

Energetska obnova zgrada koje imaju status kulturnog dobra

Križanić, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:235:876721>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-16**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ana Križanić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Ana Križanić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem mentorici izv.prof.dr.sc. Tei Žakuli na uloženom vremenu te kontinuiranom praćenju kao i asistentu Nikoli Bađunu na pomoći i korisnim savjetima. Posebno hvala obitelji, dečku i prijateljima na pruženoj podršci tijekom preddiplomskog studija.

Ana Križanić



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 brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 01	
Ur.broj: 15 - 24 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ana Križanić**

JMBAG: **0035215036**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Energetska obnova zgrada koje imaju status kulturnog dobra**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Energy renovation of buildings with cultural heritage status**

Opis zadatka:

Cilj rada je provesti analizu potencijala energetske obnove zgrada koje imaju status kulturnog dobra, a na primjeru zgrade Ministarstva kulture u Zagrebu. Kao prvi korak potrebno je proučiti i identificirati specifičnosti energetske obnove zgrada koje imaju status kulturnog dobra. Zatim je potrebno provesti energetske analize postojećeg stanja te analizirati energetski i financijski učinak jedne mjere obnove ovojnice zgrade i jedne mjere unapređenja tehničkih sustava, odnosno primjene obnovljivih izvora energije na lokaciji zgrade. Analizu potrebne energije za sve analizirane scenarije potrebno je provesti korištenjem dinamičkih simulacija u računalnom programu TRNSYS®.

Rad treba sadržavati:

- opis analizirane zgrade,
- opis specifičnosti obnove zgrada koje imaju status kulturnog dobra,
- opis razvijenog energijskog modela u računalnom programu TRNSYS®,
- usporedbu rezultata između postojećeg stanja i analiziranih mjera obnove,
- zaključak o provedenoj analizi.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadala:

Izv. prof. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPIS ZGRADE	2
2.1. Toplinsko zoniranje.....	3
2.2. Građevinski podaci	7
2.3. Ulazni parametri simulacije	9
3. OPIS METODE I PRETPOSTAVKI ANALIZE.....	11
3.1. Izrada energijskog modela višezonske zgrade	11
3.2. Opis rada u korisničkom sučelju TRNSYS-a Simulation Studio	12
3.3. Izračun isporučene energije i perioda povrata investicije	13
3.4. Pretpostavke za analizu mjera obnove	14
4. REZULTATI	15
4.1. Rezultat postojećeg stanja	15
4.2. Rezultat mjere poboljšanja ovojnice	15
4.3. Rezultat mjere poboljšanja tehničkog sustava	17
4.4. Rezultat kombinacije mjera poboljšanja ovojnice i poboljšanja tehničkog sustava ..	18
5. ZAKLJUČAK.....	19

POPIS SLIKA

Slika 1. Sjeverno i istočno pročelje zgrade Ministarstva kulture u Zagrebu [3]	2
Slika 2. Zoniranje podruma	4
Slika 3. Zoniranje prizemlja	4
Slika 4. Zoniranje 1.kata	5
Slika 5. Zoniranje 2.kata	5
Slika 6. Zoniranje 3.kata	6
Slika 7. Zoniranje 4.kata	6
Slika 8. Povezivanje komponenti u Simulation Studio-u.....	13
Slika 9. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje postojećeg stanja	15
Slika 10. Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje postojećeg i novog stanja	16
Slika 11. Ukupni trošak za grijanje/hlađenje za postojeće stanje i novu stolariju	16
Slika 12. Godišnja isporučena energija za postojeće stanje i novo ugrađenu dizalicu topline	17
Slika 13. Godišnja isporučena energija za postojeće stanje i kombinaciju mjera obnove	18

POPIS TABLICA

Tablica 1. Iskaz neto površina građevine	3
Tablica 2. Svojstva poda prema tlu	7
Tablica 3. Svojstva međukatne konstrukcije	7
Tablica 4. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja	7
Tablica 5. Svojstva vanjskih zidova dvorišnih pročelja	8
Tablica 6. Svojstva unutarnjih/pregradnih zidova.....	8
Tablica 7. Svojstva ravnog šljunčanog krova.....	8
Tablica 8. Svojstva limenog krova	9
Tablica 9. Svojstva uličnog krova s crijepom	9
Tablica 10. Svojstva dvostrukih drvenih prozora.....	9
Tablica 11. Ulazni podaci za definiranje pogonskih režima	10
Tablica 12. Svojstva novih prozora s dvostrukim IZO staklom i dva low-e premaza	14
Tablica 13. Cijena investicije nove stolarije	17
Tablica 14. Rezultati analize za sve analizirane slučajeve.....	20

SAŽETAK

U radu je analiziran potencijal mjera energetske obnove na primjeru zgrade Ministarstva kulture u Zagrebu koja se ubraja pod zaštićena kulturna dobra zbog čega je potrebno očuvati izgled vanjske ovojnice. Analizirane mjere u okviru ovog rada su zamjena vanjske stolarije (dodavanje novih prozora s unutarnje strane bez uklanjanja postojećih) te zamjena plinskog kotla dizalicom topline zrak-voda. Godišnja potrebna energija za grijanje/hlađenje dobivena je provođenjem dinamičkih simulacija u računalnom programu TRNSYS, dok je isporučena energija dobivena na temelju procijenjenih učinkovitosti sustava grijanja i hlađenja. Postojeće stanje zgrade predstavljalo je referentno stanje za procjenu energetske i financijske učinka analiziranih mjera obnove. Analizom je utvrđeno da se zamjenom postojećih prozora (uz zadržavanje plinskog kotla kao izvora topline) ostvaruje smanjenje isporučene energije od 4% za grijanje, te 5% za hlađenje. Period povrata investicije za ovaj slučaj iznosi 184 godine. Druga analizirana mjera, odnosno zamjena plinskog kotla s dizalicom topline zrak-voda rezultira značajnim smanjenjem isporučene energije na godišnjoj razini u iznosu od 70%, a period povrata investicije iznosi 15 godina.

Ključne riječi: energetska obnova, energetska učinkovitost, zaštićeno kulturno dobro, dinamičke simulacije, vrijeme povrata investicije

SUMMARY

This paper analyzes the potential of energy renovation measures using the example of the Ministry of Culture building in Zagreb, which has a cultural heritage status. Therefore, it is necessary to preserve the building's exterior. The measures analyzed in this paper include the replacement of external windows (by installing new windows on the inside without removing the existing ones) and the replacement of the gas boiler with an air-to-water heat pump. Annual heating and cooling energy needs were determined through dynamic simulations using the TRNSYS computer program, while the delivered energy was calculated based on the estimated efficiency of heating and cooling systems. The existing state of the building served as a reference for assessing the energy and financial impacts of the analyzed renovation measures. By renewing the building envelope with new windows (while retaining the gas boiler as a heat source), the annual delivered energy for heating is reduced by 4% and for cooling by 5%. The return on investment in this case is 184 years. The second measure analyzed, which involves replacing the gas boiler with an air-to-water heat pump, leads to a significant reduction in delivered energy of 70%, with a return on investment of 15 years.

Keywords: energy renovation, energy efficiency, cultural heritage, dynamic simulations, return on investment

1. UVOD

U zgradarstvu se troši velik udio ukupne potrošnje energije zbog čega je važna energetska učinkovitost zgrada, odnosno osiguravanje minimalne potrošnje energije uz optimalnu razinu toplinske ugodnosti. Povećana potrošnja energije podrazumijeva veće emisije stakleničkih plinova, stoga je potrebno poduzeti mjere kako bi se racionalizirala potrošnja dostupnih energenata. Mjere energetske obnove pružaju niz mogućnosti za uštedu toplinske i električne energije uz racionalnu upotrebu fosilnih goriva i primjenu obnovljivih izvora energije [1].

Glavni cilj rada jest procjena potencijala jedne mjere obnove vanjske ovojnice i unaprjeđenja tehničkog sustava primjenom obnovljivih izvora energije na primjeru zgrade Ministarstva kulture u Zagrebu, a koja nosi status kulturnog dobra. Energetskom obnovom potrebno je ostvariti da građevine zaštićene kao spomenici kulture doprinesu ublažavanju klimatskih promjena bez gubitka svoje kulturne vrijednosti [2]. Zato su analizirane samo mjere obnove koje ne mijenjaju vanjski izgled zgrade. Analiza je provedena za mjeru ugradnje novih prozora s boljim svojstvima te za slučaj instalacije dizalice topline zrak-voda, kao izvora toplinske i rashladne energije, umjesto plinskog kotla. Simulacija analiziranih slučajeva provedena je korištenjem računalnog programa TRNSYS. Ulazni podaci za simulaciju, uz izrađen energijski model, su meteorološki podaci za tipičnu meteorološku godinu. Energijski model zgrade izrađen je u TRNBuild-u, jednom od korisničkih sučelja TRNSYS-a. U poglavlju 2 dan je opis postojećeg stanja zgrade, a koje predstavlja referentno stanje za analizu energetskog i financijskog učinka odabranih mjera obnove. U poglavlju 3 opisana je izrada modela zgrade koja uključuje definiranje geometrije, svojstava slojeva ovojnice i unos pogonskih režima, te su opisani glavni parametri simulacije. Rezultat simulacije je potrebna energija za grijanje i hlađenje pojedinih toplinskih zona na godišnjoj razini. Potrebna energija za grijanje i hlađenje baza je za izračun godišnje isporučene energije te godišnje uštede. Kao kriterij za analizu financijske isplativosti provedene mjere obnove izračunava se period povrata investicije. Nakon opisanih metoda korištenih u ovom radu, u poglavlju 4 dani su rezultati za sve analizirane scenarije.

2. OPIS ZGRADE

Analizirana zgrada jest zgrada Ministarstva kulture Republike Hrvatske u Zagrebu. Nalazi se na uglu Runjaninova - Vodnikova pri čemu je sjeverno krilo orijentirano na Vodnikovu, a istočno krilo na Runjaninovu ulicu (Slika 1.). Zgrada je izgrađena početkom 1910-ih godina te se nalazi unutar Povijesne urbane cjeline Grada Zagreba kao zaštićeno kulturno dobro. Budući da je građevina pod zaštitom, prema zakonu je zabranjena svaka radnja kojom bi se izravno ili neizravno mogla promijeniti svojstva, oblik, značenje i izgled te na taj način ugroziti njena vrijednost [4]. Dakle, prilikom energetske obnove potrebno je uzeti u obzir očuvanje karakterističnih građevinskih obilježja kako bi se zadržala autentičnost.



Slika 1. Sjeverno i istočno pročelje zgrade Ministarstva kulture u Zagrebu [3]

Zgrada je podijeljena na 6 etaža: podrum, prizemlje i 4 kata. Ukupna neto površina iznosi 4241,1 m². U Tablici 1. prikazana je neto površina zgrade po katovima. Otvore u vanjskoj ovojnici najvećim dijelom čine dvostruki drveni prozori koji se nalaze na sjevernom i istočnom

pročelju zgrade. Na pročelja s dvorišne strane ugrađeni su jednostruki drveni prozori s dvostrukim IZO staklom. Za potrebe rada, kao pojednostavljenje prilikom izrade modela, korištena je samo jedna vrsta prozora čija su svojstva navedena u odlomku 2.2. Prema namjeni se analizirana zgrada svrstava u nestambene uredske i administrativne zgrade, odnosno, zgrade javne namjene.

Tablica 1. Iskaz neto površina građevine

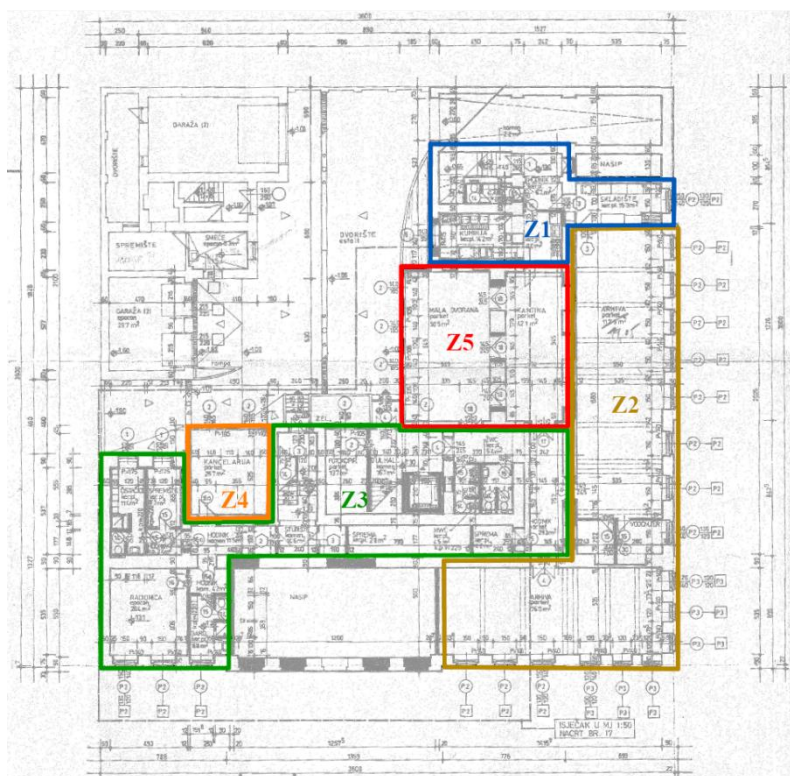
Kat	Neto površina [m²]
PODRUM	543,70
PRIZEMLJE	686,50
PRVI KAT	748,50
DRUGI KAT	766,20
TREĆI KAT	766,80
POTKROVLJE	729,40
Ukupno	4241,10

2.1. Toplinsko zoniranje

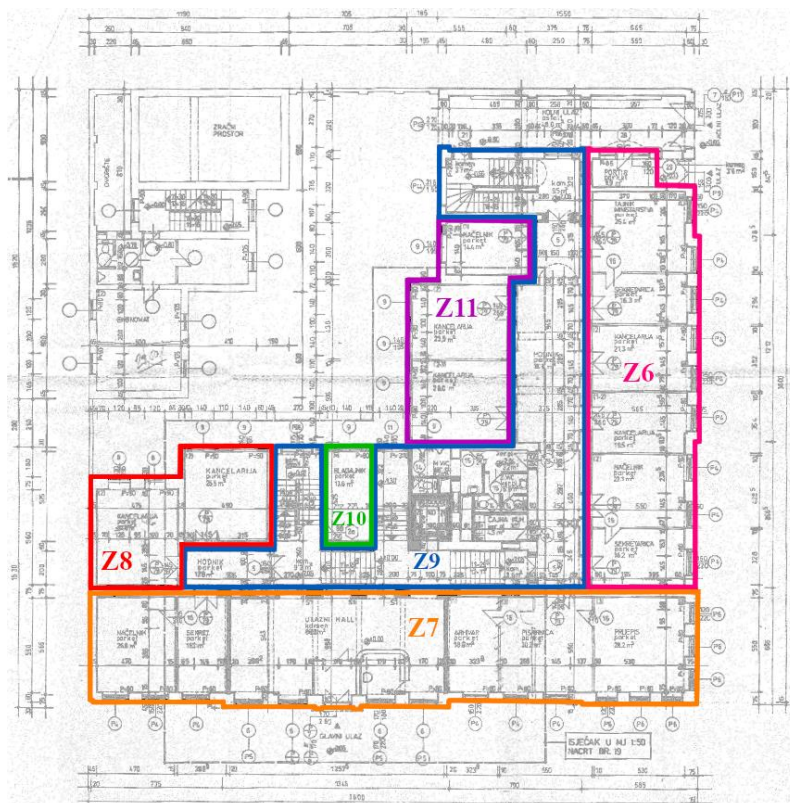
Prvi korak u izradi energijskog modela za proračun potrebne toplinske energije jest zoniranje zgrade, a provodi se prema normi HRN EN ISO 52016-1:2017 [5]. Smjernice prema normi navode sljedeće:

- Za svaku prostoriju potrebno je odrediti namjenu, toplinske uvjete korištenja (npr. postavne temperature) te pogonske režime (grijanje/hlađenje).
- Susjedne zone mogu se grupirati u jednu toplinsku zonu ukoliko imaju isti režim rada. Ukoliko susjedne zone imaju slične toplinske uvjete korištenja, mogu se spojiti u jednu zonu. Također, postoje li veliki otvori između prostora, zoniraju se zajedno.
- Susjedne nekondicionirane zone mogu se grupirati u jednu nekondicioniranu zonu.
- U slučaju da toplinska zona ima korisnu površinu manju od 5% korisne površine objekta, može se spojiti sa susjednom zonom ako ima iste pogonske režime, a različite uvjete korištenja.
- Ako je površina zone manja od 1% korisne površine objekta, može se spojiti sa susjednom zonom iako se pogonski režimi razlikuju.

Slijedeći gore navedene smjernice, zgrada je podijeljena na 39 toplinskih zona. Podrum je podijeljen na 5, prizemlje na 6, a ostali katovi na 7 zona. Na Slikama 2. – 7. prikazano je zoniranje po katovima.



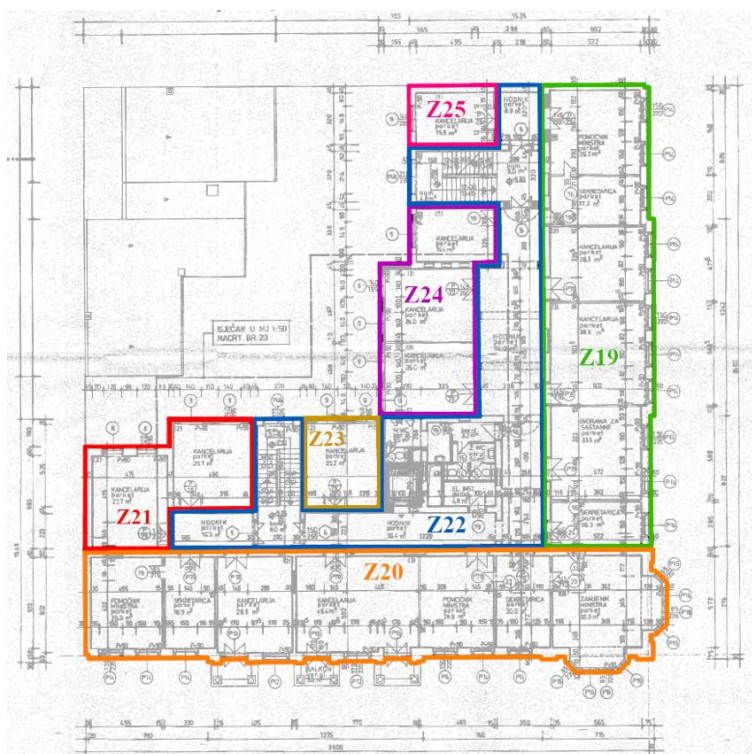
Slika 2. Zoniranje podruma



Slika 3. Zoniranje prizemlja



Slika 4. Zoniranje 1.kata



Slika 5. Zoniranje 2.kata



Slika 6. Zoniranje 3.kata



Slika 7. Zoniranje 4.kata

2.2. Građevinski podaci

U sljedećim tablicama nalaze se toplinska i fizikalna svojstva građevinskih elemenata promatrane zgrade, a koja su potrebna za daljnju analizu. Podaci su preuzeti iz projektne dokumentacije.

Tablica 2. Svojstva poda prema tlu

Slojevi	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]
Cementni estrih	3	2200	1050	1,4
Lagano armirana betonska podloga	6	2200	960	2,33
PE folija	0,02	1000	1250	0,19
Ekstrudirani polistiren	6	40	1260	0,032
Hidroizolacija	1	1000	1460	0,19
Betonska podloga	15	2500	960	2,33
Ukupna debljina [cm]	31,02			
U-vrijednost [W/m²K]	0,451			

Tablica 3. Svojstva međukatne konstrukcije

Slojevi	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]
Cementni estrih	3	2200	1050	1,4
Armirana betonska podloga	6	2200	960	1,4
PE folija	0,02	1000	1250	0,19
Ekspandirani polistiren	4	15	1260	0,041
Armirana betonska šuplja stropna ploča	33	2500	960	2,33
Zatvoreni tračni prostor	10	1,2	1005	0,0714
Ukupna debljina [cm]	56,02			
U-vrijednost [W/m²K]	0,362			

Tablica 4. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja

Slojevi	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]
Završni sloj žbuke	1	1800	1050	0,87
Toplinska žbuka	2	700	920	0,10
Opeka	60	1800	1050	0,87
Produžna žbuka	4	1800	1050	0,87
Ukupna debljina [cm]	67			
U-vrijednost [W/m²K]	0,895			

Tablica 5. Svojstva vanjskih zidova dvorišnih pročelja

Slojevi	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]
Produžna žbuka	1	1800	1050	0,87
Šuplja blok opeka	30	1100	900	0,48
Stiropor	6	25	1260	0,041
Polimer cementni mort	0,50	1050	1130	0,80
Silikatna žbuka	0,20	1800	1130	0,70
Ukupna debljina [cm]	37,70			
U-vrijednost [W/m²K]	0,439			

Tablica 6. Svojstva unutarnjih/pregradnih zidova

Slojevi	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]
Produžna žbuka	2	1800	1050	0,87
Puna opeka	30	1800	1050	0,87
Produžna žbuka	2	1800	1050	0,87
Ukupna debljina [cm]	34			
U-vrijednost [W/m²K]	1,783			

Tablica 7. Svojstva ravnog šljunčanog krova

Slojevi	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]
Šljunak	8	1700	840	0,81
Bitumenska traka	0,30	1100	1000	0,23
Stiropor	8	15	1260	0,041
Beton	5	2500	960	2,33
Opeka	16	1800	920	0,76
Beton	4	2500	960	2,33
Produžna žbuka	2	1800	1050	0,87
Ukupna debljina [cm]	43,30			
U-vrijednost [W/m²K]	0,396			

Tablica 8. Svojstva limenog krova

Slojevi	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]
Lim	0,07	7900	1000	17
PE filc	6	1000	1250	0,19
Bitumenska traka	0,30	1100	1000	0,23
Daska	2,4	500	1600	0,13
Kamena vuna	10	50	1030	0,035
Opeka	16	1800	920	0,76
Zrak	10	1	1000	0,026
Gipskartonska ploča	1,25	1000	840	0,21
Ukupna debljina [cm]	46,02			
U-vrijednost [W/m²K]	0,130			

Tablica 9. Svojstva uličnog krova s crijepom

Slojevi	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]
Crijep	2	2100	900	0,68
Drvo	3	500	1600	0,13
Bitumenska traka	0,30	1100	1000	0,23
Daska	2,40	500	1600	0,13
Kamena vuna	12	50	1030	0,035
PE folija	0,02	1000	1250	0,19
Zrak	10	1	1000	0,026
Gipskartonska ploča	3,30	1000	840	0,21
Ukupna debljina [cm]	33,02			
U-vrijednost [W/m²K]	0,124			

Tablica 10. Svojstva dvostrukih drvenih prozora

Koeficijent prolaza topline stakla, U [W/m ² K]	2,01
Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, g [-]	0,70

2.3. Ulazni parametri simulacije

Ulazni podaci potrebni za definiranje pogonskih režima prikazani su u Tablici 11., a definirani su prema namjeni prostora prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje HRN EN 13790 [6] i Algoritmu za proračun toplinske energije za ventilaciju i klimatizaciju [7]. Unutarnja postavna temperatura za grijanje referentne zgrade iznosi 20°C, dok je za hlađenje iznos postavne temperature 22°C. Infiltracijski gubici imaju vrijednost 0,9

h^{-1} za sve zone. Zgrada se koristi 5 dana u tjednu u periodu od 07:00 do 18:00 sati te je u tom periodu iznos toplinskih dobitaka $10,30 \text{ W/m}^2$. Kad se prostor ne koristi, sustav grijanja i hlađenja je isključen te se toplinski dobici ne uzimaju u obzir. Za zone koje obuhvaćaju stubište, hodnik i sanitarije je pretpostavljeno da nemaju značajnijih toplinskih dobitaka.

Tablica 11. Ulazni podaci za definiranje pogonskih režima

Ulazni podaci energetskog modela zgrade	
Izmjena zraka uslijed infiltracije [h^{-1}]	0,90
Postavna temperatura za grijanje [$^{\circ}\text{C}$]	20
Postavna temperatura za hlađenje [$^{\circ}\text{C}$]	22
Unutarnji toplinski dobici kada zgrada radi [W/m^2]	10,30
Unutarnji toplinski dobici kada zgrada ne radi [W/m^2]	0

3. OPIS METODE I PRETPOSTAVKI ANALIZE

Za izradu energijskog modela zgrade i proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje korišten je računalni program TRNSYS (*Transient System Simulation Program*). TRNSYS je računalni alat u kojem se provode dinamičke simulacije različitih energetskih sustava poput višezonskih zgrada, sustava koji koriste obnovljive izvore energije (solarni sustavi, vjetroelektrane), sustava grijanja, hlađenja, ventilacije i slično [8].

Prilikom izrade modela korištena su dva korisnička sučelja, TRNBuild i Simulation Studio. Simulacija se postavlja u korisničkom sučelju Simulation Studio povezivanjem komponenti na način da izlazni podaci jedne komponente postaju ulazni podaci druge komponente. Komponentna korištena u ovom radu jest komponenta višezonske zgrade *Type 56* čiji se ulazni parametri definiraju u korisničkom sučelju TRNBuild.

3.1. Izrada energijskog modela višezonske zgrade

Modeliranje višezonske zgrade u TRNBuild-u započinje određivanjem Zemljine polutke na kojoj se promatrani objekt nalazi te definiranjem redoslijeda strana svijeta koji odgovara redoslijedu pripremljenih meteoroloških podataka [9]. Sljedeći je korak definiranje geometrije i svojstva slojeva pojedinih zidova i prozora prema Tablicama 2. – 10. prikazanih u odlomku 2.2. Zidovi mogu biti definirani kao vanjski, susjedni, unutarnji i adijabatski. Vanjski zid predstavlja zid koji graniči s vanjskim okolišem te je za njega potrebno odrediti orijentaciju i *view factor to sky* koji definira koliki je postotak neba vidljiv s površine zida (iznosi 1 za horizontalne i 0,5 za vertikalne plohe). Susjedni zid graniči s nekom drugom susjednom zonom, dok se unutarnji zid nalazi unutar zone i predstavlja dodatnu akumulacijsku masu. Adijabatski zid je zid kroz kojeg nema prolaza topline. Prozori se odabiru prema vrijednostima koeficijenta prolaza topline U i faktora g koji označava stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje. Orijehtacija i kategorija prozora odgovara orijentaciji i kategoriji zida na kojem se isti nalazi. Osim geometrije je potrebno definirati i pogonske režime za svaku zonu. Pogonski režimi mogu se definirati kao konstantna vrijednost (opcija *constant*), kao zadani raspored (opcija *schedule*) ili kao ulazni podatak iz neke vanjske datoteke (opcija *input*).

Obzirom da se promatrana zgrada koristi od 07:00 do 18:00 sati 5 dana u tjednu, za taj je period definiran raspored korištenja u *Schedule Type Manager*-u. Za definiranje tjednog rasporeda potrebno je definirati dnevni raspored za pojedini dan u tjednu. Kada se zgrada koristi

dodjeljuje se vrijednost faktora 1, a u ostalim satima (od 00:00 do 07:00 sati i od 18:00 do 24:00 sata) faktor poprima vrijednost 0. Time je definiran dnevni raspored za radne dane od ponedjeljka do petka. Kako sustav vikendom nije uključen, potrebno je izraditi raspored za subotu i nedjelju koji za period od 00:00 do 24:00 sata poprima vrijednost 0. Režim grijanja i hlađenja te unutarnji toplinski dobici definirani su prema prethodno opisanom tjednom rasporedu. Postavna temperatura za grijanje određena je jednadžbom (1):

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

Kada je sustav grijanja uključen, faktor X jednak je 1 pa se na temelju jednadžbe (1) dobije vrijednost postavne temperature 20°C . U slučaju kada se zgrada ne koristi, faktor X jednak je 0 te je iznos postavne temperature -20°C . Na taj je način osigurano da sustav grijanja ostane isključen u periodu kada se zgrada ne koristi. Analogno postavnoj temperaturi za grijanje se određuje i postavna temperatura za hlađenje, a definirana je jednadžbom (2):

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

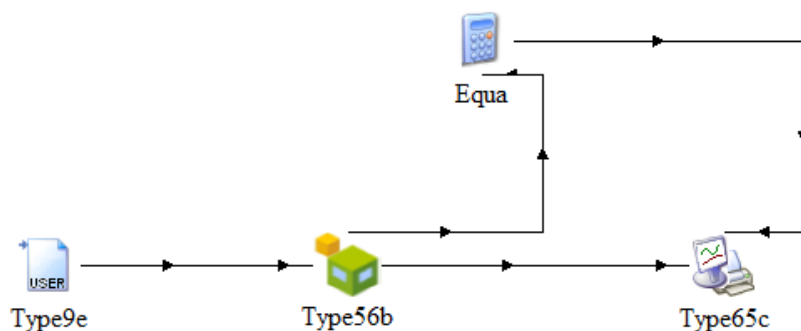
Postavna temperatura za hlađenje iznosi 22°C u periodu kada se zgrada koristi, odnosno 50°C kad se zgrada ne koristi.

Unutarnji toplinski dobici od ljudi, računala i rasvjete se također definiraju preko rasporeda, a iznose $10,30 \text{ W/m}^2$ za vrijeme korištenja zgrade. Za modeliranje unutarnjih dobitaka koristi se *Gain Type Manager*. Zbog jednostavnosti proračuna, pretpostavlja se da se unutarnji dobici predaju prostoru 50% konvekcijom i 50% zračenjem. Infiltracija je modelirana kao konstantna vrijednost od $0,9 \text{ h}^{-1}$.

3.2. Opis rada u korisničkom sučelju TRNSYS-a Simulation Studio

Nakon modeliranja svih zona zgrade provodi se dinamička simulacija u Simulation Studio-u kako bi se odredila potrebna energija za grijanje i hlađenje. Potrebna energija za grijanje i hlađenje služi kao temelj za procjenu potencijala mjera energetske obnove. U Simulation Studio-u povezuju se komponente pri čemu su izlazni podaci jedne komponente ulazni podaci druge komponente (Slika 8.). Ulazni podaci za *Type 56*, sadržani u komponenti *Type 9e*, su meteorološki podaci za tipičnu godinu za grad Zagreb. Izlazni podaci komponente višezonske

zgrade su temperature zraka i potrebne energije za grijanje i hlađenje zona, a ispisuju se pomoću komponente *Type 65c*. Dodatak *Equa* služi za preračunavanje kJs u kWh potrebne energije za jednostavniju obradu podataka. Dinamičke simulacije provedene su za 8760 h s vremenskih korakom od 1 h.



Slika 8. Povezivanje komponenti u Simulation Studio-u

3.3. Izračun isporučene energije i perioda povrata investicije

Rezultat simulacije prethodno opisanog energijskog modela je energija potrebna za grijanje i hlađenje zgrade za svaki sat u godini. Simulacija se prvo provodi za postojeće stanje zgrade koje služi kao referentno stanje za procjenu potencijala energetske obnove. Za potrebe ovog rada, analizirana je promjena stolarije kao jedna od najčešćih mjera obnove vanjske ovojnice te zamjena plinskog kotla s dizalicom topline zrak-voda, kao obnovljivim izvorom energije.

Isporučena energija dobiva se dijeljenjem potrebne energije za grijanje i hlađenje s učinkovitosti sustava distribucije i proizvodnje. Godišnja potrošnja se određuje na temelju isporučene energije te cijene plina i električne energije. U proračunima su korištene cijena plina u iznosu od 0,15 €/kWh i cijena električne energije 0,36 €/kWh prema cjeniku HEP-a na datum 14. travnja 2023. godine.

Isplativost optimizacije promatrana je na temelju perioda povrata investicije (PPI) koji se izračunava tako da se investicijski trošak, izražen u €, podijeli s ostvarenom uštedom na godišnjoj razini. Investicijski trošak se u slučaju obnove vanjske ovojnice određuje iz cijene nove stolarije po kvadratu površine i ukupne površine prozora te iznosi 357 760 € (podatak je dobiven mail korespondencijom dr.sc. Tee Žakule s dipl.ing.arh. Miljenkom Kukićem na datum 5. travnja 2023.). Kod zamjene plinskog kotla investicijski trošak jednak je zbroju cijene dizalice topline i montaže koji iznosi 145 500 € (podatak je dobiven mail korespondencijom dr.sc. Tee Žakule s dipl.ing.stroj. Silvanom Sušilovićem na datum 5. travnja 2023.). Ušteda (€/god) označava razliku ukupnih troškova postojećeg i optimiziranog stanja zgrade.

3.4. Pretpostavke za analizu mjera obnove

Za slučaj promjene stolarije, odnosno postavljanja novih prozora, provedena je simulacija korištenjem svojstava prozora opisanih u Tablici 12. U ovoj analizi pretpostavljeno je da se zgrada grije i hladi postojećim sustavom grijanja i hlađenja, a koji se sastoji od plinskog kotla za grijanje te split-sustava za hlađenje. Za potrebe analize, odnosno izračuna isporučene energije, pretpostavljena je učinkovitost sustava distribucije od 95%, plinskog kotla od 90%, te faktor hlađenja split-sustava (SEER) 3.

Za slučaj zamijene izvora topline pretpostavljeno je da je učin dizalice topline jednak učinku instaliranog plinskog kotla od 350 kW. Pretpostavljeno je da je učinkovitost sustava distribucije ostala ista kao i za referentno stanje (95%), s obzirom da je sustav distribucije isti. Također je pretpostavljeno da sezonska učinkovitost dizalice topline za grijanje (SCOP) iznosi 3, dok za hlađenje (SEER) iznosi 4.

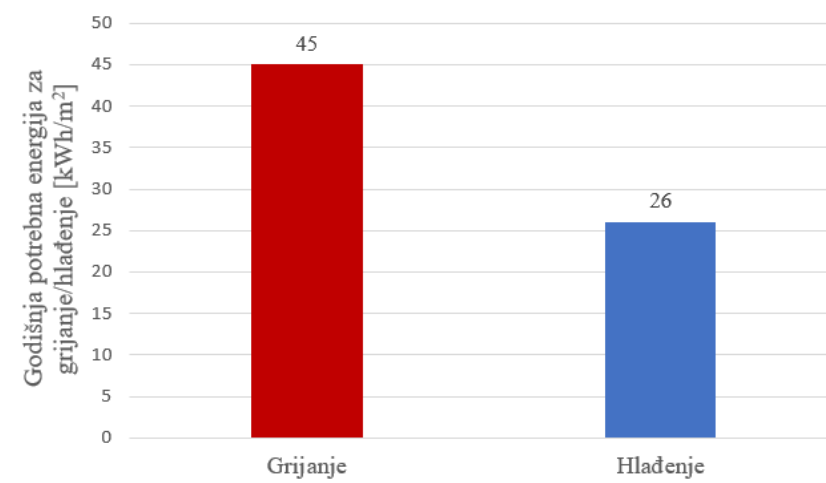
Tablica 12. Svojstva novih prozora s dvostrukim IZO staklom i dva low-e premaza

Koeficijent prolaza topline stakla, U [W/m^2K]	1,1
Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, g [-]	0,62

4. REZULTATI

4.1. Rezultat postojećeg stanja

Nakon provedene simulacije postojećeg stanja dobivena je potrebna energija za grijanje i hlađenje. Godišnja potrebna energija za grijanje iznosi 45 kWh/m² korisne površine, dok godišnja potrebna energija za hlađenje iznosi 26 kWh/m² korisne površine (Slika 9.).



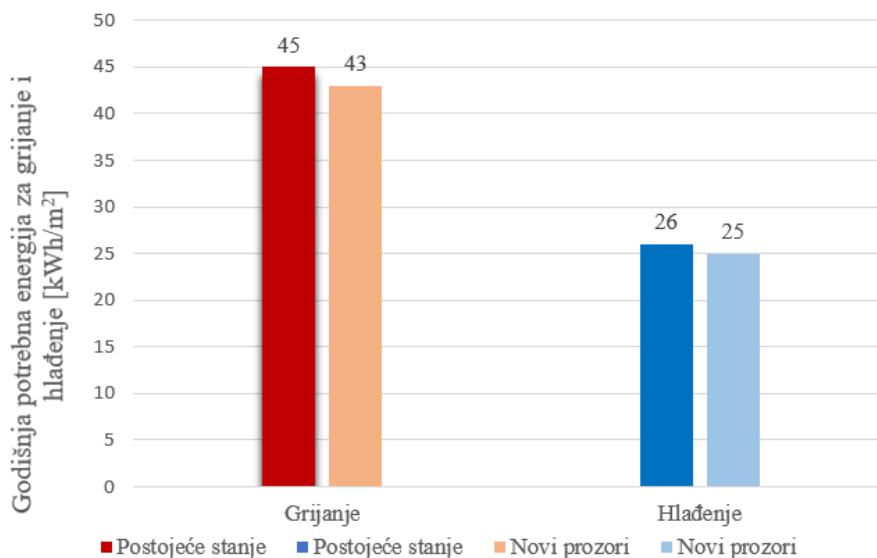
Slika 9. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje postojećeg stanja

Potrebna godišnja energija za grijanje uvećana za gubitke sustava predaje, razvoda i gubitke proizvodnje predstavlja godišnju isporučenu energiju. U provedenoj analizi pretpostavljeno je da su gubitci sustava predaje zanemarivi, a gubitci sustava distribucije i proizvodnje pretpostavljeni su kako je opisano u prethodnom poglavlju. Na temelju provedenih izračuna godišnja isporučena energija za grijanje promatrane zgrade za postojeće stanje iznosi 53 kWh/m², dok isporučena energija za hlađenje iznosi 7 kWh/m². Godišnja isporučena energija pomnožena sa cijenom energenta daje ukupni godišnji trošak, a koji za postojeće stanje iznosi 33 676 € za grijanje te 9 985 € za hlađenje.

4.2. Rezultat mjere poboljšanja ovojnice

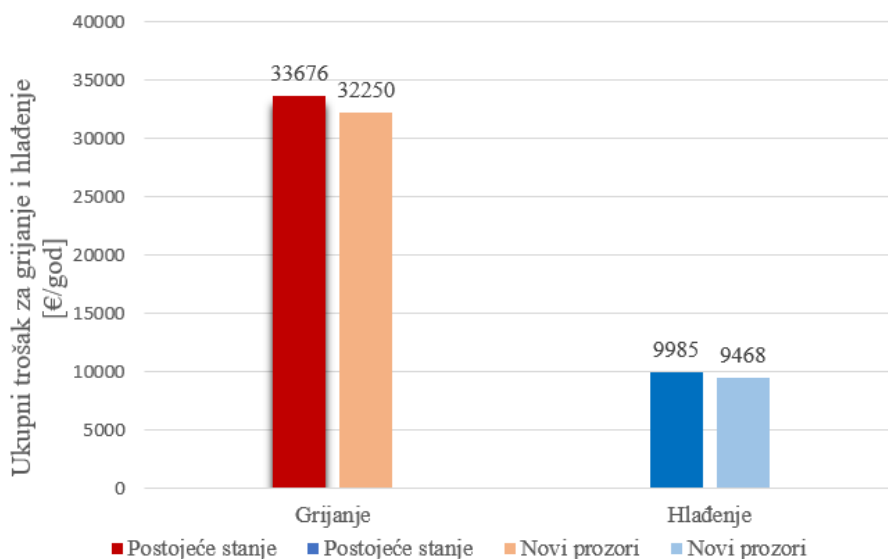
Kako se radi o zgradi koja je zaštićeno kulturno dobro, iz konzervatorskih uvjeta nije moguće mijenjati vanjski izgled ovojnice kao ni vanjske prozore. Stoga je u analizi pretpostavljeno da se zadržavaju stari prozori te se s unutarnje strane ugrađuju novi. Svojstva novih prozora navedena su u Tablici 12.

Potrebna energija za grijanje u slučaju primjene opisane mjere iznosi 43 kWh/m²a, a za hlađenje 25 kWh/m²a. Vidljivo je da dolazi do smanjenja potrebne energije za grijanje za 4% i smanjenja potrebne energije za hlađenje za 5% (Slika 10.).



Slika 10. Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje postojećeg i novog stanja

Analogno prethodnom izračunu ukupnog troška za grijanje/hlađenje za postojeće stanje, izračunat je ukupni trošak za grijanje i hlađenje nakon ugradnje nove stolarije. Iznos ukupnog troška iznosi 32 250 € za grijanje te 9 468 € za hlađenje (Slika 11.), što predstavlja smanjenje ukupnih godišnjih troškova od 1943 €.



Slika 11. Ukupni trošak za grijanje/hlađenje za postojeće stanje i novu stolariju

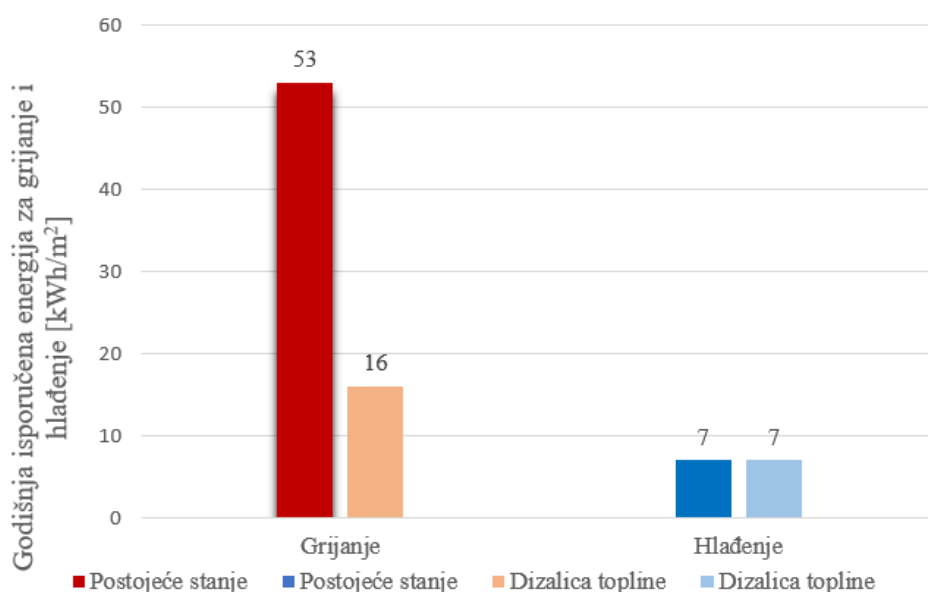
Cijena investicije prikazana je u Tablici 13. Na temelju cijene investicije i uštede u odnosu na postojeće stanje izračunat je period povrata investicije te iznosi 184 godine. S obzirom na dug period povrata investicije i minimalne uštede koje se ostvaruju na godišnjoj razini, može se zaključiti da ugradnja novih prozora nije isplativa.

Tablica 13. Cijena investicije nove stolarije

Cijena investicije [€/m ²]	Površina [m ²]	Cijena investicije [€]
520	688	357 760

4.3. Rezultat mjere poboljšanja tehničkog sustava

Druga analizirana mjera pretpostavlja zamjenu postojećeg plinskog kotla dizalicom topline zrak-voda pri čemu su zadržani postojeći prozori. Rezultati analize pokazuju kako je primjenom ove mjere moguće postići značajno smanjenje isporučene energije za grijanje, i to za 70%. U ovom slučaju isporučena energija za grijanje iznosi 16 kWh/m² (Slika 12.). Kod energije za hlađenje nije došlo do promijene s obzirom da je pretpostavljeno da se za hlađenje zadržava postojeći split-sustav. Naime, iako je novu dizalicu topline moguće koristiti i za hlađenje, to bi zahtijevalo zamjenu postojećih radijatora s ventilokonvektorima, a što u ovom radu nije analizirano. Osim toga, pretpostavljeno je da nema razlike u SEER-u između postojećih split- sustava i dizalice topline.

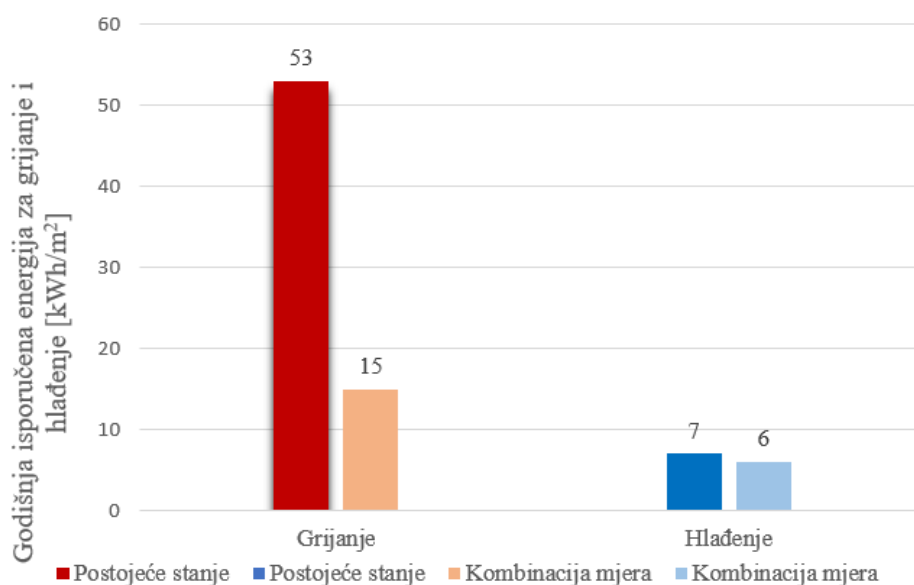


Slika 12. Godišnja isporučena energija za postojeće stanje i novo ugrađenu dizalicu topline

Cijena investicije obuhvaća cijenu dizalice topline zrak-voda i montaže te iznosi 145 500 €, a period povrata investicije za analiziranu mjeru iznosi 15 godina. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako dizalica topline predstavlja opravdan izbor za unaprjeđenje tehničkog sustava zgrade s obzirom na uštede koje ostvaruje te s obzirom na činjenicu da se ova tehnologija ubraja u obnovljive izvore energije.

4.4. Rezultat kombinacije mjera poboljšanja ovojnice i poboljšanja tehničkog sustava

Kombinacijom mjera implementacije dizalice topline i novih prozora isporučena energija za grijanje iznosi 15 kWh/m² čime se ostvaruje smanjenje od 71%. Uz to se isporučena energija za hlađenje smanjuje za 1 kWh/m² u odnosu na postojeće stanje (Slika 13.). Period povrata investicije u ovom slučaju iznosi 46 godina. S obzirom da se uz približno trostruko veći period povrata investicije u odnosu na prethodni slučaj (ugradnja samo dizalice topline) postiže neznatna ušteda, može se zaključiti da kombinacija mjera nije isplativa.



Slika 13. Godišnja isporučena energija za postojeće stanje i kombinaciju mjera obnove

5. ZAKLJUČAK

Svrha rada bila je analiza utjecaja dvaju mjera energetske obnove na primjeru zgrade Ministarstva kulture u Zagrebu, a koja nosi status kulturnog dobra. Prva mjera koja je analizirana obuhvaća ugradnju novih prozora, dok se druga mjera odnosi na unaprjeđenje tehničkog sustava instalacijom dizalice topline zrak-voda. Smanjenjem vrijednosti isporučene energije ostvaruje se ušteda, ali i pozitivan efekt na okoliš zbog manjeg korištenja fosilnih goriva i emisije stakleničkih plinova.

Energijski model zgrade izrađen je u programu za dinamičke simulacije TRNSYS, pri čemu je zgrada, prema smjernicama za toplinsko zoniranje, podijeljena na 39 toplinskih zona. Za svaku zonu je u korisničkom sučelju TRNBuild definirana geometrija, sastav ovojnice i pogonski režimi. Simulacija je provedena za cijelu godinu s vremenskim korakom od jednog sata. Za vanjske uvijete korištena je tipična meteorološka godina u gradu Zagrebu. Izlazni podaci dinamičkih simulacija bili su potrebna energija za grijanje i hlađenje, a koji su zatim korišteni za izračun isporučene energije. U svim slučajevima pretpostavljena je učinkovitost sustava distribucije od 95%. Kod analize zamjene stolarije uzeta je učinkovitost plinskog kotla od 90% te faktor hlađenja split-sustava (SEER) 3, dok je za dizalicu topline pretpostavljena sezonska učinkovitost koja za grijanje (SCOP) iznosi 3, a za hlađenje (SEER) iznosi 4. Za procjenu financijske isplativosti provedene mjere, kao kriterij korišten je period povrata investicije.

Prva analizirana mjera obnove odnosila se na ugradnju prozora s unutarnje strane starih prozora budući da se promatrana zgrada nalazi pod zaštitom kao kulturno dobro te nije dozvoljeno mijenjati vanjski izgled ovojnice. Smanjenje potrebne energije za grijanje za promatrani slučaj iznosi 4%, a za hlađenje 5%. S obzirom da je cijena investicije za nove prozore značajna (357 760 €), a ušteda koja se ostvaruje praktički zanemariva, period povrata investicije iznosio bi 184 godine. Stoga se ova mjera ne preporuča.

Druga analizirana mjera odnosi se na zamjenu postojećeg plinskog kotla dizalicom topline zrak-voda. Smanjenje isporučene energije za grijanje u ovom slučaju iznosi 70%, dok period povrata investicije iznosi 15 godina. Iako je vrijeme povratka investicije i dalje značajno, može se zaključiti da instalacija dizalice topline za proizvodnju energije doprinosi boljoj održivosti sustava s obzirom da se ova tehnologija ubraja u obnovljive izvore energije. Stoga se ova mjera preporučuje.

Kombinacijom prethodno opisanih mjera dolazi do smanjenja isporučene energije za 71%, a period povrata investicije iznosi 46 godina. S obzirom da se ne ostvaruje značajno poboljšanje u odnosu na slučaj ugradnje samo dizalice topline, a period povrata investicije se povećava za 31 godinu, ova mjera se ne preporuča. U tablici 14. prikazana je usporedba rezultata za sve analizirane slučajeve.

Tablica 14. Rezultati analize za sve analizirane slučajeve

	Ukupni troškovi [€/god]	Ušteda [€/god]	Investicijski troškovi [€]	PPI [god]
Postojeće stanje	43 661	-	-	-
Novi prozori	41 718	1 943	357 760	184
Dizalica topline	34 232	9 429	145 500	15
Kombinacija mjera	32 688	10 972	503 260	46

LITERATURA

- [1] <https://www.fzoeu.hr/hr/enu-u-zgradarstvu/7571> , Pristupljeno 13.2.2024.
- [2] https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Program_energetske_obnove_kulturna_dobra_do_2030.pdf , Pristupljeno 13.2.2024.
- [3] <https://www.ing-grad.hr/hr/sto-radimo/obnova-kulturne-bastine/javne-gradevine/zgrada-ministarstvo-kulture-runjaninova-1-zagreb> , Pristupljeno 13.2.2024.
- [4] <https://www.zakon.hr/z/340/Zakon-o-za%C5%A1titi-i-o%C4%8Duvanju-kulturnih-dobara> , Pristupljeno 13.2.2024.
- [5] HRN EN ISO 52016-1. Energijska svojstva zgrada- Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarnje temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja, 2017.
- [6] Soldo V., Novak S., Horvat I.: Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [7] Dović D., Ferdelji N., Horvat I., Rodić A. : Algoritam za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [8] TRNSYS 17 Documentation: Getting Started (Volume 1). Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2012.
- [9] TRNSYS 17 Documentation: Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild (Volume 5). Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2012.