

Optimizacija toplinske mase za korištenje školske zgrade kao pasivnog toplinskog spremnika

Štajduhar, Mihaela

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:423793>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mihaela Štajduhar

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Student:

Mihaela Štajduhar

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentorici doc.dr.sc. Tei Žakuli na savjetima, uloženom trudu i vremenu. Zahvaljujem se na pruženoj prilici za stjecanje novih znanja u području termotehnike te drugom, zanimljivijem pogledu na struku.

Hvala kolegi Nikoli Bađunu na savjetima i rješavanju svakog problema na putu.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci i molitvama.

Zahvaljujem se dečku Nikoli koji je uvijek tu i vjeruje u mene, samo on zna koliko je svega iza nas.

Mihaela Štajduhar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mihaela Štajduhar** Mat. br.: 0035205844

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija toplinske mase za korištenje školske zgrade kao pasivnog toplinskog spremnika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of the thermal mass for the use of a school building as a passive thermal storage**

Opis zadatka:

Masivnost građevine jedan je od osnovnih preduvjeta za korištenje zgrade kao pasivnog toplinskog spremnika, a što ima važnu ulogu u naprednom upravljanju sustava grijanja i hlađenja u zgradi te sudjelovanju zgrade na tržištu energije. Međutim, beton također ima visoku vrijednost sadržane energije (eng. *embodied energy*), odnosno energije potrebne za njegovu proizvodnju. U radu je potrebno optimizirati količinu betona zgrade s ciljem korištenja zgrade kao pasivnog toplinskog spremnika te istovremeno minimizacije sadržane energije. Analizu je potrebno provesti za zgradu Tehničke škole Ruđer Bošković u Zagrebu koja je trenutno u fazi projektiranja prema standardu za zgrade gotovo nulte potrošnje energije. Dinamičku simulaciju energijskih tokova zgrade u ovisnosti o utjecajnim parametrima provesti u detaljnom računalnom programu za energijsko modeliranje, TRNSYS®. Za geometriju zgrade koristiti podatke prema idejnom arhitektonskom rješenju.

Rad treba sadržavati:

- pregled literature o sadržanoj energiji betona,
- opis geometrije zgrade i načina korištenja,
- opis energijskog modela zgrade,
- opis i rezultati optimizacije toplinske mase.

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

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

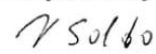
Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

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

Zadatak zadala:


Doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK	IV
SUMMARY	V
1. UVOD.....	1
2. OPIS MODELA ZGRADE	2
2.1. Zoniranje zgrade	3
2.2. Svojstva zidova	9
2.3. Svojstva prozora.....	14
2.4. Ostali ulazni podaci energijskog modela zgrade	16
3. SADRŽANA ENERGIJA ZGRADE.....	17
3.1. Definicija sadržane energije.....	17
3.2. Metode smanjenja sadržane energije.....	18
3.3. Izračun sadržane energije analizirane zgrade.....	19
3.3.1. Sadržana energija armiranog betona.....	19
3.3.2. Sadržana energija izolacije	23
4. ENERGIJSKI MODEL ZGRADE.....	25
4.1. Definiranje svojstava zona zgrade u TRNBuildu.....	25
4.2. Simulacija u sučelju Simulation Studio	27
5. POTREBNA ENERGIJA ZA GRIJANJE I HLAĐENJE	30
6. MODELIRANJE PODNOG HLAĐENJA	32
6.1. Dimenzioniranje sustava podnog hlađenja.....	33
6.2. Određivanje temperature polaza vode kod podnog hlađenja.....	34
7. NOĆNI REŽIM RADA SUSTAVA HLAĐENJA.....	37
8. OPTIMIZACIJA KOLIČINE BETONA	39
9. ZAKLJUČAK	41
10. LITERATURA.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1. Sjeverno pročelje zgrade [1]	3
Slika 2: Zoniranje prizemlja.....	4
Slika 3: Zoniranje prvog kata.....	5
Slika 4: Zoniranje drugog kata.....	6
Slika 5: Zoniranje trećeg kata	7
Slika 6: Zoniranje četvrtog kata	7
Slika 7. Vrste energija u sadržanoj energiji [3].....	18
Slika 8. Sadržana energija armiranog betona za vanjske zidove, pregradne zidove i pod.....	21
Slika 9. Usporedba sadržane energije vanjskih zidova različitih debljina	22
Slika 10. Usporedba sadržane energije pregradnih zidova različitih debljina	23
Slika 11. Usporedba sadržane energije izolacije različitih debljina.....	24
Slika 12. Definiranje svojstava zidova i prozora Zone 1 u TRNBuild-u	26
Slika 13. Definiranje zona u TRNBuildu.....	27
Slika 14. Model glavne simulacije.....	29
Slika 15. Potrebna energija za grijanje i hlađenje po mjesecima	31
Slika 16. Ograničenja prilikom definiranja modela podnog hlađenja [7]	33
Slika 17. Potrebna energija za hlađenje za karakterističan dan	34
Slika 18. Temperature polaza vode za karakterističan dan	36
Slika 19. Temperature zraka u prostoru za karakterističan dan	37
Slika 20. Profil temperature zraka u prostoru pri konstantnoj temperaturi polaza vode od 7°C	38
Slika 21. Profil temperature zraka u prostoru pri konstantnoj temperaturi polaza vode od 13°C	39
Slika 22. Profil temperature zraka u prostoru promjenom debljine betona vanjskih i pregradnih zidova ..	40

POPIS TABLICA

Tablica 1. Površine i volumeni definiranih zona	8
Tablica 2. Definiranje svojstava Zone 1	9
Tablica 3. Fizikalna svojstva zidova	10
Tablica 4. Sastav vanjskog zida	10
Tablica 5. Sastav pregradnog zida	11
Tablica 6. Sastav poda na tlu	11
Tablica 7. Sastav stropa između grijanih zona.....	12
Tablica 8. Sastav ravnog krova	13
Tablica 9. Fizikalna svojstva slojeva zidova.....	13
Tablica 10. Površine prozora po zonama i orijentaciji zgrade	15
Tablica 11. Parametri zona	16
Tablica 12. Sadržana energija materijala i procesa u proizvodnji armiranog betona.....	20
Tablica 13. Sadržana energija armiranog betona analizirane zgrade	21
Tablica 14. Sadržana energija izolacijskog sloja analizirane zgrade	23
Tablica 15. Ulazni parametri za simulaciju	28
Tablica 16. Potrebna energija za grijanje i hlađenje	30
Tablica 17. Parametri podnog hlađenja.....	32

SAŽETAK

U ovom radu provedena je optimizacija toplinske mase školske zgrade kao pasivnog toplinskog spremnika. Zgrada koja je analizirana u radu jest dogradnja na postojeću zgradu Tehničke škole Ruđer Bošković u Zagrebu. Zgrada je opisana prema podacima Ministarstva graditeljstva i prostornoga uređenja za referentnu obrazovnu zgradu gotovo nulte potrošnje energije (nZEB) za kontinentalnu Hrvatsku s meteorološkim podacima za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb. Osnovni materijal za izgradnju zgrade je beton, a njezina korisna površina iznosi 1568 m². Kako sadržana energija zauzima velik udio u ukupnoj potrošnji energije, analizirana je, na temelju analize literature, sadržana energija betona vanjskih i pregradnih zidova te poda. Također, analizirana je i sadržana energija izolacijskog sloja prisutnog kod vanjskih zidova. Sadržana energija je energija potrebna za proizvodnju betona i izolacije. Ukupna sadržana energija betona iznosi 296 368 769 kWh, dok izolacijskog sloja iznosi 13 108 757 kWh. Provedbom dinamičkih simulacija u računalnom programu TRNSYS dobivena je potrebna energija za grijanje koja iznosi 55,5 kWh/m² i energija za hlađenje koja iznosi 23 kWh/m². Kada se potrebna energija za grijanje i hlađenje pomnoži s površinom zgrade i uspoređi sa sadržanom energijom zgrade, vidi se kako je sadržana energija za nekoliko redova veličine veća. U radu je predviđeno hlađenje zgrade pomoću vodenog sustava u podu. Dinamičkim simulacijama u TRNSYS-u izračunate su temperature polaza vode za karakterističan dan i svaki sat u tom danu. Kako bi se postigle uštede električne energije i/ili novca na radu sustava, hlađenje zgrade je postavljeno samo tijekom noći. Također, za hlađenje preko noći provedena je optimizacija debljine betona kod vanjskih i pregradnih zidova. Rezultati simulacija su prikazani za različite debljine betona kao i njihova usporedba sa iznosima sadržane energije. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti kako promjena debljine betona kod vanjskih i pregradnih zidova nema veliki utjecaj jer je akumulacija rashladne energije primarno vezana za pod. Zbog toga, najveći utjecaj ima promjena debljine poda što je dokazano rezultatima prikazanim u radu.

SUMMARY

In this work, the optimization of the thermal mass of a school building as a passive thermal storage has been carried out. The analyzed building is an upgrade to the existing building of the Ruđer Bošković Technical School in Zagreb. The building is described according to the data of the Ministry of Construction and Physical Planning for the reference educational nearly zero-energy building for continental Croatia with meteorological data for a typical meteorological year for the city of Zagreb. The basic material for the construction of the building is concrete and its gross surface is 1568 m². As the embodied energy takes a large share in the total energy consumption, the embodied energy of concrete of the external and boundary walls and floor has been analyzed. Also, the embodied energy of the insulation layer of the external walls was analyzed. The embodied energy is the energy required for the production of concrete and insulation. The total embodied energy of concrete is 296,368,769 kWh, while of the insulation layer is 13,108,757 kWh. Dynamic simulations of the building energy flows have been conducted using TRNSYS energy software. Heating demand of the building is 55,5 kWh/m² while cooling demand is 23 kWh/m². The building is cooled using a water system in the floor. Using TRNSYS dynamic simulations, inlet water temperatures have been calculated for a characteristic day. In order to save operational costs of the system, the cooling of the building was transferred to night regime. Also, for overnight cooling, concrete thickness optimization has been carried out for the external and boundary walls. The results of dynamic simulations are presented for different concrete thicknesses as well as their comparison with the amounts of the embodied energy. Based on the results, it can be concluded that the change in concrete thickness of external and boundary walls does not have large impact because the cooling energy accumulation is primarily related to the floor.

1. UVOD

S obzirom na to da ljudi većinu svoga vremena tijekom dana provode u zgradama, čak 90%, nužno je zgrade učiniti energetske učinkovitima. Zgrade su velik potrošač energije, te prema analizama, zgrade u EU troše skoro polovicu proizvedene energije. Najviše energije troše na grijanje te imaju velik utjecaj na okoliš. Racionalno korištenje energije u zgradarstvu znači gradnju objekata koji će maksimalno štedjeti energiju za vrijeme njihove eksploatacije, odnosno smanjiti na minimum potrošnju iste. Da bi se zgrada mogla promatrati kao pasivni spremnik energije, potrebno je veliku pažnju posvetiti njezinoj ovojnici, odnosno analizirati njezinu masivnost.

Tema rada je optimizacija toplinske mase za korištenje školske zgrade kao pasivnog toplinskog spremnika. Zgrada koja je predmet analize u ovom radu je dio kompleksa Tehničke škole Ruđer Bošković u Zagrebu. Prema arhitektonskim nacrtima provedena je podjela zgrade na toplinske zone te su definirane dimenzije zidova u svakoj zoni. Zgrada je opisana prema podacima Ministarstva graditeljstva i prostornoga uređenja za referentnu nZEB (*eng. nearly zero-energy building*) obrazovnu zgradu za kontinentalnu Hrvatsku s meteorološkim podacima za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb. Kako je osnovni materijal za izgradnju zgrade beton, izračunata je sadržana energija (*eng. embodied energy*) vanjskih i pregradnih zidova te poda. Također, zbog značajne debljine izolacije kod vanjskih zidova, proveden je proračun sadržane energije izolacije. Sadržana energija betona i izolacije je energija potrebna za njihovu proizvodnju. Na temelju proračuna su dobiveni veliki iznosi sadržane energije i time je uočen velik udio sadržane energije u ukupnoj potrošnji energije. Cilj rada je optimizirati debljinu betona i izolacije tako što će se smanjiti njihova debljina, a time i sadržana energija. S druge strane njihova debljina mora biti dovoljna za akumulaciju toplinske energije potrebne za grijanje i hlađenje. Provođenjem detaljne energijske simulacije u računalnom programu TRNSYS, dobiveni su podaci o godišnjoj potrebnoj energiji za grijanje i hlađenje zgrade. Prema najvećem toplinskom opterećenju kod hlađenja, modelirano je podno hlađenje u zgradi. S obzirom da se opterećenje u svakom satu preko dana mijenja, potrebno je regulirati predanu rashladnu energiju, a što se u sustavu podnog hlađenja najčešće radi promjenom temperature polaza vode (pri konstantnom protoku vode). Za karakterističan dan, simulacijom u TRNSYS-u, dobivene su temperature polaza vode za svaki sat u danu. Nakon toga, zbog manje cijene električne energije, režim hlađenja je postavljen preko noći. Cilj optimizacije KGH sustava je uz što manje resurse/troškove postići tražene uvjete u prostoru

te ostvariti toplinsku ugodnost. Pokazano je kako se zgrada može dovoljno ohladiti preko noći s time da je toplinska ugodnost zadovoljena te dolazi do velikih smanjenja troškova energije i/ili novca za rad sustava. Za noćni režim hlađenja je napravljena usporedba tri slučaja hlađenja s različitim debljinama betona. Na temelju provedene analize dobiveni su profili temperature zraka u prostoru za različite debljine betona vanjskih i pregradnih zidova. Time je pokazano kako vanjski i pregradni zidovi ne sudjeluju pri akumulaciji energije kao pod čija je masivnost ključna kod zgrade kao pasivnog spremnika.

2. OPIS MODELA ZGRADE

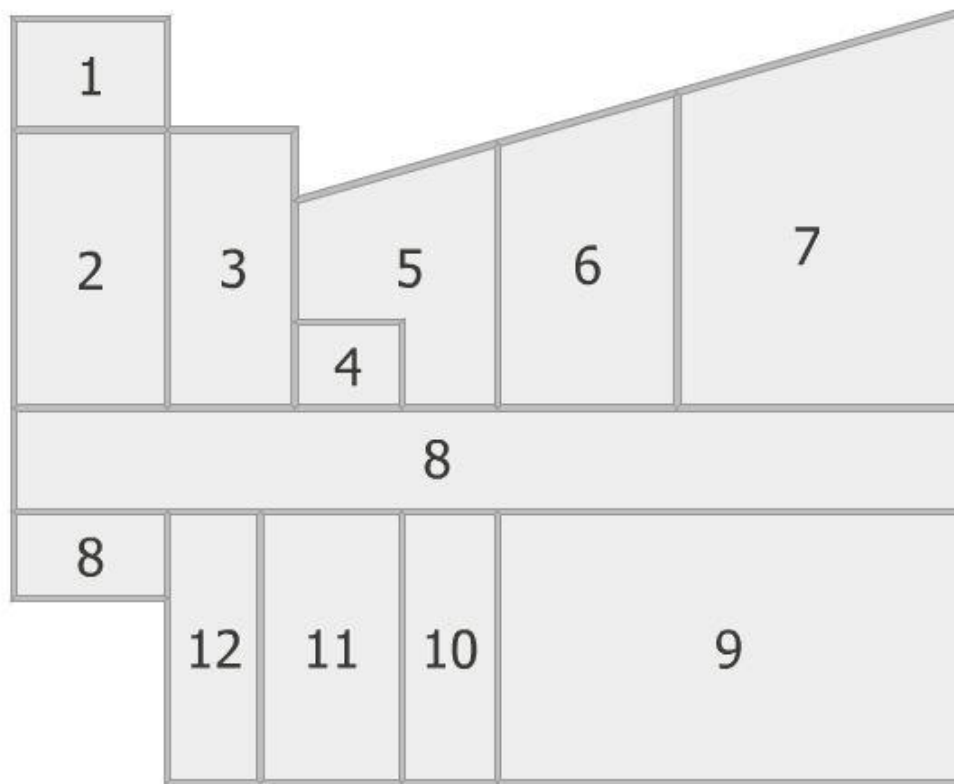
Zgrada koja je predmet analize jest dogradnja na postojeću školu, a njezina namjena je regionalni centar kompetentnosti. Regionalni centri kompetentnosti (RCK) su mjesta izvrsnosti u strukovnom obrazovanju i osposobljavanju u kojima će se provoditi programi redovitog strukovnog obrazovanja, stručnog usavršavanja i cjeloživotnog obrazovanja kao i drugi oblici formalnog i neformalnog obrazovanja. Zgrada je orijentirana u smjeru sjever-jug-istok-zapad te ima ostakljene površine na sjeveru, jugu i zapadu. Visina zgrade iznosi 18 m dok korisna površina zgrade iznosi 1567,73 m². Zgrada ima direktan pristup postojećem dijelu škole i to preko središnjih hodnika. U prizemlju se nalazi recepcija, garderoba, spremište, sanitarije, strojarnica, uredi uprave i nastavnika te dvije specijalizirane učionice. Na prvom katu također se nalaze sanitarije i spremište te četiri specijalizirane učionice. Na drugom katu nalaze se sanitarije, deset soba sa lođama namijenjenima za gostujuće predavače te restoran sa kuhinjom. Treći kat ima funkciju prohodnog krova, dok četvrti kat služi kao izlaz iz dizala na postojeći krov. [1]



Slika 1. Sjeverno pročelje zgrade [1]

2.1. Zoniranje zgrade

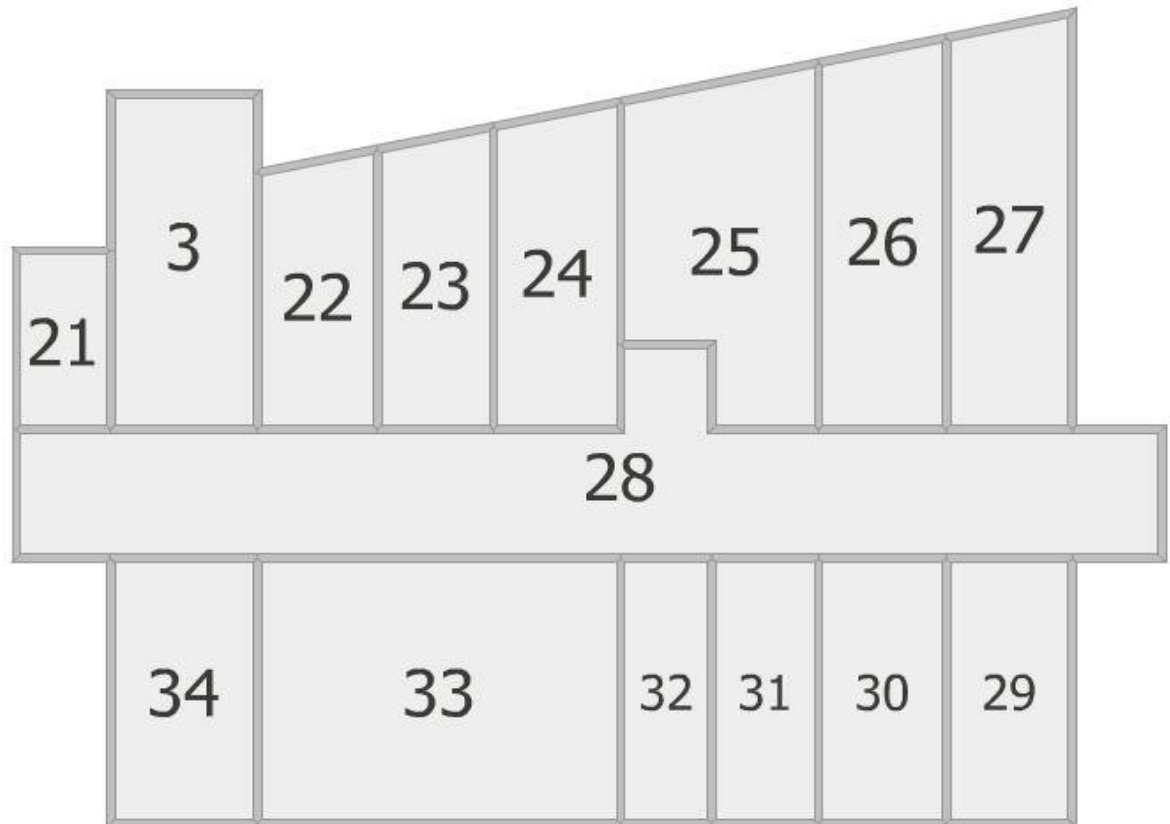
Kako bi se potrebna energija za grijanje i hlađenje te sadržana energija zgrade mogle pravilno i precizno izračunati potrebno je zgradu podijeliti na toplinske zone. Zbog što preciznijeg proračuna, zgrada je podijeljena na 38 zona. Zone koje su definirane nalaze se u prizemlju te na prvom, drugom, trećem i četvrtom katu koji su prethodno opisani. Podjela na zone prikazana je na tlocrtima prema Slikama 2, 3, 4, 5 i 6. U prizemlju se nalazi 12 zona (Slika 2). Na prvom katu se nalazi 8 zona (Slika 3), a drugi kat je podijeljen na 14 zona (Slika 4). Na trećem katu su 3 zone (Slika 5) te na četvrtom katu jedna zona (Slika 6). Zona 3 obuhvaća dizalo i stubište te spaja katove, proteže se od prizemlja do trećeg kata.



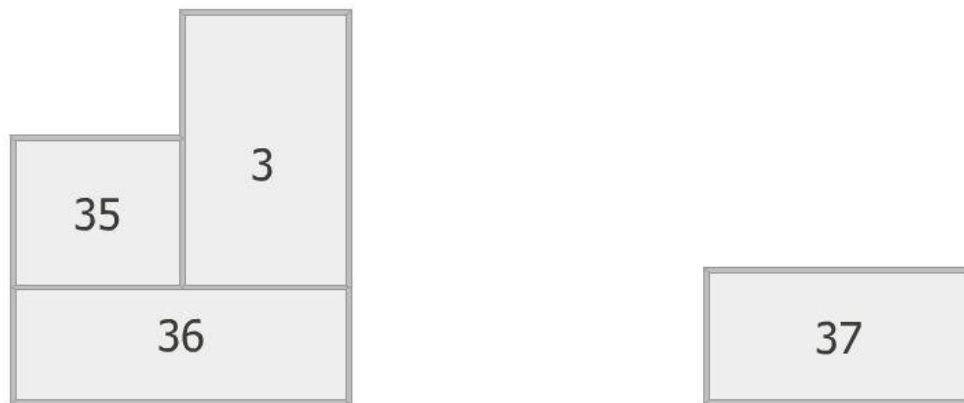
Slika 2: Zoniranje prizemlja



Slika 3: Zoniranje prvog kata



Slika 4: Zoniranje drugog kata



Slika 5: Zoniranje trečeg kata



Slika 6: Zoniranje četrtega kata

Nakon što je zgrada podijeljena na toplinske zone potrebno je odrediti dimenzije zona te svojstva zidova i prozora kao ulazne podatke za računalni program TRNSYS. Dimenzije zona i zidova definirane su u Excel tablici. Površine i volumeni zona prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Površine i volumeni definiranih zona

Zona	Korisna površina zone [m ²]	Volumen zone [m ³]
1	10,9	27,2
2	31,9	79,7
3	133,8	382,4
4	9,6	24
5	49,3	123,2
6	18,9	47,4
7	64,4	160,9
8	228,3	228,3
9	78,4	196
10	38,2	97,5
11	28,7	71,7
12	12,1	30,4
13	17,6	61,7
14	59,6	208,7
15	20,5	71,8
16	72,2	252,8
17	105,7	367
18	92,9	325,2
19	69,1	241,9
20	26,3	92,1
21	17,6	89,9
22	18,1	92,3
23	19,9	101,3
24	20,9	106,8
25	37,9	193,5
26	26,7	132,4
27	27,1	138,1
28	119,1	607,2
29	25,3	129,1
30	25,8	131,3
31	25,3	129,1
32	25,8	131,3
33	79,9	407,6
34	37,8	194,7

35	17,6	49,4
36	26,1	73,1
37	16,2	45,4
38	31,2	109,1

2.2. Svojstva zidova

Primjer definiranja zone i zidova dan je u Tablici 2. U tablici je prikazana Zona 1 koja se nalazi u prizemlju, površine 10,9 m² i volumena 27,2 m³. Nakon što su definirane površine zidova, potrebno je odrediti vrstu zida i definirati njegova svojstva. Kategorija zida označena je kraticama EX (external) što označava vanjski zid, AD (adjacent) što označava unutarnji zid koji graniči sa zidom druge zone te BO (boundary) što označava zid koji je definiran kao rubni uvjet, u ovom slučaju adijabatska ploha. Orijehtacija zidova označena je prema oznakama S (sjever), I (istok), J (jug), Z (zapad) dok su horizontalne plohe označene sa H. Bitan ulazni podatak za računalni model je i vidni faktor između plohe i neba. Posljednji stupac tablice pokazuje vrstu zida (vanjski, pregradni, pod na tlu, strop ili ravni krov).

Tablica 2. Definiranje svojstava Zone 1

ZONA 1							
	Opis	Površina [m²]	Kategorija	Zona s kojom graniči	Orijehtacija	Vidni faktor	Vrsta zida
1	VZ N	11,985	EX		S	0,5	vanjski
2	VR N	5,1	EX		S	0,5	vrata
3	VZ E	7,905	EX		I	0,5	vanjski
4	UZ S	11,6025	AD	2	J		pregradni
5	VZ W	11,6025	EX		Z	0,5	vanjski
6	POD	12,98	BO		H		pod na tlu

7	KROV	12,98	EX	H	1	ravni krov
---	------	-------	----	---	---	------------

Podaci prema kojima su definirani zidovi preuzeti su od Ministarstva graditeljstva i prostornoga uređenja za referentnu nZEB obrazovnu zgradu za kontinentalnu Hrvatsku. Fizikalna svojstva zidova prikazana su u Tablici 3 gdje su navedeni koeficijent prolaza topline U_{zid} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] i ukupna debljina zida d [m] koja je zbroj debljina pojedinih slojeva koji čine zid.

Tablica 3. Fizikalna svojstva zidova

Vrsta zida	Koeficijent prolaza topline U_{zid} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	Debljina [m]
Vanjski zid	0,1725	0,405
Pregradni zid	12,987	0,20
Pod na tlu	0,3	0,3932
Strop	0,582	0,3232
Ravni krov	0,144	0,5004

Sastav vanjskog zida prikazan je u Tablici 4. S unutrašnje strane vanjskog zida nalazi se sloj armiranog betona debljine 20 cm te sloja mineralne vune kao izolacijskog sloja, debljine 0,2m. S vanjske strane nalazi se sloj polimercementne žbuke armirane staklenom mrežicom debljine 0,03 m i sloj silikatne žbuke debljine 0,02m.

Tablica 4. Sastav vanjskog zida

Sloj	Materijal	Debljina [m]
1	Armirani beton	0,2
2	Mineralna vuna	0,2

3	Polimercementna žbuka armirana staklenom mrežicom	0,03
4	Silikatna žbuka	0,02

Sastav pregradnog zida prikazan je u Tablici 5. Pregradni zid sastoji se samo od jednog sloja, armiranog betona debljine 0,2 m. Posljedično, pregradni zid ima najveći koeficijent prolaza topline.

Tablica 5. Sastav pregradnog zida

Sloj	Materijal	Debljina [m]
1	Armirani beton	0,2

Sastav poda prikazan je u Tablici 6. Sa strane tla nalazi se sloj ekstrudirane polistirenske pjene (XPS) debljine 0,1 m i sloj armiranog betona debljine 0,1 m. Na beton dolaze višeslojne polimerbitumenske hidroizolacijske trake debljine 0,01 m. Kao izolacija slijede dva različita tipa stiropora, stiropor EPS 150 debljine 0,01 m i stiropor EPS T debljine 0,02. Zatim slijedi PE folija debljine 0,0002 m na koju dolazi sloj cementnog estriha debljine 0,06 m. Zadnji sloj na unutarnjoj strani je sloj epoksi smole debljine 0,003 m.

Tablica 6. Sastav poda na tlu

Sloj	Materijal	Debljina [m]
1	Epoksi smola	0,003
2	Cementni estrih	0,06
3	PE folija	0,0002
4	Stiropor EPS T	0,02

5	Stiropor EPS 150	0,1
6	višeslojne polimerbitumenske hidroizolacijske trake	0,01

Sastav stropa prikazan je u Tablici 7. Masivni dio stropa čini armirani beton debljine 0,2 m. Izolaciju zida čine dvije vrste stiropora, stiropor EPS 150 debljine 0,04 m i stiropor EPS T debljine 0,02 m. Zatim dolazi sloj cementnog estriha m te tanki sloj PE folije od 0,0002 m. Na kraju dolazi sloj epoksi smole debljine 0,003 m.

Tablica 7. Sastav stropa između grijanih zona

Sloj	Materijal	Debljina [m]
1	Epoksi smola	0,003
2	Cementni estrih	0,06
3	PE folija	0,0002
4	Stiropor EPS T	0,02
5	Stiropor EPS 150	0,04
6	Armirani beton	0,2

Sastav ravnog krova prikazan je u Tablici 8. S unutrašnje strane nalazi se armirani beton debljine 0,2 m. Na beton dolazi tanka bitumenska traka debljine 0,0002 m, a na nju izolacija od mineralne vune fasadne ploče debljine 0,24 m. Na kraju dolazi polimerna hidroizolacijska traka na bazi PIB debljine 0,0002 m. Kod proračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade u obzir nije uzet suhi šljunak, a koji dolazi na hidroizolacijsku traku.

Tablica 8. Sastav ravnog krova

Sloj	Materijal	Debljina [m]
1	Armirani beton	0,2
2	Bitumenska traka	0,0002
3	Mineralna vuna	0,24
4	Polimerna hidroizolacijska traka na bazi PIB	0,002

Prilikom definiranja sastava zidova spomenuti su različiti slojevi zidova: armirani beton, mineralna vuna, polimercementna žbuka armirana staklenom mrežicom, silikatna žbuka, epoksi smola, cementni estrih, PE folija, stiropor EPS T, stiropor EPS 150, bitumenska traka, polimerna hidroizolacijska traka na bazi PIB, višeslojne polimerbitumenske hidroizolacijske trake. Fizikalna svojstva slojeva korištena u ovom radu dana su u Tablici 9, a prema podacima Ministarstva graditeljstva i prostornoga uređenja za referentnu nZEB obrazovnu zgradu za kontinentalnu Hrvatsku.

Tablica 9. Fizikalna svojstva slojeva zidova

Sloj	Specifični toplinski kapacitet c_p [J/(kg K)]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska provodnost λ [W/(m K)]
Armirani beton	1000	2500	2,6
Mineralna vuna	1030	50	0,035
Polimercementna žbuka armirana staklenom mrežicom	1000	1100	0,7
Silikatna žbuka	1050	1850	0,87

Epoksi smola	1400	1200	0,2
Cementni estrih	1100	2000	1,6
PE folija	1250	1000	0,19
Stiropor EPS T	1260	12	0,042
Stiropor EPS 150	1260	25	0,036
Bitumenska traka	940	2700	203
Polimerna hidroizloacijska traka na bazi PIB	960	1600	0,26
Višeslojne polimerbitumenske hidroizolacijske trake	1000	1100	0,23

2.3. Svojstva prozora

U Tablici 10. prikazane su površine prozora po orijentacijama i zonama zgrade. Prozori su raspoređeni na sjevernoj, južnoj i zapadnoj strani zgrade. Svi prozori na zgradi su jednakih svojstava. Koeficijent prolaza topline iznosi $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ dok stupanj propuštanja Sunčevog zračenja iznosi 0,55.

Tablica 10. Površine prozora po zonama i orijentaciji zgrade

Orijentacija	Zona	Površina prozora [m ²]	Ukupna površina prozora [m ²]
Sjever	Zona 3	17,28	167,156
	Zona 5	21,85	
	Zona 7	22,94	
	Zona 14	21,52	
	Zona 15	7,41	
	Zona 16	22,59	
	Zona 22	7,58	
	Zona 23	7,7	
	Zona 24	7,58	
	Zona 25	15,06	
	Zona 26	7,72	
	Zona 27	7,93	
Jug	Zona 9	22,95	157,54
	Zona 10	14,28	
	Zona 11	11	
	Zona 17	10,81	
	Zona 18	29,81	
	Zona 28	10,81	
	Zona 29	7,84	
	Zona 30	7,6	
	Zona 31	7,48	
	Zona 32	7,48	
Zapad	Zona 3	7,28	28,53
	Zona 20	10,45	
	Zona 34	10,8	

2.4. Ostali ulazni podaci energijskog modela zgrade

Za sve zone zadan je isti raspored korištenja, postavne temperature za grijanje i hlađenje, broj izmjena zraka, infiltracija te unutarnji dobici. Tablica 11 prikazuje parametre prema kojima je definiran sustav grijanja i hlađenja zgrade. Vrijeme rada KGH sustava je od 6 ujutro do 20 sati navečer svakim radnim danom, dok subotom i nedjeljom sustav ne radi. Postavna temperatura za grijanje iznosi 20°C, a za hlađenje 22°C. Infiltracija je zadana kao 0,7 ACH. Unutarnji dobici kada sustav radi procijenjeni su na 6 W/m², dok su dobici za vrijeme prekida rada sustava zanemareni.

Tablica 11. Parametri zona

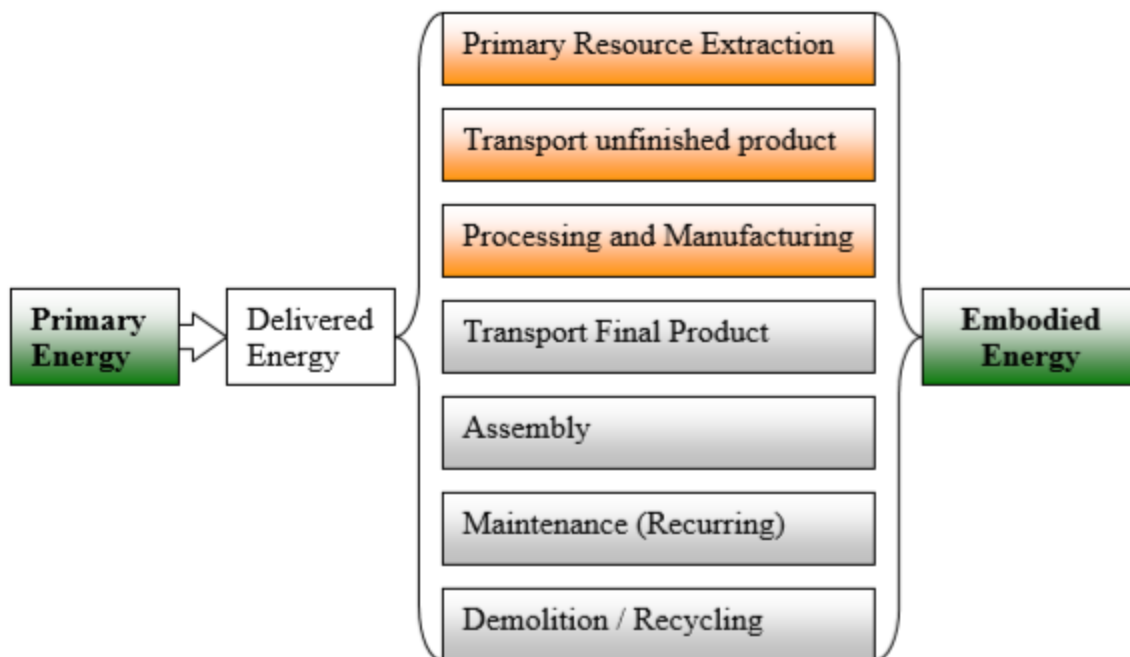
Parametri zona	
Radno vrijeme	06:00-20:00, 5 dana u tjednu
Infiltracija (ACH)	0.7
Unutarnji dobici kada sustav radi (W/m ²)	6
Unutarnji dobici kada sustav ne radi (W/m ²)	0
Postavna temperature za grijanje (°C)	20
Postavna temperature za hlađenje (°C)	22

3. SADRŽANA ENERGIJA ZGRADE

3.1. Definicija sadržane energije

Sadržana energija predstavlja energiju koja je utrošena u svim procesima prilikom izgradnje zgrade. Ona obuhvaća skup energija koje su potrebne za obradu, proizvodnju, transport i isporuku materijala od kojih je zgrada izgrađena. Bitno je napomenuti kako je to ukupna energija utrošena od iskopa sirovina do njihove konačne implementacije u zgradi. Uz navedene, sadržana energija može obuhvaćati i neke druge oblike potrošnje energije ukoliko su iznosi tih dodatnih troškova značajni. Na Slici 7 nalazi se prikaz energija koje imaju značajnu ulogu kod izračuna sadržane energije te čiji zbroj čini sadržanu energiju. Do danas pojam sadržane energije nije u potpunosti definiran i opisan jednadžbama koje bi bile primjenjive za svaku građevinu.

Provedena su mnoga istraživanja i analize sadržane energije diljem svijeta, no zanimljivo je kako su znanstvenici na različite načine opisali slične građevine. Naime, trenutno postoji više modela izračuna sadržane energije te se rezultati analiza razlikuju jer ovise o modelima proračuna. Svaki model je opisan posebnim skupom matematičkih jednadžbi pri čemu su jednadžbe temeljene na različitim pretpostavkama i uvjetima prilikom istraživanja. Faktori koji utječu na različito opisivanje sadržane energije su tip građevine, lokacija, cijena sirovina od kojih se proizvode građevinski materijali, cijena strojeva, cijena transporta, cijena fosilnih goriva, itd. Nadalje, svaka zemlja ima različite cijene dobara i usluga koje se primjenjuju prilikom izgradnje zgrade što predstavlja dodatni izazov prilikom proračuna sadržane energije. Iako su analize temeljene na različitim modelima, redovi veličina izračunate sadržane energije su slični i ne razlikuju se mnogo. Sve provedene analize dolaze do istog zaključka; iznos sadržane energije nije zanemariv i potrebno je, prilikom izgradnje zgrade, pažnju posvetiti analizi sadržane energije te pokušaju njezinog smanjenja. Sadržana energija može se prikazati na više različitih načina. Mjerne jedinice ovise o lokaciji gdje se provodi analiza. Najčešće korištene mjerne jedinice su MJ i GJ po jedinici energije. Također, ovisno i literaturi, sadržana enrgija može biti izražena u MWh po toni materijala. Prilikom analize sadržane energije Tehničke škole Ruđer Bošković korišteni su podaci energije izražene u GJ/t^2 koje su kasnije preračunate u kWh energije radi lakše usporedbe sa energijom potrebnom za grijanje i hlađenje.



Slika 7. Vrste energija u sadržanoj energiji [3]

3.2. Metode smanjenja sadržane energije

Smanjenje sadržane energije moguće je ostvariti na više načina, međutim, bitno je napomenuti da postoje slučajevi gdje smanjenje nije nužno najbolje rješenje. Nije dovoljno pronaći način za smanjenje i primjeniti ga, već je potrebno provjeriti moguće negativne posljedice tog rješenja. Dobar primjer kako smanjenjem sadržane energije dolazi do negativnih posljedica na okoliš jest istraživanje provedeno u Švedskoj [2]. Cilj istraživanja bio je usporediti sadržanu energiju zgrade izgrađene od armiranog betona i zgrade izgrađene od drveta. Prilikom proizvodnje betona dolazi do velike potrošnje energije te oslobađanja visokih emisija stakleničkih plinova (GHG emission). Oboje je vrlo štetno za okoliš te je logično rješenje bilo odabrati drvo kao građevinski materijal zgrade pod pretpostavkom da će drvena zgrada imati manju sadržanu energiju, čak 60-80% manju te neće imati štetan utjecaj na okoliš. Međutim, nakon detaljne analize, ispostavilo se kako zamjena građevinskih materijala ipak nije najbolji način smanjenja sadržane energije. Problem koji nastaje primjenom tog rješenja jest zbrinjavanje drvnog otpada nakon rušenja drveća. Ukoliko se drvni otpad ostavi na odlagalištima ili se koristi kao zamjena za

fosilna goriva, emisija stakleničkih plinova biti će pozitivna. Problem nastaje prilikom razgradnje otpada uslijed nastanka štetnog spoja CH_4 . Cilj je stoga bio pronaći rješenje pri kojem će emisija stakleničkih plinova biti negativna. Analizama je potvrđeno kako će emisija stakleničkih plinova biti negativna samo ukoliko se dio drvnih ostataka prenamijeni (kao građevni materijal) i koristi u zgradi. Iz primjera se može zaključiti kako smanjenje sadržane energije ovisi o puno faktora te ne postoji jedinstveno rješenje za svaku situaciju već treba biti vrlo oprezan prilikom donošenja odluka.

3.3. Izračun sadržane energije analizirane zgrade

3.3.1. Sadržana energija armiranog betona

Među standardnim građevnim materijalima, armirani beton ima vrlo veliku vrijednost sadržane energije. Stoga je za smanjenje ukupne sadržane energije zgrade potrebno obratiti posebnu pozornost na optimizaciju količine armiranog betona. Kako bi se odredila sadržana energija armiranog betona Tehničke škole Ruđer Bošković korištena je kombinacija dvaju modela proračuna prikazanih u [4] i [5]. Prema studiji slučaja o sadržanoj energiji u betonskim zgradama [4] određene su sadržane energije materijala i procesa koji su potrebni prilikom izgradnje zgrade. U Tablici 12 prikazane su sadržane energije materijala i procesa koji imaju značajnu potrošnju energije prilikom izgradnje zgrade od armiranog betona. Vrijednost ukupne sadržane energije svih materijala i procesa koji su uzeti u obzir pri proračunu sadržane energije armiranog betona koja iznosi 22.892 GJ/t^2 . Ukupna vrijednost je zbroj energija utrošenih od iskopa sirovina potrebnih za proizvodnju armiranog betona do ugradnje u zgradu.

Tablica 12. Sadržana energija materijala i procesa u proizvodnji armiranog betona

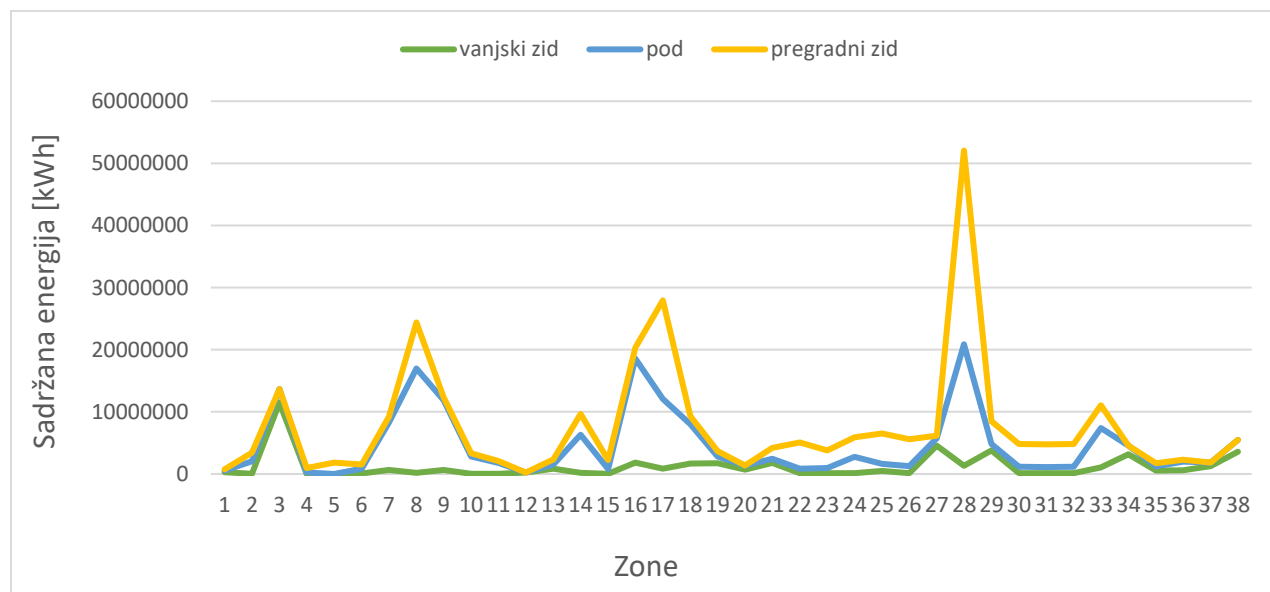
Materijali i procesi	Gustoća [kg/m³]	Sadržana energija [GJ/t²]
Cement	1500	6
Pijesak	1500	0.0285
Šljunak	1500	0.15
Čelične šipke	7800	16.7
Transport	-	0.001
Sakupljanje, obrada i distribucija vode	1000	0.003
Proizvodnja žbuke	1250	0.002
Proizvodnja betona	2300	0.0025
Transport i ispumpavanje betona	2300	0.005
Ukupno	-	22.892

Za svaku zonu izračunata je sadržana energija. Zidovi koji su uzeti u proračunu su prethodno definirani vanjski i pregradni zidovi te pod. Za svaki od tih zidova izračunata je površina, zatim volumen i na kraju masa zida. Kada su definirane te veličine dobivena je sadržana energija armiranog betona koji je masivni dio promatranih zidova. Zbrojem svih energija zidova u svima zonama zgrade dobivena je ukupna sadržana energija armiranog betona. Tablica 13 prikazuje rezultate proračuna sadržane energije armiranog betona za vanjski i pregradni zid te pod. Ukupna sadržana energija armiranog betona iznosi 315 152 224 kWh.

Tablica 13. Sadržana energija armiranog betona analizirane zgrade

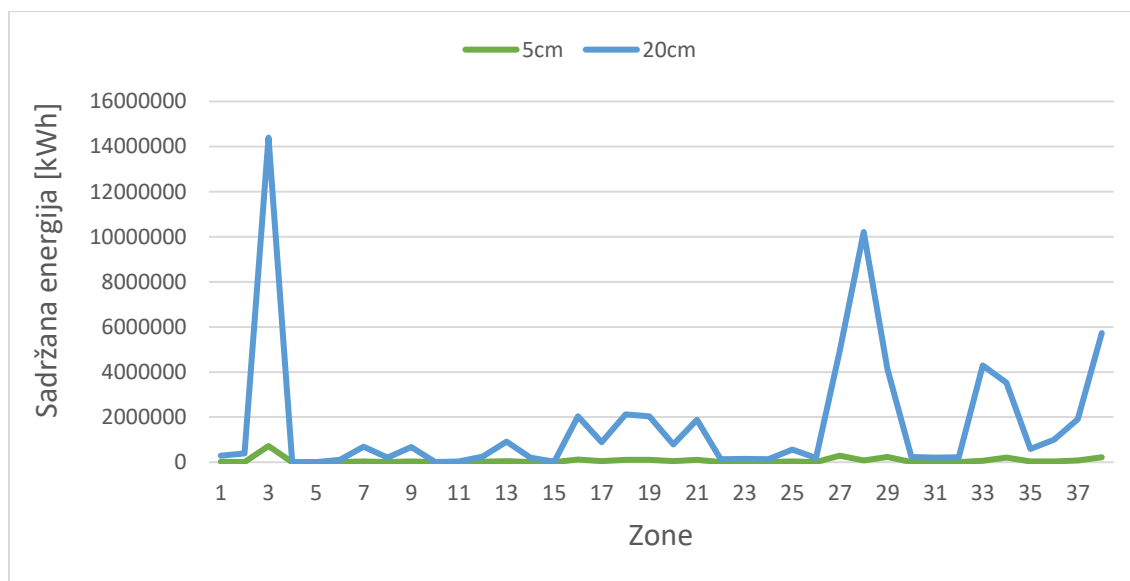
Zidovi	Sadržana energija [kWh]
Vanjski zid	44 488 200
Pod	139 918 535
Pregradni zid	111 962 034
Ukupno	296 368 769

Na Slici 8 prikazana je promjena sadržane energije betona po zonama. Krivulja zelene boje označava sadržanu energiju betona vanjskih zidova, krivulja plave boje poda, a krivulja žute boje pregradnih zidova. Najveća sadržana energija može se primjetiti kod pregradnih zidova upravo zbog toga što pregradnih zidova ima najviše u zgradi te je njihova debljina pretpostavljena da iznosi 0,2 m kao i za vanjske zidove i pod.



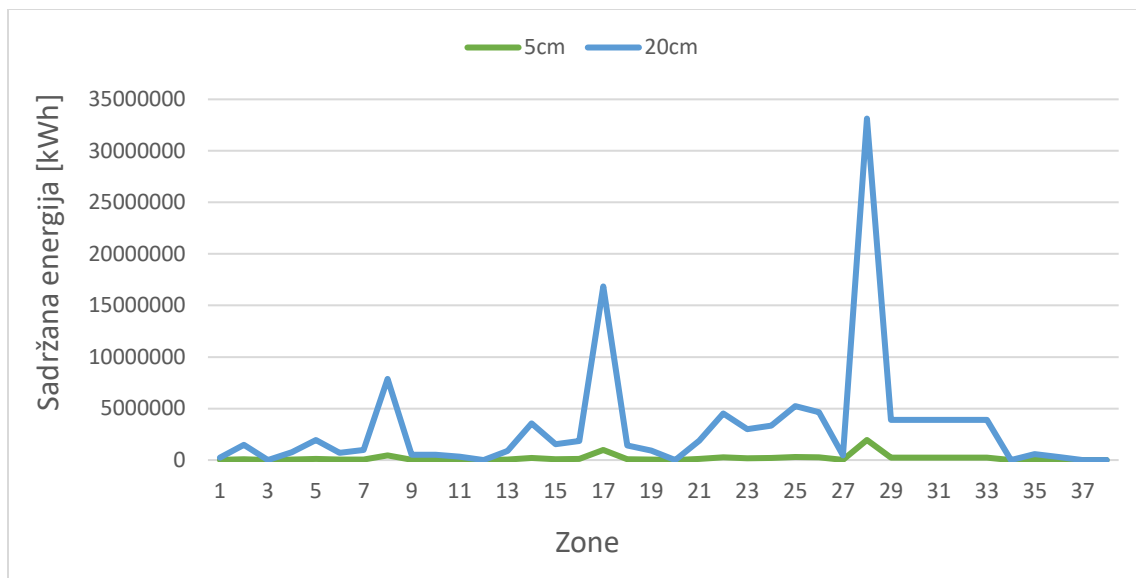
Slika 8. Sadržana energija armiranog betona za vanjske zidove, pregradne zidove i pod

Promjenom debljine armiranog betona moguće je postići smanjenje sadržane energije. Na Slici 9 prikazana je usporedba sadržane energije vanjskih zidova različitih debljina. Sadržana energija vanjskih zidova debljine 0,2 m prikazana je plavom bojom, a vanjskih zidova debljine 0,05 m prikazana je zelenom bojom. Manja debljina betona uzrokuje značajno smanjenje sadržane energije, a time dolazi do velikih ušteda prilikom izgradnje zgrade. Iako su troškovi manji, potrebno je provesti detaljnije analize da li smanjenje betona u konačnici daje najbolje rješenje za zgradu. Naime, smanjenjem debljine ovjionice zgrade utječemo na sposobnost zgrade za akumulacijom energije što se odražava na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Analiza debljine ovjionice zgrade i njezin utjecaj na sustav hlađenja opisan je kasnije u ovome radu.



Slika 9. Usporedba sadržane energije vanjskih zidova različitih debljina

Na Slici 10 prikazana je usporedba sadržane energije pregradnih zidova različitih debljina. Plavom bojom označena je sadržana energija pregradnih zidova debljine 0,2 m, a zelenom bojom sadržana energija pregradnih zidova 0,05 cm. Kao i kod vanjskih zidova, dolazi do značajnog smanjenja sadržane energije promjenom debljine betona. Detaljnija analiza utjecaja debljine vanjskih i pregradnih zidova na toplinska svojstva analizirane zgrade, opisana je kasnije u ovome radu.



Slika 10. Usporedba sadržane energije pregradnih zidova različite debljine

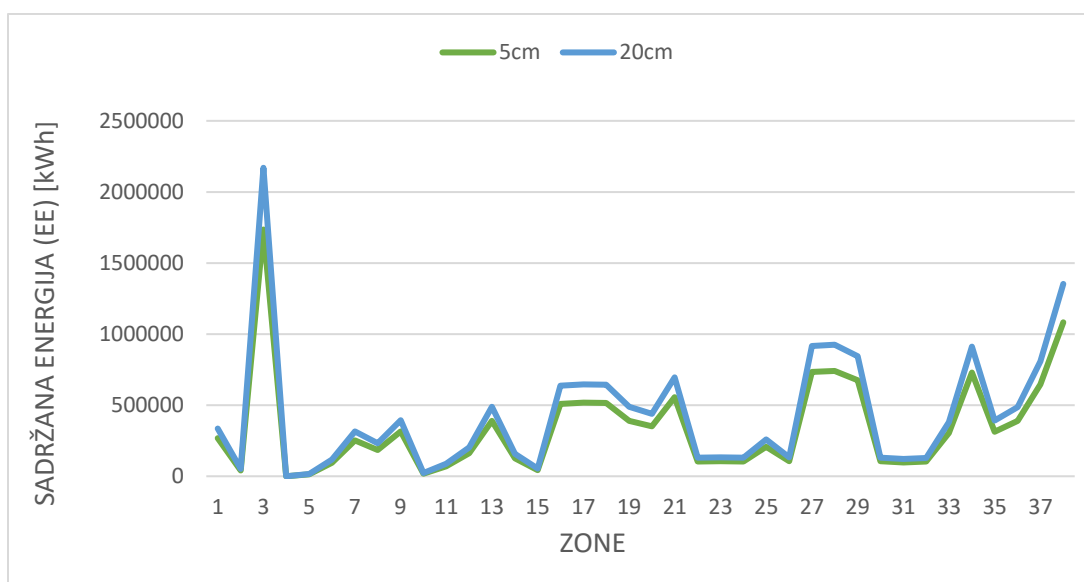
3.3.2. Sadržana energija izolacije

U nastavku je izračunata sadržana energija izolacije vanjskih zidova, pri čemu je za izolaciju zgrade korištena mineralna vuna. Vrijednost sadržane energije mineralne vune odabrana je prema podacima iz [6], gdje se navodi da sadržana energija mineralne vune iznosi 1182 MWh po toni minerane vune. Tablica 14 prikazuje sadržanu energiju mineralne vune vanjskih zidova koja iznosi 13 108 757 kWh.

Tablica 14. Sadržana energija izolacijskog sloja analizirane zgrade

Zidovi	Sadržana energija mineralne vune [kWh]
Vanjski zid	13 108 757

Promjena sadržane energije mineralne vune po zonama zgrade prikazana je na Slici 11. Krivulja zelene boje označava promjenu sadržane energije mineralne vune debljine 5cm, dok krivulja plave boje označava sadržanu energiju mineralne vune debljine 20cm. Prema dijagramu na slici vidi se kako sadržana energija raste s povećanjem debljine sloja mineralne vune. Smanjivanjem debljine mineralne vune smanjuje se sadržana energija, no također to ima negativnu posljedicu na koeficijent prolaza topline ovojnice zgrade. Smanjenjem izolacije dolazi do povećanih toplinskih gubitaka zimi i dobitaka ljeti te je potrebno odabrati optimalnu debljinu na temelju sveobuhvatne analize sadržane energije i potrebne energije za grijanje i hlađenje.



Slika 11. Usporedba sadržane energije izolacije različitih debljina

4. ENERGIJSKI MODEL ZGRADE

Za proračun godišnje potrošnje energije za grijanje i hlađenje zgrade korištene su računalne simulacije zgrade u računalnom programu za energijsko modeliranje, TRNSYS. Isti računalni program korišten je i za modeliranje podnog hlađenja u zgradi, a u svrhu konačne optimizacije debljine betona.

TRNSYS (Transient System Simulation Program) je računalni program za simulaciju dinamičkih sustava s modularnom strukturom. Modularna priroda TRNSYS-a daje programu veliku fleksibilnost, pri čemu se omogućuje korisniku unos komponenata energetske sustava te njihovo povezivanje u složenije sustave. Program je pogodan za detaljne analize sustava čije ponašanje varira u vremenu. TRNSYS je postao referentni softver za istraživače i inženjere širom svijeta te ima široku primjenu u različitim sustavima kao što su solarni i fotonaponski sustavi, niskoenergetske zgrade i HVAC sustavi, sustavi obnovljive energije, kogeneracija i gorivne ćelije.

U ovome radu korištena su dva sučelja programa. Modeliranje zgrade, definiranje zidova i parametara zona te modeliranje podnog hlađenja provedeno je u korisničkom sučelju TRNBuild. Povezivanje različitih komponenata i simulacije su provedene u korisničkom sučelju Simulation Studio.

4.1. Definiranje svojstava zona zgrade u TRNBuildu

Model zgrade čini 38 zona koje su ranije opisane u Poglavlju 2. Prema prethodno izračunatim dimenzijama zona i zidova koji čine pojedinu zonu, u TRNBuild su izrađene zone na način kako je prikazano na Slici 12.

Z1
 volume: 27.1625 m³
 capacitance: 32.59 kJ/K

Infiltration Heating Gains Initial Values
 Ventilation Cooling Comfort Humidity Radiation Modes Geometry Modes

Walls

Surf	Type	Area	Category	
Additional Windows				
1	TYPE1	11.98	EXTERNAL	N_180_90
3	TYPE1	7.91	EXTERNAL	E_270_90
4	TYPE1	7.91	EXTERNAL	W_90_90
5	TYPE4	12.98	BOUNDARY	
6	TYPE5	12.98	EXTERNAL	H_0_0
74	TYPE2	11.60	ADJACENT	Z2

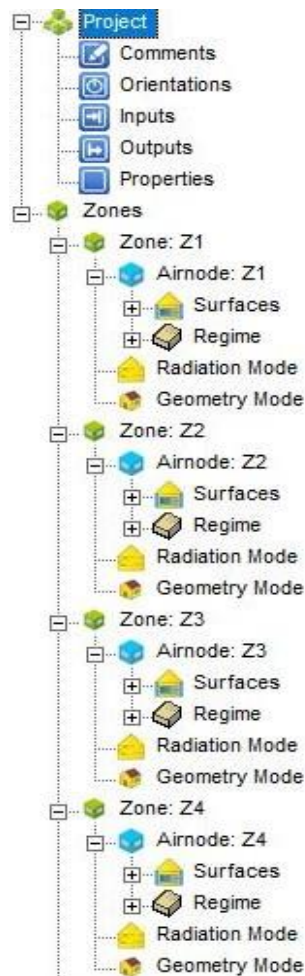
wall type: TYPE1 <-- new ...
 area: 11.985 m² incl. windows
 category: EXTERNAL
 geosurf: 0 1
 wall gain: 0 kJ/h
 orientation: N_180_90 N_180_90
 view fac. to sky: 0.5

Windows

Surf	Type	Area	Category	u-Value	g-Value
2	INS3_KR_1	5.10	EXTERNAL	0.68	0.407

window type: INS3_KR_1 <-- new ...
 area: 5.1 m²
 category: EXTERNAL
 geosurf: 0 2
 gain: 0 kJ/h
 orientation: N_180_90 N_180_90
 view fac. to sky: 0.5

Slika 12. Definiranje svojstava zidova i prozora Zone 1 u TRNBuild-u



Slika 13. Definiranje zona u TRNBuildu

4.2. Simulacija u sučelju Simulation Studio

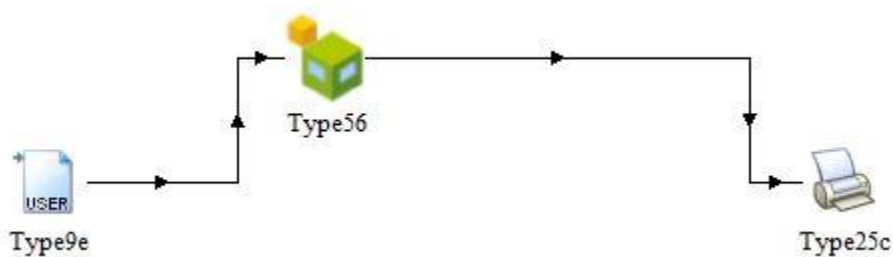
Na temelju definiranih parametara provedene su dinamičke simulacije zgrade u sučelju Simulation za izračun potrebne energije za grijanje i hlađenje. Simulacije su provedene za svaki sat u godini korištenjem meteoroloških podataka za tipičnu meteorološku godinu u gradu Zagrebu. Ulazni parametri koji definiraju meteorološke podatke prikazani su u Tablici 15.

Tablica 15. Ulazni parametri za simulaciju

1. TAMB	Temperatura vanjskog zraka
2. RELHUM	Relativna vlažnost vanjskog zraka
3. TSKY	Temperature neba
4. TSGRD	Temperature tla
5. AZEN	Zenit kut Sunca
6. AAZM	Azimet kut Sunca
7. IT_N	Ukupno Sunčevo zračenje za sjever
8. IT_E	Ukupno Sunčevo zračenje za istok
9. IT_S	Ukupno Sunčevo zračenje za jug
10. IT_W	Ukupno Sunčevo zračenje za zapad
11. IT_H_0	Ukupno Sunčevo zračenje za horizontalne površine
12. IB_N	Direktno Sunčevo zračenje za sjever
13. IB_E	Direktno Sunčevo zračenje za istok
14. IB_S	Direktno Sunčevo zračenje za jug
15. IB_W	Direktno Sunčevo zračenje za zapad
17. IB_H_0	Direktno Sunčevo zračenje za horizontalne površine

19. AI_N	Upadni kut Sunca za sjever
20. AI_E	Upadni kut Sunca za istok
21. AI_S	Upadni kut Sunca za jug
22. AI_W	Upadni kut Sunca za zapad
23. AI_H_0	Upadni kut Sunca za horizontalne površine
24. GRDREF	Faktor refleksije tla

Simulacija se sastoji od povezanih komponenti Simulation Studio-a. Za potrebe ove simulacije odabrane su komponente Type 9e, Type56 te Type25c. Komponenta Type9e koristi se za učitavanje meteoroloških podataka prikazanih u Tablici 14. Izlaz komponente Type 9e povezuje se sa ulazom komponente Type56 koja definira model višezonske zgrade. Podaci sadržani u Type56 su podaci o analiziranoj zgradi, a prema ranijem opisu. Provedbom dinamičke simulacije izračunavaju se satne vrijednosti potrebne energije za grijanje i hlađenje te se šalju u komponentu Type25c koja ispisuje rezultate u tekstualne datoteke. Na temelju dobivenih rezultata provedena je analiza potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade koja je opisana u nastavku. Korištene komponente i njihovo povezivanje prikazano je na Slici 14.



Slika 14. Model glavne simulacije

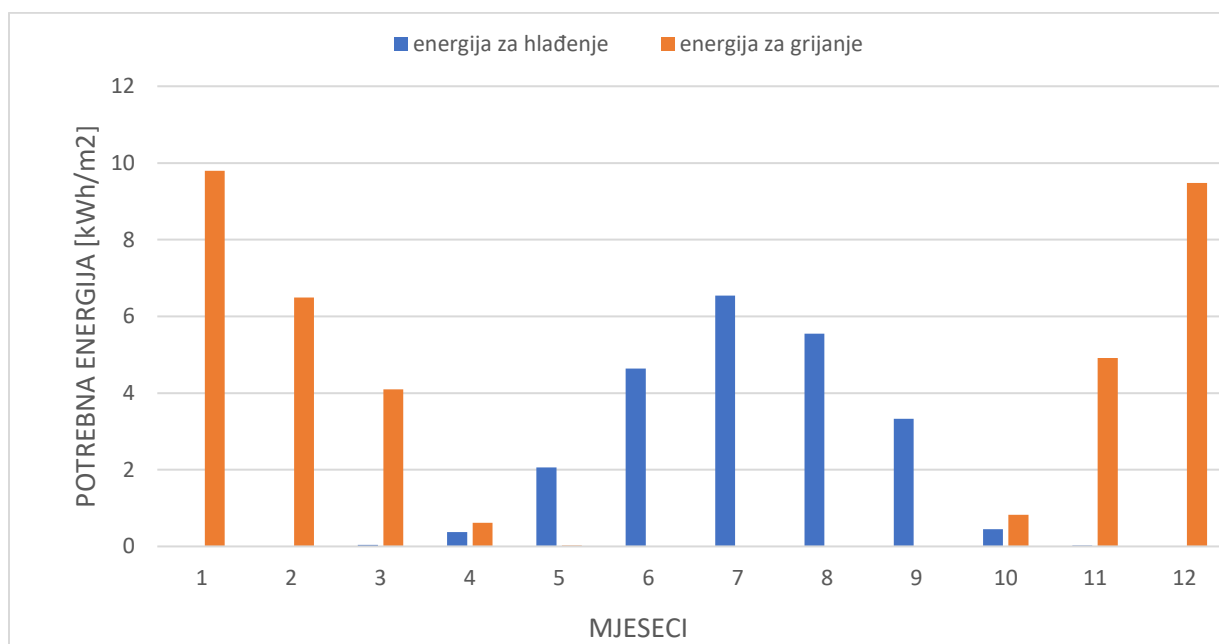
5. POTREBNA ENERGIJA ZA GRIJANJE I HLAĐENJE

Rezultat provedene računalne simulacije su potrebna energija za grijanje i hlađenje te temperature zraka u prostoriji. Početak simulacije je 1. prosinac koji služi kao mjesec za zagrijavanje („warm up“), a kako bi 1. siječanj imao realnije i preciznije podatke o potrebnoj energiji i temperaturi zraka u prostoru. Simulacija je provedena s vremenskim korakom od jednog sata za svaki sat u godini i za svaku od 38 definiranih zona. Na temelju provedene simulacije, podaci o potrebnoj energiji za grijanje i hlađenje prikazani su u Tablici 16 te grafički na Slici 15. Rezultati su prikazani po mjesecima, za cijelu zgradu. Prema podacima se vidi kako je potrebna energija za grijanje najveća u siječnju i prosincu, dok je energija za hlađenje najveća u srpnju i kolovoza. Tijekom lipnja, srpnja i kolovoza ne postoji potreba za grijanjem dok tijekom siječnja, veljače, ožujka, studenog i prosinca ne postoji potreba za hlađenjem ili je zanemariva.

Tablica 16. Potrebna energija za grijanje i hlađenje

Mjesec	Potrebna energija za grijanje [kWh/m ²]	Potrebna energija za hlađenje [kWh/m ²]
Siječanj	9,795	0
Veljača	6,49	0,0018
Ožujak	4,094	0,023
Travanj	6,2	0,378
Svibanj	2,63	2,06
Lipanj	0	4,64
Srpanj	0	6,54
Kolovoz	0	5,54

Rujan	3,725	3,33
Listopad	8,205	0,445
Studeni	4,91	0
Prosinac	9,48	0



Slika 15. Potrebna energija za grijanje i hlađenje po mjesecima

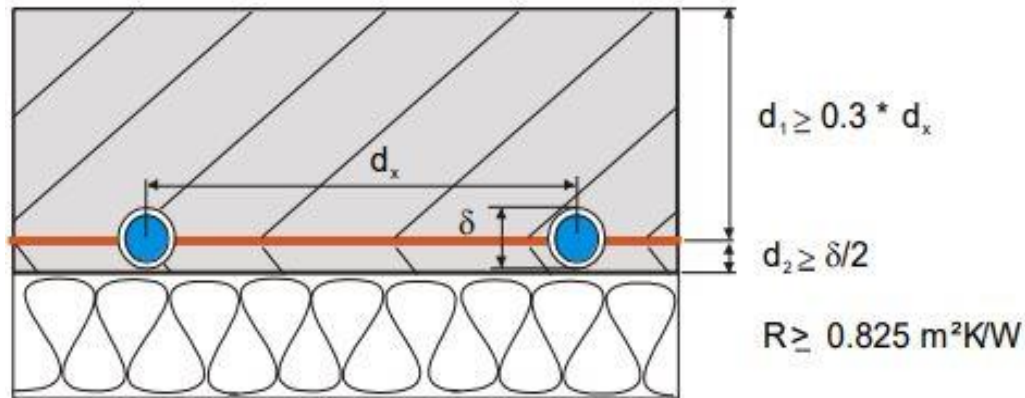
6. MODELIRANJE PODNOG HLAĐENJA

U ovom radu predviđeno je hlađenje zgrade pomoću vodenog sustava u podu. Sustav podnih panelnih izmjenjivača topline sastoji se od cijevi položenih u estrih debljine 0,6 m. Cijevi su postavljene u pužnu petlju, jedan od osnovnih načina postavljanja. Osnovni mehanizam izmjene topline kod podnog hlađenja jest zračenje (60-75%). Podno hlađenje karakterizira ravnomjerna raspodjela temperature u prostoru te visoka toplinska ugodnost. Prednosti podnog hlađenja su to što nema vidljivih dijelova instalacije te povoljna raspodjela temperature. Velik nedostatak je tromost sustava zbog velike količine vode koja struji cijevima, kao i visoka cijena ugradnje i popravka. Temperature poda su definirane normom jer moraju zadovoljiti higijenske zahtjeve. Podno hlađenje zgrade modelirano je u TRNSYS-u korištenjem sučelja TRNBuild, a parametri aktivne površine korišteni pri modeliranju prikazani su u Tablici 17.

Tablica 17. Parametri podnog hlađenja

c_w	4,18	kJ/kgK	specifični toplinski kapacitet vode
L	0.2	M	razmak između cijevi
D_v	0.02	M	vanjski promjer cijevi
Δ	0.002	M	debljina cijevi
λ	1.26	kJ/hmK	toplinska provodnost

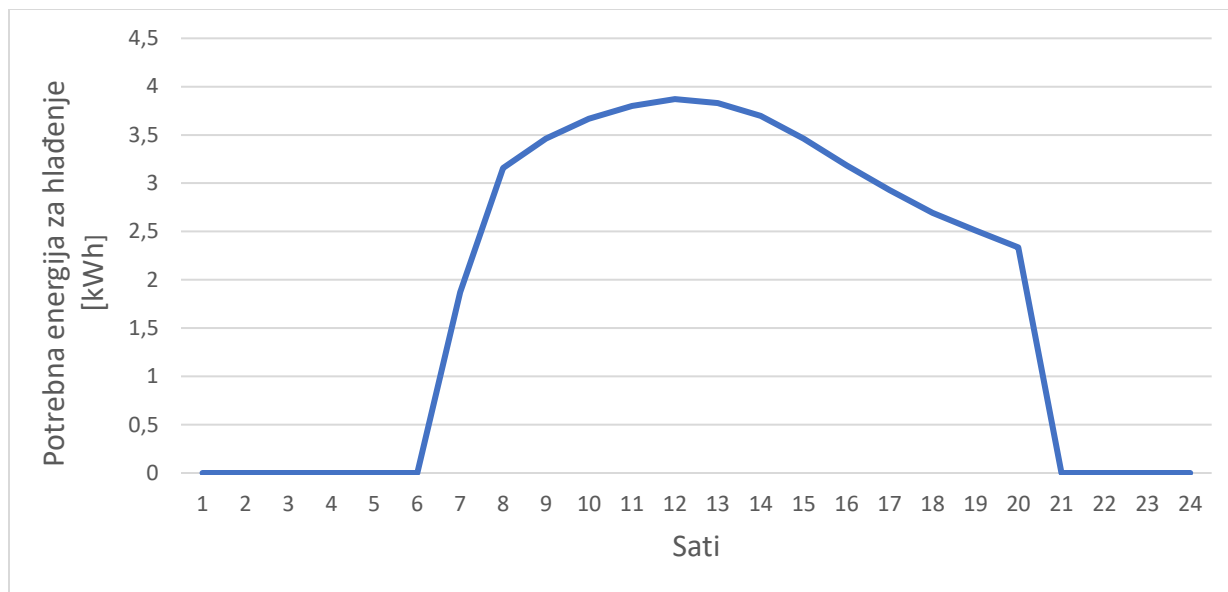
Model aktivne površine u TRNSYS-u definira i ograničenja prilikom modeliranja podnog hlađenja, a koja su prikazana na Slici 16. Debljina aktivne površine (estrih u koji su uronjene cijevi) mora biti veća ili jednaka 30% duljine razmaka između cijevi. Otpor izolacije koja se nalazi ispod estriha mora biti veći ili jednak 0,825 m²K/W. Debljina između aktivne površine i izolacije mora biti veća ili jednaka polovici debljine cijevi.



Slika 16. Ograničenja prilikom definiranja modela podnog hlađenja [7]

6.1. Dimenzioniranje sustava podnog hlađenja

Analiza rada sustava podnog hlađenja provedena je za karakterističnu zonu zgrade. Od 38 zona na koje je zgrada podijeljena, kao karakteristična zona odabrana je zona 9. Zona 9 je najveća prostorija koja se nalazi u prizemlju i okrenuta je prema jugu. Površina poda iznosi 84 m^2 . U zoni 9 bit će najveće opterećenje od ljudi, opreme, uređaja zbog njezine veličine te Sunčevog zračenja (južna orijentacija). S obzirom da proračun projektnog hlađenja nije u opsegu ovog rada, oprema je dimenzionirana na temelju rezultata simulacije potrebne energije za hlađenje u TRNSYS-u. Najveća potrebna energija za hlađenje je 31. kolovoza u 12h i iznosi $3,87 \text{ kWh}$. Na Slici 17 prikazana je potrebna energija za hlađenje tijekom toga dana. Za dimenzioniranje sustava podnog hlađenja pretpostavljeno je stoga maksimalno opterećenje prostorije od $3,87 \text{ kW}$, a pod pretpostavkom kontinuiranog opterećenja kroz sat vremena ($3,87 \text{ kW} \times 1\text{h} = 3,87 \text{ kWh}$). Zbog sigurnosti maksimalno opterećenje je uvećano za faktor sigurnosti od 10% te konačni iznos toplinskog opterećenja korišten za dimenzioniranje iznosi $4,3 \text{ kW}$.



Slika 17. Potrebna energija za hlađenje za karakterističan dan

6.2. Određivanje temperature polaza vode kod podnog hlađenja

S obzirom da se opterećenje u svakom satu preko dana mijenja, potrebno je regulirati predanu rashladnu energiju, a što se u sustavu podnog hlađenja najčešće radi promjenom temperature polaza vode (pri konstantnom protoku vode). S obzirom da modeliranje sustava regulacije temperature polaza vode nije bilo u opsegu ovog rada, bilo je potrebno na pojednostavljeni način za svaki sat u godini odrediti temperaturu polaza vode. Na temelju zadane temperature polaza vode se zatim simulacijom odredila temperatura zraka u prostoru za svaki sat u danu. Cilj simulacije je bio postići da podno hlađenje održava temperaturu zraka u prostoru od oko 22°C tijekom sati rada zgrade, pri čemu su prema standardima toplinske ugodnosti minimalna i maksimalna dopuštena temperatura 20°C i 25°C. Postupak proračuna i određivanja profila temperature polaza vode te temperature zraka u prostoru proveden je na sljedeći način:

1.korak: Odabran je protok vode q_m od 900 kg/h, odnosno 0,25 kg/s prema ograničenju koje postavlja TRNSYS, a to je da protok vode po metru kvadratnom ne smije biti manji od 10 kg/hm². Toplinski kapacitet vode iznosi 4,187 kJ/kgK, a površina poda iznosi 84 m².

2.korak: Pretpostavljeno je kvazi-stacionarno stanje za koje vrijedi jednačina :

$$\Phi = q_m * c_w * (T_{polaza} - T_{povrata}) \quad (1)$$

gdje su:

q_m maseni protok vode [kg/s]

c_w specifični toplinski kapacitet vode [kJ/kgK]

T_{polaza} temperatura polaza vode [°C]

$T_{povrata}$ temperatura povrata vode [°C]

3.korak: Pretpostavljeno je da se izmjena topline između poda i zraka u prostoru može približno točno opisati korištenjem pretpostavke o 2D prolazu topline te korištenjem jednadžbe za izmjenjivač topline:

$$\Phi = k * A * \frac{T_{polaza} - T_{povrata}}{\ln\left(\frac{T_{polaza} - T_a}{T_{povrata} - T_a}\right)} \quad (2)$$

gdje su:

Φ toplinski tok [W]

T_a temperatura zraka u prostoru [°C]

k koeficijent prolaza topline [W/m²K]

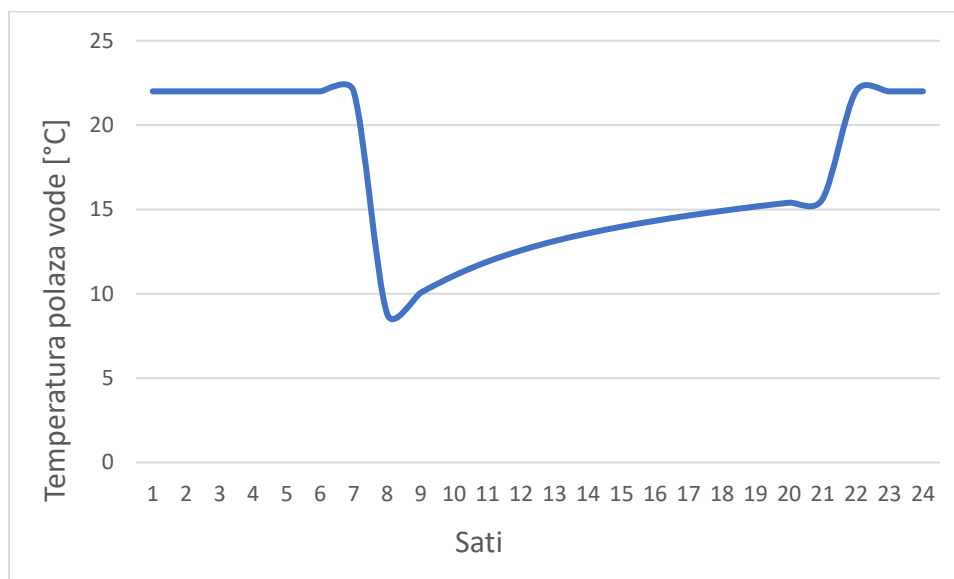
A površina poda [m²]

4.korak: Pretpostavljeno je da toplinski tok iz jednadžbe 1 i 2 treba biti jednak potrebnoj energiji za hlađenje u tom satu, a koja je dobivena prethodnom simulacijom u TRNSYS-u. Nepoznanice u jednadžbama su stoga temperature polaza i povrata te koeficijent prolaza topline.

5.korak: Kako bi se odredio efektivni koeficijent prolaza topline, sustav podnog hlađenja je simuliran pod pretpostavkom konstantne temperature polaza vode od 7°C u periodu od 6 do 20h. Provedena je simulacija prema kojoj je program izračunao temperature zraka u prostoru, temperature povrata vode, temperature poda i predanu energiju pri konstantnoj temperaturi polaza vode od 7°C. Na temelju dobivenih rezultata izračunat je efektivni (fiktivni) koeficijent prolaza topline za svaki sat u danu. Konačno, na temelju izračunatih, satnih vrijednosti, određen je efektivni koeficijent prolaza od 5,2 W/m²K, a koji je korišten u svim daljnjim simulacijama.

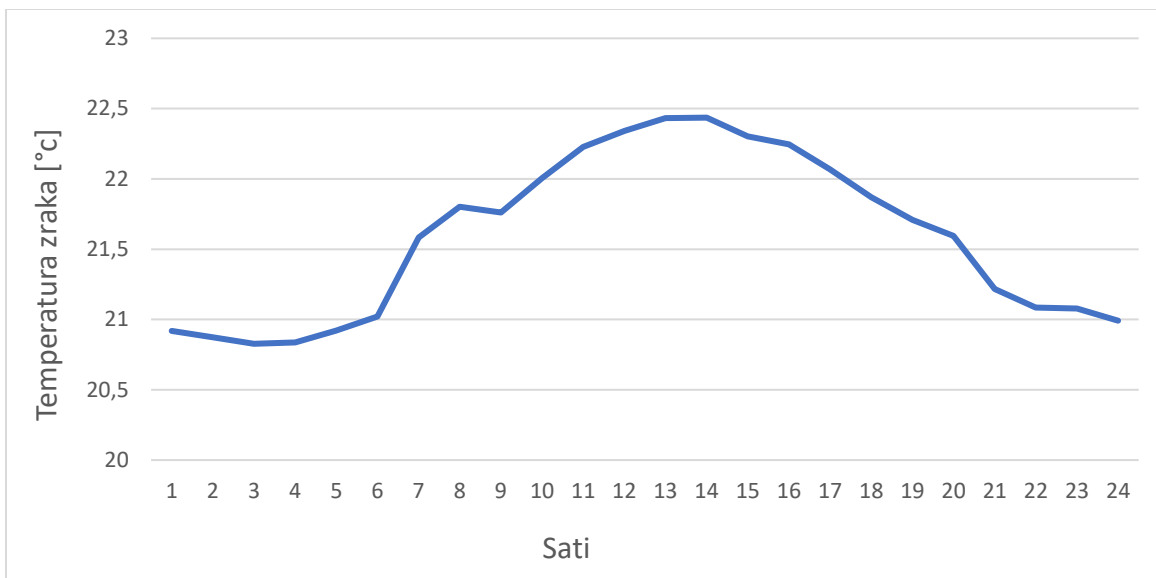
6.korak: Uz poznati koeficijent prolaza topline moguće je riješiti gore navedeni sustav jednadžbi te odrediti temperature polaza vode za svaki sat u godini.

Kao karakterističan dan za koji su provedene daljnje analize u ovome radu pretpostavljen je 21. lipanj. Kako je promatrana zgrada škola, pretpostavlja se kako neće raditi preko ljeta, odnosno tijekom srpnja i kolovoza. Upravo zbog toga je odabran dan s najvećim opterećenjem u lipnju, a to je 21. lipanj. Najveća potrebna energija za hlađenje toga dana pojavljuje se u 13h i iznosi 3,2 kWh. Na temelju podataka o potrebnoj energiji za hlađenje za 21. lipanj te pojednostavljene procedure opisane u prethodnim koracima izračunate su temperature polaza vode za svaki sat u danu. Vrijednosti temperature polaza prikazane su na Slici 18.



Slika 18. Temperature polaza vode za karakterističan dan

Korištenjem izračunatih podataka za temperaturu polaza vode provedena je simulacija za karakterističan dan te je rezultat simulacije bio traženi profil temperature zraka u prostoru za 21. lipanj (Slika 19). Prema slici se vidi kako dnevna temperatura zraka ne prelazi 22,5°C, što potvrđuje da je podno hlađenje dobro dimenzionirano i upravljano. Drugim riječima, može se zaključiti iz prikazanih rezultata kako su izračunate temperature polaza vode dovoljne kako bi se održala prihvatljiva temperatura zraka u prostoru za održavanje toplinske ugodnosti tijekom dana. Iako sustav noću ne radi, noću temperatura pada ispod 21°C. Razlog tomu je niska vanjska temperatura te nedostatak dobitaka od ljudi, opreme i rasvjete.

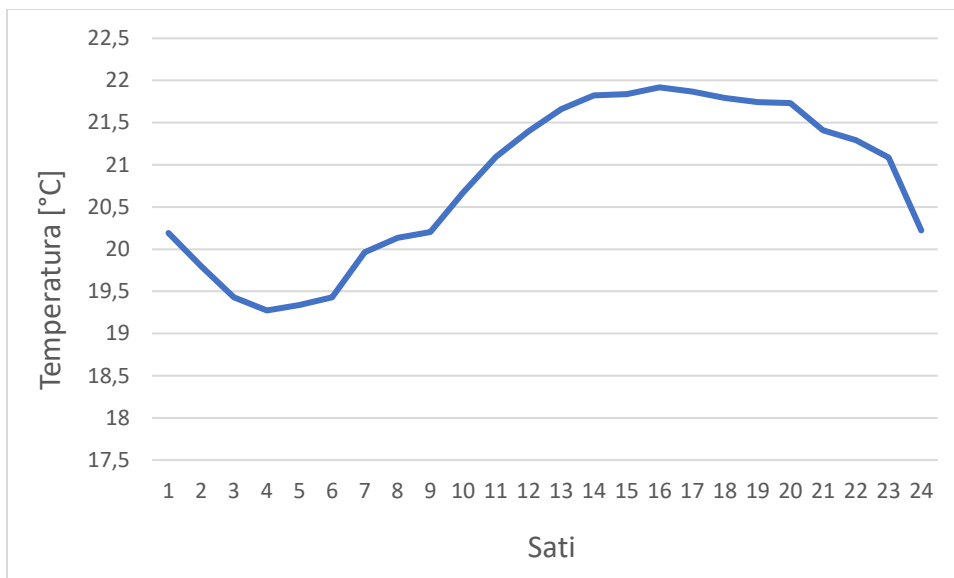


Slika 19. Temperature zraka u prostoru za karakterističan dan

7. NOĆNI REŽIM RADA SUSTAVA HLAĐENJA

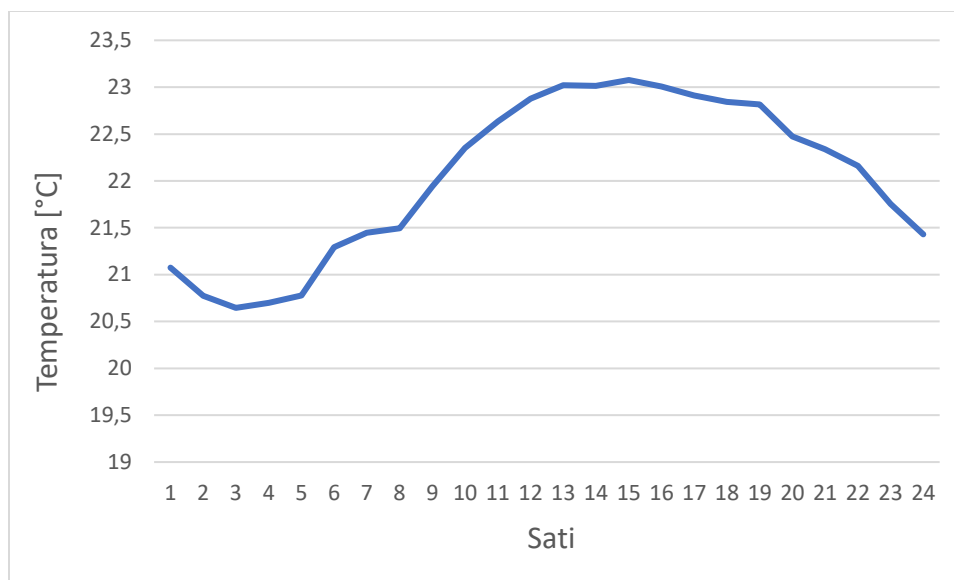
Cilj optimizacije KGH sustava je uz što manje troškove postići tražene uvjete u prostoru te ostvariti toplinsku ugodnost. Jedan od mogućih načina postizanja tog cilja je preko noći dovoljno ohladiti zgradu kako preko dana hlađenje ne bi bilo potrebno. Na taj način moguće je ostvariti znatne uštede električne energije i/ili novca za rad sustava. Kao primjer, u Hrvatskoj je od 29. ožujka do 27. kolovoza cijena električne energije noću (od 22 do 8 sati ujutro) bila 50% manja u odnosu na cijenu tijekom dana.

U ovom radu analiziran je upravo takav način hlađenja zgrade. U tu su svrhu provedene dvije simulacije, pri čemu prva za period od 22 do 3 sata ujutro uz konstantan protok od 0,25 kg/s i konstantnu temperaturu polaza vode od 7°C. Cilj je održati preko dana temperaturu prostora između 22°C i 25°C. Ukoliko bi temperatura bila viša od 25°C, potrebno je uključiti hlađenje i preko dana. Iz rezultata simulacije prikazanih na Slici 20 vidi se kako temperatura zraka u prostoru tijekom dana ne prelazi 22°C. Stoga, noćno hlađenje je dovoljno za održavanje temperature zraka u prostoru između 22°C i 25°C preko dana i ostvarivanje toplinske ugodnosti.



Slika 20. Profil temperature zraka u prostoru pri konstantnoj temperaturi polaza vode od 7°C

Druga simulacija je provedena za period od 22 do 3 sata ujutro uz konstantan protok od 0,25 kg/s i konstantnu temperaturu polaza vode od 13°C. Povećanjem temperature polaza smanjuju se troškovi za hlađenje vode, odnosno manje energije će se utrošiti ako se voda hladi na 13°C u odnosu na 7°C. Cilj je također održati preko dana temperaturu prostora između 22°C i 25°C. Ukoliko bi temperatura bila veća od 25°C, potrebno je uključiti hlađenje i preko dana. Rezultati simulacije su prikazani na Slici 21 te se vidi kako temperatura zraka u prostoru tijekom dana ne prelazi 23,5°C. Kao i u prethodnoj simulaciji, noćno hlađenje je dovoljno da održava temperaturu zraka u prostoru između 22°C i 25°C. Razlika između prvog i drugog slučaja je što je u drugome slučaju značajnija ušteda energije zbog veće temperature polaza vode od 13°C.



Slika 21. Profil temperature zraka u prostoru pri konstantnoj temperaturi polaza vode od 13°C

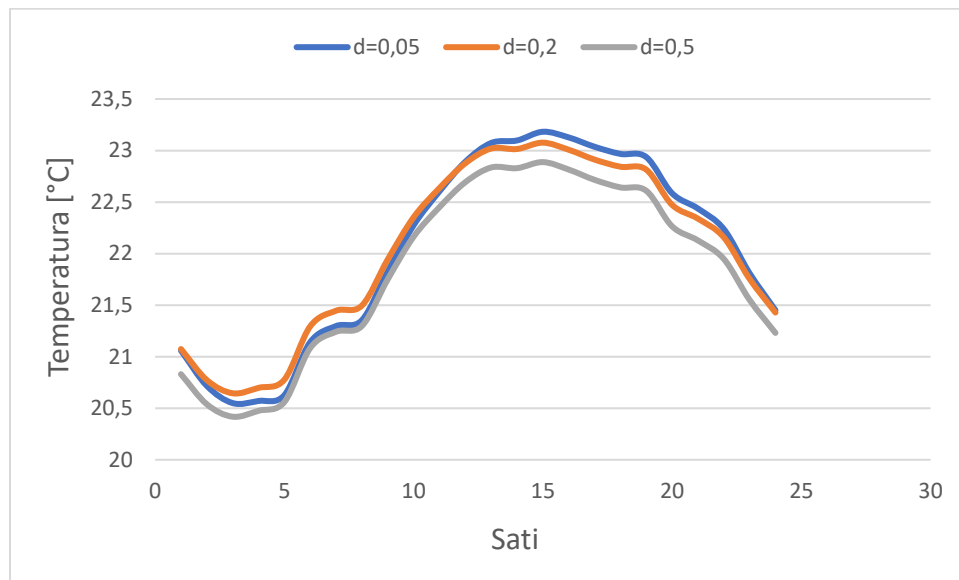
8. OPTIMIZACIJA KOLIČINE BETONA

Cilj ovog rada je optimizacija masivnosti zgrade. Masivnost, kako je prethodno pokazano, ima velik utjecaj na sadržanu energiju zgrade. Provedenim analizama određena je debljina betona pri kojoj neće doći do velikih iznosa sadržane energije, a traženi parametri prostora će biti zadovoljeni. Cilj je ostvariti traženu unutarnju temperaturu zraka, a da pritom troškovi energije ostanu što manji. Na promatranoj zgradi je provedena simulacija noćnog režima hlađenja (od 22 do 3 sata ujutro) za različite debljine betona vanjskih i pregradnih zidova. Temperatura polaza vode je konstantna i iznosi 13°C kao i protok vode koji iznosi 0,25 kg/s.

Tri slučaja prema kojima je provedena simulacija se odnose na debljinu betona od 0,05 m, 0,2 m i 0,5 m. Na Slici 22 vide se tri profila temperature zraka u prostoru za sva tri slučaja. Može se primjetiti kako u sva tri slučaja ne dolazi do značajne promjene temperature zraka u prostoru te ona ne prelazi 23,5°C. Time je zadovoljena toplinska ugodnost, ali i ostvarena ušteda na energiji potrebnoj za hlađenje.

Zaključuje se kako promjenom debljine betona vanjskih i pregradnih zidova ne dolazi do značajnih promjena temperature zraka u prostoru jer ti zidovi ne služe kao primaran spremnik rashladne energije. Bitno je zamijetiti kako najveću ulogu u akumulaciji rashladne energije

predstavlja pod u koji su položene cijevi podnog hlađenja. Iz grafa je vidljivo kako se u zgradi sa zidovima od 0,5 m održavaju najniže temperature. U zgradi sa zidovima od 0,05 m dolazi do brzog hlađenja noću, ali i brzog zagrijavanja preko dana.



Slika 22. Profil temperature zraka u prostoru promjenom debljine betona vanjskih i pregradnih zidova

9. ZAKLJUČAK

U radu je provedena optimizacija toplinske mase za korištenje školske zgrade kao pasivnog toplinskog spremnika. Kako je osnovni materijal za izgradnju zgrade beton, a njezina korisna površina iznosi 1568 m^2 , provedena je analiza sadržane energije. Sadržana energija predstavlja energiju koja je utrošena u svim procesima prilikom izgradnje zgrade. Ona obuhvaća skup energija koje su potrebne za obradu, proizvodnju, transport i isporuku materijala od kojih je zgrada izgrađena. U svrhu ovog rada, analizirana je sadržana energija betona vanjskih i pregradnih zidova te poda kao i izolacije vanjskih zidova. Na temelju provedenih analiza, ukupna sadržana energija betona iznosi $296\,368\,769 \text{ kWh}$, dok izolacijskog sloja iznosi $13\,108\,757 \text{ kWh}$. Model zgrade opisan je prema podacima Ministarstva graditeljstva i prostornoga uređenja za referentnu obrazovnu zgradu gotovo nulte potrošnje energije (nZEB) za kontinentalnu Hrvatsku s meteorološkim podacima za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb. Provedbom dinamičkih simulacija u računalnom programu TRNSYS, dobiveni su podaci potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade koji iznose $55,5 \text{ kWh/m}^2$ i 23 kWh/m^2 . Kada bi se usporedila sadržana energija sa potrebnom energijom za grijanje i hlađenje pomnoženom sa površinom zgrade, vidi se kako je sadržana energija za nekoliko redova veličine veća. Na temelju dobivenih potreba za grijanje i hlađenje, u radu je predviđeno hlađenje zgrade pomoću vodenog sustava u podu. S obzirom da se opterećenje u svakom satu preko dana mijenja, potrebno je regulirati predanu rashladnu energiju, a što se u sustavu podnog hlađenja najčešće radi promjenom temperature polaza vode (pri konstantnom protoku vode). Za karakterističan dan, simulacijom u TRNSYS-u, dobivene su temperature polaza vode za svaki sat u danu. Nakon toga, zbog manje cijene električne energije, hlađenje je postavljeno samo tijekom noćnih sati. Cilj optimizacije KGH sustava je uz što manje resurse/troškove postići tražene uvjete u prostoru te ostvariti toplinsku ugodnost. Pretpostavljena je tražena temperatura u prostoru između 22°C i 25°C . Provedenim simulacijama, uz konstantnu temperaturu polaza vode od 7°C i protokom vode od $0,25 \text{ kg/s}$, pokazano je kako se zgrada može dovoljno ohladiti preko noći u razdoblju od 22 do 3 sata ujutro. Time je toplinska ugodnost zadovoljena te dolazi do velikih smanjenja troškova energije i/ili novca za rad sustava. Kako je tema ovog rada optimizacija toplinske mase, za noćni režim hlađenja je napravljena usporedba tri slučaja hlađenja sa različitim debljinama betona. Debljine betona koje su uzete u analizi su $0,05 \text{ m}$, $0,2 \text{ m}$ te $0,5 \text{ m}$. Na temelju provedene analize dobiveni su profili temperature zraka u prostoru

za različite debljine betona vanjskih i pregradnih zidova. Time je pokazano kako vanjski i pregradni zidovi ne sudjeluju pri akumulaciji energije na jednak način kao i pod. Za pravilan rad sustava najbitnija je masivnost poda u kojemu se nalaze cijevi podnog hlađenja. Pod dovoljne debljine služi kao pasivni spremnik energije i njegova masivnost je ključna pri izgradnji zgrade. Noćnim režimom hlađenja dolazi do velikih ušteda električne energije za rad sustava. Prema analizama može se zaključiti kako je debljina betona od 0,05 m dovoljna za održavanje tražene temperature zraka u prostoru, a time pada vrijednost sadržane energije. U tome slučaju će vrijednost sadržane energije također biti manja jer će se proizvoditi manje armiranog betona za izgradnju zgrade.

10. LITERATURA

1. red.prof.art. Ljubomir Mišćević, dipl.ing.arh., ovl.arh., Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, Zavod za arhitekturu: Rekonstrukcija i dogradnja Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu, Zagreb, 2019.
2. Pal Borjesson, Leif Gustavsson: Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives, Sweden, 1999.
3. Richard Haynes: Embodied Energy Calculations within Life Cycle Analysis of Residential Buildings, 2010 (Revised 2013)
4. Marco Aurelio Gonzales Stumpf: A case study about embodied energy in concrete and structural masonry buildings, Sao Leopoldo, Brasil, 2014.
5. Jamie Goggins, Colleague of Engineering and Informatics, Nacional University of Ireland, Galway: The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland, 2010.
6. <http://mima.info/about-mineral-wool/sustainability/>
7. TRNSYS 17 Documentation (2012 cop.). Multizone Building Modeling with Type56 and TRNBuild (Volume 5). Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. [34] Giglioli N., Saltelli A. (2011). SIMLAB – Software Package for Uncertainty and Sensitivity Analysis. Ispra, Italy: Institute for Systems Informatics and Safety (Joint Research Centre, European Commission)
8. Matthew Eckelman PhD, NU Civil & Environmental Engineering: Embodied Energy and Carbon (A systems modeling tool for quantifying the total resource inputs and GHG burdens of a particular material), 2012.

9. Chastas P, Theodosiou T, Bikas D: Embodied energy in residential buildings towards the nearly zero energy building: A literature review, *Building and Environment*, 2016.

10. Manish K. Dixit Department of Construction Science, Texas A&M University: Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters
United States, 2017.