

Optimizacija ovojnice zgrade korištenjem dinamičkih simulacija

Sokolić Frigula, Alojzije

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:235:026091>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-10**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Alojzije Sokolić-Frigula

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Student:

Alojzije Sokolić-Frigula

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentorici doc.dr.sc Tei Žakuli na vremenu, trudu i svim savjetima koje mi je dala i koji su mi pomogli da napišem ovaj rad. Također, hvala ko-mentor Borutu Omerzu i asistentu Nikoli Bađunu na svim savjetima i pomoći u korištenju računalnih alata.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom cijelog studija.

Alozije Sokolić-Frigula



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite



Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodostrojarski

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Alojzije Sokolić Frigula** JMBAG: **0035211427**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija ovojnice zgrade korištenjem dinamičkih simulacija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The optimisation of building envelope using dynamic simulations**

Opis zadatka:

Cilj rada je analiza i optimizacija ovojnice postojeće zgrade javne namjene u Hrvatskoj Kostajnici, a u svrhu smanjenja godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje. Za analizu dinamičkog odziva te potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade potrebno je izraditi energijski model u računalnom programu TRNSYS. U radu je potrebno odrediti potrebnu godišnju energiju za grijanje i hlađenje kroz optimizaciju debljine izolacije, svojstava prozora te zasjenjenja. Konačno rješenje treba težiti konceptu zgrade gotovo nulte energije (nZEB) sukladno Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama.

Rad treba sadržavati:

- opis postojećeg stanja zgrade,
- opis korištenog računalnog alata,
- opis metode i rezultata optimizacije,
- usporedbu potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje između početnog i konačnog (optimiziranog) rješenja,
- energijski model početnog i konačnog rješenja u računalnom programu TRNSYS.

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

Zadatak zadan:

6. svibnja 2021.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	6
2. POSTOJEĆE STANJE ZGRADE	2
2.1. Toplinsko zoniranje	5
3. OPIS KORIŠTENOG RAČUNALNOG ALATA	7
3.1. Izrada modela višezonske zgrade u korisničkom sučelju TRNBuild	7
3.1.1. Pogonski režimi.....	10
3.2. Definiranje i pokretanje simulacije u komponenti Simulation Studio	14
4. OPIS METODE I REZULTATA OPTIMIZACIJE	17
4.1. Energijski proračun postojećeg stanja zgrade	18
4.2. Postupak optimizacije vanjske ovojnice zgrade	21
4.2.1. Energijski zahtjevi nakon ugradnje novih prozora.....	21
4.2.2. Energijski zahtjevi nakon ugradnje toplinske izolacije	33
4.2.3. Utjecaj zasjenjenja na energijske zahtjeve	40
4.2.4. Usporedba početnog i konačnog stanja ovojnice zgrade	46
5. ZAKLJUČAK	48
6. LITERATURA	51

POPIS SLIKA

Slika 1.	Postojeće stanje zgrade	3
Slika 2.	Podjela prostorija zgrade u toplinske zone	6
Slika 3.	Primjer definirane toplinske zone u sučelju TRNBuild	9
Slika 4.	Podsučelje Wall Type Manager s definiranim slojevima zidova.....	10
Slika 5.	Prikaz dnevnog rasporeda	12
Slika 6.	Prikaz tjednog rasporeda.....	12
Slika 7.	Određivanje pogonskog režima grijanja i hlađenja.....	13
Slika 8.	Prikaz povezanih komponenti modela u sučelju Simulation Studio.....	16
Slika 9.	Potrebna godišnja energija za grijanje i hlađenje zgrade	19
Slika 10.	Tarifne stavke (cijene) za kategoriju poduzetništvo [4].....	20
Slika 11.	Potrebna isporučena el. energija i pogonski trošak postojećeg stanja zgrade	21
Slika 12.	Shema djelovanja 2-izo stakla [5].....	22
Slika 13.	Usporedba potrebne energije između jednostrukih prozora i 2-izo prozora.....	24
Slika 14.	Usporedba isporučene el. energije i pogonskih troškova zgrade s jednostrukim prozorima i 2-izo prozora.....	25
Slika 15.	Usporedba potrebne energije između prozora s jednostrukim staklom i 3-izo prozora	26
Slika 16.	Usporedba isporučene el. energije i pogonskih troškova između prozora s jednostrukim staklom i 3-izo prozora	27
Slika 17.	Slojevi fasade i potrebni elementi za pravilno postavljanje mineralne vune [8].....	35
Slika 18.	Potrebna energija za grijanje za referentno stanje i stanja ovojnice s 3-izo prozorima i različitim debljinama toplinske izolacije	37
Slika 19.	Potrebna energija za hlađenje za referentno stanje i stanja ovojnice s 3-izo prozorima i različitim debljinama toplinske izolacije	38
Slika 20.	Usporedba potrebne energije po mjesecima prije i nakon energetske obnove ovojnice	40
Slika 21.	Vrijednosti Sunčevog zračenja — sjever	41
Slika 22.	Vrijednosti Sunčevog zračenja — istok.....	42
Slika 23.	Vrijednosti toplinskog zračenja — jug	42
Slika 24.	Vrijednosti Sunčevog zračenja — zapad	43
Slika 25.	Usporedba postojećeg/referentnog stanja i konačnog stanja ovojnice zgrade	47
Slika 26.	Usporedba pogonskih troškova između početnog i konačnog stanja ovojnice.....	47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Neto korisna površina zgrade.....	2
Tablica 2. Fizika zgrade	4
Tablica 3. Ulazni parametri energijskog modela	11
Tablica 4. Ulazni i izlazni parametri dinamičke simulacije.....	15
Tablica 5. Podaci o prozorima	23
Tablica 6. Procjena cijene ugradnje novih prozora [6]	23
Tablica 7. Izračun investicijskog troška za izo prozore	28
Tablica 8. Izračun PPI za izo prozore	32
Tablica 9. Projektne vrijednosti nekoliko toplinsko-izolacijskih materijala [1].....	34
Tablica 10. Izračun površine koju zauzima mineralna vuna.....	35
Tablica 11. Procjena izračuna investicijskog troška postavljanja toplinske izolacije (mineralne vune) [6].....	36
Tablica 12. Izračun PPI kada je postavljena toplinska izolacija	39
Tablica 13. Ključne vrijednosti Sunčevog zračenja za sve orijentacije	44
Tablica 14. Rezultati optimizacije potrebne energije pomoću zasjenjenja	45

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	površina
c_p	J/kgK	toplinski kapacitet
d	m	debljina
g	-	stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje
H	m	visina
U_g	W/m^2K	koeficijent prolaza topline stakla
U_f	W/m^2K	koeficijent prolaza topline okvira prozora
V	m^3	volumen
ρ	kg/m^3	gustoća
λ	W/mK	toplinska provodnost

SAŽETAK

U ovome je radu opisan postupak i prikazani su rezultati optimizacije vanjske ovojnice zgrade javne namjene u Hrvatskoj Kostajnici. Zgrada je trenutačno energetske vrlo neučinkovita te je s ciljem povećanja energetske učinkovitosti i približavanja konceptu zgrade gotovo nulte energije izrađen energijski model u računalnom programu TRNSYS. Energijskim su modelom izračunate godišnje satne vrijednosti te godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje. Postojeće stanje zgrade poslužilo je kao referentna točka od koje je započeo proces optimizacije vanjske ovojnice. Za potrebe ovog rada, kao sustav proizvodnje toplinske i rashladne energije pretpostavljena je dizalica topline zrak-voda. Korištenjem faktora grijanja i hlađenja dizalice topline te cijene električne energije precizno su izračunati pogonski troškovi. Prvi korak optimizacije analizirao je zamjenu dotrajalih, postojećih prozora s novim prozorima s dva ili tri stakla, čime se postigla značajna ušteda energije. Sljedeći je korak bio, uz nove prozore, postavljanje toplinske izolacije na vanjske zidove zgrade. U usporedbi s početnim stanjem, toplinska izolacija i novi prozori omogućuju ukupnu godišnju uštedu energije za grijanje od 78,3%, no istovremeno uzrokuju povećanje potrebne energije za hlađenje za 42,1% zbog svojstva toplinske izolacije da zadržava toplinu unutar prostorija. U posljednjem je koraku modeliran sustav zasjenjenja čime se pokazalo da takav sustav značajno utječe na potrošnju energije i može pridonijeti u daljnjim uštedama. Sustav zasjenjenja najviše je utjecao na smanjenje potrebne energije za hlađenje, tako da je u konačnici kombinacija toplinske izolacije i novih prozora sa zasjenjenjem rezultirala smanjenjem ukupne potrebne energije u iznosu od 63%, odnosno smanjenjem godišnje isporučene električne energije u iznosu od 65,8%, što znači da su pogonski troškovi smanjeni za 60,6%. Period povrata investicije iznosi 139 godina.

Ključne riječi: optimizacija ovojnice, energijski model, nZEB, TRNSYS, energetska obnova

SUMMARY

This paper describes the procedure and results of the building envelope optimization of a public building in Hrvatska Kostajnica. The building is very energy inefficient in its current condition. In order to make it energy efficient and closer to the concept of the nearly-zero energy building (nZEB), an energy model of the building has been created using the computer program TRNSYS®. The energy model was used to calculate hourly and annual heating and cooling energy needs. The existing condition of the envelope and current energy needs were a baseline for the optimization. An air-to-water heat pump was assumed to be the production system for heating and cooling energy. Heat pump coefficients of performance and the price/tariff of electricity were used to calculate annual operating expenses of the building. The first step in the optimization of the building envelope was to replace old, inefficient windows with new, double-paned or triple-paned insulated windows. This proved to be very energy efficient, resulting in substantial energy savings and savings in operating costs. The next step was to add thermal insulation on external walls in addition to the new windows. The combination of thermal insulation and new windows have resulted in even greater energy savings and the reduction in operating costs. Compared to the baseline, the annual heating need was reduced by 78,3%. However, the annual cooling need increased by 42,1% because the thermal insulation effects prevented the heat from escaping the building. As the last step, a shading system has been implemented, which also affected the energy needs. Specifically, it has significantly reduced the annual cooling needs. In conclusion, the total energy need for the building was reduced by 63% and the delivered (electrical) energy was reduced by 65,8%. Furthermore, the annual operating expenses were reduced by 60,6% and the return of investment equals to 139 years.

Key words: envelope optimization, energy model, nZEB, TRNSYS, energy renovation

1. UVOD

Energetska učinkovitost zgrada postala je ključan element prilikom izgradnje novih ili energetske obnove postojećih zgrada. Promatramo li zgradu kao cjelinu, može se zaključiti da se radi o vrlo dinamičnom sustavu u kojem se na dnevnoj bazi izmijeni velika količina energije, pogotovo s okolišem. Energija potrebna za grijanje i hlađenje te električna energija su oblici energije koje sustav kao što je zgrada koristi za svoje pravilno i učinkovito djelovanje. Ovojnica zgrade predstavlja materijalnu vezu između zgrade i okoliša, a optimizacijom svojstava ovojnice zgrade može se osigurati velika ušteda energije bez da se pritom naruši toplinska ugodnost ili specifični uvjeti koji se u zgradi, odnosno zatvorenom prostoru, zahtijevaju. Štoviše, optimizacija ovojnice upravo će osigurati i olakšati postizanje traženih uvjeta toplinske ugodnosti uz smanjenje potrošnje energenata.

U ovom radu promatra se zgrada u Hrvatskoj Kostajnici koja je trenutačno energetska neučinkovita i na tom primjeru zgrade je proveden postupak optimizacije ovojnice s ciljem smanjenja godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje. Napravljen je energijski model u računalnom programu TRNSYS pomoću kojeg je izračunata potrebna energija za grijanje i hlađenje za postojeće stanje ovojnice zgrade kao referentno stanje te za različita stanja ovojnice zgrade koja uključuju ugradnju novih prozora i toplinske izolacije. U obzir je uzeto i zasjenjenje toplinskih zona, odnosno prostorija. U procesu optimizacije ovojnice za svaki korak je izračunat period povrata investicije (*PPI*) koji je služio kao kriterij isplativosti obnove s financijskog stajališta pritom uzimajući u obzir uštedu energije. Konačno (optimizirano) rješenje odnosno stanje ovojnice zgrade uspoređeno je s početnim stanjem te je odabrano takvo optimizirano stanje koje ima što manji period povrata investicije. Također, cilj optimizacije je da zgrada u konačnici teži konceptu zgrade gotovo nulte energije (*nZEB* - *eng. nearly zero-energy building*) sukladno Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [1]. Također, za izradu energijskog modela primijenjena je norma HRN EN 52016 [2] koja propisuje toplinsko zoniranje. Pokazano je da se optimizacijom ovojnice postiže vrlo značajna ušteda potrebne energije te da proces ugradnje toplinske izolacije predstavlja nužan korak pri očuvanju energije.

2. POSTOJEĆE STANJE ZGRADE

Zgrada na kojoj se provodi energetska analiza nalazi se u Hrvatskoj Kostajnici. Izgrađena je 1975. godine i pripada najnižem energetsom razredu G, što znači da pripada kategoriji energetske vrlo neučinkovite zgrade bez toplinske izolacije. Zgrada je javne namjene i uglavnom se koristi za rad neprofitnih organizacija i rad građanskih udruga. Također je predviđeno održavanje tribina i plenuma koji bi uvelike pridonijeli poboljšanju standarda građana, poticali sastajanje građana i prezentacije projekata i ideja. Iz navedenih je razloga nužno energetski obnoviti zgradu kako bi se svim korisnicima osigurala toplinska ugodnost i uvjeti rada, a da se pritom gubitci energije i troškovi opskrbe energijom svedu na minimum.

Zgrada ima ukupnu neto korisnu površinu od 543,16 m². Neto korisna površina predstavlja podnu površinu prostora umanjenu za širinu zidova koji je prekidaju. Katnost zgrade je sljedeća: prizemlje, prvi kat, drugi kat, treći kat i potkrovlje. Ukupna neto korisna površina po katovima prikazana je u Tablici 1. Proračun neto korisne površine proveden je prema arhitektonskim nacrtima. Površina potkrovlja nije ubrojana u neto korisnu površinu zbog geometrije i namjene prostora. Stubište također nije uzeto u proračun kao neto korisna površina jer mu je jedina namjena povezivanje katova zgrade. Postojeće stanje zgrade prikazano je na Slici 1. Na zgradi postoje oštećenja na krovu i prozorima, što stvara dodatne toplinske gubitke.

Tablica 1. Neto korisna površina zgrade

	Neto površina [m ²]	Postotak cjeline
Prizemlje	134,1 m ²	24,67%
Prvi kat – Poslovni prostor I	136,28 m ²	25,1%
Drugi kat – Poslovni prostor II	136,28 m ²	25,1%
Treći kat – Poslovni prostor III	136,5 m ²	25,13%
UKUPNO	543,16 m ²	100%



Slika 1. Postojeće stanje zgrade

Za potrebe proračuna energijskog modela opisanog u sljedećem poglavlju, u Tablici 2. je opisana fizika zgrade. Zidovi zgrade se sastoje od jednog ili više slojeva čija su toplinska svojstva vrlo važna prilikom izračuna potrebne energije. Važno je primijetiti da ovojnica zgrade nema slojeva toplinske izolacije, što je energetske iznimno neučinkovito. Svojstva materijala koja nisu mogla biti jednoznačno određena iz postojećeg stanja zgrade preuzeta su iz Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [1].

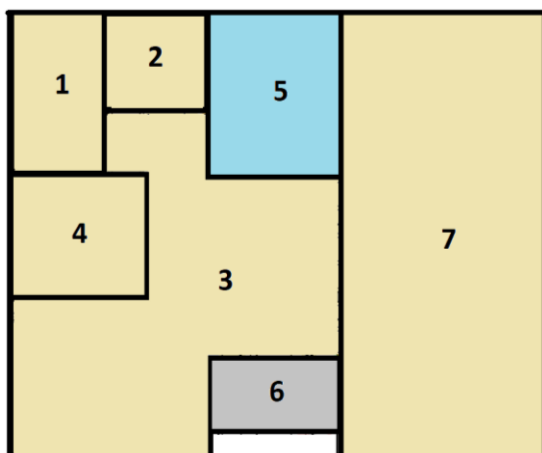
Tablica 2. Fizika zgrade

Pod prema tlu					
Sloj	Materijal	d [cm]	c_p [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]
1	Beton	5	1000	2500	2,5
2	Šuplja opeka	20	700	1000	0,480
Pod					
1	Keramičke pločice	1,2	840	2000	1,31
2	Cementni estrih	4	880	2000	0,3
3	Beton	5	1000	2500	2,5
4	Šuplja opeka	20	700	1000	0,48
Vanjski zid					
1	Puna opeka	20	920	1800	0,67
Pregradni zid					
1	Puna opeka	10	920	1800	0,67
Krov					
1	Cementni estrih	4	880	2000	0,3
2	Beton	5	1000	2500	2,5
3	Hidroizolacija	1	960	1600	0,26
4	Šuplja opeka	20	700	1000	0,48
Prozori					
Koeficijent prolaska topline stakla, U_{st} [W/m ² K]				5,68	
Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, g [-]				0,855	

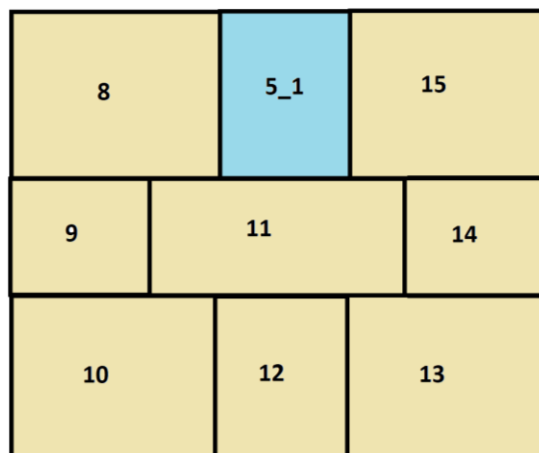
2.1. Toplinsko zoniranje

Toplinska zona je dio zgrade za koji se vrši energetska proračun sa svrhom racionalne uporabe energije i toplinske zaštite [1]. Za potrebe ovog rada, zgrada u Hrvatskoj Kostajnici podijeljena je na toplinske zone prema normi HRN EN ISO 52016. U normi je objašnjen postupak toplinskog zoniranja. Za svaku prostoriju u zgradi, osim namjene, potrebno je definirati zahtjeve kao što su npr. postavna temperatura grijanja i/ili hlađenja. Susjedne prostorije mogu se spajati u jednu toplinsku zonu ako su njihovi zahtjevi za grijanjem i hlađenjem isti, odnosno ako imaju isti režim rada. Također, međusobno se mogu spajati i susjedne prostorije u kojima nema zahtjeva za grijanjem i hlađenjem. Površinom male zone (manje od 5% ukupne neto korisne površine) mogu se spojiti sa susjednom većom čak i ako su im zahtjevi za energijom ili režimi rada različiti [2] .

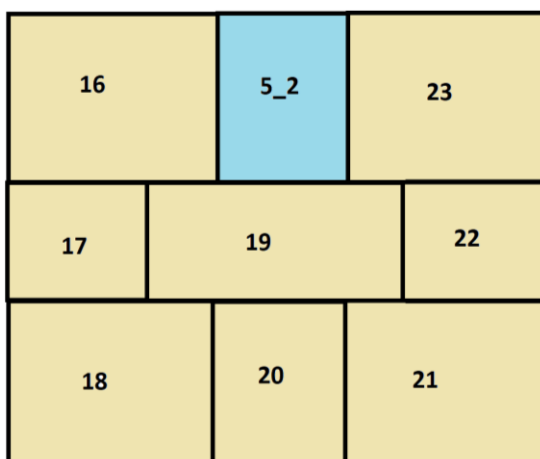
Primjenjujući preporuke iz norme, za analiziranu zgradu je definirana 31 toplinska zona. Veliki udio površine vanjskih zidova zgrade zauzimaju prozori, što je vidljivo iz Slike 1., pa se većina prostorija promatrala kao zasebna toplinska zona zbog toga što kroz prozore ulazi značajna količina Sunčevog zračenja. Budući da toplinske zone imaju različite toplinske dobitke iz okoliša, razlikovat će se potrebna energija za grijanje i hlađenje toplinskih zona iako imaju istu postavnu temperaturu za grijanje i hlađenje. Pregled toplinskih zona prikazan je na Slici 3. Stubište je definirano kao jedna zona jer prolazi kroz sve katove. Potkrovlje je također definirano kao jedna zona. Zona 5 predstavlja stubište i označena je plavom bojom, a zona 6 predstavlja ulaz u zgradu i označena je sivom bojom. Zona 31 predstavlja potkrovlje i označena je također sivom bojom.



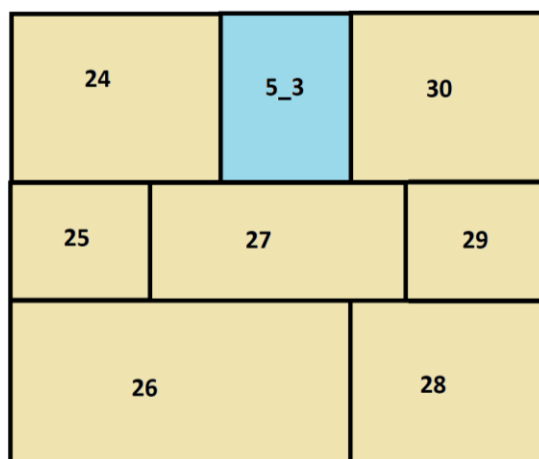
2.a) Prizemlje



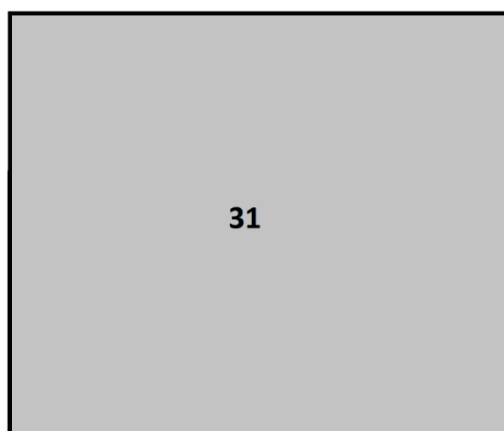
2.b) Prvi kat



2.c) Drugi kat



2.d) Treći kat



2.e) Potkrovlje

Slika 2. Podjela prostorija zgrade u toplinske zone

3. OPIS KORIŠTENOG RAČUNALNOG ALATA

Za energetska proračuna zgrade i izradu energijskog modela korišten je računalni program TRNSYS (Transient System Simulation Tool). TRNSYS se koristi za potrebe simulacija dinamičkih sustava kao što je zgrada u Hrvatskoj Kostajnici. Dinamički sustav je sustav čije se ponašanje mijenja u vremenu. Širok spektar mogućnosti i detaljan, precizan matematički model korišten u TRNSYS-u daju ovom programu mogućnost uporabe za simulacije energetskih sustava raznih kategorija kao što su višezonske zgrade (eng. *multizone building*), vjetroelektrane, solarni i fotonaponski sustavi, sustavi grijanja, hlađenja i ventilacije.

Izrada energijskog modela zgrade je u ovom radu potrebna kako bi se proračunala godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje. Proračun potrebne energije poslužio je kao osnova za optimizaciju ovojnice zgrade. Sukladno tome, dva glavna korisnička sučelja TRNSYS-a koja su korištena pri izradi modela su TRNBuild i Simulation Studio.

3.1. Izrada modela višezonske zgrade u korisničkom sučelju TRNBuild

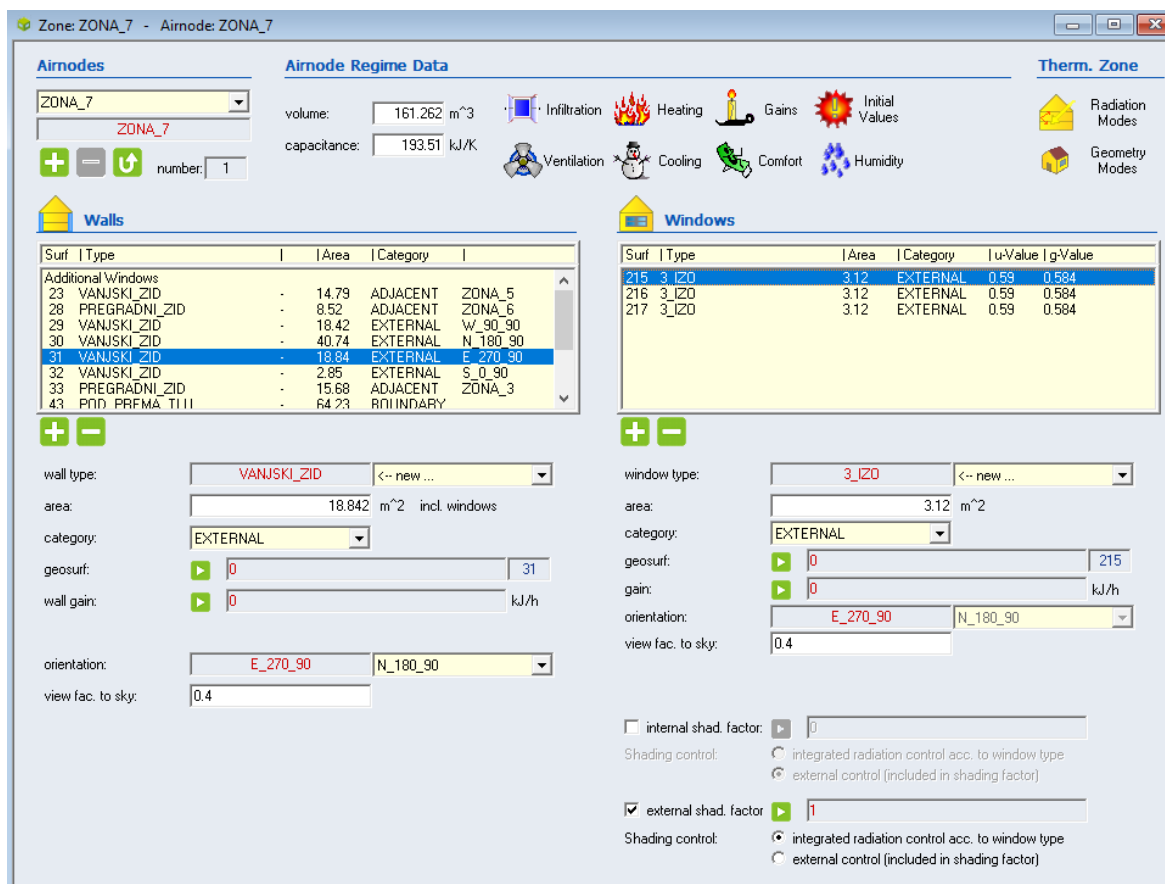
Korisničko sučelje TRNBuild omogućuje detaljno modeliranje višezonske zgrade [3]. Prilikom otvaranja sučelja TRNBuild-a, prvo je potrebno definirati u kojoj se hemisferi nalazi zgrada ili objekt koji želimo modelirati. Zgrada u Hrvatskoj Kostajnici nalazi se u sjevernoj hemisferi. Potom se određuju orijentacije, odnosno strane svijeta prema određenom redoslijedu koji odgovara redoslijedu ulaznih parametara u datoteci s meteorološkim podacima. Model višezonske zgrade temelji se na definiranju i povezivanju toplinskih zona opisanih u Poglavlju 2. Svaka zona sastoji se od zidova i prozora s pripadajućim svojstvima. Podjela zidova na kategorije je sljedeća:

1. Vanjski zid (eng. *external wall*) – zid koji graniči s okolišem. Vanjski zidovi su ključni prilikom optimizacije vanjske ovojnice zgrade jer se na njih stavlja toplinska izolacija.
2. Susjedni zid (eng. *adjacent wall*) – susjedni zid koji jedna zona dijeli s drugom.
3. Unutarnji zid (eng. *internal wall*) – unutarnji zid se definira kada postoji zid unutar jedne toplinske zone, a koji povećava ukupnu akumulacijsku masu zone.
4. Adijabatski zid (eng. *boundary wall*) – zid kroz koji nema prolaza topline, odnosno, koji ne dopušta prolaz topline između zona. U modelu zgrade, podovi prema tlu definirani su kao adijabatski horizontalni zidovi.

Za svaku prethodno definiranu toplinsku zonu potrebno je izračunati volumen zone, površine zidova te odrediti kategoriju i orijentaciju zidova koji ju sačinjavaju. Za svaki zid može se odrediti vidni faktor prema nebu (eng. *view factor to sky*) kojim se opisuje koliki postotak neba je vidljiv s plohe ovisno o njenoj orijentaciji, a utječe na izmjenu topline zračenjem. Općenito se može uzeti vrijednost 0 za podove unutar zgrade, 0.5 za vertikalne vanjske zidove, a za krov kao horizontalnu plohu vrijednost 1. Ukoliko ispred plohe (u ovom slučaju zida) relativno blizu ili daleko postoji neki objekt ili druga ploha koji bi utjecao na vidni kut prema nebu, faktor se može smanjiti ili povećati prema potrebi.

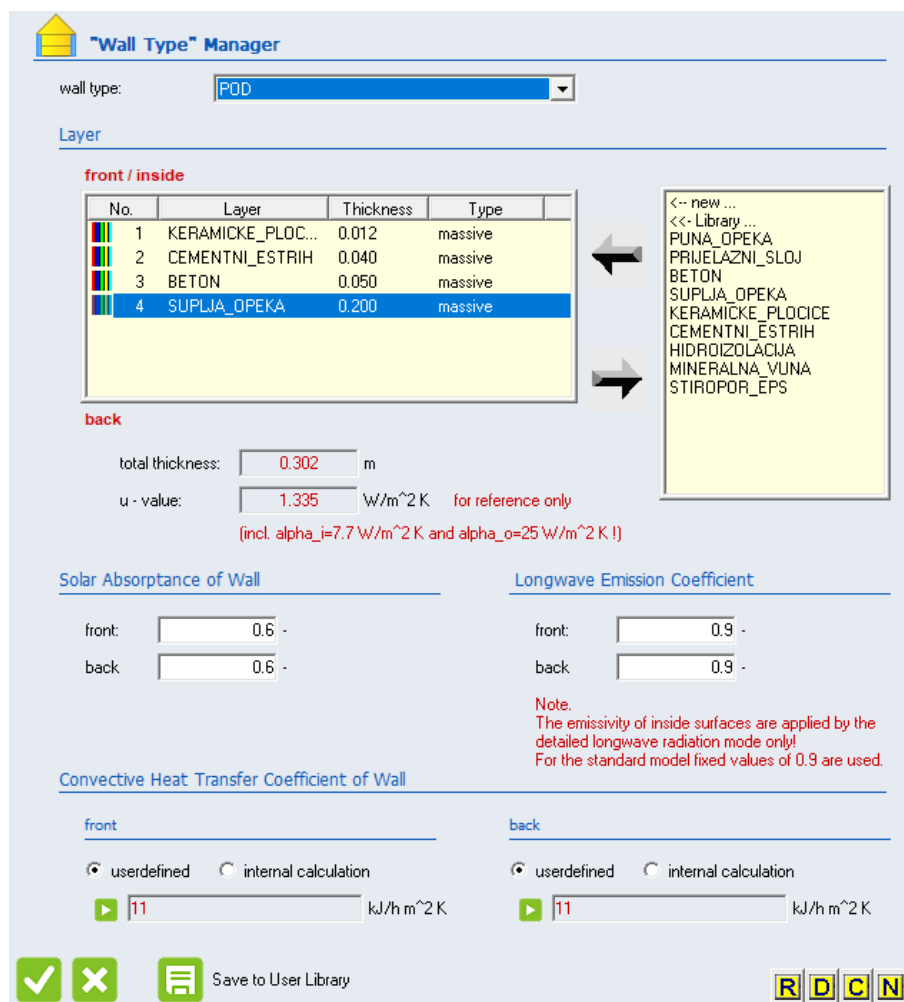
Na zidu se mogu definirati prozori koji u slučaju višezonske zgrade predstavljaju vrlo važan element prilikom optimizacije ovojnice. Slično kao za zidove, prozori se definiraju pomoću površine, kategorije (vanjski prozor ili unutarnji prozor), orijentacije i vidnog faktora prema nebu. Također, za prozore su izrazito važne dvije veličine; U_{st} i g . Veličina U_{st} naziva se koeficijent prolaza topline stakla i opisuje koliko se topline izmijeni u jednoj sekundi po 1 m^2 površine stakla prozora pri razlici temperature od 1 K. Koeficijent prolaza topline je vrlo važan prilikom izračuna toplinskog toka koji se izmijenjuje kroz prozore uslijed razlike temperature između unutrašnjosti zgrade i okoliša. Što je vrijednost U_{st} manja, to je manji prolaz topline za postojeću razliku temperatura. Vrijednost g opisuje koliki udio Sunčevog zračenja prolazi kroz stakla u unutarnji prostor, a koje se zatim akumulira i pretvara u toplinski dobitak prostora. Također, na prozorima se mogu modelirati i definirati faktori zasjenjenja koji mogu biti vanjski ili unutarnji. U praksi se pritom misli na, primjerice, rolete ili žaluzine kao vanjske elemente zasjenjenja ili zavjese kao unutarnje elemente zasjenjenja. Detaljnije objašnjenje i optimizacija ovojnice zgrade pomoću sustava zasjenjenja pokazana je u Poglavlju 4.2.3.

Proces modeliranja vrata može se također odraditi u podsučelju u kojem se modeliraju prozori, međutim za potrebe ovog rada vrata nisu modelirana. Primjer jedne toplinske zone te izgled sučelja prikazan je na Slici 3.



Slika 3. Primjer definirane toplinske zone u sučelju TRNBuild

Kako je opisano u prethodnom poglavlju, svaki zid sastoji se od slojeva koji su modelirani prema Tablici 2. Svojstva zidova definiraju se u podsučelju *Wall Type Manager*. Redoslijed definiranja slojeva ide od unutra prema van, što znači da je toplinska izolacija definirana kao zadnji sloj. Takvim definiranjem toplinske izolacije omogućuje se najbolje iskorištavanje izolacijskih svojstava i ušteda energije. Slika 4. prikazuje definiranje slojeva zidova.



Slika 4. Podsučelje Wall Type Manager s definiranim slojevima zidova

3.1.1. Pogonski režimi

Definiranje pogonskih režima zgrade vrši se preko pripadajućih *Type Manager*-a. TRNBuild ima mogućnost definiranja režima infiltracije, ventilacije, grijanja, hlađenja i načina korištenja, odnosno unutarnjih dobitaka. Svaki pogonski režim može se definirati kao konstantna vrijednost (*Constant*), ulazni podatak iz neke vanjske datoteke (*Input*) ili preko rasporeda (*Schedule*). Ulazne vrijednosti prema kojima su definirani pogonski režimi prikazani su u Tablici 3.

Tablica 3. Ulazni parametri energijskog modela

Parametar	Vrijednost
Infiltracija [ACH]	0,5 h ⁻¹
Raspored korištenja zgrade	7:00 – 18:00 h (5 dana u tjednu)
Projektna temperatura u režimu grijanja	20°C
Projektna temperatura u režimu hlađenja	22°C
Unutarnji toplinski dobici u periodima korištenja zgrade	10 W/m ²
Unutarnji toplinski dobici u periodima kada se zgrada ne koristi	0 W/m ²

Raspored korištenja zgrade definira se u izborniku *Schedule Type Manager*. U vremenu kada se zgrada koristi definiran je raspored za radni dan, pa je od 7:00 – 18:00 h dodijeljena vrijednost 1. Kada se zgrada ne koristi, također je potrebno definirati preostale vremenske intervale, a to su od 18:00 – 24:00 h i od 24:00 – 07:00 h kojima se dodijeljuje vrijednost 0. Preko vikenda se zgrada ne koristi, pa je od 0:00 – 24:00 h također dodijeljena vrijednost 0. Prikaz dnevnog rasporeda prikazan je na Slici 5. Raspored za radni dan i vikend spojeni su u tjedni raspored koji je korišten za definiranje ostalih pogonskih režima. Slika 6. prikazuje tjedni raspored.

Schedule Type Manager

"Schedule Type" Manager

schedule type:

daily weekly

Daily

From	Until	Value
00:00	07:00	0.00
07:00	18:00	1.00
18:00	24:00	0.00

from until value

h:

min:

Slika 5. Prikaz dnevnog rasporeda

Schedule Type Manager

"Schedule Type" Manager

schedule type:

daily weekly

Weekly

Monday:	<input type="text" value="RADNI_DAN"/>	<input type="text" value="RADNI_DAN"/>
Tuesday:	<input type="text" value="RADNI_DAN"/>	<input type="text" value="RADNI_DAN"/>
Wednesday:	<input type="text" value="RADNI_DAN"/>	<input type="text" value="RADNI_DAN"/>
Thursday:	<input type="text" value="RADNI_DAN"/>	<input type="text" value="RADNI_DAN"/>
Friday:	<input type="text" value="RADNI_DAN"/>	<input type="text" value="RADNI_DAN"/>
Saturday:	<input type="text" value="VIKEND"/>	<input type="text" value="VIKEND"/>
Sunday:	<input type="text" value="VIKEND"/>	<input type="text" value="VIKEND"/>

Slika 6. Prikaz tjednog rasporeda

Određivanje pogonskog režima grijanja i hlađenja vrši se u pripadajućem *Type Manager* sučelju. Za postavke grijanja odabire se *Heating Type Manager* i u njemu se određuje projektna temperatura grijanja preko jednadžbe (1):

$$T_{\text{set,ON}} = 40 \cdot X - 20 \quad (1)$$

$T_{\text{set,ON}}$ je projektna temperatura grijanja i iznosi 20°C. Kada je vrijednost uz faktor X jednaka jedinici znači da sustav grijanja radi. Kad je faktor uz X jednak nuli znači da grijanje ne radi pa se jednadžba (1) može napisati kao:

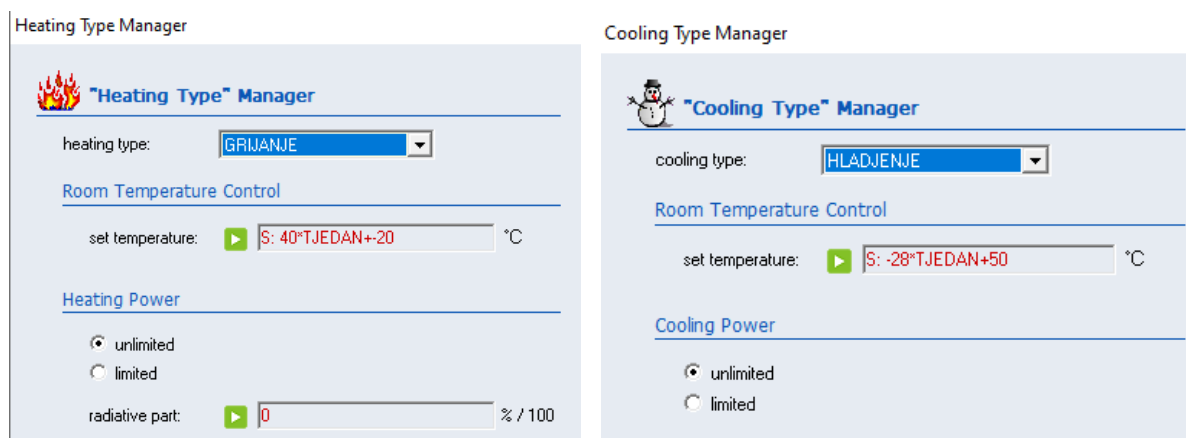
$$T_{\text{set,OFF}} = -20$$

$T_{\text{set,OFF}}$ je temperatura ispod koje će se upaliti grijanje. Vrijednost od -20°C odabrana je kao temperatura koja se neće postići u zgradi, pa je s takvom vrijednošću osigurano da se grijanje neće upaliti tijekom sati kada se zgrada ne koristi.

Definiranje režima hlađenja odvija se na vrlo sličan način u sučelju *Cooling Type Manager* pomoću jednadžbe (2):

$$T_{\text{set,ON}} = -28 \cdot X + 50 \quad (2)$$

Za vrijednost X=1 dobije se tražena projektna temperatura hlađenja $T_{\text{set,ON}}$ koja iznosi 22°C. Za vrijednost X=0 dobije se $T_{\text{set,OFF}}$ koja iznosi 50°C, a ta temperatura se neće postići u zgradi pa se sustav hlađenja neće upaliti tijekom neradnih sati. Prikaz određivanja režima grijanja i hlađenja prikazan je na Slici 7.



Slika 7. Određivanje pogonskog režima grijanja i hlađenja

Snaga dostupna za grijanje i hlađenje postavljena je na neograničenu vrijednost kako bi se izračunala stvarna potrebna energija za grijanje i hlađenje, bez mogućih ograničenja instaliranih ogrjevnih/rashladnih sustava.

Infiltracija se temelji na izmjeni količine zraka po satu (eng. *ACH = air changes per hour*) u prostoriji odnosno toplinskoj zoni. Zrak ulazi kroz zatore na prozorima i kroz vrata, a za modeliranu zgradu infiltracija je definirana u izborniku *Infiltration Type Manager* kao konstantna vrijednost od $0,5 \text{ h}^{-1}$.

Unutarnji toplinski dobici su definirani u izborniku *Gain Type Manager* i dodijeljena je vrijednost od 10 W/m^2 korisne površine za sve zone osim stubišta, hodnika i potkrovlja. Unutarnji toplinski dobici odnose se na osjetnu toplinu od ljudi koji borave u prostorijama te disipaciju topline od rasvjete i uređaja. Zbog jednostavnosti, u proračunu je pretpostavljeno da se unutarnji toplinski dobici dijele na 50% konvektivnih dobitaka i 50% dobitaka zračenjem.

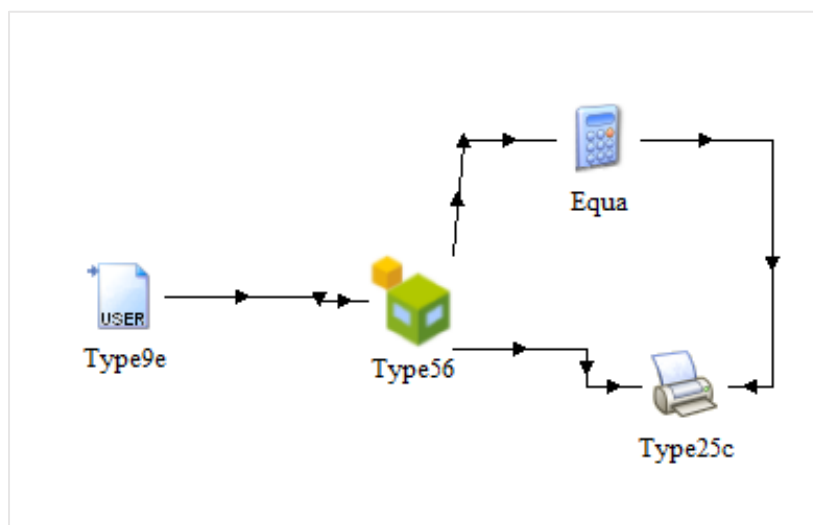
3.2. Definiranje i pokretanje simulacije u komponenti Simulation Studio

Nakon što je definiran model višezonske zgrade potrebno je provesti dinamičke simulacije u svrhu određivanja potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje. Simulation Studio služi za povezivanje više modela i njihovih parametara u cjelinu kako bi se definirao cijeli sustav u kojem se mogu vršiti dinamičke simulacije. Svaka komponenta modela ima više ulaza i izlaza koji služe za povezivanje istih pomoću alata *Link*. Model višezonske zgrade, prethodno definiran u sučelju TRNBuild, učitani je odabirom komponente *Type56* iz biblioteke komponenti. U komponenti *Type56* nalazi se matematički model tj. skup jednadžbi koje služe za izračun određenih izlaznih vrijednosti. Ostali potrebni ulazni podaci za simulaciju su meteorološki podaci koji su učitani pomoću komponente *Type9e* koja je namijenjena za čitanje tekstualnih datoteka. Meteorološki podaci korišteni za potrebe ovoga rada su podaci za tipičnu godinu za Grad Zagreb, a opisani su s 22 vrijednosti navedenih u Tablici 4. Korištenjem ovih ulaznih vrijednosti, matematički model komponente *Type56* izračunava temperature zraka i potrebnu energija za grijanje/hlađenje u pojedinim toplinskim zonama. Rezultati simulacije ispisani su kao tekstualna datoteka koristeći komponentu *Type 25c*. Korištenjem alata *Link* spojene su sve komponente određenim redoslijedom prikazanim na Slici 9. Simulacije su provedene za 8760 h, odnosno za svaki sat u godini, s vremenskim korakom od 1 h.

Tablica 4. Ulazni i izlazni parametri dinamičke simulacije

ULAZNI PARAMETRI			
Oznaka	Opis	Oznaka	Opis
TAMB	Temperatura zraka [°C]	IB_N_180_90	Direktno Sunčevo zračenje na vertikalnu plohu (sjever) [kJ/h*m ²]
RELHUMAMB	Relativna vlažnost zraka [%]	IB_E_270_90	Direktno Sunčevo zračenje na vertikalnu plohu (istok) [kJ/h*m ²]
TSKY	Efektivna temperatura neba za dugovalno zračenje [°C]	IB_S_0_90	Direktno Sunčevo zračenje na vertikalnu plohu (jug) [kJ/h*m ²]
TSGRD	Efektivna temperatura tla za dugovalno zračenje [°C]	IB_W_90_90	Direktno Sunčevo zračenje na vertikalnu plohu (zapad) [kJ/h*m ²]
AZEN	Zenit (kut Sunca)	IB_H_0_0	Direktno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu [kJ/h*m ²]
AAZM	Azimut (kut Sunca)	AI_N_180_90	Upadni kut direktnog Sunčevog zračenja na vertikalnu plohu orijentiranu na sjever
IT_N_180_90	Sunčevo zračenje prema vertikalnoj plohi orijentiranoj prema sjeveru [kJ/h*m ²]	AI_E_270_90	Upadni kut direktnog Sunčevog zračenja na vertikalnu plohu orijentiranu na istok
IT_E_270_90	Sunčevo zračenje prema vertikalnoj plohi orijentiranoj prema istoku [kJ/h*m ²]	AI_S_0_90	Upadni kut direktnog toplinskog zračenja na vertikalnu plohu orijentiranu na jug

IT_S_0_90	Sunčevo zračenje prema vertikalnoj plohi orijentiranoj prema jugu [kJ/h*m ²]	AI_W_90_90	Upadni kut direktnog toplinskog zračenja na vertikalnu plohu orijentiranu na zapad
IT_W_90_90	Sunčevo zračenje prema vertikalnoj plohi orijentiranoj prema zapadu [kJ/h*m ²]	AI_H_0_0	Upadni kut direktnog toplinskog zračenja na horizontalnu plohu
IT_H_0_0	Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu	GRDREF	Faktor refleksije tla od difuznog zračenja s neba
IZLAZNI PARAMETRI			
Oznaka		Opis	
QSENS_ZONA_n (n=1,2,3,...,31)		Potrebna energija za grijanje(-) ili hlađenje(+)	
TAIR_ZONA_n (n=1,2,3,...,31)		Temperatura zraka u toplinskoj zoni	



Slika 8. Prikaz povezanih komponenti modela u sučelju Simulation Studio

4. OPIS METODE I REZULTATA OPTIMIZACIJE

U ovom poglavlju opisana je metoda i prikazani su rezultati optimizacije ovojnice zgrade u Hrvatskoj Kostajnici. Prethodno definirani model zgrade i potrebni ulazni parametri korišteni su za proračun potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje unutar programa Simulation Studio. Prva simulacija korištena je kao referentno stanje jer odgovara potrebnoj energiji postojećeg stanja zgrade. U naknadnim simulacijama prvo je proveden proračun s toplinski izoliranim prozorima te je zabilježena ušteda energije. Za odabranu novu vrstu prozora, na vanjsku ovojnicu zgrade stavljane su različite debljine izolacije te su rezultati proračuna potrebne energije uspoređeni s početnim stanjem. Kao kriterij isplativosti investicije odnosno optimizacije vanjske ovojnice korištena je vrijednost perioda povrata investicije (*PPI*). Vrijednost *PPI* za svaku iteraciju prilikom optimizacije ovojnice izračunata je pomoću sljedeće pojednostavljene jednadžbe (3):

$$PPI = \frac{\text{Investicija}}{\text{Ušteda}} = \frac{I}{A - B} \quad (3)$$

gdje su:

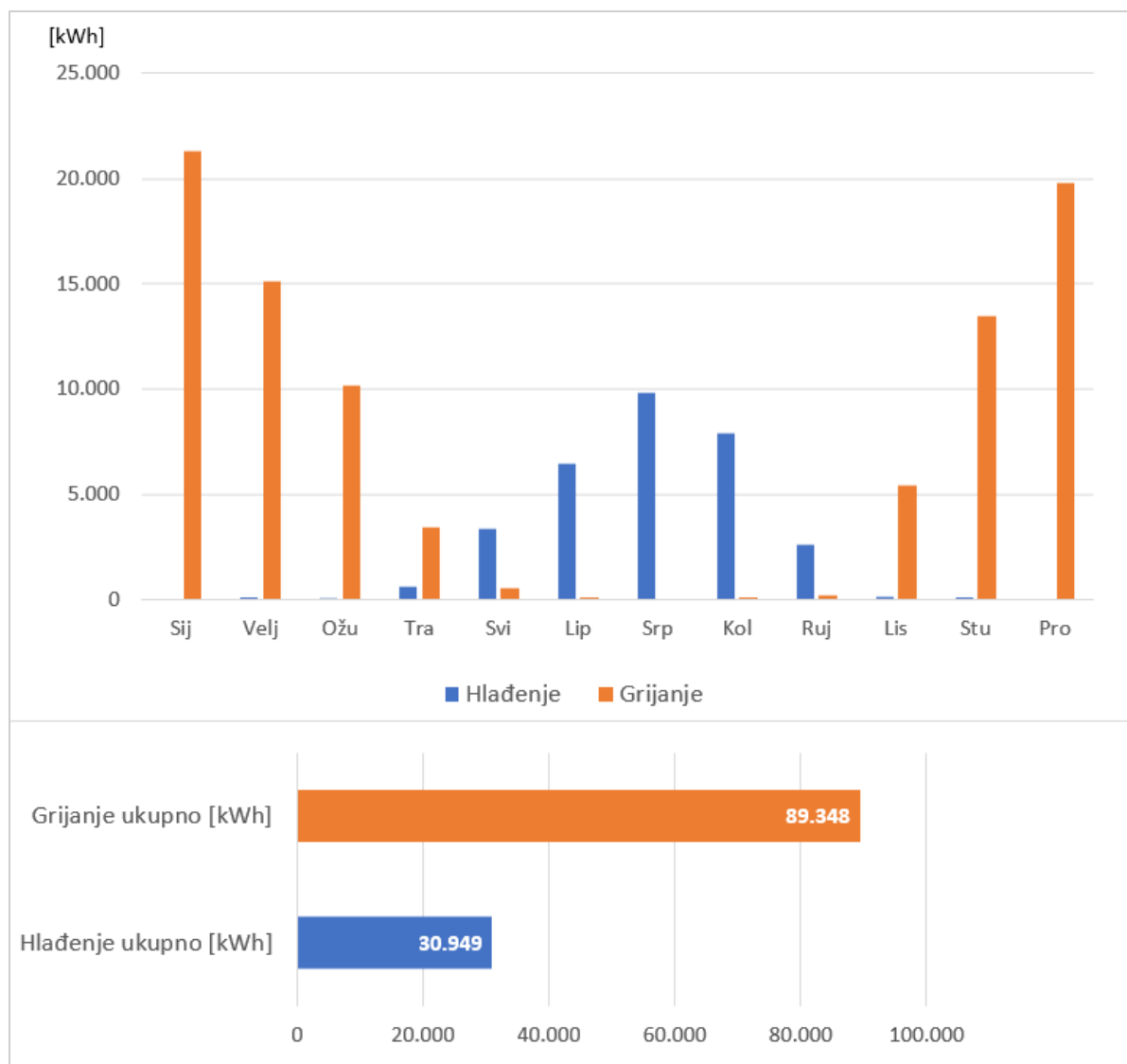
- I – investicijski trošak [kn]
- A – ukupni pogonski trošak postojećeg stanja zgrade [kn/god]
- B – ukupni pogonski trošak optimiziranog stanja zgrade [kn/god]

Za potrebe ovog rada, kao sustav proizvodnje toplinske i rashladne energije pretpostavljena je dizalica topline voda-zrak. Dizalice topline su energetske učinkovite i ekonomični sustavi opskrbe energijom, a također su idealne i za zamjenu postojećih, često dotrajalih sustava grijanja i hlađenja. Rad dizalica topline u režimu grijanja temelji se na crpljenju geotermalne energije iz tla, energije iz vode ili zraka te predajom te toplinske energije u prostor. Osim za grijanje zimi, mogu se koristiti i za hlađenje ljeti s obzirom da imaju mogućnost prelaska radnog ciklusa iz režima grijanja u režim hlađenja i obrnuto. Energetska učinkovitost dizalica topline opisana je pomoću koeficijenta *COP* (eng. *coefficient of performance*) i *EER* (eng. *energy efficiency ratio*). *COP* predstavlja faktor grijanja, a *EER* faktor hlađenja. Oni označavaju omjer toplinskog toka za grijanje ili hlađenje koji isporučuje dizalica topline u odnosu na iznos električne energije utrošene

za taj proces. Odabrane vrijednosti faktora za potrebe ovog rada su $COP=3$ i $EER=4$, što znači da za 1 kW utrošene električne energije ova dizalica topline daje 3 kW toplinske energije u režimu grijanja, odnosno 4 kW rashladne energije u režimu hlađenja. Iz navedenog se može zaključiti da dizalica topline predstavlja smislen izbor koji bi se koristio kao sustav proizvodnje energije koji koristi obnovljivi izvor energije te bi na taj način zgradu približili konceptu zgrade gotovo nulte energije.

4.1. Energijski proračun postojećeg stanja zgrade

Energijski proračun postojećeg stanja zgrade temelji se na definiranom modelu zgrade u prethodnom poglavlju. Stanje zidova i prozora određeno je prema Tablici 2. Prozori su u sučelju TRNBuild definirani kao SINGLE što znači da se sastoje od jednog stakla. Rezultat dinamičke simulacije postojećeg stanja zgrade pokazao je potrebu od 89 348 kWh toplinske energije za grijanje i 30 949 kWh energije za hlađenje, odnosno $164,5 \text{ kWh/m}^2$ za grijanje i 57 kWh/m^2 za hlađenje. Potrebna energija za grijanje i hlađenje po mjesecima te ukupna potrebna energija u godini prikazana je na Slici 9. Ukupna energija potrebna za grijanje je gotovo 3 puta veća od energije potrebne za hlađenje, što je posljedica izostanka toplinske izolacije na vanjskim zidovima i prozorima. Značajan dio topline potrebne za održavanje temperature unutar toplinskih zona odlazi prema vanjskom okolišu kroz stijenke zidova i prozora koji svojom toplinskom provodnošću omogućavaju neprestanu izmjenu topline između toplinskih zona i okoliša. Također, dio se topline troši na zagrijavanje zidova koji imaju veliku masu. Toplinska energija sadržana u zidovima i prvenstveno u zraku unutar toplinskih zona se izmjenjuje provođenjem i konvekcijom s okolišem. Ovaj proces je najistaknutiji preko noći kada je razlika temperature zraka unutar zgrade (toplinskih zona) i vanjskog zraka najveća pa je shodno tome i količina izmjenjene topline najveća. Sva dovedena energija za grijanje ili hlađenje koja na dnevnoj bazi ode u vanjski okoliš može se smatrati izgubljenom odnosno toplinskim gubitcima. Tijekom godine, odnosno najviše tijekom zime u jutarnjim satima prilikom paljenja sustava grijanja potrebno je ponovno zagrijati cijelu zgradu što zahtijeva veliku količinu topline, a na taj se način povećava i pogonski trošak. S druge strane, tijekom ljeta toplinski dobici od Sunca i unutrašnji dobici povećavaju potrebu za hlađenjem.



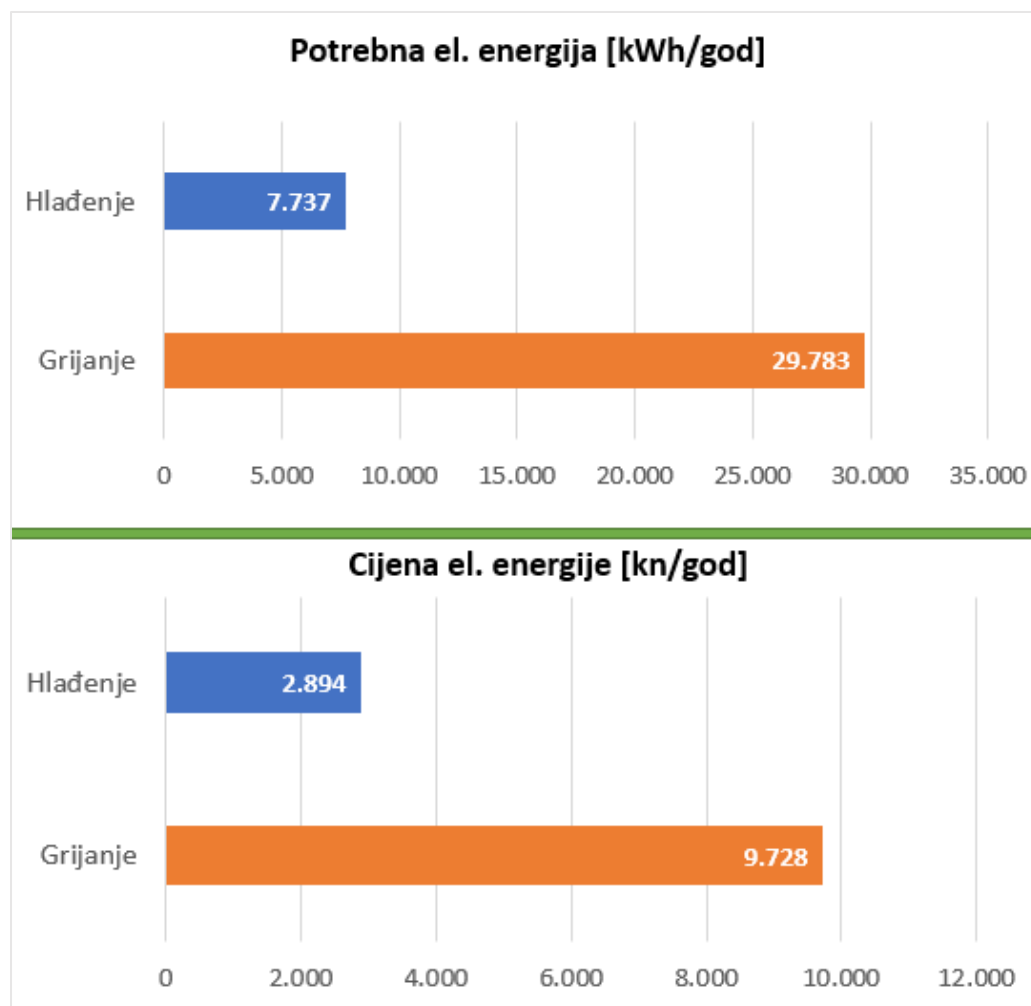
Slika 9. Potrebna godišnja energija za grijanje i hlađenje zgrade

Pogonski trošak na godišnjoj razini određen je na način da je potrebna energija za grijanje i hlađenje preračunata u ekvivalentnu električnu energiju koju potroši dizalica topline kako bi pokrila potrebe za grijanjem i hlađenjem. Zatim je pomoću HEP ODS tarife za poduzetništvo [4] izračunata cijena električne energije. S obzirom da se zgrada koristi od 7:00 do 18:00 h, izabran je plavi tarifni model s jedinstvenom tarifom. Tablični prikaz tarifnih stavki za poduzetništvo prikazan je na Slici 10.

Kategorija kupca		Tarifni model	Radna energija			Obračunska vršna radna snaga	Prekomjerna jalova energija	Naknada za obračunsko mjesto
			JT	VT	NT			
			[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kW]	[kn/kvarh]	[kn/m]
			Tarifne stavke					
			1	2	3	4	5	6
P o d u z e t n i š t v o	Visoki i vrlo visoki napon	Bijeli	-	0,04	0,02	14,00	0,16	68,00
	Srednji napon	Bijeli	-	0,14	0,07	26,00	0,15	66,00
	Niski napon	Plavi	0,31				0,15	41,30
		Bijeli	-	0,35	0,17	-	0,15	41,30
		Crveni	-	0,21	0,10	38,50	0,15	41,30
		Žuti (javna rasvjeta)	0,23	-	-	-	-	14,70

Slika 10. Tarifne stavke (cijene) za kategoriju poduzetništvo [4]

Dijeljenjem potrebne energije za grijanje za faktorom $COP = 3$ izračunato je da dizalica troši 29.783 kWh električne energije godišnje za grijanje. Dijeljenjem potrebne energije za hlađenje za faktorom $EER = 4$ izračunato je da dizalica troši 7.737 kWh električne energije godišnje za hlađenje. Množenjem potrebne godišnje električne energije sa cijenom plavog tarifnog modela od 0,31 kn/kWh izračunat je pogonski godišnji trošak u iznosu od 9.728 kn/god za grijanje i trošak od 2.894 kn/god za hlađenje. Ovo stanje zgrade i pogonski trošak poslužili su kao referentna vrijednost od koje počinje proces optimiziranja ovojnice. Također, ovaj način izračunavanja pogonskih troškova (cijene el. energije) primijenjen je za svaki korak optimizacije ovojnice zgrade. Potrebna isporučena električna energija te pogonski trošak prikazani su na Slici 11.



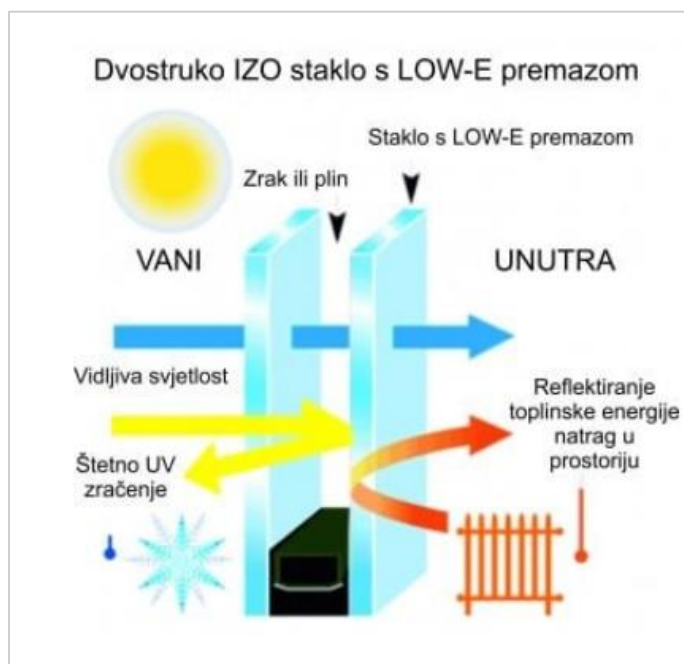
Slika 11. Potrebna isporučena el. energija i pogonski trošak postojećeg stanja zgrade

4.2. Postupak optimizacije vanjske ovojnice zgrade

4.2.1. Energijski zahtjevi nakon ugradnje novih prozora

Prvi korak optimizacije proveden je tako što su prozori od jednog stakla koji imaju neučinkovita svojstva zamijenjeni novim izo prozorima. Izo prozori su prozori koji se sastoje od dvije ili više staklenih ploha, a prostor između njih je hermetički zatvoren te ispunjen zrakom ili plinom koji ima ulogu toplinske izolacije. Promatrajući cjelokupnu konstrukciju prozora, najveći toplinski gubitci se ostvaruju preko stakla jer staklo općenito zauzima najveći udio površine prozora. Danas se izo prozori redovito koriste kako bi se prostori raznih namjena učinili što više

energetski učinkovitima. Osim toplinske izolacije, izo prozori imaju ulogu sprječavanja prodiranja vlage u prostoriju zbog svoje precizne izrade i odličnog brtvljenja pa stoga pružaju i zvučnu izolaciju. Tijekom procesa proizvodnje stakla, uobičajeno se premazuju s Low-E (*eng. low emission*) premazom od metalnog oksida. Taj metalni oksid djeluje s vanjske strane kao filter koji onemogućuje propuštanje štetnih UV zraka u prostoriju, dok s unutrašnje strane djeluje kao reflektor koji reflektira infracrveno (toplinsko) zračenje natrag u prostoriju. Time je moguće smanjiti gubitke topline kroz staklo za 70% u odnosu na klasično jednostruko staklo [5].



Slika 12. Shema djelovanja 2-izo stakla [5]

Za zgradu u Hrvatskoj Kostajnici proveden je energijski proračun s dvostrukim izo (2-izo) i trostrukim izo (3-izo) prozorima. Prije nego što je napravljen energijski proračun zgrade s izo prozorima, bilo je potrebno odrediti broj i dimenzije svih postojećih prozora. Ukupno su definirana 103 prozora čiji su potrebni podaci prikazani u Tablici 5. Nakon provedenih dinamičkih simulacija zabilježena je ušteda energije za jedan i drugi slučaj u odnosu na postojeće stanje zgrade pa je s obzirom na uštedu izračunat period povrata investicije prema kojem je odabrana vrsta prozora za nastavak optimizacije ovojnice zgrade. Procjena investicijskih troškova procesa ugradnje novih prozora izračunati su prema Tablici 6 [6].

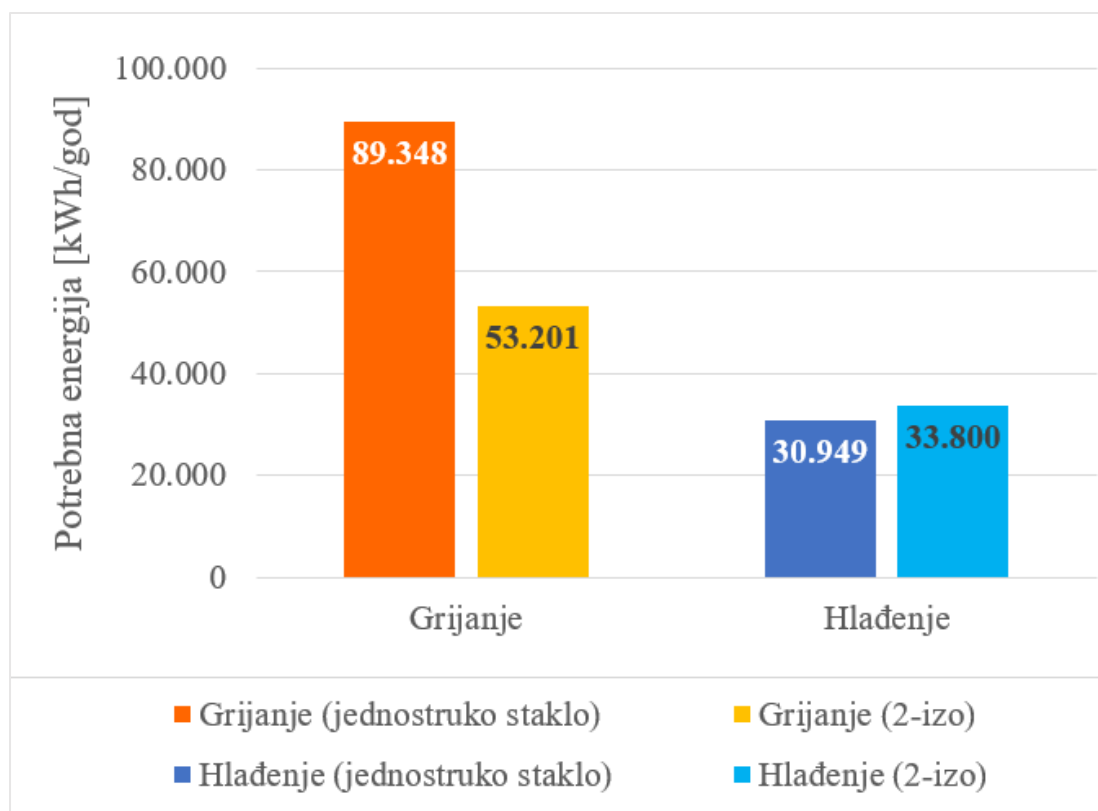
Tablica 5. Podaci o prozorima

Dimenzije [m] (širina x visina)	Površina [m ²]	Broj prozora	Ukupna površina [m ²]
1,25 x 1,95	2,4375	20	48,75
1,30 x 1,95	2,535	10	25,35
1,45 x 1,95	2,8275	8	22,62
1,50 x 1,95	2,925	8	23,4
1,60 x 1,95	3,12	38	118,56
1,45 x 0,8	1,16	8	9,28
1,50 x 1,30	1,95	10	19,5
1,60 x 1,27	2,032	1	2,032
		$\Sigma = 103$	$\Sigma = 269,492$

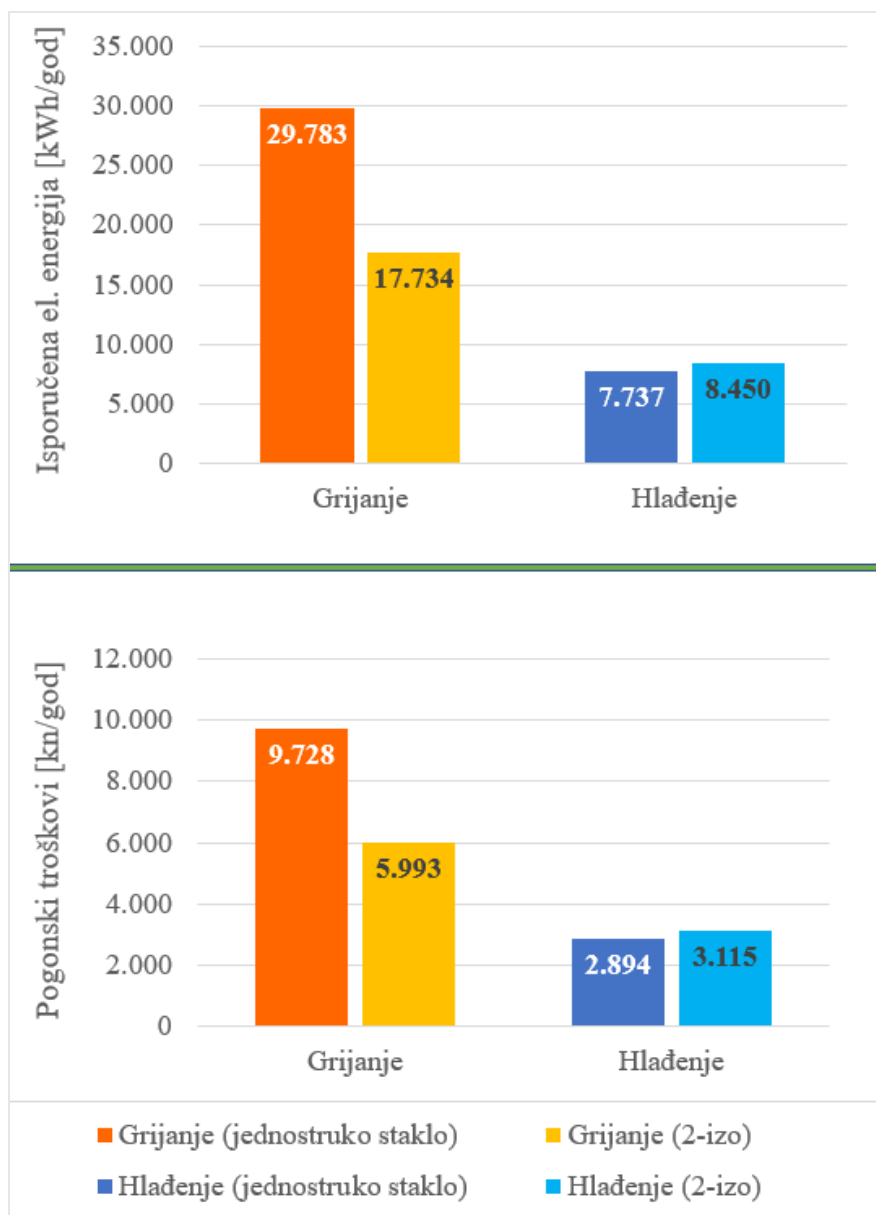
Tablica 6. Procjena cijene ugradnje novih prozora [6]

	Opis	Cijena
1	ALU profil, izrada prozora, $U_f = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$	1525 kn/m ²
	PVC profil, izrada prozora, $U_f = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$	980 kn/m ²
2	Dvostruko izo (2-izo) staklo ($U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, 8-16-6, obostrano laminirano, 1 Low-E premaz)	520 kn/m ²
	Trostruko izo (3-izo) staklo ($U_g = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, 8-16-4-14-6, obostrano laminirano, 2 Low-E premaza)	660 kn/m ²
3	Aluminijske vanjske žaluzine	820 kn/m ²
	Aluminijske rolete	525 kn/m ²
4	Demontaža postojećeg prozora	80 kn/m ²
5	Montaža novog prozora	235 kn/m ²
6	RAL trake montaža	65 kn/m špalete
7	ALU vanjska klupčica	180 kn/m
8	PVC unutarnja klupčica	120 kn/m
9	Obrada unutarnjih špaleta, zidarska obrada	70 kn/m špalete

Za prvi slučaj provedena je dinamička simulacija kojom je proračunat energijski model zgrade kada bi se ugradili 2-izo prozori. Rezultati dinamičke simulacije s 2-izo prozorima i usporedba potrebne energije za grijanjem i hlađenjem s postojećim prozorima prikazana je na Slici 13. Potrebna isporučena električna energija te pogonski trošak prikazan je na Slici 14. Koeficijent prolaza topline stakla odabran za ovaj slučaj iznosi $U_g=1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Unutar sučelja TRNBuild iz biblioteke prozora odabrani su prozori s istim koeficijentom prolaza topline i s vrijednošću $g=0,598$, pri čemu imaju jedan Low-E premaz. Od ukupne površine jednog prozora, pretpostavljeno je da okvir zauzima 15% površine. Međutim, u praksi bi vjerojatno postojale neke razlike kao što su širina međuprostora ili debljina stakla. U konačnici te razlike ne predstavljaju veliku razliku, odnosno ne očekuju se velike razlike u potrebnoj energiji za grijanje i hlađenje zgrade između prozora koji bi se ugradili i onih s kojima je provedena simulacija.



Slika 13. Usporedba potrebne energije između jednostrukih prozora i 2-izo prozora

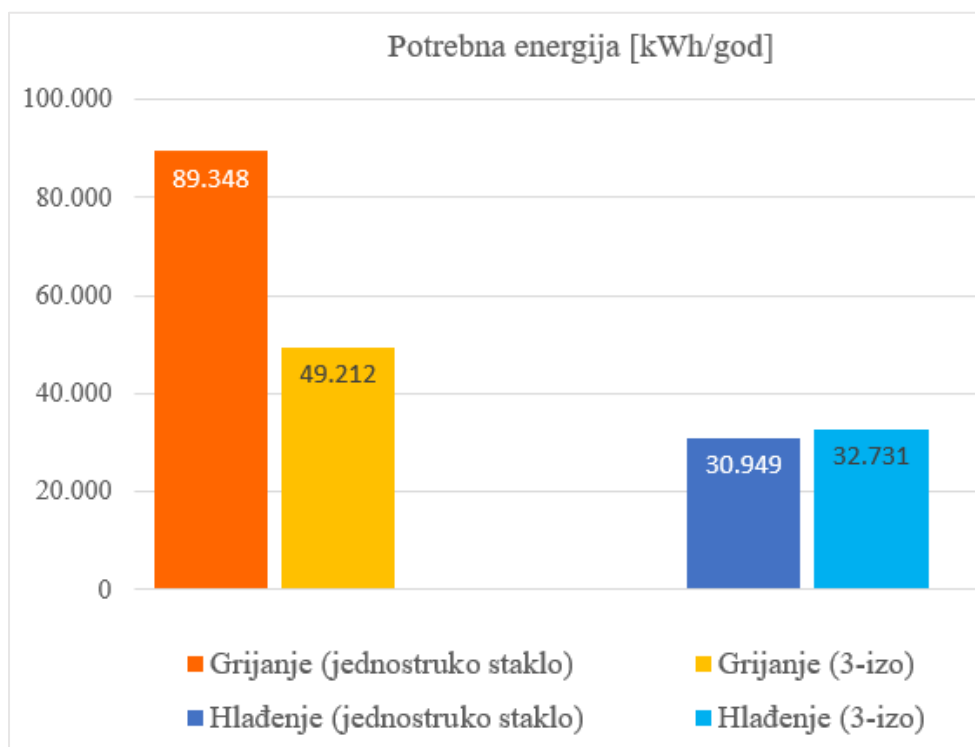


Slika 14. Usporedba isporučene el. energije i pogonskih troškova zgrade s jednostrukim prozorima i 2-izo prozorima

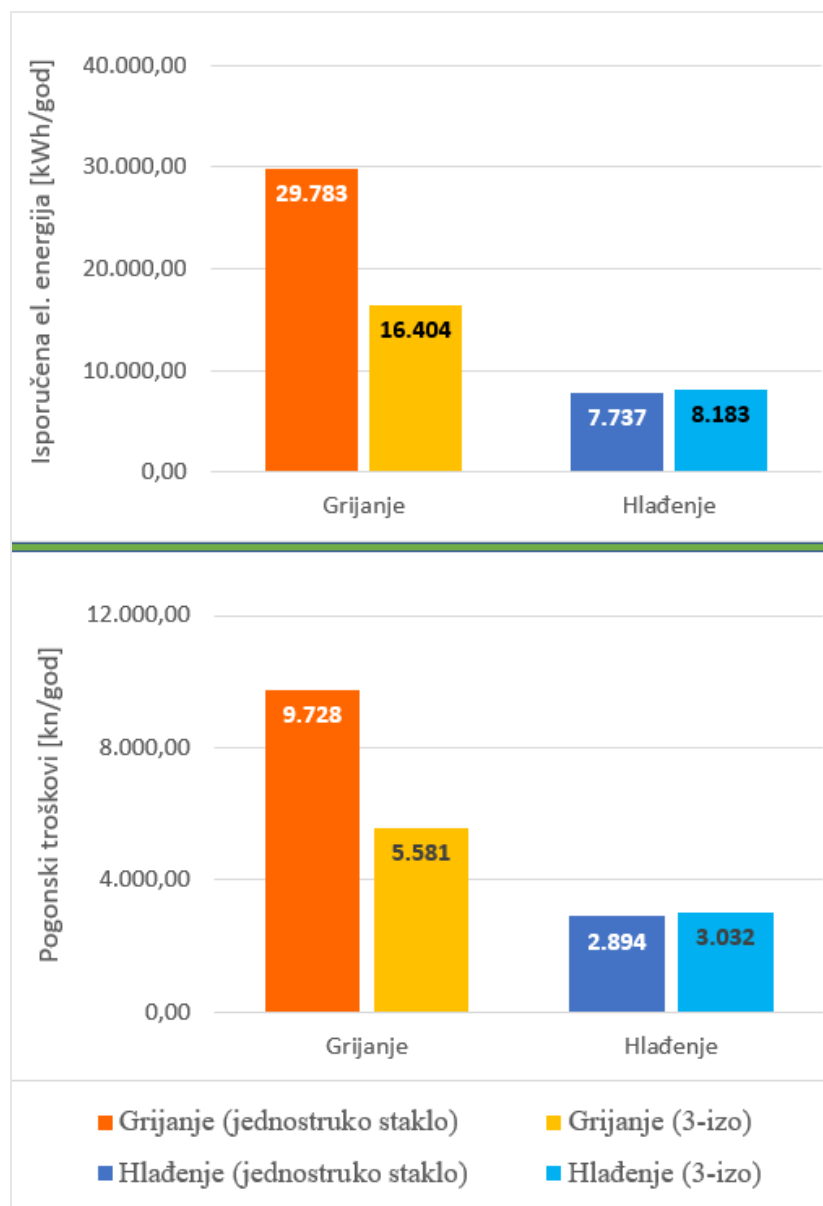
Rezultati dinamičke simulacije pokazali su da se ugradnjom 2-izo prozora može postići vrlo značajna ušteda energije na analiziranoj zgradi. Moguće je uštedjeti potrebnu energiju za grijanje, odnosno isporučenu el. energiju za grijanje u iznosu od 40,5%. Važno je primijetiti kako se potrebna energija za hlađenje povećala. Povećanje potrebne rashladne energije, a sukladno tome i troškova hlađenja može se objasniti time da, kako je prije navedeno, izo prozori imaju ulogu

toplinske izolacije. Naime, toplina iz prostorije neće više prolaziti kroz stijenke 2-izo stakla u onoj mjeri kao kod prozora s jednim staklom bez izolacije, jer će dio topline biti reflektiran natrag u prostoriju (Slika 12.). U konačnici, pogonski trošak nakon ugradnje 2-izo prozora smanjen je u iznosu od 27,8%.

Sljedeća dinamička simulacija je provedena s 3-izo prozorima. Ova vrsta prozora ima 3 stakla odnosno 2 međuprostora ispunjena zrakom ili plinom koji ima ulogu toplinske izolacije. Iz biblioteke prozora u sučelju TRNBuild odabrana je vrsta 3-izo prozora s koeficijentom prolaza topline $U_g=0,59 \text{ W/m}^2\text{K}$ i vrijednosti $g=0,584$ jer je najbližiji referentnim podacima iz Tablice 6. Ova opcija iz biblioteke prozora ima minimalnu razliku koeficijenta prolaza topline od $0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$ što je prihvatljivo. Rezultati dinamičke simulacije pokazali su da 3-izo prozori pružaju još značajniju uštedu od 2-izo prozora što je bilo očekivano. Slika 15. prikazuje usporedbu potrebne energije za grijanje i hlađenje između prozora s jednostrukim staklom i 3-izo prozora. Usporedba potrebne isporučene električne energije i pogonskih troškova prikazana je na Slici 16.



Slika 15. Usporedba potrebne energije između prozora s jednostrukim staklom i 3-izo prozora



Slika 16. Usporedba isporučene el. energije i pogonskih troškova između prozora s jednostrukim staklom i 3-izo prozora

Rezultati dinamičke simulacije pokazuju da se ugradnjom novih 3-izo prozora postiže ušteda isporučene el. energije za grijanje u iznosu od 45% odnosno pogonskom trošku za grijanje od 42,6%. Kod hlađenja, može se uočiti povećanje potrebne energije od 5,8% što uzrokuje povećanje pogonskih troškova hlađenja za 4,8%. Objašnjenje ove pojave je isto kao i kod 2-izo prozora zbog toga što 3-izo prozori imaju svojstvo toplinske izolacije.

Za izračun perioda povrata investicije potrebno je izračunati investicijski trošak za oba slučaja. Investicijski trošak ugradnje novih izo prozora izračunat je prema Tablici 7. Odabran je PVC profil jer je jeftiniji pa će shodno tome i *PPI* biti manji. Cijena montaže brtvenih RAL traka izračunata je na način da se obrađuju sve vanjske i unutarnje špalete. Za cijenu zidarske obrade špaleta uzeto je da se obrađuju vertikalne i gornja špaleta. Špalete su stranice otvora za prozor, a u ovom slučaju radi se o dvije vertikalne i dvije horizontalne špalete. Koristeći podatke iz Tablice 6., procjena ukupnog investicijskog troška za 103 prozora iznosi 614.235 kn za 2-izo prozore i 651.964 kn za 3-izo prozore. Izračun investicijskog troška prikazan je u Tablici 7. Investicijski trošak izračunat je bez PDV-a i bez aluminijskih žaluzina jer će energijski proračun sa žaluzinama biti proveden u Poglavlju 4.2.3.

Tablica 7. Izračun investicijskog troška za izo prozore

Dimenzije: 1,25x1,95m $A=2,4375\text{m}^2$		
	2-izo	3-izo
PVC profil, izrada prozora	2.388,75 kn	2.388,75 kn
IZO staklo	1.267,50 kn	1.608,75 kn
Aluminijske žaluzine	0,00 kn	0,00 kn
Demontaža postojećeg prozora	195,00 kn	195,00 kn
Montaža novog prozora	572,81 kn	572,81 kn
RAL trake montaža	416,00 kn	416,00 kn
AL vanjska klupčica	225,00 kn	225,00 kn
PVC unutarnja klupčica	150,00 kn	150,00 kn
Obrada unutarnjih špaleta	360,50 kn	360,50 kn
UKUPNO	5.575,56 kn	5.916,81 kn
Za 20 prozora UKUPNA cijena	111.511 kn	118.336 kn

Dimenzije: 1,30x1,95m A=2,535m ²		
	2-izo	3-izo
PVC profil, izrada prozora	2.484,30 kn	2.484,30 kn
IZO staklo	1.318,20 kn	1.673,10 kn
Aluminijske žaluzine	0,00 kn	0,00 kn
Demontaža postojećeg prozora	202,80 kn	202,80 kn
Montaža novog prozora	595,73 kn	595,73 kn
RAL trake montaža	422,50 kn	422,50 kn
AL vanjska klupčica	234,00 kn	234,00 kn
PVC unutarnja klupčica	156,00 kn	156,00 kn
Obrada unutarnjih špaleta	364,00 kn	364,00 kn
UKUPNO	5.777,53 kn	6.132,43 kn
Za 10 prozora UKUPNA cijena	57.775 kn	61.324 kn

Dimenzije: 1,45x1,95m A=2,8275m ²		
	2-izo	3-izo
PVC profil, izrada prozora	2.770,95 kn	2.770,95 kn
IZO staklo	1.470,30 kn	1.866,15 kn
Aluminijske žaluzine	0,00 kn	0,00 kn
Demontaža postojećeg prozora	226,20 kn	226,20 kn
Montaža novog prozora	664,46 kn	664,46 kn
RAL trake montaža	442,00 kn	442,00 kn
AL vanjska klupčica	261,00 kn	261,00 kn
PVC unutarnja klupčica	174,00 kn	174,00 kn
Obrada unutarnjih špaleta	374,50 kn	374,50 kn
UKUPNO	6.383,41 kn	6.779,26 kn
Za 8 prozora UKUPNA cijena	51.067 kn	54.234 kn

Dimenzije: 1,50x1,95m A=2,925m ²		
	2-izo	3-izo
PVC profil, izrada prozora	2.866,50 kn	2.866,50 kn
IZO staklo	1.521,00 kn	1.930,50 kn
Aluminijske žaluzine	0,00 kn	0,00 kn
Demontaža postojećeg prozora	234,00 kn	234,00 kn
Montaža novog prozora	687,38 kn	687,38 kn
RAL trake montaža	448,50 kn	448,50 kn
AL vanjska klupčica	270,00 kn	270,00 kn
PVC unutarnja klupčica	180,00 kn	180,00 kn
Obrada unutarnjih špaleta	378,00 kn	378,00 kn
UKUPNO	6.585,38 kn	6.994,88 kn
Za 8 prozora UKUPNA cijena	52.683 kn	55.959 kn

Dimenzije: 1,60x1,95m A=3,12m ²		
	2-izo	3-izo
PVC profil, izrada prozora	3.057,60 kn	3.057,60 kn
2-struko IZO staklo	1.622,40 kn	2.059,20 kn
Aluminijske žaluzine	0,00 kn	0,00 kn
Demontaža postojećeg prozora	249,60 kn	249,60 kn
Montaža novog prozora	733,20 kn	733,20 kn
RAL trake montaža	461,50 kn	461,50 kn
AL vanjska klupčica	288,00 kn	288,00 kn
PVC unutarnja klupčica	192,00 kn	192,00 kn
Obrada unutarnjih špaleta	385,00 kn	385,00 kn
UKUPNO	6.989,30 kn	7.426,10 kn
Za 38 prozora UKUPNA cijena	265.593 kn	282.192 kn

Dimenzije: 1,45x0,8m A=1,16m ²		
	2-izo	3-izo
PVC profil, izrada prozora	1.136,80 kn	1.136,80 kn
2-struko IZO staklo	603,20 kn	765,60 kn
Aluminijske žaluzine	0,00 kn	0,00 kn
Demontaža postojećeg prozora	92,80 kn	92,80 kn
Montaža novog prozora	272,60 kn	272,60 kn
RAL trake montaža	292,50 kn	292,50 kn
AL vanjska klupčica	261,00 kn	261,00 kn
PVC unutarnja klupčica	174,00 kn	174,00 kn
Obrada unutarnjih špaleta	213,50 kn	213,50 kn
UKUPNO	3.046,40 kn	3.208,80 kn
Za 8 prozora UKUPNA cijena	24.371 kn	25.670 kn

Dimenzije: 1,50x1,30m A=1,95m ²		
	2-izo	3-izo
PVC profil, izrada prozora	1.911,00 kn	1.911,00 kn
2-struko IZO staklo	1.014,00 kn	1.287,00 kn
Aluminijske žaluzine	0,00 kn	0,00 kn
Demontaža postojećeg prozora	156,00 kn	156,00 kn
Montaža novog prozora	458,25 kn	458,25 kn
RAL trake montaža	364,00 kn	364,00 kn
AL vanjska klupčica	270,00 kn	270,00 kn
PVC unutarnja klupčica	180,00 kn	180,00 kn
Obrada unutarnjih špaleta	287,00 kn	287,00 kn
UKUPNO	4.640,25 kn	4.913,25 kn
Za 10 prozora UKUPNA cijena	46.403 kn	49.133 kn

Dimenzije: 1,60x1,27m A=3,12m ²		
	2-izo	3-izo
PVC profil, izrada prozora	1.991,36 kn	1.991,36 kn
2-struko IZO staklo	1.056,64 kn	1.341,12 kn
Aluminijske žaluzine	0,00 kn	0,00 kn
Demontaža postojećeg prozora	162,56 kn	162,56 kn
Montaža novog prozora	477,52 kn	477,52 kn
RAL trake montaža	373,10 kn	373,10 kn
AL vanjska klupčica	288,00 kn	288,00 kn
PVC unutarnja klupčica	192,00 kn	192,00 kn
Obrada unutarnjih špaleta	289,80 kn	289,80 kn
UKUPNO za 1 prozor	4.830,98 kn	5.115,46 kn
UKUPNO za svih 103 prozora	614.235 kn	651.964 kn

Tablica 8. Izračun *PPI* za izo prozore

Prozori	Pogonski troškovi	Ušteda	Investicijski trošak	PPI
jednostruki	Grijanje: 9.728 kn Hlađenje: 2.894 kn Ukupno: 12.622 kn (A)			
2-izo	Grijanje: 5.993 kn Hlađenje: 3.115 kn Ukupno: 9.108 kn (B)	3.514 kn	614.235 kn	175 god
3-izo	Grijanje: 5.581 kn Hlađenje: 3.032 kn Ukupno: 8.613 kn (B)	4.009 kn	651.964 kn	163 god

Kada su izračunati pogonski i investicijski troškovi, izračunat je period povrata investicije za oba slučaja. Objedinjeni rezultati simulacija s uštedama i izračunatom vrijednosti *PPI* prikazani su u Tablici 8. Period povrata investicije *PPI* izračunat je po jednadžbi (4). Iz izračunatog se vidi da je *PPI* za 3-izo prozore manji od *PPI* za 2-izo prozore iako je investicijski trošak 3-izo prozora veći. Manji *PPI* za 3-izo prozore se može objasniti time da je ušteda potrebne energije ugradnjom 3-izo prozora veća od 2-izo prozora, što ujedno znači da su manji pogonski troškovi odnosno veća ušteda u usporedbi s jednostrukim prozorima. Prema tome, za nastavak proračuna optimizacije ovojnice zgrade korišteni su 3-izo prozori. Važno je napomenuti kako je period povrata investicije od 163 godine jako dugačak za slučaj kada bi se ugradili samo 3-izo prozori. Stoga je potrebno ispitati utjecaj drugih elemenata uz ugradnju novih prozora prilikom optimizacije ovojnice, jedan od kojih je postavljanje toplinske izolacije na vanjske zidove.

4.2.2. Energijski zahtjevi nakon ugradnje toplinske izolacije

Drugi korak optimizacije vanjske ovojnice zgrade proveden je tako što je napravljen proračun energijskog modela zgrade kada bi se ugradila toplinska izolacija uz odabrane 3-izo prozore. Postavljanje toplinske izolacije se općenito vrši na vanjskoj strani zidova orijentiranih prema okolišu. Također se mogu toplinski izolirati i unutarnji pregradni zidovi, no za potrebe ovog rada uzeta je u obzir samo toplinska izolacija na vanjskoj ovojnici zgrade. Funkcija toplinske izolacije je smanjenje količine topline koja se izmijeni između toplinske zone i okoliša. Zahtjev za materijale koji se postavljaju kao toplinski izolatori je da imaju što manju toplinsku provodnost. Uz svojstvo toplinske izolacije, ovi materijali mogu zaštititi građevinsku konstrukciju od atmosferskih utjecaja (vlage) i pružiti zaštitu od buke. Uobičajeni toplinsko-izolacijski materijali koji se koriste su mineralna vuna, staklena vuna, kamena vuna, ekspanzirani polistiren (EPS), ekstrudirana polistirenska pjena (XPS), poliuretanska pjena (PU), drvena vuna, pluto i sl. [1]. Svojstva nekoliko toplinsko-izolacijskih materijala prikazana su u Tablici 9. Kod energetske obnove zgrada, postavljanje nove ili zamjena postojeće toplinske izolacije neizostavan je element kako bi se zgrada dovela u stanje zadovoljavajuće energetske učinkovitosti. Za potrebe ovog rada, s obzirom da se radi o višestambenoj zgradi javne namjene, kao toplinski izolator odabrana je mineralna vuna. Mineralna vuna je često korištena u svrhu toplinske izolacije, a posjeduje ispitana i pouzdana svojstva kao što je protupožarna i zvučna zaštita te dugotrajnost. Naime, ekspanzirani

polistiren, poznatiji kao stiropor, ima slična toplinsko-izolacijska svojstva mineralnoj vuni, no ima negativno svojstvo brzog gorenja u slučaju požara. Stoga je odabir mineralne vune sigurniji izbor prilikom postavljanja na zgradu. Međutim, nedostatak je taj što mineralnu vunu često treba upariti s drugim materijalima koji imaju bolja hidroizolacijska svojstva (vodonepropusnost, paronepropusnost), a što povećava investicijski trošak [7]. Toplinska svojstva mineralne vune korištena u ovom energijskom modelu i proračunu preuzeta su iz Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [1] prema Tablici 9.

Tablica 9. Projektne vrijednosti nekoliko toplinsko-izolacijskih materijala [1]

Materijal	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/m*K]	Specifični toplinski kapacitet c_p [J/kg*K]	Faktor otpora difuziji vodene pare μ
Mineralna vuna (MW)	10 do 200	0,035 do 0,050	1030	1-1,2
Ekspandirani polistiren (EPS)	12 do 30	0,032 do 0,042	1260	20-100
Ekstrudirana polistirenska pjena (XPS)	25 do 50	0,033 do 0,040	1450	80-200
Drvena vuna (WW)	360 do 460	0,065 do 0,09	1470	3-5

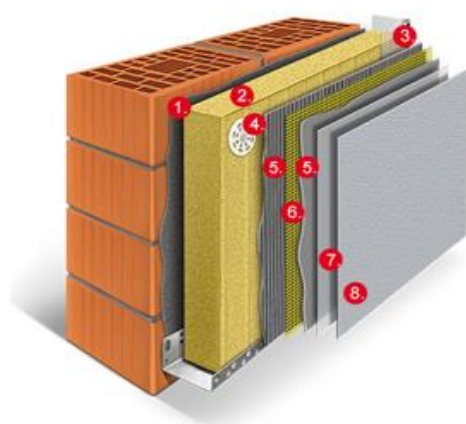
Unutar sučelja TRNBuild, mineralna vuna je postavljena kao zadnji sloj gledano iznutra prema van, što znači da je postavljena kao prvi sloj prema okolišu na vanjskoj strani zida. Takvim postavljanjem toplinske izolacije postiže se maksimalni učinak izolacije, a sukladno tome i ušteda energije. Prije nego što je izračunat investicijski trošak ugradnje mineralne vune, bilo je potrebno izračunati površinu vanjskih zidova na koje se postavlja mineralna vuna. Površina potrebne izolacije je izračunata na jednostavan način, od ukupne površine vanjskog zida zgrade za svaku orijentaciju oduzeta je površina prozora i vanjskih vrata koji se na tom zidu nalaze. Kratki pregled

postupka prikazan je u Tablici 10. Ukupna površina izolacije iznosi 631,13 m². Površina manjih izbočina na zidovima zgrade je zbog jednostavnosti proračuna zanemarena.

Tablica 10. Izračun površine koju zauzima mineralna vuna

Orijentacija zida	Površina zida	Površina prozora	Površina izolacije
Sjever	182,72 m ²	69,42 m ²	113,3 m ²
Istok	190,95 m ²	96,35 m ²	94,6 m ²
Jug	182,72 m ²	38,92 m ²	143,8 m ²
Zapad	190,95 m ²	81,95 m ²	109 m ²
Krov (horizontalno)	170,4 m ²	/	170,4 m ²
UKUPNO	917,74 m²	286,61 m²	631,13 m²

Nakon što je izračunata potrebna površina, sljedeći korak je izračun investicijskog troška prema cjeniku dva proizvođača/ponuđača; RÖFIX i Samoborka. Slika 17. prikazuje slojeve standardnog fasadnog sustava kada se postavlja mineralna vuna tvrtke Samoborka [8]. U konačnici, investicijski trošak nije se puno razlikovao između ove dvije tvrtke pa je za daljnji proračun energijskog modela odabran onaj malo jeftiniji, proizvođača Samoborka. Tablica 11. prikazuje procjenu troška postavljanja fasadnih sustava s uračunatim troškovima radova i najma skela te ukupni investicijski trošak.



- 1 – ljepilo
- 2 – toplinska izolacija
- 3 – profil PVC sa mrežicom
- 4 – pričvrsnice
- 5 – mort za armaturni sloj
- 6 - armirajuća mrežica
- 7 – temeljni premaz
- 8 – završna obrada

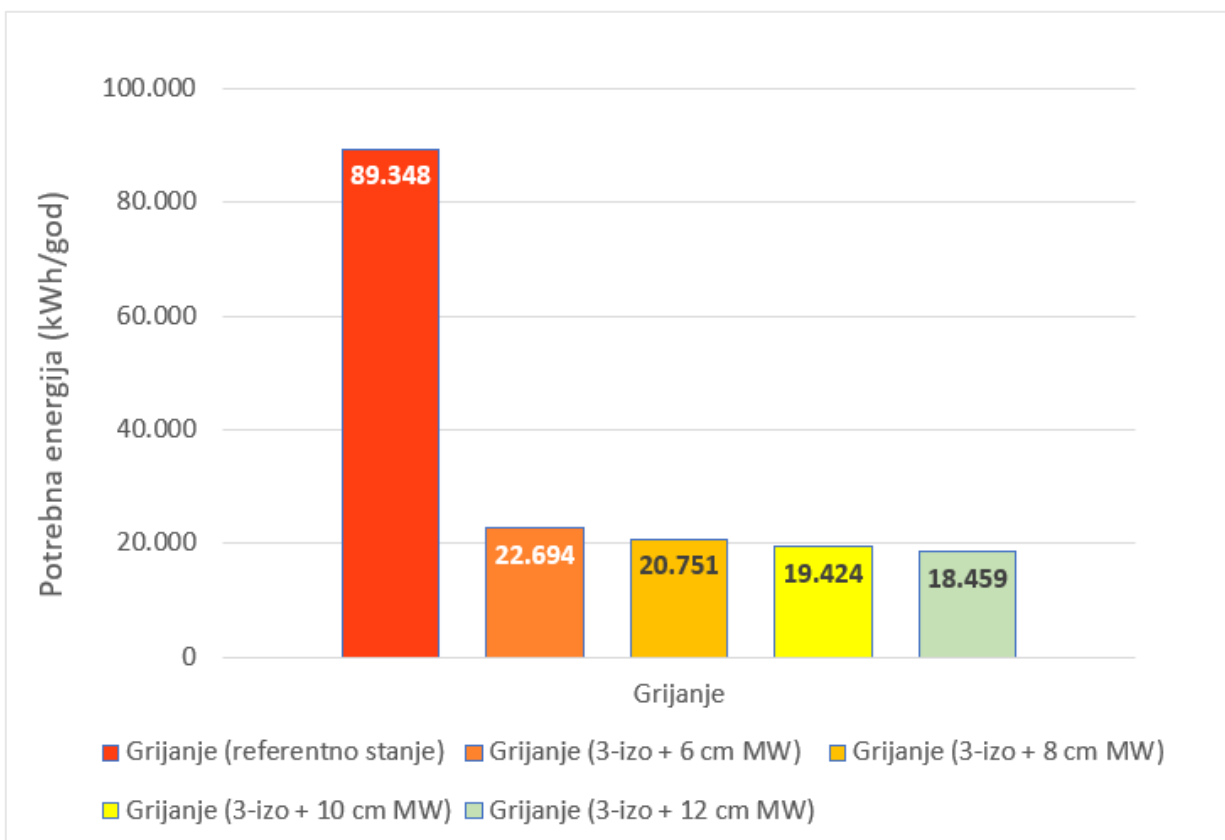
Slika 17. Slojevi fasade i potrebni elementi za pravilno postavljanje mineralne vune [8]

Tablica 11. Procjena izračuna investicijskog troška postavljanja toplinske izolacije (mineralne vune) [6]

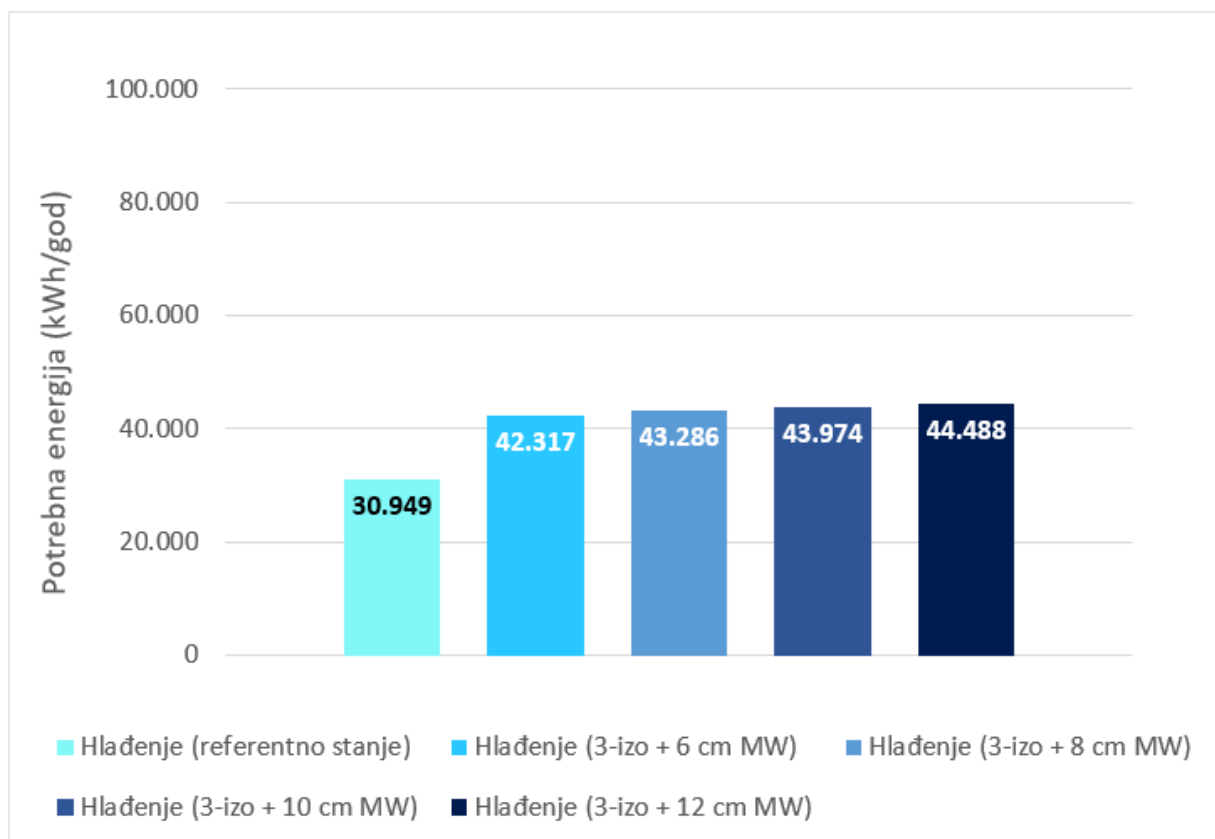
d [cm]	Cijena materijala po m^2		Skela po m^2 3 mjeseca najma	Rad po m^2	Ukupna cijena po m^2	
	RÖFIX	Samoborka			RÖFIX	Samoborka
6	108,36 kn	96,51 kn	45,00 kn	130,00 kn	283,36 kn	271,51 kn
8	121,30 kn	109,60 kn	45,00 kn	130,00 kn	296,30 kn	284,60 kn
10	135,75 kn	123,66 kn	45,00 kn	130,00 kn	310,75 kn	298,66 kn
12	149,17 kn	137,50 kn	45,00 kn	130,00 kn	324,17 kn	312,50 kn
14	165,03 kn	153,37 kn	45,00 kn	130,00 kn	340,03 kn	328,37 kn
15	171,78 kn	161,16 kn	45,00 kn	130,00 kn	346,78 kn	336,16 kn
16	178,03 kn	166,36 kn	45,00 kn	130,00 kn	353,03 kn	341,36 kn
18	193,41 kn	181,74 kn	45,00 kn	130,00 kn	368,41 kn	356,74 kn
Investicijski trošak = (Ukupna cijena po m^2) * (Površina izolacije)						
d [cm]	Samoborka		RÖFIX			
6	171.630 kn		178.838 kn			
8	179.621 kn		187.002 kn			
10	188.497 kn		196.126 kn			
12	197.227 kn		204.593 kn			
14	207.244 kn		214.606 kn			
15	212.162 kn		218.867 kn			
16	215.444 kn		222.810 kn			
18	225.153 kn		232.515 kn			

Dinamičke simulacije su provedene za različite debljine mineralne vune, počevši od 6 cm izolacije pa sve do one debljine koja je rezultirala porastom PPI u odnosu na vrijednost PPI za prethodnu manju debljinu izolacije. Povećavanjem debljine toplinske izolacije ukupna ušteda energije za grijanje raste, no paralelno raste i investicijski trošak te potrošnja energije za hlađenje. Iz tog je razloga PPI korišten kao kriterij odabira optimalne debljine toplinske izolacije. Rezultati

dinamičkih simulacija te usporedba potrebne energije za grijanje različitih stanja ovojnice zgrade sa referentnim/postojećim stanjem prikazana je na Slici 18. Usporedba potrebne energije za hlađenje za različita stanja ovojnice zgrade prikazana je na Slici 19. Modeliranje, odnosno postavljanje toplinske izolacije rezultiralo je značajnom uštedom energije i smanjenjem pogonskih troškova.



Slika 18. Potrebna energija za grijanje za referentno stanje i stanja ovojnice s 3-izo prozorima i različitim debljinama toplinske izolacije



Slika 19. Potrebna energija za hlađenje za referentno stanje i stanja ovojnice s 3-izo prozorima i različitim debljinama toplinske izolacije

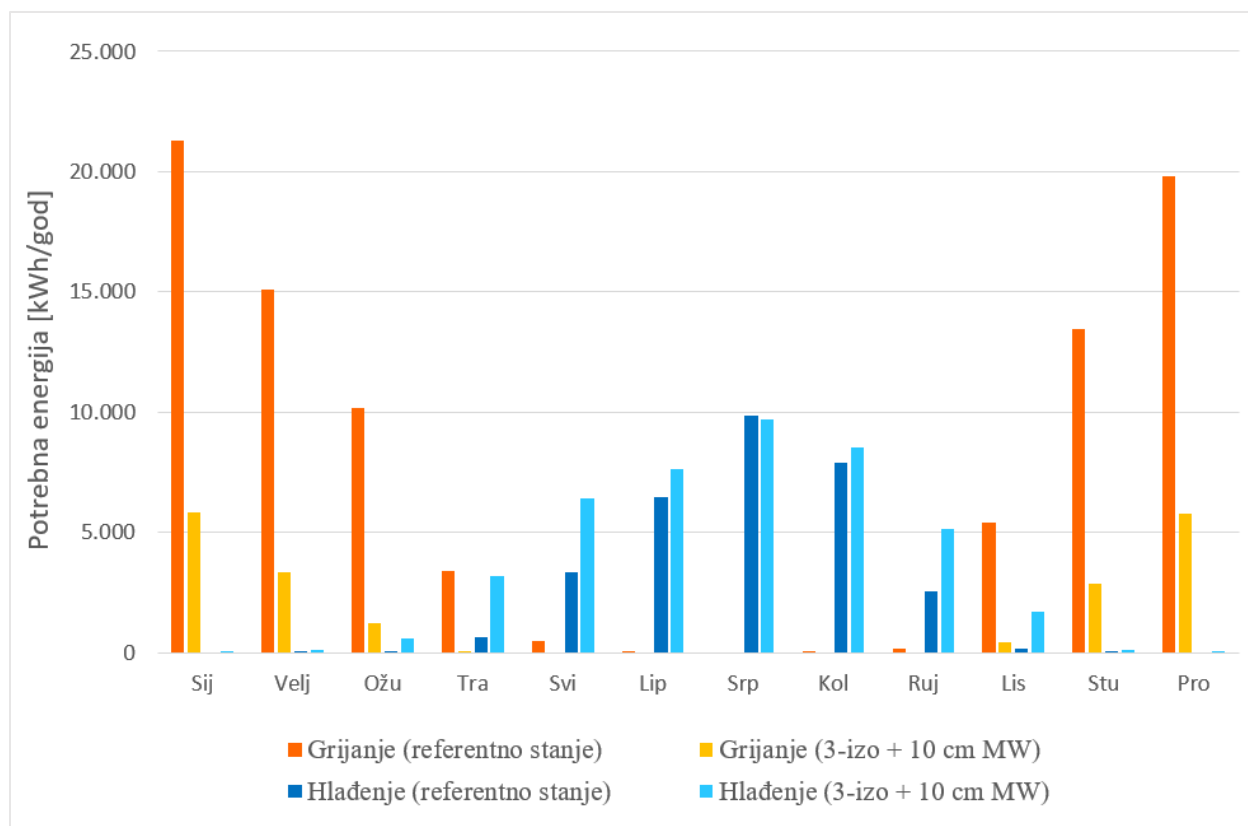
Prema rezultatima dinamičkih simulacija, povećavanjem debljine toplinske izolacije uočava se kontinuirani pad potrebne energije za grijanje, ali i rast potrebne energije za hlađenje. Pogonski troškovi za različite debljine toplinske izolacije prikazani su u Tablici 12. u kojoj je izračunata vrijednost *PPI* prema kojoj je zaključeno da optimalna debljina toplinske izolacije za zgradu u Hrvatskoj Kostajnici iznosi 10 cm. Postupak računanja pogonskih troškova isti je kao kod izo prozora. Postavljanje debljine izolacije od 12 cm uzrokuje rast *PPI* što znači da je odabir s 10 cm ispravan prema opisanom kriteriju. Debljina izolacije od 10 cm zajedno s 3-izo prozorima rezultira smanjenjem godišnje potrebne energije za grijanje u iznosu od 78,3%, ali povećava se potrebna energija za hlađenje u iznosu od 42,1% u odnosu na referentno stanje. Povećanje potrebne energije za hlađenje je posljedica djelovanja toplinske izolacije koja značajno smanjuje izmjenu topline između okoliša i toplinske zone što znači da toplina ostaje unutar toplinske zone u većoj mjeri što uzrokuje veću potrebu za rashladnom energijom. U konačnici, godišnja isporučena el.

energija smanjena je za 53,4% odnosno smanjeni su pogonski troškovi za 6.216 kn/god što predstavlja uštedu od 49,2%.

Tablica 12. Izračun *PPI* kada je postavljena toplinska izolacija

Ovojnica	Godišnji pogonski troškovi	Godišnja ušteda (A-B)	Investicijski trošak	<i>PPI</i>
jednostruki prozori	Grijanje: 9.728 kn Hlađenje: 2.894 kn Ukupno: 12.622 kn (A)			
3-izo + 6 cm MW	Grijanje: 2.841 kn Hlađenje: 3.775 kn Ukupno: 6.616 kn (B)	6.006 kn	651.964 kn +171.630 kn = 823.594 kn	137 god.
3-izo + 8 cm MW	Grijanje: 2.640 kn Hlađenje: 3.850 kn Ukupno: 6.490 kn (B)	6.132 kn	651.964 kn +179.621 kn = 831.585 kn	135,6 god.
3-izo + 10 cm MW	Grijanje: 2.503 kn Hlađenje: 3.904 kn Ukupno: 6.406 kn (B)	6.216 kn	651.964 kn +188.497 kn = 840.461 kn	135,2 god
3-izo + 12 cm MW	Grijanje: 2.403 kn Hlađenje: 3.943 kn Ukupno: 6.346 kn (B)	6.276 kn	651.964 kn +197.227 kn = 849.191 kn	135,3 god

Prikaz potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade po mjesecima za referentni slučaj (bez izolacije s jednostaklenim prozorima) i za slučaj s 3-izo prozorima i 10 cm mineralne vune prikazan je na Slici 20. Može se uočiti da uvođenjem izolacije potreba za hlađenjem raste najviše u proljeće (travanj i svibanj) i na jesen (rujan i listopad), ali je zato potreba za grijanjem u tim mjesecima značajno smanjena. Potreba za grijanjem tijekom najhladnijih zimskih mjeseci je također višestruko smanjena. Tijekom ožujka, ukupna potrebna energija smanjena je za čak 82,5%.

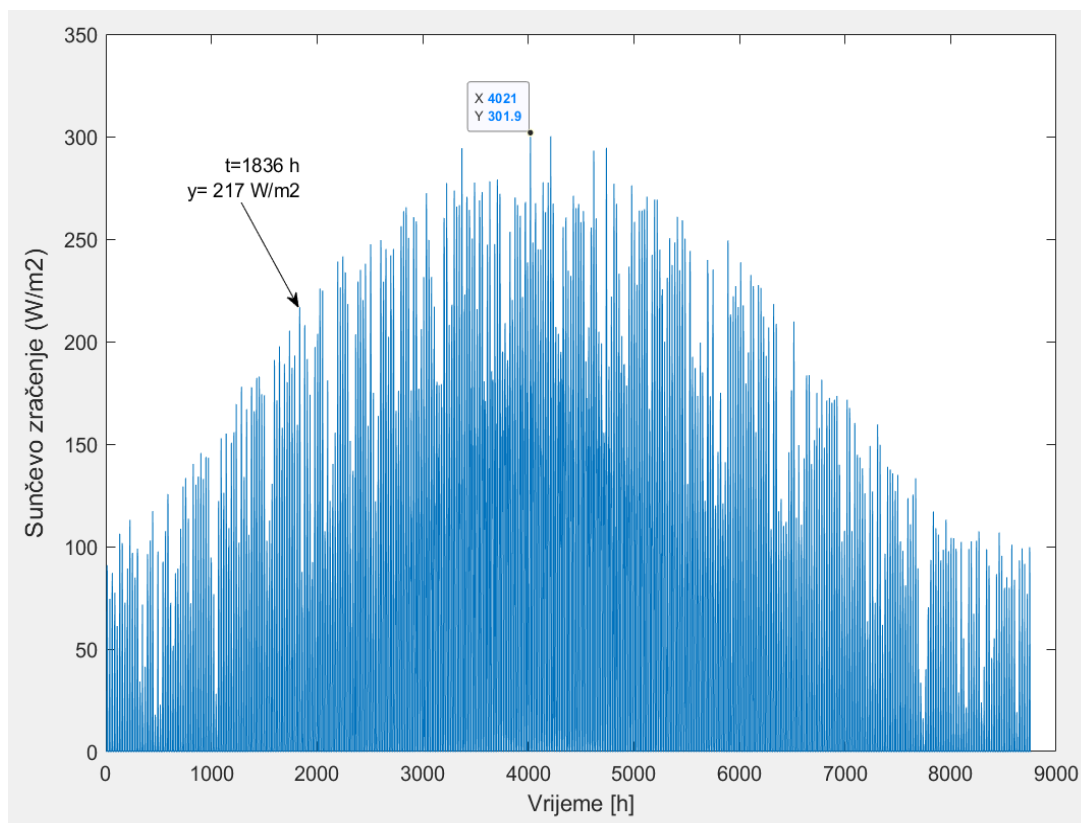


Slika 20. Usporedba potrebne energije po mjesecima prije i nakon energetske obnove ovojnice

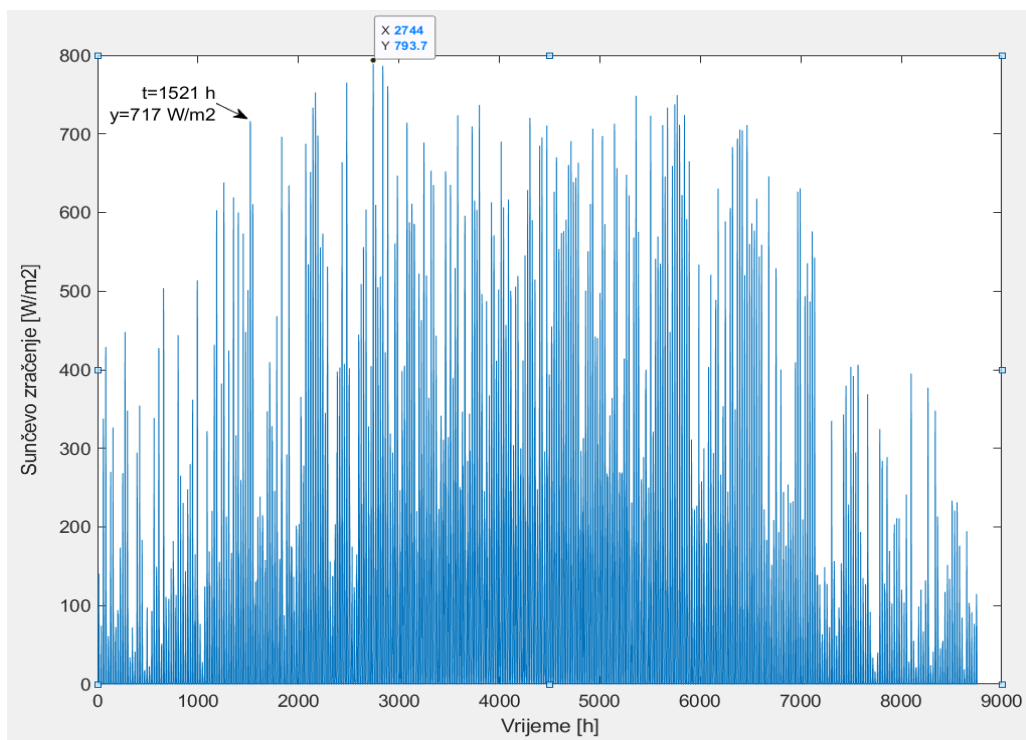
4.2.3. Utjecaj zasjenjenja na energetske zahtjeve

Kako bi zgrada težila konceptu gotovo nulte energije (nZEB) potrebno je, između ostalog, osim projektiranja i ugradnje toplinske izolacije osigurati rješenja za kontrolu Sunčevog zračenja. Kontrolom Sunčevog zračenja postiže se iskorištavanje toplinskih dobitaka od Sunca zimi i smanjenje, odnosno kontrola toplinskih dobitaka ljeti. Sukladno tome, sustav zasjenjenja omogućuje dodatnu razinu uštede energije i kvalitetu toplinske udobnosti. Odabrani slučaj za koji se je modelirano zasjenjenje je prethodni slučaj optimizirane ovojnice zgrade s 3-izo prozorima i 10 cm toplinske izolacije (mineralne vune). Za sustav zasjenjenja zgrade odabrane su aluminijske žaluzine koje čine prikladan i uobičajen izbor na zgradama javne namjene. Sustav zasjenjenja modeliran je za istočnu, južnu i zapadnu orijentaciju zgrade. Zasjenjenje nije modelirano za sjevernu orijentaciju jer ta strana dobiva najmanje Sunčevog zračenja tijekom godine pa je za nju potrebno iskoristiti toplinske dobitke u što većoj mjeri, pogotovo zimi. Vrijednosti Sunčevog

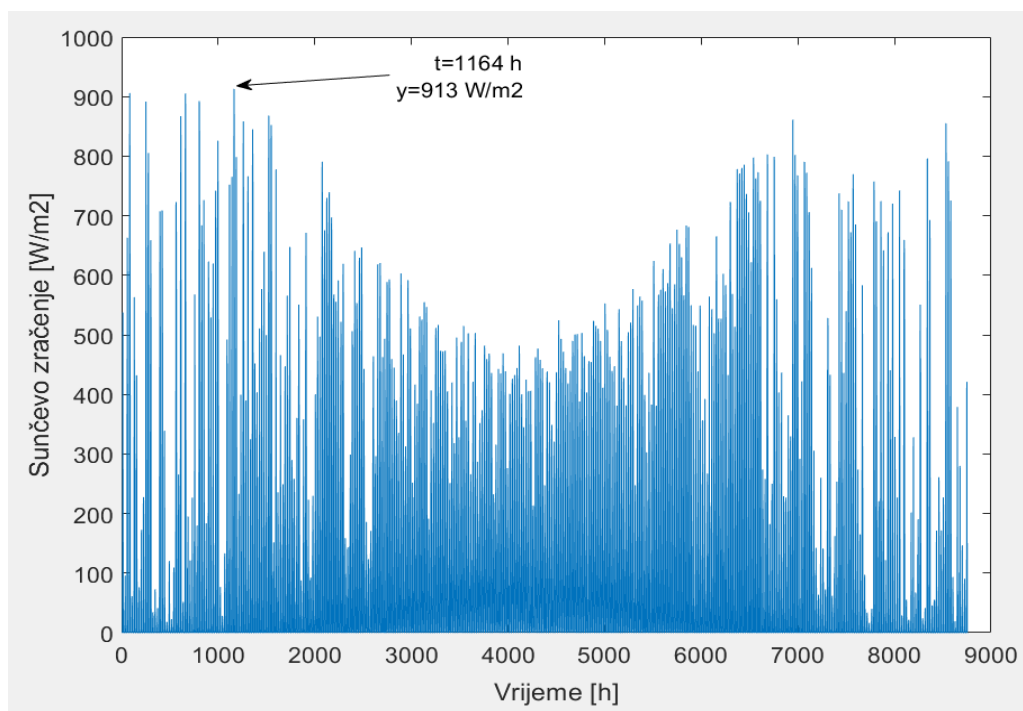
zračenja prema kojima je modeliran sustav kontrole zasjenjenja su različite za svaku stranu svijeta. Za referentne meteorološke podatke, vrijednosti Sunčevog zračenja prema stranama svijeta odnosno orijentacijama prikazane su na Slikama 21.-24.



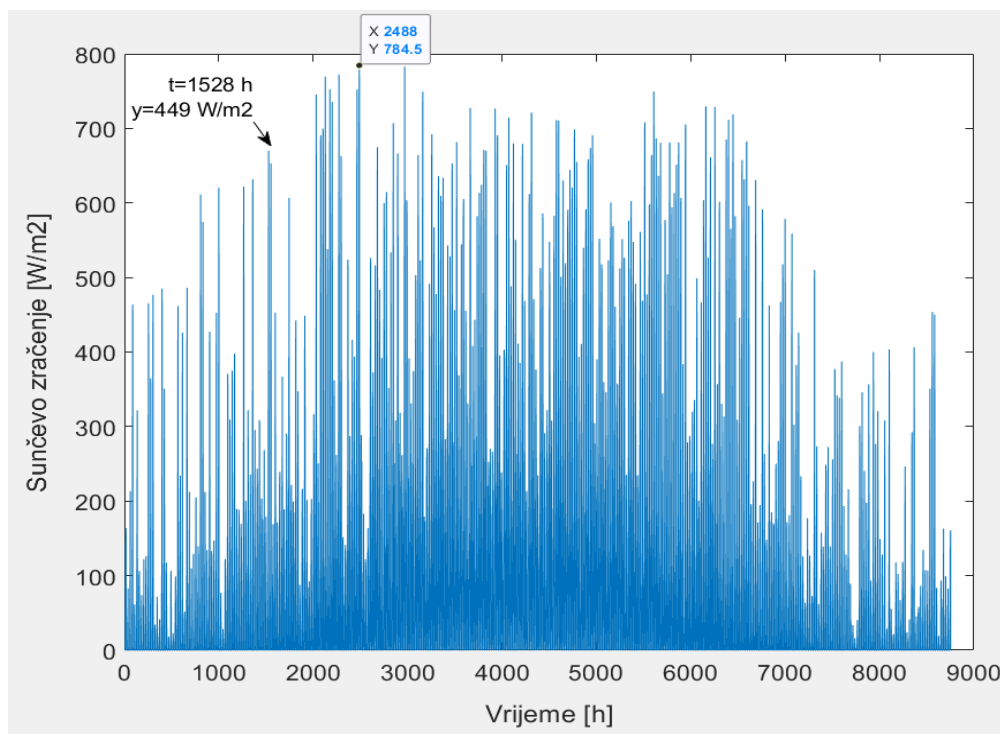
Slika 21. Vrijednosti Sunčevog zračenja — sjever



Slika 22. Vrijednosti Sunčevog zračenja — istok



Slika 23. Vrijednosti toplinskog zračenja — jug



Slika 24. Vrijednosti Sunčevog zračenja — zapad

Iz grafova se može uočiti da najveće ukupno Sunčevo zračenje tijekom godine prima južna strana, a najmanje sjeverna strana zgrade. Vremenski interval u kojem su tražene maksimalne vrijednosti toplinskog zračenja zimi približno odgovara kalendarskom trajanju zime (od 8520. sata u godini do 1920. sata u godini). Pregled vrijednosti Sunčevog zračenja prema orijentacijama nalazi se u Tablici 13. Najveću dnevnu vrijednost Sunčevog zračenja prima južna strana zgrade u iznosu od 913 W/m^2 tijekom zime.

Unutar sučelja TRNBuild postoji integrirani sustav kontrole zračenja na prozor povezan sa vrstom prozora. Takav sustav djeluje na principu odabira vrijednosti zračenja pri kojoj će se sustav zasjenjenja aktivirati, odnosno deaktivirati. Nakon što izračunata vrijednost Sunčevog zračenja na prozor dosegne zadanu vrijednost, na svim stranama zgrade aktivira se zasjenjenje odnosno žaluzine se zatvaraju do određenog stupnja zasjenjenja opisanih faktorom od 0 do 1. Vrijednost faktora zasjenjenja 0 znači da su žaluzine potpuno otvorene i ne blokiraju Sunčevo zračenje niti svjetlost, dok faktor 1 znači da su potpuno zatvorene. Kada vrijednost Sunčevog zračenja na prozor padne ispod druge zadane vrijednosti, žaluzine se otvaraju. Cilj optimizacije je što veće smanjenje

potrebne energije za hlađenje, pritom vodeći računa da se potrebna energija za grijanje ne poveća u značajnoj mjeri. Kada bi rezultat optimizacije pokazao znatno povećanje potrebne energije za grijanje, to bi značilo da je sustav zasjenjenja radio tijekom hladnijih zimskih dana te tako stvorio dodatne pogonske troškove grijanja.

Tablica 13. Ključne vrijednosti Sunčevog zračenja za sve orijentacije

	Najveće Sunčevo zračenje zimi [W/m^2]	Najveće Sunčevo zračenje u cijeloj godini [W/m^2]	Ukupno godišnje Sunčevo zračenje [W/m^2]
Sjever	217	303	455.167
Istok	717	794	750.222
Jug	913	913	945.611
Zapad	670	784	757.333

Postupak optimizacije ovojnice koristeći elemente zasjenjenja proveden je za različite vrijednosti zatvaranja žaluzina koristeći spomenuti integrirani sustav i podatke iz Tablice 13. te je zabilježena ušteda energije i utjecaj na period povrata investicije. Za prvi korak optimizacije, vrijednost toplinskog zračenja pri kojoj će se aktivirati sustav zasjenjenja odnosno zatvoriti žaluzine je odabrana da iznosi pola najvećeg zračenja na jug čiji je iznos 456 W/m^2 . Za sve provedene simulacije, određeno je da će se žaluzine otvoriti kada vrijednost toplinskog zračenja bude manja za 100 W/m^2 od zadane vrijednosti zatvaranja žaluzina. Objedinjeni prikaz rezultata optimizacije za nekoliko slučajeva prikazan je u Tablici 14. Stanje s kojim je uspoređeno dodatno smanjenje ili povećanje potrebne energije je stanje ovojnice zgrade s 10 cm mineralne vune i 3-izo prozorima bez zasjenjenja. Dinamičke simulacije sa zasjenjenjem su provedene uz faktore zasjenjenja 0,5 i 0,7. Povećanje faktora zasjenjenja iznad 0,7 moglo bi, uz dodatnu uštedu energije, rezultirati smanjenjem ugodnosti boravka u prostoriji zbog nedostatka svjetla dok su spuštene žaluzine, pogotovo ako su spuštene duže vrijeme. U tom slučaju, povećava se vjerojatnost korištenja umjetnog osvjetljenja (rasvjete) što bi uzrokovalo dodatno trošenje električne energije umjesto da su prostorije više prirodno osvjetljene. Takvu situaciju trebalo bi uzeti u obzir pri optimizaciji sustava zasjenjenja, no to je izvan opsega ovog rada.

Tablica 14. Rezultati optimizacije potrebne energije pomoću zasjenjenja

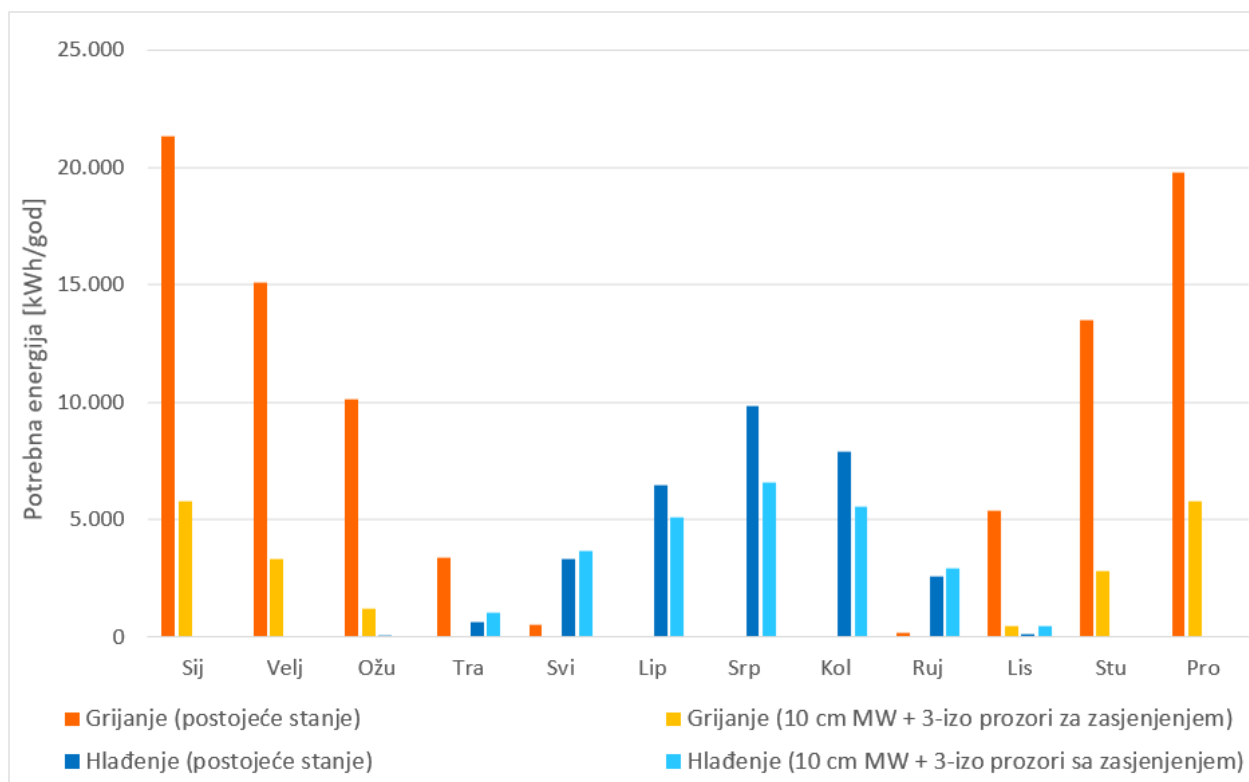
f	Topl. zračenje pri kojem se zatvaraju žaluzine [W/m^2]	Grijanje [kWh/god]	Hlađenje [kWh/god]	Dodatna ušteda u pog. troškovima [kn/god]	PPI [god]
0,5	456	20.693	34.803	711	153
0,5	400	21.019	32.496	855	150
0,5	300	21.736	30.070	1.078	145
0,7	456	21.391	31.480	968	148
0,7	400	21.863	29.092	1.153	144
0,7	300	22.894	25.470	1.434	139

U usporedbi sa stanjem ovojnice zgrade s 10 cm toplinske izolacije i 3-izo prozorima bez zasjenjenja, povećala se potrebna energija za grijanje zbog toga što je sustav zasjenjenja djelovao tijekom toplijih zimskih dana prvenstveno na južnoj strani, a zatim u manjoj mjeri na istočnoj i zapadnoj strani te tako smanjio zagrijavanje toplinskih zona od Sunčevog zračenja. Budući da je sustav definiran na način da se aktivira kada vrijednost Sunčevog zračenja na prozor dosegne zadanu vrijednost, to znači da se neizbježno aktivirao tijekom toplijih zimskih dana. Ukoliko bi se povećala vrijednost pri kojoj se zatvaraju žaluzine tada bi uštede energije bile manje. Proces odabira tih vrijednosti je vrlo složen jer ovisi o puno faktora. Osim iskorištavanja toplinskih dobitaka zimi, potrebno je i osigurati sveukupnu toplinsku ugodnost boravka u zgradi što izravno ovisi o odabiru vrijednosti faktora zasjenjenja. Odabrana vrijednost s $f=0,7$ i vrijednost zračenja pri kojoj se zatvaraju žaluzine od $300 W/m^2$ pruža dovoljnu uštedu energije te sprječava pregrijanje prostorija tijekom dana. Važno je istaknuti kako se povećanje potrebne energije za grijanje zbog zasjenjenja u rezultatima dinamičkih simulacija može zanemariti jer bi u praksi sustav zasjenjenja uspješno regulirao zatvaranje žaluzina tijekom hladnijih dana te tako spriječio povećanje potrebe za grijanjem. Ovaj argument odnosno činjenica korištena je pri računanju PPI prikazanom u Tablici 14. Period povrata investicije se povećao s 135,2 na 139 godina što ne utječe povoljno na isplativost dodavanja žaluzina u investiciju. Međutim, s gledišta uštede energije, sustav zasjenjenja je vrlo značajan. Konačan odabrani rezultat pokazuje da je uvođenjem sustava zasjenjenja moguće dodatno smanjiti godišnje potrebe za rashladnom energijom u iznosu od 42%. Drugim riječima,

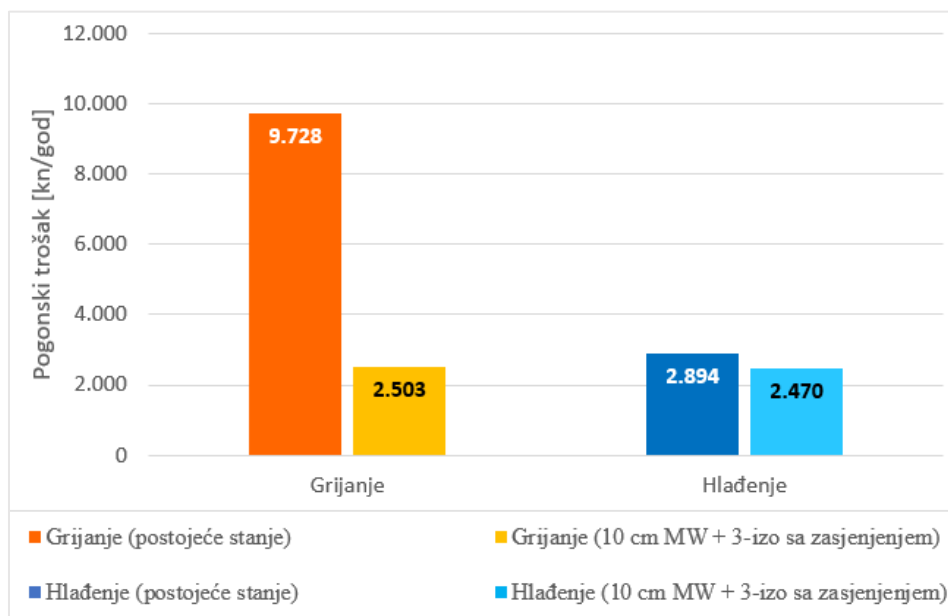
godišnja isporučena električna energija za hlađenje dodatno bi se smanjila za 42%, odnosno godišnji pogonski trošak hlađenja bi se smanjio za 36,7%. Investicijski trošak žaluzina iznosi 220.983 kn što povećava ukupnu investiciju na iznos od 1.061.444 kn.

4.2.4. Usporedba početnog i konačnog stanja ovojnice zgrade

Za konačno stanje odabrano je stanje s ovojnice s 10 cm tolinske izolacije i 3-izo prozorima sa sustavom zasjenjenja koji čine vanjske aluminijske žaluzine koje se zatvaraju kada vrijednost Sunčevog zračenja na prozore iznosi 300 W/m^2 . Stanje ovojnice zgrade u ovom slučaju daje najveću ukupnu uštedu potrebne energije u iznosu od 75.403 kWh/god što znači da je ukupna potrebna godišnja energija za grijanje i hlađenje smanjena za 63% u odnosu na postojeće/referentno stanje. Prema tome, ukupna isporučena električna energija smanjena je za 65,8%, odnosno pogonski troškovi smanjeni su za 60,6%. Slika 25. prikazuje usporedbu potrebne energije između referentnog i konačnog optimiziranog stanja, po mjesecima. Slika 26. prikazuje usporedbu isporučene el. energije i pogonske troškove između referentnog i konačnog stanja. Cjelokupni postupak optimizacije ovojnice omogućio je značajne uštede energije tokom cijele godine, no treba istaknuti da je ukupna potrebna energija za listopad smanjena za 83,5%, a za ožujak smanjena za 87,6%. Može se uočiti manje povećanje potrebne energije za hlađenje u svibnju i rujnu u usporedbi s referentnim stanjem, no u najtoplijim ljetnim mjesecima potreba za hlađenjem je značajno smanjena zbog primjene zasjenjenja. Period povrata investicije za konačno optimizirano stanje ovojnice zgrade iznosi 139 godina. Iznos *PPI* je jako velik, no u obzir je potrebno uzeti značajnu uštedu energije i pogonskih troškova koji zgradu u Hrvatskoj Kostajnici čine energetski učinkovitijom i približavaju je konceptu zgrade gotove nulte energije.



Slika 25. Usporedba postojećeg/referentnog stanja i konačnog stanja ovojnice zgrade



Slika 26. Usporedba pogonskih troškova između početnog i konačnog stanja ovojnice

5. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada bila je optimizacija ovojnice zgrade u Hrvatskoj Kostajnici s ciljem postizanja što veće energetske učinkovitosti, odnosno težnje ka konceptu zgrade gotovo nulte energije. Energijski model zgrade, izrađen u računalnom programu TRNSYS, korišten je za izračun godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje te pogonskih troškova. Energijski model zgrade obuhvaća dijeljenje zgrade na toplinske zone za koje se zasebno računa potrebna godišnja energija za grijanje i hlađenje pomoću programa TRNSYS. Provođenjem dinamičkih simulacija s vremenskim korakom od jednog sata, izračunata je potrebna godišnja energija za grijanje i hlađenje postojećeg stanja zgrade za svaki sat u godini za svaku toplinsku zonu. Postojeće stanje zgrade predstavlja referentno stanje kojemu je optimizacijom ovojnice bilo potrebno povećati energetske učinkovitost. Za sustav proizvodnje toplinske i rashladne energije pretpostavljena je dizalica topline zrak-voda. Dizalica topline predstavlja učinkovit sustav proizvodnje energije čiji su izvori energije obnovljivi. Na taj se način zadovoljio kriterij Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama i smjernica za nZEB zgrade prema Ministarstvu prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine o potrebi korištenja obnovljivih izvora za pokrivanje energijskih potreba. Pomoću konstantnih faktora učinkovitosti za grijanje (*COP*) i hlađenje (*EER*) izračunata je potrebna isporučena električna energija za svaki korak optimizacije. Isporučena električna energija korištena je za izračun pogonskog troška koristeći plavi tarifni model za poslovne korisnike od distributera HEP ODS-a.

Prvi korak optimizacije proveden je na način da su zamijenjeni svi prozori na zgradi s novim izo prozorima koji danas predstavljaju standard te osiguravaju značajnu uštedu energije. Usporedbom dobivenih rezultata za 2-izo i 3-izo prozore zaključeno je da su 3-izo prozori, unatoč većoj investiciji, bolja opcija zbog manjeg perioda povrata investicije (*PPI*), a koji je u obzir uzeo omjer investicijskog troška i uštede u pogonskom trošku. Ugradnjom 3-izo prozora na zgradu koja je tema ovog rada, moguće je smanjiti godišnju isporučenu el. energiju za 34,5% što predstavlja smanjenje pogonskih troškova za 4.009 kn odnosno 31,8%.

Drugi korak optimizacije odnosio se na dodavanje toplinske izolacije na vanjske zidove zgrade s 3-izo prozorima. Za potrebe ovog rada odabrana je mineralna vuna kao ekonomičan i učinkovit materijal čija su toplinsko-izolacijska svojstva zadovoljavajuća i prikladna za postavljanje na zgrade javne namjene. Rezultati dinamičkih simulacija i vrijednost *PPI* dali su

rješenje prema kojem optimalna debljina izolacije iznosi 10 cm. S gledišta potrebne energije, izračunato je smanjenje potrebne energije za grijanje u iznosu od 69.924 kWh/god odnosno 78,3%, no došlo je do povećanja potrebne energije za hlađenje u iznosu od 13.025 kWh/god odnosno 42,1% u odnosu na referentno stanje. Razlog povećanja potrebne energije za hlađenje je smanjena izmjena topline između okoliša i toplinskih zona zbog veće toplinske izoliranosti koja uzrokuje da toplina ostaje unutar toplinske zone što rezultira većom potrebom za rashladnom energijom. S gledišta pogonskih troškova, ovojnica zgrade s toplinskom izolacijom od 10 cm i novim 3-izo prozorima daje mogućnost smanjenja godišnje isporučene el. energije za 53,4% odnosno smanjenje pogonskih troškova za 6.216 kn/god odnosno uštedu od 49,2% u odnosu na referentno stanje.

Posljednji korak optimizacije bio je ispitivanje utjecaja zasjenjenja zbog moguće dodatne uštede energije. Glavni cilj ovog koraka optimizacije bio je iskorištavanje Sunčevog zračenja tijekom zime, pri čemu su kontrolirani dobici od Sunca tijekom ljeta u svrhu uštede energije za hlađenje. Sustav zasjenjenja je modeliran za stanje ovojnice s 10 cm toplinske izolacije i 3-izo prozorima. Zasjenjenje nije modelirano na sjevernoj strani zgrade budući da ta strana ima najmanje Sunčevo zračenje. Provođenje dinamičkih simulacija uz modelirani sustav zasjenjenja koji se sastojao od otvaranja i zatvaranja aluminijskih žaluzina na istočnoj, zapadnoj i južnoj strani pokazalo se značajnim. Sustav upravljanja zasjenjenjem prati postavljenu vrijednost Sunčevog zračenja na prozore pri kojoj će se žaluzine zatvoriti i otvoriti. Uspoređujući rezultate s ovojnicom zgrade koja ima 10 cm toplinske izolacije i 3-izo prozore bez zasjenjenja zaključuje se kako zasjenjenje dodatno smanjuje potrebu za rashladnom energijom za 42% odnosno dodatno smanjuje godišnje troškove hlađenja za 36,7%. Zbog definicije sustava zasjenjenja u računalnom programu, sustav zasjenjenja je djelovao tijekom hladnijih zimskih dana te tako povećao potrebu za grijanjem. Sustavi zasjenjenja u praksi imaju preciznu regulaciju tijekom zime te mogu spriječiti nastajanje dodatnih troškova grijanja. Prema tome, povećanje potrebne energije za grijanje zbog sustava zasjenjenja nije uzeto u obzir kod računanja perioda povrata investicije. Također, djelovanje sustava zasjenjenja odnosno spuštanje žaluzina moglo bi utjecati na potrošnju električne energije za rasvjetu, što bi također trebalo uzeti u obzir pri optimizaciji sustava, no to je izvan opsega ovog rada.

Konačni rezultat optimizacije pokazuje da je moguće smanjiti ukupnu godišnju isporučenu el. energiju iznosu od 65,8% kada bi se na postojeću ovojnicu zgrade postavilo 10 cm toplinske

izolacije i 3-izo prozori s aktivnim sustavom zasjenjenja. Sukladno tome, pogonski troškovi smanjeni su za 7.650 kn/god, odnosno za 60,6% u odnosu na postojeće stanje. Konačna vrijednost perioda povrata investicije iznosi 139 godina. Ovako velik *PPI* je posljedica visokih investicijskih troškova prvenstveno zbog prozora. Budući da zgrada ima 103 prozora, investicijski trošak ugradnje novih 3-izo prozora sa žaluzinama iznosi 82,2% od ukupne investicije čiji je iznos 1.061.444 kn. Unatoč velikom periodu povrata investicije, potrebno je uzeti u obzir značajnu uštedu energije kojom zgrada u Hrvatskoj Kostajnici postaje energetske učinkovitijom i teži konceptu zgrade gotovo nulte energije.

6. LITERATURA

- [1]. Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja, NN 128/2015
- [2]. HRN EN 52016-1:2017, Energijska svojstva zgrada -- Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarnje temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja -- 1. dio: Postupci proračuna (ISO 52016-1:2017; EN ISO 52016-1:2017)
- [3]. TRNSYS 17 Documentation: Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild (Volume 5). Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
URL: <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/user17-resources/index.html> (Pristupljeno: 21.9.2021.)
- [4]. HEP ODS; Poduzetništvo, tarifne stavke (cijene)
URL: <https://www.hep.hr/ods/korisnici/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-161/161> (Pristupljeno: 21.9.2021.)
- [5]. INOPREM d.o.o. Prozori i vrata, IZO staklo
URL: <https://www.inoprem.hr/pvc-stolarija-inoprem-pocetna/pvc-prozori/izo-staklo-dvoslojno-i-troslojno/> (Pristupljeno: 21.9.2021.)
- [6]. Miljenko Kukić, dipl.ing.arh, e-mail komunikacija, ožujak 2021.
- [7]. Joseph W. Lstiburek, PH.D., A Good Insulation Always Knows Its Limitations, ASHRAE Journal, April 2021, Volume 63, str. 48.–54.
- [8]. Samoborka d.d., Termozol Standard
URL: <http://www.samoborka.hr/fasadni-sustav-termozol-standard> (Pristupljeno: 21.9.2021.)
- [9]. Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Zgrade gotovo nulte energije nZEB
URL: <https://mpgi.gov.hr/naslovna-blokovi/o-ministarstvu-15/djelokrug/energetska-ucinkovitost-u-zgradarstvu/zgrade-gotovo-nulte-energije-nzeb/10504> (Pristupljeno: 21.9.2021.)