

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Petra Rožman

**Energetska obnova zgrada koje imaju status  
kulturnog dobra**



Zagreb, 2024.

*Ovaj rad izrađen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB) u Laboratoriju za energetske učinkovitost pod vodstvom mentorice, izv. prof. dr. sc. Tee Žakula te sumentorstvo istraživača Nikole Bađuna. Predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2023./2024.*

*Petra Rožman*

## SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| POPIS SLIKA .....   | iv |
| POPIS TABLICA.....  | v  |
| 1. Uvod.....  | 1  |
| 2. Opći i specifični ciljevi rada.....  | 2  |
| 3. Plan rada.....   | 3  |
| 3.1. Postojeće stanje.....  | 5  |
| 3.1.1 Opis fizike zgrade .....  | 7  |
| 3.1.2 Opis tehničkog sustava zgrade.....  | 11 |
| 3.1.3. Energijske potrebe zgrade za postojeće stanje.....   | 14 |
| 3.2. Mjere poboljšanja.....   | 16 |
| 3.2.1. Mjera FZ1: Brtvljenje vanjske ovojnice zgrade.....   | 17 |
| 3.2.2. Mjera FZ2: Zamjena unutarnjih prozorskih krila .....   | 18 |
| 3.2.3. Mjera FZ3: Dodavanje toplinske izolacije izvana na vanjske zidove s dvorišne strane 19   | 19 |
| 3.2.4. Mjera FZ4: Dodavanje toplinske izolacije izvana na vanjske zidove uličnih pročelja 21  | 21 |
| 3.2.5. Mjera FZ5: Dodavanje toplinske izolacije iznutra na vanjske zidove uličnih pročelja 22   | 22 |
| 3.2.6. Mjera FZ6: Dodavanje toplinske izolacije iznutra i izvana na vanjske zidove uličnih pročelja .....   | 23 |
| 3.2.7. Mjera FZ7: Kombinacija Mjera FZ1 – FZ5 .....   | 24 |
| 3.2.8. Mjera FZ8: Kombinacija Mjera FZ1 + Mjera FZ2 + Mjera FZ3 .....   | 25 |
| 3.2.9. Mjera TS1: Zamjena plinskog kotla, rashladnika vode i split sustava dizalicom topline zrak-voda .....  | 26 |
| 3.2.10. Mjera TS2: Uvođenje regulacije ogrjevnih tijela .....   | 30 |
| 3.2.11. Mjera TS3: Zamjena postojećih radijatora i ventilokonvektora novim ventilokonvektorima i ugradnja dizalice topline zrak-voda kao izvora toplinske/rashladne energije 31 | 31 |
| 3.2.12. Mjera TS4: Uvođenje sustava centralizirane ili decentralizirane mehaničke ventilacije 33  | 33 |
| 3.2.13. Mjera TS5: Uvođenje sustava automatizacije.....   | 35 |
| 3.2.14. Mjera TS6: Instalacija fotonaponskih panela.....  | 36 |
| 3.2.15. Mjera TS7: Kombinacija mjera TS1 – TS6 .....  | 37 |
| 3.3. Ulazni podaci za izračun jednostavnog perioda povrata investicije .....  | 39 |
| 4. Rezultati .....  | 40 |

|   |    |
|---|----|
| 4.1. Mjere poboljšanja fizike zgrade.....             | 40 |
| 4.2. Mjere poboljšanja tehničkih sustava zgrade ..... | 44 |
| 5. Rasprava i zaključak.....                          | 49 |
| ZAHVALE.....  | 51 |
| POPIS LITERATURE.....                                 | 52 |
| SAŽETAK .....   | 54 |
| SUMMARY .....   | 58 |

## POPIS SLIKA

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Slika 1. Energetski tok kroz zgradu s termotehničkim sustavom za grijanje [4] .....</i>  | <i>4</i>  |
| <i>Slika 2. Zgrada ministarstva kulture i medija - ulična pročelja [6] .....</i>  | <i>5</i>  |
| <i>Slika 3. Sjeverno pročelje – orijentirano na Vodnikovu ulicu [6] .....</i>   | <i>6</i>  |
| <i>Slika 4. Istočno pročelje – orijentirano na Runjaninovu ulicu [6] .....</i>  | <i>6</i>  |
| <i>Slika 5. Južno i zapadno pročelje – orijentirano prema dvorištu i drugim zgradama [6].....</i>   | <i>6</i>  |
| <i>Slika 6. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje za postojeće stanje [kWh/a i kWh/m<sup>2</sup>a] .....</i>  | <i>15</i> |
| <i>Slika 7. Osnovna shema kompresijske dizalice topline s izvorom i ponorom topline [10] .....</i>  | <i>26</i> |
| <i>Slika 8. Vrijednosti COP-a i EER-a za svaki sat u godini.....</i>  | <i>29</i> |
| <i>Slika 9. Vrijednosti COP-a za svaki sat u promatranoj godini za niskotemperaturni režim grijanja .....</i>   | <i>32</i> |
| <i>Slika 10. Usporedba isporučene energije za hlađenje pomoću split sustava i proizvodnje električne energije fotonaponskim sustavom .....</i>                    | <i>37</i> |
| <i>Slika 11. Usporedba godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje za postojeće stanje i za pojedinu mjeru poboljšanja fizike zgrade.....</i>               | <i>40</i> |
| <i>Slika 12. Procjena investicije za mjere poboljšanja fizike zgrade .....</i>  | <i>42</i> |
| <i>Slika 13. Procjena perioda povrata investicije za sve mjere poboljšanja fizike zgrade .....</i>  | <i>43</i> |
| <i>Slika 14. Usporedba godišnje isporučene energije za grijanje i hlađenje zgrade za postojeće stanje i za pojedinu mjeru poboljšanja tehničkih sustava .....</i> | <i>44</i> |
| <i>Slika 15. Procjena investicije za mjere poboljšanja tehničkih sustava zgrade.....</i>  | <i>46</i> |
| <i>Slika 16. Procjena perioda povrata investicije za sve mjere poboljšanja tehničkih sustava zgrade .....</i>   | <i>46</i> |

**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| <i>Tablica 1. Svojstva poda prema tlu</i> .....  | 7  |
| <i>Tablica 2. Svojstva međukatne konstrukcije</i> .....  | 8  |
| <i>Tablica 3. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja</i> .....  | 8  |
| <i>Tablica 4. Svojstva vanjskih zidova dvorišnih pročelja</i> .....  | 8  |
| <i>Tablica 5. Svojstva unutarnjih/pregradnih zidova</i> .....  | 9  |
| <i>Tablica 6. Svojstva ravnog šljunčanog krova</i> .....   | 9  |
| <i>Tablica 7. Svojstva limenog krova</i> .....   | 9  |
| <i>Tablica 8. Svojstva uličnog krova s crijepom</i> .....  | 10 |
| <i>Tablica 9. Svojstva dvostrukih drvenih prozora</i> .....  | 10 |
| <i>Tablica 10. Dodatak na U vrijednost zbog postojanja toplinskih mostova</i> .....  | 11 |
| <i>Tablica 11. Koeficijent prolaza topline pojedinog građevnog elementa te dopuštene vrijednosti koeficijenata prolaza topline prema Tehničkom propisu</i> ..... | 11 |
| <i>Tablica 12. Raspored korištenja zgrade</i> .....  | 12 |
| <i>Tablica 13. Učinkovitost podsustava proizvodnje, distribucije i predaje</i> .....   | 13 |
| <i>Tablica 14. Ulazni podaci za definiranje pogonskih režima</i> .....   | 14 |
| <i>Tablica 15. Pregled analiziranih mjera poboljšanja fizike zgrade</i> .....  | 17 |
| <i>Tablica 16. Pregled analiziranih mjera poboljšanja tehničkih sustava zgrade</i> .....   | 17 |
| <i>Tablica 17. Investicija Mjere FZ1</i> .....   | 18 |
| <i>Tablica 18. Svojstva novih prozora s dvostrukim izo-staklom i dva low-e premaza</i> .....   | 18 |
| <i>Tablica 19. Investicija Mjere FZ2</i> .....   | 19 |
| <i>Tablica 20. Svojstva vanjskih zidova dvorišnog pročelja nakon provedene Mjere FZ3</i> .....   | 20 |
| <i>Tablica 21. Vrijednost koeficijenata prolaza topline prije i poslije provedene Mjere FZ3</i> .....  | 20 |
| <i>Tablica 22. Investicija Mjere FZ3</i> .....   | 20 |
| <i>Tablica 23. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja nakon provedene Mjere FZ5</i> .....   | 21 |
| <i>Tablica 24. Vrijednost koeficijenta prolaza topline prije i poslije provedene Mjere FZ4</i> .....   | 21 |
| <i>Tablica 25. Investicija Mjere FZ4</i> .....   | 22 |
| <i>Tablica 26. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja nakon provedene Mjere FZ5</i> .....   | 22 |
| <i>Tablica 27. Vrijednost koeficijenta prolaza topline prije i poslije provedene Mjere FZ5</i> .....   | 23 |
| <i>Tablica 28. Investicija Mjere FZ5</i> .....   | 23 |
| <i>Tablica 29. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja nakon provedene Mjere FZ5</i> .....   | 24 |
| <i>Tablica 30. Investicija Mjere FZ6</i> .....   | 24 |

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Tablica 31. Investicija svih mjera poboljšanja fizike zgrade.....</i>  | <i>25</i> |
| <i>Tablica 32. Investicija Mjere FZ8.....</i>   | <i>25</i> |
| <i>Tablica 33. Investicija Mjere TS1 .....</i>  | <i>29</i> |
| <i>Tablica 34. Procijenjeni koeficijenti učinkovitosti postojećeg i novog stanja radijatora nakon uvođenja regulacije .....</i>       | <i>30</i> |
| <i>Tablica 35. Procijenjeni koeficijenti učinkovitosti postojećeg i novog stanja ventilokonvektora nakon uvođenja regulacije.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Tablica 36. Učinkovitost podsustava predaje topline postojećeg i novog stanja.....</i>   | <i>31</i> |
| <i>Tablica 37. Investicija za Mjeru TS2.....</i>  | <i>31</i> |
| <i>Tablica 38. Broj radijatora i ventilokonvektora u predmetnoj zgradi.....</i>   | <i>32</i> |
| <i>Tablica 39. Investicija za Mjeru TS3.....</i>  | <i>33</i> |
| <i>Tablica 40. Ulazni podaci za analizu mjere uvođenja mehaničke ventilacije – postojeće i novo stanje zgrade .....</i>               | <i>34</i> |
| <i>Tablica 41. Potrošnja električne energije na ventilatorima klimatizacijske jedinice.....</i>                                       | <i>35</i> |
| <i>Tablica 42. Investicija za Mjeru TS4.....</i>  | <i>35</i> |
| <i>Tablica 43. Investicija za Mjeru TS5.....</i>  | <i>36</i> |
| <i>Tablica 44. Investicija za Mjeru TS6.....</i>  | <i>37</i> |
| <i>Tablica 45. Investicija za Mjeru TS7.....</i>  | <i>38</i> |
| <i>Tablica 46. Cijene energenata .....</i>  | <i>39</i> |

## 1. Uvod

Potres koji je zadesio Zagreb 2020. godine doveo je do oštećenja mnogih zgrada, među kojima su zgrade kulturnog dobra te zgrade koje su dio zaštićene kulturno-povijesne cjeline grada. Ubrzo nakon potresa započela je diskusija o obnovi zgrada oštećenih potresom kao i donošenje mnogih zakona i pravila [1]. U većini zakona nameće se potreba za smanjenjem godišnje potrebne energije za grijanje ( $Q_{H,nd}$ ) i hlađenje ( $Q_{C,nd}$ ) te za uštedom primarne energije ( $E_{prim}$ ) prilikom obnove. Najveći izazovi uočeni su prilikom energetske obnove zgrada koje imaju status kulturnog dobra, velikim dijelom i zbog nedovoljne definiranosti smjernica te brojnih zahtjeva i konzervatorskih ograničenja koja se pojavljuju pri obnovi kulturne baštine [2]. Navedeno dovodi do toga da mnogobrojne zgrade ne prođu kroz proces obnove, što dovodi do smanjenja kvalitete boravka i udobnosti u prostorima zgrade (npr. sindrom bolesne zgrade), energetske neučinkovitosti, potencijalnog urušavanja, a u konačnici i smanjenja ukupne vrijednosti zgrade.

Ovim radom analizirane su mjere energetske obnove zgrade kulturnog dobra na primjeru zgrade Ministarstva kulture i medija Republike Hrvatske u Zagrebu. Zgrada je odabrana kao predstavnik brojnih sličnih zgrada u Donjem Gradu, a koje su oštećene potresom. Cilj rada je analizirati tehničku opravdanost te financijsku isplativost najučestalijih mjera energetske obnove za predmetnu zgrade te za slične zgrade pod konzervatorskom zaštitom. Također, jedan od ciljeva je kvantificiranje negativnog utjecaja neprovođenja pojedinih mjera u slučajevima kada zbog konzervatorskih i drugih ograničenja navedena mjera nije provediva.

Analizirane mjere energetske obnove obuhvaćaju 8 mjera na ovojnici zgrade te 7 mjera koje se odnose na tehničke sustave zgrade. Mjere poboljšanja fizike zgrade obuhvaćaju brtvljenje vanjske ovojnice zgrade, zamjenu postojećih prozora, toplinsku izolaciju zgrade te kombinaciju mjera. Mjere poboljšanja tehničkih sustava obuhvaćaju mjere poboljšanja performansi tehničkih sustava (automatizacija, uvođenje regulacije, zamjena postojećih ogrjevnih tijela), mjere uvođenja suvremenih tehnologija (instalacija dizalice topline zrak-voda i instalacija fotonaponskih panela) te mjeru povećanja kvalitete zraka u prostoru uvođenjem mehaničke ventilacije. Sve analizirane mjere dovode do povećanja održivosti zgrade kroz energetske uštede te povećanje kvalitete boravka ljudi u prostorijama.



## ***2. Opći i specifični ciljevi rada***

Pregledom dostupne literature te u konzultaciji sa stručnjacima u građevinskom sektoru uočeno je da postoje brojne poteškoće i prepreke prilikom energetske obnove zgrada koje imaju status kulturnog dobra zbog nedovoljne definiranosti i neusklađenosti smjernica za obnovu. Stoga je u sklopu ovog rada na primjeru zgrade Ministarstva kulture i medija Republike Hrvatske u Zagrebu analizirano na koji način pojedine mjere poboljšanja fizike i tehničkih sustava zgrade utječu na energetske obnovu te povećanje održivosti zgrade. Cilj je rada davanje preporuka i konkretnih smjernica za energetske obnovu predmetne zgrade te sličnih zgrada pod konzervatorskom zaštitom. Sve analize rađene su u suradnji s Ministarstvom kulture i medija Republike Hrvatske te stručnjacima iz područja arhitekture (Miljenko Kukić, dipl.ing.arh.), građevine (izv.prof.dr.sc. Bojan Milovanović, dipl.ing.grad.) te strojarstva (Silvano Sušilović, dipl.ing.stroj.).

### 3. Plan rada

Za predmetnu zgradu analizirane su mjere poboljšanja fizike zgrade i tehničkih sustava u svrhu energetske obnove. Navedene mjere detaljno su objašnjene u nastavku rada. Kako je već ranije spomenuto, svrha energetske obnove je ušteda godišnje potrebne energije za grijanje ( $Q_{H,nd}$ ) i hlađenje ( $Q_{C,nd}$ ), odnosno, ušteda primarne energije ( $E_{prim}$ ).

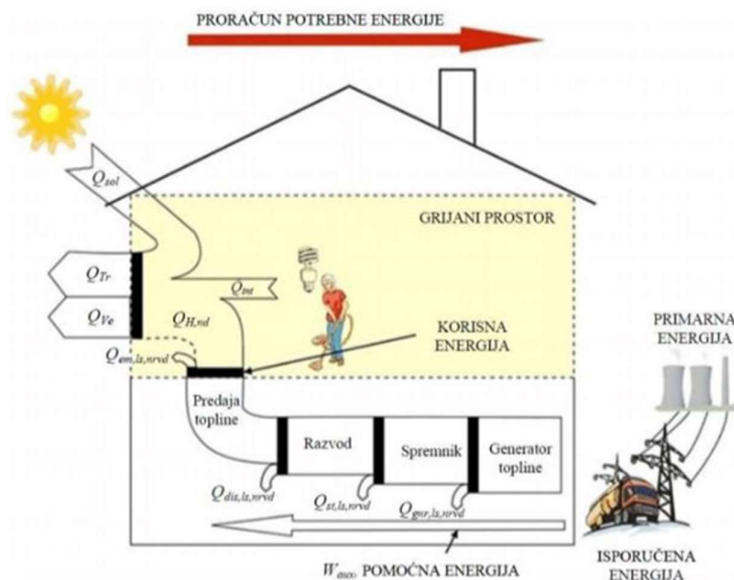
Za ugodan boravak ljudi u prostoriji potrebno je osigurati dostatnu količinu toplinske/rashladne energije te primjerene količine svježeg zraka. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje i godišnja potrebna energija za hlađenje definirane su prema [3]:

- GODIŠNJA POTREBNA TOPLINSKA ENERGIJA ZA GRIJANJE,  $Q_{H,nd}$  (kWh/a), je računski određena količina topline koju sustavom grijanja treba tijekom jedne godine dovesti u zgradu za održavanje unutarnje projektne temperature u zgradi tijekom razdoblja grijanja zgrade.
- GODIŠNJA POTREBNA TOPLINSKA ENERGIJA ZA HLAĐENJE,  $Q_{C,nd}$  (kWh/a), je računski određena količina topline koju sustavom hlađenja treba tijekom jedne godine odvesti iz zgrade za održavanje unutarnje projektne temperature u zgradi tijekom razdoblja hlađenja zgrade.

Kako bi se osigurala potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje nužno je korištenje tehničkih sustava, a koji za svoj rad koriste energiju. Ta energija naziva se isporučena energija te je prema [3]:

- ISPORUČENA ENERGIJA je energija, izražena po nositelju energije, koja se dovodi u tehnički sustav u zgradi kroz granicu sustava kako bi se zadovoljile promatrane potrebe za grijanjem, hlađenjem, ventilacijom i klimatizacijom, potrošnom toplom vodom i rasvjetom.

Isporučena energija je uvijek veća od potrebne energije. Prema Slici 1 može se zaključiti da je isporučena energija jednaka zbroju potrebne energije i ukupnih gubitaka sustava umanjениh za iskorištene gubitke. Ukupne gubitke sustava čine gubici podsustava predaje, gubici podsustava razvoda te gubici podsustava proizvodnje. Isporučena energija je osnova za analize isplativosti pojedine mjere poboljšanja s obzirom na to da se radi o energiji koju korisnik u konačnici plaća.



Slika 1. Energetski tok kroz zgradu s termotehničkim sustavom za grijanje [4]

Kako bi tehnički sustav zgrade imao dovoljno isporučene energije u odgovarajućem obliku potrebno je osigurati primarnu energiju. Prema [3]:

- PRIMARNA ENERGIJA je energija iz obnovljivih i neobnovljivih izvora koja nije podvrgnuta niti jednom postupku pretvorbe.

Poznavanje potonjih energija važno je zbog toga što *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 128/15)* [3] propisuje minimalne zahtjeve za građevine na temelju kojih se zaključuje da li nova zgrada ili rekonstrukcija ispunjava uvjete.

Za računsko određivanje godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje korišten je računalni program TRNSYS. TRNSYS je računalni simulacijski program koji se koristi za dinamičke simulacije različitih energetskih sustava.

Zgradu je prije početka modeliranja potrebno podijeliti na toplinske zone. Podjela na zone izvršena je prema normi HRN EN ISO 52016-1:2017 [5] te se analizirana zgrada sastoji od 50 toplinskih zona. Toplinska zona može obuhvaćati jednu ili više prostorija, pri čemu se više prostorija može grupirati u jednu toplinsku zonu ako one imaju slična svojstva (toplinska opterećenja, pogonske režime, raspored korištenja, orijentacija i sl.).

U nastavku je opisano postojeće stanje zgrade, korišteni ulazni podaci u računalnom programu TRNSYS te detaljan pregled analiziranih mjera poboljšanja.

### 3.1. *Postojeće stanje*

Zgrada Ministarstva kulture i medija Republike Hrvatske je ulična zgrada kompleksa središnjice Ministarstva kulture na lokaciji Runjaninova – Vodnikova u Zagrebu. Predmetna zgrada je ugrađena uglovnica složenog tlocrtnog oblika, tlocrtno i visinski razvedena. Čine ju sjeverno krilo orijentirano na Vodnikovu ulicu i istočno krilo orijentirano na Runjaninovu ulicu. Južnim i zapadnim krilom zgrada je orijentirana prema dvorištu, odnosno drugim zgradama. Locirana je unutar Povijesne urbane cjeline Grada Zagreba kao zaštićenog kulturnog dobra, oznake Z-1525. Ujedno se nalazi na rubu „Zelene potkove”, također zaštićenog kulturnog dobra oznake Z-1536, klasificiranog kao baština vrtno arhitekture. Zgrada se s obzirom na namjenu razvrstava u nestambene zgrade uredske i administrativne namjene, s oznakom vrste NSZ1 [6].



*Slika 2. Zgrada ministarstva kulture i medija - ulična pročelja [6]*

Pješački pristup u zgradu je neposredno iz Runjaninove ulice, preko glavnog ulaza s vjetrobranom. Kolni i pješački pristup u dvorište je iz Vodnikove ulice, preko prolaza ispod zgrade u razini prizemlja.

Pročelja zgrade po stranama svijeta prikazana su na Slici 3 – 5.



*Slika 3. Sjeverno pročelje – orijentirano na Vodnikovu ulicu [6]*



*Slika 4. Istočno pročelje – orijentirano na Runjaninovu ulicu [6]*



*Slika 5. Južno i zapadno pročelje – orijentirano prema dvorištu i drugim zgradama [6]*

### 3.1.1 Opis fizike zgrade

Zgrada je u cijelosti rekonstruirana i obnovljena te je 2003. godine stavljena u funkciju Ministarstva kulture i medija. Sastoji se od glavne zgrade koju čine podrum, prizemlje, četiri kata i strojarnica te dvorišna zgrada koja nije bila predmet razmatranja. Zgrada ima neto korisnu površinu od 5 365 m<sup>2</sup>.

Ovojnica grijanog dijela zgrade čine:

- pod prema tlu
- međukatna konstrukcija
- vanjski zidovi – ulična pročelja
- vanjski zidovi – dvorišna pročelja
- unutarnji/pregradni zidovi
- ravni krov – šljunčani
- limeni krov
- ulični krov s crijepom
- otvori u vanjskim zidovima

Svojstva ovojnice dana su u Tablici 1 – 8 te su ista korištena kao ulazni podaci u računalnom programu TRNSYS.

Tablica 1. Svojstva poda prema tlu

| Slojevi                             | $d$ [cm]     | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|-------------------------------------|--------------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Cementni estrih                     | 3            | 2200                        | 1050        | 1,40             |
| Lagano armirana<br>betonska podloga | 6            | 2200                        | 960         | 2,33             |
| PE folija                           | 0,01         | 1000                        | 1250        | 0,19             |
| Ekstrudirani polistiren             | 6            | 40                          | 1260        | 0,03             |
| Hidroizolacija                      | 1            | 1000                        | 1460        | 0,19             |
| Betonska podloga                    | 15           | 2500                        | 960         | 2,33             |
| <b>Ukupno [cm]</b>                  | <b>31,01</b> |                             |             |                  |

Tablica 2. Svojstva međukatne konstrukcije

| Slojevi                                | $d$ [cm]     | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|--|--------------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Cementni estrih                        | 3            | 2200                        | 1050        | 1,40             |
| Armirana betonska podloga              | 6            | 2200                        | 960         | 1,40             |
| PE folija                              | 0,01         | 1000                        | 1250        | 0,19             |
| Ekspandirani polistiren                | 4            | 15                          | 1260        | 0,04             |
| Armirana betonska šuplja stropna ploča | 33           | 2500                        | 960         | 2,33             |
| Zatvoreni zračni prostor               | 10           | 1,2                         | 1005        | 0,07             |
| Gipskartonska ploča                    | 1,3          | 1000                        | 840         | 0,21             |
| <b>Ukupno [cm]</b>                     | <b>57,31</b> |                             |             |                  |

Tablica 3. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja

| Slojevi            | $d$ [cm]     | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [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             |
| <b>Ukupno [cm]</b> | <b>67,00</b> |                             |             |                  |

Tablica 4. Svojstva vanjskih zidova dvorišnih pročelja

| Slojevi              | $d$ [cm]     | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|----------------------|--------------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Produžna žbuka       | 2            | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| Šuplja blok opeka    | 30           | 1100                        | 900         | 0,48             |
| Stiropor             | 6            | 25                          | 1260        | 0,04             |
| Polimer cementi mort | 0,50         | 1050                        | 1130        | 0,80             |
| Silikatna žbuka      | 0,20         | 1800                        | 1130        | 0,70             |
| <b>Ukupno [cm]</b>   | <b>38,70</b> |                             |             |                  |

Tablica 5. Svojstva unutarnjih/pregradnih zidova

| Slojevi            | $d$ [cm]     | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|--------------------|--------------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Produžna žbuka     | 2            | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| Puna opeka         | 30           | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| Produžna žbuka     | 2            | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| <b>Ukupno [cm]</b> | <b>34,00</b> |                             |             |                  |

Tablica 6. Svojstva ravnog šljunčanog krova

| Slojevi            | $d$ [cm]     | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|--------------------|--------------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Šljunak            | 8            | 1700                        | 840         | 0,81             |
| Bitumenska traka   | 0,30         | 1100                        | 1000        | 0,23             |
| Stiropor           | 8            | 15                          | 1260        | 0,04             |
| Bitumenska traka   | 0,50         | 1100                        | 1000        | 0,23             |
| Beton              | 5            | 2500                        | 960         | 2,33             |
| Opeka              | 16           | 1800                        | 920         | 0,76             |
| Beton              | 4            | 2500                        | 960         | 2,33             |
| Produža žbuka      | 2            | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| <b>Ukupno [cm]</b> | <b>43,80</b> |                             |             |                  |

Tablica 7. Svojstva limenog krova

| Slojevi             | $d$ [cm]     | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|---------------------|--------------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Lim                 | 0,07         | 7900                        | 1000        | 17               |
| PE file             | 0,30         | 1000                        | 1250        | 0,19             |
| Bitumenska traka    | 0,30         | 1100                        | 1000        | 0,23             |
| Daska               | 2,40         | 500                         | 1600        | 0,13             |
| Kamena vuna         | 10           | 50                          | 1030        | 0,035            |
| Beton               | 4            | 2500                        | 960         | 2,33             |
| Opeka               | 16           | 1800                        | 920         | 0,76             |
| Zrak                | 10           | 1                           | 1000        | 0,62             |
| Gipskartonska ploča | 1,25         | 1000                        | 840         | 0,21             |
| <b>Ukupno [cm]</b>  | <b>44,32</b> |                             |             |                  |



Tablica 8. Svojstva uličnog krova s crijepom

| Slojevi                | $d$ [cm]     | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|------------------------|--------------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Crijep                 | 2            | 2100                        | 900         | 0,68             |
| Ventilirani sloj zraka | 3            | 1                           | 1000        | 0,62             |
| 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        | 0,62             |
| Gipskartonska ploča    | 1,25         | 1000                        | 840         | 0,21             |
| <b>Ukupno [cm]</b>     | <b>30,97</b> |                             |             |                  |

Otvore u vanjskim zidovima čine u najvećem dijelu drveni prozori i ostakljena vrata kao prozirni elementi te ulazna vrata s punim krilima kao neprozirni elementi. Najveću površinu zauzimaju dvostruki drveni prozori ugrađeni na sjeverno i istočno pročelje zgrade. Jednostruki drveni prozori ostakljeni dvoslojnim IZO staklom ugrađeni su na pročelja s dvorišne strane. U računalnom programu TRNSYS, zbog pojednostavljenja, kao ulazni podatak vanjskih otvora uzeta je jedna vrsta prozora. Svojstva korištenog prozora dana su u Tablici 9.

Tablica 9. Svojstva dvostrukih drvenih prozora

|   |      |
|---|------|
| Koeficijent prolaza topline prozora, $U$ (W/m <sup>2</sup> K)   | 2,01 |
| Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, $g$ [-] | 0,70 |

Za vanjske zidove uzet je dodatak na koeficijent prolaza topline zbog postojanja toplinskih mostova, a kako je prikazano u Tablici 10. Dodatno su koeficijenti prolaza topline krovova uvećani za 15 % uslijed postojanja rogova. Tablica 11 prikazuje usporedbu koeficijenta prolaza topline pojedinog građevnog elementa ovojnice s trenutno dopuštenim vrijednostima koeficijenta prolaza topline prilikom rekonstrukcije definiranim *Tehničkim propisom* [3].

Tablica 10. Dodatak na  $U$  vrijednost zbog postojanja toplinskih mostova

| <b>Dodatak na <math>U</math> vrijednost zbog postojanja toplinskog mosta [<math>W/m^2K</math>]</b> |      |
|--|------|
| Vanjski zidovi bez izolacije   | 0,15 |
| Vanjski zidovi s izolacijom izvana   | 0,05 |

Tablica 11. Koeficijent prolaza topline pojedinog građevnog elementa te dopuštene vrijednosti koeficijenata prolaza topline prema Tehničkom propisu

| <b>Građevni element</b>            | <b>Koeficijent prolaza topline, <math>U</math> [<math>W/m^2K</math>]</b> | <b>Dopuštena vrijednost koeficijenta prolaza topline, <math>U_{dop}</math> [<math>W/m^2K</math>]</b> |
|------------------------------------|--|--|
| Pod prema tlu                      | 0,45   | 0,40   |
| Međukatna konstrukcija             | 0,34   | 0,60   |
| Vanjski zidovi – ulična pročelja   | 0,97   | 0,30   |
| Vanjski zidovi – dvorišna pročelja | 0,49   | 0,30   |
| Unutarnji/pregradni zidovi         | 1,84   | 0,60   |
| Ravni krov - šljunčani             | 0,40   | 0,25   |
| Limeni krov                        | 0,31   | 0,25   |
| Ulični krov s crijepom             | 0,29   | 0,25   |
| Dvostruki drveni prozori           | 2,01   | 1,10   |

Uočljivo je iz Tablice 11 da skoro svi građevni elementi premašuju trenutno dopuštene vrijednosti koeficijenata prolaza topline, a što dovodi do zaključka da postoji potencijal uštede energije pomoću mjera poboljšanja fizike zgrade.

### 3.1.2 Opis tehničkog sustava zgrade

Na početku poglavlja spomenuto je da se s obzirom na namjenu analizirana zgrada razvrstava u nestambene zgrade uredske i administrativne namjene. Raspored korištenja zgrade (Tablica 12) definiran je prema *Izveštaju o provedenom energetskom pregledu – zgrada Ministarstva kulture RH* [6].

*Tablica 12. Raspored korištenja zgrade*

|                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| 5 dana kroz tjedan      | 06:00 – 20:00        |
| 1 dan u tjednu (subota) | 06:00 – 16:00        |
| nedjelja                | zgrada se ne koristi |

U zgradi postoji sustav grijanja, hlađenja i ventilacije, kako je opisano u nastavku.

## **VENTILACIJA**

Ventilacija zgrade je najvećim dijelom prirodna (otvaranjem prozora). Prisilna mehanička ventilacija izvedena je kao lokalni sustav odsisne ventilacije u prostorijama čajne kuhinje i sanitarijama. Svaka prostorija se zasebno ventilira ventilatorom integriranim u kanale za ventilaciju te se zagađeni zrak izbacuje pomoću ventilacijskih vertikalna preko krova građevine. Prema informacijama djelatnika, sustav ventilacije podruma i prvog kata je izvan funkcije.

## **GRIJANJE**

U predmetnoj zgradi postoji sustav toplovodnog radijatorskog i ventilokonvektorskog grijanja. Toplinsku energiju opskrbljuje standardni plinski kotao smješten u kotlovnici. Kotao je atmosferske izvedbe proizvođača *Buderus*, toplinskog učina 350 kW, tip GE434X. Cijevna mreža koja ide iz kotlovnice ima četiri regulacijska kruga grijanja. Sustav grijanja radi u temperaturnom režimu 80/60°C. Radom sustava i kliznim vođenjem temperature polaznog voda, ovisno o vanjskoj temperaturi, upravlja automatska regulacija. U ljetnim mjesecima kotao se koristi za pripremu potrošne tople vode. Potrošna topla voda pohranjuje se u centralni spremnik zapremnine 800 litara. Iz spremnika se potrošna topla voda cijevnim razvodom distribuira do izljevniha mjesta po objektu.

## **HLAĐENJE**

Sustav hlađenja izveden je centralno pomoću ventilokonvektora te decentralizirano pomoću split jedinica.

Rashladni agregat za centralni sustav hlađenja, rashladnog učina 183 kW, smješten je na krovu predmetne zgrade te ima ukupnu instaliranu električnu snagu od 61 kW. Regulacija rada vrši se preko daljinskog upravljača na rashladnom agregatu te pomoću termostata za svaki ventilokonvektor, održavajući zadanu temperaturu u predmetnom prostoru. Hlađenje ventilokonvektorima koristi se prema individualnim željama korisnika prostora. Prema informacijama djelatnika, većina ventilokonvektora za hlađenje je izvan funkcije u ljetnim mjesecima. Najčešći uzroci tome jesu hidraulički neuravnoteženi sustav razvoda hladne vode, prljavi filteri na usisu u ventilokonvektore te neispravnost elektronike od termostata do ventilokonvektora.

Dodatno, u predmetnoj zgradi izveden je sustav hlađenja pomoću split jedinica ukupno instalirane električne snage 10,16 kW te 32,75 kW rashladnog učina. Regulacija rada istih vrši se preko daljinskog upravljača održavajući zadanu temperaturu u predmetnom prostoru. Split sustav koristi se individualno prema željama korisnika prostora te je prema informacijama djelatnika djelomično u funkciji tijekom ljetnih mjeseci.

## REGULACIJA OGRJEVNIH TIJELA

Značajni gubici sustava zgrade uzrokovani su postojanjem ručnih ventila koji onemogućuju hidraulički balans te temperaturnu regulaciju ogrjevnih/rashladnih tijela.

Za izračun gubitaka potrebno je poznavati učinkovitosti podsustava distribucije vode te učinkovitost podsustava proizvodnje (kotla), koji su utvrđeni iskustveno na temelju pregleda sustava (Tablica 13). Koeficijenti učinkovitosti za podsustav predaje (ogrjevna tijela) određeni su prema *Algoritmu za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama [4]*. U postojećem stanju koeficijenti učinkovitosti radijatora odabrani su za nereguliranu temperaturu prostora, nad-temperaturu od 50 K i pretpostavku da je većina radijatora smještena uz vanjski zid. Za ventilokonvektore koeficijent učinkovitosti odabran je za nisku razinu regulacije.

Tablica 13. Učinkovitost podsustava proizvodnje, distribucije i predaje

|   |      |
|---|------|
| Učinkovitost plinskog kotla, $\eta_{kotao}$                 | 0,90 |
| Učinkovitost podsustava distribucije, $\eta_{distribucija}$ | 0,95 |
| Učinkovitost podsustava predaje, $\eta_{em}$                | 0,81 |

Ostali bitni parametri zgrade, pri definiranju pogonskih režima, za potrebe modeliranja godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje prikazani su u Tablici 14.

Tablica 14. Ulazni podaci za definiranje pogonskih režima

| <b>Ulazni podaci energetskog modela zgrade</b>   |       |
|--|-------|
| Broj izmjena vanjskog zraka za nestambene zgrade [ $\text{h}^{-1}$ ], $n_{win} + n_{inf}$          | 0,91  |
| Broj izmjena zraka uslijed infiltracije (pri razlici tlaka od 50 Pa), $n_{50}$ [ $\text{h}^{-1}$ ] | 10    |
| Postavna temperatura za grijanje [ $^{\circ}\text{C}$ ]  | 21    |
| Postavna temperatura za hlađenje [ $^{\circ}\text{C}$ ]  | 22    |
| Unutarnji toplinski dobici kada zgrada radi [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]                              | 10,30 |
| Unutarnji toplinski dobici kada zgrada ne radi [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]                           | 0     |

Izmjena vanjskog zraka za nestambene zgrade od  $0,91 \text{ h}^{-1}$  je vrijednost dobivena korištenjem *Algoritma za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade [7]*. Za izračun je korištena, na temelju pregleda zgrade, vrijednost od  $10 \text{ h}^{-1}$  izmjene zraka uslijed infiltracije pri nametnutoj razlici tlaka od 50 Pa .

Postavne temperature za grijanje i hlađenje usvojene su iz *Izvještaja o provedenom energetskom pregledu – zgrada Ministarstva kulture RH [6]*.

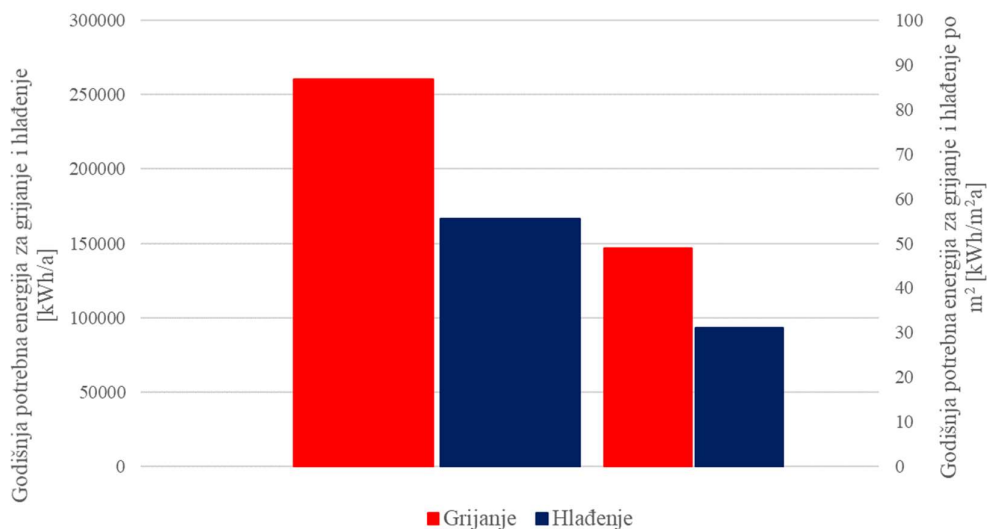
Unutarnji toplinski dobici pretpostavljeni su sa  $6 \text{ W}/\text{m}^2$  korištenjem *Algoritma za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790 [8]* te skalirani za vrijednost korištenja zgrade.

### 3.1.3. Energijske potrebe zgrade za postojeće stanje

Modeliranjem energijskih potreba zgrade u računalnom programu TRNSYS te korištenjem ulaznih podataka spomenutih u poglavlju 3.1.1. i 3.1.2., dobivena je godišnja potrebna energija za grijanje ( $Q_{H,nd}$ ) u iznosu od 260 646 kWh/a i godišnja potrebna energija za hlađenje ( $Q_{C,nd}$ ) u iznosu od 166 594 kWh (Slika 6). Budući da se u praksi vrijednosti najčešće iskazuju po  $\text{m}^2$

korisne površine, Slika 6 također prikazuje navedene vrijednosti podijeljene s korisnom površinom zgrade (5 365 m<sup>2</sup>).

Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje iznosi 49 kWh/m<sup>2</sup>, a što je 100 % više od maksimalno dopuštenih 23 kWh/m<sup>2</sup> koji su definirani *Tehničkim propisom* [3] za rekonstruirane zgrade. Spomenutim propisom maksimalna dopuštena godišnja potrebna energija za hlađenje nije ograničena, a za postojeće stanje ona iznosi 31 kWh/m<sup>2</sup>.



Slika 6. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje za postojeće stanje [kWh/a i kWh/m<sup>2</sup>a]

### **3.2. Mjere poboljšanja**

U svrhu povećanja održivost zgrade analizirano je 15 mjera poboljšanja, od čega 8 mjera poboljšanja fizike zgrade i 7 mjera poboljšanja tehničkih sustava zgrade. Za svaku mjeru je u nastavku dan kratak opis zahvata te pretpostavke analize. U poglavlju Rezultati prikazana je ušteda pogonskih troškova te jednostavni period povrata investicije u odnosu na postojeće stanje za svaku mjeru poboljšanja. Mjere poboljšanja na fizici zgrade definirane su u suradnji s dipl.ing.arh. Miljenkom Kukićem te izv.prof.dr.sc. Bojanom Milovanovićem dok su mjere poboljšanja tehničkih sustava definirane u suradnji s dipl.ing.stroj. Silvanom Sušilovićem. Važno je napomenuti kako se kod mjera poboljšanja fizike zgrade ne ulazi u detaljnu razradu građevinskih radova zbog potreba pojednostavljenja simulacija. Primjerice, u praksi će se prije dodavanja izolacije ukloniti postojeći slojevi te će se na njih dodati novi slojevi.

U Tablici 15 dan je pregled svih mjera poboljšanja fizike zgrade, a u Tablici 16 pregled svih mjera poboljšanja tehničkih sustava zgrade.

Tablica 15. Pregled analiziranih mjera poboljšanja fizike zgrade

|                  |   |
|------------------|---|
| <b>Mjera FZ1</b> | Brtvljenje vanjske ovojnice zgrade  |
| <b>Mjera FZ2</b> | Zamjena unutarnjih prozorskih krila   |
| <b>Mjera FZ3</b> | Dodavanje toplinske izolacije izvana na vanjske zidove s dvorišne strane      |
| <b>Mjera FZ4</b> | Dodavanje toplinske izolacije izvana na vanjske zidove uličnih pročelja       |
| <b>Mjera FZ5</b> | Dodavanje toplinske izolacije iznutra na vanjske zidove uličnih pročelja      |
| <b>Mjera FZ6</b> | Dodavanje topl. izolacije iznutra i izvana na vanjske zidove uličnih pročelja |
| <b>Mjera FZ7</b> | Kombinacija mjera: Mjera FZ1 – Mjera FZ6                                      |
| <b>Mjera FZ8</b> | Kombinacija mjera: Mjera FZ1 + Mjera FZ2 + Mjera FZ3                          |

Tablica 16. Pregled analiziranih mjera poboljšanja tehničkih sustava zgrade

|                  |  |
|------------------|--|
| <b>Mjera TS1</b> | Zamjena plinskog kotla i rashladnika vode dizalicom topline zrak-voda  |
| <b>Mjera TS2</b> | Uvođenje regulacije ogrjevnih tijela   |
| <b>Mjera TS3</b> | Zamjena postojećih radijatora i ventilokonvektora novim ventilokonvektorima uz dizalicu topline zrak-voda kao izvorom toplinske/rashladne energije |
| <b>Mjera TS4</b> | Uvođenje sustava mehaničke ventilacije   |
| <b>Mjera TS5</b> | Uvođenje sustava automatizacije  |
| <b>Mjera TS6</b> | Instalacija fotonaponskih panela uz dizalicu topline zrak-voda kao izvorom toplinske/rashladne energije  |
| <b>Mjera TS7</b> | Kombinacija mjera: Mjera TS1 – Mjera TS6   |

### 3.2.1. Mjera FZ1: Brtvljenje vanjske ovojnice zgrade

Mjera FZ1 podrazumijeva brtvljenje vanjske ovojnice zgrade, a što je moguće postići ugradnjom gumenih brtvi na unutarnja i/ili vanjska krila prozora i vrata te korištenjem brtvene mase za lijepljenje i brtvljenje rubnih spojeva parne brane kosog krovišta. Parna brana djelomično sprječava prelazak vodene pare, a samim time i prolazak zraka, što dovodi do smanjenja izmjene topline s vanjskim okolišem. Drugim riječima, što je manja zrakopropusnost zgrade to su manji neželjeni i nekontrolirani gubici/dobici topline.

Spomenuta mjera modelirana je u računalnom programu TRNSYS promjenom broja izmjene zraka uslijed infiltracije i prozračivanja ( $n_{win} + n_{inf}$ ). Ulazne vrijednosti dobivene su



korištenjem *Algoritma za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade [7]*. Za postojeće stanje zgrade i  $n_{50} = 10 \text{ h}^{-1}$  broj izmjena zraka uslijed infiltracije i prozračivanja iznosi  $0,91 \text{ h}^{-1}$ . Smanjenjem  $n_{50}$  sa sadašnjih  $10 \text{ h}^{-1}$  na  $3 \text{ h}^{-1}$  dolazi do smanjenja broja izmjene zraka uslijed infiltracije i prozračivanja na  $0,79 \text{ h}^{-1}$ .

Tablica 17 prikazuje investiciju za sanaciju vanjskih prozorskih krila te uključuje zamjenu brtvila, kitanje i bojanje vanjskih prozorskih krila. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

*Tablica 17. Investicija Mjere FZ1*

| Investicija [€/m <sup>2</sup> ] | Površina [m <sup>2</sup> ] | Investicija [€] |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------|
| 80                              | 692                        | 55 360          |

### **3.2.2. Mjera FZ2: Zamjena unutarnjih prozorskih krila**

Prozirne otvore na vanjskoj ovojnici predmetne zgrade čine dvostruki prozori na uličnim pročeljima i jednostruki prozori na pročeljima s dvorišne strane. Uobičajeno rješenje za zgrade pod zaštitom, gdje zamjena vanjske stolarije na uličnim pročeljima često nije moguća zbog estetskih razloga, jest zamjena unutarnjih prozorskih krila s onima boljih svojstava. U provedenoj analizi pretpostavljeno je korištenje prozora s dvostrukim izo-staklom i s dva low-e premaza.

Radi jednostavnosti, prilikom modeliranja u računalnom programu TRNSYS postojeći prozori zamijenjeni su novim prozorima svojstava u Tablici 18, a što daje efekt zamjene unutarnjih prozorskih krila.

*Tablica 18. Svojstva novih prozora s dvostrukim izo-staklom i dva low-e premaza*

|   |      |
|---|------|
| Koeficijent prolaza topline prozora, $U$ (W/m <sup>2</sup> K)   | 1,1  |
| Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, $g$ [-] | 0,62 |

Low-e staklo je staklo na koje je u toku proizvodnje nanesen tanki sloj metalnog oksida. Metalni oksid djeluje s vanjske strane kao filter koji onemogućuje propuštanje štetnog UV

zračenja u prostoriju, dok s unutrašnje strane djeluje kao reflektor koji reflektira infracrveno (toplinsko) zračenje nazad u prostoriju. Na taj se način značajno smanjuju gubici topline kroz staklo (npr. oko 70 %) u odnosu na klasično jednostruko staklo [9].

Budući da zamjenom unutarnjih prozorskih krila također dolazi do smanjenja zrakopropusnosti zgrade (kao kod brtvljenja vanjske ovojnice), potrebno je u računalnom programu TRNSYS smanjiti broj izmjene zraka uslijed infiltracije i prozračivanja s postojećih  $0,91 \text{ h}^{-1}$  na  $0,79 \text{ h}^{-1}$  (detaljno upisano u Mjeri FZ1).

Investicija je prikazana u Tablici 19 i uključuje demontažu postojećih unutarnjih drvenih okvira te izradu i montažu novih s ugrađenim izo-staklom, potrebno pripasivanje i zamjenu okova. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

*Tablica 19. Investicija Mjere FZ2*

| Investicija [€/m <sup>2</sup> ] | Površina [m <sup>2</sup> ] | Investicija [€] |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------|
| 520                             | 692                        | 359 840         |

### ***3.2.3. Mjera FZ3: Dodavanje toplinske izolacije izvana na vanjske zidove s dvorišne strane***

Mjera FZ3 i ostale mjere poboljšanja fizike zgrade u nastavku podrazumijevaju dodavanje toplinske izolacije na vanjske zidove s vanjske ili unutrašnje strane. Za predmetnu zgradu izolacija se može dodati na vanjske zidove uličnih pročelja ili na vanjske zidove s dvorišne strane. U mnogim slučajevima dodavanje izolacije s vanjske strane vanjskih zidova uličnih pročelja nije moguće zbog zahtjeva od strane konzervatorskih tijela. Cilj analiza opisanih u nastavku je kvantifikacija utjecaja koju takvi zahtjevi imaju za promatranu građevinu.

Spomenuta mjera modelirana je dodavanjem kamene vune debljine 12 cm s vanjske strane dvorišnih zidova. Svojstva vanjskih zidova dvorišnih pročelja nakon dodavanja kamene vune debljine 12 cm prikazana su u Tablici 20.

Tablica 20. Svojstva vanjskih zidova dvorišnog pročelja nakon provedene Mjere FZ3

| Slojevi              | $d$ [cm]     | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|----------------------|--------------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Produžna žbuka       | 1            | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| Šuplja blok opeka    | 2            | 1100                        | 900         | 0,48             |
| Stiropor             | 6            | 25                          | 1260        | 0,041            |
| Kamena vuna          | 12           | 50                          | 1030        | 0,035            |
| Polimer cementi mort | 0,50         | 1050                        | 1130        | 0,80             |
| Silikatna žbuka      | 0,20         | 1800                        | 1130        | 0,70             |
| <b>Ukupno [cm]</b>   | <b>49,70</b> |                             |             |                  |

Dodavanje toplinske izolacije dovodi do smanjenja koeficijenta prolaza topline na 37 % početne vrijednosti. Vrijednosti koeficijenta prolaza topline prije i poslije provedene mjere prikazane su u Tablici 21, a prema čemu se može zaključiti kako je koeficijent prolaza topline vanjskih zidova dvorišnih pročelja nakon provedene Mjere FZ3 unutar dopuštenih vrijednosti definiranih *Tehničkim propisom* (Tablica 11).

Tablica 21. Vrijednost koeficijenta prolaza topline prije i poslije provedene Mjere FZ3

| Koeficijent prolaza topline, $U$ [W/m <sup>2</sup> K] |                             |
|---|-----------------------------|
| Prije provedene Mjere FZ3                             | Poslije provedene Mjere FZ3 |
| 0,49  | 0,18                        |

Investicija je prikazana u Tablici 21 i uključuje montažu i demontažu skele, pripremu podloge, ETICS sustav od 12 cm (mineralna vuna, armaturni sloj, silikatna žbuka) te limarski, elektroinstalaterske i strojarske radove. Svaki dodatan cm ETICS sustava naplaćuje se 1,5 €/m<sup>2</sup>. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

Tablica 22. Investicija Mjere FZ3

| Investicija [€/m <sup>2</sup> ] | Površina [m <sup>2</sup> ] | Investicija [€] |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------|
| 75                              | 803                        | 60 25           |

### 3.2.4. Mjera FZ4: Dodavanje toplinske izolacije izvana na vanjske zidove uličnih pročelja

Kao što je već spomenuto u poglavlju 3.2.3., dodavanje toplinske izolacije izvana na vanjske zidove uličnih pročelja mjera je koja se uglavnom izbjegava kada se radi o zgradama pod konzervatorskom zaštitom. Međutim, postoje zgrade kod kojih je spomenuta mjera moguća te je ista analizirana na primjeru predmetne zgrade. Cilj analize ove mjere također je bio kvantificirati negativni utjecaj na energetska učinkovitost kod onih zgrada gdje se mjera ne primjenjuje.

Mjera FZ4 modelirana je u računalnom programu TRNSYS dodavanjem sloja toplinske žbuke debljine 5 cm na trenutačnih 2 cm. Debljina izolacije od 5 cm predstavlja rubnu vrijednost iznad koje bi se toplinska žbuka na zgradi trebala armirati, a što značajno poskupljuje investiciju. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja nakon provedene Mjere FZ4 prikazana su u Tablici 23.

Tablica 23. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja nakon provedene Mjere FZ5

| Slojevi            | $d$ [cm]  | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|--------------------|-----------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Završni sloj žbuke | 1         | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| Toplinska žbuka    | 7         | 700                         | 920         | 0,10             |
| Opeka              | 60        | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| Produžna žbuka     | 4         | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| <b>Ukupno [cm]</b> | <b>72</b> |                             |             |                  |

Spomenutom mjerom dolazi do smanjenja koeficijenta prolaza topline na približno 60 % početne vrijednosti, što iako je značajno, još uvijek nije dovoljno da bi se postigla dopuštena vrijednost definirana *Tehničkim propisom* (Tablica 11).

Tablica 24. Vrijednost koeficijenta prolaza topline prije i poslije provedene Mjere FZ4

| Koeficijent prolaza topline, $U$ [W/m <sup>2</sup> K] |                             |
|---|-----------------------------|
| Prije provedene Mjere FZ4                             | Poslije provedene Mjere FZ4 |
| 0,97  | 0,58                        |

Investicija je prikazana u Tablici 25 i uključuje montažu i demontažu skele, istražne konzervatorske radove, uklanjanje postojeće žbuke i profilaciju te zidarsko-fasaderske radove, restauratorske radove, limarske radove i ličilačke radove. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

Tablica 25. Investicija Mjere FZ4

| Investicija [€/m <sup>2</sup> ] | Površina [m <sup>2</sup> ] | Investicija [€] |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------|
| 650                             | 1 497                      | 973 050         |

### 3.2.5. Mjera FZ5: Dodavanje toplinske izolacije iznutra na vanjske zidove uličnih pročelja

Kako se kod zgrada koje su pod konzervatorskom zaštitom najčešće ne može staviti izolacija izvana, analizirano je dodavanje izolacije iznutra, debljine 3 cm. Dodavanjem izolacije iznutra smanjuje se korisna površina zgrade, što može biti nepoželjno. Iz istog razloga potrebno je odabrati toplinsku izolaciju što boljih karakteristika, a kako bi se željeni učinak mogao postići sa što manjom debljinom izolacije.

Navedena mjera modelirana je dodavanjem sloja toplinske žbuke debljine 3 cm s unutarnje strane vanjskih zidova uličnih pročelja. Pretpostavka je da se zbog drugih građevnih elemenata (otvori, stupovi, itd.) izolacijom s unutarnje strane može pokriti 80 % površine zida. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja nakon provedene Mjere FZ5 prikazana su u Tablici 26, a usporedba koeficijenata prolaza topline prije i poslije provedene mjere u Tablici 27.

Tablica 26. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja nakon provedene Mjere FZ5

| Slojevi            | $d$ [cm]  | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|--------------------|-----------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Završni sloj žbuke | 1         | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| Toplinska žbuka    | 2         | 700                         | 920         | 0,10             |
| Opeka              | 60        | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| Toplinska žbuka    | 3         | 700                         | 920         | 0,10             |
| Produžna žbuka     | 4         | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| <b>Ukupno [cm]</b> | <b>69</b> |                             |             |                  |

Tablica 27. Vrijednost koeficijenta prolaza topline prije i poslije provedene Mjere FZ5

| Koeficijent prolaza topline, $U$ [W/m <sup>2</sup> K] |                             |
|---|-----------------------------|
| Prije provedene Mjere FZ5                             | Poslije provedene Mjere FZ5 |
| 0,97  | 0,66                        |

Investicija je prikazana u Tablici 28 i uključuje montažu i demontažu skele, istražne konzervatorske radove, uklanjanje postojeće žbuke i profilaciju te zidarske radove, restauratorske radove i ličilačke radove. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

Tablica 28. Investicija Mjere FZ5

| Investicija [€/m <sup>2</sup> ] | Površina [m <sup>2</sup> ] | Investicija [€] |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------|
| 55                              | 1 306                      | 71 830          |

### 3.2.6. Mjera FZ6: Dodavanje toplinske izolacije iznutra i izvana na vanjske zidove uličnih pročelja

Mjera FZ6 obuhvaća kombinaciju ranije spomenutih mjera: Mjeru FZ5 – dodavanje toplinske izolacije izvana na vanjske zidove uličnih pročelja i Mjeru FZ4 – dodavanje izolacije iznutra na vanjske zidove uličnih pročelja. Pretpostavka je da se kombinacijom izolacije izvana i iznutra postiže značajnije smanjenje toplinskih gubitaka zgrade u usporedbi s pojedinačnom mjerom. Između ostalog, postiže se veća razina ugodnosti za korisnike zgrade zbog povećanja površinske temperature vanjskih zidova. Navedena mjera specifična je za zgrade pod konzervatorskom zaštitom.

Svojtava vanjskih zidova uličnih pročelja poslije provedene mjere prikazana su u Tablici 29.

Tablica 29. Svojstva vanjskih zidova uličnih pročelja nakon provedene Mjere FZ5

| Slojevi            | $d$ [cm]  | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] |
|--------------------|-----------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Završni sloj žbuke | 1         | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| Toplinska žbuka    | 7         | 700                         | 920         | 0,10             |
| Opeka              | 60        | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| Toplinska žbuka    | 3         | 700                         | 920         | 0,10             |
| Produžna žbuka     | 4         | 1800                        | 1050        | 0,87             |
| <b>Ukupno [cm]</b> | <b>75</b> |                             |             |                  |

Investicija je prikazana u Tablici 30 i uključuje montažu i demontažu skele, istražne konzervatorske radove, uklanjanje postojeće žbuke i profilaciju te zidarsko-fasaderske radove, restauratorske radove, limarske radove i ličilačke radove. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

Tablica 30. Investicija Mjere FZ6

|                   | Investicija [€/m <sup>2</sup> ] | Površina [m <sup>2</sup> ] | Investicija [€] |
|-------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------|
| Izolacija izvana  | 650                             | 1 497                      | 973 050         |
| Izolacija iznutra | 55                              | 1 306                      | 71 830          |
| $\Sigma$          |                                 |                            | 1 044 880       |

### 3.2.7. Mjera FZ7: Kombinacija Mjera FZ1 – FZ5

Idealna situacija za energetska obnovu ovojnice zgrade obuhvaća primjenu svih ranije spomenutih mjera. Koliko je pojedina mjera tehnički izvediva i ekonomski isplativa detaljno je komentirano u poglavlju Rezultati.

Korišteni ulazni podaci kao i način modeliranja u računalnom programu TRNSYS detaljno su objašnjeni ranije uz svaku primijenjenu mjeru, a investicija je prikazana u Tablici 31. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

Tablica 31. Investicija svih mjera poboljšanja fizike zgrade

|   | Investicija<br>[€/m <sup>2</sup> ] | Površina<br>[m <sup>2</sup> ] | Investicija<br>[€] |
|---|------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Zamjena unutarnjih prozorskih krila<br>(uključuje brtvljenje vanjske ovojnice zgrade) | 520                                | 692                           | 359 840            |
| Izolacija izvana – dvorišni zidovi  | 75                                 | 803                           | 60 225             |
| Izolacija izvana – ulična pročelja  | 650                                | 1 497                         | 973 050            |
| Izolacija iznutra – ulična pročelja   | 55                                 | 1 306                         | 71 830             |
| Σ   |                                    |                               | 1 464 945          |

### 3.2.8. Mjera FZ8: Kombinacija Mjera FZ1 + Mjera FZ2 + Mjera FZ3

U usporedbi s Mjerom FZ7 koja predstavlja idealan, ali u velikom broju slučajeva nerealan scenarij, analizirana je Mjera FZ8. Mjera podrazumijeva kombinaciju brtvljenja ovojnice, zamjenu postojećih prozora i dodavanje toplinske izolacije na vanjske zidove dvorišnih pročelja.

Korišteni ulazni podaci kao i način modeliranja u računalnom programu TRNSYS detaljno su objašnjeni ranije uz svaku primijenjenu mjeru, a investicija je prikazana u Tablici 32. Navedeni podatak definiran prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

Tablica 32. Investicija Mjere FZ8

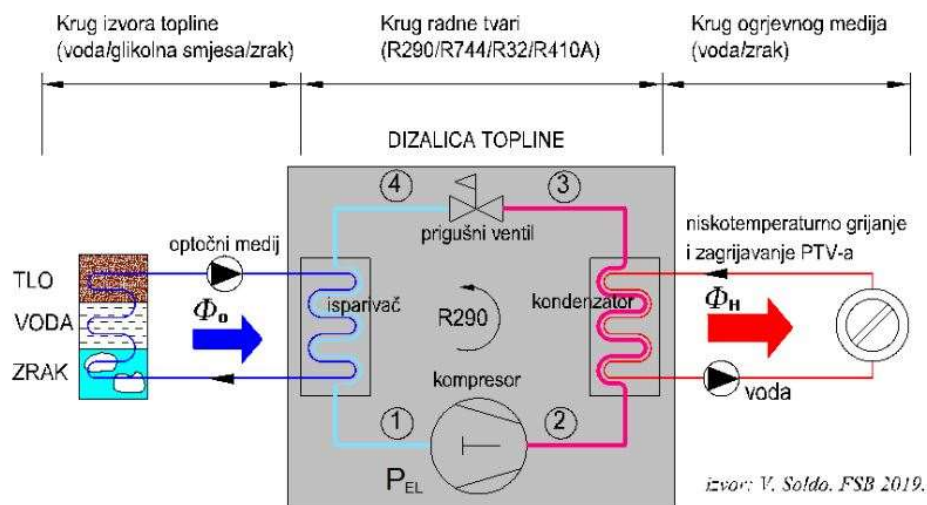
|   | Investicija<br>[€/m <sup>2</sup> ] | Površina<br>[m <sup>2</sup> ] | Investicija<br>[€] |
|---|------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Zamjena unutarnjih prozorskih krila<br>(uključuje brtvljenje vanjske ovojnice zgrade) | 520                                | 692                           | 359 840            |
| Izolacija izvana – dvorišni zidovi  | 75                                 | 803                           | 60 225             |
| Σ   |                                    |                               | 420 065            |



### 3.2.9. Mjera TS1: Zamjena plinskog kotla, rashladnika vode i split sustava dizalicom topline zrak-voda

Mjera TS1 podrazumijeva zamjenu izvora toplinske i rashladne energije, specifično, zamjenu plinskog kotla, rashladnika vode i split sustava s dizalicom topline zrak-voda za postojeće stanje fizike zgrade. Pri tome je pretpostavljeno da će plinski kotao ostati u funkciji rezervnog pogona. Zbog jednostavnosti proračuna pretpostavljena je instalacija dizalice topline jednakog toplinskog učina kao i postojeći plinski kotao (350 kW).

Dizalica topline je uređaj koji radi na principu ljevokretnog kružnog procesa, a može raditi u režimu grijanja ili hlađenja. Osnovni elementi su: isparivač, kompresor, kondenzator i prigušni ventil. Primjerice, u režimu grijanja je isparivač dizalice topline zrak-voda smješten u vanjskom okolišu te radna tvar na sebe prima toplinu iz okolišnog zraka (izvor topline) i isparava. Pare radne tvari se pomoću kompresora tlače na viši tlak i temperaturu. U kondenzatoru radna tvar kondenzira te predaje toplinu vodi (ponor topline) koja dalje cirkulira u prostorije kojima treba dovoditi toplinsku energiju. Radna tvar koja je kondenzirala prigušuje se pomoću prigušnog ventila na tlak isparavanja i proces se ponavlja. U režimu hlađenja isparivač i kondenzator zamjenjuju svoje uloge te voda postaje izvor topline, a zrak ponor topline. Osnovna shema kompresijske dizalice topline s izvorom i ponorom topline prikazana je na Slici 7.



Slika 7. Osnovna shema kompresijske dizalice topline s izvorom i ponorom topline [10]

Kao što prikazuje Slika 7, kao toplinski izvor mogu se koristiti tlo, voda, zrak i otpadna toplina. Prednosti korištenja zraka kao toplinskog izvora su u pristupačnosti, jednostavnosti opreme i priključaka te uglavnom niži investicijski troškovi u odnosu na druge vrste dizalica topline. Ograničavajući faktor u primjeni su konstantne varijacije temperature vanjskog zraka.

Učinkovitost dizalice topline u režimu grijanja iskazana je faktorom grijanja (eng. *Coefficient of Performance – COP*) te se definira kao omjer učina grijanja i električne snage za pogon kompresora i pomoćnih komponenti:

$$COP = \frac{\Phi_H}{P_K} \quad (1)$$

Na sličan način definira se učinkovitost dizalice topline u režimu hlađenja. Faktor hlađenja (eng. *Energy Efficiency of Ratio – EER*) definira se kao omjer učina hlađenja i električne snage za pogon kompresora i pomoćnih komponenti:

$$EER = \frac{\Phi_C}{P_K} \quad (2)$$

Za energetska vrednovanje sustava relevantna je sezonska učinkovitost dizalice topline za grijanje (*SEER*) i hlađenje (*SCOP*). Prema [3]:

- Sezonski faktor grijanja (*SCOP*) odnosi se na ukupno vrijeme rada uređaja u sezoni grijanja, a izračunava se tako da se referentna godišnja potrebna energija za grijanje podijeli s godišnjom potrošnjom električne energije za grijanje.
- Sezonski faktor hlađenja (*SEER*) odnosi se na ukupno vrijeme rada uređaja u sezoni hlađenja, a izračuna se tako da se referentna godišnja potrebna energija za hlađenje podijeli s godišnjom potrošnjom električne energije za hlađenje.

*COP* i *EER* za dizalicu topline zrak-voda ovise o:

- temperaturi okoliša,
- temperaturi polaza vode,
- djelomičnom opterećenju dizalice topline (eng. *part load ratio – PLR*).

Spomenuta mjera modelirana je korištenjem računalnog programa MATLAB. Poznavanjem podataka od proizvođača o vrijednostima  $COP$ -a i  $EER$ -a u određenim radnim točkama te korištenjem MATLAB *polyfitn* funkcije dobiveni su polinomi koji opisuju ovisnost  $COP$ -a i  $EER$ -a o temperaturi okoliša i temperaturi polaza vode za visokotemperaturnu dizalicu (Jednadžba 3 i Jednadžba 5). Zatim su korištenjem polinoma izračunati  $COP$ -ovi i  $EER$ -ovi za svaki sat u godini.

### GRIJANJE

$$COP(i) = 0,00049351 \cdot X_1^2(i) - 0,0013126 \cdot X_1(i) \cdot X_2(i) - 0,10058 \cdot X_1(i) + 0,0012354 \cdot X_2^2(i) + 0,15778 \cdot X_2(i) + 6,6788 \quad (3)$$

gdje su:

$X_1(i)$  temperatura polaza vode prema ogrjevnim tijelima za sat  $i$  [ $^{\circ}C$ ]

$X_2(i)$  temperatura okoliša za sat  $i$  [ $^{\circ}C$ ]

Temperatura polaza vode prema ogrjevnim tijelima za sat  $i$  računa se ovisno o temperaturi okoliša, a prema sljedećoj regulacijskoj krivulji:

$$X_1(i) = -1,1143 \cdot X_2(i) + 51,1 \quad (4)$$

### HLADENJE

$$EER(i) = 0,0022959 \cdot X_1^2(i) - 0,0028383 \cdot X_1(i) \cdot X_2(i) + 0,13761 \cdot X_1(i) + 0,0011228 \cdot X_2^2(i) - 0,15563 \cdot X_2(i) + 6,6247 \quad (5)$$

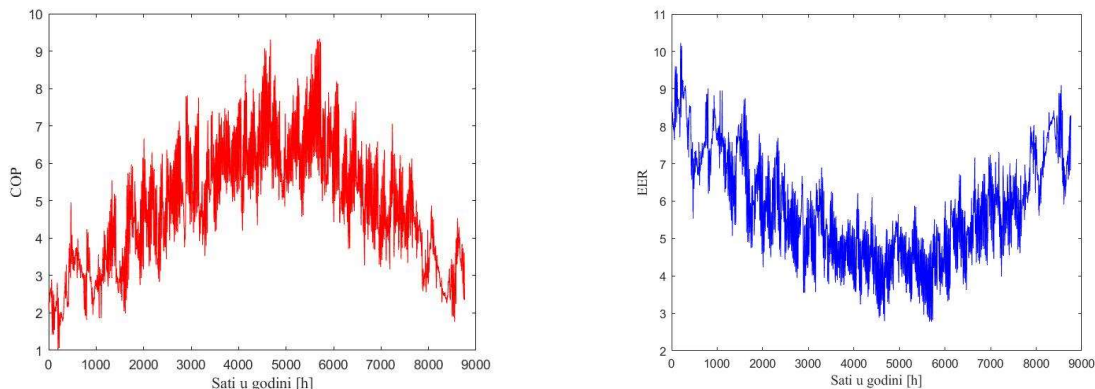
gdje su:

$X_1(i)$  temperatura polaza vode prema rashladnim tijelima za sat  $i$  [ $^{\circ}C$ ]

$X_2(i)$  temperatura okoliša za sat  $i$  [ $^{\circ}C$ ]

Temperatura polaza vode prema ogrjevnim tijelima za sat  $i$  dobivena je preko krivulje grijanja za visokotemperaturnu dizalicu topline koja opisuje kako se mijenja temperatura polaza ovisno o vanjskoj temperaturi. Temperaturni režim u hlađenju iznosi  $7/12$   $^{\circ}C$  te je kao temperatura

polaza vode prema rashladnim tijelima uzeta konstantna vrijednost od 7 °C. Za temperature vanjskog okoliša u gradu Zagrebu korišteni su podaci od Državnog hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske za tipičnu meteorološku godinu [11].



Slika 8. Vrijednosti  $COP$ -a i  $EER$ -a za svaki sat u godini

Na Slici 8 prikazane su vrijednosti  $EER$ -a i  $COP$ -a za svaki sat u godini. Dizalica topline radi učinkovitije što su veće vrijednosti  $COP$ -a. Za postizanje viših vrijednosti  $COP$ -a potrebno je osigurati da sustav radi sa što nižim temperature polaza vode kako bi se trošilo što manje električne energije potrebne za pogon kompresora. Isto kao i kod  $COP$ -a, učinkovitiji rad u režimu hlađenja karakterizira veća vrijednost  $EER$ -a. Što su niže temperature okoliša (zima, početak proljeća i kraj jeseni) to su vrijednosti  $EER$ -a veće. Isto tako, što je viša temperatura polaza vode, vrijednosti su također više jer je potrebno uložiti manje energije za pogon kompresora. Sezonska učinkovitost dizalice topline za grijanje,  $SCOP$ , iznosi 2,3, dok sezonska učinkovitost dizalice topline za hlađenje,  $SEER$ , iznosi 4,0

Investicija je prikazana u Tablici 33. Pretpostavljena je ugradnja dizalice topline istog ogrjevnog učina kao i plinski kotao (350 kW). Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

Tablica 33. Investicija Mjere TS1

|   | Investicija [€] |
|---|-----------------|
| Dizalica topline zrak-voda ogrjevnog učina 350 kW | 145 500         |

### 3.2.10. Mjera TS2: Uvođenje regulacije ogrjevnih tijela

Mjera TS2 podrazumijeva opremanje radijatora termoventilima i digitalnim termostatskim glavama te opremanje ventilokonvektora tlačno-neovisnim regulacijskim ventilima. Posljedično, unaprijeđeni sustav je hidraulički balansiran jer navedena mjera dovodi do odgovarajućeg protoka vode na ogrjevnim/rashladnim tijelima.

U mjeri su analizirani gubici predaje ogrjevnih tijela (radijatora i ventilokonvektora) za sezonu grijanja. Potonji se određuju kako bi se izračunao iznos godišnjih pogonskih troškova postojećeg i novog stanja za radijatore i ventilokonvektore, a samim time i ušteta na istima. Pri tome su u obzir uzeti različiti udjeli kapaciteta radijatora i ventilokonvektora. Sezona hlađenja nije analizirana jer se pretpostavlja da se za hlađenje (za analizu ove mjere) koriste postojeći split sustavi.

U novom stanju, nakon uvođenja lokalne regulacije radijatora i ventilokonvektora, odabrani su novi koeficijenti učinkovitosti. Pretpostavljeno je da se kod novih radijatora regulacija temperature prostora vrši P-regulatorom (1 K), da nadtemperatura iznosi 50 K, te da ventilokonvektori imaju visoku razinu regulacije. Također, uvođenjem regulacije sustav postaje hidraulički uravnotežen. Iznosi procijenjenih koeficijenata učinkovitosti radijatora i ventilokonvektora nalaze se u Tablici 34 i Tablici 35. Tablica 36 prikazuje učinkovitost sustava predaje topline prije i poslije provođenja Mjere TS2.

*Tablica 34. Procijenjeni koeficijenti učinkovitosti postojećeg i novog stanja radijatora nakon uvođenja regulacije*

| Utjecajni parametar                               | Učinkovitost      | Učinkovitost |
|---|-------------------|--------------|
|   | postojećeg stanja | novog stanja |
|   | [%]               | [%]          |
| Regulacija temperature prostora                   | 80                | 95           |
| Nad-temperatura (interpolirano)                   | 91                | 91           |
| Specifični toplinski gubici kroz vanjske površine | 95                | 95           |

Tablica 35. Procijenjeni koeficijenti učinkovitosti postojećeg i novog stanja ventilokonvektora nakon uvođenja regulacije

| Utjecajni parametar     | Učinkovitost postojećeg stanja [%] | Učinkovitost novog stanja [%] |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| Grijanje optočnog zraka | 89                                 | 93                            |

Tablica 36. Učinkovitost podsustava predaje topline postojećeg i novog stanja

| Učinkovitost postojećeg stanja [%] | Učinkovitost novog stanja [%] |
|------------------------------------|-------------------------------|
| 81                                 | 92                            |

Investicija je prikazana u Tablici 37. Investicija za regulaciju radijatora uključuje ugradnju tlačno-rasterećenog termostatskog radijatorskog ventila s mogućnošću predregulacije i ugrađeni osjetnik s potpunim zatvaranjem. Investicija za regulaciju ventilokonvektora uključuje ugradnju tlačno-neovisnog balansnog i regulacijskog ventila s pogonom. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

Tablica 37. Investicija za Mjeru TS2

|                              | Investicija [€] |
|------------------------------|-----------------|
| Regulacija radijatora        | 2 292           |
| Regulacija ventilokonvektora | 15 894          |
| $\Sigma$                     | 18 186          |

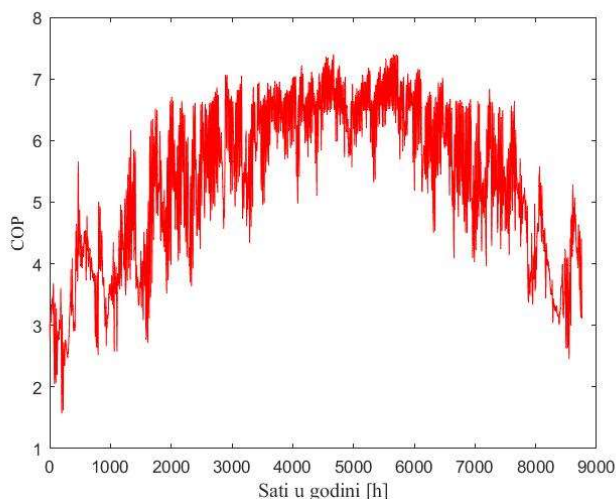
### 3.2.11. Mjera TS3: Zamjena postojećih radijatora i ventilokonvektora novim ventilokonvektorima i ugradnja dizalice topline zrak-voda kao izvora toplinske/rashladne energije

Mjera TS3 uključuje zamjenu postojećih radijatora i ventilokonvektora novim ventilokonvektorima, uz pretpostavku da se za proizvodnju toplinske i rashladne energije koristi niskotemperaturna dizalica topline zrak-voda. Naime, sustav grijanja u postojećem

stanju (plinski kotao) radi s temperaturnim režimom 80/60°C, što je karakteristika visokotemperaturnog grijanja. Korištenjem dizalice topline zrak-voda u kombinaciji s novim ventilokonvektorima kao ogrjevnim tijelima moguće je u potpunosti prijeći na niskotemperaturno grijanje, čime se povećava učinkovitost i postižu značajne energetske uštede. Specifično, uslijed niže temperature polaza vode postižu se više vrijednosti *COP*-a (Slika 9) te posljedično manja potrošnja električne energije potrebne za pogon kompresora. Pri tome Tablica 38 prikazuje broj radijatora i ventilokonvektora koje je potrebno zamijeniti.

Tablica 38. Broj radijatora i ventilokonvektora u predmetnoj zgradi

| Broj radijatora | Broj ventilokonvektora |
|-----------------|------------------------|
| 51              | 173                    |



Slika 9. Vrijednosti *COP*-a za svaki sat u promatranoj godini za niskotemperaturni režim grijanja

Spomenuta mjera modelirana je istim principom kao i Mjera TS1, korištenjem računalnog programa MATLAB. Poznavanjem podataka od proizvođača o vrijednostima *COP*-a i *EER*-a u određenim radnim točkama za niskotemperaturnu dizalicu topline izračunati su promjenjivi *COP* i *EER* za svaki sat u godini. Budući da temperatura polaza za hlađenje ostaje ista, sezonska učinkovitost dizalice topline za hlađenje, *SEER*, iznosi ranije spomenutih 4,0. Za režim grijanja vrijedi:

**GRIJANJE**

$$\text{COP}(i) = 0,00049351 \cdot X_1^2(i) - 0,0013126 \cdot X_1(i) \cdot X_2(i) - 0,10058 \cdot X_1(i) - 0,0012354 \cdot X_2^2(i) + 0,15778 \cdot X_2(i) + 6,6788$$

(6)

gdje su:

$X_1(i)$  temperatura polaza vode prema ogrjevnim tijelima za sat  $i$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$X_2(i)$  temperatura okoliša za sat  $i$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$$X_1(i) = -0.6897 \cdot X_2(i) + 37,2$$

(7)

Temperatura polaza vode prema ogrjevnim tijela za sat  $i$  dobivena je preko krivulje grijanja za niskotemperaturnu dizalicu topline koja opisuje kako se mijenja temperatura polaza ovisno o vanjskoj temperaturi. Sezonska učinkovitost dizalice topline za grijanje, SCOP, iznosi 3,1.

Investicija je prikazana u Tablici 39. Pojedinačni trošak ventilokonvektora s pripadajućim ventilom iznosi 700 €. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u travnju 2023.

*Tablica 39. Investicija za Mjeru TS3*

|  | <b>Investicija [€]</b> |
|--|------------------------|
| Cijena dizalice topline zrak-voda + montaža        | 145 500                |
| Cijena za 224 ventilokonvektora + potrebni ventili | 156 800                |
| $\Sigma$   | 302 300                |

### ***3.2.12. Mjera TS4: Uvođenje sustava centralizirane ili decentralizirane mehaničke ventilacije***

U predmetnoj zgradi ventilacija je u većoj mjeri prirodna. Sustav mehaničke ventilacije postoji u prostorima čajne kuhinje i sanitarijama, ali je izvan funkcije. Navedenom mjerom analiziran je utjecaj centraliziranog ili decentraliziranog sustava prozračivanja na potrošnju energije zgrade. Također, ovom mjerom postiže se znatno veća kvaliteta zraka u prostorijama. Nadalje, uslijed korištenja mehaničke ventilacije nije potrebno otvarati prozore, što posljedično dovodi do manje ulične buke u prostorijama te sprječava ulazak prašine i mikročestica s ulice u predmetnu zgradu.



Spomenuta mjera podrazumijeva ugradnju klimatizacijskih jedinice s povratom toplinske energije, pri čemu pretpostavljeni stupanj povrata topline iznosi 80 %. Također se predviđa ugradnja CO<sub>2</sub> osjetnika u prostorijama, a kojim se regulira potrebna količina svježeg zraka.

Mjera je modelirana korištenjem računalnog programa TRNSYS i MATLAB. Kako bi se pojednostavilo modeliranje, za postojeće stanje razdvojena je izmjena zraka uslijed infiltracije i prozračivanja te je određen protok zraka uslijed prozračivanja potreban za postizanje standarda higijene zraka u prostoru u A klasi prema važećoj normi *HRN CR 1752:2004* [12]. Tablica 40 prikazuje ulazne podatke za postojeće i novo stanje zgrade. Podaci su dobivenim korištenjem *Algoritma za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade* [7]. Prilikom izračuna  $n_{inf}$  za postojeće stanje korištena je vrijednost od 10 h<sup>-1</sup> izmjene zraka uslijed infiltracije pri nametnutoj razlici tlaka od 50 Pa. Za novo stanje također je korištena vrijednost od 10 h<sup>-1</sup> izmjene zraka uslijed infiltracije pri nametnutoj razlici tlaka od 50 Pa s obzirom na to da nije analizirana kombinacija mjera (npr. brtvljenje ovojnice). Međutim, brtvljenje ovojnice bi svakako bilo preporučljivo provesti prilikom uvođenja mehaničke ventilacije, a što bi dodatno smanjilo potrošnju energije.

Tablica 40. Ulazni podaci za analizu mjere uvođenja mehaničke ventilacije – postojeće i novo stanje zgrade

| TJEDNI<br>RASPORED         | POSTOJEĆE STANJE             |                               | NOVO STANJE                  |                               |
|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
|                            | $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ] | $n_{wind}$ [h <sup>-1</sup> ] | $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ] | $n_{vent}$ [h <sup>-1</sup> ] |
| PON – PET<br>06:00 – 20:00 | 0,4                          | 0,874                         | 0,4                          | 0,874                         |
| PON – PET<br>20:00 – 06:00 | 0,4                          | 0                             | 0,4                          | 0                             |
| SUBOTA<br>06:00 – 16:00    | 0,4                          | 0,874                         | 0,4                          | 0,874                         |
| SUBOTA<br>16:00 – 06:00    | 0,4                          | 0                             | 0,4                          | 0                             |
| NEDJELJA                   | 0,4                          | 0                             | 0,4                          | 0                             |

Za novo stanje pretpostavljeno je da se mehaničkom ventilacijom dovodi isti protok zraka kao i uslijed prozračivanja za postojeće stanje (13 700 m<sup>3</sup><sub>zraka</sub>/h). Međutim, u novom stanju

pretpostavlja se korištenje rekuperatora topline kojim se iskorištava toplina otpadnog zraka za zagrijavanje svježeg zraka te se postižu znatne energetske uštede. Temperatura zraka nakon rekuperacije izračunata je korištenjem računalnog programa MATLAB za svaki sat u godini te je zatim korištena kao ulazni parametar u računalnom programu TRNSYS za izračun potrebne energije. Isto tako, potrošnja električne energije ventilatora klimatizacijske jedinice pridodana je isporučenoj energiji za grijanje i hlađenje. Potonja je modelirana prema podacima proizvođača klimatizacijske jedinice, a kako slijedi prema Tablici 41.

*Tablica 41. Potrošnja električne energije na ventilatorima klimatizacijske jedinice*

| <b>Godišnji kapacitet klimatizacijske jedinice</b><br><b>[m<sup>3</sup> zrak/godišnje]</b> | <b>Potrošnja električne energije</b><br><b>[kWh/(m<sup>3</sup> zrak/godišnje)]</b> | <b>Potrošnja električne energije [kWh]</b> |
|--|--|--|
| 56 992 000   | 0,000714079  | 40 697                                     |

Investicija je prikazana u Tablici 42. Obujam grijanog zraka za predmetnu zgradu iznosi 15 627 m<sup>3</sup>. Ako se pretpostavi 0,874 h<sup>-1</sup> izmjena zraka dobije se kapacitet klimatizacijske jedinice od 13 700 m<sup>3</sup>/h zraka za prethodno navedeni volumen zgrade. Investicija iznosi 12 €/(m<sup>3</sup> zrak/h) što uključuje kanale, montažu i regulaciju. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u siječnju 2024.

*Tablica 42. Investicija za Mjeru TS4*

| <b>Kapacitet klimatizacijske jedinice [m<sup>3</sup> zrak/h]</b> | <b>Investicija [€/(m<sup>3</sup> zrak/h)]</b> | <b>Investicija [€]</b> |
|--|---|------------------------|
| 13 700   | 12  | 164 400                |

### **3.2.13. Mjera TS5: Uvođenje sustava automatizacije**

Uvođenje sustava automatizacije tehničkih sustava zgrade omogućuje optimizaciju rada sustava, dojava alarma u slučaju kvarova i/ili potrebe za održavanjem, praćenje potrošnje energenata i vode te mnoge druge funkcije koje omogućavaju povećanje sigurnost i pouzdanosti rada sustava te uštede energije.

Navedena mjera analizirana je pod pretpostavkom da uvođenje sustava nadzora i upravljanja rezultira prosječnom uštedom od oko 15 % na godišnjoj isporučenoj energiji za grijanje i hlađenje, a što je podatak iz brojne literature na ovu temu te iz prakse [13].

Investicija je prikazana u Tablici 43. Navedeni podatak definiran je prema cijenama na tržištu u ožujku 2024.

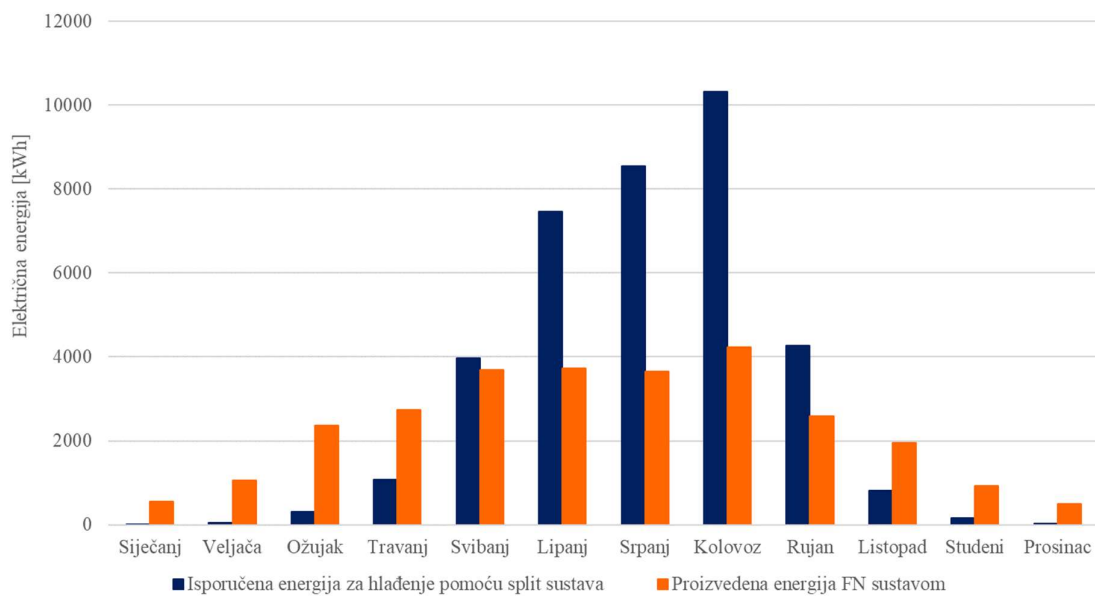
*Tablica 43. Investicija za Mjeru TS5*

| <b>Investicija [€/prostoriji]</b> | <b>Broj prostorija</b> | <b>Investicija [€]</b> |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|
| 470                               | 100                    | 47 000                 |

#### **3.2.14. Mjera TS6: Instalacija fotonaponskih panela**

Korištenjem fotonaponskih panela iskorištava se Sunčevo zračenje za proizvodnju električne energije te kao takvo predstavlja učinkovitu tehnologiju korištenja obnovljivih izvora energije. Mjera poboljšanja TS6 obuhvaća ugradnju fotonaponskih panela ukupne površine 100 m<sup>2</sup> koja odgovara raspoloživoj površini krova i učinkovitosti 20 % [14]. Za analizu su korišteni podaci o ukupnom (direktno + difuzno) Sunčevom zračenju na plohu okrenutu na jug pod kutom od 30°, na satnoj razini. Kut nagiba od 30° predstavlja optimalni nagib panela pri kojem se proizvodi najviše električne energije. Spomenuta mjera modelirana je u glavnom korisničkom sučelju TRNSYS-a, Simulation Studio-u. Najvažnija korištena komponenta je Type194, koja na temelju podataka o ozračenosti od Sunca i parametrima fotonaponskih panela izračunava proizvodnju električne energije. U ovoj mjeri pretpostavljeno je da će se instaliranim fotonaponskim panelima pokrivati potrebe split sustava za hlađenje zgrade (s obzirom na to da je to u postojećem stanju jedini potrošač električne energije sustava grijanja, hlađenja i ventilacije).

Slika 10 prikazuje usporedbu proizvodnje električne energije fotonaponskim sustavom i isporučenu energiju split sustavu za hlađenja zgrade po mjesecima. Rezultati prikazuju da je proizvodnja viša od potrošnje u zimskim mjesecima (jer nema potrebe za hlađenjem). U prijelaznim razdobljima proizvodnja se najviše približava potrošnji (svibanj i rujana).



Slika 10. Usporedba isporučene energije za hlađenje pomoću split sustava i proizvodnje električne energije fotonaponskim sustavom

Investicija je prikazana u Tablici 44. Podatak o investiciji dobiven je od tvrtke *Solvis*, hrvatskog proizvođača fotonaponskih modula [14].

Tablica 44. Investicija za Mjeru TS6

|                               | Investicija [€] |
|-------------------------------|-----------------|
| Ugradnja fotonaponskih panela | 8 800           |

### 3.2.15. Mjera TS7: Kombinacija mjera TS1 – TS6

Mjera TS7 obuhvaća provođenje svih mjera poboljšanja tehničkih sustava (za postojeću fiziku zgrade) i predstavlja idealan scenarij za energetske uštede.

Spomenuta mjera modelirana je u nekoliko koraka:

1. Plinska kotlovnica, rashladnik i split sustav zamijenjeni su dizalicom topline zrak-voda. Postojeća ogrjevna tijela, koja čine radijatori i ventilokonvektori, zamijenjeni su u potpunosti novim ventilokonvektorima čime se prelazi s visokotemperaturnog na niskotemperaturni režim grijanja. Navedeno odgovara opisanoj Mjeri TS3: Zamjena

postojećih radijatora i ventilokonvektora novim ventilokonvektorima uz dizalicu topline zrak-voda kao generator topline.

2. Za novo stanje, odnosno dizalicu topline zrak-voda te reguliranim ventilokonvektorima kao ogrjevnim/rashladnim tijelima, uveden je sustav mehaničke ventilacije. Postupak je identičan kao u ranije spomenutoj Mjeri TS4: Uvođenje sustava centralizirane ili decentralizirane mehaničke ventilacije te su za modeliranje korišteni računalni programi TRNSYS i MATLAB.
3. Energija proizvedena fotonaponskim panelima oduzeta je od isporučene energije dizalici topline za potrebe grijanja i hlađenja zgrade po mjesecima (za novo stanje zgrade nakon koraka 3).
4. Također je predviđeno da se za novo stanje uvodi sustav automatizacije.

Investicija za kombinaciju mjera prikazana je u Tablici 45.

*Tablica 45. Investicija za Mjeru TS7*

|  | <b>Investicija [€]</b> |
|--|------------------------|
| Zamjena postojećih radijatora i ventilokonvektora novim ventilokonvektorima uz dizalicu topline zrak-voda kao izvor toplinske/rashladne energije | 302 300                |
| Uvođenje sustava centralizirane ili decentralizirane mehaničke ventilacije   | 164 400                |
| Instalacija fotonaponskih panela   | 8 800                  |
| Uvođenje sustava automatizacije  | 4 700                  |
| $\Sigma$   | 480 200                |

### 3.3. *Ulazni podaci za izračun jednostavnog perioda povrata investicije*

Kako bi se odlučilo koja od spomenutih mjera je, ne samo energetska, već i ekonomski isplativa, potrebno je napraviti analizu na temelju isporučene energije koja se plaća. Kao što je već ranije spomenuto, isporučena energija jednaka je zbroju potrebne energije i ukupnih gubitaka sustava umanjnih za iskorištene gubitke. Ukupne gubitke sustava čine gubici podsustava predaje, gubici podsustava razvoda te gubici podsustava proizvodnje. Isporučena energija je osnova za analize isplativosti pojedine mjere poboljšanja. U Tablici 46 prikazani su najvažniji podaci za izračun isporučene energije za grijanje i hlađenje predmetne zgrade. Iskristivost plinskog kotla i razvoda uzeti su prema Tablici 13. Cijena plina i električne energije odgovara cjeniku sa stranice HEP-a za datum pristupa istoj [16, 17].

*Tablica 46. Cijene energenata*

| <b>GRIJANJE</b>            |            |
|----------------------------|------------|
| Cijena plina               | 0,15 €/kWh |
| <b>HLADENJE</b>            |            |
| Cijena električne energije | 0,36 €/kWh |

Jednostavni period povrata, iako najjednostavniji kriterij ekonomskog odlučivanja o ulaganjima (ne uzima u obzir vremensku vrijednost novca, amortizaciju...), primjeren je pokazatelj isplativosti mjera poboljšanja energetske učinkovitosti. Jednostavni period povrata računat je kao:

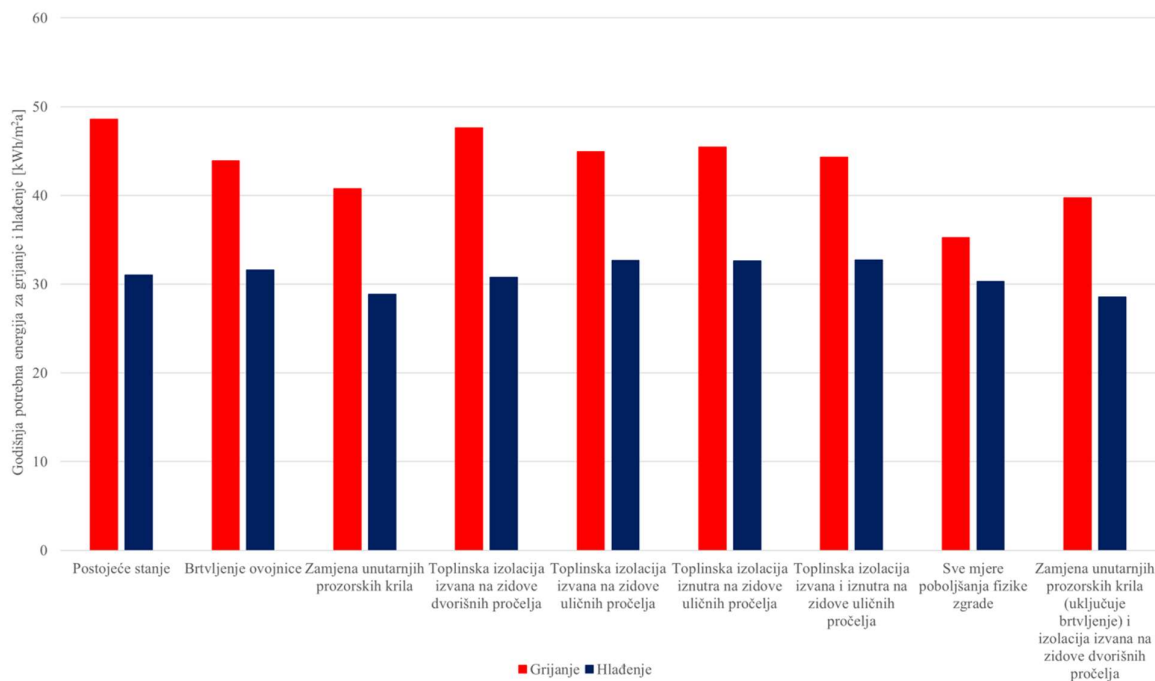
$$JPP = \frac{\text{Cijena investicija [€]}}{\text{Ušteda u isporučenoj energiji [€/a]}} \quad (8)$$

## 4. Rezultati

U nastavku su zasebno prikazani rezultati mjera poboljšanja fizike zgrade i mjera poboljšanja tehničkih sustava. Za obje grupe mjera prikazane su godišnje energetske uštede, investicija te jednostavni period povrata investicije. Za mjere poboljšanja fizike zgrade pretpostavljeno je da zgrada koristi postojeći sustav grijanja, hlađenja i ventilacije, odnosno da nisu provedene mjere poboljšanja tehničkih sustava. Sukladno tome, mjere poboljšanja tehničkih sustava analizirane su uz pretpostavku da zgrada ima postojeće stanje fizike zgrade.

### 4.1. Mjere poboljšanja fizike zgrade

Slika 11 prikazuje godišnju potrebnu energiju za grijanje i hlađenje za postojeće stanje i za pojedinu mjeru poboljšanja fizike zgrade svedeno na  $m^2$  korisne površine. Za postojeću fiziku zgrade godišnja potrebna energija za grijanje iznosi  $49 \text{ kWh}/m^2$ , a za hlađenje  $31 \text{ kWh}/m^2$ .



Slika 11. Usporedba godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje za postojeće stanje i za pojedinu mjeru poboljšanja fizike zgrade

Mjerom FZ1, brtvljenje vanjske ovojnice zgrade, godišnja potrebna energija za grijanje je 10 % niža, dok je godišnja potrebna energija za hlađenje oko 2 % viša u usporedbi s postojećim stanjem. Uzrok porasta energije za hlađenje jest smanjenje efekta pasivnog hlađenja koje se ostvaruje dotokom hladnijeg vanjskog zraka u prijelaznim mjesecima (proljeće i jesen). Drugim riječima, zbog smanjenja U-vrijednosti vanjskih zidova, smanjuje se predaja topline iz zgrade prema okolišu kada su vanjske temperature niže od unutarnjih (primjerice noću), a što u režimu hlađenja ima za posljedicu povećanje potrebne energije za hlađenje.

Nakon provođenja Mjere FZ2, zamjene unutarnjih prozorskih krila, dolazi do smanjenja godišnje potrebne energije za grijanje za 16 % i godišnje potrebne energije za hlađenje za 7 %.

Mjera FZ3, dodavanje mineralne vune debljine 12 cm na zidove s dvorišne strane, uzrokuje neznatno smanjenje godišnje potrebne energije za grijanje za 2 % i godišnje potrebne energije za hlađenje za oko 1 %. Razlog tome je što na predmetnoj zgradi trenutačno postoji izolacija na vanjskim zidovima s dvorišne strane u vidu stiropora debljine 6 cm.

Mjerom FZ4, povećanje debljine toplinske izolacije za 5 cm na zidovima uličnih pročelja s vanjske strane, godišnja potrebna energija za grijanje smanjuje se za 8 %. Godišnja potrebna energija za hlađenje u porastu je za 5 % u odnosu na postojeće stanje. Rezultati pokazuju da dolazi do smanjenja godišnje potrebne energije za grijanje, te je postotak veći što je deblja izolacija (do graničnog slučaja). Godišnja potrebna energija za hlađenje je u laganom porastu zbog smanjenje efekta pasivnog hlađenja (kao i kod Mjere FZ1).

Provođenjem Mjere FZ5, dodavanje toplinske izolacije debljine 3 cm na zidove uličnih pročelja s unutarnje strane, godišnja potrebna energija za grijanje smanjuje se za 6 % u odnosu na postojeće stanje. Uslijed smanjenja efekta pasivnog hlađenja, kao i u mjeri dodavanja izolacije izvana, dolazi do povećanja godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje za 5 %. Usporedbom rezultata sa Slike 11 vidljivo je da rezultati potvrđuju energetske učinkovitost korištenja izolacije izvana na vanjskim zidovima u odnosu na izolaciju iznutra. Međutim, uzevši u obzir činjenicu da razlike u rezultatima nisu velike te da dodavanje vanjske izolacije može znatno narušiti estetiku zgrade i biti znatno skuplje (a u mnogim slučajevima i neprihvatljivo) smisljeno je spomenutu mjeru primijeniti kao alternativu izolaciji izvana.

Kombinacijom izolacije izvana i iznutra na zidovima uličnih pročelja (Mjera FZ6) dolazi do smanjenja godišnje potrebne energije za grijanje za 9 % i povećanja godišnje potrebne energije za hlađenje za 5 %. Zanimljivo je uočiti kako kombinacijom dodavanja toplinske

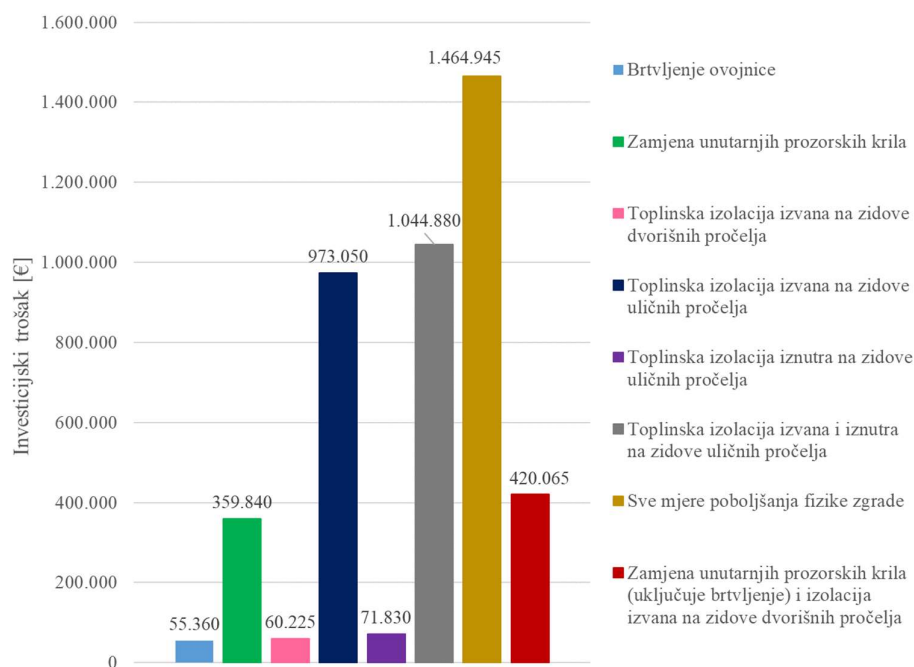


izolacije iznutra i izvana na vanjske zidove uličnih pročelja ne dolazi do značajnijih ušteda u usporedbi s dodavanjem toplinske izolacije samo izvana.

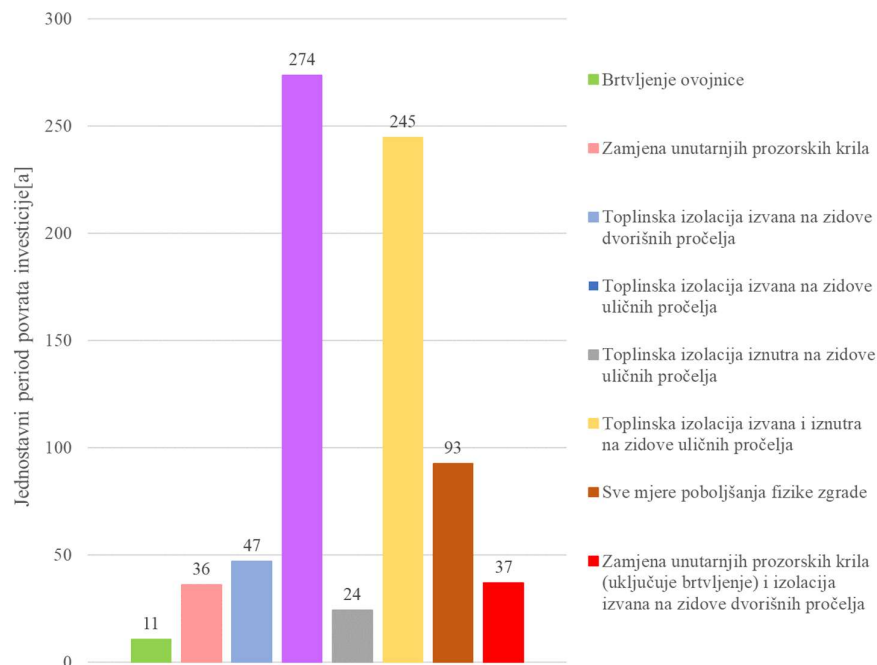
U slučaju provođenja svih mjera poboljšanja fizike zgrade (Mjera FZ7) godišnja potrebna energija za grijanje iznosi 27 % manje u usporedbi s postojećim stanjem. Smanjenje potrebne energije za hlađenje iznosi svega 2 %.

Mjera FZ8, zamjena unutarnjih prozorskih krila koja uključuje brtvljenje vanjske ovojnice zgrade i toplinska izolaciju na zidovima dvorišnih pročelja, dovodi do značajnijeg smanjenja godišnje potrebne energije za hlađenje. S obzirom na postojeće stanje, godišnja potrebna energija za grijanje smanjila se za 18 % dok se godišnja potrebna energija za hlađenje smanjila za oko 8 %.

U nastavku su prikazani investicija (Slika 12) i jednostavni period povrata investicije (Slika 13) pojedine mjere poboljšanja fizike zgrade.



Slika 12. Procjena investicije za mjere poboljšanja fizike zgrade

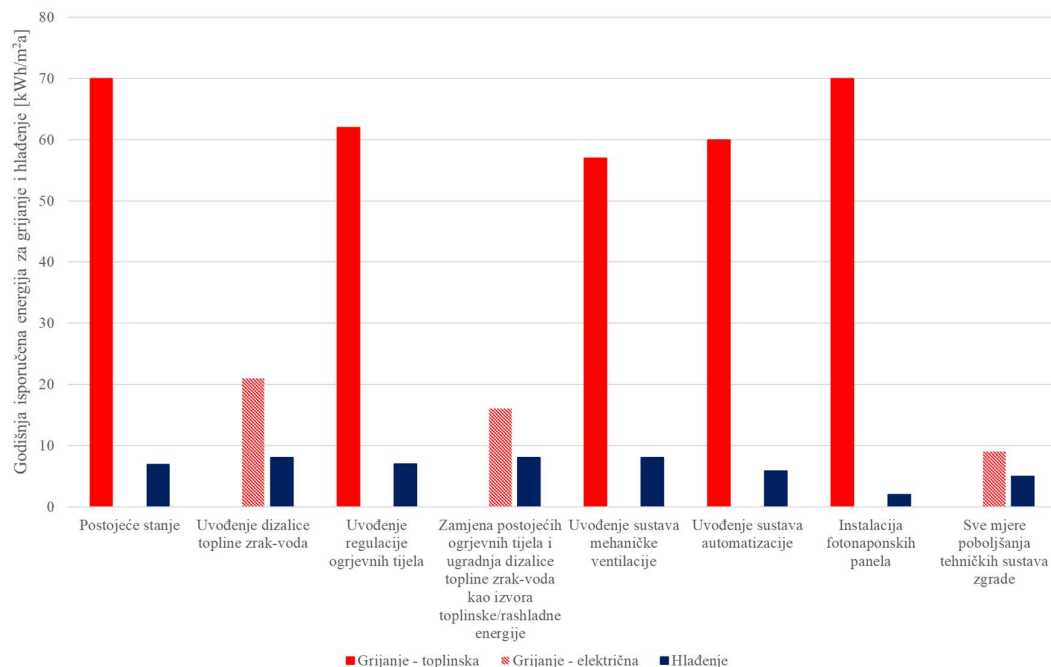


Slika 13. Procjena perioda povrata investicije za sve mjere poboljšanja fizike zgrade

Rezultati pokazuju da kod mjera poboljšanja fizike zgrade ne dolazi do značajne energetske uštede dok su investicijski troškovi relativno visoki, što posljedično dovodi do dugog perioda povrata investicije. Razlog tome je što je predmetna zgrada početkom 2000. godine rekonstruirana i obnovljena, pri čemu su krovište i dvorišni zidovi izolirani. Usprkos tome, analiza navedenih mjera je korisna budući da većina zgrada pod konzervatorskom zaštitom u Donjem Gradu nije prošla nikakav oblik rekonstrukcije i/ili obnove dugi niz godina.

#### 4.2. Mjere poboljšanja tehničkih sustava zgrade

Slika 14 prikazuje godišnju isporučenu energiju za grijanje i hlađenje za postojeće stanje i za pojedinu mjeru poboljšanja tehničkih sustava zgrade svedeno na  $\text{m}^2$  korisne površine. Za postojeću stanje zgrade godišnja isporučena energija (plin) za grijanje iznosi  $70 \text{ kWh/m}^2$ , a za hlađenje (električna)  $7 \text{ kWh/m}^2$ .



Slika 14. Usporedba godišnje isporučene energije za grijanje i hlađenje zgrade za postojeće stanje i za pojedinu mjeru poboljšanja tehničkih sustava

Iz Slike 14 uočljivo je da se instalacijom dizalice topline zrak-voda umjesto plinskog kotla, rashladnika vode i split sustava postiže značajno smanjenje potrošnje isporučene energije za grijanje. Dolazi do smanjenja godišnje isporučene toplinske energije za grijanje sa  $70 \text{ kWh/m}^2$  na godišnju isporučenu električnu energiju za grijanje od  $21 \text{ kWh/m}^2$ . Dodatno, za razliku od plinskog kotla, dizalicom topline iskorištava se energija iz obnovljivih izvora te se postiže veća razina održivosti. Suprotno tome, dolazi do povećanja u godišnjoj isporučenoj energiji za hlađenje za oko 16 %. Potonje se može objasniti činjenicom da je za postojeće stanje pri izračunu godišnje isporučene energije za hlađenje pretpostavljena konstantna i visoka vrijednost  $EER$ -a, dok se za Mjeru TS1 izračunava vrijednost  $EER$ -a za svaki sat u godini što je dalo preciznije i nešto više rezultate na isporučenoj energiji za hlađenje. Dodatno, sustavi s

direktnom ekspanzijom rade učinkovitije jer ne postoji dodatni izmjenjivač topline što dovodi do povoljnijih temperaturnih uvjeta na unutarnjoj jedinici.

Regulacijom postojećih ogrjevnih tijela bez ugradnje dizalice topline zrak-voda dolazi do smanjenja godišnje isporučene toplinske energije za grijanje u iznosu od 11 %, dok godišnja isporučena električna energija za hlađenje ostaje ista zbog uvedene pretpostavke (vidi više u poglavlju 3.2.10.).

Dodatno smanjenje isporučene energije za grijanje postiže se zamjenom postojećih ogrjevnih tijela ventilokonvektorima uz dizalicu topline zrak-voda kao izvor topline. Prelaskom s visokotemperaturnog na niskotemperaturni režim grijanja postižu se značajna smanjenja gubitaka topline kao i energetske uštede. Godišnja isporučena električna energija za novo stanje iznosi 16 kWh/m<sup>2</sup>.

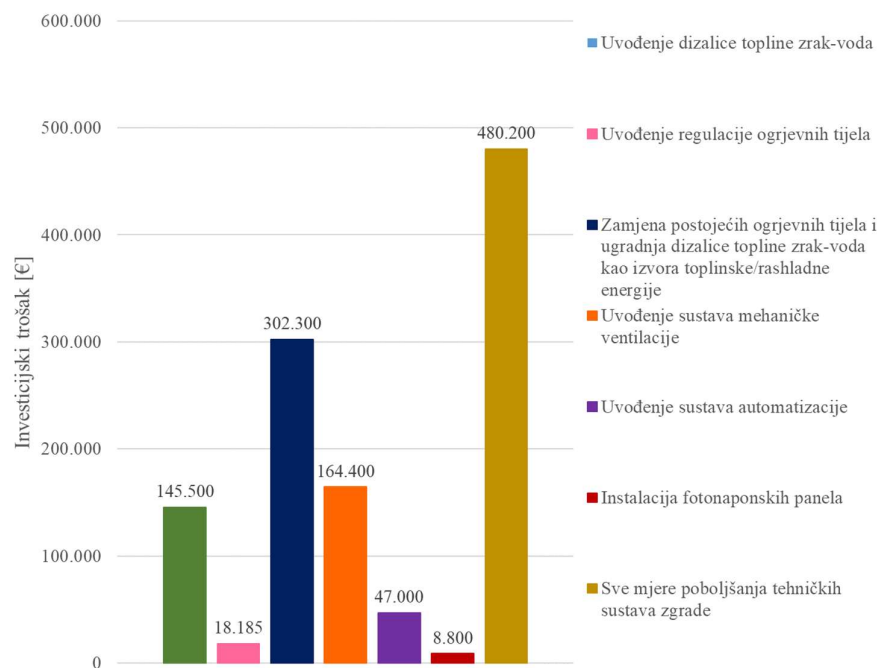
Mjerom TS4, uvođenjem sustava mehaničke ventilacije dolazi do smanjenja godišnje isporučene toplinske energije za grijanje, za 19 %. Doduše, dolazi do porasta godišnje isporučene energije za hlađenje u iznosu od 16 % zbog povećane potrebe za pripremom vanjskog zraka na unutrašnje uvjete. Dodatno povećanje potrošnje isporučene električne energije predstavlja rad ventilatora koji iznosi 8 kWh/m<sup>2</sup>a. Međutim, velika prednost mehaničke ventilacije je učinkovita i kontrolirana dobava vanjskog zraka, a što značajno dovodi do poboljšanja mikroklimatskih uvjeta u prostoru, odnosno, do povećanja ugodnosti boravka u prostorijama.

Mjerom uvođenja sustava automatizacije za postojeće stanje postiže se smanjenje godišnje isporučene energije za grijanje i hlađenje za 15 %, kako je i pretpostavljeno pri analizi same mjere.

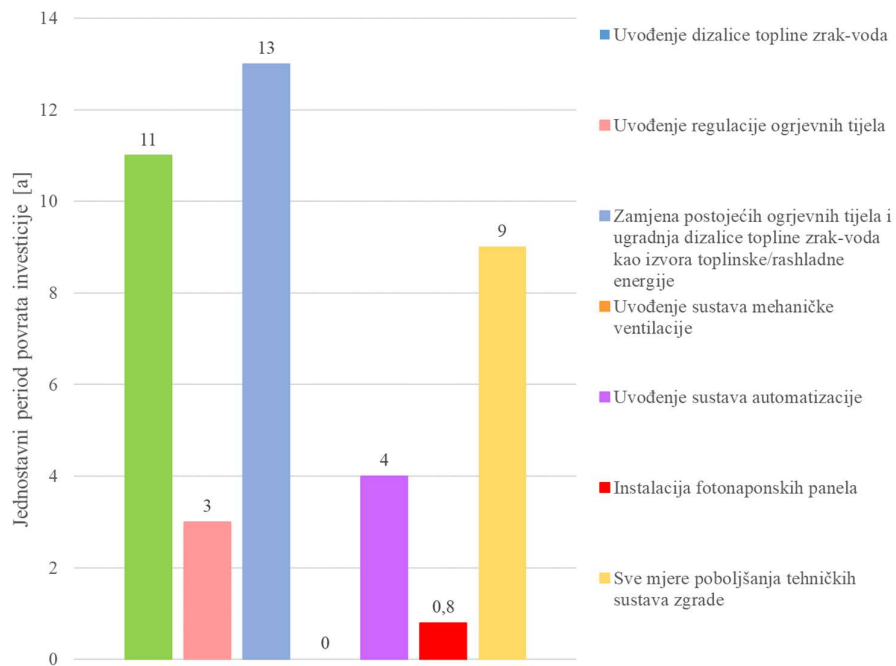
Instalacijom fotonaponskih panela godišnja isporučena toplinska energije za grijanje ostaje ista dok se godišnja isporučena električna energija za hlađenje smanjuje za 71 %, sa 8 kWh/m<sup>2</sup>a na 2 kWh/m<sup>2</sup>a.

Optimalni slučaj predstavlja kombinacija svih mjera poboljšanja tehničkih sustava pri čemu dolazi do najvećih ušteda. Godišnja isporučena električna energije za grijanje tako iznosi 9 kWh/m<sup>2</sup>a, dok za hlađenje iznosi 5 kWh/m<sup>2</sup>a. Dodatnu potrošnju predstavlja električna energija potrebna za rad ventilatora klimatizacijske jedinice koja na godišnjoj razini iznosi 8 kWh/m<sup>2</sup>a.

U nastavku su prikazani investiciju (Slika 15) i jednostavni period povrata investicije (Slika 16) pojedine mjere poboljšanja tehničkih sustava zgrade.



Slika 15. Procjena investicije za mjere poboljšanja tehničkih sustava zgrade



Slika 16. Procjena perioda povrata investicije za sve mjere poboljšanja tehničkih sustava zgrade

Period povrata investicije za mjeru zamjene plinskog kotla, rashladnika vode i split sustava dizalicom topline iznosi 11 godina. Iako je praksa investitora da prihvaćaju one mjere koje će dovesti do povrata izvornog ulaganja za najviše 5 godina, mnogo je opravdanih razloga za realizaciju ugradnje dizalice topline zrak-voda. Zamjenom plinskog kotla dizalicom topline prelazi se na obnovljiv izvor energije čije se korištenje potiče i sufinancira europskim fondovima. Također, u radu je pretpostavljeno da se plinski kotao zamjenjuje dizalicom topline istog toplinskog učinka što se praksi ne provodi, već bi se kapacitet dizalice topline smanjio, a prema stvarnim potrebama zgrade. Konačno, dizalica topline je pouzdana i tehnologija koja ne zahtijeva visoke troškove održavanja.

Jednostavni period povrata investicije za uvođenje regulacije ogrjevnih tijela iznosi 3 godine. Uvođenjem lokalne regulacije postiže se smanjenje toplinskih gubitaka, smanjuju se potrošnja energije i emisije CO<sub>2</sub>, a uredskim prostorima i hodnicima omogućuje se ujednačeno grijanje i hlađenje. Nadalje, postiže se hidraulička ravnoteža cjelokupnog sustava.

Dizalica topline zrak-voda u kombinaciji sa zamjenom postojećih ogrjevnih tijela (radijatora i ventilokonvektora) novim ventilokonvektorima donosi prednosti spomenute za Mjeru TS1. Dodatno se omogućuje niskotemperaturno grijanje, a što dovodi do dodatne uštede energije. Iako je jednostavni period povrata investicije relativno dugačak (13 godina), sa stajališta energetske učinkovitosti i pozitivnog utjecaja na ugodnost boravka ljudi u prostorijama, ova mjera se preporučuje kao opravdana.

Jednostavni period povrata investicije za ugradnju sustava mehaničke ventilacije nije izračunat. Naime, ukupni pogonski troškovi za ovu mjeru su veći u odnosu na postojeće stanje (za 5 686 EUR/a), a uslijed povećane potrošnje energije za pripremu i dobavu vanjskog zraka. Usprkos tome, prednost je mehaničke ventilacije kontrolirana dobava filtriranog, vanjskog zraka, što dovodi do znatnog poboljšanja mikroklimatskih uvjeta u prostoru.

Uvođenjem sustava automatizacije postižu se niži pogonski troškovi grijanja/hlađenja te troškovi održavanja. Budući da je sustav opremljen sensorima, to omogućava prediktivno upravljanje na temelju podataka koji se prikupljaju. Navedeno dovodi do povećanja ugodnosti u prostorijama boravka, a samim time i povećane produktivnosti. Uvođenje sustava automatizacije za postojeće stanje zgrade prihvatljivo je promatrati kao moguću mjeru zbog relativno niskog jednostavnog perioda povrata investicije od 4 godina. Ipak, uz provedbu ove mjere u praksi je svakako nužno uvođenje i primjerene regulacije ogrjevno-rashladnih tijela (Mjera TS2).

Najkraći period povrata investicije iznosi za instalaciju fotonaponskih panela. Međutim, s obzirom na rezultate prikazane na Slici 11 (vidi poglavlje 3.2.14.), u trenucima najveće potrebe za električnom energijom za hlađenje (ljetni mjeseci) potencijal za proizvodnjom električne energije nije dostatan, a zbog nedovoljne raspoloživosti krovnih površina primjerenih za instalaciju panela.

Najveća razina ugodnosti u zgradi i najveće energetske uštede postižu se kombinacijom svih mjera poboljšanja tehničkih sustava zgrade. Primjenom suvremenih tehnologija (dizalice topline i fotonaponski paneli), tehnologija koje omogućavaju visoku razinu ugodnosti (sustav mehaničke ventilacije) te pametnih tehnologija (sustav automatizacije) postižu se značajne energetske uštede, smanjenje emisija ugljikovog dioksida te povećava ugodnost boravka u prostorima predmetne zgrade. Jednostavni period povrata investicije od 9 godina čini se prihvatljivim s obzirom na prednosti koje donosi kombinacija svih analiziranih mjera poboljšanja tehničkih sustava zgrade.

## 5. Rasprava i zaključak

Kao što je spomenuto u uvodnom poglavlju, za većinu zgrada pod zaštitom kulturnog dobra ne postoje jasno definirane smjernice o energetskej obnovi. Upravo zbog toga, kao i mnogih konzervatorskih ograničenja, većina zgrada ne uđe u proces energetske obnove, čime se postavlja pitanje energetske učinkovitosti istih, ugodnosti i sigurnosti korisnika zgrada kulturnog dobra te u konačnici pitanje zaštite i očuvanja kulturne baštine.

Mjere energetske obnove analizirane su za zgradu Ministarstva kulture i medija Republike Hrvatske u Zagrebu kao predstavnicu brojnih sličnih zgrada pod statusom kulturnog dobra u Donjem Gradu. Cilj mjera energetske obnove je definirati konkretne smjernice za energetske obnovu zgrada, olakšati i ubrzati proces izrade projekta energetske obnove te kvantificirati utjecaj pojedinih mjera poboljšanja na energetske uštedu u slučaju njihovog neprovođenja.

Za predmetnu zgradu izračunata je godišnja potrebna energija za grijanje ( $49 \text{ kWh/m}^2$ ) i hlađenje ( $31 \text{ kWh/m}^2$ ) te su analizirane mjere poboljšanja fizike zgrade i tehničkih sustava zgrade.

Analizirane mjere poboljšanja fizike zgrade obuhvaćaju brtvljenje vanjske ovojnice zgrade, zamjenu unutarnjih prozorskih krila, neki od mogućih načina toplinske izolacije zgrade (na vanjskoj ili unutarnjoj strani fasade) te kombinaciju spomenutih mjera. Usporedbom koeficijenta prolaza topline za građevne elemente zgrade s dopuštenim vrijednostima prema *Tehničkom propisu* zaključilo se da postoji potencijal za energetske uštedom primjenom spomenutih mjera. Način modeliranja pojedine mjere objašnjen je u Poglavlju 3. Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da unatoč postignutim energetske uštedama, većina mjera obnove fizike zgrade nije financijske opravdana (visoki investicijske troškovi i periodi povrata investicije), osim u slučaju subvencioniranja istih. Tako naprimjer najbrži period povrata investicije iznosi 11 godina (brtvljenje vanjske ovojnice zgrade) dok najduži 274 godine (toplinske izolacije izvana na zidove uličnih pročelja). Period povrata investicije za najrealističniju mjeru, Mjeru FZ8, iznosi 37 godina. Ipak, vrijedi spomenuti specifičnost ove zgrade. Na predmetnoj zgradi trenutno postoji izolacija u vidu izolacije krovišta (kamena vuna) i dvorišnih zidova (stiropor) što nije slučaj za većinu zgrada kulturnog dobra Donjeg Grada. Stoga je preporuka svakoj zgradi pristupiti individualno te detaljno analizirati spomenute mjere poboljšanja fizike zgrade.



Analizirane mjere poboljšanja tehničkih sustava obuhvaćaju mjere koje poboljšavaju performanse tehničkih sustava (automatizacija, uvođenje regulacije, zamjena postojećih ogrjevnih tijela), mjere primjene suvremene tehnologije (uvođenje dizalice topline zrak-voda i instalacija fotonaponskih panela) te mjere kojima se postiže znatno veća kvaliteta zraka u prostoru (mehanička ventilacija). Na temelju rezultata provedenih analiza može se zaključiti da svaka pojedina mjera dovodi do značajnih energetske ušteda na godišnjoj isporučenoj energiji za grijanje i hlađenje (iznimka je mjera uvođenja mehaničke ventilacije). Najveće energetske uštede s relativno brzim povratom investicije odnose se na mjeru uvođenja regulacije ogrjevnih tijela (3 godine), uvođenje sustava automatizacije (4 godine) te instalaciju fotonaponskih panela (8 mjeseci). Optimalni scenarij energetske obnove obuhvaća kombinaciju svih mjera, čime se postižu znatne uštede (prvenstveno smanjenje godišnje isporučene energije za grijanje sa 70 kWh/m<sup>2</sup>a toplinske energije na 9 kWh/m<sup>2</sup>a električne energije) te brojne druge prednosti. Iako se sa stajališta investitora period povrata investicije od 9 godina može doimati relativno dugačak, mnogo je prednosti ovog scenarija. Primjerice, zamjenom plinskog kotla s dizalicom topline osigurava se prelazak na obnovljivi izvor energije te tehnologiju koju je jednostavnije održavati. Također je preporučljivo mjeru ugradnje dizalicu topline kombinirati s instalacijom fotonaponskih panela koji imaju vrlo nizak period povrata investicije. Na taj se način ukupni trošak grijanja i hlađenja zgrade smanjuje (efekt ovisi o raspoloživoj površini krova). Konačno, uslijed uvođenja sustava automatizacije i mehaničke ventilacije znatno se povećava razina ugodnosti za korisnike u prostoru.

Na kraju, važno je spomenuti održivost sustava te oporezivanje energije, a koje potiče upotrebu energenata koji imaju manje štetan utjecaj na okoliš. Naime, emisija CO<sub>2</sub> upotrebljava se kao kriterij zagađenja okoliša, a jedinična cijena CO<sub>2</sub> parametrom oporezivanja emisija. Cilj je europskog zelenog plana uskladiti oporezivanje s ciljevima za postizanje europske klimatske neutralnosti. Stoga su emisije CO<sub>2</sub> za grijanje i hlađenje za postojeću zgradu izračunate prema [19] i iznose 98 057 kg/godišnje. Mjerama poboljšanja fizike zgrade može se postići smanjenje emisija od 15 % u slučaju individualne mjere (zamjene prozorskih krila), 17 % za scenarij s kombinacijom zamjene prozorskih krila i izolacijom izvana na zidovima dvorišnih pročelja te 25 % kombinacijom svih mjera poboljšanja fizike zgrade. Za mjere poboljšanja tehničkih sustava najveće smanjenje emisija CO<sub>2</sub> postiže se kombinacijom svih mjera poboljšanja tehničkih sustava (74 %). Od pojedinačnih mjera, najveće smanjenje postiže se ugradnjom dizalice topline zrak-voda te iznosi 55 %.

## ZAHVALE

Zahvaljujem se mentorici, izv. prof. dr.sc. Tei Žakuli na ukazanom povjerenju i pomoći prilikom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem prekrasnom timu ljudi iz Laboratorija za energetske učinkovitost koji su uvijek bili dostupni za sva moja pitanja, a osobito mlađem istraživaču Nikoli Bađunu.

Veliko hvala stručnjacima: Miljenku Kukiću, dipl.ing.arh., izv.prof.dr.sc. Bojanu Milovanoviću, dipl.ing.grad. te Silvanu Sušiloviću, dipl.ing.stroj., na korisnim savjetima, primjerima iz prakse i angažiranosti prilikom izrade ovog rada.

## POPIS LITERATURE

- [1] Narodne novine (2021.), Program energetske obnove zgrada koje imaju status kulturnog dobra za razdoblje do 2030. godine. Zagreb: Narodne novine d.d., NN 143/2021.
- [2] Narodne novine (2023.), Zakon o zaštiti i očuvanju kulturnih dobara. Zagreb: Narodne novine d.d., NN 152/14, 44/17, 62/20.
- [3] Narodne novine (2020.), Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama. Zagreb: Narodne novine d.d., NN 102/2020.
- [4] Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine (2015.), Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama: Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode, Zagreb.
- [5] HRN EN ISO 52016-1:2017, Energijska svojstva zgrada; Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarnje temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja; 1. dio: Postupci proračuna
- [6] biro 29 d.o.o, Izvještaj o provedenom energetsom pregledu – Ministarstvo kulture RH, zgrada središnjice, Runjaninova 2, Zagreb, 2013.
- [7] Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine (2017.), Algoritam za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade, Zagreb.
- [8] Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine (2017.), Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Zagreb.
- [9] PVC stolarija INOPREM. *Izo staklo*. Preuzeto 20.studenog 2023. s <https://www.inoprem.hr/pvc-stolarija-inoprem-pocetna/pvc-prozori/izo-staklo-dvoslojno-i-troslojno/>
- [10] Soldo, V.; predavanja iz kolegija *Projektiranje rashladnih sustava*, Zagreb, 2022.
- [11] Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine (2016.), Meteorološki podaci, Zagreb.
- [12] Ventilacija u zgradama, Projektni kriteriji za unutrašnjost (CR 1752:1998)
- [13] Alabama Department of Economic and Community Affairs, *TOP Energy Saving Tips*. Preuzeto 20.studenog 2023. s <https://adeca.alabama.gov/wp-content/uploads/TopEnergy-SavingTips.pdf>
- [14] SOLVIS d.o.o., „Cjenik fotonaponskih panela“. Preuzeto 11.siječnja 2023. s <https://solvis.hr/en/>
- [15] Balen, I.; predavanja iz kolegija *Grijanje*, Zagreb, 2022.
- [16] Hrvatska elektroprivreda (HEP), „Cjenik plina za kupce kategorije kućanstvo“. Preuzeto 14.travnja 2023. s <https://www.hep.hr/plin/>

[17] Hrvatska elektroprivreda (HEP), „Cjenik električne energije za kupce kategorije kućanstvo“. Preuzeto 14.travnja 2023. s <https://www.hep.hr/ods/>

[18] Jakšić, D. (2022). *Energetska obnova zgrade je investicija u (dugoročno) smanjenje troškova za energiju*. Preuzeto 14.travnja 2023. s <https://www.zgradonacelnik.hr/jip-javno-i-poslovno/energetska-obnova-zgrade-je-investicija-u-dugorocno-smanjenje-troskova-za-energiju/618/>

[19] Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine (2017.), Algoritam za izračun energetske svojstava zgrada: Faktori primarne energije i emisija CO<sub>2</sub>

## SAŽETAK

**Autor:** Petra Rožman

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

Potres koji je zadesio Zagreb 2020. godine doveo je do oštećenja mnogih zgrada, među kojima su zgrade kulturnog dobra te zgrade koje su dio zaštićene kulturno-povijesne cjeline grada. Ubrzo nakon potresa započela je diskusija o obnovi zgrada oštećenih potresom kao i donošenje mnogih zakona i pravila. Najveći izazovi uočeni su prilikom energetske obnove zgrada koje imaju status kulturnog dobra, velikim dijelom i zbog nedovoljne definiranosti smjernica te brojnih zahtjeva i konzervatorskih ograničenja koja se pojavljuju pri obnovi kulturne baštine. Navedeno dovodi do toga da mnogobrojne zgrade ne prođu kroz proces obnove, što dovodi do smanjenja kvalitete boravka i ugodnosti u prostorima zgrade, energetske neučinkovitosti, potencijalnog urušavanja, a u konačnici i smanjenja ukupne vrijednosti zgrade.

Ovim radom analizirano je 8 mjera poboljšanja fizike zgrade i 7 mjera poboljšanja tehničkih sustava zgrade kako bi se definirale smjernice za energetske obnovu zgrada koje imaju status kulturnog dobra, olakšao i ubrzao proces izrade projekta energetske obnove te kvantificirao utjecaj pojedinih mjera poboljšanja na energetske uštede u slučaju njihovog neprovođenja. Za predmetnu zgradu uzeta je zgrada Ministarstva kulture i medija Republike Hrvatske u Zagrebu kao predstavnik brojnih sličnih zgrada u Donjem Gradu, a koje su oštećene potresom.

Kao prvi korak analize simulirana je potrebna energija za grijanje i hlađenje korištenjem dinamičkih računalnih simulacija u računalnom programu TRNSYS. Za postojeće stanje potrebna energija za grijanje iznosi 49 kWh/m<sup>2</sup>a, što je znatno više od maksimalno dopuštenih 23 kWh/m<sup>2</sup>a prilikom rekonstrukcije (definirano *Tehničkim propisom*). Potrebna energija za hlađenje iznosi 31 kWh/m<sup>2</sup>a. Kako bi se zaključilo koja od analiziranih mjera je energetski i ekonomski isplativa, bilo je potrebno iz potrebne energije izračunati isporučenu energiju, a za što je korišten algoritam razvijen u računalnom programu MATLAB. Za predmetnu zgradu i postojeći tehnički sustav isporučena toplinska energija za grijanje iznosi 70 kWh/m<sup>2</sup>a dok isporučena električna energija za hlađenje iznosi 7 kWh/m<sup>2</sup>a.

Mjerama poboljšanja fizike zgrade analizirano je na koji način zahvati na vanjskoj ovojnici zgrade utječu na smanjenje potrebne i isporučene energije za grijanje i hlađenje. Analizirane mjere uključivale su:

- 1) Brtvljenje vanjske ovojnice zgrade
- 2) Zamjenu unutarnjih prozorskih krila
- 3) Dodavanje toplinske izolacije izvana na vanjske zidove s dvorišne strane
- 4) Dodavanje toplinske izolacije izvana na vanjske zidove uličnih pročelja
- 5) Dodavanje toplinske izolacije iznutra na vanjske zidove uličnih pročelja
- 6) Dodavanje toplinske izolacije iznutra i izvana na vanjske zidove uličnih pročelja
- 7) Kombinaciju svih spomenutih mjera
- 8) Kombinaciju mjera brtvljenja ovojnice, zamjene unutarnjih prozorskih krila i toplinske izolacije izvana na vanjske zidove s dvorišne strane.

Zaključeno je da usprkos postignutim energetske uštedama (koje za pojedinu mjeru iznose do 25 %) je period povrata investicije visok te iznosi od 11 (brtvljenje vanjske ovojnice zgrade) do 274 godina (toplinska izolacija izvana na zidove uličnih pročelja). Naime, na predmetnoj zgradi trenutno postoji izolacija u vidu izolacije krovišta (kamena vuna) i dvorišnih zidova (stiropor) što nije slučaj za većinu zgrada kulturnog dobra Donjeg Grada. Za zgrade na kojima ne postoji izolacija preporučljivo je pristupiti individualno te analizirati spomenute mjere poboljšanja fizike zgrade. Mjere koje se na predmetnoj zgradi ističu jer dovode do najvećih energetske ušteda uz prihvatljivije investicijske troškove i kraće periode povrata investicije jesu: mjera brtvljenja vanjske ovojnice (11 godina), dodavanja toplinske izolacije iznutra na ulična pročelja (24 godina) te zamjena unutarnjih prozorskih krila (36 godina).

Mjere poboljšanja tehničkih sustava uključivale su sljedeće analize:

- 1) Zamjenu plinskog kotla i split-sustava dizalicom topline zrak-voda
- 2) Uvođenje regulacije ogrjevnih tijela
- 3) Zamjenu postojećih radijatora i ventilokonvektora novim ventilokonvektorima te ugradnju dizalice topline zrak-voda kao izvora toplinske/rashladne energije

- 4) Uvođenje sustava centralizirane ili decentralizirane mehaničke ventilacije
- 5) Uvođenje sustava automatizacije
- 6) Instalaciju fotonaponskih panela.
- 7) Kombinacija svih mjera poboljšanja tehničkih sustava zgrade.

Najveće uštede, uz period povrata investicije u iznosu od 9 godina, postižu se kombinacijom svih mjera poboljšanja tehničkih sustava. Pri tome isporučena električna energija za grijanje iznosi 9 kWh/m<sup>2</sup>a, za hlađenje iznosi 5 kWh/m<sup>2</sup>a, dok dodatna potrošnja električne energije za pogon ventilatora klimatizacijske jedinice iznosi 8 kWh/m<sup>2</sup>a. Usprkos dodatnoj potrošnji električne energije za pogon ventilatora, velika je prednost mehaničke ventilacije učinkovita i kontrolirana dobava vanjskog zraka, a što značajno dovodi do poboljšanja mikroklimatskih uvjeta u prostoru.

Također, vrlo važan parametar prilikom odlučivanja za provođenje određene mjere poboljšanja jest emisija CO<sub>2</sub> koja ukazuje na održivost zgrade. Za postojeće stanje zgrade emisija CO<sub>2</sub> iznosi 98 057 kg/godišnje. Najveće smanjenje emisija CO<sub>2</sub> postiže se kombinacijom svih mjera poboljšanja tehničkih sustava (74 %). Od pojedinačnih mjera, najveće smanjenje postiže se ugradnjom dizalice topline zrak-voda te iznosi 55 %. Smanjenje koje je moguće ostvariti kombinacijom mjera na fizici zgrade (bez unaprjeđenja tehničkih sustava) iznosi 25 %.

Zaključno, za svaku zgradu pa i onu pod konzervatorskom zaštitom potrebno je:

- 1) Izračunati potrebnu energiju za grijanje i hlađenje s obzirom na postojeće stanje.
- 2) Sastaviti plan potencijalnih mjera poboljšanja fizike zgrade te mjera tehničkih sustava. U slučaju zgrada bez izolacije preporučuje se analiza mjere brtvljenja ovojnice, dodavanja toplinske izolacije izvana na dvorišna pročelja ili iznutra na ulična pročelja.
- 3) Sastaviti plan potencijalnih mjera poboljšanja tehničkih sustava. S obzirom na globalnu situaciju s plinom preporučljivo je za sve zgrade analizirati mjeru primjene dizalice topline zrak-voda u kombinaciji s fotonaponskim panelima za opskrbu električnom energijom. Također se preporučuje analiza mjera regulacije ogrjevnno-rashladnih tijela, mjera uvođenja mehaničke ventilacije te mjera uvođenja sustava automatike.

- 4) Analizirati kako pojedina mjera utječe na smanjenje potrebne i isporučene energije za grijanje, hlađenje i ventilaciju.
- 5) Izračunati jednostavni period povrata investicije i emisija CO<sub>2</sub> za svaku pojedinu mjeru te kombinacije mjera, a kako bi se odabralo optimalno rješenje.

Ključni pojmovi: zgrade pod konzervatorskom zaštitom, energetska obnova, niskoenergetske zgrade, održive zgrade, emisije CO<sub>2</sub>.



## SUMMARY

**Author:** Petra Rožman

**Title:** Energy renovation of buildings with cultural heritage status

The earthquake that hit Zagreb in 2020 caused damage to many buildings, including cultural heritage objects, and buildings that are part of the protected cultural-historical complex of the city. Shortly after the earthquake, discussions on the reconstruction of damaged buildings began, along with the adoption of numerous laws and regulations. The most significant challenges were observed during the energy renovation of buildings designated as cultural heritage, largely due to insufficiently defined guidelines and numerous conservation restrictions and requirements that arise during the restoration of such buildings. Consequently, numerous buildings do not undergo the renovation process, leading to decreased quality of living and comfort, energy inefficiency, potential structural collapse, and ultimately a decrease in the overall value of buildings.

This study analyzed 8 measures to improve the building's physics and 7 measures to enhance the building's technical systems, all with the aim to define guidelines for the energy renovation of buildings designated as cultural property. The aim was to facilitate and expedite the process of creating an energy renovation project and quantify the impact of individual improvement measures on energy savings in the event of their non-implementation. The building under consideration is the Ministry of Culture and Media of the Republic of Croatia in Zagreb, representing numerous similar buildings in Donji Grad damaged by the earthquake.

As the first step of the analysis, the required energy for heating and cooling was simulated using dynamic computer simulations in the TRNSYS program. For the existing condition, the required energy for heating is 49 kWh/m<sup>2</sup>a, which is significantly higher than the maximum allowed 23 kWh/m<sup>2</sup>a during reconstruction (as defined by the *Technical Regulations*). The required energy for cooling is 31 kWh/m<sup>2</sup>a. To determine which of the analyzed measures is energetically and economically viable, it was necessary to calculate the delivered energy from the required energy, for which an algorithm developed in the MATLAB computer program was used. For the subject building and the existing system, the delivered thermal energy for heating is 70 kWh/m<sup>2</sup>a, while the delivered electrical energy for cooling is 7 kWh/m<sup>2</sup>a.

The analysis of measures to improve the physics of the building examined how interventions on the outer envelope of the building affect the reduction of the required and delivered energy for heating and cooling. The analyzed measures included:

- 1) Sealing the outer envelope of the building
- 2) Replacement of internal window sashes
- 3) Adding thermal insulation from the outside to the exterior walls on the courtyard side
- 4) Adding thermal insulation from the outside to the external walls of the street facades
- 5) Adding thermal insulation from the inside to the outer walls of the street facades
- 6) Adding thermal insulation from the inside and outside to the exterior walls of the street facades
- 7) Combination of all mentioned measures
- 8) Combination of envelope sealing measures, replacement of internal window sashes, and thermal insulation from the outside to the external walls on the courtyard side.

It was concluded that despite the achieved energy savings (which are up to 25 % for a single measure), the investment return period is high, ranging from 11 (sealing of the building's outer envelope) to 274 years (thermal insulation from the outside on the walls of the street facades). Namely, the building under consideration currently has insulation in the form of roof insulation (rock wool) and courtyard wall insulation (styrofoam), which is not typical for most heritage buildings in Donji Grad. For buildings lacking insulation, it is advisable to approach each individually and analyze the mentioned measures to improve the building's physics. The measures that stand out (for the analyzed building) because they lead to the greatest energy savings with more acceptable investment costs and shorter investment return periods are: sealing the outer envelope (11 years), adding thermal insulation from the inside to the street facades (24 years), and replacing the internal window sashes (36 years).

Measures to improve technical systems included the analysis of:

- 1) Replacing the gas boiler, water cooler, and split assembly with an air-water heat pump
- 2) Regulation of heating bodies

- 3) Replacement of existing radiators and fan coil units with new valve convectors and installation of an air-water heat pump as a source of heat/cooling energy
- 4) Implementation of a system for centralized or decentralized mechanical ventilation
- 5) Implementation of an automation system
- 6) Installation of photovoltaic panels
- 7) Combination of all measures to enhance the technical systems of the building.

The greatest savings, with a 9-year investment return period, are achieved through the combination of all measures aiming to enhance the technical systems. For this case, the electricity consumption for heating is 9 kWh/m<sup>2</sup>a, for cooling is 5 kWh/m<sup>2</sup>a, while the additional electricity consumption for operating the air conditioning unit's fan is 8 kWh/m<sup>2</sup>a. Despite the extra electricity consumption for fan operation, the significant advantage of mechanical ventilation lies in its efficient and controlled supply of outside air, markedly improving the microclimatic conditions indoors.

Moreover, a critical parameter when deciding on the implementation of specific improvement measures is the CO<sub>2</sub> emission, indicative of the building's sustainability. For the current condition of the building, CO<sub>2</sub> emissions are 98,057 kg/year. The most substantial reduction in CO<sub>2</sub> emissions is achieved through the combination of all measures aiming to improve technical systems (74 %). Among individual measures, the largest reduction is achieved by installing an air-water heat pump, accounting for 55 %. The reduction achievable through a combination of measures concerning the building's physics (without improving technical systems) is 25 %.

In conclusion, for every building, including those under conservation protection, the following steps are necessary:

- 1) Calculate the required energy for heating and cooling considering the existing situation.
- 2) Develop a plan of potential measures to improve the building's physics and technical systems. For buildings lacking insulation, it's advisable to analyze measures such as sealing the envelope, adding external thermal insulation to courtyard facades, or internal insulation to street facades.
- 3) Develop a plan of potential measures to improve technical systems. Given the global gas situation, it's recommended for all buildings to analyze the application of air-water

heat pumps combined with photovoltaic panels for electricity supply. Additionally, consider measures to regulate heating and cooling units, introduce mechanical ventilation, and implement automation systems.

- 4) Analyze the impact of individual measures on reducing required and supplied energy for heating, cooling, and ventilation.
- 5) Calculate the ROI (return on investment) period and CO<sub>2</sub> emissions for each individual measure and combination of measures to select the optimal solution.

Key terms: buildings under conservation protection, energy renovation, low-energy buildings, sustainable buildings, CO<sub>2</sub> emissions.