

Postizanje standarda niskouglične zgrade na primjeru zgrade Muzeja Slavonije u Osijeku

Biloš, Mateo

Master's thesis / Diplomski 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:235:018444>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-09**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mateo Biloš

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Mateo Biloš

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Tei Žakuli za nesebično mentorstvo i kontinuiranu podršku. Njena stručnost i razumijevanje bili su od neprocjenjive važnosti za završetak ovog rada.

Posebnu zahvalnost želim izraziti mag. ing. Luciji Hajsok za pomoć koju je pružila tijekom procesa izrade ovog diplomskog rada. Njena podrška bila je neizostavan dio mog uspjeha.

Neizmjernu zahvalnost dugujem svojim roditeljima na njihovom neumornom trudu, radu, požrtvornosti, razumijevanju i neprestanoj podršci kroz cijeli period studiranja. Njihova vjera u mene bila je temelj na kojem sam gradio svoj akademski uspjeh.

Hvala i mojoj braći na podršci i ohrabrenju u svim fazama mog obrazovanja. Njihova prisutnost i razumijevanje uvijek su bili izvor dodatne snage i motivacije.

Mateo Biloš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mechatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mateo Biloš** JMBAG: 0035226848

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Postizanje standarda niskouglične zgrade na primjeru zgrade Muzeja Slavonije u Osijeku**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Achieving the low-carbon building standard using the example of the Museum of Slavonia in Osijek**

Opis zadatka:

Muzej Slavonije u Osijeku jedan je od najstarijih i najznačajnijih muzeja u Hrvatskoj. Kompleks zgrada u koje se planira preseljenje muzeja nalazi se u osječkoj Tvrđi na Trgu Sv. Trojstva te ima status kulturnog dobra. Zgrada je trenutno u derutnom stanju te se planira u potpunosti rekonstruirati. Cilj rada je na primjeru ove zgrade provesti analizu potencijala za postizanje niskouglične zgrade.

Kao prvi korak potrebno je proučiti i identificirati specifičnosti energetske obnove zgrada koje imaju status kulturnog dobra. Zatim je potrebno provesti analizu potrebne energije za grijanje i hlađenje korištenjem dinamičkih simulacija u računalnom programu TRNSYS[®]. Na temelju potrebne energije za grijanje i hlađenje potrebno je analizirati energetske, financijske i klimatološke učinak tri moguća scenarija sustava za grijanje, hlađenje i ventilaciju, kao i mogućnost primjene obnovljivih izvora energije na lokaciji zgrade. Konačno, potrebno je donijeti zaključak o odabranom troškovno-optimalnom scenariju te dati preporuke za investitora.

Rad treba sadržavati:

- opis analizirane zgrade,
- opis razvijenog energijskog modela u računalnom programu TRNSYS[®],
- rezultate o potrebnoj, isporučenoj i primarnoj energiji za analizirane scenarije,
- usporedbu emisija CO₂ za analizirane scenarije,
- usporedbu pogonskih i investicijskih troškova za analizirane scenarije,
- zaključak o odabranom troškovno-optimalnom scenariju.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

9. svibnja 2024.

11. srpnja 2024.

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv.prof.dr.sc. Tea Žakula

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Tea Žakula

Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY.....	IX
1. Uvod.....	1
2. Ulazni podaci za zgradu.....	2
2.1. Tlocrtni prikaz zgrade.....	4
2.2. Fizika zgrade.....	7
2.3. Podjela zgrade na toplinske zone.....	7
2.4. Ulazni meteorološki podaci za energijski model zgrade.....	13
2.5. Pogonski režimi i način korištenja zgrade.....	15
3. Simulacijski model za izračun potrebne energije za grijanje.....	18
3.1. Matematički model za simulaciju višezonske zgrade.....	18
3.1.1. Matematički model za simulaciju temperature zraka u zoni.....	18
3.1.2. Matematički model za simulaciju toplinskih tokova konvekcijom prema zoni.....	19
3.1.3. Matematički model za simulaciju toplinskog toka između zidova i zraka u prostoriji.....	21
3.1.4. Matematički model distribucije zračenja na plohe zona.....	23
3.2. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje.....	24
4. Proračun godišnje isporučene energije, primarne energije i emisije CO ₂	28
3.3. Ulazni podaci za proračun isporučene energije.....	31
3.4. Proračun isporučene energije za ventilacijski sustav i ventilokonvektore.....	33
3.5. Proračun isporučene energija za tri scenarija.....	34
3.6. Proračun godišnje primarne energije.....	36
3.7. Proračun godišnje emisije CO ₂	37
4. Proračun investicijskih i pogonskih troškova.....	38
4.1. Proračun kumulativnih troškova za ventilacijski sustav i sustav ventilokonvektora.....	38
4.2. Proračun kumulativnih troškova za Scenarij 1.....	39
4.3. Proračun kumulativnih troškova za Scenarij 2.....	41
4.4. Proračun kumulativnih troškova za Scenarij 3.....	43
5. Procjena potencijala ugradnje fotonaponskih panela.....	45
5.1. Proračun potrebne površine i investicijskih troškova fotonaponskih panela.....	47
6. Rezultati.....	48
6.1. Usporedba godišnje isporučene energije za sve scenarije.....	48

6.2. Usporedba godišnje primarne energije za sve scenarije.....	49
6.3. Usporedba kumulativnih troškova za sve scenarije.....	51
6.4. Usporedba godišnje emisije CO ₂ za sve scenarije.....	52
7. Zaključak.....	53
LITERATURA.....	55

POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Lokacija muzeja Slavonije u Osijeku. Plavo označava trenutnu lokaciju, crveno označava novu lokaciju i predmet ove analize.....</i>	2
<i>Slika 2. Trenutno stanje nove lokacije Muzeja Slavonije.....</i>	3
<i>Slika 3. 3D prikaz analizirane zgrade.....</i>	4
<i>Slika 4. Tlocrt prizemlja.....</i>	5
<i>Slika 5. Tlocrt prvog kata.....</i>	5
<i>Slika 6. Tlocrt potkrovlja.....</i>	6
<i>Slika 7. Podjela prizemlja na toplinske zone.....</i>	8
<i>Slika 8. Podjela prvog kata na toplinske zone.....</i>	9
<i>Slika 9. Podjela potkrovlja na toplinske zone.....</i>	9
<i>Slika 10 Temperatura okoliša.....</i>	14
<i>Slika 11 Ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu.....</i>	14
<i>Slika 12. Daljinsko grijanje [5].....</i>	28
<i>Slika 13 Rashladnik vode [6].....</i>	28
<i>Slika 14 Dizalica topline voda-zrak [7].....</i>	29
<i>Slika 15 Dizalica topline voda-voda s bunarom [8].....</i>	29
<i>Slika 16 Ventilokonvektori [9].....</i>	30
<i>Slika 17 Mehanička ventilacija [10].....</i>	30
<i>Slika 18. Dostupna površina krova za fotonaponske panele.....</i>	46
<i>Slika 19. Usporedba godišnje isporučene energije za sve scenarije.....</i>	49
<i>Slika 20. Usporedba godišnje primarne energije za sve scenarije.....</i>	50
<i>Slika 21. Usporedba kumulativnih troškova za sve scenarije.....</i>	51
<i>Slika 22. Usporedba godišnje emisije CO₂ za sve scenarije.....</i>	52

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1. Fizikalne veličine zidova.....</i>	<i>7</i>
<i>Tablica 2. Fizikalne veličine prozora.....</i>	<i>7</i>
<i>Tablica 4. Površine i volumeni toplinskih zona prizemlja.....</i>	<i>10</i>
<i>Tablica 5. Površine i volumeni toplinskih zona prvog kata.....</i>	<i>11</i>
<i>Tablica 6. Površine i volumeni toplinskih zona potkrovlja.....</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 7. Ukupna površina i volumen zgrade.....</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 3. Pogonski režimi i način korištenja.....</i>	<i>15</i>
<i>Tablica 8. Godišnja potrebna energija za toplinske zone prizemlja.....</i>	<i>25</i>
<i>Tablica 9. Godišnja potrebna energija za toplinske zone prvog kata.....</i>	<i>26</i>
<i>Tablica 10. Godišnja potrebna energija za toplinske zone potkrovlja.....</i>	<i>27</i>
<i>Tablica 11. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje cijele zgrade.....</i>	<i>27</i>
<i>Tablica 12. Ulazni podaci za proračun daljinskog grijanja.....</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 13. Ulazni podaci za proračun rashladnika vode.....</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 14. Ulazni podaci za proračun dizalice topline voda-zrak.....</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 15. Ulazni podaci za proračun dizalice topline voda-voda.....</i>	<i>32</i>
<i>Tablica 16. Ulazni podaci za proračun ventilokonvektora.....</i>	<i>32</i>
<i>Tablica 17. Ulazni podaci za proračun ventilacijskog sustava.....</i>	<i>33</i>
<i>Tablica 18. Kapacitet ventilacijskog sustava.....</i>	<i>34</i>
<i>Tablica 19. Godišnja potrebna i isporučena energija za ventilacijski sustav.....</i>	<i>34</i>
<i>Tablica 20. Godišnja isporučena energija za ventilokonvektore.....</i>	<i>34</i>
<i>Tablica 21. Isporučena energija za Scenarij 1.....</i>	<i>35</i>
<i>Tablica 22. Isporučena energija za Scenarij 2.....</i>	<i>35</i>
<i>Tablica 23. Isporučena energija za Scenarij 3.....</i>	<i>35</i>
<i>Tablica 24. Faktori primarne energije [3].....</i>	<i>36</i>
<i>Tablica 25. Godišnja primarna energija za tri scenarija.....</i>	<i>36</i>
<i>Tablica 26. Faktori emisije CO₂ [3].....</i>	<i>37</i>
<i>Tablica 27. Godišnja emisija CO₂ za tri scenarija.....</i>	<i>37</i>
<i>Tablica 28. Troškovi toplinske i električne energije.....</i>	<i>38</i>
<i>Tablica 29. Investicijski troškovi za ventilacijski sustav.....</i>	<i>38</i>
<i>Tablica 30. Investicijski troškovi za ventilokonvektore.....</i>	<i>39</i>
<i>Tablica 31. Investicijski troškovi za daljinsko grijanje.....</i>	<i>39</i>
<i>Tablica 32. Investicijski troškovi za rashladnik vode.....</i>	<i>40</i>
<i>Tablica 33. Investicijski troškovi za Scenarij 1.....</i>	<i>40</i>
<i>Tablica 34. Pogonski troškovi za Scenarij 1.....</i>	<i>41</i>
<i>Tablica 35. Kumulativni troškovi za Scenarij 1.....</i>	<i>41</i>
<i>Tablica 36. Investicijski troškovi za dizalicu topline voda-zrak.....</i>	<i>41</i>
<i>Tablica 37. Investicijski troškovi za Scenarij 2.....</i>	<i>42</i>
<i>Tablica 38. Pogonski troškovi za Scenarij 2.....</i>	<i>42</i>
<i>Tablica 39. Kumulativni troškovi za Scenarij 2.....</i>	<i>42</i>
<i>Tablica 40. Investicijski troškovi za dizalicu topline voda-voda s bunarom.....</i>	<i>43</i>
<i>Tablica 41. Investicijski troškovi za Scenarij 3.....</i>	<i>43</i>
<i>Tablica 42. Pogonski troškovi za Scenarij 3.....</i>	<i>44</i>
<i>Tablica 43. Kumulativni troškovi za Scenarij 3.....</i>	<i>44</i>
<i>Tablica 44. Ulazni podaci za fotonaponske panele.....</i>	<i>46</i>
<i>Tablica 45. Potrebna površina i investicijski troškovi fotonaponskih panela.....</i>	<i>47</i>

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
δ	[cm]	debljina zida
λ	[W/(mK)]	toplinska provodnost
c	[J/(kgK)]	specifični toplinski kapacitet
ρ	[kg/m ³]	gustoća
U	[W/m ²]	koeficijent prolaza topline
g	[-]	vrijednost propuštanja sunčevog zračenja
T_{gr}	[°C]	temperatura grijanja prema pogonskom režimu
T_{hl}	[°C]	temperatura hlađenja prema pogonskom režimu
T_i	[°C]	temperatura zone
Q_i	[W]	konvekcijski toplinski tok prema zoni
c_i	[J/K]	toplinski kapacitet zraka u zoni
Δt	[s]	vremenski korak simulacije
$Q_{surf,i}$	[W]	toplinski tok izračunat Star network mreže
$Q_{inf,i}$	[W]	infiltracijski toplinski tok prema zoni
$Q_{vent,i}$	[W]	ventilacijski toplinski tok prema zoni
$Q_{g,c,i}$	[W]	konvekcijski udio unutarnjih toplinskih dobitaka
$Q_{cplg,i}$	[W]	toplinski tok strujanja zraka između zona
$Q_{solair,i}$	[W]	toplinski tok sunčevog zračenja pretvoren neposredno
$Q_{SHCCI,i}$	[W]	toplinski tok sunčevog zračenja prema uređajima za zasjenjenje
V	[m ³ /s]	protok infiltracijskog zraka
T_{out}	[°C]	temperatura vanjskog zraka
V_{vent}	[m ³ /s]	protok ventilacijskog zraka
T_{vent}	[°C]	temperatura ventilacijskog zraka
V_{cplg}	[m ³ /s]	protok zraka iz susjedne zone
$T_{zone,adj}$	[°C]	temperatura zraka susjedne zone
$f_{solair,i}$	[-]	udio Sunčevog zračenja pretvoren u toplinski tok
$I_{trans,dif,i}$	[W]	difuzno Sunčevo zračenje preneseno kroz prozore zone
$I_{trans,dir,i}$	[W]	direktno Sunčevo zračenje preneseno kroz prozore zone
$q_{comb,s,o}$	[W]	kombinirani toplinski tok koji predstavlja konvekciju i zračenje s vanjske strane zida
$S_{s,o}$	[-]	faktor koji predstavlja distribuciju zračenja
$\dot{q}_{c,s,o}$	[W]	toplinski tok konvekcijom na vanjskoj strani zida
$\dot{q}_{r,s,o}$	[W]	toplinski tok zračenjem na vanjskoj strani zida
$h_{conv,s,o}$	[W/(m ² K)]	koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani zida
$T_{s,o}$	[°C]	temperatura vanjske plohe zida

σ	[W/(m ² K ⁴)]	Stefan-Boltzmannova konstanta
$\varepsilon_{s,o}$	[-]	faktor emisije za vanjsku plohu zida
T_{fsky}	[°C]	fiktivna temperatura koja uključuje zajednički utjecaj temperatura neba i tla
f_{sky}	[-]	udio neba vidljiv s vanjske površine zida
T_{grd}	[°C]	temperatura tla
T_{sky}	[°C]	temperatura neba
$q_{s,i}$	[W/m ²]	toplinski tok provođenjem na unutarnjoj strani zida
$q_{comb,s,i}$	[W/m ²]	kombinirani toplinski tok zračenjem i konvekcijom na unutarnjoj strani zida
$S_{s,i}$	[W/m ²]	toplinski tok zračenjem uslijed Sunčevih dobitaka i unutarnjih toplinskih dobitaka zračenjem
WG	[W/m ²]	toplinski tok na unutarnjoj strani zida koji je moguće svojevrijedno definirati
$\rho_{dif,s}$	[-]	faktor refleksije za difuzno zračenje za unutarnju plohu zida
$q_{g,r,i}$	[W/m ²]	unutarnji toplinski dobici zračenjem

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je na primjeru rekonstrukcije zgrade Muzeja Slavonije u Osijeku provesti analizu potencijala za postizanje niskougljične zgrade. Preseljenje stalnog postava Muzeja planirano je u zgradu koja ima status kulturnog dobra, ali se trenutno nalazi u derutnom stanju. Stoga je prvi korak ovog rada bio je istražiti i identificirati specifičnost energetske obnove zgrada koje imaju status kulturnog dobra.

U radu je detaljno opisana analizirana zgrada, a što uključuje podatke o fizici zgrade (sastav zidova i prozora), geometriju te način korištenja i pogonske režime. Kao prvi korak provedena je analiza godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje, za što je bio korišten računalni program za dinamičke simulacije *TRNSYS*. Na temelju podataka o potrebnoj energiji te podataka proizvođača opreme izračunate su godišnja isporučena energija za grijanje, hlađenje i ventilaciju, godišnja primarna energija te godišnje emisije CO₂. Analiza je provedena za tri moguća scenarija sustava za grijanje, hlađenje i ventilaciju, te je također analizirana mogućnost primjene obnovljivih izvora energije na zgradi. Konačno, analiziran je energetski, financijski i klimatski utjecaj za tri spomenuta scenarija.

Tri analizirana sustava grijanja i hlađenja uključivala su kako slijedi: sustav s daljinskim grijanjem i rashladnikom vode, sustav s dizalicom topline voda-zrak i sustav s dizalicom topline voda-voda s bunarom. Ventilacijski sustav i sustav ventilokonvektora bio je isti za sva tri scenarija. Uz primjenu dizalice topline, a koja se ubraja u obnovljivi izvor, primjena obnovljivih izvora energije također je istražena kroz analizu četvrtog scenarija koji je uključivao implementaciju fotonaponskih panela na krovu zgrade.

Konačno, bilo je potrebno donijeti zaključak o odabranom troškovno-optimalnom scenariju i dati preporuke za investitora. Kao konačan odabir odabran je četvrti scenarij u kojem su sadržani: sustav ventilokonvektora kao ogrjevno-rashladnog tijela zgrade, sustav mehaničke ventilacije, dizalica topline voda-zrak za proizvodnju toplinske i rashladne energije te fotonaponski paneli za proizvodnju električne energije. Konačni iznosi relevantnih vrijednosti za odabrani scenarij su: godišnja isporučena energija u iznosu od 226 010 kWh, odnosno 33 kWh/m² ukupne korisne površine. Primarna energija za odabrani scenarij iznosi 0 kWh iz razloga što se isporučena energija za grijanje, hlađenje i ventilaciju u potpunosti proizvodi korištenjem fotonaponskih panela. Procijenjeni kumulativni troškovi koji se sastoje od investicijskih i pogonskih troškova za

10 godina rada iznose 782 154 eura, a predloženim rješenjem postignuta je i nulta razina godišnje emisije CO₂.

Ključne riječi: energetska obnova, troškovno-optimalna analiza, održive zgrade, TRNSYS, godišnja emisija CO₂, energetska učinkovitost

SUMMARY

The aim of this study was to analyze the potential for achieving a low-carbon building through the example of the reconstruction of the Museum of Slavonia building in Osijek. The relocation of the Museum's permanent exhibition is planned for a building with the status of a cultural heritage but is currently in a derelict condition. Therefore, the first step of this study was to investigate and identify the specificities of energy renovation of buildings with cultural heritage status.

The study provides a detailed description of the analyzed building, including data on the building's physics (composition of walls and windows), geometry, usage, and operational regimes. The first step involved analyzing the annual energy demand for heating and cooling, using the TRNSYS computer program for dynamic simulations. Based on the energy demand data and the equipment manufacturers' data, the annual delivered energy for heating, cooling, and ventilation, the annual primary energy, and the annual CO₂ emissions were calculated. The analysis was conducted for three possible scenarios of heating, cooling, and ventilation systems, and the possibility of applying renewable energy sources to the building was also analyzed. Finally, the energy, financial, and climatic impacts of the three mentioned scenarios were analyzed.

The three analyzed heating and cooling systems included the following: a system with district heating and a water chiller, a water-to-air heat pump system, and a water-to-water heat pump system with a well. The ventilation system and the fan coil unit system were the same for all three scenarios. In addition to the application of the heat pump, which is classified as a renewable source, the application of renewable energy sources was also investigated through the analysis of a fourth scenario, which included the implementation of photovoltaic panels on the building's roof.

Finally, it was necessary to draw a conclusion on the selected cost-optimal scenario and provide recommendations for the investor. The final choice was the fourth scenario, which included a fan coil unit system as the building's heating and cooling element, a mechanical ventilation system, a water-to-air heat pump for the production of thermal and cooling energy, and photovoltaic panels for the production of electrical energy. The final relevant values for the selected scenario are annual delivered energy amounting to 226,010 kWh, or 33 kWh/m² of total usable area. The primary energy for the selected scenario is 0 kWh because the delivered energy for heating, cooling, and ventilation is

completely produced using photovoltaic panels. The estimated cumulative costs, consisting of investment and operational costs for 10 years of operation, amount to 782,154 euros, and the proposed solution achieves zero annual CO₂ emissions.

Keywords: energy renovation, cost-optimal analysis, sustainable buildings, TRNSYS, annual CO₂ emissions, energy efficiency

1. Uvod

Energetska obnova zgrada pod kulturnom zaštitom u Hrvatskoj predstavlja složen i specifičan proces iz razloga što se takve zgrade tretiraju kao povijesni i kulturni spomenici. Pri provođenju energetske obnove potrebno je uzeti u obzir očuvanje estetike zgrade i njene arhitekture, te također maksimizirati učinkovitost. Proces definiraju jasni zakoni i regulative kao što su *Zakon o zaštiti i očuvanju kulturnih dobara* i *Zakon o gradnji*, koji definiraju postupke koji dovode do zaštite takvih zgrada. Nadzor i suglasnost mora proizaći od strane konzervatorskih odijela *Ministarstva kulture i medija Republike Hrvatske*, što osigurava da se poštuju vrijednosti takvih zgrada.

Sami postupak obnove uključuje analizu postojećeg stanja, izbor materijala i tehnologija te implementaciju modernih energetske sustava u obnovljenu zgradu. Ovaj postupak je sadržan u ovom radu. Analiza postojećeg stanja prikazana je u početku rada, gdje su opisana fizikalna svojstva, tlocrti i pogonski režimi zgrade. Nadalje, implementacija modernih energetske sustava sačinjavala je većinski dio rada gdje su na primjeru tri scenarija energetske sustava za grijanje, hlađenje i ventilacije izvršeni proračuni za analizu energetske, financijske i klimatske učina. Dodatno je istražena mogućnost primjene sustava obnovljivih izvora na zgradi.

Energetska analiza uključivala je dinamičku simulaciju u računalnom programu *TRNSYS*, a što je za rezultat dalo godišnju potrebnu energiju za grijanje i hlađenje zgrade. Zatim je slijedio izračun godišnjih isporučenih energija i izračun godišnjih primarnih energija. Financijska analiza sadržavala je proračun kumulativnih troškova koji su uključivali investicijske troškove i pogonske troškove u trajanju od 10 godina. Klimatski utjecaj analiziran je kroz izračun godišnjih emisija CO₂. Mogućnost primjene obnovljivih izvora istražena je kroz implementaciju dizalice topline za proizvodnju toplinske i rashladne energije te fotonaponskih panela za proizvodnju električne energije, a čime bi se pokrila godišnja potrošnja električne energije zgrade

2. Ulazni podaci za zgradu

Muzej Slavonije u Osijeku je najveći hrvatski muzej općeg tipa, osnovan je 1877. godine, a od 1946. godine muzej se nalazi u zgradi Magistrata, izgrađenoj 1702. godine (Slika 1 prikazuje zgradu označenu plavim okvirom) [1].

U svrhu proširenja i organizacije stalnog postava planirano je preseljenje muzeja u obližnju zgradu, a koja će biti prenamijenjena u svrhu ostvarenja uvjeta održavanja sadržaja muzeja (Slika 1 prikazuje zgradu označenu crvenim okvirom).



Slika 1. Lokacija muzeja Slavonije u Osijeku. Plavo označava trenutnu lokaciju, crveno označava novu lokaciju i predmet ove analize.

Slika 2 prikazuje trenutno stanje zgrade u koju je planirano preseljenje i za koju će biti izvedena prenamjena.



Slika 2. Trenutno stanje nove lokacije Muzeja Slavonije

Prenamjena ovog objekta definirana je glavnim projektom zgrade, iz kojeg su korišteni ulazni podaci za ovaj rad. U ovom poglavlju prikazani su relevantni podaci za energetske analize zgrade, a to su: detaljan tlocrt, termodinamička svojstva zidova i prozora te način korištenja (broj ljudi, raspored) i pogonski režimi (period grijanja/hlađenja i postavne temperature prostorija). Način korištenja i pogonski režimi definirani za svaku toplinsku zonu zasebno.

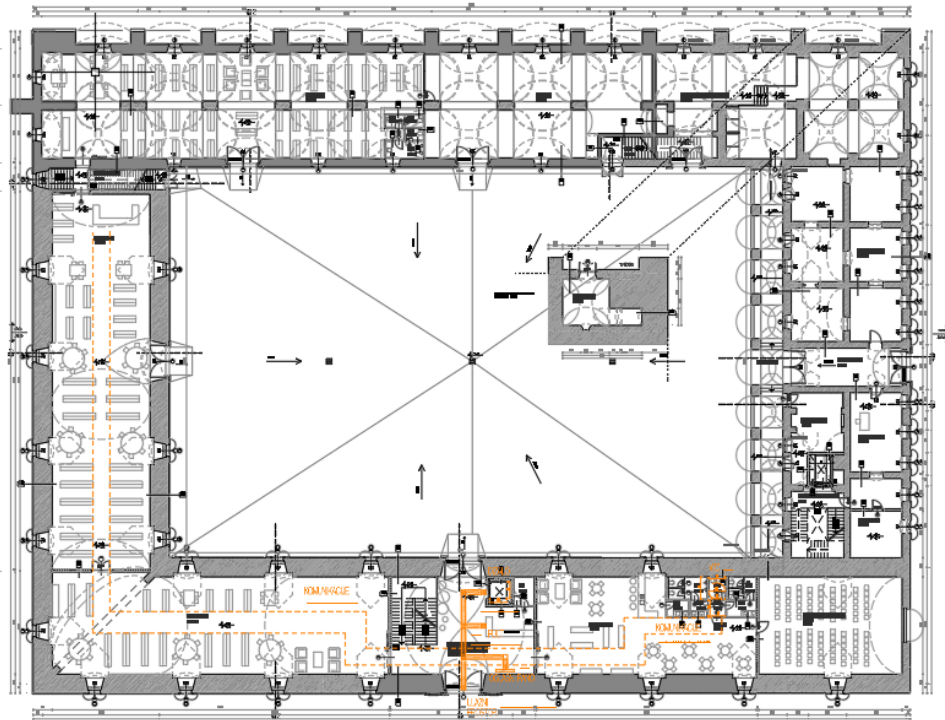
2.1. Tlocrtni prikaz zgrade

Slika 3 prikazuje zgradu u 3D prikazu s pomoću *Google Earth* alata kao predodžbu trenutnog stanja zgrade. Za zgradu je u računalnoj simulaciji pretpostavljeno da je orijentirana točno prema sjeveru, dok u stvarnosti odstupa 8° . Zgrada ima tri etaže: prizemlje površine 2096 m^2 , prvi kat površine 2345 m^2 i potkrovlje površine 2442 m^2 .



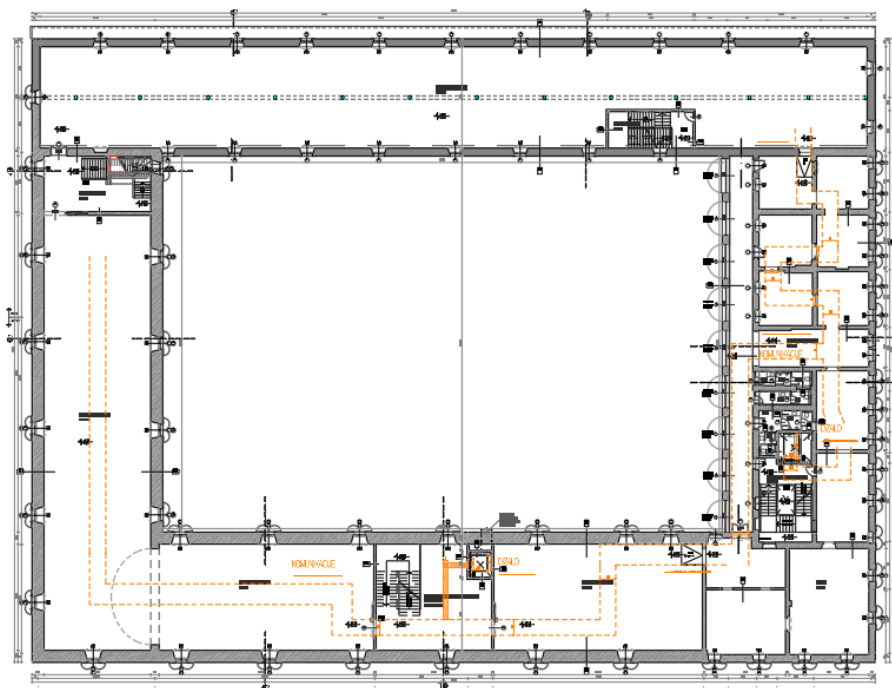
Slika 3. 3D prikaz analizirane zgrade

Slika 4 prikazuje tlocrtnu dokumentaciju za prenamjenu trenutnog stanja prizemlja nove zgrade. U prizemlju je planirano 19 prostorija sljedećih namjena: depo, knjižnica, čitaonica, kafić, suvenirnica, stubišta, prostori za strojarske instalacije i sanitarne prostorije.



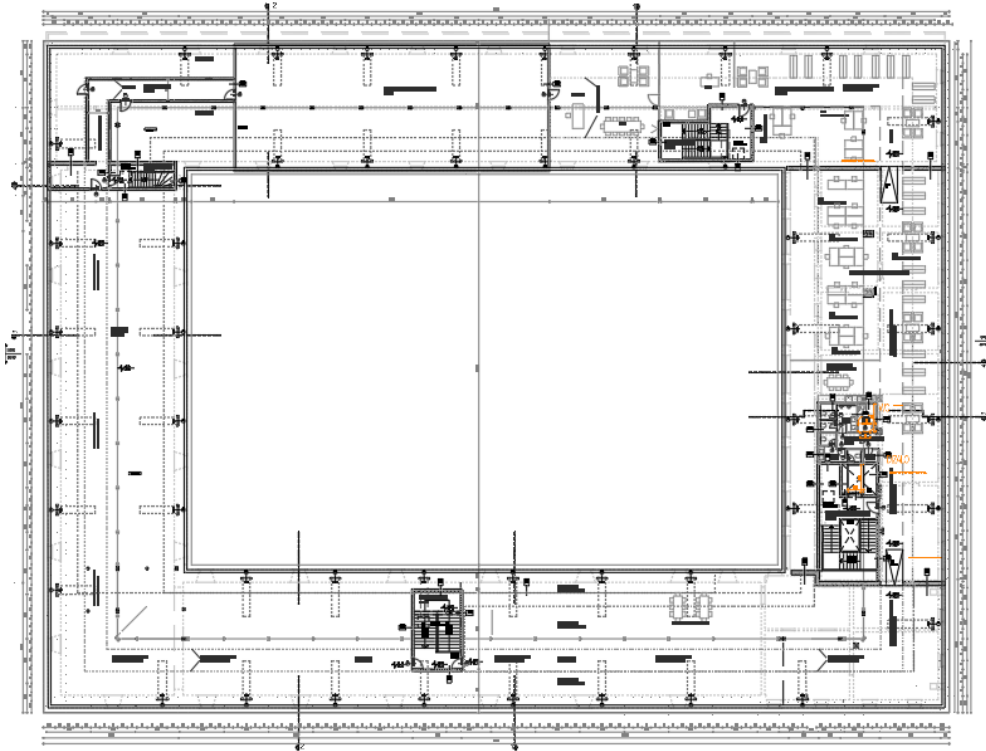
Slika 4. Tlocrt prizemlja

Slika 5 prikazuje tlocrtnu dokumentaciju za prenamjenu trenutnog stanja prvog kata. Na prvom katu planirano je 14 prostorija koje su podijeljene prema namjeni: stalni postavi, povremeni postavi, stubišta, učionica i sanitarne prostorije.



Slika 5. Tlocrt prvog kata

Slika 6 prikazuje tlocrtnu dokumentaciju za prenamjenu potkrovlja nove zgrade. U potkrovlju je planirano 12 prostorija koje se mogu podijeliti prema namjeni: uredi, sanitarne prostorije, prostor za strojarske instalacije, stubišta i depoi.



Slika 6. Tlocrt potkrovlja

2.2. Fizika zgrade

Fizika zgrade definira svojstva građevinskih materijala koji uvelike utječu na rezultate energijske analize zgrade. Svojstva svih građevnih elemenata korištena u ovom radu su prema opisu u Glavnom projektu rekonstrukcije zgrade. Tablica 1 prikazuje sljedeće fizikalne veličine za navedene zidove i krov: debljine zida δ , toplinsku provodnost λ , toplinski kapacitet c , gustoću ρ te koeficijent prolaza topline U .

Tablica 1. Fizikalne veličine zidova

Vrsta zida	Sloj	δ [cm]	λ [W/(mK)]	c [J/(kgK)]	ρ [kg/m ³]	U [W/m ²]
Vanjski zid	Žbuka	3	1	1000	1800	0,43 – 1,1
	Opeka	75 – 175	0,81	900	2000	
	Žbuka	3	1	1000	1800	
Postojeći unutarnji zid	Žbuka	3	1	1000	1800	0,43 – 1,1
	Opeka	do 175	0,81	900	2000	
	Žbuka	3	1	1000	1800	
Novi unutarnji zid	Žbuka	1	1	1000	1800	3,8
	Armirani beton	20	2,6	1000	2500	
	Žbuka	1	1	1000	1800	
Krov	Armirani beton	20	2,6	1000	2500	0,4
	Polistiren	8	0,14	1000	1200	

Svojstva prozora korištena u računalnoj simulaciji (Tablica 2) uključuju koeficijenta prolaza topline g i vrijednost propuštanja Sunčevog zračenja U .

Tablica 2. Fizikalne veličine prozora

Vrsta prozora	U [W/m ²]	g [-]
Prozor tipa 1	1,4	0,62

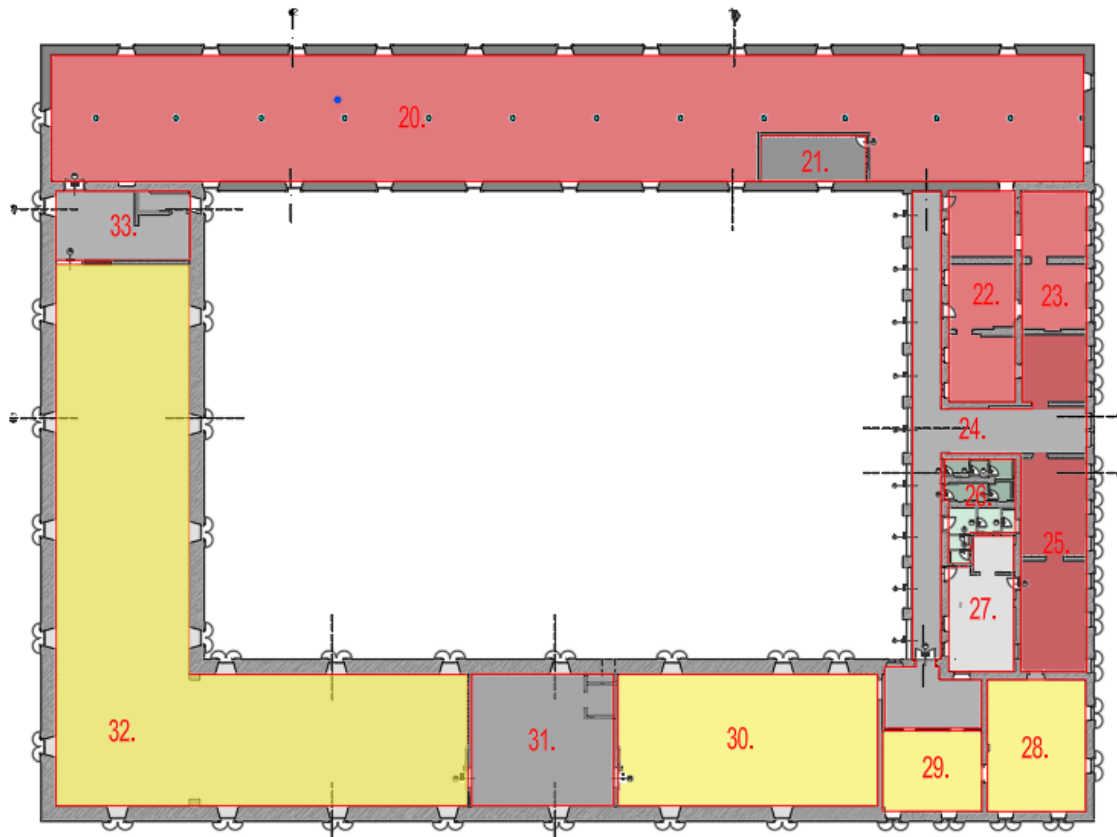
2.3. Podjela zgrade na toplinske zone

Toplinske zone predstavljaju optimalnu raspodjelu granica prostorija koje su modelirane u simulaciji. Toplinske zone odabiru se prema namjenama prostorija i toplinskim stanjima prostorije. Odabir zahtjeva da toplinska stanja zone budu podjednakih uvjeta kao što su: temperatura zraka zone, unutarnji dobici, te potrebna energija za grijanje i hlađenje.

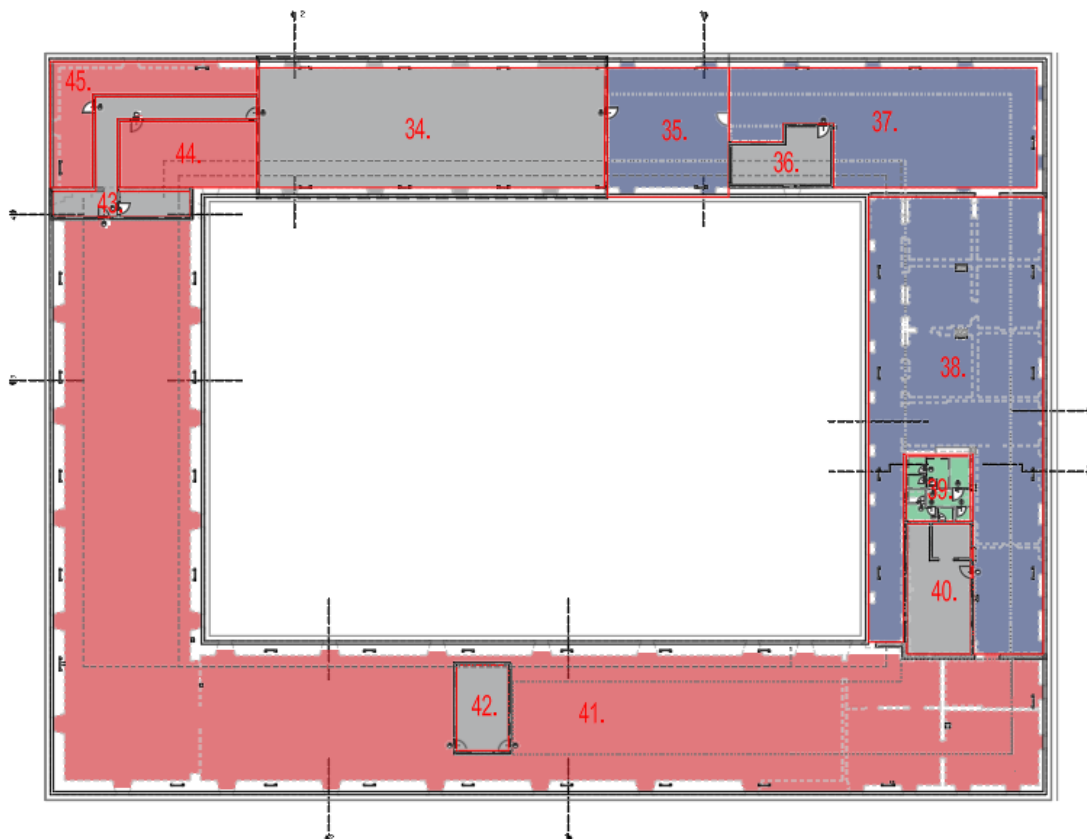
Za analiziranu zgradu definirano je 45 toplinskih zona. Za svaku toplinsku zonu definirani su podaci o površinama, volumenu, fizikalnim svojstvima zidova, načinu korištenja i pogonskim režimima. Slika 7 – Slika 9 prikazuju podjelu prizemlja, prvog kata i potkrovlja na toplinske zone, pri čemu se prizemlje sastoji od 19 zona, prvi kat od 14 zona, a potkrovlje od 12 zona.



Slika 7. Podjela prizemlja na toplinske zone



Slika 8. Podjela prvog kata na toplinske zone



Slika 9. Podjela potkrovlja na toplinske zone

U nastavku su prikazani površina i volumen pojedine toplinske zone (Tablica 3 – Tablica 5), a Tablica 6 prikazuje ukupnu površinu i volumen svih toplinskih zona.

Tablica 3. Površine i volumeni toplinskih zona

Tablica 3. Površine i volumeni toplinskih zona prizemlja

Ime zone	Namjena	Površina [m ²]	Volumen [m ³]
1. zona	Knjižnica	322	1159
2. zona	Sanitarije	14	50
3. zona	Depo	188	676
4. zona	Stubište	10	36
5. zona	Prostor za strojarske instalacije	218	785
6. zona	Depo prizemlje	77	277
7. zona	Depo prizemlje	77	277
8. zona	Sporedni ulaz	37	133
9. zona	Klima komora	30	108
10. zona	Kontrola ulaza	35	126
11. zona	Stubište	46	166
12. zona	Spremište	20	72
13. zona	Multifunkcionalna dvorana	118	425
14. zona	Sanitarije	30	108
15. zona	Kafić	150	540
	Suvenirnica		
16. zona	Glavni ulaz	117	421
17. zona	Čitaonica	277	997
18. zona	Knjižnica	310	1116
19. zona	Stubište	20	72
Ukupni iznos za prizemlje		2096	7546

Tablica 4. Površine i volumeni toplinskih zona prvog kata

Ime zone	Namjena	Površina [m ²]	Volumen [m ³]
20. ZONA	Stalni postav	731	2997
21. ZONA	Stubište	28	115
22. ZONA	Stalni postav	83	340
23. ZONA	Stalni postav	80	328
24. ZONA	Hodnik	145	595
25. ZONA	Stalni postav	84	344
26. ZONA	Sanitarije	33	135
27. ZONA	Stubište	38	156
28. ZONA	Učionica	77	316
29. ZONA	Prostorija	46	189
30. ZONA	Povremeni postav	202	828
31. ZONA	Glavni ulaz	104	426
32. ZONA	Stalni postav	639	2620
33. ZONA	Stubište	55	226
Ukupni iznosi za prvi kat		2345	9615

Tablica 5. Površine i volumeni toplinskih zona potkrovlja

Ime zone	Namjena	Površina [m ²]	Volumen [m ³]
34. ZONA	Prostor za strojarske instalacije	272	666
35. ZONA	Ured ravnatelja	95	234
36. ZONA	Stubište	32	117
37. ZONA	Otvoreni prostor ureda u potkrovlju	204	503
38. ZONA	Otvoreni prostor ureda u potkrovlju	429	1106
39. ZONA	Sanitarije	27	89
40. ZONA	Stubište	44	145
41. ZONA	Depo	1138	2772
42. ZONA	Stubište	30	94
43. ZONA	Spojni hodnik	57	136
44. ZONA	Depo	59	179
45. ZONA	Depo	55	179
Ukupni iznos za potkrovlje		2442	6220

Tablica 6. Ukupna površina i volumen zgrade

Ukupna površina [m ²]	Ukupan volumen [m ³]
6 883	23 380

2.4. Ulazni meteorološki podaci za energijski model zgrade

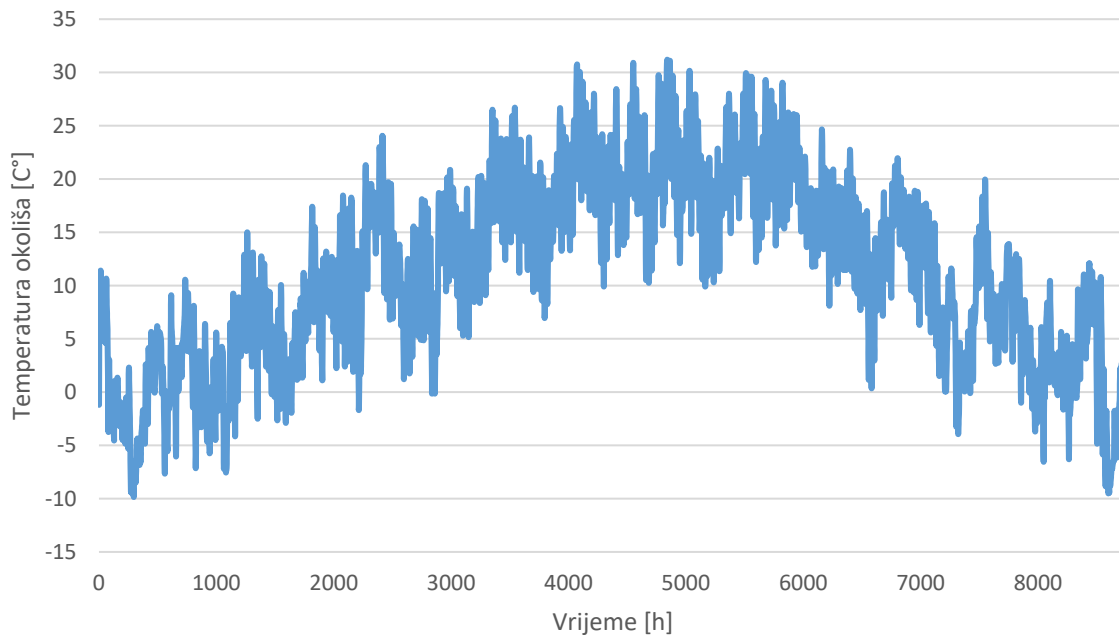
Godišnja isporučena energija grijanja i hlađenja znatno ovisi o geografskoj lokaciji zgrade. Stoga se za simulaciju u *TRNSYS*-u koriste satni meteorološki podaci za tipičnu meteorološku godinu, pri čemu tipična meteorološka godina predstavlja statistički obrađene podatke na temelju podatka za zadnjih 20 ili 30 godina mjerenja.

Za potrebe izrade ovog rada korišteni su podaci za područje Zagreba, s obzirom da podaci o tipičnoj meteorološkoj godini za grad Osijek nisu bili dostupni. Međutim, s obzirom da ne postoji velika razlika u meteorološkim podacima između te dvije lokacije (obje se ubrajaju u kontinentalnu klimu RH) ne očekuju se značajne promjene u rezultatima simulacije.

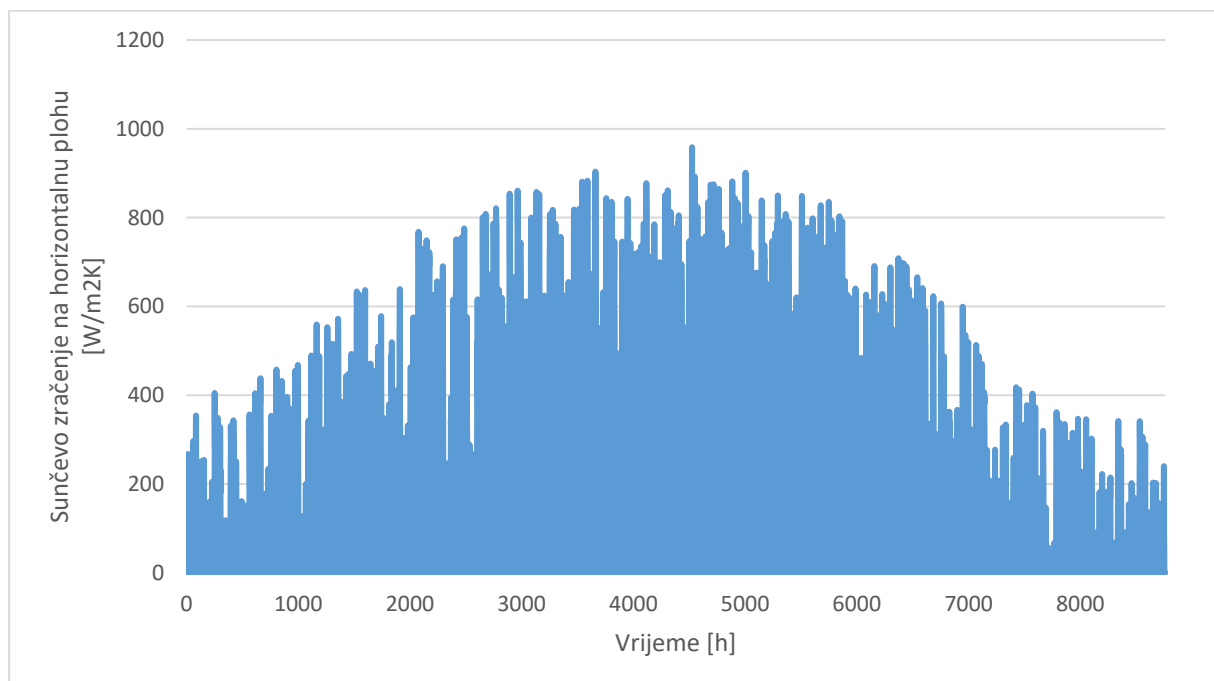
Postoji 46 ulaznih podataka o meteorološkim uvjetima okoliša, pri čemu se većina podataka odnosi na Sunčevo zračenje za različitu orijentaciju ploha. Ulazni podaci su:

- temperaturu vanjskog zraka
- relativnu vlažnost vanjskog zraka
- temperaturu neba
- temperaturu tla
- zenitni kut Sunca
- azimutni kut Sunca
- ukupno Sunčevo zračenje na plohe vertikalne orijentacije
- ukupno Sunčevo zračenje na plohu horizontalne orijentacije
- ukupno Sunčevo zračenje na plohe kose orijentacije
- direktno Sunčevo zračenje na plohe vertikalne orijentacije
- direktno Sunčevo zračenje na plohu horizontalne orijentacije
- direktno Sunčevo zračenje na plohe kose orijentacije
- kut upada Sunčevog zračenja na plohe vertikalne orijentacije
- kut upada Sunčevog zračenja na plohu horizontalne orijentacije
- kut upada Sunčevog zračenja na plohe kose orijentacije
- faktor refleksije tla.

Slika 10 i Slika 11 prikazuju dva najbitnija ulazna podatka, temperaturu okoliša i ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu, pri čemu su podaci prikazani za svaki sat u godini.



Slika 10 Temperatura okoliša



Slika 11 Ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu

2.5. Pogonski režimi i način korištenja zgrade

Ulazni podaci o pogonskim režimima daju informacije o postavljenim temperaturama grijanja i hlađenja prostorija te raspored rada sustava. Za definiranje načina korištenja zgrade relevantni podaci uključuju raspored korištenja i unutarnje toplinske dobitke od ljudi, opreme i rasvjete. Prostorije su podijeljene na tri tipa ovisno o vremenu korištenja i zahtjevima koji ovise o namjeni prostorija:

- A tip zone
- B tip zone
- C tip zone.

Prostorije tipa A zahtijevaju neprekidno održavanje temperature, vlage i kvalitete zraka zbog njihove namjene koja je najčešće depo, stalni postav ili knjižnica, a gdje postoje dobra koja su osjetljiva na bilo kakvu promjenu okoline. Prostorije tipa B, nisu toliko rigoroznih zahtjeva te uključuju sanitarne prostorije, učionice, urede i slično. U prostorije tipa C ubrojene su prostorije koje nemaju potrebu za kondicioniranjem (grijanje i hlađenje), primjerice, stubišta, hodnici, ulazi i prostori za strojarske instalacije. Tablica 7 prikazuje podatke o svim načinu korištenja i pogonskim režimima za svaku prostoriju.

Tablica 7. Pogonski režimi i način korištenja

Namjena prostorije	T_{gr} [°C]	T_{hl} [°C]	Raspored korištenja		Unutarnji dobitci [W/(m ² K)]	Tip zone
			PON – PET	SUB – NED		
PRIZEMLJE						
Knjižnica	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	10	A
Sanitarije	20	-	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	-	B
Depo	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	-	A
Stubište	-	-	-	-	-	C
Prostor za strojarske instalacije	-	-	-	-	-	C
Depo prizemlje	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	-	A

Depo prizemlje	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h		A
Sporedni ulaz	-	-	-	-	-	C
Klima komora	-	-	-	-	-	C
Kontrola ulaza	-	-	-	-	-	C
Stubište	-	-	-	-	-	C
Spremište	-	-	-	-	-	C
Multifunkcionalna dvorana	20	25	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	10	B
Sanitarije	20	-	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	-	B
Kafić	20	25	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	10	A
Suvenirnica						
Glavni ulaz	20	20	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	10	B
Čitaonica	21	22	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	10	B
Knjižnica	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	10	A
Stubište	-	-	-	-	-	C
PRVI KAT						
Stalni postav	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	10	A
Stubište	-	-	-	-	-	C
Stalni postav	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	10	A
Stalni postav	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	10	A
Hodnik	-	-	-	-	-	C
Stalni postav	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	10	A
Sanitarije	20	-	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	-	B
Stubište	-	-	-	-	-	C
Učionica	21	22	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	10	B

Prostorija	21	22	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	10	B
Povremeni postav	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	10	A
Glavni ulaz	-	-	-	-	-	C
Stalni postav	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	10	A
Stubište	-	-	-	-	-	C
POTKROVLJE						
Prostor za strojarske instalacije	-	-	-	-	-	C
Ured ravnatelja	20	25	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	10	B
Stubište	-	-	-	-	-	C
Otvoreni prostor ureda u potkrovlju	20	25	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	10	B
Otvoreni prostor ureda u potkrovlju	20	25	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	10	B
Sanitarije	20	-	8:00 h–17:00 h	8:00 h–13:00 h	-	B
Stubište	-	-	-	-	-	C
Depo	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	-	A
Stubište	-	-	-	-	-	C
Spojnik hodnik	-	-	-	-	-	C
Depo	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	-	A
Depo	21	22	0:00 h–24:00 h	0:00 h–24:00 h	-	A

3. Simulacijski model za izračun potrebne energije za grijanje

U ovom poglavlju prikazan je način izrade i detaljno objašnjen princip rada simulacijskog modela zgrade muzeja, čiji je rezultat bila potrebna energija za grijanje i hlađenje koju trebala dovesti/odvesti zgradi za postizanje postavnih temperatura grijanja i hlađenja. Za potrebe ovog rada korišten je računalni program *TRNSYS* koji je trenutno najdetaljniji program za dinamičke simulacije energetskih modela zgrade. Također, u programu je moguće modelirati različite komponente sustava, poput izmjenjivača topline, dizalice topline, fotonaponskih modula, vjetroelektrana i slično. U ovom radu korišten je model višezonske zgrade koji za ulazne parametre koristi sve fizikalne veličine i pogonske režime opisane u prošlom poglavlju.

3.1. Matematički model za simulaciju višezonske zgrade

U nastavku je opisan matematički model koji *TRNSYS* koristi za modeliranje višezonske zgrade. Među glavnim rezultatima simulacije su podaci o svim energijskim tokovima zgrade za svaki vremenski trenutak (npr. minutno, satno, mjesečno...), a iz čega se izračunava i potrebna energija za grijanje i hlađenje. Matematički model opisan u nastavku prikazuje primjer bilanci energija na primjeru jedne prostorije.

3.1.1. Matematički model za simulaciju temperature zraka u zoni

U ovom radu korišten je vremenski korak simulacije od sat vremena kroz cijelu godinu, dakle sveukupno 8760 koraka. Podatak o temperaturi zraka u prostoriji i toplinskim tokovima u prostoriji računaju se za svaki korak simulacije. Simulacija radi na način da uzima temperaturu zraka u prošlom vremenskom koraku i na njega nadodaje promjenu ovisnu o toplinskom toku koji se trenutno izmjenjuje, izraz je prikazan jednadžbom (1):

$$T_i^{(t)} = T_i^{(t-1)} + \frac{\dot{Q}_i}{C_i} \cdot \Delta t \quad (1)$$

gdje su:

T_i	temperatura zone [°C]
Q_i	konvekcijski toplinski tok prema zoni [W]
c	toplinski kapacitet zraka u zoni [J/K]
Δt	vremenski korak simulacije [s].

3.1.2. Matematički model za simulaciju toplinskih tokova konvekcijom prema zoni

Toplinski tok prikazan u jednadžbi broj (1) uključuje toplinske tokove uslijed infiltracije, ventilacije, unutarnjih toplinskih dobitaka, izmjene uslijed dotoka zraka iz susjednih zona, Sunčevog zračenja koje se pretvara u toplinski tok konvekcijom prema zoni, Sunčevog zračenja koje je apsorbirano u unutarnjem zasjenjenju i toplinski tok koji predstavlja utjecaj zidova na temperaturu zraka u prostoriji. Izraz je prikazan jednadžbom (2):

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{\text{surf},i} + \dot{Q}_{\text{inf},i} + \dot{Q}_{\text{vent},i} + \dot{Q}_{\text{g},c,i} + \dot{Q}_{\text{cplg},i} + \dot{Q}_{\text{solair},i} + \dot{Q}_{\text{ISHCCL},i} \quad (2)$$

gdje su:

$Q_{\text{surf},i}$	toplinski tok izračunat Star network mreže [W]
$Q_{\text{inf},i}$	infiltracijski toplinski tok prema zoni [W]
$Q_{\text{vent},i}$	ventilacijski toplinski tok prema zoni [W]
$Q_{\text{g},c,i}$	konvekcijski udio unutarnjih toplinskih dobitaka [W]
$Q_{\text{cplg},i}$	toplinski tok uslijed strujanja zraka između zona (ako je definiran) [W]
$Q_{\text{solair},i}$	udio Sunčevog zračenja koji se neposredno pretvara u toplinski tok konvekcijom prema zoni (ako je faktor $f_{\text{solair},i}$ veći od 0) [W]
$Q_{\text{ISHCCL},i}$	Sunčevo zračenje koje se apsorbira u unutrašnjem zasjenjenju (ako ga ima) i prenese kao toplinski tok konvekcijom prema zoni (ako ima zasjenjenja i ako se uzima u obzir) [W].

U nastavku opisan je svaki član jednadžbe (2). Prvi od toplinskih tokova je infiltracijski toplinski tok, koji predstavlja dobitke i gubitke uslijed prirodnog strujanja zraka kroz zazor zone uslijed efekta dimnjaka. Izraz je prikazan jednadžbom (3):

$$\dot{Q}_{\text{inf}} = \dot{V} \rho c (T_{\text{out}} - T_i) \quad (3)$$

gdje su:

V	protok infiltracijskog zraka [m^3/s]
ρ	gustoća zraka [kg/m^3]
c	specifični toplinski kapacitet zraka [$\text{J}/(\text{kg K})$]
T_{out}	temperatura vanjskog zraka [$^{\circ}\text{C}$].

Ventilacijski toplinski tok predstavlja tok izmijenjen uslijed izmjene volumena zraka u zoni, odnosno razlike temperature dolaznog zraka i zraka koji se već nalazi u prostoriji. Izraz je prikazan jednadžbom (4):

$$\dot{Q}_{\text{vent}} = \dot{V}_{\text{vent}} \rho c (T_{\text{vent}} - T_i) \quad (4)$$

gdje su:

\dot{V}_{vent}	protok ventilacijskog zraka [m^3/s]
T_{vent}	temperatura ventilacijskog zraka [$^{\circ}\text{C}$].

Toplinski tok uslijed protoka zraka iz susjednih zona, izraz je prikazan jednadžbom (5):

$$\dot{Q}_{\text{cplg},i} = \dot{V}_{\text{cplg}} \rho c (T_{\text{zone,adj}} - T_i) \quad (5)$$

gdje su:

\dot{V}_{cplg}	protok zraka iz susjedne zone [m^3/s]
$T_{\text{zone,adj}}$	temperatura zraka susjedne zone [$^{\circ}\text{C}$].

Toplinski tok uslijed Sunčevog zračenja prevedenog u toplinski tok konvekcijom prikazan je jednadžbom (6):

$$\dot{Q}_{\text{solair},i} = f_{\text{solair},i} (I_{\text{trans,dif},i} + I_{\text{trans,dir},i}) \quad (6)$$

gdje su:

$f_{\text{solair},i}$	udio Sunčevog zračenja neposredno pretvoren u toplinski tok konvekcijom [-]
$I_{\text{trans,dif},i}$	difuzno Sunčevo zračenje preneseno kroz prozore zone [W]
$I_{\text{trans,dir},i}$	direktno Sunčevo zračenje preneseno kroz prozore zone [W].

3.1.3. Matematički model za simulaciju toplinskog toka između zidova i zraka u prostoriji

U nastavku je prikazan način modeliranja toplinskog toka između zraka i zidove zone. Izračun nije izravan kao u prošlim slučajevima, te ovaj matematički model u sebi sadrži metode bilanci energije, prijenosnih funkcija i *star-network* metodu. Prvo se definira bilanca energije na vanjskoj strani zida u svrhu poznavanja temperatura zidova, jednadžba je prikazana izrazom (7):

$$q_{s,o} = q_{comb,s,o} + S_{s,o} \quad (7)$$

gdje su:

- $q_{comb,s,o}$ kombinirani toplinski tok koji predstavlja konvekciju i zračenje s vanjske strane zida [W/m²]
 $S_{s,o}$ faktor koji predstavlja distribuciju zračenja [W/m²].

Kombinirani toplinski tok izražen u jednadžbi (7) prikazan je je izrazom (8):

$$\dot{q}_{comb,s,o} = \dot{q}_{c,s,o} - \dot{q}_{r,s,o} \quad (8)$$

gdje su:

- $\dot{q}_{c,s,o}$ toplinski tok konvekcijom na vanjskoj strani zida [W/m²]
 $\dot{q}_{r,s,o}$ toplinski tok zračenjem na vanjskoj strani zida [W/m²].

Nadalje, izražena su dva toplinska toka koja su definirana u jednadžbi (8) toplinski tok konvekcijom na vanjskoj strani zida, izražen je jednadžbom (9):

$$\dot{q}_{c,s,o} = h_{conv,s,o}(T_{out} - T_{s,o}) \quad (9)$$

gdje su:

- $h_{conv,s,o}$ koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani zida [W/(m² K)]
 $T_{s,o}$ temperatura vanjske plohe zida [°C].

Toplinski tok zračenjem na vanjskoj strani zida, izražen je jednadžbom (10):

$$\dot{q}_{T,S,0} = \sigma \varepsilon_{s,0} (T_{s,0}^4 - T_{fsky}^4) \quad (10)$$

gdje su:

σ	Stefan-Boltzmannova konstanta [W/(m ² K ⁴)]
$\varepsilon_{s,0}$	faktor emisije za vanjsku plohu zida [-]
T_{fsky}	fiktivna temperatura koja uključuje zajednički utjecaj temperatura neba i tla [°C].

Potrebno je dodatno definirati izraz za fiktivnu temperaturu neba i tla koja se nalazi u jednadžbi (3.10.), izraz je prikazan jednadžbom (11):

$$T_{fsky} = (1 - f_{sky})T_{grd} - f_{sky}T_{sky} \quad (11)$$

gdje su:

f_{sky}	udio neba vidljiv s vanjske površine zida [-]
T_{grd}	temperatura tla [°C]
T_{sky}	temperatura neba [°C].

Sukladno postupku određivanja bilance na vanjskoj strani zida danog izrazom (7), opisuje se postupak određivanja bilance energije na unutarnjoj strani zida. Taj izraz je prikazan jednadžbom (12):

$$q_{s,i} = q_{comb,s,i} + S_{s,i} + WG \quad (12)$$

gdje su:

$q_{s,i}$	toplinski tok provođenjem na unutarnjoj strani zida [W/m ²]
$q_{comb,s,i}$	kombinirani toplinski tok zračenjem i konvekcijom na unutarnjoj strani zida [W/m ²]
$S_{s,i}$	toplinski tok zračenjem uslijed Sunčevih dobitaka i unutarnjih toplinskih dobitaka zračenjem [W/m ²]
WG	dodatni toplinski tok na unutarnjoj strani zida koji je definirao korisnik programa [W/m ²].

Uz sve navedene jednadžbe, dodatno se za izračun toplinskog toka koji proizlazi iz utjecaja zidova na zrak prostorije koristi *star-network* metoda. Važno je napomenuti kako metoda nije eksplicitno definirana u *TRNSYS* priručniku te jednadžbe u ovom radu nije moguće navesti, već samo opis metode kao takve. Model predstavlja izmjenu toplinskog

toka između fiktivne temperature zraka u zoni i temperature zidova, pri čemu je intenzitet izmjene određen otporima zidova. Dodatno, fiktivna temperatura predstavlja temperaturu zraka prostorije koja uključuje kumulativni utjecaj svih ploha na zrak u zoni.

Dodatno, matematički model koristi i metodu prijenosnih funkcija, a čime se modelira svojstvo zida da akumulira toplinsku energiju. Model sadrži vremenske prijenosne funkcije koje opisuju trenutna stanja zidova u ovisnosti o prethodnim temperaturama zidova te o toplinskim tokovima provođenjem. Bilanca energije za zid prikazana je izrazom (13):

$$\frac{\partial E_{\text{wall}}}{\partial t} = \dot{q}_{s,i} - \dot{q}_{s,o} \neq 0 \quad (13)$$

Toplinski tokovi izraženi u jednadžbi (13) predstavljaju toplinske tokove na vanjskoj i unutarnjoj strani zida, a modelirani su korištenjem prijenosnih funkcija kao:

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_B} B^{(k)} T_{s,o}^{(k)} - \sum_{k=0}^{n_C} C^{(k)} T_{s,i}^{(k)} - \sum_{k=1}^{n_D} D^{(k)} \dot{q}_{s,i}^{(k)} \quad (14)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_A} A^{(k)} T_{s,o}^{(k)} - \sum_{k=0}^{n_B} B^{(k)} T_{s,i}^{(k)} - \sum_{k=1}^{n_D} D^{(k)} \dot{q}_{s,o}^{(k)} \quad (15)$$

Prijenosne funkcije i parametri A , B , C , D predstavljaju pogled u prošlost, odnosno koliko svaki vremenski korak utječe na izmjenu topline u promatranom trenutku. Nazivaju se i težinski faktori jer prikazuju koliko prošle temperature i prošli toplinski tokovi utječu na trenutni toplinski tok i temperature. Ovisi o materijalima zidova i koeficijentima prijelaza topline na vanjskim i unutarnjim ploham zidova.

3.1.4. Matematički model distribucije zračenja na plohe zona

Toplinski tok uslijed zračenja Sunca i unutrašnjih toplinskih dobitaka definira se za svaku zonu posebno. Prije izražavanja jednadžbe za ovaj toplinski tok potrebno je definirati faktore raspodjele zračenja za svaku plohu posebno, izrazi su dani jednadžbama (16) i (17). Jednadžba (16) predstavlja faktor raspodjele za zračenje unutarnjih dobitaka:

$$f_{\text{int,g,s}} = \frac{A_s}{\sum_x A_{s,x}} \quad (16)$$

Jednadžba (17) predstavlja faktor raspodjele uslijed Sunčevog zračenja i u ovom slučaju razmatra se kao difuzno zračenje. To znači da se zračenje distribuira ovisno o površinama ploha i njihovog faktora refleksije i apsorpcije.

$$f_{\text{dif,s,s}} = \frac{(1 - \rho_{\text{dif,s}})A_s}{\sum_{\text{surfaces}} (1 - \rho_{\text{dif,s}})A_s} \quad (17)$$

gdje je:

$\rho_{\text{dif,s}}$ faktor refleksije za difuzno zračenje za unutarnju plohu zida [-].

Konačan izraz za distribuciju zračenja koji uzima u obzir oba faktora i direktno utječe na sve relevantne rezultate simulacije prikazan je izrazom (18):

$$S_{s,i} = f_{\text{int,g,s}} \cdot \dot{q}_{\text{g,r,i}} + GEOSURF \cdot I_{\text{trans,dir,i}} + f_{\text{dif,s,s}} \cdot I_{\text{trans,dif,i}} \quad (18)$$

gdje je:

$\dot{q}_{\text{g,r,i}}$ unutarnji toplinski dobici zračenjem [W/m^2].

3.2. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje

Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje, a koja je dobivena kao rezultat dinamičke simulacije u računalnom programu *TRNSYS* prikazana je u ovom poglavlju za svaku toplinsku zonu. Podaci su izraženi u specifičnom obliku, odnosno po m^2 površine pojedine zone. Tablica 8 prikazuje podatke o godišnjoj potrebnoj energiji za grijanje i hlađenje zona prizemlja, Tablica 9 prikazuje podatke za prvi kat, a Tablica 10 za potkrovlje zgrade. Tablica 11 prikazuje podatke o godišnjoj potrebnoj energiji za grijanje i hlađenje cijele zgrade.

Tablica 8. Godišnja potrebna energija za toplinske zone prizemlja

Zone	Potrebna energija za grijanje [kWh/m ²]	Potrebna energija za hlađenje [kWh/m ²]
1. zona	23	19
2. zona	19	0
3. zona	45	6
4. zona	0	0
5. zona	0	0
6. zona	74	5
7. zona	51	17
8. zona	0	0
9. zona	0	0
10. zona	74	0
11. zona	0	0
12. zona	0	0
13. zona	13	6
14. zona	16	0
15. zona	14	11
16. zona	9	0
17. zona	9	18
18. zona	14	16
19. zona	0	0

Tablica 9. Godišnja potrebna energija za toplinske zone prvog kata

Zone	Potrebna energija za grijanje [kWh/m ²]	Potrebna energija za hlađenje [kWh/m ²]
20. zona	45	0
21. zona	0	0
22. zona	17	23
23. zona	35	30
24. zona	0	0
25. zona	61	36
26. zona	72	0
27. zona	0	0
28. zona	32	19
29. zona	34	21
30. zona	36	17
31. zona	0	0
32. zona	28	13
33. zona	0	0

Tablica 10. Godišnja potrebna energija za toplinske zone potkrovlja

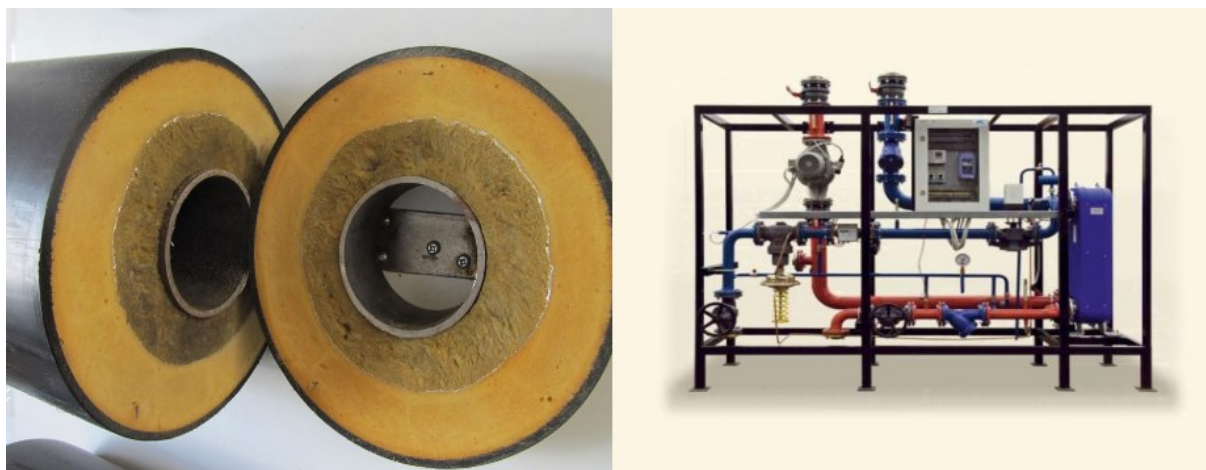
Zone	Potrebna energija za grijanje [kWh/m ²]	Potrebna energija za hlađenje [kWh/m ²]
34. zona	0	0
35. zona	30	3
36. zona	0	0
37. zona	20	5
38. zona	17	6
39. zona	53	0
40. zona	0	0
41. zona	42	3
42. zona	0	0
43. zona	0	0
44. zona	67	3
45. zona	90	4

Tablica 11. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje cijele zgrade

Godišnja potrebna energija za grijanje [kWh]	185 784
Godišnja potrebna energija za hlađenje [kWh]	50 097

4. Proračun godišnje isporučene energije, primarne energije i emisije CO₂

Na temelju simulirane potrebne energije za grijanje i hlađenje sljedeći korak bio je izračun godišnje isporučene energije zgrade. Isporučena energija definirana je kao energija koju je potrebno dovesti sustavima koji su ugrađeni u zgradu kako bi mogli izvršavati pogonske režime zgrade. Proračun je proveden za tri scenarija sustava grijanja, hlađenja i ventilacije, a koji su uključivali: sustav s daljinskim grijanjem i rashladnikom vode, sustav s dizalicom topline voda-zrak te sustav s dizalicom topline voda-voda s bunarom. Za sva tri slučaja također je predviđena implementacija sustava mehaničke ventilacije za dovod vanjskog zraka te sustava ventilokonvektora kao ogrjevno-rashladnih tijela u prostoru. Slika 12 do Slika 17 prikazuje sve sustave koji su implementirani za tri različita scenarija, dakle sve sustave za grijanje i hlađenje, ventilokonvektore i sustav mehaničke ventilacije.



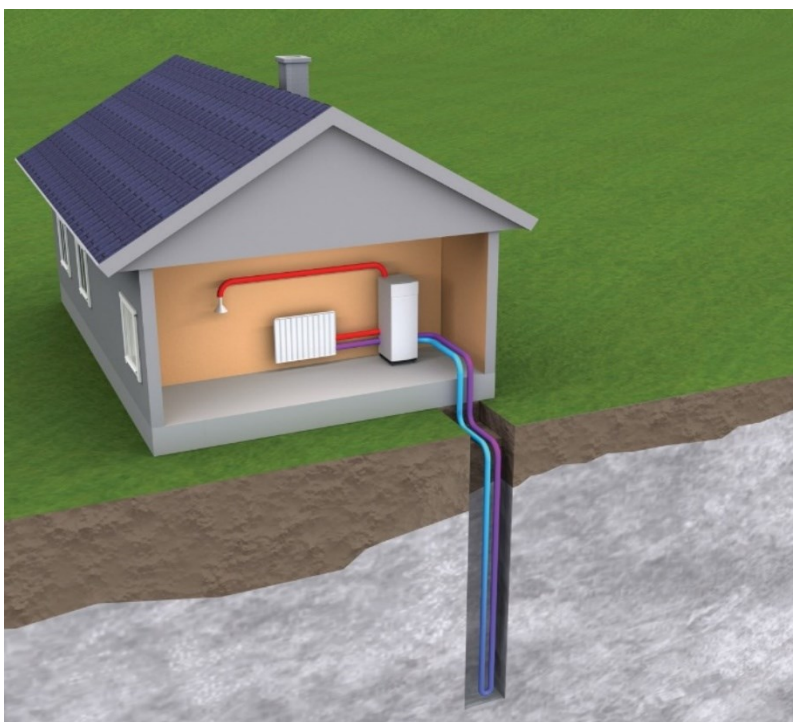
Slika 12. Daljinsko grijanje [5]



Slika 13 Rashladnik vode [6]



Slika 14 Dizalica topline voda-zrak [7]



Slika 15 Dizalica topline voda-voda s bunarom [8]



Slika 16 Ventilokonvektori [9]



Slika 17 Mehanička ventilacija [10]

Na temelju isporučene energije u sljedećem je koraku izračunata godišnja primarna energiju za svaki od scenarija. Primarna energija definirana je kao energija koju je potrebno utrošiti u obliku prirodnih resursa (npr. potrošnja plina za proizvodnju isporučene električne energije) kako bi se zgradi uspješno dostavila energija u iznosu proračunate isporučene energije.

Dodatno je proveden proračun godišnje emisije CO₂ koji je prikazao utjecaj implementacije svih analiziranih scenarija na okoliš. Cilja rada bio je postizanje standarda niskouglične zgrade.

3.3. Ulazni podaci za proračun isporučene energije

U nastavku su prikazani korišteni podaci za izračun isporučene energije sustava grijanja, hlađenja i ventilacije. Tablica 12 prikazuje ulazne podatke za daljinsko grijanje koje je analizirano u Scenariju 1. Prikazani podaci predstavljaju godišnju potrebnu energiju za grijanje koju je sustavom daljinskog grijanja potrebno dovesti zgradi.

Tablica 12. Ulazni podaci za proračun daljinskog grijanja

Godišnja potrebna energija za grijanje [kWh]	185 784
--	---------

Tablica 13 prikazuje ulazne podatke za izračun isporučene energije rashladnika voda za Scenarij 1. Podaci uključuju sezonski faktor hlađenja i godišnju potrebnu energiju za hlađenje. Sezonski faktor hlađenja SEER (eng. *Seasonal Energy Efficiency Ratio*) predstavlja omjer predane rashladne energije i potrošene električne energije, a što ima značajan utjecaj na isporučenu energiju. Podaci su korišteni na temelju kataloga proizvođača opreme.

Tablica 13. Ulazni podaci za proračun rashladnika vode

Sezonski faktor hlađenja, SEER [-]	4,5
Godišnja potrebna energija za hlađenje [kWh]	50 097

Tablica 14 prikazuje podatke za proračun isporučene energije dizalice topline voda-zrak. Ulazni podaci uključuju sezonski faktor grijanja i hlađenja te godišnju potrebnu energiju za grijane hlađenje. Sezonskog faktor hlađenja, kao i kod rashladnika predstavlja korisnost uređaja u režimu hlađenja (omjer predane rashladne energije u odnosu na uloženu električnu energiju), dok sezonski faktor grijanja predstavlja korisnost uređaja u režimu grijanja (omjer predane toplinske energije u odnosu na uloženu električnu energiju).

Tablica 14. Ulazni podaci za proračun dizalice topline voda-zrak

SCOP	4
SEER	4,5
Godišnja potrebna energija za grijanje [kWh]	185 784
Godišnja potrebna energija za hlađenje [kWh]	50 097

Tablica 15 proračun isporučene energije dizalice topline voda-voda s bunarom, pri čemu su ulazni podaci istovjetni onima za dizalicu topline voda-zrak, razlika postoji jedino u iznosima.

Tablica 15. Ulazni podaci za proračun dizalice topline voda-voda

SCOP	5,5
SEER	11
Godišnja potrebna energija za grijanje [kWh]	185 784
Godišnja potrebna energija za hlađenje [kWh]	50 097

Tablica 16 prikazuje podatke za proračun isporučene energije ventilokonvektora, a koji su predviđeni kao ogrjevno-rashladna tijela za predaju topline u pojedinom prostoru. Podaci se odnose na pretpostavljeni broj ventilokonvektora (na temelju broja prostorija), električnu snagu ventilokonvektora te broj radnih sati godišnje.

Tablica 16. Ulazni podaci za proračun ventilokonvektora

Broj ventilokonvektora [-]	150
Električna snaga po ventilokonvektoru [kW]	0,02
Ukupna električna snaga svih ventilokonvektora [kW]	3
Broj radnih sati godišnje [h]	6 706

Tablica 17 prikazuje podatke za proračun isporučene energije ventilacijskog sustava zgrade za dobavu svježeg zraka i održavanje željene vlage. Ulazni podaci odnose se na broj radnih sati godišnje, broj izmjena vanjskog zraka (na sat) u odnosu na volumen prostora, specifičnu godišnju potrebnu energiju za kondicioniranje ventilacijskog zraka (grijanje i hlađenje), specifičnu godišnju potrebnu energiju za pogon ventilatora klimatizacijske jedinice te ukupne volumene toplinskih zona tipa A i tipa B. Tip A predstavlja prostoriju koja ima takve zahtjeve da je potrebno održavati temperaturu, vlagu i svježinu zraka 3670 sati u godini, dok tip B predstavlja prostoriju koja nema tako rigorozne zahtjeve te je grijanje i hlađenje upaljeno samo kada su ljudi prisutni u zgradi, odnosno u njihovom radnom vremenu kroz tjedan. Podaci su definirani na temelju pravila struke te podataka proizvođača.

Tablica 17. Ulazni podaci za proračun ventilacijskog sustava

Broj radnik sati godišnje [h]	8760
Izmjena na sat vanjskog zraka u odnosu na volumen prostora [h^{-1}]	0,7
Specifična godišnja potrebna energija za grijanje [kWh/m^3]	0,00162
Specifična godišnja potrebna energija za hlađenje [kWh/m^3]	0,00016
Specifična godišnja potrebna energija za pogon ventilatora [kWh/m^3]	0,00071
Volumen zona tipa A [m^3]	17 852
Volumen zona tipa B [m^3]	9 536

3.4. Proračun isporučene energije za ventilacijski sustav i ventilokonvektore

Proračun godišnje isporučene energije za ventilacijski sustav i sustav ventilokonvektora provedeni su posebno jer su isti za svaki od analiziranih scenarija.

Tablica 18 prikazuje podatke o potrebnim kapacitetima sustava ventilacije za prostorije tipa A i tipa B. Volumni protoci izračunati na temelju volumena prostorija tip A i tipa B te potrebnog broja izmjena vanjskog zraka. Definirana je i ukupna količina

kondicioniranog zraka za godinu dana (umnožak volumnih protoka i radnih sati u godini za obje zone).

Tablica 18. Kapacitet ventilacijskog sustava

Volumni protok A [m ³ /h]	12 496
Volumni protok B [m ³ /h]	6 675
Ukupna kondicionirana količina zraka kroz godinu [m ³]	128 906 646

Umnoškom ukupne količine kondicionalnog zraka sa specifičnim godišnjim energijama iz ulaznih podataka dobiveni su iznosi godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje te dodatno iznos isporučene električne energije za pogon ventilatora. Tablica 19 prikazuje izračunate podatke za sustav ventilacije u svim scenarijima.

Tablica 19. Godišnja potrebna i isporučena energija za ventilacijski sustav

Godišnja potrebna energija za grijanje [kWh/a]	208 829
Godišnja potrebna energija za hlađenje [kWh/a]	20 625
Godišnja isporučena električna energija [kWh/a]	91 524

Tablica 20 prikazuje podatak o godišnjoj potrebnoj energiji za pogon ventilokonvektora. Iznos je izračunat umnoškom ukupne snage ventilokonvektora i broja radnih sati rada ventilokonvektora.

Tablica 20. Godišnja isporučena energija za ventilokonvektore

Godišnja isporučena električna energija [kWh/a]	20 118
---	--------

3.5. Proračun isporučene energija za tri scenarija

Za Scenarij 1 izračunata je godišnja isporučena toplinska energija daljinskog grijanja te isporučena električna energija za pogon rashladnika vode, ventilokonvektora i ventilacijskog sustava (Tablica 21). Godišnja isporučena toplinska energija ovog scenarija

izračunata je kao zbroj potrebnih energija grijanja vode u strojarnici koja se koristi za ventilokonvektore i grijače u klimatizacijskoj jedinici. Godišnja isporučena električna energija ovog scenarija izračunata je kao zbroj: godišnje potrebne energije za hlađenje podijeljene sa sezonskim faktorom hlađenja (predstavlja energiju koja se koristi za pripremu vode za ventilokonvektore i hladnjake u klimatizacijskoj jedinici), potrebne električne energije za pogon ventilokonvektora i ventilatora klimatizacijske jedinice.

Tablica 21. Isporučena energija za Scenarij 1

Godišnja isporučena toplinska energija [kWh/a]	394 613
Godišnja isporučena električna energija [kWh/a]	127 358

Za Scenarij 2 izračunata je godišnja isporučena električna energija za pogon dizalice topline voda-zrak, ventilokonvektora i ventilacijskog sustava (Tablica 22). Godišnja isporučena toplinska energija ovog scenarija jednaka je nuli iz razloga što se za proizvodnju toplinske i rashladne energije koristi električna energija za pogon dizalice topline. Godišnja isporučena električna energija izračunata je kao zbroj: godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora podijeljene sa sezonskim faktorima grijanja i hlađenja, te godišnjih potrebnih električnih energija za pogon ventilokonvektora i ventilatora klimatizacijske jedinice.

Tablica 22. Isporučena energija za Scenarij 2

Godišnja isporučena toplinska energija [kWh/a]	0
Godišnja isporučena električna energija [kWh/a]	226 011

Za Scenarij 3 također je izračunata godišnja isporučena električna energija za pogon dizalice topline voda-voda s bunarom, ventilokonvektora i ventilacijskog sustava (Tablica 23). Proračun je identičan kao onaj opisan za Scenarij 2, osim što se scenariji razlikuju u iznosu sezonskog faktora grijanja i hlađenja.

Tablica 23. Isporučena energija za Scenarij 3

Godišnja isporučena toplinska energija [kWh/a]	0
Godišnja isporučena električna energija [kWh/a]	189 819

3.6. Proračun godišnje primarne energije

U ovom odlomku opisan je proračun godišnje primarne energije za sva tri scenarija, a na temelju prethodno izračunate isporučene energije. Primarna energija definira se kao energija sadržana u prirodnim resursima (npr. ugljen, prirodni plin) koja se troši kako bi se postigao iznos isporučene energije. Drugim riječima, primarna energija u obzir uzima sve gubitke procesa koji nastaju prilikom pretvorbe i distribucije energije do zgrade (npr. gubitci u elektrani te gubitci sustava distribucije).

Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine definiralo je faktore primarne energije za svaki prirodni resurs i sustav proizvodnje. Faktori predstavljaju omjere primarne i isporučene energije. Tablica 24 prikazuje podatke o faktorima primarne energije za slučaj korištenja električne energije iz mreže i toplinske energije dobivene iz centralnih i zatvorenih toplinskih sustava u Osijeku [3].

Tablica 24. Faktori primarne energije [3]

Faktor za primarnu toplinsku energiju iz CTS i ZTS u Osijeku	1,07
Faktor za primarnu električnu energiju dobivenu iz mreže	1,583

Proračun scenarij ponavljao se te se definirao kao zbroj: umnoška faktora primarne toplinske energije s godišnjom ispučenom toplinskom energijom i umnoška faktora primarne električne energije s godišnjom ispučenom električnom energijom. Tablica 25 prikazuje podatke o godišnjoj primarnoj energiji za sva tri scenarija grijanja i hlađenja zgrade.

Tablica 25. Godišnja primarna energija za tri scenarija

Godišnja primarna energija za Scenarij 1 [kWh/a]	623 843
Godišnja primarna energija za Scenarij 2 [kWh/a]	357 775

Godišnja primarna energija za Scenarij 3 [kWh/a]	300 483
--	---------

3.7. Proračun godišnje emisije CO₂

Jedan od glavnih ciljeva ovog projekta preseljenja je implementacija sustava koji za rezultat imaju minimalnu godišnju razinu emisije CO₂. Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine definira faktori emisije CO₂ izražene kao kilogram CO₂ po kWh proizvedene energije. Faktori su izraženi za svaki prirodni resurs i izvedene sustave proizvodnje energije.

Tablica 26 prikazuje podatke o faktorima emisije CO₂ za slučaj centralnih i zatvorenih toplinskih sustava i električne energije preuzete iz mreže u Osijeku.

Tablica 26. Faktori emisije CO₂ [3]

Faktor CO ₂ emisije za toplinsku energiju iz CTS i ZTS u Osijeku [kg/kWh]	0,249
Faktor CO ₂ emisije za električnu energiju preuzetu iz mreže [kg/kWh]	0,280

Tablica 27 prikazuje iznose godišnjih emisija CO₂ za tri scenarija koji su izračunati kao zbroj umnožaka faktora CO₂ emisije s pripadajućim isporučenim energijama.

Tablica 27. Godišnja emisija CO₂ za tri scenarija

Godišnja emisija CO ₂ za Scenarij 1 [kg/a]	133 919
Godišnja emisija CO ₂ za Scenarij 2 [kg/a]	62 283
Godišnja emisija CO ₂ za Scenarij 3 [kg/a]	53 149

4. Proračun investicijskih i pogonskih troškova

Investicijska analiza implementacije sustava za grijanje, hlađenje i ventilaciju izvedena je na temelju kumulativnih troškova. Kumulativni troškovi definirani su kao zbroj investicijskih troškova za sustave i pogonskih troškova u trajanju od 10 godina.

Tablica 28 prikazuje cijenu po energentima koja je ista za sva tri scenarija, a podatak je značajan jer je vezan za isporučenu energiju pomoću koje su izračunati pogonski troškovi. Podaci su dobiveni na temelju računa Muzeja Slavonije za 2023. godinu, a uključuje ukupnu cijenu po kWh (uključivo cijenu distribucije, naknadu za obnovljive izvore itd.).

Tablica 28. Troškovi toplinske i električne energije

Toplinska energija iz daljinskog grijanja [€/kWh]	0,066
Električna energija [€/kWh]	0,164
Zakup električne energije [€/kW]	200

4.1. Proračun kumulativnih troškova za ventilacijski sustav i sustav ventilokonvektora

Prije izračuna kumulativnih troškova za svaki od sustava potrebno je definirati troškove za ventilacijski sustav i sustav ventilokonvektora koji su zajednički za sva tri scenarija.

Tablica 29 prikazuje proračun za ventilacijski sustav koji je definiran zbrojem umnoška volumnih protoka tipa A i tipa B s investicijskim troškom izraženim po volumnom protoku. Kao rezultat dobiven je ukupan investicijski trošak.

Tablica 29. Investicijski troškovi za ventilacijski sustav

Investicijski trošak izražen po volumnom protoku [€/m ³ /h]	16
Volumni protok tipa A [m ³ /h]	12 496
Volumni protok tipa B [m ³ /h]	6 675
Ukupan investicijski trošak [€]	306 746

Tablica 30 prikazuje proračun za sustav ventilokonvektora koji je definiran kao zbroj investicijskih troškova jedinica ventilokonvektora i zakupa snage za ventilokonvektore. Investicijski trošak jedinica ventilokonvektora dobiven je umnoškom broja jedinica i cijene po jedinici, a zakup snage dobiven je umnoškom cijene zakupa energije i ukupne snage svih ventilokonvektora.

Tablica 30. Investicijski troškovi za ventilokonvektore

Broj ventilokonvektora	150
Ukupna električna snaga svih ventilokonvektora [kW]	3
Cijena [€/kom]	700
Ukupan investicijski trošak [€]	105 600

4.2. Proračun kumulativnih troškova za Scenarij 1

Proračun kumulativnih troškova Scenarija 1 sastoji se od investicijskih troškova za sustave daljinskog grijanja, rashladnika vode, sustava ventilokonvektora i sustava ventilacije.

Tablica 31 prikazuje proračun investicijskih troškova za sustav daljinskog grijanja Scenarija 1. Definirani su: trošak toplinske podstanice, kapacitet toplinske podstanice, cijena priključnog toplovoda izražena po jedinici duljine i duljina toplovoda. Ukupan investicijski trošak definiran je kao zbroj cijene toplinske podstanice i umnoška cijene duljine toplovoda i duljine toplovoda.

Tablica 31. Investicijski troškovi za daljinsko grijanje

Toplinska podstanica [€]	18 000
Energija toplinske podstanice [kW]	500
Cijena priključnog toplovoda [€/m]	500
Duljina toplovoda [m]	60
Ukupan investicijski trošak [€]	48 000

Tablica 32 prikazuje proračun investicijskih troškova za sustav rashladnika vode. Definirani su podaci: učin rashladnika, električna snaga i cijena rashladnika u ovisnosti o učinku. Ukupan investicijski trošak izračunat je kao zbroj umnoška učina i cijene rashladnika, te umnoška električne snage i cijene zakupa snage.

Tablica 32. Investicijski troškovi za rashladnik vode

Učin [kW]	247
Električna snaga [kW]	55
Cijena rashladnika [€/kW]	400
Ukupan investicijski trošak [€]	109 800

Tablica 33 prikazuje ukupne investicijske troškove za Scenarij 1 u kojima su sadržani troškovi sustava daljinskog grijanja, sustava rashladnika vode, sustava ventilacije i sustava ventilokonvektora.

Tablica 33. Investicijski troškovi za Scenarij 1

Investicijski trošak za sustav daljinskog grijanja [€]	48 000
Investicijski trošak za sustav rashladnika vode [€]	109 800
Investicijski trošak za sustav ventilokonvektora [€]	105 600
Investicijski trošak za ventilacijski sustav [€]	306 746
Ukupan investicijski trošak	570 146

Drugi dio kumulativnih troškova jesu pogonski troškovi koji se izračunavaju umnoškom godišnjih iznosa isporučene toplinske i električne energije s cijenom energije.

Tablica 34 prikazuje godišnju isporučenu energiju te godišnju pogonski trošak

Tablica 34. Pogonski troškovi za Scenarij 1

Godišnja potrošnja toplinske energije [kWh/a]	394 613
Godišnja potrošnja električne energije [kWh/a]	127 358
Godišnji pogonski trošak [€/a]	46 931

Tablica 35 prikazuje ukupne investicijske troškove za prvi scenarij i pogonske troškove za 10 godina rada sustava, te kumulativne troškove za prvi scenarij.

Tablica 35. Kumulativni troškovi za Scenarij 1

Investicijski trošak [€]	570 146
Pogonski troškovi za 10 godina rada [€]	469 311
Kumulativni troškovi [€]	1 039 457

4.3. Proračun kumulativnih troškova za Scenarij 2

Proračun kumulativnih troškova Scenarija 2 sastoji se od investicijskih troškova za sustav dizalice topline voda-zrak, sustava ventilokonvektora i sustava ventilacije.

Tablica 36 prikazuje podatke o dizalici topline voda-zrak u svrhu izračuna investicijskih troškova. Definirani su podaci: učin dizalice topline, cijena dizalice topline ovisno o učinku te električna snaga na temelju koje je izračunata dodatna investicija za zakup snage.

Tablica 36. Investicijski troškovi za dizalicu topline voda-zrak

Cijena dizalice topline [€/kW]	400
Učin [kW]	433
Električna snaga [kW]	79
Ukupan investicijski trošak [€]	189 000

Tablica 37 prikazuje ukupne investicijske troškove u kojima su sadržani troškovi sustava dizalice topline voda-zrak, sustava ventilacije i sustava ventilokonvektora.

Tablica 37. Investicijski troškovi za Scenarij 2

Investicijski trošak za sustav dizalice topline voda-zrak [€]	189 00
Investicijski trošak za sustav ventilokonvektora [€]	105 600
Investicijski trošak za sustav ventilacije [€]	306 746
Ukupan investicijski trošak [€]	601 346

Tablica 38 prikazuje pogonske troškove za drugi scenarij koji su definirani kao umnožak godišnje isporučene toplinske i električne energije s cijenom energije.

Tablica 38. Pogonski troškovi za Scenarij 2

Godišnja potrošnja toplinske energije [kWh/a]	0,00
Godišnja potrošnja električne energije [kWh/a]	226 011
Godišnji pogonski trošak [€/a]	37 066

Tablica 39 prikazuje kumulativne troškove za drugi scenarij koji su definirani kao zbroj investicijskih troškova i pogonskih troškova za 10 godina rada sustava.

Tablica 39. Kumulativni troškovi za Scenarij 2

Investicijski trošak [€]	601 346
Pogonski troškovi za 10 godina rada [€]	370 658
Kumulativni troškovi [€]	972 003

4.4. Proračun kumulativnih troškova za Scenarij 3

Proračun kumulativnih troškova Scenarija 3 sastoji se od investicijskih troškova za sustav dizalice topline voda-voda s bunarom, sustava ventilokonvektora i sustava ventilacije.

Tablica 40 prikazuje podatke o dizalici topline voda-voda s bunarom u svrhu proračuna investicijskih troškova. Sadržani podaci su: učin dizalice topline, cijena dizalice topline ovisne o učinku te električna snaga dizalice topline na temelju koje je izračunata dodatna investicija za zakup snage.

Tablica 40. Investicijski troškovi za dizalicu topline voda-voda s bunarom

Cijena dizalice topline [€/kW]	650
Učin [kW]	433
Električna snaga [kW]	217
Ukupan investicijski trošak [€]	324 850

Tablica 41 prikazuje ukupne investicijske troškove u kojima su sadržani troškovi sustava dizalice topline voda-voda s bunarom, sustava ventilokonvektora i ventilacijskog sustava.

Tablica 41. Investicijski troškovi za Scenarij 3

Investicijski trošak za sustav dizalice topline voda-voda s bunarom [€]	324 850
Investicijski trošak sustava ventilokonvektora [€]	105 600
Investicijski trošak sustava ventilacije [€]	306 746
Ukupan investicijski trošak [€]	737 196

Tablica 42 prikazuje pogonske troškove koji su izračunati umnoškom godišnje isporučene toplinske i električne energije s cijenom energije.

Tablica 42. Pogonski troškovi za Scenarij 3

Godišnja isporučena toplinska energija [kWh/a]	0,00
Godišnja isporučena električna energija [kWh/a]	189 819
Godišnji pogonski trošak [€/a]	31 130

Tablica 43 prikazuje kumulativne troškove za treći scenarij koji su definirani kao zbroj investicijskih troškova s pogonskim troškovima za 10 godina rada sustava.

Tablica 43. Kumulativni troškovi za Scenarij 3

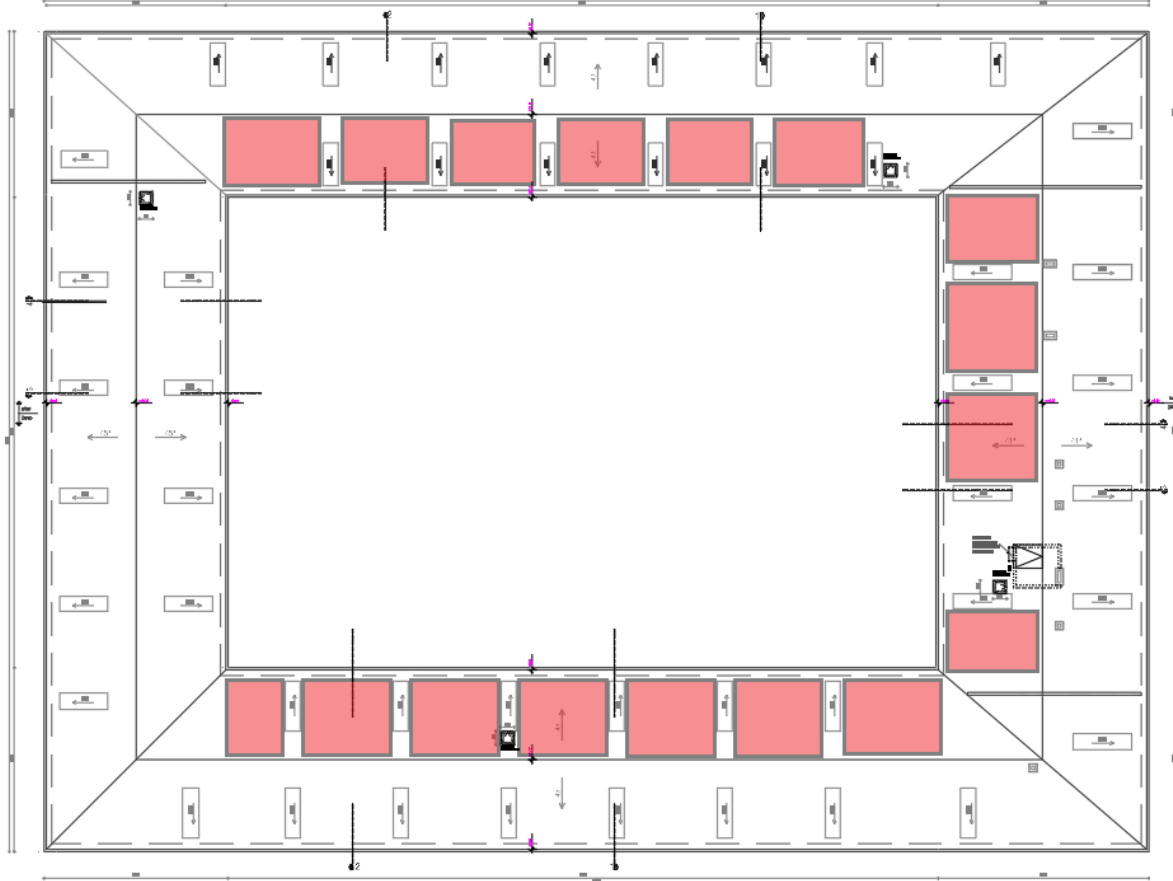
Investicijski trošak [€]	737 196
Pogonski troškovi za 10 godina rada [€]	311 302
Kumulativni troškovi [€]	1 048 498

5. Procjena potencijala ugradnje fotonaponskih panela

Obnovljivi izvori primijenjeni su u ovom radu u obliku dizalice topline te fotonaponskih panela gdje se nakon odabira prema troškovno-optimalnom scenariju istraživala mogućnost njihove implementacije u svrhu postizanja nulte razine emisije CO₂. Prema izračunatim godišnjim emisijama CO₂ i prema uspoređivanim kumulativnih troškova može se zaključiti da je od tri analizirana scenarija (opisana u prethodnom poglavlju) troškovno-optimalan Scenarij 2. Naime, Scenarij 2 ima najniži kumulativni trošak uz zanemarivo višu godišnju emisiju CO₂ u odnosu na Scenarij 3, a što je detaljno prikazano u Poglavlju 6.

Stoga je za Scenarij 2 (kao troškovno-optimalno rješenje) dodatno analiziran potencijal ugradnje fotonaponskih panela u svrhu proizvodnje električne energije za grijanje, hlađenje i ventilaciju. Proračun, odnosno dimenzioniranje fotonaponskih panela, se mogao izvršiti na dva načina. Jedan od njih je izračun proizvedene električne energije za maksimalnu dostupnu površinu krova. Drugi način je obrnut postupak pri čemu se računa potrebna površine krova koja je potrebna za pokrivanje ukupne potrošnje električne energije (isporučena energija za Scenarij 2). Za proračun je odabran drugi način iz razloga što bi predimenzioniranje fotonaponskih panela iziskivalo veće investicijske troškove, a time bi opadala isplativost investicije. U konačnici, izračunata je površina panela kojom se omogućuje (na godišnjoj razini) pokrivanje ukupne potrošnje energije Scenarija 2, a čime su pogonski troškovi te godišnje emisije CO₂ svedeni na nulu.

Potrebno je bilo dodatno razmotriti činjenicu da je zgrada pod konzervatorskom zaštitom kao kulturno dobro te stoga implementacija fotonaponskih panela na površinu krova možda nije poželjno rješenje iz estetskih razloga. Slika 18 prikazuje označeno crveno dostupnu površinu krova za implementaciju fotonaponskih panela, pri čemu je odabrana isključivo unutarnja strana kao opcija koja bi najmanje narušavala estetski izgled zgrade, a postizala bi nultu razinu CO₂ emisije.



Slika 18. Dostupna površina krova za fotonaponske panele

Tablica 44 prikazuje ulazne podatke za proračun potrebne površine i investicijskih troškova fotonaponskih panela. Podaci uključuju: iznos proizvedene energije u odnosu na površinu panela za kontinentalnu Hrvatsku, investicijski trošak panela i maksimalno dostupnu površinu krova (samo unutarnje površine koje se ne vide s ulice).

Tablica 44. Ulazni podaci za fotonaponske panele

Proizvodnja električne energije [kWh/m ²]	225
Investicijski trošak fotonaponskih panela [€/kWh]	0,8
Maksimalna dostupna površina krova [m ²]	1 144

5.1. Proračun potrebne površine i investicijskih troškova fotonaponskih panela

Proračun potrebne površine je uključivao dijeljenje godišnje isporučene električne energije s ulaznim podatkom proizvodnje električne energije u odnosu na površinu panela. Nakon izračuna bilo je potrebno usporediti maksimalnu dostupnu površinu s izračunatom. U ovom scenariju izračunata površina bila je manja od maksimalno dostupne, što je značilo kako je moguća implementacija potrebne količine panela koji bi pokrili godišnju isporučenu električnu energiju. To bi u konačnici rezultiralo nultim iznosom pogonskih troškova i nultom godišnjom emisijom CO₂.

Tablica 45 prikazuje godišnju isporučenu električnu energiju drugog scenarija, ukupnu potrebnu površinu i investicijski trošak panela.

Tablica 45. Potrebna površina i investicijski troškovi fotonaponskih panela

Godišnja isporučena električna energija za Scenarij 2 [kWh/a]	226 011
Izračunata površina panela [m ²]	1 005
Investicijski trošak panela [€]	180 809

6. Rezultati

Ovo poglavlje daje sažetak i usporedbu rezultata svih analiziranih scenarija na temelju njihovog energetskeg, investicijskog i ekološkog utjecaja. Cilj provođenja analiza bio je donošenje zaključka o najboljem troškovno-optimalnom rješenju uz postizanje niske godišnje emisije CO₂.

Energetske analize su izvršene za tri scenarija na temelju usporedbe godišnjih isporučenih toplinskih i električnih energija te godišnjih primarnih energija. Investicijske analize izvršene su usporedbom kumulativnih troškova koji su definirani kao zbroj investicijskih troškova te pogonskih troškova za 10 godina rada sustava. Konačno, izvršena je ekološka analiza na temelju usporedbe godišnjih emisija CO₂. Dodatno, nakon što je od tri analizirana scenarija odabrano troškovno-optimalno rješenje, analiziran je i potencijal za implementaciju fotonaponskih panela.

6.1. Usporedba godišnje isporučene energije za sve scenarije

Slika 19 prikazuje usporedbu godišnje isporučenih toplinskih energija i godišnjih isporučenih električnih energija za četiri analizirana scenarija.

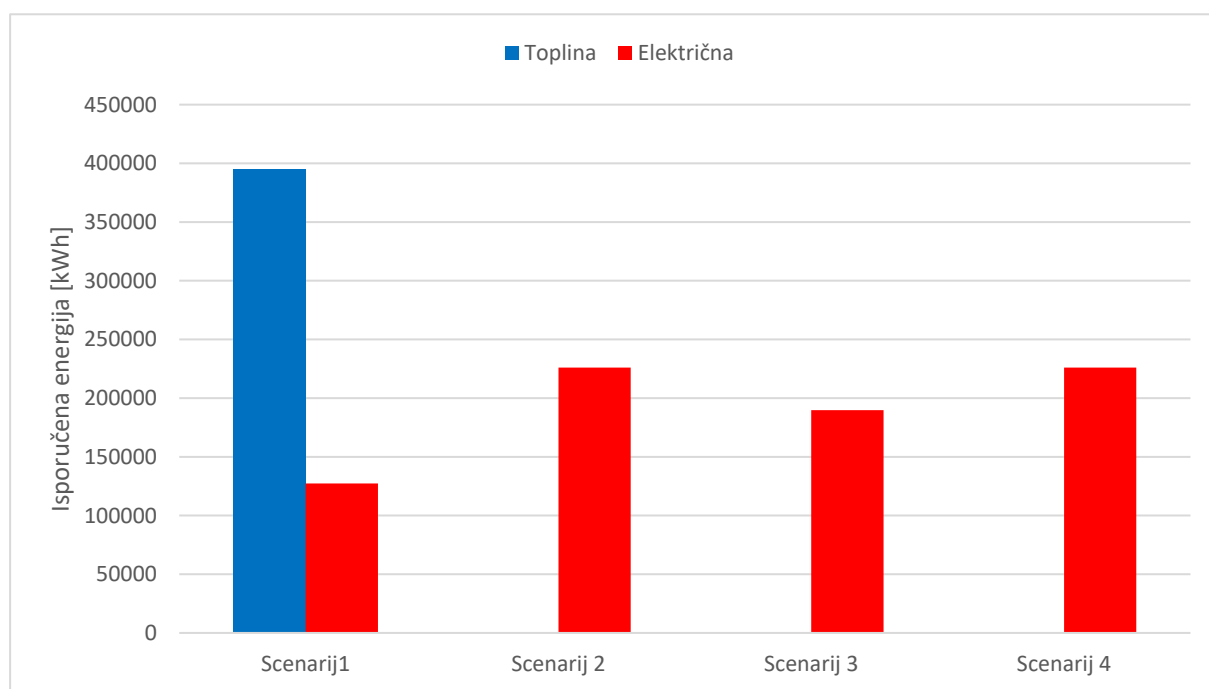
Scenarij 1 predstavlja implementaciju sustava daljinskog grijanja, sustava rashladnika vode, sustava ventilokonvektora i sustava mehaničke ventilacije. Vidljivo je kako ova scenarij ima najnižu isporučenu električnu energiju, no također ima znatnu količinu isporučene toplinske energije (koju nije moguće nadomjestiti fotonaponskim panelima).

Scenarij 2 ima isključivo isporučenu električnu energije s obzirom da se dizalica topline voda-zrak koristi za proizvodnju i rashladne i toplinske energije. Prednost ovog scenarija jest u činjenici da se ova isporučena električna energija može proizvesti korištenjem fotonaponskih panela. Uz dizalicu topline implementirani su i sustav ventilokonvektora i sustav mehaničke ventilacije. Ovaj scenarij ima najvišu isporučenu električnu energiju.

Scenarij 3 sadrži također samo električni oblik godišnje isporučene energije iz razloga što se radi o implementaciji sustava dizalice topline voda-voda s bunarom, sustava

ventilokonvektora i sustava mehaničke ventilacije. Iz rezultata je vidljivo kako ovaj scenarij ima najniži iznos isporučene energije.

Konačno, zadnji analizirani scenarij uključuje sve mehaničke sustave kao i Scenarij 2, ali je dodatno predviđena implementacija fotonaponskih panela za pokrivanje ukupne potrošnje električne energije, a s ciljem postizanja zgrade nulte emisije CO₂.



Slika 19. Usporedba godišnje isporučene energije za sve scenarije

Iako podaci o godišnjoj isporučenoj toplinskoj i električnoj energiji nisu sami za sebe dovoljni za donošenje zaključaka o troškovno-optimalnom rješenju, oni služe kao smjernica za predodžbu o iznosima primarne energije.

6.2. Usporedba godišnje primarne energije za sve scenarije

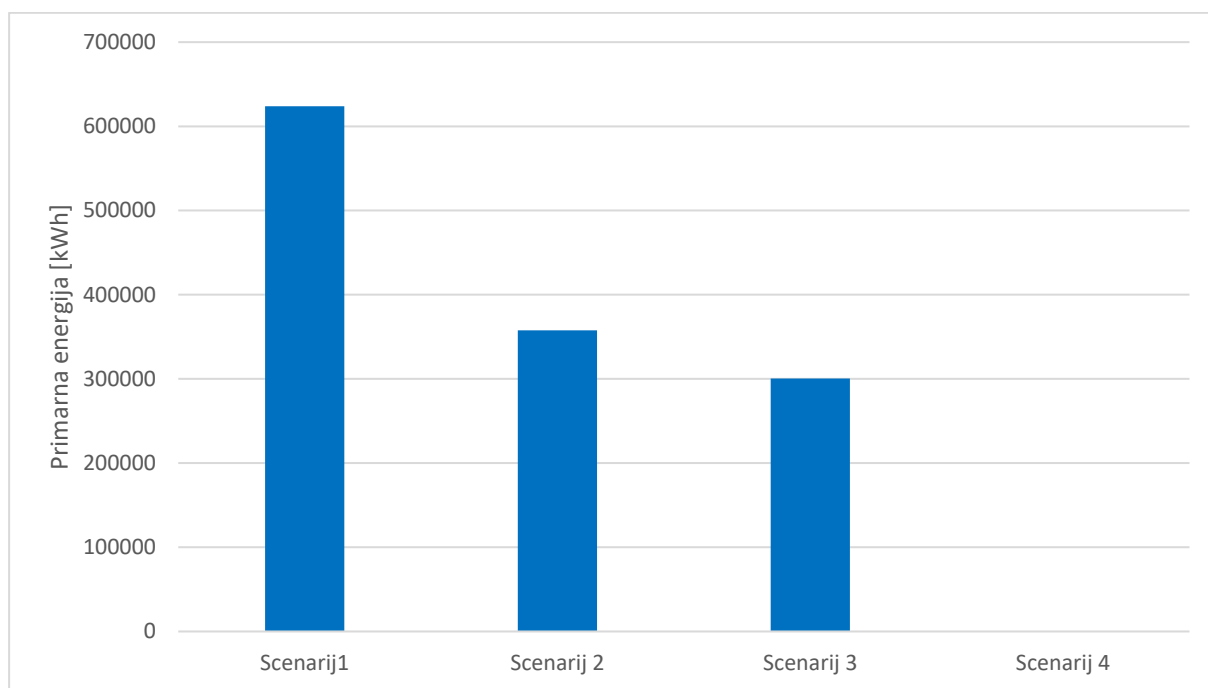
Slika 20 prikazuje usporedbu godišnje primarne energije za četiri analizirana scenarija. Primarna energija predstavlja energiju sadržanu u prirodnim resursima koji se koriste kako bi se generirala i dovela isporučena energija do zgrade.

Scenarij 1 ima znatno višu godišnju primarnu energiju u odnosu na ostale iz razloga što uz isporučenu električnu energiju ima i značajan iznos isporučene toplinske energije, a što je znatno povisilo primarnu energiju.

Scenarij 2 ima samo godišnju isporučenu električnu energiju uslijed korištenja dizalice topline, koji se također ubraja i u obnovljive izvore energije. Stoga je godišnja primarna energija ovog scenarija znatno manja u odnosu na Scenarij 1.

Scenarij 3 ima najmanju godišnju primarnu energiju iz razloga što je ima najučinkovitiji izvor toplinske i rashladne energije (najbolje sezone faktore hlađenja i grijanja). To je znatno smanjilo godišnju isporučenu energiju, a time i godišnju primarnu energiju.

Zadnji scenarij podrazumijeva implementaciju fotonaponskih panela za pokrivanje ukupne potrošnje isporučene energije (električne energije za grijanje, hlađenje i ventilaciju) te stoga ima nultu primarnu energiju. Količina proizvedene energije fotonaponskim panelima istovjetna je isporučenoj energiji Scenarija 2.



Slika 20. Usporedba godišnje primarne energije za sve scenarije

6.3. Usporedba kumulativnih troškova za sve scenarije

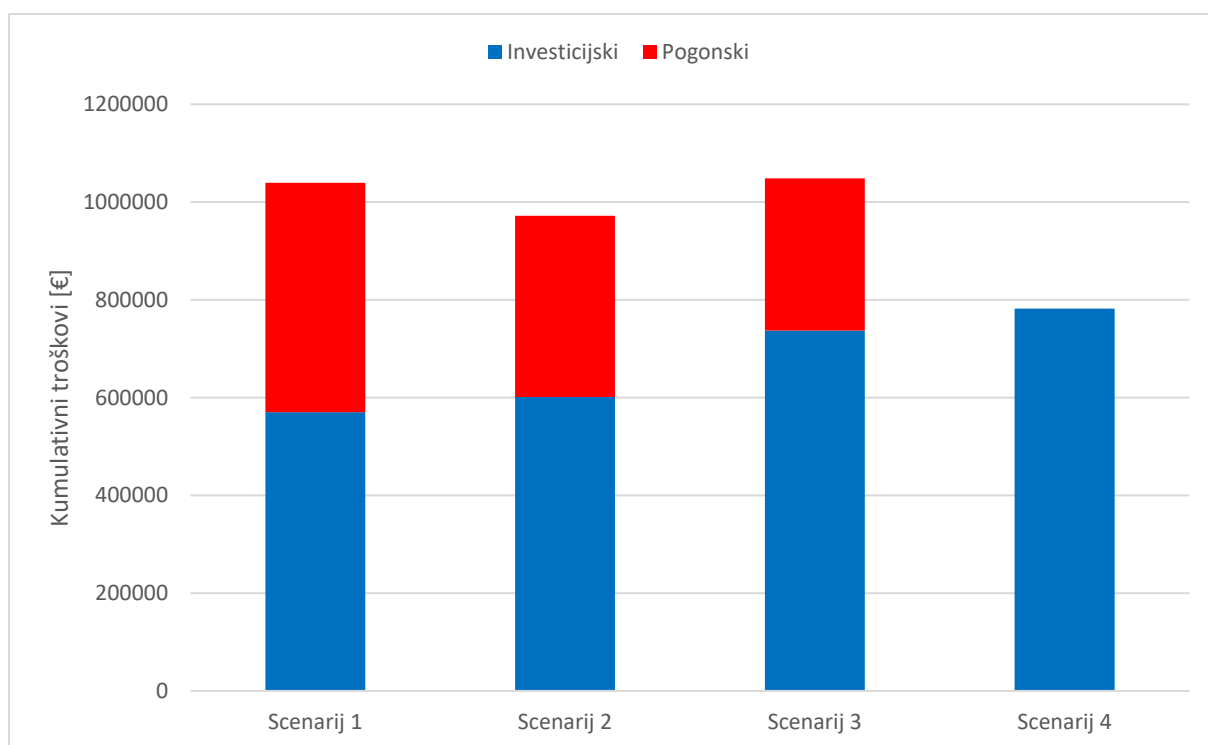
Slika 20 prikazuje kumulativne troškove za sve scenarije, a koji se sastoje od investicijskih troškova i troška pogona za 10 godina rada sustava.

Scenarij 1 ima najniže investicijske troškove, no troškovi pogona su značajni te u konačnici dovode do relativno visokih kumulativnih troškova.

Scenarij 2 imao najniže kumulativne troškove od analizirana tri osnovna scenarija te se stoga nameće kao troškovno-optimalno rješenje u izboru između tri osnovna scenarija (Scenarij 1, Scenarij 2 i Scenarij 3).

Scenarij 3, iako ima najnižu primarnu i isporučenu energije istovremeno ima i najviše kumulativne troškove iz razloga što ima visoke investicijske troškove.

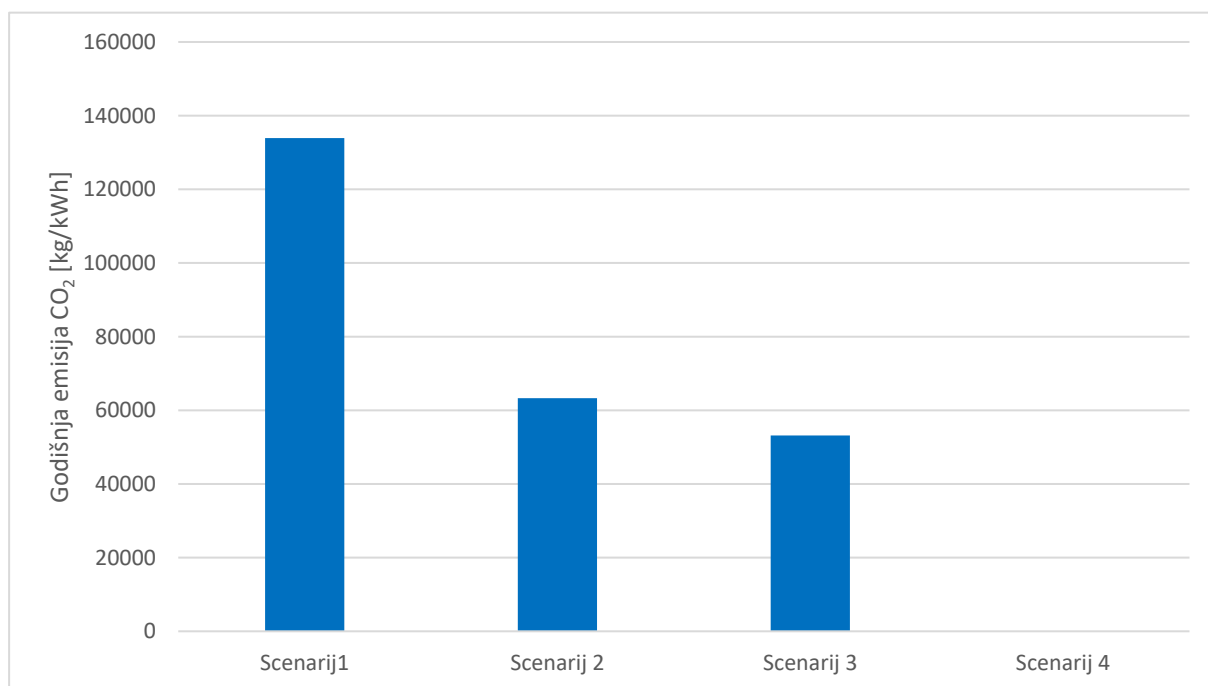
Rezultati pokazuju da je zadnji scenarij (kombinacija Scenarija 2 uz implementaciju fotonaponskih panela) optimalni scenarij od svih analiziranih. Iako su investicijski troškovi najviši, istovremeno su pogonski troškovi jednaki nuli te je investicija isplativa.



Slika 21. Usporedba kumulativnih troškova za sve scenarije

6.4. Usporedba godišnje emisije CO₂ za sve scenarije

Slika 22 prikazuje usporedbu godišnjih emisija CO₂, kako bi se analizirao ekološki učin analiziranih scenarija. Iz rezultata je vidljivo da Scenarij 2 u kombinaciji s fotonaponskim panelima daje nultu emisiju CO₂, odnosno omogućava postizanje standardna nulte emisije. Uz to, kako je ranije pokazano, ovo je istovremeno i troškovno-optimalni scenarije s obzirom da ima najniže kumulativne troškove.



Slika 22. Usporedba godišnje emisije CO₂ za sve scenarije

7. Zaključak

Cilj ovog rada bio je na primjeru rekonstrukcije zgrade Muzeja Slavonije u Osijeku provesti analizu potencijala za postizanje niskouglične zgrade. Zgrada na novoj lokaciji je u derutnom stanju te ju je potrebno rekonstruirati i prenamijeniti. S obzirom da se zgrada nalazi pod kulturnom zaštitom, iziskuje projektiranje sukladno konzervatorskim zahtjevima. Glavni arhitektonski projekt predviđa tri etaže: prizemlje s 19 prostorija ukupne površine 2 096 m², prvi kat s 14 prostorija ukupne površine 2 345 m² i potkrovlje s 13 prostorija ukupne površine 2 442 m². Za potrebe analize u ovom je radu zgrada podijeljena na 45 toplinskih zona. Pri tome toplinska zona predstavlja odabrane granice unutar zgrade, a karakteriziraju ju homogeni uvjeti unutar tih granica (npr. homogena temperatura zraka u zoni, homogena vlažnost, homogeni dobitci topline, itd).

Analiza je provedena na temelju glavnog arhitektonskog projekt koji sadrži podatke o fizici zgrade te geometriji zgrade. Pogonski režimi i termini korištenja zgrade definirani su prema namjeni prostorija, a podrazumijevaju definiranje npr. postavnih temperatura prostorija te rasporeda korištenja. Prema rasporedu korištenja zgrade definiraju tri tipa prostorija: tip A (održavanje stanja kroz cijelu godinu), tip B (održavanje stanja kada su ljudi u zgradi), tip C (nema potrebe za kondicioniranjem prostora).

Pri korak analize uključivao je izračun godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje. Analiza je provedena u računalnom programu za dinamičke simulacije *TRNSYS*, na način da je modelirana višezonska zgrada na temelju ulaznih parametara koji uključuju toplinske zone, fiziku zgrade, pogonske režime i termine korištenja zgrade. Simulacija je provedena za svaki sat u godini, korištenjem ulaznih podataka za tipičnu meteorološku godinu, a što predstavlja statistički obrađene podatke na temelju podataka za zadnjih npr. 20 ili 30 godina. Za potrebe ovog rada korišteni su podaci za područje Zagreba, s obzirom da podaci za grad Osijek nisu bili dostupni. U radu je dodatno opisan matematički model na čijem principu računalni program radi.

Na temelju podataka o potrebnoj energiji izvršena je energetska analiza koja je uključivala proračun godišnje isporučene toplinske i električne energije za tri moguća scenarija implementacije sustava grijanja i hlađenja. Tri analizirana scenarija su sustav s daljinskim grijanjem i rashladnikom vode, sustav s dizalicom topline voda-zrak i sustav s dizalicom topline voda-voda s bunarom. Za sva tri scenarija pretpostavljeno je da se koristi sustav mehaničke ventilacije za dobavu vanjskoj zraka te ventilokonvektori kao

ogrjevno-rashladno tijelo u prostoru. Za analize isporučene energije korišteni su podaci proizvođača opreme te stručni proračuni.

Sljedeći korak analize bila je kvantifikacija klimatološkog utjecaja pojedinog scenarija kroz izračun godišnje primarne energije i emisije CO₂. Primarna energija i emisija CO₂ izračunate su na temelju faktora pretvorbe koje definira Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine.

U radu je također izvršena ekonomska analiza koja je uključivala izračun investicijskih te pogonskih troškova za 10 godina rada sustava, a koji zajedno sačinjavaju kumulativne troškove. Važno je napomenuti da su kumulativni troškovi računati s pretpostavkom da je cijena energenata konstantna.

Osim analize tri osnovna scenarija, u radu je provedena i analiza utjecaja ugradnje fotonaponskih panela. Proračun je uključivao izračun potrebne površine krova za postizanje standarda zgrade nulte emisije, odnosno površine kojom je na godišnjoj razini moguće proizvesti dovoljno električne energije za pokrivanje potreba za grijanje, hlađenje i ventilaciju.

Na temelju svih proračunatih podataka odabran je troškovno-optimalni scenarij, a koji uključuje korištenje obnovljivih izvora energije u obliku implementacije dizalice topline voda-zrak i fotonaponskih panela. Ovaj scenarij također uključuje mehaničku ventilaciju te ventilokonvektore za kondicioniranje prostora.

Konačan proračun daje sljedeće podatke za odabrani scenarij:

- godišnja isporučena energija iznosi 226 010 kWh, odnosno, 34 kWh/m² izraženo po korisnoj površini zgrade,
- godišnja primarna energija iznosi 0 kWh,
- godišnja emisija CO₂ iznosi 0 kWh,
- godišnji kumulativni troškovi iznose 782 154 €, od čega se 782 154 € odnosi na investicijske troškove, a 0 € na pogonske troškove.

Rezultati pokazuju da je predloženim scenarijem postignut standard niskouglične zgrade uz 100% udjela obnovljivih izvora energije. Rezultati također ukazuju na činjenicu da je odabrani scenarij troškovno-optimalno rješenje s obzirom da ima najniže kumulativne troškove za 10 godina rada sustava u odnosu na ostale analizirane scenarije.

LITERATURA

- [1] Muzej Slavonije u Osijeku, povijest, <https://mso.hr/povijest-muzeja/>, 1.07.2024.
- [2] Muzej Slavonije u Osijeku, odjeli, <https://mso.hr/odjeli/>, 1.07.2024.
- [3] Faktori primarne energije i emisije CO₂, https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/meteoroloski_podaci/Tablice_faktori_prim.en-1.4.2022..pdf, 1.07.2024.
- [4] Daljinsko grijanje parovod, <https://www.purlen.si/hr/daljinsko-grijanje-parovod/>, 9.07.2024.
- [5] Daljinsko grijanje toplinska stanica, <https://mmo.hr/toplinske-stanice/>, 9.07.2024.
- [6] Rashladnik vode, <https://www.frigo-plus.hr/rashladnici-vode/>, 9.07.2024.
- [7] Dizalica topline voda-zrak, <https://webgradnja.hr/katalog/23689/vitocal-100-a-monoblok-dizalica-topline-zrak-voda-za-vanjsku-ugradnju>, 9.07.2024.
- [8] Dizalica topline voda-voda s bunarom, <https://www.bug.hr/energetika/dizalice-topline-i-na-nebu-i-u-zemlji-26397>, 9.07.2024.
- [9] Ventilokonvektori, <https://kera-term.hr/proizvod/innova-airleaf-sl-200-ventilokonv-2cj-hl-076-kw-gr-45-70c-097-kw-189-kw/>, 9.07.2024.
- [10] Mehanička ventilacija, <https://www.optimaklima.hr/usluge/ventilacija-prostora/>, 9.07.2024.