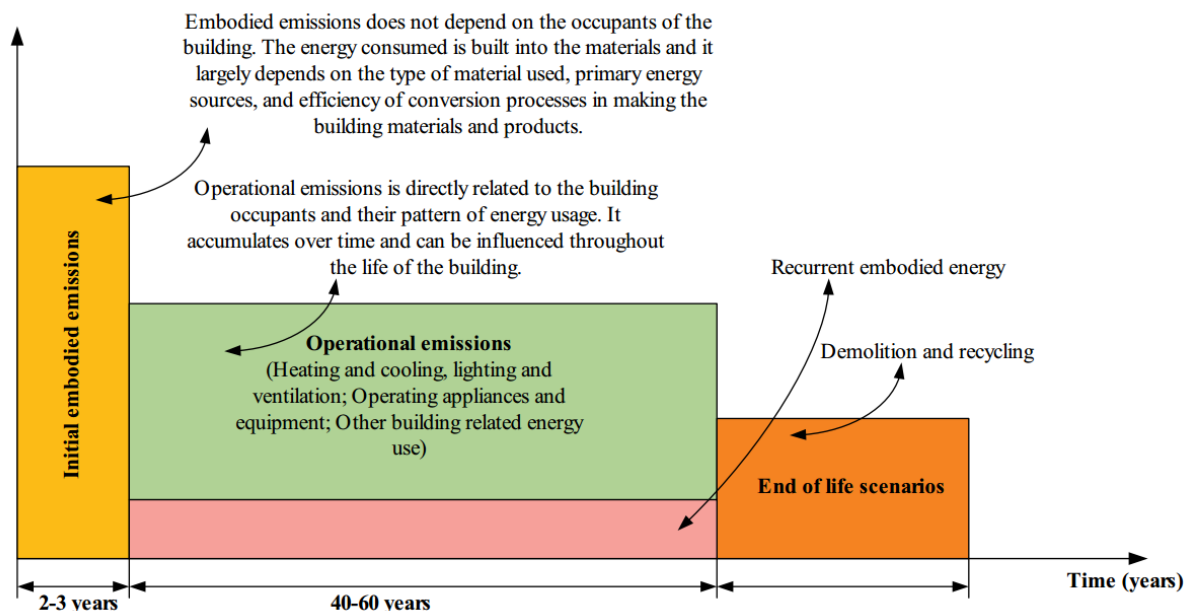


Slika 28. Prikaz formiranja 8 senzora za mjerenje sunčevog zračenja u sklopu Shoebox modela [16]

4.5. Analiza emisije stakleničkih plinova (eng. *Life Cycle*)

U posljednje vrijeme sve više se podiže svijest o klimatskim promjenama, a značajan ekološki i ekonomski utjecaj ima sektor zgradarstva. S razvojem i primjenom novih, naprednijih, izolacijskih materijala, niskoenergetske rasvjete, sustava povrata topline te obnovljivih izvora energije, ostvaruje se veliki potencijal u smanjenju potrošnje energije, a time i emisija stakleničkih plinova. Važnost energetske analiza proizlazi iz činjenice da je 40% ukupne svjetske energetske potrošnje i trećina svjetske emisije stakleničkih plinova povezano sa zgradarstvom [17].

Embodied emission uključuju emisije nastale tijekom proizvodnje, obrade materijala, transporta, konstrukcije, održavanja, renovacije i konačno rušenja. Emisije koje nastaju tijekom korištenja zgrade, eng. *operational emissions*, a povezane su s grijanjem, hlađenjem, ventilacijom, rasvjetom, uobičajeno su više od *embodied emissions*. Slika 29 prikazuje vrste emisija kroz vijek trajanja zgrade.



Slika 29. Prikaz vrsta emisija kroz vijek trajanja zgrade [17]

U sklopu *Life Cycle* analize u UMI-u, postoji mogućnost računanja *Embodied Energy* i *Embodied Carbon*. *Embodied Energy* predstavlja potrošnju goriva, obično iz neobnovljivih izvora, koja se koristi tijekom trajanja zgrade, a izražava se u kWh primarne energije. Parametar

Embodied Carbon predstavlja emisije stakleničkih plinova, a rezultat se izražava kao kgCO_2 ili $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$.

Substitution Step definira trajanje materijala, odnosno vrijeme nakon kojeg će biti potrebno izmijeniti materijal, a parametar *Substitution Rate* pokazuje u kojoj mjeri će biti te izmjene. Primjerice, unos „0.1, 0.1, 1“ predstavlja da će nakon prvih 10 godina biti potrebno izmijeniti 10% materijala, nakon 20 godina, sljedećih 10% materijala, a nakon 30 godina 100%.

Transport Distance odnosi se na prosječnu udaljenost od proizvodnje materijale do mjesta izvedbe, a *Transportation Carbon/Energy* odnosi se na vozilo, a pri čemu vrijednosti ovise o vrsti goriva. Na temelju svojstava materijala provodi se simulacija koja prikazuje godišnje rezultate za predviđeni vijek trajanja zgrade. Simulaciju je moguće provesti za sve objekte ili za željene (Slika 30).

Zone Information		Building Templates	
Materials		Constructions	
Schedules			
Opaque Glazing Gas			
Setting	Value	Units	
Conductivity	1.25	W/mK	
Cost	0		
Density	880	kg/m ³	
Embodied Carbon	0.08	kgCO ₂ /kg	1
Embodied Energy	0.71	MJ/kg	
Substitution Rate Pattern	0.2		2
Substitution Timestep	50		
Transportation Carbon	0.067	kgCO ₂ /kg/km	3
Transportation Distance	500	km	
Transportation Energy	0.94	MJ/kg/km	
Moisture Diffusion Resistance	50		
Roughness	Rough		
Solar Absorptance	0.7		
Specific Heat	840	J/kgK	
Thermal Emittance	0.9		
Visible Absorptance	0.7		

Slika 30. Ulazni parametri za primjenu Life Cycle modela

4.6. Analiza prohodnosti (eng. *Mobility*)

Analiza utjecaja dimenzija i raspored ulica te geometrijskih karakteristika objekata na prohodnost naselja te njihov utjecaj na osvjetljenost zgrade provodi se u jednom od računalnih alata UMI-ja koji se naziva *Mobility*. Pravilnim rasporedom objekata različitih namjena ostvaruje se potencijal smanjenja ovisnosti o automobilima te se omogućuje veća prohodnost, a na taj način smanjuje se utjecaj na okoliš. U sklopu alata *Mobility*, moguće je napraviti analizu prohodnosti prostora koja se definira kao površina koja je dostupna za pješake (Slika 31). *Walk Score* je faktor vrijednosti od 0 do 100 [14], koji poprimaju svi objekti u ovisnosti o udaljenosti od određenih sadržaja (škola, restoran, kafić, trgovina, zabavni sadržaj, park, banka, tržnica, knjižnica).

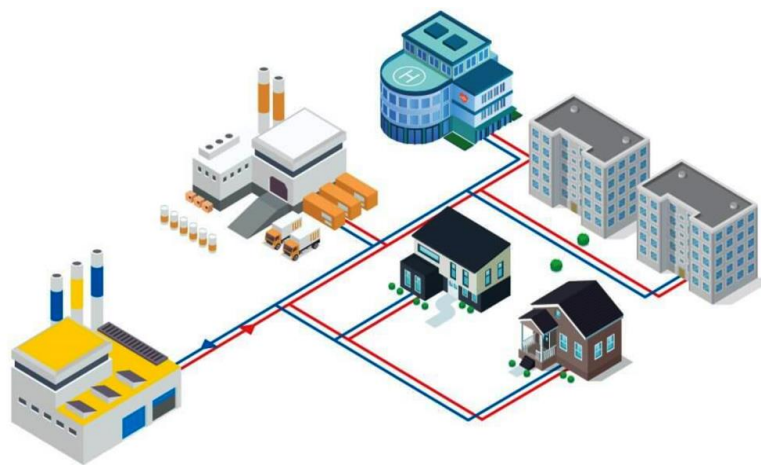


Slika 31. Primjer primjena analize *Mobility* [14]

Također, primjenom računalnog alata *Mobility*, analizira se odnos osvjetljenja zgrade i toplinskih dobitaka. Ukoliko je potreba za grijanjem dominantnija, sunčevi dobitci su poželjni, no za područja u kojima je izražena potreba za hlađenjem, vrlo je važno pronaći odgovarajući odnos željene razine prirodnog osvjetljenja te neželjenih toplinskih dobitaka.

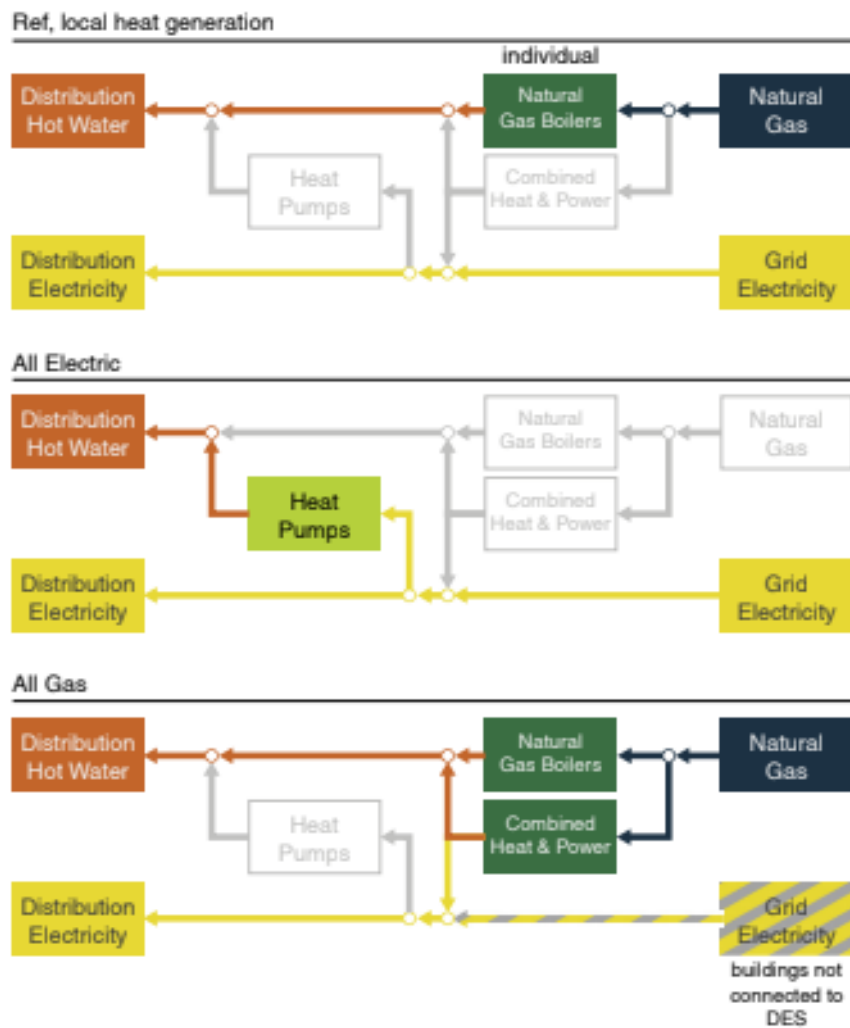
4.7. Analiza sustava daljinskog grijanja i hlađenja (eng. *District Energy*)

Jedan od računalnih modula u sklopu UMI-a je *District Energy* koji omogućuje analizu sustava daljinskog grijanja i hlađenja (Slika 32). Kako bi se smanjio utjecaj na okoliš, sve više se kao izvor toplinske i rashladne energije koriste obnovljivi izvori energije. Potpuni potencijal daljinskog grijanja/ hlađenja moguće je ostvariti primjenom u naseljima/ gradovima koji su određene gustoće naseljenosti.



Slika 32. Shema daljinskog sustava grijanja/hlađenja [18]

Ulazni podaci za provedbu simulacije su satni rezultati nastali provođenjem simulacije za isporučenu energiju, satno godišnje opterećenje za toplu vodu, hladnu vodu te profil za električnu energiju. Model se definira kao kaskada različitih komponenti kojima se ostvaruje potreba za grijanjem, hlađenjem i električnom energijom tijekom cijele godine [19]. Ukoliko je potražnja energije veća od trenutnog kapaciteta, preostali udio će se zamijeniti drugim izvorom. Na Slika 33 prikazane su mogućnosti izvora toplinske i rashladne energije, odnosno električne energije, a primjenom ovog modula moguće je optimizirati krajnje potrebe i zahtjeve ovisno o cijeni energenta te smanjiti emisiju stakleničkih plinova.

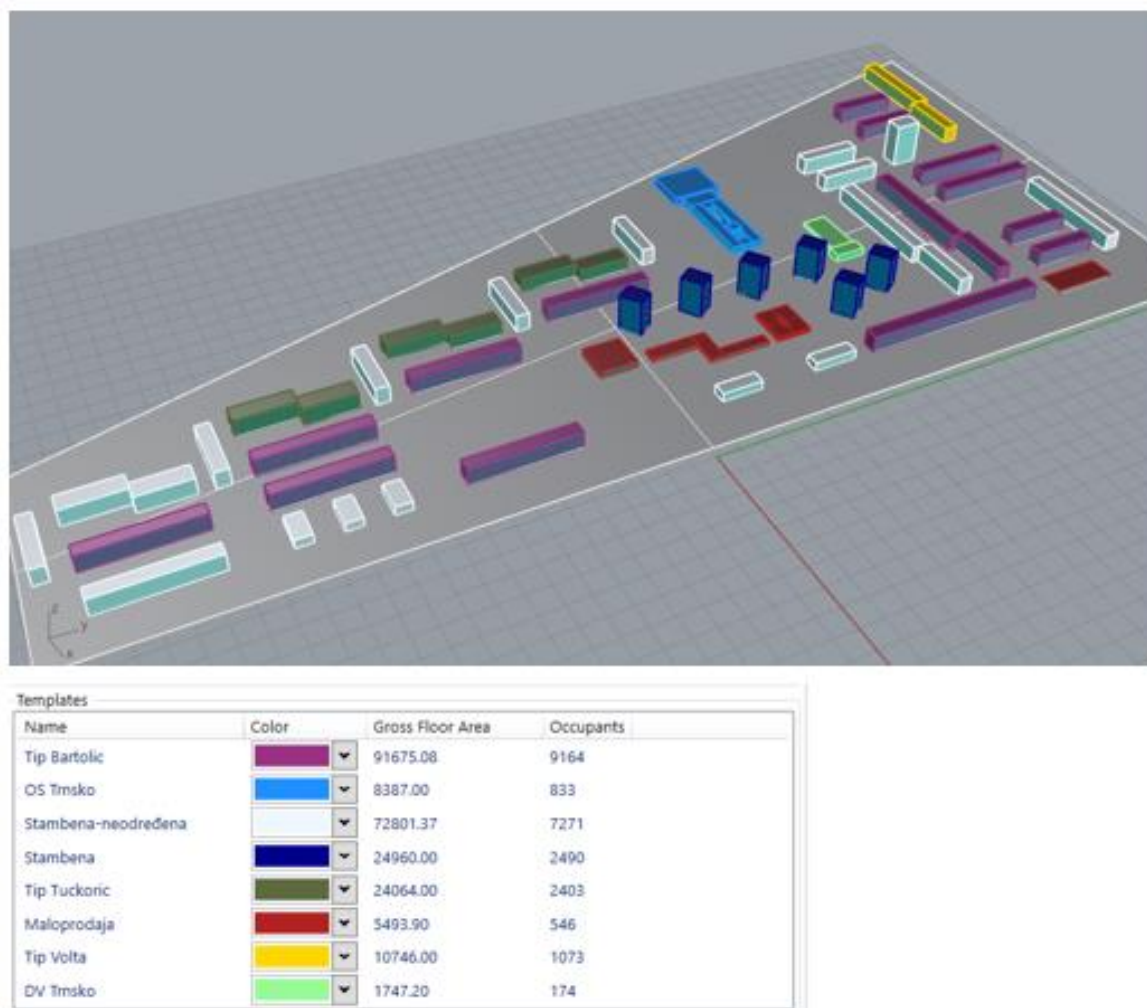


Slika 33. *Mogućnosti ulaznih parametra za analizu daljinskog grijanja i hlađenja [19]*

5. Modeliranje naselja Trnsko u računalnom programu *Rhinoceros 7*

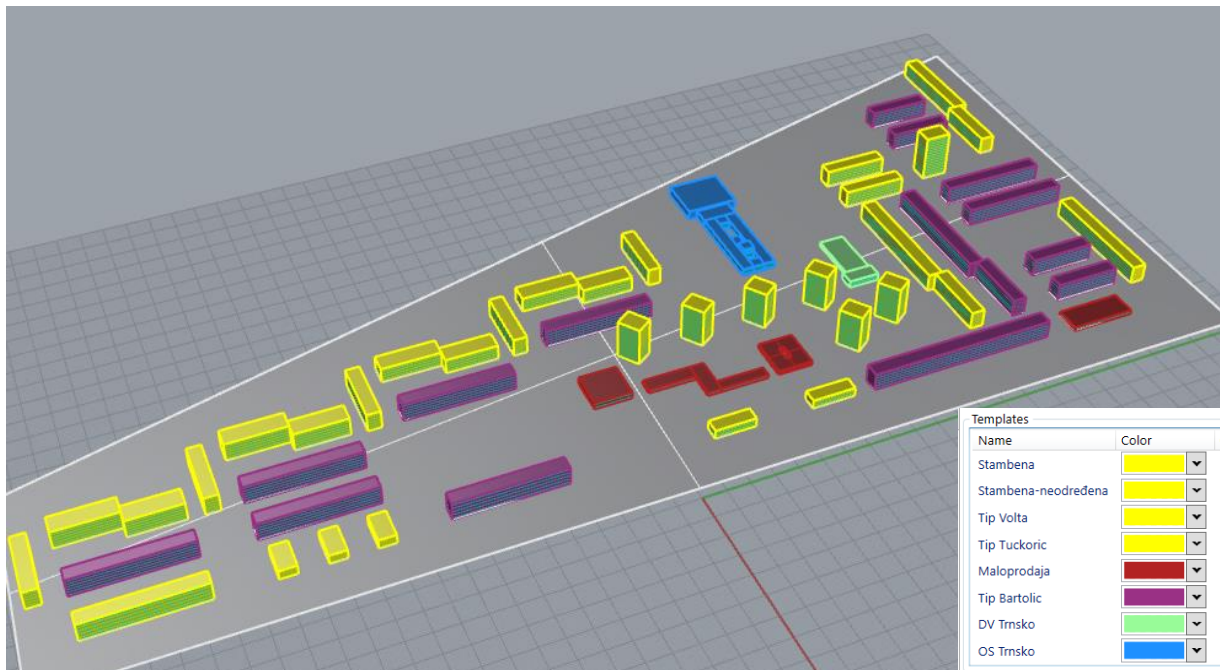
Osnovna funkcija modeliranja zgrada u računalnom programu za BIM modeliranje *Rhinoceros 7* te provedba simulacija korištenjem računalnog alata je analiza većih cjelina. Uz pomoć alata GEOportal [20], koji omogućuje prikaz svih katastarskih čestica s informacijama o površini i namjeni, te primjenom *Google Eartha*, uzete su u obzir dimenzije objekta i udaljenost između njih. Također, za svaku zgradu procijenjen je i postotak ostakljenja površine.

Slika 34 prikazuje izrađeni 3D model naselja Trnsko, pri čemu su različitim bojama označeni objekti različitih svojstava i/ili namjena. Najviše stambenih zgrada u naselju Trnsko je tip Bartolić, a prikazane su ljubičastom bojom te se razlikuju u sastavu zidova od ostalih zgrada. Svi preostali objekti stambene namjene tlocrtno su različiti, no kako je sastav zidova sličan, pretpostavlja se da svi oni sadrže istu vrstu vanjskih zidova. Tip Tučkorić označen je zelenom bojom, a Tip Volta, koji se nalazi uz Aveniju Dubrovnik, označen je žutom bojom. Šest karakterističnih nebodera, za čiju je geometriju provedena detaljnija analiza zasjenjenja, označeni su tamno plavom bojom. Za objekte bijele boje nije pronađena točna informacija o svojstvima zidova, te su oni modelirani kao i tip *Stambene zgrade 1*. Crvenom bojom prikazani su objekti maloprodaje, plavom bojom *Osnovna škola Trnsko*, dok je zeleno označena zgrada *Dječjeg vrtića Trnsko*.



Slika 34. 3D model naselja Trnsko u računalnom programu Rhinoceros 7

S ciljem grupiranja objekata istih karakteristika, uključujući toplinska svojstva ovojnice, rasporede korištenja te pogonskih režima, izrađuju se predlošci koji se dodjeljuju objektima. Kako bi se pojednostavio prikaz te točnije vidjele razlike u predlošcima, zgrade za koje je primijenjen isti predložak označene su istom bojom (Slika 35).



Slika 35. Prikaz sortiranja objekata naselja Trnsko prema različitoj vrsti primijenjenog predloška

6. Analiza točnosti UMI-a za proračun potrošnje energije

6.1. Osnovna škola Trnsko

Korištenjem računalnog alata UMI uvode se određenja pojednostavljena, kojima se povećava brzina simulacija, ali također potencijalno smanjuje točnost. S ciljem analize točnosti simulacije potrošnje energije, za jednu zgradu napravljena je usporedba UMI-a i dinamičkih simulacija u računalnom programu TRNSYS. Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje napravljena je za *Osnovna škola Trnsko* (Slika 36).



Slika 36. Zgrada OŠ Trnsko korištena za analizu točnosti UMI simulacija potrošnje energije

6.2. Ulazni parametri za simulaciju godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje u TRNSYS-u

OŠ Trnsko nalazi se na adresi Trnsko 25 na katastarskoj čestici 1444. Izgrađena je 1963. godine, a pohađa je 590 učenika naselja Trokut i Trnsko [21]. Škola se sastoji od dva dijela: nastavnog dijela i sportske dvorane. Pročelje objekta je orijentacije sjever-jug, pri čemu Slika 3 prikazuje južno pročelje, a ulaz u školu nalazi se sa sjeverne strane. Nastavnički dio orijentiran je pretežno na južnu stranu, dok su uprava, kuhinja, knjižnica, strojarnica orijentirane prema sjevernom dijelu. Prostor sanitarija nalaze se na zapadnoj i istočnoj strani. Hodnici su kružnog oblika te na taj način povezuju sve prostorije, a posebnost škole je ostakljena prostorija iz likovne kulture na 2. katu.

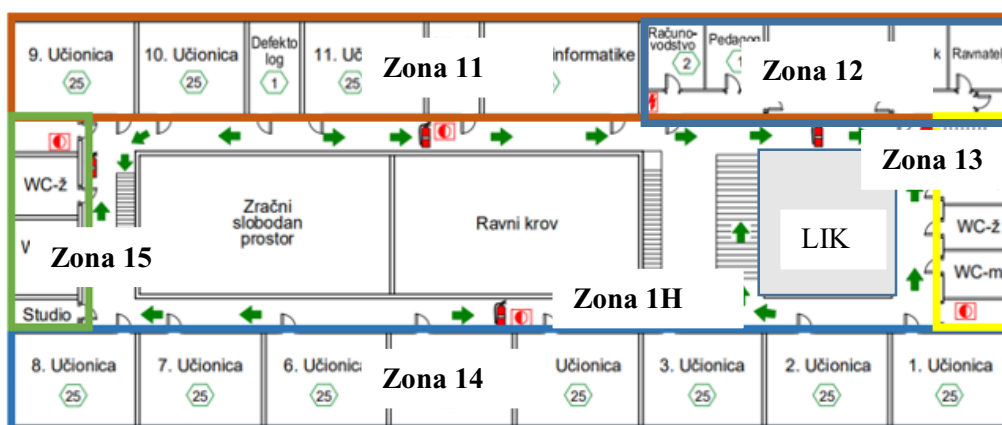
Modeliranje zgrade u TRNSYS-u provedeno je korištenjem korisničkog sučelja TRNBuild, a koji omogućuje modeliranje višezonske zgrade. Zoniranje, odnosno podjela zgrade na toplinske zone, provedeno je prema normi ISO 52016-1:2017 [22] uzimajući u obzir orijentaciju prostorija i namjenu. Pri tome je škola podijeljena na 13 toplinskih zona (Tablica 10). Uz prikazane toplinske zone na tlocrtu prizemlja i prvog kata (Slika 37, Slika 38), na drugom katu nalazi se prostorija za održavanje likovne kulture koja je definirana kao zasebna zona. Za sve zone modelirane su karakteristike toplinske ovojnice i pogonskih režima za obrazovnu ustanovu, a prema opisu u Poglavlju 2.1.

Tablica 10. Popis toplinskih zona za OŠ Trnsko

Oznaka zone	Orijentacija	Vrsta/namjena zone
Prizemlje		
0H	-	hodnik
01	sjever	blagovaonica, kuhinja
02	sjever	knjižnica, učionica
03	istok	sanitarije
04	jug	učionica
05	zapad	sanitarije
1. kat		
1H	-	hodnik
11	sjever	učionica
11	sjever	zbornica, uprava
13	istok	sanitarije
14	jug	učionica
15	zapad	sanitarije
2. kat		
LIK	-	učionica

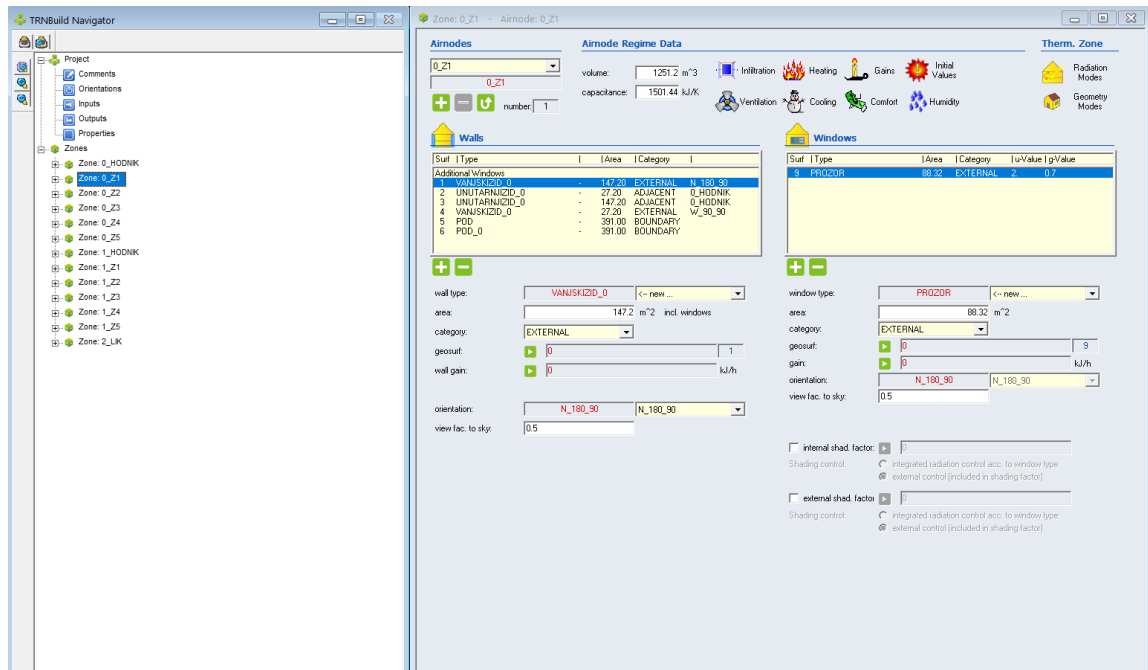


Slika 37. Prikaz toplinskog zoniranja prizemlja OŠ Trnsko



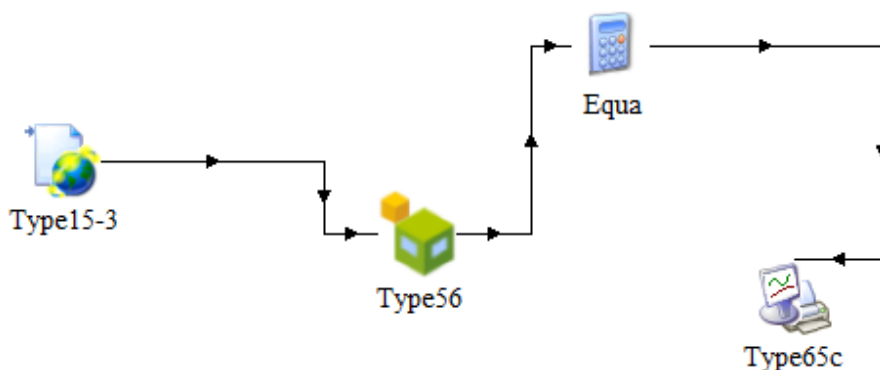
Slika 38. Prikaz toplinskog zoniranja 1. kata OŠ Trnsko

Zidovi su modelirani kao vanjski ili pregradni, za podove i strop primijenjen je adijabatski rubni uvjet kojim se zanemaruje izmjena toplina. Definiranje zidova uključuje definiranje orijentacije (za vanjske zidove), debljine građevinskih slojeva te njihovih svojstava (toplinsku provodnost, gustoću i specifični toplinski kapacitet). Sva svojstva prikazana su u Tablica 1. Slika 39 prikazuje sučelje TRNBuild-a s prikazom ulaznih parametara jedne zone.



Slika 39. Prikaz korisničkog sučelja TRNBuild na primjeru modela OŠ Trnsko

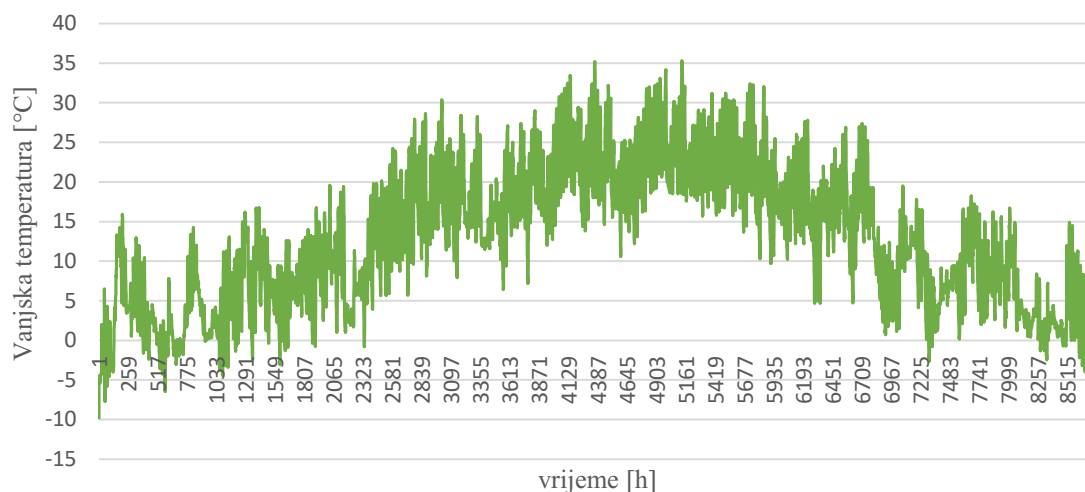
Nakon definiranja ulaznih parametara, provedena je simulacija u glavnom sučelju TRNSYS-a, Simulation Studio (Slika 40). Meteorološki podaci definirani su korištenjem komponente *Type15-3* te su povezani kao ulazni parametri za komponentu *Type56*. Izlazni parametri komponente *Type 56* su potrebna energija za grijanje i hlađenja, a koji se zatim pomoću komponente *Type65c* ispisuju u datoteku s rezultatima.



Slika 40. Prikaz povezivanja komponenti simulacije u korisničkom sučelju Simulation Studio

6.3. Meteorološki podaci

Osim geometrijskog modela, ulazni podaci za provođenje energijskih simulacija su meteorološki podaci. Meteorološki podaci koriste za mjernu postaju Maksimir od 2007. godine do 2021. godine, pri čemu svaki mjesec sadrži podatke za tipičan mjesec iz određene godine [23]. Slika 41 prikazuje satnu promjenu vanjske temperaturu kroz godinu dana. Budući da UMI podržava isključivo datoteku .epw, kako bi se uskladili podaci i smanjila mogućnost pogreške, isti set meteoroloških podataka korišten je i u TRNSYS-u. S ciljem točnijih rezultata uzeti su noviji meteorološki podaci koji uzimaju u obzir osjetno povećanje temperature posljednjih godina.

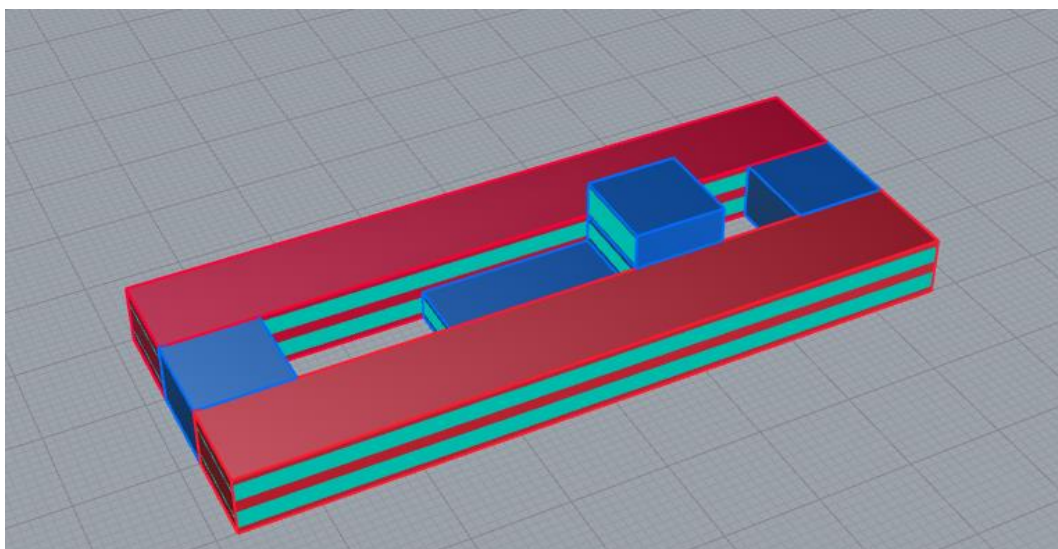


Slika 41. Satne vrijednosti vanjske temperature za grad Zagreb

Za postojeće računalne programe za energijske simulacije, meteorološki podaci uzimaju se za određenu postaju, a one ne uzimaju u obzir utjecajne parametre poput povezanosti sunčevog zračenja, vjetrova i gustoće naseljenosti. Kako bi se stvorila kvalitetnija baza podataka, znanstvenici istražuju i razvijaju modele koji bi uzimali u obzir dobitke od vozila i zgrada, apsorpciju sunčevog zračenja na površine, a neki modeli uključivali bi i predviđanje vremenskih uvjeta [15].

6.4. Ulazni parametri za simulaciju godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje u UMI-u

Model *Osnovne škole Trnsko* napravljen je u računalnom programu *Rhinoceros 7*, te je zatim korištenjem računalnog alata UMI provedena simulacija energijskih tokova (Slika 42). Budući da se u *Rhinoceros 7* modelira 3D geometrija zgrade s osi y definiranom kao sjeverna orijentacija, u programu nije potrebno dodatno definirati orijentaciju pojedinih fasada. Model u *Rhinoceros 7* uzima u obzir i međudjelovanje zgrada, odnosno svaki zasebni objekt ima ulogu potencijalnog zasjenjenja susjednih objekata. Stoga je za potrebe usporedbi analiza u TRNSYS-u i UMI-u model škole napravljen izdvojeno od modela cijelog naselja kako bi se uklonio utjecaj okolnih zgrada.

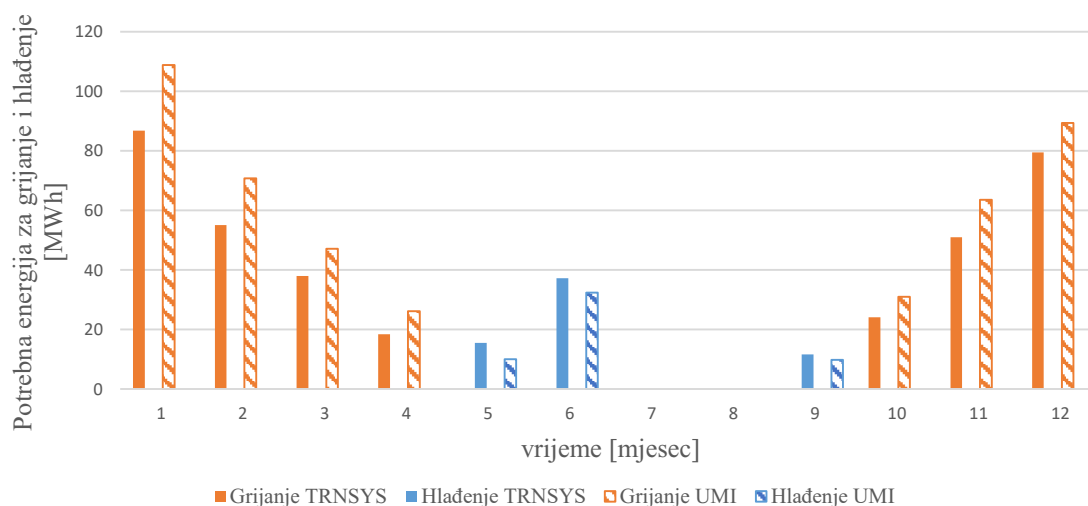


Slika 42. Model OŠ Trnsko u računalnom programu Rhinoceros 7

Temeljna razlika u TRNSYS-u i UMI-u je toplinsko zoniranje. Toplinskim zoniranjem u TRNSYS-u, *OŠ Trnsko* podijeljena je na 13 toplinskih zona s obzirom na namjenu i orijentaciju. Zoniranje u UMI-u je pojednostavljeno, a jedan objekt predstavlja jednu toplinsku zonu s obzirom na namjenu, pri čemu je orijentacija uzeta u obzir izradom 3D modela.

6.5. Usporedba rezultata TRNSYS-a i UMI-a

Iz usporedbe rezultata za potrebnu energiju dobivene korištenjem računalnih alata UMI s rezultatima i TRNSYS proizlazi da UMI procjenjuje veću potrebnu energiju za grijanje, a manju za hlađenje. Godišnja potrebna energija za grijanje izračunata u TRNSYS-u iznosi 87 kWh/m², a u UMI-u 113 kWh/m², odnosno 30% više. Za hlađenje su rezultati 16 kWh/m² u TRNSYS-u i 12 kWh/m², odnosno 25% niže u UMI-u. Slika 43 prikazuje potrebnu energiju tijekom cijele godine u kWh. Tablica 11 prikazuje rezultate svedene na postotnu promjenu potrebne energije za grijanjem/ hlađenjem u odnosu na relevantne podatke dobivene TRNSYS-om. Postotna promjena potrebne energije za grijanje iznosi 31,72%, dok za hlađenje iznosi 29,86%.



Slika 43. Mjesečna potrebna energija za grijanje i hlađenje (MWh) za OŠ Trnsko

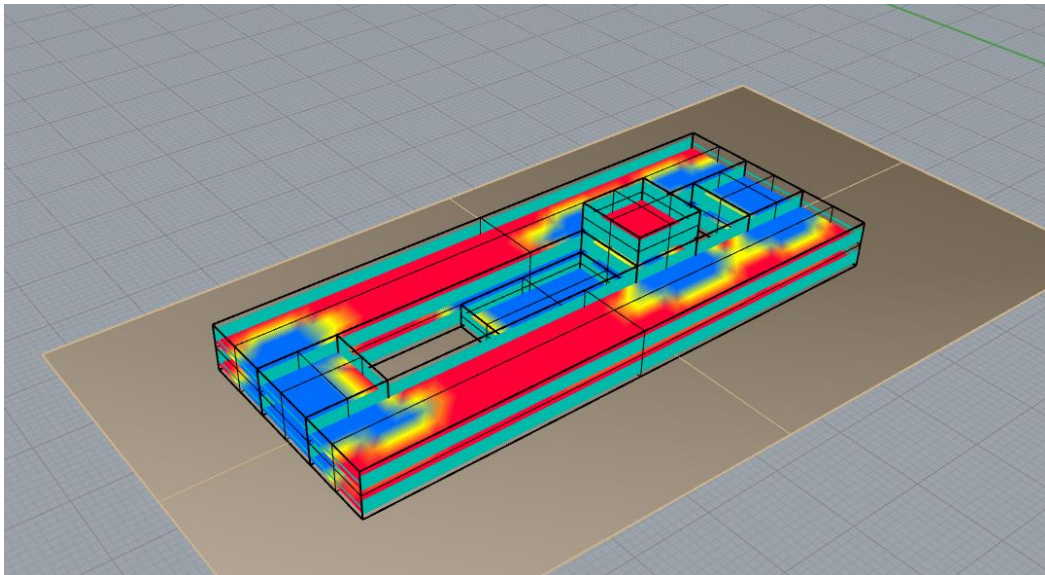
Tablica 11. Potrebna ukupna energija

Potrebna energija za grijanje [kWh]		Potrebna energija za hlađenje [kWh]	
TRNSYS	UMI	TRNSYS	UMI
352.708	459.158	64.238	48.739
-31,72 %		29,86 %	

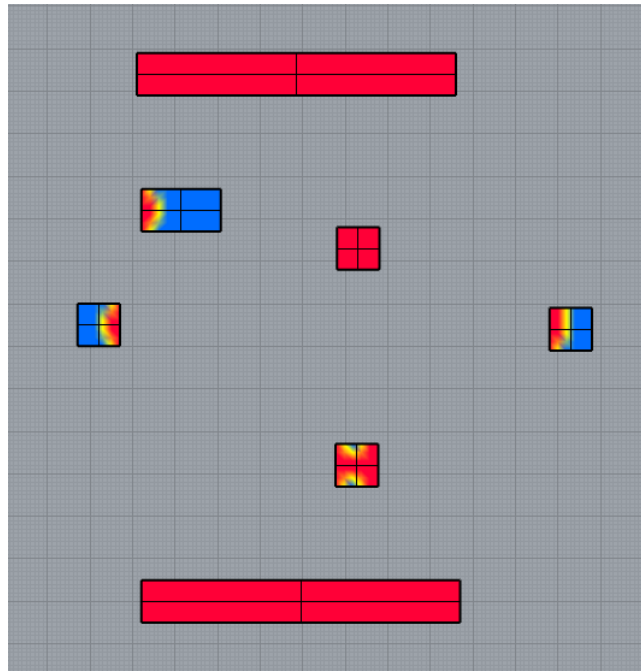
Glavni razlog 30% razlici između modela u TRNSYS-u i UMI-u je pojednostavljeno toplinsko zoniranje u UMI-u. Osim toga, model u TRNSYS-u ne uzima u obzir zasjenjenja koje nastaju zbog složenosti oblika samog objekta, već svaku zonu promatra izoliranu od ostalih utjecaja. U Poglavlju 6.6. napravljena je analiza koja pokazuje u kojoj mjeri zasjenjenje utječe na rezultate ukupne potrebne energije.

6.6. Utjecaj zasjenjenja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

Iako je zgrada *OŠ Trnsko* izdvojena od ostalih objekata koji ju okružju, zbog svoje geometrije postoji utjecaj zasjenjenja između pojedinih dijelova škole. Kako bi se analizirao utjecaj objekata, odnosno zasjenjenja na dnevnu osvjetljenost i potrebnu energiju za grijanje i hlađenje napravljena su dva modela. Kompaktni model podrazumijeva 3D model kakav se u stvarnosti modelira u UMI-u, a Slika 44 prikazuje model *OŠ Trnsko* s pripadajućom kvalitativnom analizom dnevnog osvjetljenja. Model odvojenih volumena (Slika 45) predstavlja model u kojem su volumeni na dovoljnoj udaljenosti da ne utječu jedan na drugi.

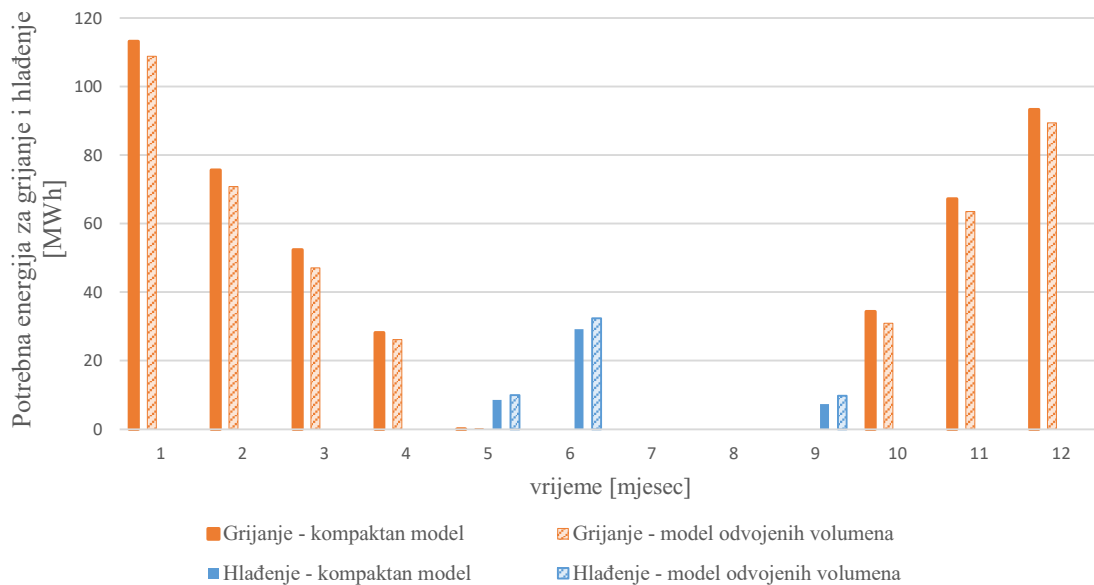


Slika 44. Prikaz analize dnevnog osvjetljenja za *OŠ Trnsko* za kompaktni model

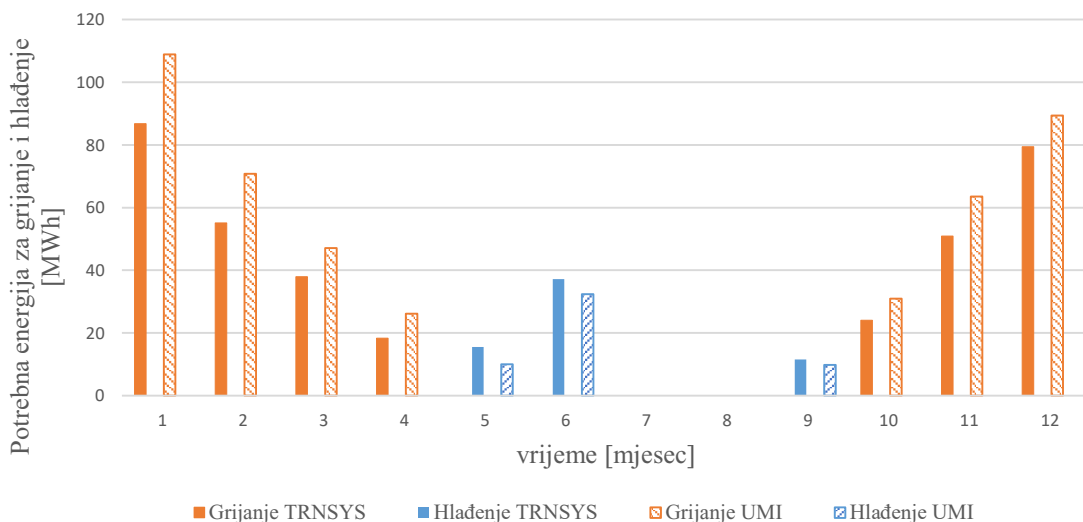


Slika 45. Tlocrtni prikaz analize dnevnog osvjetljenja za OŠ Trnsko za model odvojenih volumena

Za kompaktnu izvedbu iznosi potrebne energije za grijanje viši su tijekom cijele godine, a potreba za hlađenjem je manja (Slika 46). U modelu odvojenih volumena, svaki volumen predstavlja zasebnu zgradu čime se eliminira međusobni utjecaj dijelova zgrade. Tijekom zimskog razdoblja, zasjenjenje uzrokuje porast potrebne energije za grijanje za 6% u odnosu na model odvojenih volumena. Tijekom sezone hlađenja zasjenjenje, koje je modelirano u kompaktnom modelu, onemogućuje upad sunčevog zračenja na određene plohe te na taj način smanjuje potrebu za hlađenjem prostora za 15% u odnosu na model odvojenih volumena. Ako bi se utjecaj zasjenjenja uzeo u obzir, potrebna energija za grijanje bila bi manja dok bi za hlađenje bila veća, odnosno postotna razlika između rezultata dobivenih TRNSYS-om i UMI-jem bi se znatno smanjila. Uzimajući u obzir utjecaj samozasjenjenja, postotna promjena potrebne energije za grijanje smanjila bi se s 31,72% na 24%, dok za hlađenje s 29,86% na 19% (Slika 47).



Slika 46. Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje u UMI-u za OŠ Trnsko (kompaktan model i model odvojenih volumena)



Slika 47. Mjesečna potrebna energija za grijanje i hlađenje u UMI-u i TRNSYS-u za OŠ Trnsko (model odvojenih volumena)

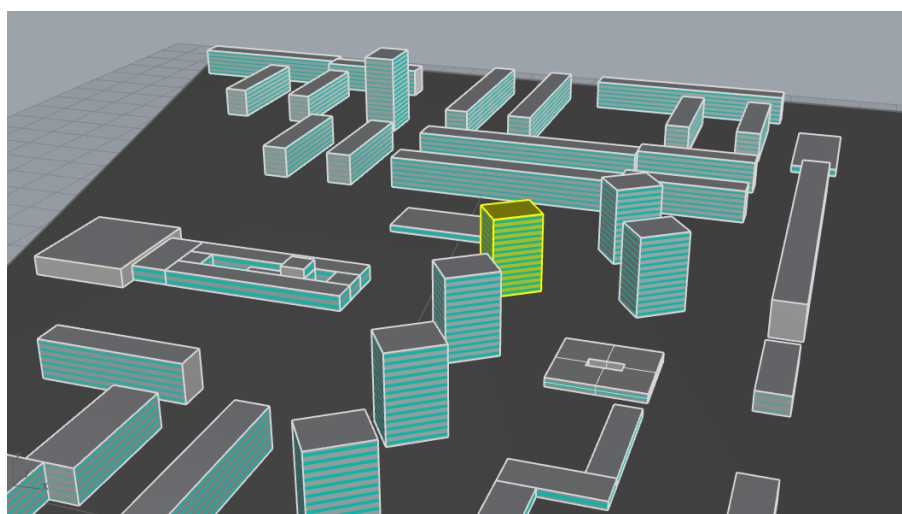
U usporedbi s OŠ Trnsko, stambene zgrade su znatno više, a režim korištenja je intenzivniji. Također, OŠ Trnsko je složenog tlocrta, a posljedica toga je direktan utjecaj jednog volumena zgrade na drugi, odnosno stvaranje sjene što utječe na rezultate simulacije. Stambene zgrade, s druge strane, su pravokutnog tlocrta, a njihov geometrijski model sastoji se od jednog volumena, čime se isključuje utjecaj samozasjenjenja zgrade na potrebnu energiju za grijanje i

hlađenje. Iz prethodno navedenih razloga i činjenicu da je većina zgrada u naselju Trnsko stambene namjene, odlučeno je provođenje dodatne analize međusobnog utjecaja objekata u naselju, odnosno analiza utjecaja zasjenjenja na iznose potrebne energije za grijanje i hlađenje.

Promatrana stambena zgrada, Trnsko 24, jedna je od šest zgrada identičnih geometrijskih i fizikalnih svojstava, a sastoji se od podruma i 12 etaža (Slika 48). Svojstva zidova zgrade odnose se na stil *Stambena zgrada 1*.

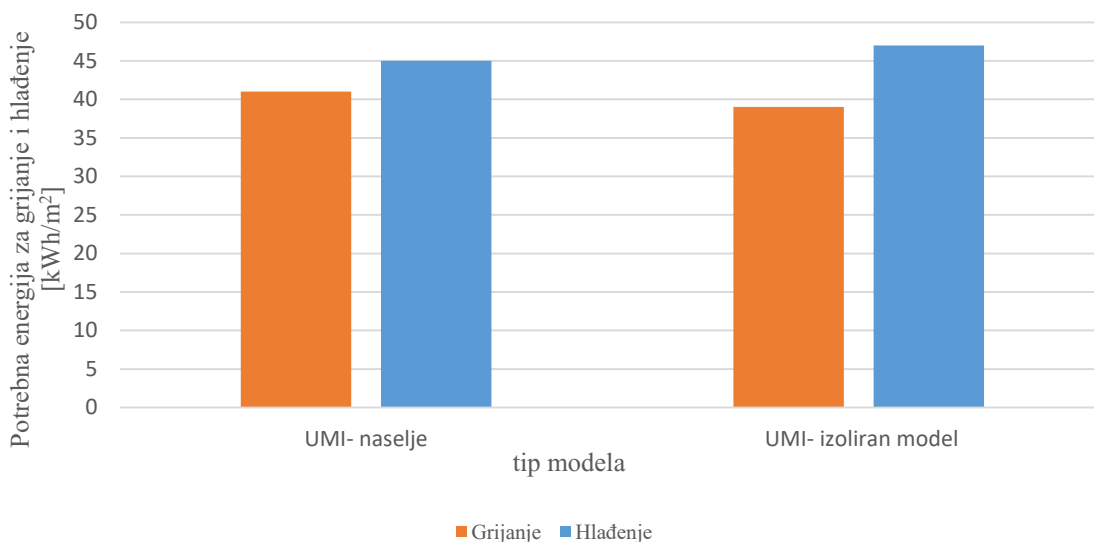


Slika 48. Stambena zgrada Trnsko 24 [9]



Slika 49. Stambena zgrada Trnsko 24 u sklopu modeliranog naselja Trnsko

Slika 49 prikazuje dio modela naselja Trnsko, a žutom bojom označena je promatrana zgrada. Zgrada u sklopu naselja ima potrebnu energiju od 41 kWh/m² za grijanje i 45 kWh/m² za hlađenje. Ako se utjecaj susjednih objekata eliminira, potreba za grijanjem poraste za 5%, dok se potreba za hlađenjem smanji za 4% (Slika 50). Budući da su objekti modelirani u realnim odnosima, udaljenosti između zgrada dovoljne su da ne dolazi do značajnijeg utjecaja zasjenjenja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Prednost korištenja UMI-a u odnosu na programe za pojedinačno modeliranje zgrada je uzimanje u obzir utjecaj zasjenjenja, a za naselja koja sadrže zgrade različitih visina zasjenjenje će imati značajniji utjecaj na rezultate potrebne energije za grijanje i hlađenje.



Slika 50. Utjecaj susjednih zgrada na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje stambene zgrade Trnsko 24

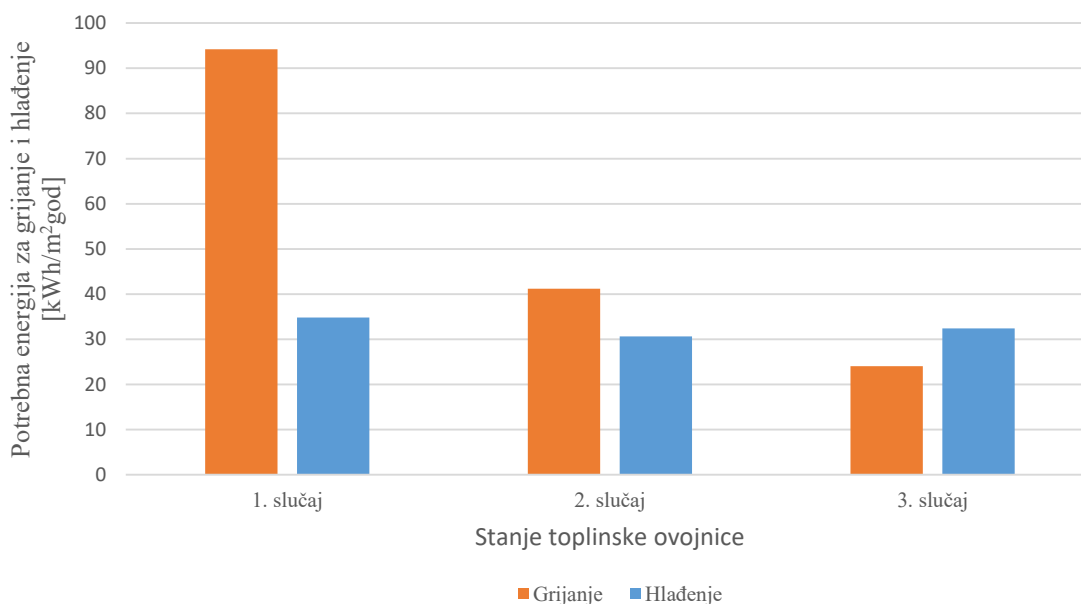
7. Analiza potencijala energetske obnove ovojnice

Analiza potencijala energetske obnove ovojnice za potrebnu energiju za grijanje i hlađenje provedena je za cijelo naselje Trnsko. Također, kako bi se utvrdila točnost rezultata, napravljena je dodatna analiza za *OŠ Trnsko* u računalnom programu TRNSYS. S obzirom na početni slučaj, prije energetske obnove analizirana su dva dodatna slučaja (Tablica 12). Prvi obuhvaća energetska obnovu toplinske ovojnice, odnosno dodatak izolacije na vanjske zidove te krov, dok se drugi slučaj odnosi na kompletnu obnovu koja uključuje i zamjenu prozora.

Tablica 12. Promatrani slučajevi za analizu ukupne potrebne i isporučene energije

Slučaj	Stanje toplinske ovojnice	Prozor
1. slučaj	prije energetske obnove	$U = 5,68 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,855$
2. slučaj	sastav zidova nakon energetske obnove	$U = 5,68 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,855$
3. slučaj	sastav zidova nakon energetske obnove	$U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,589$

Rezultati simulacija cijelog naselja pokazuju da je energetskom obnovom koja uključuje izolaciju zidova, bez promjena prozora, moguće ostvariti 56% ušteda toplinske energije i 12% rashladne energije (Slika 51). Ukoliko se uz rekonstrukciju zidova, primijeni i zamjena jednoslojnih prozora ($U = 5,68 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,899$) s dvoslojnim prozorom ($U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,589$), ostvaruje se smanjenje potrebne energije za grijanje za 74% u odnosu na početno stanje, odnosno smanjenje u iznosu od 41% u odnosu na 2. slučaj. Potrebna rashladna energija smanji se za 7% u odnosu na stanje prije energetske obnove, a poveća se za 6% u odnosu na 2. slučaj (Slika 51, Tablica 13).



Slika 51. Ukupna potrebna energija za naselje Trnsko za različite mjere energetske obnove ovojnice

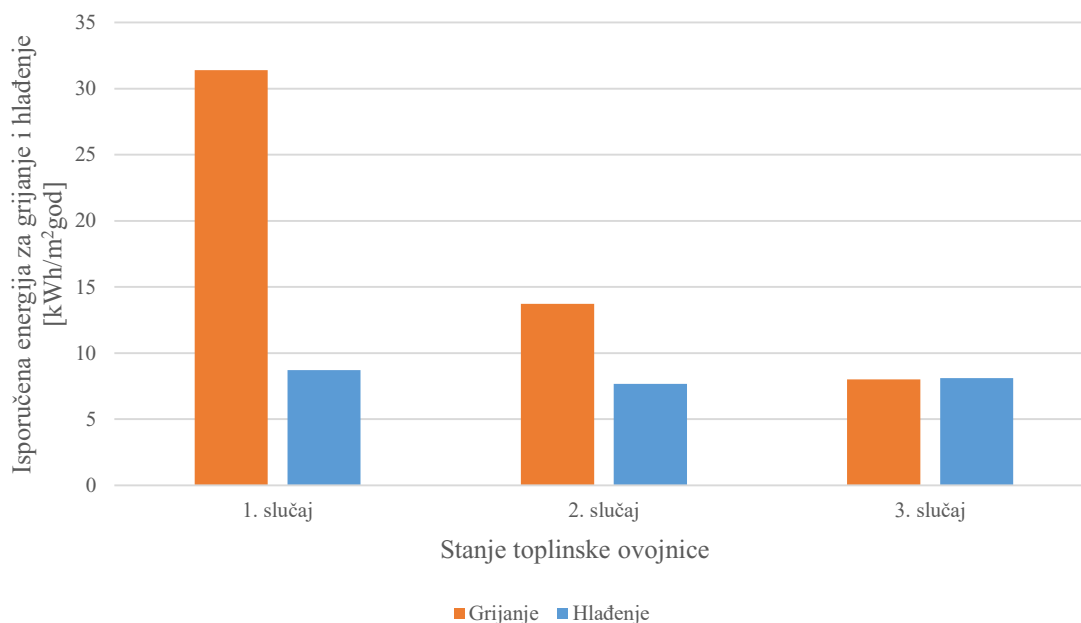
Tablica 13. Ukupna potrebna energija za naselje Trnsko za različite mjere energetske obnove ovojnice

Slučaj	Potrebna energija za grijanje		Potrebna energija za hlađenje	
	[kWh/god]	[kWh/m ² god]	[kWh/god]	[kWh/m ² god]
1. slučaj	22.599.878	94	8.361.881	35
2. slučaj	9.876.514	41	7.353.354	31
	-56 %		-12%	
3. slučaj	5.766.155	24	7.781.780	32
	-74% (-41%)*		-7% (+6%)*	

*promjena u odnosu na 2. slučaj

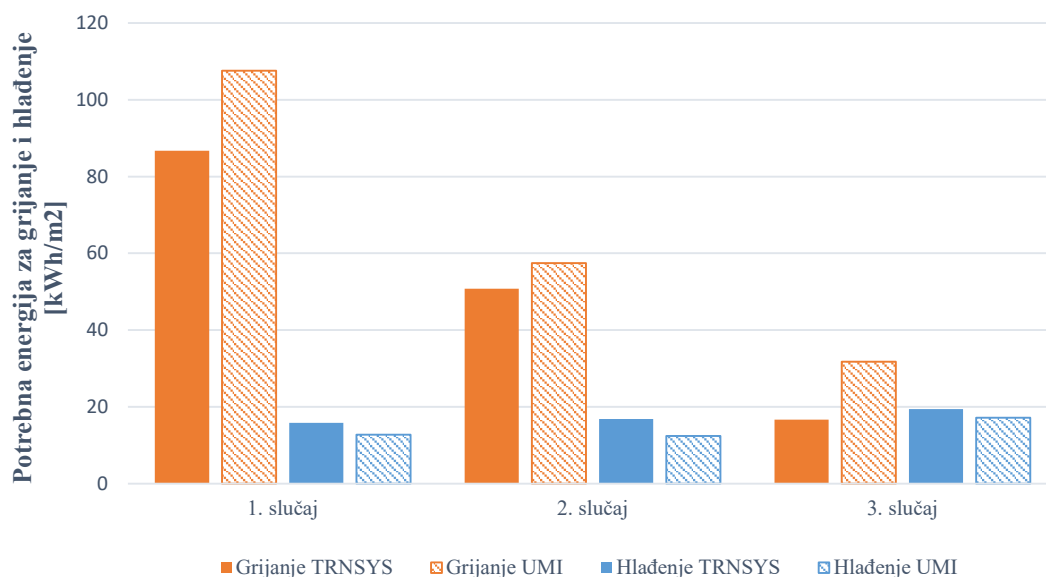
Isporučena energija izračunata je pod pretpostavkom da se dizalica topline zrak-voda koristi u svim analiziranim slučajevima. Stoga je isporučena električna energija izračunata dijeljenjem potrebne energije za grijanje i hlađenje s faktorom grijanja, odnosno faktorom hlađenja. Iako su oni promjenjivi i ovise o vanjskoj temperaturi, temperaturi polaza te djelomičnom opterećenju, za potrebe rada pretpostavlja se da su oni konstantni, odnosno da sezonski faktor grijanja (*SCOP*) iznosi 3, a sezonski faktor hlađenja 4 (*SEER*). Kompletnom

energetskom obnovom ostvaruje se smanjenje isporučene električne energije za grijanja s 31 kWh/m² na 8 kWh/m², a za hlađenje s 9 kWh/m² na 8 kWh/m² (Slika 52).



Slika 52. Ukupna isporučena električna energija za naselje Trnsko za različite mjere energetske obnove ovojnice

Kako bi se utvrdila točnost rezultata, dodatna analiza provedena je za OŠ Trnsko koristeći program TRNSYS, a rezultati su prikazani na Slika 53. Za grijanje trend smanjenja potrebne energije isti je za oba programa, dok za hlađenje postoje razlike, no one su nezamjetne. Iz rezultata na primjeru jedne zgrade može se zaključiti da UMI daje pouzdane rezultate analize potencijala energetske uštede naselja Trnsko.



Slika 53. Usporedba rezultata godišnje potrebne energije (TRNSYS i UMI) za različite mjere energetske obnove za OŠ Trnsko

Zamjenom prozora koeficijent prolaza topline smanji se za 75%, dok se g -vrijednost, koja govori o postotku propusnosti sunčevog zračenja kroz staklo, smanji za 34%. Primjenom mjera energetske obnove promjene u potrebnoj energiji za hlađenje manje su izražene u odnosu na potrebnu energiju za grijanje. Zbog utjecaja pasivnog hlađenja, smanjenjem U -vrijednosti dolazi do povećanja potrebne energije za hlađenje. S druge strane, smanjenje g -vrijednosti sugerira smanjenje potrebne energije za hlađenje. Potrebna energija za hlađenje povećava se zamjenom prozora (promjena s 2. slučaja na 3. slučaj), iz čega proizlazi da je utjecaj promjene U -vrijednosti dominantniji od utjecaja promjene g -vrijednosti.

Učink pasivnog hlađenja smanjuje se dodatkom izolacije i primjenom prozora s manjim koeficijentima prolaza topline te posljedično dovodi do veće potrebne energije za hlađenjem. S ciljem provjere ove pretpostavke, provedena je dodatna simulacija za OŠ Trnsko za dva usporedna slučaja s različitim g -vrijednostima prozora. Za jedan slučaj korišten je dvoslojni prozor $U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, a $g = 0,589$, dok je za drugi slučaj korišten prozor iste U -vrijednosti, ali znatno niže g -vrijednosti, $g = 0,2$. Iz rezultata proizlazi da se potreba za rashladnom energijom smanjila za 28%, a potrebna energija za grijanje povećala za 12%, što potvrđuje ispravnost obrazloženja.

8. Ekonomska analiza energetske obnove za stambene zgrade

Za sve objekte stambene namjene napravljena je dodatna analiza isplativosti energetske obnove te je izračunato vrijeme povrata investicije. Analiza je napravljena za 3 debljine izolacije vanjskog zida koja se ostvaruje dodavanjem kamene vune. Tablica 14. prikazuje vrijednosti koeficijenta prolaza topline koji se pri tome ostvaruju te najveće dopuštene vrijednosti prema *Tehničkom propisu* [4]. Unatoč tome što debljina izolacije od 6 cm ne zadovoljava zahtjev prema *Propisu*, ona je uključena u ekonomski analizu.

Tablica 14. Koeficijent prolaza topline vanjskog zida za različite debljine izolacije

Koeficijent prolaza topline, U [W/m^2K]				
Vrsta zida	Debljina izolacije [cm]			Najveća dopuštena U -vrijednost
	6	14	18	
Beton	0,516	0,24	0,19	0,3
Opeka	0,429	0,22	0,18	0,3

Prema ponudi proizvođača ROFIX [24], konačna cijena koja uključuje cijenu materijala i rad prikazana je u Tablica 15. Zamjena prozora fiksni je investicijski trošak, uključuje izradu profila, prozora, žaluzine, demontažu postojećeg prozora, montažu novog prozora, klupčice te obradu unutarnjih špaleta, a pretpostavlja se da za dvoslojni prozor on iznosi 4000 kn/m^2 [24]. Površina vanjskih zidova svih zgrada iznosi $107\,814 \text{ m}^2$, a površina prozora $29\,336 \text{ m}^2$. Za provođenje ekonomske analize potrebno je odrediti potrošnju električne energije za pojedini slučaj, pri čemu je pretpostavljena konstanta vrijednost sezonskog faktora grijanja 3, a sezonskog faktora hlađenja 4. Tablica 16 prikazuje vrijednosti toplinske/rashladne energije te isporučene električne energije za analizirane slučajeve s različitim debljinama izolacije.

Tablica 15. Cijena kamene vune za različite debljine izolacije

Debljina izolacije [cm]	Cijena izolacije [kn/m ²]
6	283
14	340
18	368

Tablica 16. Ukupna potrebna i isporučena energija za različite debljine izolacije vanjskog zida

Potrebna toplinska/rashladna energija [kWh/god]				
Debljina izolacije [cm]				
	0	6	14	18
Grijanje	21.299.347	6.341.730	5.526.318	5.404.697
Hlađenje	7.774.025	7.171.629	7.143.599	7.142.799
Isporučena električna energija [kWh/god]				
Debljina izolacije [cm]				
	0	6	14	18
Grijanje	7.099.782	2.113.910	1.842.106	1.801.565
Hlađenje	1.943.506	1.792.907	1.785.899	1.785.699

Na temelju podataka sa web stranice HEP-a [25], pretpostavljena je jedinstvena tarifa od 0,99486 kn/kWh. Tablica 17 prikazuje investicijski trošak u pogledu cijene izolacije i prozora, te cijenu potrošnje električne energije. Jednostavni period povrata investicije izračunava se kao omjer uštede u cijeni električne energije i investicijskog troška, a prikazan je za sve tri debljine izolacije.

Tablica 17. Ekonomska analiza obnove stambenih zgrada za različite debljine izolacije

Debljina izolacije [cm]	Cijena izolacije [kn]	Cijena prozora [kn]	Električna energija [kWh/god]	Cijena električne energije [kn/god]	Period povrata investicije [god]
0	0	0	9.043.287	8.578.464	
6	38.187.771	117.344	3.906.817	3.706.007	31,92
14	45.825.326	117.344	3.628.006	3.441.527	31,76
18	49.649.494	117.344	3.587.265	3.402.880	32,27

Ukupna godišnja cijena električne energije za grijanje i hlađenje za postojeći sustav iznosi 8.578.463,62 kn. Dodatkom toplinske izolacije potrošnja energije se smanjuje, a cijena investicije povećava. Veći utjecaj na povrat investicije ima potrošnja električne energije za grijanje jer se značajno mijenja promjenom debljine izolacije, dok hlađenje ima nezamjetan utjecaj. Iz ekonomske analize proizlazi da je debljina izolacije od 14 cm optimalna jer je period povrata investicije najniži od tri analizirane varijante. Međutim, period povrata investicije je i dalje iznimno dug te iznosi gotovo 32 godine, što pokazuje važnost subvencioniranja mjera energetske obnove.

9. Zaključak

S ciljem optimizacije sustava te smanjenja potrošnje energije razvijeni su brojni računalni alati koji omogućuju energijsko modeliranje pojedinačnih zgrada. Međutim, naglim porastom urbanizacije sve veću potrebu i potencijal ostvaruju računalni alati koji omogućuju modeliranje većih cjelina, poput kvartova i gradova. Jedan od takvih računalnih programa je i UMI (eng. *Urban Modeling Interface*), razvijen na Massachusetts Institute of Technology-u (SAD). Program omogućuje provođenje brojnih korisnih analiza naselja i gradova, poput analiza potrebne, isporučene, sadržane energije, analiza primjene sustava daljinskog grijanja i hlađenja te analize prirodnog osvjetljenja i mobilnosti.

Cilj rada bio je provesti energijsku analizu naselja Trnsko u Novom Zagrebu korištenjem računalnog alata UMI, te analizirati potencijal primjene mjera energetske obnove ovojnice na smanjenje potrošnje energije pojedinih zgrada i cijelog naselja. U skladu sa zahtjevima energijskog modela UMI, modeliranje objekata provedeno je u programu za 3D modeliranje, *Rhinoceros 7*. U radu je analizirano koliko uvedeno pojednostavljenje ima utjecaj na točnost rezultata, provedbom i usporedbom energijske analize za *OŠ Trnsko* korištenjem računalnog programa TRNSYS. TRNSYS se smatra relevantnim programom za energijske analize, a model *OŠ Trnsko* napravljen je uzimajući u obzir podjelu na više toplinskih zona, dok su ostali ulazni parametri, uključujući sastav zidova, prozora i svojstva pogonskih režima jednaki za oba programa.

Za *OŠ Trnsko* potrebna energija za grijanje dobivena korištenjem računalnog programa TRNSYS, prije energetske obnove, iznosi 86,75 kWh/m², a za hlađenje 15,8 kWh/m². Primjenom računalnog alata UMI potrebna energija za grijanje iznosi 112,93 kWh/m², a za hlađenje iznosi 12 kWh/m². Uočava se da postotna promjena u odnosu na TRNSYS iznosi 30% za oba režima. Ukoliko se utjecaj samozasjenjenja uzima u obzir, postotna promjena smanji se s 30% na 20%.

Prednost koju modeliranje gradova ima u odnosu na modeliranje pojedinačnog objekta jest uzimanje u obzir utjecaja zasjenjenja od okolnih objekata koje može biti značajno. Utjecaj zasjenjenja ovisi o rasporedu objekata te njihovim geometrijskim karakteristikama, a potencijal korištenja računalnog alata UMI jest 3D modeliranje objekata što omogućuje provedbu analiza dnevnog osvjetljenja na koje zasjenjenje ima značajnu ulogu.

Iako u postojećem stanju naselja Trnsko postoje zgrade za koje je već provedena energetska obnova, u svrhu pojednostavljenja problema, pretpostavljeno je da svi objekti imaju toplinska svojstva ovojnice iz razdoblja gradnje. Energetska obnova analizirana ovim radom pretpostavila je dodatak izolacije vanjskog zida i krova od 14 cm te zamjenu jednoslojnih prozora ($U = 5,68 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,899$) s dvoslojnim ($U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,589$). Energetska obnova ima znatno intenzivniji utjecaj na energiju za grijanje, dok je za hlađenje zabilježen blagi trend smanjenja potrebne, odnosno isporučene energije. Za stanje nakon obnove ostvareno je smanjenje godišnje potrebne energije za grijanje od 74% (s 31 kWh/m^2 na 8 kWh/m^2) te smanjenje godišnje potrebne energije za hlađenje od 7% (s $8,7 \text{ kWh/m}^2$ na $8,1 \text{ kWh/m}^2$). Uzrok manjih promjena u rashladnoj energiji jest smanjenje efekta pasivnog hlađenja nakon obnove. Drugim riječima, zbog smanjenja U -vrijednosti zidova i prozora nakon obnove smanjuje se predaja topline iz zgrade prema okolišu što u režimu hlađenja ima negativan učinak.

Konačno, za objekte stambene namjene provedena je ekonomska analizom za različite debljine izolacije vanjskog zida. Procijenjeno je da cijena godišnje potrošnje električne energije prije energetske obnove iznosi 8.578.464 kn, a uzimajući u obzir troškove debljine izolacije i novih prozora te potrošnju električne energije nakon energetske obnove, određena je optimalna debljina izolacije vanjskog zida od 14 cm. Period povrata investicije za dodatak izolacije i zamjenu prozora u konačnici iznosi gotovo 32 godine.

LITERATURA

- [1] Wikipedia, Dostupno na:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Trnsko> (Pristupljeno: 27.6.2022.)
- [2] Web stranica:
<https://zagreb.mozemo.hr/program/novi-zagreb-zapad> (Pristupljeno: 27.6.2022.)
- [3] Google Earth
- [4] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama; Zagreb, 2020. Dostupno na:
https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_09_102_1922.html
(Pristupljeno: 27.6.2022.)
- [5] HR-DAZG-1122; *Zbirka građevinske dokumentacije*, Trnsko, Škola, SIG. 3101
- [6] Medvešek M., *Revitalizacija i zaštita urbanističke i arhitektonske cjeline naselja Trnsko u Zagrebu*, Diplomski rad, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Filozofski fakultet u Zagrebu, 2017.
- [7] Bobovec, B., Korlaet, L., Virag, N.: *Arhitekt Ivo Bartolić, prolegomena opusu*, Znanstveni časopis za arhitekturu i urbanizam 23 (2015), 1 (49), pp. 160-173
- [8] Žagar T., Uroš M., Atalić J. *Izloženost tipskih zgrada u Zagrebu izgrađenih u drugoj polovini 20. stoljeća*. Zagreb, 2021. Dostupno na: [2021_DOK_11_Zagar.pdf \(grad.hr\)](#)
(Pristupljeno 27.6.2022.)
- [9] Polančec, K. *Utjecaj zoniranja zgrade na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje*, Diplomski rad, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [10] Zidar M., Urbana energetska obnova, Uspješni primjeri energetske obnove višestambenih zgrada, Energetski institut Hrvoje Požar. Dostupno na:
https://eko.zagreb.hr/UserDocsImages/arhiva/Slike/Zagreba%C4%8Dki%20energetski%20tjedan%202016/prezentacije/%C4%8CETVRTAK/01_PRIMJERI%20EO%20VSZ%20-%20ZIDAR.pdf
(Pristupljeno 27.6.2022.)
- [11] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Minimalni zahtjevi na energetske svojstvo zgrade za maloprodaju i veleprodaju za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku, za razdoblje do 1970., 1971. - 2005., iza 2006., i gotovo nula energetske zgrade;

- Zagreb, 2018. Dostupno na:
https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages//dokumenti/Propisi//EIHP-014-0185-0503_trgovine.pdf (Pristupljeno 27.6.2022.)
- [12] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Meteorološki podaci; Zagreb, 2014.
Dostupno na:
https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Meteo_para_metri_po_postajama.pdf (Pristupljeno 27.6.2022.)
- [13] umidocs Documentation. MIT Sustainable Design Lab
URL: (Pristupljeno 27.6.2022.)
- [14] Reinhart C. et al. *UMI- An urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability*, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2008
- [15] Li Z et. al. *A review of operational energy consumption calculation method for urban building*, 2020
- [16] Dogan T., Reinhart C. *Automated conversion of architectural massing models into thermal 'Shoebox' models*. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2008
- [17] Ibn-Mohammed T. et al. *Operational vs. embodied emissions in buildings- A review of current trends*. Energy and Buildings. Elsevier, str. 232.-245. , 2013
- [18] [Support for renewable district heating in Slovenia | Solarthermalworld](https://solarthermalworld.org/news/support-renewable-district-heating-slovenia/) Dostupno na:
<https://solarthermalworld.org/news/support-renewable-district-heating-slovenia/>
(Pristupljeno 27.6.2022.)
- [19] Letellier-Duchesne S. et al. *Balancing demand and supply: Linking neighborhood-level building load calculations with detailed district energy network analysis models*, Energy and Buildings, Elsevier, str. 913.-925., 2018
- [20] [Geoportal DGU](https://geoportal.dgu.hr/), Dostupno na:
<https://geoportal.dgu.hr/> (Pristupljeno 27.6.2022.)
- [21] Internetska stranica Osnovne škole Trnsko, Dostupno na:
<http://os-trnsko-zg.skole.hr/> (Pristupljeno: 27.6.2022.)
- [22] HRN EN ISO 52016-1. Energijaska svojstva zgrada- Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarnje temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja, 2017.
- [23] Meteorološki podaci za Zagreb, Dostupno na:
https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/HRV_Croatia/index.html

(Pristupljeno 27.6.2022.)

[24] Magdić, Lucija. Cijene ovojnica. Privatna poruka. (15.6.2022.)

[25] Internetska stranica HEP Elektra d.o.o, Dostupno na:

<https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547>

(Pristupljeno 27.6.2022.)