

Primjena dizalica topline pri rekonstrukciji i dogradnji postojeće zgrade osnovne škole

Rožman, Petra

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:957926>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-15**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Petra Rožman

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Luka Boban, mag. ing.

Student:

Petra Rožman

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru, doc. dr. sc. Luki Bobanu na svemu. Ponajprije na kvalitetnim predavanjima i vježbama kojima je povećao moj interes za ovo područje te trudu koji ulaže na prenošenje znanja studentima. Hvala Vam na pomoći, razumijevanju i susretljivosti za vrijeme pisanja ovog rada.

Ovim putem zahvaljujem se i profesorima koji su ostavili poseban utisak tijekom mog fakultetskog obrazovanja. Prof. dr. sc. Soldo, hvala Vam na pomoći prilikom promjene usmjerenja te na svemu što činite za studente procesno-energetskog smjera: na svakoj terenskoj nastavi, iznimnim predavanjima i povezivanju s industrijom. Veliko hvala prof. dr. sc. Tei Žakuli i mlađem istraživaču Nikoli Bađumu koji u Laboratoriju za energetsku učinkovitost rade svjetske stvari. Vi ste mi primjer da je sve moguće. Posebno hvala Nikoli na nesebičnom dijeljenju znanja i pomoći oko korištenja TRNSYS-a.

Ovog rada ne bi bilo bez prekrasnih ljudi iz tvrtke TT Inženjering iz Zaboka. Goran i Dalibor, hvala vam na prilici, razumijevanju za fakultetske obaveze, vođenju kroz projekte te vremenu (i strpljenju) za sva moja pitanja. Također, posebne zahvale idu veseloj ekipi iz ureda: Petri, Antonu i Draženu koji su uvijek spremni pomoći i podijeliti svoje iskustvo/znanje u projektiranju, ali i ono životno!

Zahvaljujem se prijateljima i kolegama koji su sa mnom dijelili suze i veselje. Posebno hvala Ani B., koja je vjerovala u mene kada ja nisam.

Veliko hvala najboljem susjedu Sergeju na spremnosti da uskoči kad god je bilo potrebno.

Posljednje, hvala mojim roditeljima, baki i bratu, bez čije podrške ova avantura ne bi bila moguća. Volim vas!

Petra Rožman



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Petra Rožman** JMBAG: 0035222298

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena dizalica topline pri rekonstrukciji i dogradnji postojeće zgrade osnovne škole**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Heat pump application in reconstruction and extension of existing building of elementary school**

Opis zadatka:

Osnovna škola Đurđevac, ukupne površine 3 800 m², za potrebe grijanja i pripreme PTV-a trenutno koristi plinsku toplovodnu kotlovnicu i toplovodne radijatore u sustavu visoko-temperaturnog grijanja (70/55 °C). Projektom rekonstrukcije postojećeg dijela i dogradnjom novog dijela škole, a čime bi ukupna površina škole iznosila 5 904 m², predviđena je upotreba dizalica topline kao izvora energije za grijanje i hlađenje. U postojećem dijelu škole zadržava se postojeći sustav visoko-temperaturnog grijanja, a u novom dijelu škole predviđen je površinski sustav grijanja s temperaturom polaza do 40 °C te hlađenje ventilokonvektorima (7/12 °C).

U radu je potrebno projektirati novu strojarnicu Osnovne škole Đurđevac koja će za proizvodnju toplinske i rashladne energije koristiti hibridni sustav s dizalicama topline kao primarnim toplinskim izvorom te plinskom kotlovnicom kao sekundarnim izvorom topline. Na temelju proračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje te toplinskih bilanci potrebno je definirati minimalnu vanjsku temperaturu kod koje je moguće osigurati projektnu unutarnju temperaturu zraka za stari dio škole korištenjem nisko-temperaturnog režima grijanja.

Rad treba sadržavati:

1. Opis postojećeg te stanja zgrade nakon rekonstrukcije i dogradnje
2. Toplinski bilancu za zimsko razdoblje prema normi HRN EN 12831
3. Toplinski bilancu za ljetno razdoblje prema smjernici VDI 2078
4. Tehničke proračune za odabir opreme na razini strojarnice
5. Energetsku i ekonomsku usporedbu različitih izvedbi dizalica topline (tlo-voda, voda-voda, zrak-voda)
6. Energetsku i ekonomsku usporedbu korištenja „booster“ dizalice topline i plinskog kotla za visoko-temperaturno grijanje i PTV
7. Tehnički opis odabranog sustava
8. Funkcionalnu shemu spajanja sustava i automatske regulacije

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

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datumi obrane:
9. svibnja 2024. 11. srpnja 2024. 15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:
Doc. dr. sc. Luka Boban

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XIII
1. UVOD.....	1
2. DIZALICE TOPLINE	4
3. OPIS PREDMETNE ZGRADE	10
3.1. Površine i građevni elementi zgrade	10
3.2. Opis izvedbe termotehničkog sustava postojećeg stanja	14
3.3. Opis izvedbe termotehničkog sustava predviđenog stanja nakon obnove i dogradnje 15	
4. METODOLOGIJA PRORAČUNA.....	17
4.1. Proračun projektnog toplinskog opterećenja prema normi HRN EN 12831	17
4.1.1. Pregled osnovnih jednadžbi HRN EN 12831	17
4.1.2. Tijek proračuna projektnog toplinskog opterećenja.....	19
4.1.3. Ulazni podaci i rezultati proračuna projektnog toplinskog opterećenja	22
4.2. Proračun projektnog rashladnog opterećenja prema normi VDI 2078	23
4.2.1. Pregled osnovnih jednadžbi norme VDI 2078	23
4.2.2. Tijek proračuna projektnog rashladnog opterećenja.....	24
4.2.3. Ulazni podaci i rezultati proračuna projektnog rashladnog opterećenja.....	25
4.3. Proračun godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje prema HRN EN ISO 13790 27	
4.3.1. Tijek proračuna godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje	28

4.3.2.	Ulazni podaci proračuna godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje	29
4.3.3.	Rezultati proračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje	32
5.	TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA RAZLIČITIH IZVEDBI DIZALICA TOPLINE ..	34
5.1.	Potrošnja električne energije za pogon dizalica topline	34
5.2.	Energetska i ekonomska analiza	37
5.3.	Usporedba razmatranih sustava	47
6.	TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA KORIŠTENJA „BOOSTER“ DIZALICE TOPLINE I PLINSKOG KOTLA ZA VISOKOTEMPERATURNO GRIJANJE	51
6.1.	Energetska i ekonomska analiza	51
6.2.	Usporedba razmatranih sustava	53
7.	TEHNIČKI OPIS ODABRANOG SUSTAVA	55
7.1.	Ograničenja u primjeni niskotemperaturnog režima grijanja za postojeći dio zgrade	55
7.2.	Opis tehničkog sustava i odabrane opreme na razini strojarnice	63
8.	ZAKLJUČAK	68
	LITERATURA	70
	PRILOZI	72
	PRILOG I - Projektno toplinsko i rashladno opterećenje prostorija dograđenog dijela zgrade	73

POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovna shema kompresijske dizalice topline s izvorom i ponorom topline [7]	4
Slika 2. Godišnja prodaja dizalica topline u 14 europskih zemalja [4]	5
Slika 3. Pojednostavljena blok shema dizalice topline zrak-voda (monoblok izvedba)	6
Slika 4. Pojednostavljena blok shema dizalice topline tlo-voda s vertikalnom izvedbom izmjenjivača u tlu [8]	7
Slika 5. Pojednostavljena blok shema dizalice topline voda-voda [8]	8
Slika 6. Predviđeni 3D prikaz Osnovne škole Đurđevac nakon obnove i dogradnje [10]	11
Slika 7. Prikaz postojećeg dijela strojarnice	14
Slika 8. Struktura trodimenzionalnog modela zgrade	20
Slika 9. Tijek proračuna u <i>BricsCAD AX3000</i> [®]	20
Slika 10. Prikaz računalnog izračuna toplinskog opterećenja u <i>BricsCAD AX3000</i> [®] za jednu prostoriju	21
Slika 11. Prikaz prozora za izračun rashladnog opterećenja za jednu prostoriju	25
Slika 12. Energetski tok kroz zgradu s termotehničkim sustavom za grijanje [18]	27
Slika 13. Tijek izrade modela višezonske zgrade u <i>Trbuild</i> -u	28
Slika 14. Tijek odabira komponenti i pokretanja simulacije u <i>TRNSYS Simulation Studio</i> -u	29
Slika 15. Satne vrijednosti potrebne energije za grijanje cijele zgrade	33
Slika 16. Satne vrijednosti potrebne energije za hlađenje cijele zgrade	33
Slika 17. Dugoročna raspodjela temperatura tla za Scenarij 3	42
Slika 18. Dugoročna raspodjela temperature tla za Scenarij 2	43
Slika 19. Prikaz troškova po kategorijama za analizirane izvedbe sustava	49
Slika 20. Predviđeno kretanje ukupnih troškova analiziranih sustava	50
Slika 21. Prikaz troškova po kategorijama za analizirane sustave visokotemperaturnog grijanja	54

Slika 22. Predviđeno kretanje troškova analiziranih sustava visokotemperaturnog grijanja ...	54
Slika 23. Ovisnost ogrjevnog učina o vanjskoj temperaturi.....	58
Slika 24. Satne vrijednosti potrebne energije za grijanje sjeverne i južne učionice	60
Slika 25. Maksimalne i minimalne potrebne energije za temperaturne intervale dviju učionica	61
Slika 26. Udio temperaturnog intervala u sezoni grijanja i potrebne energije koju nije moguće namiriti niskotemperaturnim režimom grijanja.....	62
Slika 27. Predloženi položaj proizvodno-utisnih parova zdenaca uz naznačen smjer kretanja podzemne vode (žuto) [24].....	64
Slika 28. Izometrijski prikaz planirane strojarnice.....	65

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kvalitativni prikaz usporedbe osnovnih karakteristika različitih izvedbi dizalica topline.....	9
Tablica 2. Neto površine za postojeće stanje zgrade.....	10
Tablica 3. Dograđene neto površine.....	10
Tablica 4. Ukupna neto površina nakon obnove i dogradnje.....	11
Tablica 5. Stvarne i dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaza topline građevnih elemenata	11
Tablica 6. Svojstva prozora [11]	13
Tablica 7. Ulazni podaci i vrijednosti projektnog toplinskog opterećenja dograđenog dijela zgrade	22
Tablica 8. Ulazni podaci i vrijednosti projektnog rashladnog opterećenja	26
Tablica 9. Svojstva odabranih prozora u <i>Trnbuild</i> -u.....	30
Tablica 10. Pogonski režimi.....	30
Tablica 11. Broj izmjena zraka i stupanj rekuperacije za sustave s mehaničkom ventilacijom	32
Tablica 12. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje dograđenog i postojećeg dijela zgrade	32
Tablica 14. Vrijednosti potrošnje električne energije za grijanje i hlađenje, <i>SCOP</i> i <i>SEER</i> pojedine izvedbe dizalice topline	36
Tablica 15. Vrijednosti primarne energije i emisija CO ₂ dizalica topline i plinskog kotla.....	38
Tablica 16. Ukupni troškovi izvedbe s dizalicom topline zrak-voda.....	39
Tablica 17. Karakteristike BIT-ova i površine ugradnje mogućih scenarija.....	41
Tablica 18. Ukupni troškovi izvedbe s dizalicom topline tlo-voda i plinskim kotlom	44
Tablica 19. Ukupni troškovi izvedbe s dizalicom topline voda-voda	46
Tablica 20. Energetska i ekonomska analiza pojedine izvedbe dizalice topline.....	47

Tablica 21. Energetska analiza razmatranih sustava	52
Tablica 22. Ukupni troškovi visokotemperaturne „Booster“ dizalice topline voda-voda.....	52
Tablica 23. Ukupni troškovi plinskog kotla	53
Tablica 24. Osnovni podaci analiziranih učionica	55
Tablica 25. Rezultati proračuna učina prema normi i učina ugrađenih ogrjevnih tijela za različite temperaturne režime	57

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

1-PR-2024 Funkcionalna shema spajanja sustava i automatske regulacije

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_K	m^2	Korisna površina grijanog dijela zgrade
A_i	m^2	Površina poda grijanog prostora sa $\frac{1}{2}$ debljine zidova
A_w	m^2	Površina ostakljenja
COP	-	Faktor grijanja
$\Delta t_{m,40/32}$	$^{\circ}C$	Srednja temperaturna razlika između ogrjevnog tijela (pri temperaturnom režimu 40/32 $^{\circ}C$) i zraka u prostoriji
$\Delta t_{m,70/55}$	$^{\circ}C$	Srednja temperaturna razlika između ogrjevnog tijela (pri temperaturnom režimu 70/55 $^{\circ}C$) i zraka u prostoriji
ΔU_{TM}	$W/(m^2 K)$	Dodatak za toplinske mostove
E_c	kWh/a	Godišnja potrošnja električne energije za hlađenje
E_H	kWh/a	Godišnja potrošnja električne energije za grijanje
EER	-	Faktor hlađenja
$E_{HW,del}$	kWh/a	Godišnja isporučena energija za grijanje i PTV
E_{prim}	kWh	Primarna energija
f_{RH}	-	Korekcijski faktor ovisan o vremenu zagrijavanja i pretpostavljenom padu temperature za vrijeme prekida rada
f_p	-	Faktor primarne energije
g	-	Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kod ostakljenje
$H_{T,ie}$	W/K	Koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema vanjskom okolišu
$H_{T,ig}$	W/K	Stacionarni koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema tlu
$H_{T,ij}$	W/K	Koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema susjednom grijanom prostoru različite temperature
$H_{T,iue}$	W/K	Koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu
$H_{V,i}$	W/K	Koeficijent ventilacijskih toplinskih gubitaka

k_{vs}	m^3/h	Kapacitet ventila pri 100% otvorenosti za nazivni protok
n	-	Eksponent grijača
P_{EL}	kW	Električna snaga za pogon kompresora i pomoćnih komponenti
Q_C	kWh/a	Referentna godišnja potrebna energija za hlađenje
$Q_{C,nd}$	kWh/a	Godišnja potrebna energija za hlađenje
Q_H	kWh/a	Referentna godišnja potrebna energija za grijanje
$Q_{H,nd}$	kWh/a	Godišnja potrebna energija za grijanje
R^2	-	Koeficijent determinacije
$SCOP$	-	Sezonski faktor grijanja
$SEER$	-	Sezonski faktor hlađenja
T_{odsis}	$^{\circ}C$	Temperatura odsisnog zraka
T_{ok}	$^{\circ}C$	Temperatura vanjskog zraka
$T_{ubacivanja}$	$^{\circ}C$	Temperatura dobavnog zraka
U	$W/(m^2 K)$	Koeficijent prolaza topline
U_{dop}	$W/(m^2 K)$	Dopuštena vrijednost koeficijenta prolaza topline
V	m^3	Obujam grijanog zraka
η	-	Stupanj rekuperacije
η_{kotao}	-	Učinkovitost plinskog kotla
ϑ_e	$^{\circ}C$	Vanjska projektna temperatura
$\vartheta_{int,i}$	$^{\circ}C$	Unutarnja projektna temperatura grijanog prostora
ϑ_{ok}	$^{\circ}C$	Temperatura vanjskog zraka
ϕ	kW	Potreban ogrjevni učin
$\phi_{40/32}$	kW	Ogrjevni učin pri temperaturnom režimu 40/32 $^{\circ}C$
$\phi_{70/55}$	kW	Ogrjevni učin pri temperaturnom režimu 70/55 $^{\circ}C$
$\Phi_{A,i}$	W	Vanjsko toplinsko opterećenje
$\Phi_{B,i}$	W	Toplinski tok predan prostoriji rasvjetom
Φ_C	kW	Učin hlađenja (toplinski tok isparivača)
$\Phi_{CL,i}$	W	Projektno rashladno opterećenje prostorije
$\Phi_{FL,i}$	W	Toplinski tok predan prostoriji infiltracijom kroz zazor

$\Phi_{G,i}$	W	Toplinski tok predan prostoriji od prolaznog materijala kroz prostoriju
Φ_H	kW	Učin grijanje (toplinski tok kondenzatora)
$\Phi_{HL,i}$	W	projektno toplinsko opterećenje pojedine prostorije
Φ_{HL}	W	Ukupno toplinsko opterećenje zgrade
$\Phi_{I,i}$	W	Unutarnje toplinsko opterećenje
$\Phi_{M,i}$	W	Toplinski tok predan prostoriji od strojeva i uređaja
$\Phi_{P,i}$	W	Toplinski tok predan prostoriji od osoba
$\Phi_{R,i}$	W	Toplinski tok predan prostoriji od susjednih prostorija preko unutarnjih površina
$\Phi_{RH,i}$	W	Toplinski tok za zagrijavanje zbog prekida grijanja
$\Phi_{S,i}$	W	Toplinski tok predan prostoriji zračenjem preko ostakljenih površina
$\Phi_{T,i}$	W	Projektne transmisivni gubici prostorije
$\Phi_{T,i}$	W	Toplinski tok predan prostoriji konvekcijom kroz prozore
$\Phi_{V,i}$	W	Projektne ventilacijski gubici prostorije
$\Phi_{W,i}$	W	toplinski tok predan prostoriji konvekcijom kroz vanjske zidove
Φ_i	W	Projektne toplinski gubici prostorije

SAŽETAK

Obnova energetske neučinkovitih zgrada u javnom sektoru prepoznata je kao ključan faktor u postizanju klimatskih ciljeva Europske unije. U Hrvatskoj, kao članici Europske unije, potonjem problemu pristupilo se, između ostalog, objavom *Javnog poziva za energetske obnovu zgrada javnog sektora*, vrijednog 40 milijuna eura. Financiranim mjerama postižu se energetske i financijske uštede kao i povećana kvaliteta boravka ljudi u prostorijama. U diplomskom radu analizirana je obnova i dogradnja Osnovne škole Đurđevac korisne površine 5 919 m², kao predstavnice zgrade javnog sektora. Budući da se javnim pozivom financira uvođenje obnovljivih izvora energije, analizirane su različite izvedbe dizalica topline kao izvora toplinske/rashladne energije. U prvom dijelu rada ukratko su objašnjene dizalice topline sa zrakom, tlom i vodom kao toplinskim spremnikom. U nastavku su iskazane površine, građevni elementi analizirane zgrade te opisana izvedba postojećeg i planiranog termotehničkog sustava. Dimenzioniranje ogrjevnih tijela dograđenog dijela zgrade provedeno je prema normi HRN EN 12831 te rashladnih tijela prema VDI 2078. Proračun je proveden korištenjem računalnog programa *BricsCAD AX3000*[®]. U svrhu usporedbe različitih izvedba termotehničkih sustava proračunata je godišnja potrebna energija za grijanje ($Q_{H,nd}$) i hlađenje ($Q_{C,nd}$) cijele zgrade uz pomoć računalnog programa *TRNSYS*[®] i programskog jezika *MATLAB*[®], uz korištenje *Algoritma za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790*. Potrebna energija cijele zgrade za grijanje iznosi 436 113 kWh/god, 63 831 kWh/god za hlađenje te obuhvaća potrebnu energiju za pripremu zraka u vodenim grijačima i hladnjacima za potrebe mehaničke ventilacije. U idućem koraku izračunate su satne vrijednosti faktora grijanja (COP) i faktora hlađenja (EER) različitih izvedba dizalica topline korištenjem podataka od proizvođača opreme i programskog jezika *MATLAB*[®]. Korištenjem satnih vrijednosti COP -a i EER -a izračunata je potrošnja električne energije te sezonski faktor grijanja ($SCOP$) i sezonski faktor hlađenja ($SEER$) pojedine izvedbe dizalica topline. Provedena je energetska i ekonomska analiza izvedba dizalica topline zrak-voda, tlo-voda u kombinaciji s plinskim kotlom te voda-voda.

Za potrebe visokotemperaturnog grijanja također je provedena energetska i ekonomska analiza korištenja visokotemperaturne „*Booster*“ dizalice topline voda-voda i plinskog kotla. Izračunati investicijski troškovi visokotemperaturne dizalice topline iznose 74% investicijskih troškova plinskog kotla. Veće pogonske troškove zahtijeva visokotemperaturna dizalica topline pri čemu

pogonski troškovi plinskog kotla čine 69% pogonskih troškova visokotemperaturne dizalice topline. U analizu su uračunati pogonski troškovi niskotemperaturne dizalice topline kojom se podiže temperatura medija polaznog medija.

Na temelju provedenih tehno-ekonomskih analiza, odabran je sustav s dizalicama topline voda-voda zbog mnogobrojnih ograničenja izvedbi zrak-voda i tlo-voda s plinskim kotlom. Izvedba voda-voda pokazala je najniže vrijednosti godišnje primarne energije ($33 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) i povezanih emisija CO_2 , što je ključna prednost s ekološkog aspekta. Dizalica topline voda-voda pokazuje visoke cjelogodišnje vrijednosti faktora grijanja (COP) i faktora hlađenja (EER) zbog stabilnosti toplinskog spremnika. Iako su troškovi održavanja najviši u usporedbi s ostalim izvedbama dizalica topline, oni osiguravaju sigurniju i trajniju opremu, što održava visoku učinkovitost sustava. U budućnosti se namjera proširenje sustava hlađenja na postojeći dio škole, što bi povećalo vrijednost faktora hlađenja (EER) te smanjilo pogonske troškove.

U posljednjem poglavlju opisan je odabrani tehnički sustav i osnovna oprema na razini strojarne/izvora topline. Dodatno je provedena analiza određivanja minimalne vanjske temperature kod koje je moguće osigurati projektnu unutarnju temperaturu zraka za postojeći dio škole korištenjem niskotemperaturnog režima grijanja. Analiza je provedena za učionicu sjeverne i južne orijentacije korištenjem dostupnih podataka o zgradi te računalnih programa *IntegraCAD*[®] i *MATLAB*[®]. Preporuka granične temperature za odabir bivalentne temperature iznosi između 5 i 10 °C. Granična temperatura postavna je veličina u sustavu upravljanja te korisnik može mijenjati njenu vrijednosti tijekom rada sustava u ovisnosti o potrebama zgrade.

Ključne riječi: dizalica topline, rekonstrukcija i dogradnja osnovne škole, tehno-ekonomska analiza, hibridni sustav, bivalentna temperatura

SUMMARY

The renovation of energy-inefficient buildings in the public sector has been recognized as a crucial factor in achieving the European Union's climate goals. In Croatia, as an EU member, this issue has been addressed, among other measures, through the publication of *A Public Call for Energy Renovation of Public Sector Buildings*, worth 40 million euros. The funded measures achieve energy and financial savings as well as improved quality of living in the premises. This thesis analyzes the renovation and expansion of the Đurđevac Elementary School, with a usable area of 5,919 m², as a representative of public sector buildings. Since the public call finances the introduction of renewable energy sources, various heat pump designs as sources of heating/cooling energy have been analyzed.

The first part briefly explains heat pumps with air, ground, and water as heat source. The next sections detail the areas, construction elements of the analyzed building, and describe the existing and planned thermotechnical system. The sizing of heating bodies for the extended part of the building was carried out according to the HRN EN 12831 standard and cooling bodies according to VDI 2078. Calculations were performed using the *BricsCAD AX3000*[®] software.

For the comparison of different thermotechnical system designs, the annual required energy for heating ($Q_{H,nd}$) and cooling ($Q_{C,nd}$) of the entire building was calculated using *TRNSYS*[®] software and *MATLAB*[®] programming language, employing *The algorithm for calculating the required energy for heating and cooling building spaces according to HRN EN ISO 13790*. The required energy for the entire building for heating is 436,113 kWh/year and 63,831 kWh/year for cooling, including the energy needed to prepare air in water heaters and coolers for mechanical ventilation.

In the next step, hourly values of heating factor (COP) and cooling factor (EER) of different heat pump designs were calculated using manufacturer data and *MATLAB*[®] programming language. Using the hourly values of COP and EER , the electricity consumption and seasonal heating factor ($SCOP$) and seasonal cooling factor ($SEER$) for each heat pump design were calculated. An energy and economic analysis of the air-to-water, ground-to-water in combination with a gas boiler and water-to-water heat pump designs was conducted.

For high-temperature heating needs, an energy and economic analysis of using a high-temperature “*Booster*” water-to-water heat pump and gas boiler was also conducted. The calculated investment costs of the high-temperature heat pump amount to 74% of the gas

boiler's investment costs. The high-temperature heat pump requires higher operating costs, where the gas boiler's operating costs are 69% of the high-temperature heat pump's operating costs. The analysis also accounted for the operating costs of a low-temperature heat pump used to raise the supply medium temperature.

Based on the conducted techno-economic analyses, a water-to-water heat pump system was chosen due to the numerous limitations of air-to-water and ground-to-water designs with a gas boiler. The water-to-water design showed the lowest annual primary energy values (33 kWh/m²a) and associated CO₂ emissions, a significant advantage from an ecological standpoint. The water-to-water heat pump demonstrates high year-round values of heating (*COP*) and cooling (*EER*) factors due to the stability of the heating/cooling source (water). Although maintenance costs are the highest compared to other heat pump designs, they ensure more reliable and durable equipment, maintaining high system efficiency. Future plans include expanding the cooling system to the existing part of the school, which would increase the cooling factor (*EER*) and reduce operating costs.

The final chapter describes the chosen technical system and basic equipment at the level of the machine room/heat source. Additionally, an analysis was conducted to determine the minimum outside temperature at which it is possible to ensure the design indoor air temperature for the existing part of the school using a low-temperature heating regime. The analysis was performed for classrooms facing north and south orientation using available building data and the *IntegraCAD*[®] and *MATLAB*[®] software programs. The recommended limit temperature for selecting the bivalent temperature ranges between 5 and 10 °C. The limit temperature is a setpoint in the control system and the user can change its value during system operation depending on the building's needs.

Keywords: heat pump, elementary school renovation and expansion, techno-economic analysis, hybrid system, bivalent temperature

1. UVOD

Sektor zgradarstva smatra se jednim od najvećih potrošača energije na svijetu. Na razini Europe, oko 40% ukupne energije troši se u zgradama. Čak 85% europskih zgrada izgrađeno je prije 2000. godine, a 75% smatra ih se energetske neučinkovitim [1]. Iz spomenutih podataka jasno je da se za postizanje klimatski neutralne i zelene Europe treba fokusirati, između ostalog, na povećanje energetske učinkovitosti zgrada tj. osiguravanje minimalne potrošnje energije uz postizanje optimalnih uvjeta toplinske ugodnosti. Mjere energetske učinkovitosti uključuju poboljšanje toplinske zaštite zgrada, povećanje učinkovitosti sustava grijanja, hlađenja, ventilacije i klimatizacije, povećanje učinkovitosti rasvjete i električnih uređaja te povećanje udjela obnovljivih izvora energije.

Jedan od razloga za sve veću upotrebu obnovljivih izvora u postizanju energetske učinkovitosti zgrada je i geopolitička situacija u svijetu koja je dovela do povećanja cijene energenata i nesigurnosti u opskrbi istih. Prema revidiranoj direktivi Europske unije o obnovljivim izvorima energije, nastoji se povećati udio obnovljivih izvora energije s 32% na 42,5%, s ciljem postizanja 45% udjela u ukupnoj proizvodnji energije [2]. Prema podacima statističkog ureda Europske unije *Eurostata*, udio obnovljive energije u ukupnoj potrošnji energije na razini Europske unije iznosio je 23% u 2022. godini te 24,9% u sektoru grijanja i hlađenja. Ovom porastu zasigurno je doprinio povećan broj instaliranih dizalica topline. Prema Europskom udruženju za dizalice topline (EHPA), u 2022. godini prodano je više od 3 milijuna dizalica topline, što je na godišnjoj razini povećanje od 38,9% u odnosu na godinu ranije. Ukupno 19,79 milijuna dizalica topline, koliko ih je tada bilo instalirano u Europskoj uniji, osiguravalo je grijanje i hlađenje oko 16% europskih stambenih i poslovnih zgrada te tako zamjenjujući oko 4 milijarde kubičnih metara prirodnog plina. Istim brojem instaliranih dizalica topline sprječava se emisija 52,52 Mt CO₂, što je otprilike jednako godišnjim emisijama Grčke. U 2023. godini broj novo-instaliranih dizalica topline smanjio se za 5% u odnosu na prethodnu godinu. Neki od mogućih razloga smanjenja uključuju: visoke kamatne stope, viša cijena električne energije u odnosu na cijenu plina te promjene mjera nacionalne politike [3].

U Hrvatskoj je udio obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji energije iznosio 29,4% za 2022. godinu, odnosno 37,2% u sektoru grijanja i hlađenja. Uspoređujući podatke, na primjeru

Hrvatske, došlo je do pada u usporedbi s 2021. godinom kada je udio u sektoru grijanja i hlađenja iznosio 38% [4]. Uloga obnove energetske neučinkovitih zgrada u javnom sektoru prepoznata je kao bitan čimbenik ostvarivanja planiranih klimatskih ciljeva. Stoga je Vlada Republike Hrvatske u listopadu 2013. godine usvojila prvi *Program energetske obnove zgrada javnog sektora za razdoblje 2014. – 2015. godine*. Kroz pozive na dostavu ponuda dodijeljeno je oko 198 milijuna eura za energetske obnovu 871 zgrade, čija realizacija je procijenjena do kraja 2023. godine. Nadalje, 17. ožujka 2023. godine, Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine objavilo je novi *Javni poziv za energetske obnovu zgrada javnog sektora*, vrijedan 40 milijuna eura. Kroz javni poziv sufinanciraju se sljedeće mjere:

1. Povećanje energetske učinkovitosti (obnova vanjske ovojnice zgrade i poboljšanje toplinske izolacije);
2. Uvođenje i povećanje udjela obnovljivih izvora energije (instalacija solarnih fotonaponskih panela, ugradnja solarnih termalnih sustava, instalacija dizalica topline);
3. Optimizacija sustava grijanja, hlađenja i ventilacije (modernizacija/zamjena postojećeg sustava grijanja, uvođenje sustava rekuperacije zraka, optimizacija sustava hlađenja i ventilacije);
4. Poboljšanje sustava rasvjete;
5. Uvođenje sustava za praćenje i upravljanje energijom (praćenje potrošnje energije, uvođenje sustava automatizacije);
6. Ostale mjere (poboljšanje izolacije sustava grijanja i hlađenja, uvođenje mjera za smanjenje potrošnje energije, implementacija rješenja za poboljšanje unutarnje kvalitete zraka).

Obnove ne rezultiraju samo energetske i financijske uštedama, već i povećanom kvalitetom boravka korisnika u prostorima [5, 6].

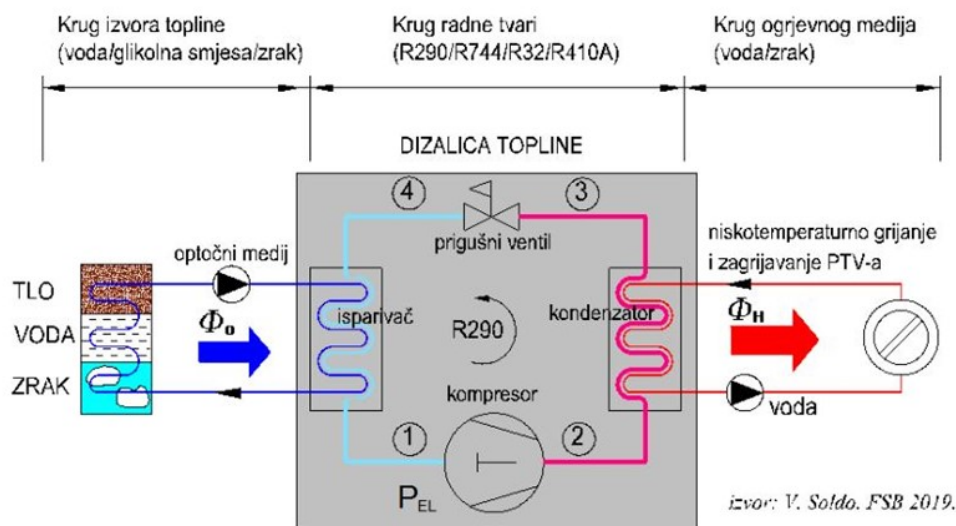
Jedan od primjera projekata sufinanciranih kroz ovaj javni poziv je obnova i dogradnja Osnovne škole Đurđevac. U ovom radu prikazana je postojeća i planirana izvedba termotehničkih sustava, s fokusom na strojarnicu. Postojeća plinska toplovodna kotlovnica zamjenjuje se novom strojarnicom. Kako bi se povećao udio obnovljivih izvora energije (Mjera 2), planirana je ugradnja dizalica topline kao primarnih izvora topline za proizvodnju toplinske i rashladne energije predmetne zgrade. Dodatno je kao sekundarni izvor topline predviđena upotreba

plinskog kotla. U postojećem dijelu zgrade zadržava se sustav visokotemperaturnog grijanja (70/55 °C) člankastim radijatorima kao ogrjevnim tijelima. Za dograđeni dio zgrade proveden je proračun projektnog toplinskog i rashladnog opterećenja u svrhu dimenzioniranja ogrjevnih i rashladnih tijela. Predviđen je niskotemperaturni režim grijanja preko površinskog sustava grijanja, hlađenje pojedinih prostorija korištenjem ventilokonvektora te sustav mehaničke ventilacije s rekuperacijom/regeneracijom topline (Mjera 3). Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje proveden je s ciljem tehno-ekonomske analize različitih izvedbi dizalica topline (zrak-voda, tlo-voda i voda-voda) te visokotemperaturne „Booster“ dizalice topline i plinskog kotla. Mogućnost korištenja niskotemperaturnog režima grijanja u postojećem dijelu zgrade provedeno je analizom tipskih učionica sjeverne i južne orijentacije (Mjera 6). Predviđeno je da cijelim sustavom upravlja centralni nadzorni sustav (CNUS) za uštedu i učinkovito upravljanje potrošnjom energije (Mjera 5). Na posljednjim stranicama rada opisan je odabrani tehnički sustav te opis osnovne potrebne opreme na razini strojarnice/izvora topline za siguran i učinkovit rad sustava.

2. DIZALICE TOPLINE

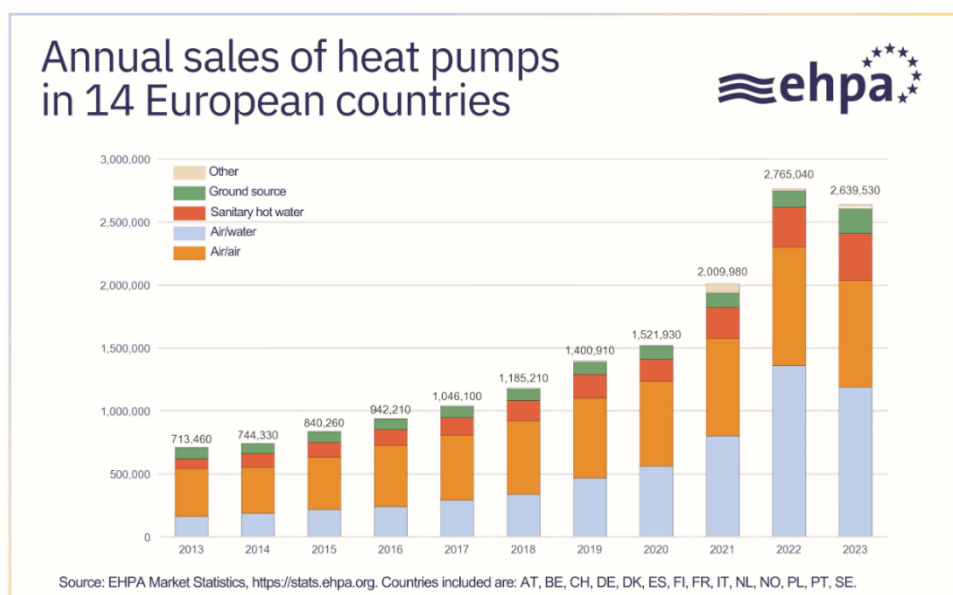
Dizalica topline uređaj je koji radi na principu ljevokretnog kružnog procesa, a kojim se podiže toplinska energija s niže na višu energetska razinu uz privedeni vanjski rad. Koristi se u sustavima grijanja, hlađenja, pripreme potrošne tople vode i klimatizaciji. Kompresijske dizalice topline najučestalije su izvedba u primjeni. Slika 1 prikazuje osnovu shemu kompresijske dizalice topline i osnovne elemente su: isparivač, kompresor, kondenzator i prigušni ventil.

Primjerice, u režimu grijanja, isparivač dizalice topline u izvedbi zrak-voda smješten je u vanjskom okolišu te radna tvar na sebe prima toplinu iz okolišnog zraka (izvor topline) i isparava. Pare radne tvari se preko 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 uz pomoć 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. Osim zraka iz okoliša, kao toplinski izvor mogu se koristiti tlo, voda i otpadna toplina.



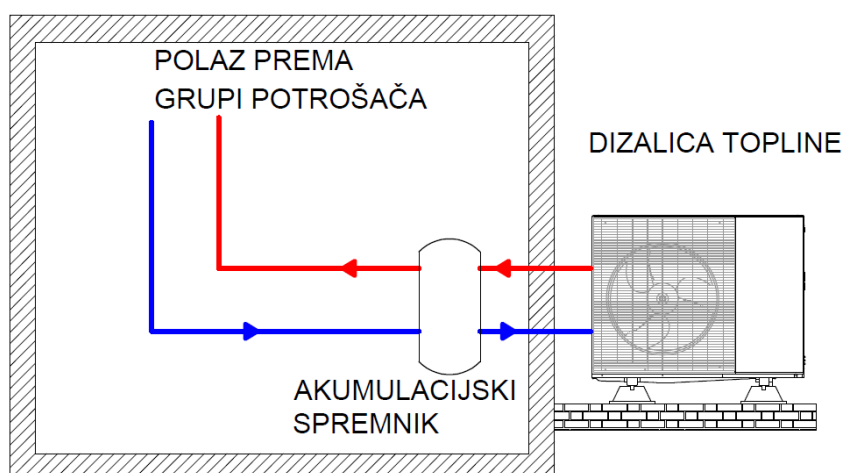
Slika 1. Osnovna shema kompresijske dizalice topline s izvorom i ponorom topline [7]

U nastavku slijedi podjela dizalica topline prema izvoru toplinske/rashladne energije.



Slika 2. Godišnja prodaja dizalica topline u 14 europskih zemalja [4]

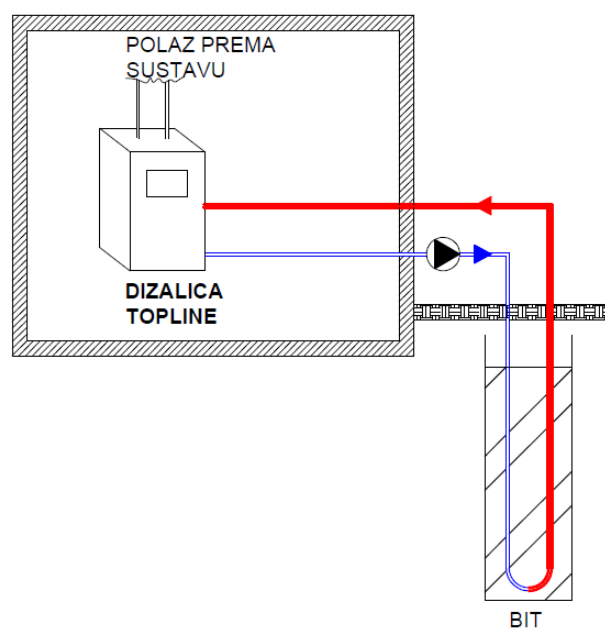
Slika 2 prikazuje dijagram godišnje prodaje dizalica topline prema izvoru topline za 14 europskih zemalja. Može se zaključiti kako su najučestalije dizalice topline u primjeni, prema broju ugrađenih uređaja, **dizalice topline zrak-voda** i **zrak-zrak**. Vanjski zrak predstavlja najpristupačniji i najjeftiniji izvor toplinske energije. Vanjska jedinica dizalice topline smješta se u slobodnu okolinu te je neprestano izložena atmosferskim prilikama. Zbog toga je potrebno osigurati zaštitu vanjske jedinice od vremenskih uvjeta (tuča, kiša, snijeg, vjetar i sl.) koji mogu smanjiti njezinu trajnost i povećati troškove održavanja. Također, smještaj vanjske jedinice u slobodnoj okolini može predstavljati estetski problem za urbana ili zaštićena područja. Nadalje, dizalice topline generiraju buku za vrijeme svog rada što može predstavljati problem u gusto naseljenim područjima. Najveći nedostatak korištenja dizalica topline sa zrakom kao izvorom topline je velika varijabilnost temperature vanjskog zraka, koja utječe na toplinski množitelj i ogrjevni učin dizalice topline. Budući da njihova ekonomičnost pada pri temperaturama vanjskog zraka nižim od $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, rijetko se dimenzioniraju kao samostalni izvori topline [7]. Na Slici 3 prikazana je pojednostavljena shema dizalice topline zrak-voda u monoblok izvedbi.



Slika 3. Pojednostavljena blok shema dizalice topline zrak-voda (monoblok izvedba)

Dizalice topline tlo-voda koriste tlo kao izvor toplinske/rashladne energije. Tlo je, nakon zraka, najzastupljenije u primjeni kao izvor topline. Velika prednost korištenja tla je u malim oscilacijama temperature tla s dubinom u usporedbi s oscilacijama temperature vanjskog zraka. Zbog stabilnih temperatura tla dizalice topline tlo-voda rade učinkovitije, što rezultira manjim potrebama za električnim priključkom. Izvedbe izmjenjivača topline koji se postavljaju u tlo mogu biti: horizontalne, vertikalne, spiralne i košaraste [7]. U spomenutim slučajevima radi se o posrednom sustavu s krugom posrednog prijenosnika energije, krugom radne tvari dizalice topline i krugom ogrjevnog/rashladnog medija. Tijekom rada posredni prijenosnik energije (najčešće mješavina vode i glikola) cirkulira izmjenjivačima topline u tlu, izmjenjuje toplinu s tлом te ju preko isparivača (ili kondenzatora) predaje krugu radne tvari dizalice topline. U dizalici topline se podiže energetski nivo radne tvari kompresorom te ponovno preko izmjenjivača topline (kondenzator/isparivač) predaje toplinu krugu ogrjevnog/rashladnog medija. Cirkulacijom posrednog prijenosnika energije u zatvorenom krugu ne dolazi do izmjene mase s izvorom topline, što povoljno djeluje na trajnost sustava. Smještaj opreme u strojarnicu dodatno pridonosi trajnosti opreme jer je zaštićena od vanjskih atmosferskih utjecaja.

Veliki nedostatak ovakvih sustava su visoki investicijski troškovi i potrebna dodatna ispitivanja toplinskih svojstava tla za velike sustave (Test toplinskog odziva tla, engl. *Thermal Response Test*). Slika 4 prikazuje pojednostavljenu shemu vertikalne izvedbe izmjenjivača topline u tlu.

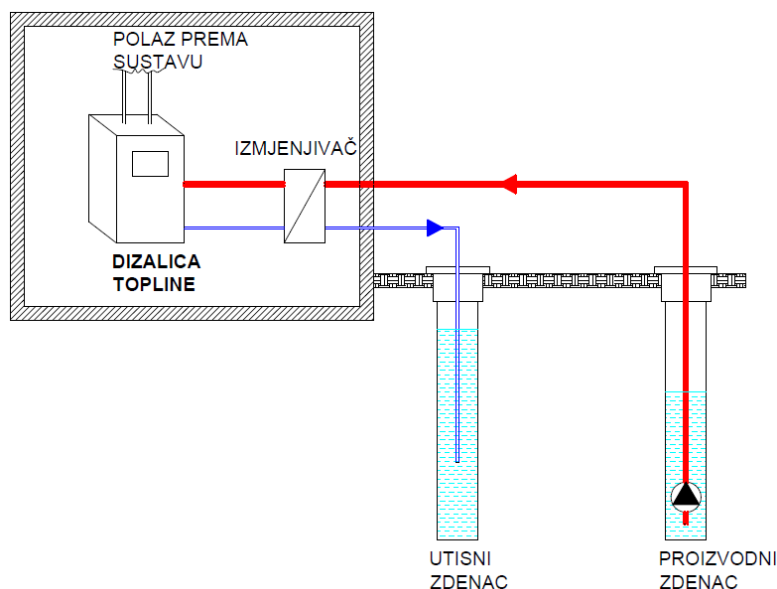


Slika 4. Pojednostavljena blok shema dizalice topline tlo-voda s vertikalnom izvedbom izmjenjivača u tlu [8]

Dizalice topline voda-voda koriste površinske vode (jezera, rijeke, mora, bunare) i podzemne vode kao izvor toplinske/rashladne energije (Slika 5). Neznatna temperaturna promjenjivost vode kroz godinu i dobri koeficijenti prijelaza topline smatraju se osnovnom prednošću vode kao izvora topline. Ovisno o dubini iz koje se crpi, temperatura može varirati između 8 °C i 16 °C. Slično kao i dizalice topline tlo-voda, zbog stabilnosti temperature vode zahtijevaju manju potrebu snagu električnog priključka. Međutim, korištenje vode kao izvora topline ima i određene nedostatke. Kvaliteta/sastav vode može pogodovati nastanku korozije i mikrobiološkom onečišćenju cijevnih i izmjenjivačkih površina. To može rezultirati povećanim troškovima održavanja i investicijskim troškovima. Osim toga, postoji njena ograničenost uslijed pravnih ili fizičkih restrikcija. Kako bi se voda koristila u radu dizalica topline treba obaviti vodoistražne radove. Vodoistražnim radovima proučavaju se, istražuju i analiziraju podzemne vode, što omogućuje bolje upravljanje vodnim resursima. Dodatni trošak u radu dizalica topline voda-voda predstavlja naknada za zahvat podzemne vode. Naknadom za zahvat podzemne vode regulirala se korištenje podzemnih voda i osigurava održiva uporaba.

Za zahvat podzemne vode potrebna su minimalno dva zdenca, proizvodni i utisni, sa što većim razmakom među njima (ne manji od 10 m). Proizvodni zdenac treba davati u svakom trenutku pogona dovoljnu količinu vode. Utisni zdenac postavlja se nizvodno od proizvodnog zdenca.

Promjer zdenca je obično 220 mm. Potopljena crpka ugrađuje se najčešće na dubini od 25 do 30 m (ovisno o dubini vodonosnika) kako bi se smanjili pogonski troškovi pumpe te se ispod pumpe ostavlja slobodna visina zdenca koja omogućuje nakupljanje pijeska i nečistoća. Prilikom dimenzioniranja sustava, protok pumpe za vodu proračunava se na temperaturnu razliku vode na isparivaču od 3 do 5 °C [7,9].



Slika 5. Pojednostavljena blok shema dizalice topline voda-voda [8]

Kvalitativni prikaz usporedbe osnovnih karakteristika različitih izvedbi dizalica topline prema vrsti toplinskog spremnika prikazuje Tablica 1. Svakoj karakteristici pridružena je boja i simbol. Zelena boja predočava prihvatljivost, crvena boja neprihvatljivost, a narančasta boja graničnu prihvatljivosti pojedine karakteristike. Simboli se koriste za označavanje relativnog iznosa karakteristike: simbol + označava visoku vrijednost, simbol – nisku vrijednost te simbol 0 nepostojeću vrijednost karakteristike. Primjerice, za dizalice topline voda-voda troškovi povezivanja sustava na spremnik predstavljaju neprihvatljivu karakteristiku (crvena) s relativno visokim troškovima (+). Suprotno tome, troškovi povezivanja sustava na toplinski spremnik dizalice topline zrak-voda su niski (-) i predstavljaju prihvatljivu karakteristiku (zelena). Visoki troškovi (+) i granična prihvatljivost (narančasta) troškova povezivanja sustava na toplinski spremnik povezuju se s dizalicama topline tlo-voda.

Tablica 1. Kvalitativni prikaz usporedbe osnovnih karakteristika različitih izvedbi dizalica topline

	ZRAK	TLO	VODA
Raspoloživost toplinskog spremnika	+	+	-
Temperaturna stabilnost toplinskog spremnika	-	+	+
Buka	+	-	-
Smještaj opreme u strojarnici	-	+	+
Monovalentni način rada	-	+	+
Troškovi održavanja	0	-	+
Troškovi povezivanja sustava na toplinski spremnik	-	+	+
Pravna procedura povezivanja sustava na toplinski spremnik	-	-	+
Specifični zahtjevi za utvrđivanje karakteristika toplinskog spremnika	0	+	+
Sezonska učinkovitost sustava	0	+	+

3. OPIS PREDMETNE ZGRADE

U idućim potpoglavljima opisana je analizirana zgrada diplomskog rada. Iskazane su neto površine zgrade, građevni elementi od kojih se zgrada sastoji te dan opis izvedbe postojećeg i planiranog termotehničkog sustava.

3.1. Površine i građevni elementi zgrade

U diplomskom radu analizirana je zgrada Osnovne škole Đurđevac, smještena u samom centru grada Đurđevca. Zgrada je tlocrtno otklonjena za 45° od osi sjevera. Postojeća zgrada osnovne škole sastoji se od dvije međusobno povezane zgrade. Prvu zgradu čine učionice, uredi, kabineti i popratne prostorije dok drugu zgradu čini sportska dvorana. U trećoj, manjoj zgradi, odvojenoj od kompleksa, nalaze se zajednička strojarnica i radionica. Tablica 2 prikazuje neto površine za postojeće stanje predmetne zgrade.

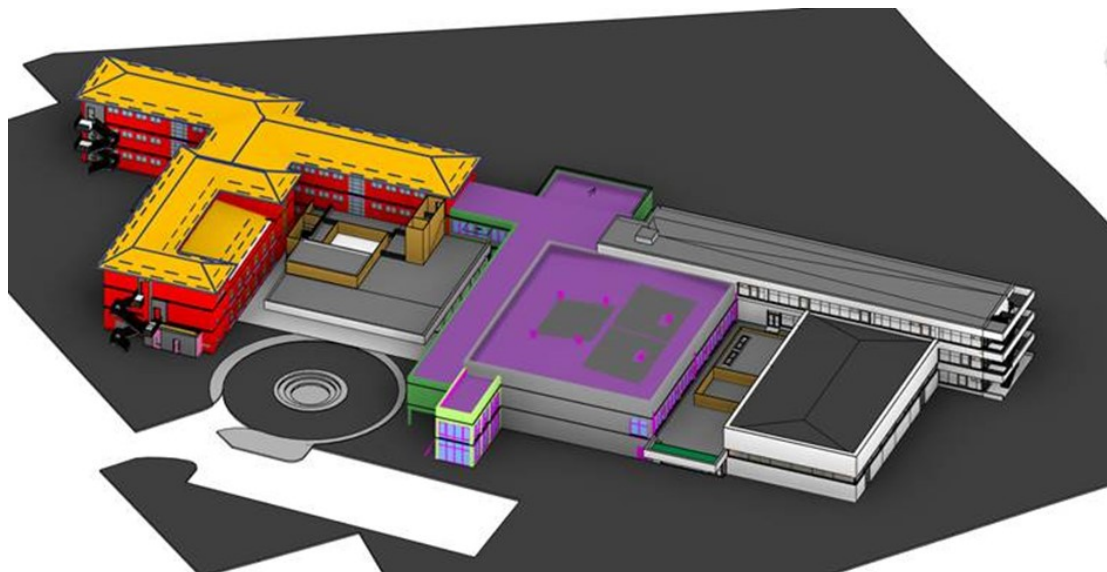
Tablica 2. Neto površine za postojeće stanje zgrade

Školski dio	2 590,02	m ²
Sportska dvorana	1 224,77	m ²
Σ	3 814,79	m ²

Obnovom i dogradnjom (Slika 6) proširuje se postojeće stanje sportskom dvoranom i popratnim prostorijama, novom blagovaonicom i kuhinjom te dodatnim učionicama. Tablica 3 prikazuje dograđene neto površine.

Tablica 3. Dograđene neto površine

Školski dio	1 285,57	m ²
Sportska dvorana	815,54	m ²
Σ	2 104,11	m ²



Slika 6. Predviđeni 3D prikaz Osnovne škole Đurđevac nakon obnove i dogradnje [10]

Tako će nakon obnove i dogradnje ukupna neto površina iznositi kako slijedi u Tablici 4.

Tablica 4. Ukupna neto površina nakon obnove i dogradnje

Školski dio	3 875,59	m ²
Sportska dvorana	2 043,31	m ²
Σ	5 918,90	m ²

Vrijednosti koeficijenta prolaza topline građevnih elemenata [11], koji čine dograđeni i postojeći dio zgrade, prikazane su u Tablici 5. U istoj tablici nalaze se i usporedbe stvarnih vrijednosti s dopuštenim vrijednostima koeficijenta prolaza topline prema Tehničkom propisu [12].

Tablica 5. Stvarne i dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaza topline građevnih elemenata

Građevni element	Koeficijent prolaza topline, U [W/(m ² K)]	Dopuštena vrijednost koeficijenta prolaza topline, U_{dop} [W/(m ² K)]
POSTOJEĆI DIO – ŠKOLA		
POD	2,24	0,40
VZ	0,18	0,30

STROP PREMA TAVANU	0,13	0,25
POSTOJEĆI DIO – SPORTSKA DVORANA		
POD	0,50	0,40
VZ	0,26	0,30
VZ_AB	0,36	0,30
KROV	0,27	0,25
POSTOJEĆI DIO – PRATEĆE PROSTORIJE SPORTSKE DVORANE		
POD	0,53	0,40
VZ	0,30	0,30
KROV	0,31	0,25
DOGRAĐENI DIO – SPORTSKA DVORANA		
POD	0,34	0,40
VZ	0,18	0,30
KROV	0,23	0,25
DOGRAĐENI DIO – PRATEĆE PROSTORIJE SPORTSKE DVORANE		
POD	0,25	0,40
KROV	0,22	0,25
DOGRAĐENI DIO – ŠKOLA		
POD	0,25	0,40
VZ	0,22	0,30
KROV	0,22	0,25

Utjecaj toplinskih mostova uzet je u obzir povećanjem koeficijenta prolaza topline građevnih elemenata. Tamo gdje su toplinski mostovi projektirani u skladu s katalogom dobrih rješenja toplinskih mostova, uzima se povećanje $\Delta U_{TM} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Kada nisu u skladu s katalogom dobrih rješenja, uzima se povećanje $\Delta U_{TM} = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Tablica 6 prikazuje svojstva prozora za dograđeni i postojeći dio zgrade.

Tablica 6. Svojstva prozora [11]

Koeficijent prolaza topline, U [W/(m ² K)]	Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, g [-]
POSTOJEĆI DIO - ŠKOLA	
1,1	0,50
POSTOJEĆI DIO – SPORTSKA DVORANA	
1,51	0,60
DOGRAĐENI DIO – ŠKOLA I SPORTSKA DVORANA	
1,41	0,45

U nastavku slijedi opis izvedbe termotehničkog sustava postojećeg stanja te planiranog stanja nakon obnove i dogradnje.

3.2. Opis izvedbe termotehničkog sustava postojećeg stanja

Prema ranije spomenutom opisu, odvojeno od kompleksa zgrade škole i sportske dvorane trenutno se nalazi manja zgrada koju čine strojarnica i radionica. U strojarnici su smještena dva niskotemperaturna toplovodna plinska kotla s ukupno instaliranim nazivnim učinkom od 550 kW. S ciljem povećanja energetske učinkovitosti i smanjenja potrošnje zemnog plina kao glavnog energenta, 2022. godine ugrađena je dizalica topline zrak-voda. Dizalica topline zrak-voda smještena je pored zgrade kotlovnice te cijevnim razvodom i potrebnom opremom povezana na postojeći sustav centralnog grijanja u kotlovnici. Ovim bivalentnim termotehničkim sustavom omogućeno je, u režimu grijanja, korištenje dizalice topline zrak-voda u kombinaciji s postojećim toplovodnim kotlovima. Dizalica topline zrak-voda dimenzionirana je za rad u niskotemperaturnom režimu grijanja gdje maksimalna temperatura polaza vode ne prelazi 50 °C. Ugrađeni akumulacijski spremnik ogrjevnice vode nazivnog volumena 3000 litara služi za pripremu potrošne tople vode te hidrauličko odvajanje toplovodnog sustava dizalice topline i kotlova [13]. Postojeći izgled dijela strojarnice prikazan je na Slici 7.



Slika 7. Prikaz postojećeg dijela strojarnice

Grijanje je u školskom prostoru izvedeno uz pomoć radijatora, a sportske dvorane kombinacijom zidnih i stropnih kalorifera i radijatora. Sustav koristi visokotemperaturni režim grijanja 70/55 °C. Hlađenje je u pojedinim prostorijama (kao ští su uredi, administracija i sl.) izvedeno lokalno korištenjem pojedinačnih split dizalica topline. Točni podaci o ukupnom broju instaliranih split jedinica nisu poznati zbog lokacijske nepristupačnosti samih jedinica te

nedostatka projektne dokumentacije. Zgrada škole ventilira se prirodno, dok je u prostorima sportskih dvorana ugrađen sustav mehaničke ventilacije. Za prostor velike dvorane predviđen je dovod i odvod svježeg zraka preko stropnih i zidnih kalorifera. U pratećim prostorijama velike sportske dvorane izvedena je odsisna ventilacija. Prema riječima korisnika, sustav ventilacije nije u upotrebi.

3.3. Opis izvedbe termotehničkog sustava predviđenog stanja nakon obnove i dogradnje

Kako bi se povećao udio obnovljivih izvora energije nakon obnove i dogradnje, planirana je ugradnja dizalica topline kao primarnih izvora toplinske i rashladne energije. Dostupni toplinski spremnici na predmetnoj lokaciji, koji će biti detaljno analizirani u radu, uključuju zrak, tlo i vodu. U slučaju korištenja vode kao izvora toplinske ili rashladne energije, potrebno je provjeriti mogućnost eksploatacije i utiskivanja podzemne vode iz Đurđevačkog vodonosnog sustava na lokaciji objekta. Ako se tlo koristi kao toplinski spremnik, treba provesti mjerenje toplinskog odziva tla TRT - om (eng. *Thermal response test*) na lokaciji objekta ili se koristiti lokalnim geološkim podacima. Specifični zahtjevi o karakteristikama zraka kao toplinskog spremnika ne postoje. Postojeća strojarnica i radionica, koje su trenutačno zasebna građevina, bit će demontirane. U sklopu novog dijela predmetne zgrade planirana je dvoetažna strojarnica. U strojarnicu je predviđen smještaj dizalica topline (u slučaju tlo-voda/voda-voda), pumpa, hidrauličkih skretnica, ekspanzijskih posuda, sigurnosnih ventila, izmjenjivača topline te ostale opreme potrebne za siguran i funkcionalan rad postrojenja. Daljnja distribucija toplinske/rashladne energije vrši se iz strojarnice prema prostorijama predmetne zgrade.

S obzirom na to da je za dograđeni dio zgrade planiran niskotemperaturni režim grijanja, pri čemu se zadržava visokotemperaturni režim grijanja 70/55 °C za postojeći dio zgrade, potrebno je predvidjeti ugradnju niskotemperaturnih i visokotemperaturnih dizalica topline. Ovisno o uvjetima u vanjskom okolišu, niskotemperaturne dizalice topline mogu se koristiti samostalno i za dograđeni dio zgrade. Prema tome, niskotemperaturne dizalice topline predviđaju se za opskrbu toplinskom ili rashladnom energijom grijača i hladnjaka planiranih klima komora te prostorija u dograđenom dijelu zgrade, kao i postojeće zgrade kada vanjski uvjeti to omogućuju. Za prostorije u dograđenom dijelu zgrade, predviđa se temperaturni režim grijanja od 40/32 °C, odnosno 40/35 °C za sportske dvorane, dok se za hlađenje predviđa temperaturni režim od 7/12 °C. Visokotemperaturna dizalica topline planirana je za pripremu potrošne tople vode (PTV) te

za grijanje postojećeg dijela zgrade kada je temperatura vanjskog okoliša niža od bivalentne temperature. Kako se visokotemperaturnom dizalicom topline ne rješava problem zaštite sustava vode od legionele, zadržala bi se instalacija zemnog plina za potrebe plinskog kotla. Plinski kotao bi, osim pregrijavanja PTV-a, služio kao rezervni sustav grijanja.

Za prostorije postojećeg dijela zgrade zadržava se sustav prirodne ventilacije. Međutim, sustav mehaničke ventilacije planiran je u sportskim dvoranama, pratećim prostorijama sportskih dvorana, blagovaonici, učionicama, kabinetima te pomoćnim prostorijama kuhinje dograđenog dijela zgrade. Predviđene su klima komora sa izmjenjivačem (rekuperatorom ili regeneratom) za povrat topline. Isto tako, kondicioniranje zraka za potrebe ventilacije kuhinje s ventilirajućim stropom predviđa se pomoću tlačno-odsisne klima komore. Ventilacija sanitarnih čvorova pored učionica postojećeg dijela zgrade planira se preko zasebnih odsisnih ventilatora, a izbacivanje otpadnog zraka pomoću ventilacijskih vertikalna preko krova u vanjski okoliš. Projektiranje klima komore predviđeno je za temperaturni režim 40/35 °C u režimu grijanja te 7/12 °C u režimu hlađenja.

4. METODOLOGIJA PRORAČUNA

Za potrebe dimenzioniranja ogrjevnih i rashladnih tijela dograđenog dijela zgrade proveden je proračun projektnog toplinskog opterećenja prema normi HRN EN 12831 [14] i projektnog rashladnog opterećenja prema normi VDI 2078 [15]. Kako bi se odredili projektni toplinski dobitci i gubici, korišten je računalni program *BricsCAD AX3000*[®]. Za potrebe tehnokoekonomske analize različitih izvedbi termotehničkih sustava, izračunata je potrebna energija za grijanje i hlađenje cijele zgrade. Proračun je proveden na satnoj razini korištenjem računalnog programa *TRNSYS*[®], uz primjenu preporučenih ulaznih podataka iz norme HRN EN ISO 13790 [16]. Svaki proračun sadrži pregled osnovnih jednadžbi, tijek proračuna i rezultate.

4.1. Proračun projektnog toplinskog opterećenja prema normi HRN EN 12831

Projektno toplinsko opterećenje dograđenog dijela predmetne zgrade dobiveno je zbrajanjem projektnih toplinskih gubitaka pojedinih prostorija. Projektne toplinske gubitke prostorije čine projektni transmisijski gubici i projektni ventilacijski gubici. Dodatno se, gdje je to potrebno, pridodaje toplina potrebna za zagrijavanje prostora s prekidom grijanja. Pregled osnovnih korištenih formula, tijeka proračuna, ulaznih podataka i rezultata slijedi u idućim potpoglavljima.

4.1.1. Pregled osnovnih jednadžbi HRN EN 12831

Projektne transmisijski gubici prostorije računaju se kako slijedi jednadžbom (4.1):

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) \cdot (\vartheta_{int,i} - \vartheta_e) \quad (4.1)$$

gdje su:

- $\Phi_{T,i}$ - projektni transmisijski gubici prostorije [W];
- $H_{T,ie}$ - koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema vanjskom okolišu [W/K];
- $H_{T,iue}$ - koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu [W/K];

- $H_{T,ig}$ - stacionarni koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema tlu [W/K];
- $H_{T,ij}$ - koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema susjednom grijanom prostoru različite temperature [W/K];
- $\vartheta_{int,i}$ - unutarnja projektna temperatura grijanog prostora [°C];
- ϑ_e - vanjska projektna temperatura [°C].

Jednadžbom (4.2) definirani su projektni ventilacijski gubici prostorije:

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (\vartheta_{int,i} - \vartheta_e) \quad (4.2)$$

gdje su:

- $\Phi_{V,i}$ - projektni ventilacijski gubici prostorije [W];
- $H_{V,i}$ - koeficijent ventilacijskih toplinskih gubitaka [W/K];
- $\vartheta_{int,i}$ - unutarnja projektna temperatura grijanog prostora [°C];
- ϑ_e - vanjska projektna temperatura [°C].

Koeficijenti transmisijskih i ventilacijskih gubitaka u ovom radu nisu detaljno objašnjeni te se izrazi za iste mogu pronaći u normi [14].

Projektne toplinske gubitke prostorije (Φ_i) dobiveni su kao zbroj projektne transmisijске i ventilacijske gubitke:

$$\Phi_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} \quad (4.3)$$

U prostorijama u kojima dolazi do prekida grijanja, a samim time i pada temperature, treba osigurati dodatnu toplinu za zagrijavanje kako bi se postigla projektna temperatura prostorije (4.4).

$$\Phi_{RH,i} = A_i \cdot f_{RH} \quad (4.4)$$

gdje su:

- $\Phi_{RH,i}$ - toplinski tok za zagrijavanje zbog prekida grijanja [W];
- A_i - površina poda grijanog prostora sa $\frac{1}{2}$ debljine zidova [W/m²];
- f_{RH} - korekcijski faktor ovisan o vremenu zagrijavanja i pretpostavljenom padu temperature za vrijeme prekida rada [W/m²];

Projektno toplinsko opterećenje pojedine prostorije ($\Phi_{HL,i}$) dobiveno je kao zbroj toplinskih gubitaka prostorije i toplinskog toka za zagrijavanje prostorije uslijed prekida grijanja:

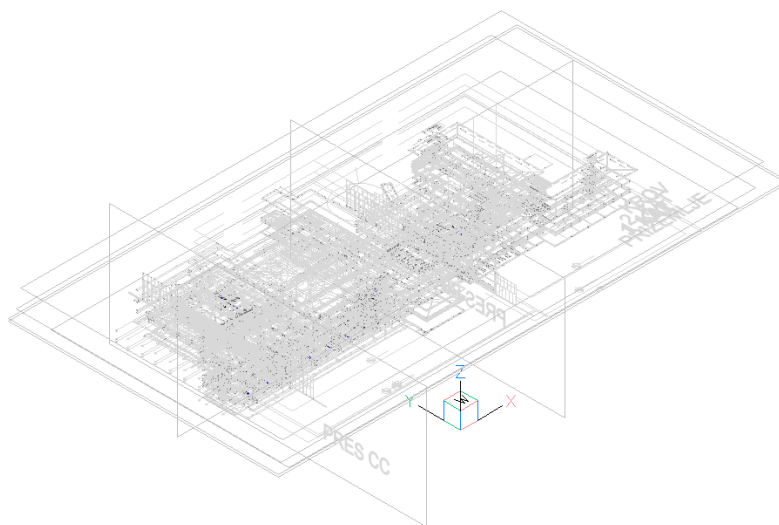
$$\Phi_{HL,i} = \Phi_i + \Phi_{RH,i} \quad (4.5)$$

Ukupno toplinsko opterećenje zgrade (Φ_{HL}) dobiveno je zbrajanjem projektnih toplinskih opterećenja prostorija:

$$\Phi_{HL} = \Sigma \Phi_{HL,i} \quad (4.6)$$

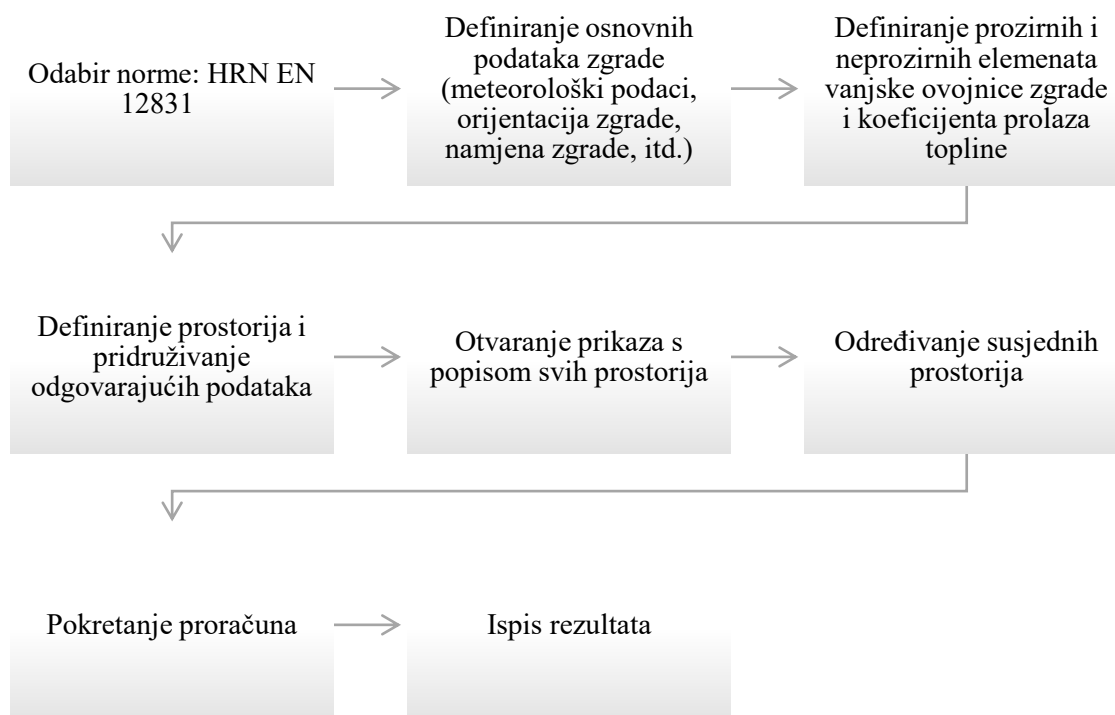
4.1.2. Tijek proračuna projektnog toplinskog opterećenja

Proračun projektnog toplinskog opterećenja proveden je prema normi [14] računalnim programom *BricsCAD AX3000*[®]. Računalni program se, osim za proračune, koristi za trodimenzionalno modeliranje i projektiranje termotehničkih sustava. Najprije se u programu otvaraju arhitektonske podloge (tlocrti, presjeci...) pomoću kojih se stvara „kostur“ trodimenzionalnog modela zgrade (Slika 8).



Slika 8. Struktura trodimenzionalnog modela zgrade

Nakon modeliranja trodimenzionalnog modela zgrade, proračun započinje prema dijagramu toka prikazanom na Slici 9.



Slika 9. Tijek proračuna u BricsCAD AX3000®

Slika 10 prikazuje definiranu prostoriju 00.08 – WC invalida sa svim potrebnim informacijama za proračun te dobivenim vrijednostima projektnog toplinskog opterećenja računalnim izračunom.

The screenshot shows the BricsCAD AX3000 software interface for heat load calculation. The main window displays a table of room components and their properties. The table has columns for Orient., Type, Includi, Components, g/kJ·h·K, Factor 12831, Temp. [°C], Temp. i [°C], Room, No., Width [m], Height/L [m], Area [m²], and U W/m²·K. The data rows show components like BF, CE, SW, SE, NE, and NW with their respective properties. A summary table at the bottom provides overall results for EN 12831.

Room/floor	Components	g/kJ·h·K	Factor 12831	Temp. [°C]	Temp. i [°C]	Room	No.	Width [m]	Height/L [m]	Area [m²]	U W/m²·K
00.08 WC INV.	BF 0 P1	...	g	0,263	10,00			2,6750	1,7500	4,6812	0,200
	CE 0 MK	...	b	0,000	20,00			2,6750	1,7500	4,6812	0,600
	SW 90 UZ	...	b	0,000	20,00	00.11		1,7500	2,8000	4,9000	0,600
	SE 90 UZ	...	b	0,000	20,00	00.07		2,6750	2,8000	7,4900	0,600
	NE 90 UZ	...	b	0,000	20,00	00.11		1,7500	2,8000	4,9000	0,600
	NW 90 UZ	...	b	0,000	20,00	00.11		2,6750	2,8000	7,4900	0,600
Σ	Windows: 0, Doors: 0										

General		Ventilation heat loss		Heatload	
Area gross	4,6812 m²	H _v	0,96 W/K	Norm heat load	49,00 W
Area net	4,0400 m²	Φ _v	37,00 W	Net heat load absolute	49,00 W
Volume	11,312 m³			Net heat load per area	10,37 W/m²
Temperature	20,0 °C			Net heat load per volume	4,29 W/m³

Slika 10. Prikaz računalnog izračuna toplinskog opterećenja u *BricsCAD AX3000*[®] za jednu prostoriju

S lijeve strane prozora nalazi se popis svih definiranih prostorija. Lijevim klikom miša otvara se željena prostorija. U središnjem dijelu nalazi se popis građevnih elemenata koji čine odabranu prostoriju. Za primjer 00.08 – WC invalida, to su pod prema tlu (P1), međukatna konstrukcija (MK) i unutrašnji zidovi (UZ) koji graniče s drugim prostorijama (00.07 i 00.11). Svaki građevni element je opisan orijentacijom (prva kolona), tipom građevnog elementa (druga kolona), kutom u odnosu na horizontalu (treća kolona) te temperaturom. Površina koju zauzima pojedini građevni element nalazi se u pretposljednjoj koloni, dok su koeficijenti prolaza topline prikazani u posljednjoj koloni. Iznad središnjeg prozora pod *Room/floor* mogu se korigirati ulazni podaci prostorije, dok se pod *Components* mogu dodati građevni elementi (prozori, zidovi...). Računalni izračun prikazan je dnu središnjeg prozora. Rezultati se mogu

ispisati pomoću *Print active room* za pojedinačnu prostoriju ili *Print...* za sve/odabrane prostorije.

4.1.3. Ulazni podaci i rezultati proračuna projektnog toplinskog opterećenja

Ulazni podaci korišteni u računalnom programu *BricsCAD AX3000*[®] i rezultati proračuna na razini katnosti zgrade prikazani su u Tablici 7. Ulazni podaci i rezultati za svaku prostoriju pojedinačno nalaze se u Prilogu I.

Tablica 7. Ulazni podaci i vrijednosti projektnog toplinskog opterećenja dograđenog dijela zgrade

	A_i [m ²]	ϑ_e [°C]	$\vartheta_{int,i}$ [°C]	Φ_{HL} [W]
PRIZEMLJE	1897,61	-15	15/18/20/24*	62 996
PRVI KAT	533,60	-15	20	18 670
DRUGI KAT	536,05	-15	20	27 310
			Σ	108 976
*unutarnja projektna temperatura ovisi o namjeni prostorije				

Budući da meteorološki podaci za grad Đurđevac nisu dostupni, korišteni su podaci za najbliži grad – Bjelovar [17]. Vanjska projektna temperatura iznosi -15°C, kako je navedeno u Tablici 7.

4.2. Proračun projektnog rashladnog opterećenja prema normi VDI 2078

Proračun projektnog rashladnog opterećenja dograđenog dijela zgrade proveden je za sportske dvorane, učionice i kabinete, blagovaonicu te kuhinju koristeći normu VDI 2078 [15]. Ostale prostorije, poput stubišta, hodnika i sanitarija neće imati sustav hlađenja te za njih proračun nije proveden.

Proračun se provodi s ciljem određivanja toplinskog toka koji treba odvoditi iz prostorije u vanjski okoliš za vrijeme ljetnih i prijelaznih razdoblja. Toplinski tok se odvodi kako bi se održavali odgovarajući uvjeti toplinske ugodnosti koji povoljno djeluju na raspoloženje i produktivnost korisnika. Pregled osnovnih korištenih formula, tijekom proračuna, ulaznih podataka i rezultata slijedi u idućim potpoglavljima.

4.2.1. Pregled osnovnih jednadžbi norme VDI 2078

Prema normi [15], ukupno projektno rashladno opterećenje prostorije određuje se kao zbroj vanjskih i unutarnjih toplinskih dobitaka:

$$\Phi_{CL,i} = \Phi_{A,i} + \Phi_{I,i} \quad (4.7)$$

gdje su:

- $\Phi_{CL,i}$ - projektno rashladno opterećenje prostorije [W];
- $\Phi_{A,i}$ - vanjsko toplinsko opterećenje [W];
- $\Phi_{I,i}$ - unutarnje toplinsko opterećenje [W].

Vanjsko toplinsko opterećenje računa se prema jednadžbi (4.8):

$$\Phi_{A,i} = \Phi_{W,i} + \Phi_{T,i} + \Phi_{FL,i} + \Phi_{S,i} \quad (4.8)$$

gdje su:

- $\Phi_{W,i}$ - toplinski tok predan prostoriji konvekcijom kroz vanjske zidove [W];

- $\Phi_{T,i}$ - toplinski tok predan prostoriji konvekcijom kroz prozore [W];
- $\Phi_{FL,i}$ - toplinski tok predan prostoriji infiltracijom kroz zazole [W];
- $\Phi_{S,i}$ - toplinski tok predan prostoriji zračenjem preko ostakljenih površina [W].

Jednadžbom (4.9) definirano je unutarnje toplinsko opterećenje:

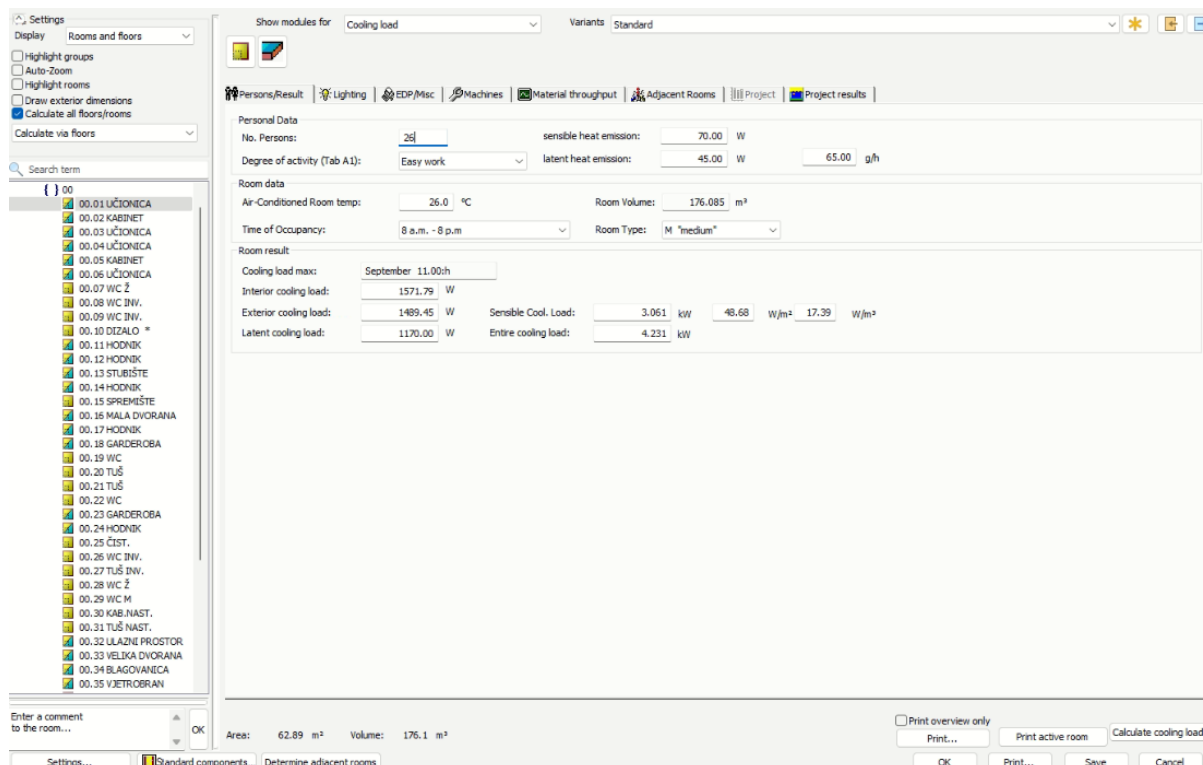
$$\Phi_{I,i} = \Phi_{P,i} + \Phi_{B,i} + \Phi_{M,i} + \Phi_{G,i} + \Phi_{R,i} \quad (4.9)$$

gdje su:

- $\Phi_{P,i}$ - toplinski tok predan prostoriji od osoba [W];
- $\Phi_{B,i}$ - toplinski tok predan prostoriji rasvjetom [W];
- $\Phi_{M,i}$ - toplinski tok predan prostoriji od strojeva i uređaja [W];
- $\Phi_{G,i}$ - toplinski tok predan prostoriji od prolaznog materijala kroz prostoriju [W];
- $\Phi_{R,i}$ - toplinski tok predan prostoriji od susjednih prostorija preko unutarnjih površina [W].

4.2.2. Tijek proračuna projektnog rashladnog opterećenja

Prema ranije spomenutom opisu, proračun projektnog rashladnog opterećenja proveden je prema normi [15] koristeći računalni program *BricsCAD AX3000*[®]. Ulazni podaci o zgradi i prostorije definirani su tijekom proračuna projektnog toplinskog opterećenja te iste nije potrebno ponovno unositi.



Slika 11. Prikaz prozora za izračun rashladnog opterećenja za jednu prostoriju

Postavke za računalni izračun projektnog rashladnog opterećenja unose se za svaku prostoriju pojedinačno. Slika 12 prikazuje prozor u koji se unose potrebni podaci prema kategorijama toplinskih dobitaka za prostoriju 00.01 - Učionica. U kategoriji *Persons/Results* unosi se broj ljudi, odabire raspored korištenja prostorije te izračunava rashladno opterećenje. Ostali toplinski dobitci unose se otvaranjem pojedinačne kategorije (*Lightning, Machines...*). Projektno rashladno opterećenje pojedinačne prostorije dobiveno računalnim izračunom se ne pojavljuje nužno istovremeno za sve prostorije (ovisi o orijentaciji prostorije i dobitcima Sunčevog zračenje koja tijekom dana variraju).

4.2.3. Ulazni podaci i rezultati proračuna projektnog rashladnog opterećenja

Ulazni podaci korišteni u računalnom programu *BricsCAD AX3000*[®] te rezultati proračuna prikazani su u Tablici 8.

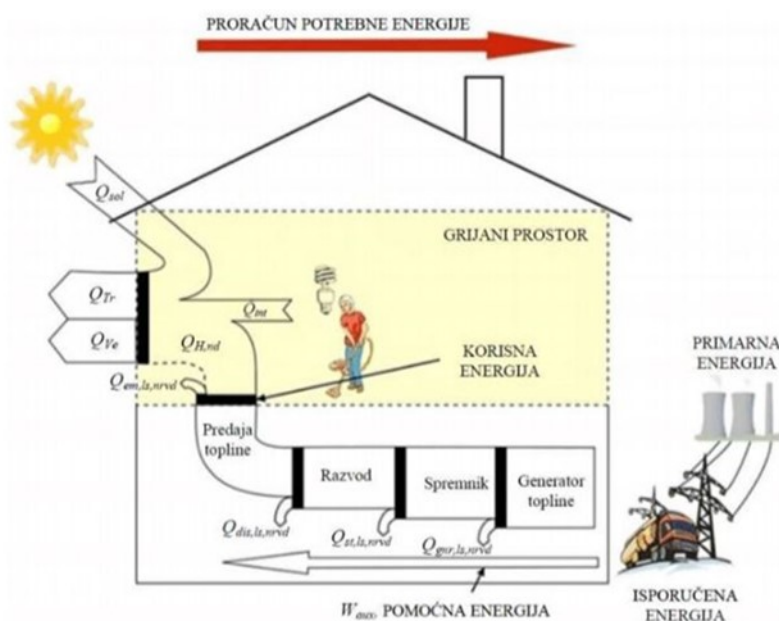
Tablica 8. Ulazni podaci i vrijednosti projektnog rashladnog opterećenja

	A_i [m ²]	ϑ_e [°C]	$\vartheta_{int,i}$ [°C]	Φ_{HL} [W]
PRIZEMLJE	1 314	+32	26	96 462
PRVI KAT	313,30	+32	26	18 809
DRUGI KAT	313,36	+32	26	20 273
			Σ	135 544

Budući da meteorološki podaci za grad Đurđevac nisu dostupni, korišteni su podaci za najbliži grad – Bjelovar [17]. Vanjska projektna temperatura iznosi 32°C. Pretpostavljeno je hlađenje svih prostorija na 26°C. Tijekom unosa parametara komponenti koje čine projektno rashladno opterećenje, pretpostavljen je broj ljudi i raspored u ovisnosti o namjeni prostora. Dobici od rasvjete pretpostavljeni su na 10 W/m² dok su dobici od strojeva i opreme pretpostavljeni s 200 W/uređaj s uvođenjem korekcije preko faktora upotrebe (ovisno o namjeni prostora).

4.3. Proračun godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje prema HRN EN ISO 13790

U svrhu usporedbe različitih izvedbi termotehničkih sustava treba izračunati potrebnu energiju za grijanje ($Q_{H,nd}$) i hlađenje ($Q_{C,nd}$). Prema [12] potrebna energija za grijanje/hlađenje je računski određena količina topline koju sustavom grijanja/hlađenja treba tijekom jedne godine dovesti u zgradu za održavanje unutarnje projektne temperature u zgradi tijekom razdoblja grijanja/hlađenja zgrade. Potrebna energija zgradi se dovodi tehničkim sustavom koji za svoj rad koristi isporučenu energiju. Prema Slici 12 isporučena energija jednaka je 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. Za provođenje tehno-ekonomske analize ključno je imati uvid u vrijednost isporučene energije, budući da ona predstavlja važan indikator potrošnje.



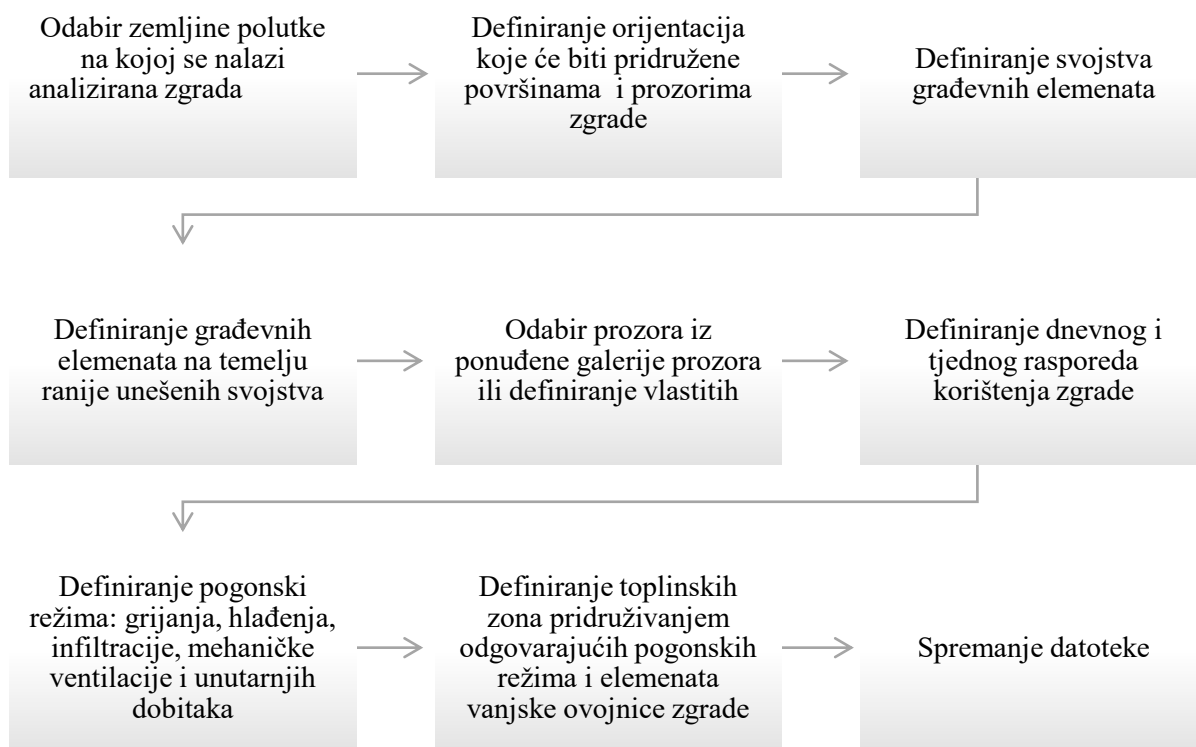
Slika 12. Energetski tok kroz zgradu s termotehničkim sustavom za grijanje [18]

U idućim potpoglavljima slijedi pregled tijeka proračuna, ulaznih podataka i rezultata.

4.3.1. Tijek proračuna godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje

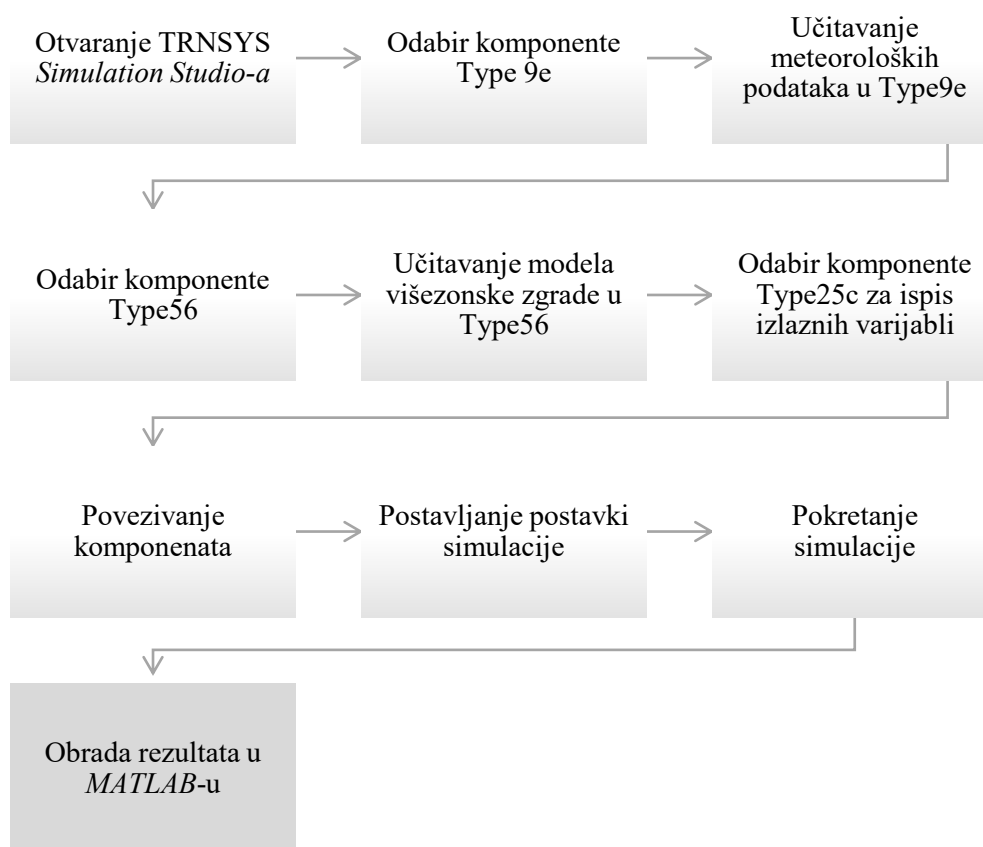
Satni proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje cijelog objekta (dograđenog i postojećeg dijela) provodi se računalnim programom *TRNSYS*[®], uz korištenje *Algoritma za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790* [16].

Prije modeliranja energijskih potreba, zgradu je potrebno podijeliti na toplinske zone. Podjela na zone izvršena je sukladno normi HRN EN ISO 52016-1:2017 [19] te se analizirana zgrada sastoji od 46 toplinskih zona. Zatim se u *Trnbuild*-u, korisničkom sučelju *TRNSYS*[®]-a izrađuje model višezonske zgrade. Tijek izrade modela višezonske zgrade u *Trbuild*-u prikazuje Slika 13.



Slika 13. Tijek izrade modela višezonske zgrade u *Trbuild*-u

Po završetku definiranja zona i spremanju datoteke prelazi se u glavno korisničko sučelje *TRNSYS*[®]-a *Simulation Studio* gdje se pokreće simulacija. Tijek odabira komponenti i pokretanja simulacije u *TRNSYS Simulation Studio*-u prikazuje Slika 14.



Slika 14. Tijek odabira komponenti i pokretanja simulacije u *TRNSYS Simulation Studio-u*

Komponenta *Type9e* služi za čitanje tekstualnih datoteka (meteorološki podaci, temperature dobavnog zraka mehaničkom ventilacijom, itd.) te predstavljaju ulazne podatke komponenti *Type56*. Odabir broja komponenti *Type9e* ovisi o broju ulaznih podataka. Komponenta *Type56* predstavlja model višezonske zgrade te se u istu učitava spremljena datoteka modela zgrade iz *Trnbuild* sučelja. Za ispis izlaznih varijabli (potrebne energije za grijanje i hlađenje) u tekstualnu datoteku treba dodati komponentu *Type25c*. Tekstualna datoteka s izlaznim varijablama otvara se u *MATLAB*[®]-u radi daljnje obrade rezultata.

4.3.2. Ulazni podaci proračuna godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje

Prema ranije spomenutom opisu, analizirana zgrada se nalazi na sjevernoj polutci te su za istu definirane sjeverozapadna, sjeveroistočna, jugozapadna i jugoistočna orijentacija. Meteorološki podaci su dobiveni kao osrednjene vrijednosti podataka za glavne strane svijeta (radi

pojednostavljenja i dostupnosti podataka). Svojstva komponenata koje čine pojedini građevni element mogu se pronaći u dokumentaciji mape fizike zgrade [11], dobivenoj od arhitektonskog ureda, ali isti ovdje nisu detaljno opisani. Koeficijenti prolaza topline građevnih elemenata korišteni prilikom modeliranja zgrade prikazuje Tablica 5. Prozori se odabiru iz *Trnbuild* baze podataka. Pri odabiru, svojstva prozora trebaju biti što sličnija stvarnima. Tablica 9 prikazuje svojstva odabranih prozora.

Tablica 9. Svojstva odabranih prozora u *Trnbuild*-u

Koeficijent prolaza topline, U [W/m ² K]	Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje, g [-]
POSTOJEĆI DIO - ŠKOLA	
1,1	0,47
POSTOJEĆI DIO – SPORTSKA DVORANA	
1,50	0,46
DOGRAĐENI DIO – ŠKOLA I SPORTSKA DVORANA	
1,46	0,52

U nastavku su definirani pogonski režimi. Budući da se predmetna zgrada koristi za nastavne i sportske aktivnosti treba definirati dva rasporeda korištenja zgrade. Također, postavne temperature grijanja razlikuju se za sportske dvorane i prostorije školskog dijela. Korišteni podaci nalaze se u Tablici 10.

Tablica 10. Pogonski režimi

Parametar	Vrijednost
Raspored korištenja sportskih dvorana i	08:00-23:00 (6 dana u tjednu)
Raspored korištenja školskih prostorija	08:00-20:00 (5 dana u tjednu)
Postavna temperatura grijanja sportskih	18 °C
Postavna temperatura grijanja školskih prostorija	20 °C

Postavna temperatura hlađenja	22 °C
Unutarnji toplinski dobitci	10 W/m ² u periodu korištenja zgrade, 0 W/m ² kada se zgrada ne koristi
Izmjena zraka uslijed infiltracije – postojeći	0,6 h ⁻¹
Izmjena zraka uslijed infiltracije – dograđeni dio, prostori s mehaničkom ventilacijom	0,1 h ⁻¹ kada se zgrada ne koristi, 0 h ⁻¹ u periodu korištenja zgrade
Izmjena zraka uslijed infiltracije – dograđeni dio, hodnici	1,7 h ⁻¹

Pogonski režimi grijanja, hlađenja i unutarnjih dobitaka unose se kao funkcija rasporeda korištenja zgrade. Infiltracija se za postojeći dio zgrade unosi kao konstantna vrijednost dok se za dograđeni dio zgrade i prostorije s mehaničkom ventilacijom unosi kao funkcija rasporeda korištenja zgrade. Mehanička ventilacija je pretpostavljena za dograđeni dio zgrade u periodu korištenja. Pretpostavljeni je sustav mehaničke ventilacije s rekuperacijom zraka. Temperatura dobavnog zraka unosi se kao ulazni podatak. Vrijednosti temperatura dobavnog zraka izračunava se u *MATLAB*[®]-u za svih 8760 h u godini prema pojednostavljenoj jednadžbi:

$$T_{ubacivanja} = T_{ok} + \eta \cdot (T_{odsis} - T_{ok}) \quad (4.10)$$

gdje su:

$T_{ubacivanja}$ - temperatura dobavnog zraka [°C];

T_{ok} - temperatura vanjskog zraka [°C];

T_{odsis} - temperatura odsisnog zraka [°C];

η - stupanj rekuperacije [-];

Broj izmjena zraka je za svaku mehanički ventiliranu zonu određen prema *Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790* [16]. Stupanj rekuperacije ovisi o korištenoj klima komori za ventilaciju pojedine zone. U Tablici 11 definirani su svi potrebni podaci za mehaničku ventilaciju.

Tablica 11. Broj izmjena zraka i stupanj rekuperacije za sustave s mehaničkom ventilacijom

Zona	Broj izmjene zraka	Stupanj rekuperacije (zima/ljeto) [%]
Z1	1,13	81/76
Z2	3,12	93/83
Z3	3,22	88
Z8	2,89	81/76
Z9	6,49	81/76
Z10	2,90	93/53
Z11	24,61	65/56
Z12	3,22	88
Z17	3,22	88

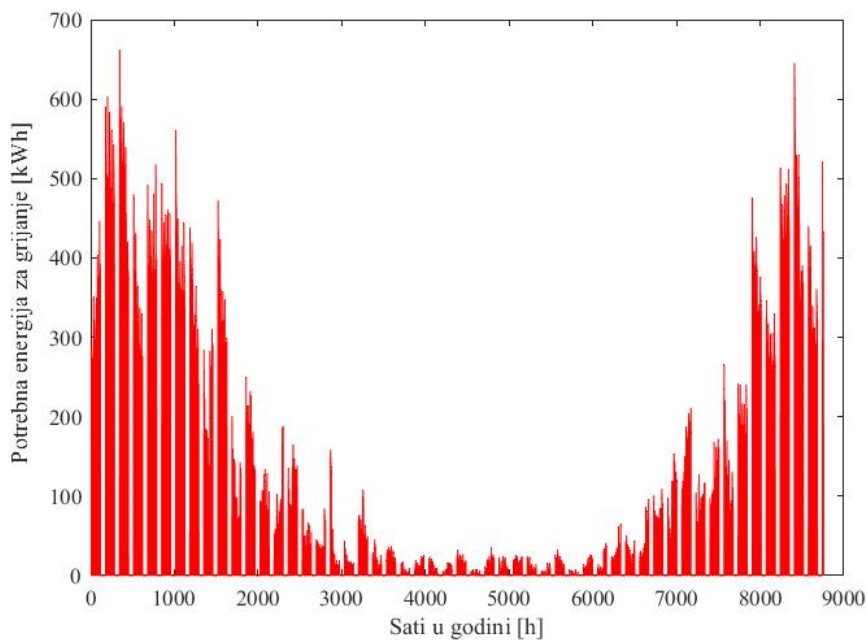
4.3.3. Rezultati proračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje

Pokretanjem simulacije dolazi se do rezultata potrebne energije za grijanje i hlađenje postojećeg i dograđenog dijela zgrade. Potrebna energija za grijanje iznosi 436 113 kWh/god, 63 831 kWh/god za hlađenje te obuhvaća potrebnu energiju za pripremu zraka u vodenim grijačima i hladnjacima za potrebe mehaničke ventilacije. U Tablici 12 prikazane su vrijednosti odvojeno za dograđeni i postojeći dio. Ako se potrebne energije svedu na korisnu površinu od 5 919 m², potrebna energija za grijanje iznosi 73 kWh/m²a te 11 kWh/m²a za hlađenje. Satne potrebe zgrade za grijanjem i hlađenjem u jednoj godini prikazuju Slika 15 i Slika 16.

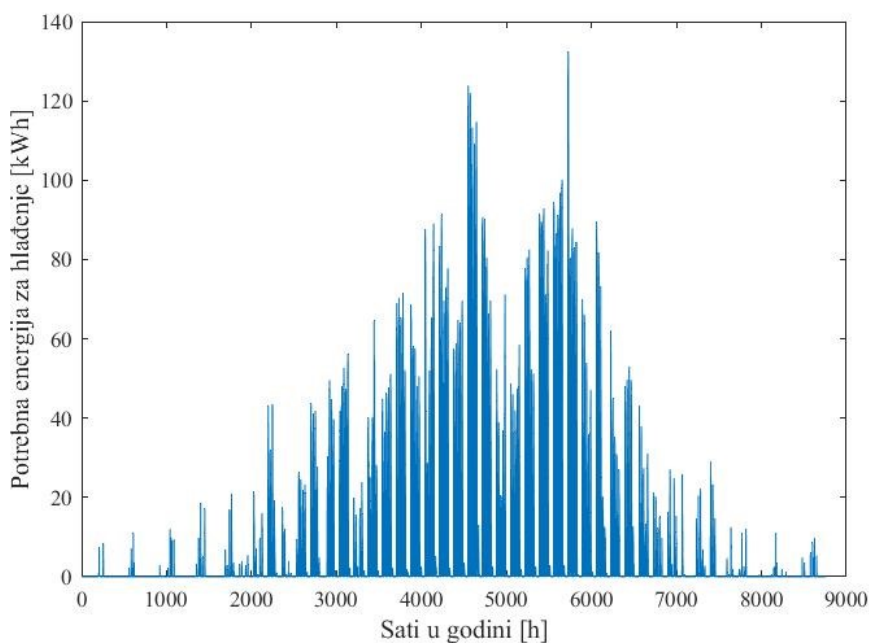
Tablica 12. Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje dograđenog i postojećeg dijela zgrade

	$Q_{H,nd}$ [kWh/god]	$Q_{C,nd}$ [kWh/god]
Dograđeni dio	204 983	58 147
Postojeći dio	231 130	5 684
Σ	436 113	63 831

Zbog pretpostavke da se svih 5 919 m² korisne površine ne hladi te da se u postojećem dijelu hladi samo sportska dvorana, vrijednost potrebne energije za hlađenje je značajno niža od potrebne energije za grijanje.



Slika 15. Satne vrijednosti potrebne energije za grijanje cijele zgrade



Slika 16. Satne vrijednosti potrebne energije za hlađenje cijele zgrade

5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA RAZLIČITIH IZVEDBI DIZALICA TOPLINE

U nastavku su provedene tehno-ekonomske analize različitih izvedbi dizalica topline prema vrsti toplinskog spremnika, s ciljem odabira tehnički i financijski prihvatljivog rješenja. Proračunate su satne vrijednosti faktora grijanja (*COP*) i faktora hlađenja (*EER*) korištenjem programskog jezika *MATLAB*[®]. Na temelju dobivenih vrijednosti i prethodno izračunatih potrebnih energija za grijanje i hlađenje, određena je potrošnja električne energije za pogon dizalica topline. Budući da potrošnja električne energije čini samo jedan dio ukupnih troškova, definirani su i drugi troškovi. Pregled ukupnih troškova za svaku od izvedba dizalica topline slijedi u idućim potpoglavljima.

5.1. Potrošnja električne energije za pogon dizalica topline

Nakon određenih potrebnih energija za grijanje i hlađenje u svakom satu (poglavlje 4.3.3.), u sljedećem su koraku proračunate satne vrijednosti faktora grijanja (eng. *Coefficient of Performance* – *COP*) i faktora hlađenja (eng. *Energy Efficiency of Ratio* – *EER*). Faktor grijanja, *COP* definira se kao omjer učina grijanja i električne snage za pogon kompresora i pomoćnih komponenti:

$$COP = \frac{\Phi_H}{P_{EL}} \quad (5.1)$$

gdje su:

Φ_H - učin grijanja (toplinski tok predan kondenzatorom) [kW];

P_{EL} - električna snaga za pogon dizalice topline [kW].

Slično je definiran faktor hlađenja *EER*, kao omjer učina hlađenja i električne snage za pogon kompresora i pomoćnih komponenti:

$$EER = \frac{\Phi_C}{P_{EL}} \quad (5.2)$$

Φ_C - učin hlađenja (toplinski tok preuzet na isparivaču) [kW];

P_{EL} - električna snaga za pogon dizalice topline [kW].

COP i *EER* dizalice topline, za odabrani uređaj, ovise o:

- temperaturi toplinskog spremnika (zrak, tlo, voda);
- temperaturi polaza vode prema ogrjevnim/rashladnim tijelima;
- djelomičnom opterećenju dizalice topline (eng. *part load ratio* – PLR).

Od proizvođača opreme preuzete su vrijednosti *COP*-a i *EER*-a u različitim radnim točkama i za različite izvedbe dizalica topline. Korištenjem funkcije *polyfitn* u *MATLAB*[®]-u izračunati su polinomi koji opisuju ovisnost *COP*-a i *EER*-a o ranije spomenutim parametrima. Pretpostavke koje su usvojene zbog pojednostavljenja prilikom proračuna:

- temperatura izvora (ponora u hlađenju) topline: satne vrijednosti za dizalicu topline zrak-voda, osrednjene vrijednosti po mjesecima za dizalicu topline tlo-voda, konstantna vrijednost za dizalicu topline voda-voda,
- temperatura polaza vode prema ogrjevnim/rashladnim tijelima: konstantna vrijednost za sve izvedbe dizalica topline,
- djelomično opterećenje dizalice topline: promjenjiva vrijednost koja ovisi o potrebama predmetne zgrade i raspoloživom učinku ovisno o temperaturi toplinskih spremnika.

Dodatno je uvedena korekcija *COP*-ova i *EER*-ova uslijed niskih vrijednosti djelomičnog opterećenja. Minimalno djelomično opterećenje dizalice topline iznosi 40%, a u slučaju nižih vrijednosti djelomičnog opterećenja dolazi do cikličkog rada dizalice topline. U satima kada je stvarno opterećenje manje od minimalnog djelomičnog opterećenja dizalice topline, *COP* i *EER* su korigirani prema normi HRN EN 14825. Izračunatim polinomima određeni su *COP*-ovi i *EER*-ovi za svaki sat u godini.

Korištenjem jednadžbi (5.1) i (5.2) te izračunatim satnim vrijednostima *COP*-ova i *EER*-ova određena je potrošnja električne energije za pogon dizalice topline. Na temelju dobivenih rezultata potrošnje električne energije i potrebne energije za grijanje i hlađenje izračunati su sezonski faktor grijanja *SCOP* i sezonski faktor hlađenja *SEER*. Navedeni faktori uzimaju u obzir promjenjive uvjete kroz cijelu godinu i pružaju potpuniji uvid u učinkovitost dizalice topline, prema [20]:

$$SCOP = \frac{\sum Q_H}{\sum E_H} \quad (5.3)$$

$$SEER = \frac{\sum Q_C}{\sum E_C} \quad (5.4)$$

gdje su:

- Q_H - godišnja potrebna energija za grijanje [kWh/a];
- E_H - godišnja potrošnja električne energije za grijanje [kWh/a];
- Q_C - godišnja potrebna energija za hlađenje [kWh/a];
- E_C - godišnja potrošnja električne energije za hlađenje [kWh/a].

U analizi potrošnje električne energije pretpostavljeno je korištenje niskotemperaturnog režima isključivo za dograđeni dio zgrade dok se za potrebe postojećeg dijela zgrade prelazi na „Booster“ dizalicu topline i visokotemperaturni režim grijanja. Potrošnja zemnog plina računata je u kombinaciji s izvedbom dizalice topline tlo-voda za potrebe plinskog kotla kao sekundarnog izvora topline pri radu u najhladnijem dijelu godine. Iako dizalica topline tehnički može zadovoljiti navedene potrebe, zbog velikog omjera potrebne energije za grijanje i hlađenje uvedene su određene pretpostavke pri dimenzioniranju koje su objašnjene u nastavku rada.

U Tablici 14 prikazani su rezultati dobiveni izračunom.

Tablica 13. Vrijednosti potrošnje električne energije za grijanje i hlađenje, SCOP i SEER pojedine izvedbe dizalice topline

Izvedba dizalice topline	Potrošnja električne energije za grijanje [kWh]	Potrošnja zemnog plina pri bivalentnom radu [kWh]	Potrošnja električne energije za hlađenje [kWh]	SCOP	SEER
Niskotemperaturna zrak-voda	82 364	0	33 194	2,5	2,0
Niskotemperaturna tlo-voda	42 968	132 596	16 152	4,3	4,0

Niskotemperaturna voda-voda	52 278	0	16 756	3,9	3,8
Visokotemperaturna („Booster“) voda-voda	51 864	0	0	4,5	-

Izračunate vrijednosti *SCOP*-a i *SEER*-a direktno su uvjetovane početnim pretpostavkama analize, modelom satnih izračuna vrijednosti *COP*-a i *EER*-a, potrebama zgrade te karakteristikom dizalica topline odabranog proizvođača opreme. U osnovnoj školi Đurđevac dominantna su toplinska opterećenja u odnosu na rashladno opterećenje. Preuzete dizalice topline iz selekcije tako u režimu grijanja rade u intervalu opterećenja kojim se iskorištava potencijal kapaciteta dizalica topline dok su u režimu hlađenja predimenzionirane zbog malog opterećenja. Na razini modeliranja, više vrijednosti sezonske učinkovitosti grijanja i hlađenja postigle bi se korištenjem krivulje grijanja/hlađenja kojima se opisuje unutarnja projektna temperatura u prostoriji te iskorištenjem dodatnog plinskog izvora kod dizalica topline zrak-voda kako bi se smanjio ugrađeni kapacitet. Dodatno se povećanje učinkovitosti može postići korištenjem više dizalica topline manjeg kapaciteta ili više dizalica topline različitih kapaciteta kako bi u režimu hlađenja radila pri višim djelomičnim opterećenjima i boljim *EER*-ovima. Detaljnija analiza povećanja sezonske učinkovitosti grijanja i hlađenja optimizacijom izvora topline nije u opsegu ovog diplomskog rada, a najveći potencijal za povećanje sezonske učinkovitosti optimizacijom izvora topline je kod izvedbe zrak-voda.

5.2. Energetska i ekonomska analiza

U prethodnom je poglavlju za svaku izvedbu dizalica topline izračunata potrošnja električne energije za grijanje i hlađenje, odnosno isporučena energija. Potonja predstavlja energiju koju je potrebno isporučiti dizalici topline za rad, a koju korisnik plaća. Poznavanje podatka o isporučenoj energiji omogućava detaljniju energetska analizu. Naime, za razumijevanje energetske efikasnosti i ekološkog utjecaja pojedinog sustava treba izračunati primarnu energiju i emisije CO₂. Primarna energija predstavlja energiju potrebnu za proizvodnju isporučene energije i povezane emisije CO₂ tijekom procesa proizvodnje. Pretvorba isporučene energije u primarnu omogućena je korištenjem faktora primarne energije. U Tablica 15

prikazane se izračunata primarne energije i emisije CO₂ za sve izvedbe dizalice topline. Faktori primarne energije i specifične emisije CO₂ (kg CO₂/MWh) za električnu energiju i zemni plin preuzeti su iz [21].

Tablica 14. Vrijednosti primarne energije i emisija CO₂ dizalica topline i plinskog kotla

Izvor topline	Faktor primarne energije [-]	Specifične emisije CO₂ [kg/MWh]	Primarna energija, E_{prim} [kWh]	Emisije CO₂ [kg]
Niskotemperaturna DT zrak-voda	1,614	234,81	186 511	27 134
Niskotemperaturna DT tlo-voda	1,614	234,81	95 419	13 882
Plinski kotao	1,095	220,20	145 193	29 198
Niskotemperaturna DT voda-voda	1,614	234,81	111 421	16 210
Visokotemperaturna „Booster“ DT voda-voda	1,614	234,81	83 708	12 178

Prije provođenja ekonomske analize uvedene su iduće pretpostavke:

- definirani su troškovi koji su različiti za pojedinu izvedbu dizalice topline
- oprema u strojarnici koja je zajednička analiziranim sustavima (akumulacijski spremnici, razdjelnici, sabirnici, itd.) nije uključena u ukupne troškove prilikom analize

Za izračun potrošnje električne energije, određena je jedinična cijena električne energije od 0,13820 €/kWh prema stranici HEP-a za kategoriju poduzetništvo [22]. Tarifni model predmetne zgrade je HEP MAX. Uzimajući u obzir raspored korištenja zgrade i period rada sustava, korištena je cijena za viši tarifni model. Kako se za izvedbu dizalica topline tlo-voda i Scenarij 2 predviđa upotreba plinskog kotla u najhladnijim mjesecima (studeni, prosinac i

siječanj), određena je i jedinična cijena zemnog plina. Jedinična cijena zemnog plina u iznosu od 0,05845 €/kWh preuzeta je stranice Međimurje plin d.o.o. [23].

U nastavku su za pojedinu izvedbu dizalica topline definirani investicijski troškovi, troškovi održavanja, pogonski troškovi te dodatni troškovi, ako postoje. Iskazani troškovi dobiveni su od proizvođača opreme (za glavne komponente sustava) te procjenom istih na temelju informativnih ponuda i troškova za izvedene sustave sličnog kapaciteta.

U usporedbi s dizalicama topline tlo-voda i voda-voda, kod **dizalica topline zrak-voda** ne postoje specifični zahtjevi za određivanjem karakteristika izvora topline što značajno smanjuje trošak investicije. Međutim, budući da se radi o obrazovnoj ustanovi, dobava i montaža akustičkog kućišta za prigušivanje emisija buke u okoliš dodatno povećava troškove investicije. Troškovi održavanja relativno su niski i jednostavni. Uključuju redovite provjere i održavanja te kontrolu i upravljanje sustavom.

Troškovi električne energije ovise o uvjetima u vanjskom okolišu. Kako je spomenuto u poglavlju 2., najveći nedostatak dizalica topline zrak-voda je u nestabilnosti vanjske temperature, a koja izravno utječe na potrošnju dizalice topline. U hladnijim mjesecima učinkovitost dizalice topline opada, a raste potrošnja električne energije potrebne za pogon kompresora i pomoćnih komponenti. Potonjem se može pristupiti bivalentnom izvedbom sustava s dizalicom topline zrak-voda i plinskog kotla čime bi se smanjili troškovi investicije dizalice topline te povećao sezonski faktor grijanja.

Za **dizalice topline zrak-voda** troškovi su prikazani u Tablici 16.

Tablica 15. Ukupni troškovi izvedbe s dizalicom topline zrak-voda

Opis stavke	Cijena [€]
INVESTICIJSKI TROŠKOVI	
Niskotemperaturna dizalica topline	126 390
Visokotemperaturna dizalica topline	58 289
Troškovi ugradnje s akustičkim kućištem	40 000
Priprema za ugradnju dizalica topline i povezivanje sa strojarnicom (armirano betonsko postolje, čelična podkonstrukcija,	20 000

antivibracijska podloga, prodor, izolacija, ožičenja, itd.)	
Σ	239 684
TROŠKOVI RADA (troškovi održavanja + pogonski troškovi)	
Redovito godišnje održavanje	2 500
Trošak električne energije za rad dizalica topline	23 138
Obračunska vršna radna snaga dizalica topline	6 100
Σ	31 738

Za **dizalice topline tlo-voda** prvo su analizirani mogući scenariji korištenja dizalice topline s obzirom na specifične potrebe za grijanje i hlađenje te raspoloživog prostora za ugradnju polja izmjenjivača u tlu:

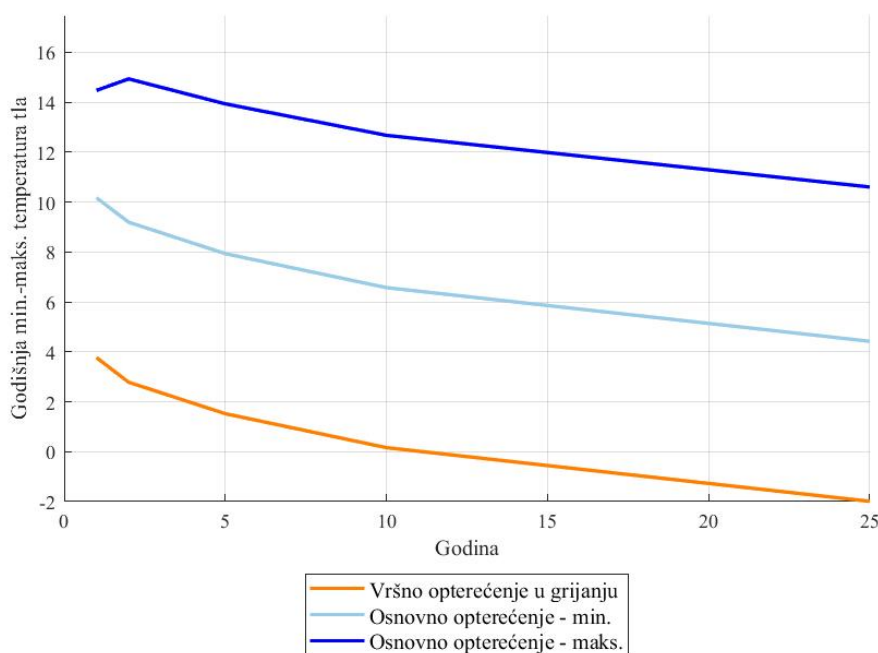
- Scenarij 1: Predviđeno je korištenje dizalice topline tlo-voda samo za novi dio zgrade.
- Scenarij 2: Dizalica topline tlo-voda koristila bi se za grijanje i hlađenje oba dijela zgrade, osim u najhladnijim mjesecima (studeni, prosinac i siječanj). U tim zimskim mjesecima planirano je korištenje plinskog kotla kao alternativnog izvora topline.
- Scenarij 3: Predviđeno je korištenje dizalice topline tlo-voda za cijelu zgradu tijekom cijele godine.

Prema dostupnim podacima, prostor za ugradnju bušotinskih izmjenjivača topline procijenjen je i ograničen na 100x70 m. Proračunom triju scenarija, korištenjem programskog paketa *EED*[®] i potrebnih energija za grijanje i hlađenje, analiziran je raspored, udaljenost, broj i dubina potrebnih vertikalnih bušotinskih izmjenjivača u tlu (BIT-ova) te ukupna površina ugradnje (Tablica 17)

Tablica 16. Karakteristike BIT-ova i površine ugradnje mogućih scenarija

Karakteristika	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3
Broj izmjenjivača [-]	34	32	81
Udaljenost između izmjenjivača [m]	8	9	9
Dubina izmjenjivača [m]	100	108	110
Ukupna duljina izmjenjivača (m)	3 400	3 456	8 910
Površina potrebna za ugradnju [m ²]	3 328	5 184	5 184

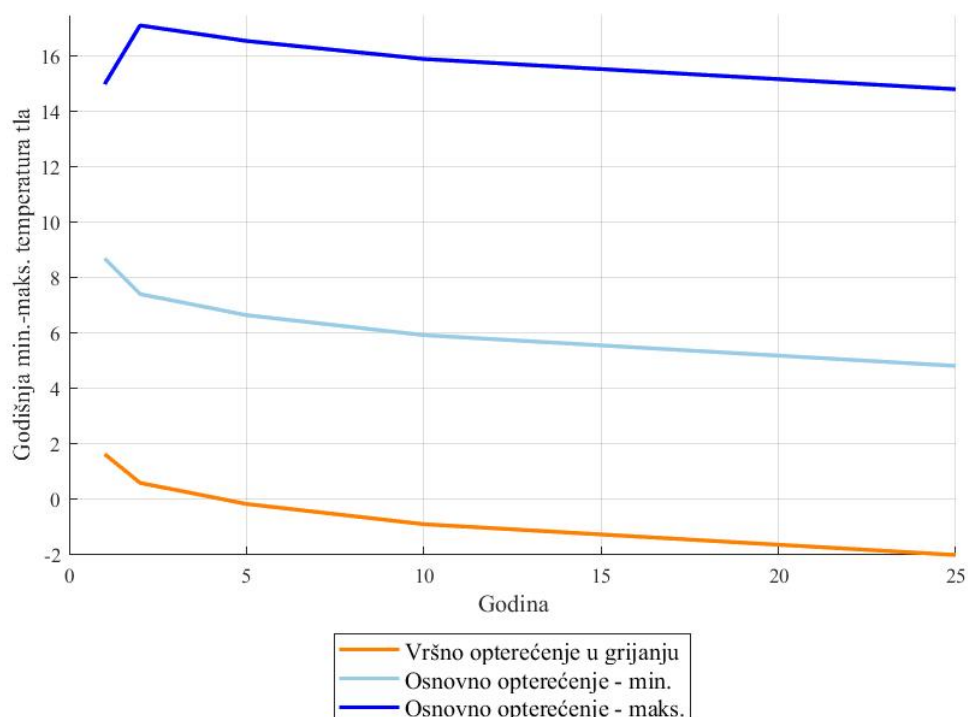
U obrazovnim ustanovama gdje je grijanje dominantno tijekom cijele godine, dugoročna eksploatacija dovodi do pada temperature tla. Razlog tome je što su potrebe za hlađenjem značajno niže nego za grijanje, te se tijekom ljetnih mjeseci dovoljno topline ne preda tlu kako bi se održala toplinska ravnoteža. Slika 17 prikazuje dugoročnu raspodjelu temperature tla za Scenarij 3.



Slika 17. Dugoročna raspodjela temperatura tla za Scenarij 3

Narančasta linija prikazuje vrijednosti temperature tla pri vršnom opterećenju za vrijeme grijanja. Minimalne i maksimalne vrijednosti temperatura tla pri osnovnom opterećenju prikazane su tamnoplavom i svijetloplavom bojom. Sve linije pokazuju trend pada temperature tijekom godina, što ukazuje na nemogućnost regeneracije tla zbog kontinuirane eksploatacije. Regeneracija tla je ključna kako bi sustav dugoročno bio učinkovit i kako bi se održale stabilne temperature tla. Navedeno rezultira značajnim povećanjem potrebnih broja izmjenjivača i značajnim povećanjem investicijskih troškova za ovu izvedbu sustava.

Iz prethodno navedenih razloga, za tehno-ekonomsku analizu odabran je Scenarij 2. Odnosno, iako je primarni cilj rada bio analizirati različite izvedbe dizalica topline kao samostalne izvore topline, dizalica topline tlo-voda analizirana je u kombinaciji s plinskim kotlom. Slika 18 prikazuje raspodjelu temperatura tla za Scenarij 2 tijekom 25 godina rada sustava. Može se primijetiti manji pad temperature tla prilikom vršnog i osnovnog opterećenja, zbog dominantnih potreba za grijanjem u odnosu na hlađenje, koji ne utječe značajno na učinkovitost rada sustava. Pri tome je važno istaknuti da razlika između ukupne dubine ugrađenih izmjenjivača između Scenarija 2 i Scenarija 3 iznosi više od 5 400 m.



Slika 18. Dugoročna raspodjela temperature tla za Scenarij 2

U usporedbi s dizalicama topline zrak-voda, investicijski troškovi dizalica topline tlo-voda značajno su viši uslijed složenosti izvedbe sustava. Dodatan trošak predstavlja provođenje mjerenja toplinskog odziva tla TRT-om (eng. *Thermal response test*), kojim se određuju efektivna svojstva tla: toplinska vodljivost tla i toplinski otpor bušotine.

Sustavi s dizalicom topline tlo-voda zahtijevaju minimalne troškove za održavanjem u odnosu na preostale tipove dizalice topline. Svakih 5 do 10 godina treba zamijeniti glikol (posredni prijenosnik energije) te održavati cirkulacijsku pumpu izvora topline što je ključno za osiguranje učinkovitosti sustava. Tlo predstavlja stabilan izvor topline te je učinkovitost kroz cjelogodišnji rad visoka. Uz redovno održavanje, praćenje i upravljanje sustavom te kvalitetno izvedenim početnim radovima potrošnja električne energije je relativno niska.

U Tablici 18 prikazani su ukupni troškovi za rad dizalice topline tlo-voda i odabrani Scenarij 2.

Tablica 17. Ukupni troškovi izvedbe s dizalicom topline tlo-voda i plinskim kotlom

Opis stavke	Cijena [€]
SPECIFIČNI ZAHTJEVI ZA TOPLINSKI SPREMNIK	
TRT	7 000
INVESTICIJSKI TROŠKOVI DIZALICE TOPLINE	
Niskotemperaturne dizalice topline tlo-voda	38 400
Ugradnja dizalice topline	13 000
Radovi bušenja, ugradnje i ispunjavanja bušotinskih izmjenjivača topline (32 sonde, dvostruka U cijev, PEHD 32x2.9, dubina 100 m)	241 080
Horizontalni razvod (sabitnici sa šahtovima, cijevi PEHD DN45, PEHD DN63)	7 000
Radovi iskopa kanala, šahtova, polaganja cijevi, zavarivanja i montaže razdjelnika	6 000
Etilen (propilen) glikol	6 950
Pumpna grupa za sonde u tlu	6 000
INVESTICIJSKI TROŠKOVI PLINSKOG KOTLA	
Dobava i ugradnja kotla u kućištu za vanjsku ugradnju	65 409
Dobava i ugradnja dimnjaka	5 851
Spoj na plinski priključak, plinska mjerno-regulacijska stanica, razvod mjerelog priključka	24 050
Σ	420 740
TROŠKOVI RADA (troškovi održavanja + pogonski troškovi)	
Redovito godišnje održavanje dizalice topline	1 200
Redovito godišnje održavanje kotla	4 500
Održavanje pumpe na strani izvora topline	300

Zamjena (dopuna) glikola (svedeno na 1 god.)	200
Cijena električne energije za pogon dizalica topline	8 215
Obračunska vršna radna dizalice topline	3 100
Cijena zemnog plina	7 750
Cijena električne energije za pogon pumpe BIT-a	410
Σ	25 675

Radi mogućnosti eksploatacije i utiskivanja podzemne vode iz Đurđevačkog vodonosnog sustava, analizirana je upotreba **dizalica topline voda-voda**. Troškovi održavanja potonjih su najznačajniji uslijed kompleksnosti izvedbe sustava.

Najprije se izvode bušački i popratni radovi izrade zdenca. Bušenje se izvodi do dubine od 17 do 19 m, ovisno o zdencu. Tijekom bušenja prati se iznos materijala te uzima uzorak na svakom metru bušenja, a kako bi se utvrdio točan litološki profil pojedinog zdenca. Nakon bušenja, pristupa se opremanju pojedinog zdenca; ugradnja slijepe nadfilterske INOX cijevi, INOX žičane filter cijevi te ugradnja taložnika, odnosno slijepe INOX cijevi. Nakon ugradnje pojedinih segmenata INOX cijevi, pristupa se postavljanju sloja šljunka ili šljunčanog filtra oko perforiranog dijela cijevi zdenca postupku zatvaranja ili zapečaćivanja prostora između zidova bušotine i cijevi zdenca, kao i svih eventualnih slojeva kroz koje bušotina prolazi. Po izvedbi pojedinog zdenca provodi se niz postupaka za razvoj i pripremu zdenca za eksploataciju, pokusnog crpljenja (različitim testovima), uzimanja uzorka vode i kemijske analize. U posljednjem koraku ugrađuje se šaht, glava zdenca te projektirana potopna pumpa sa svom nužnom opremom te spajanje na sabirni cjevovod [24]. Iz prethodnog skraćenog opisa radova može se zaključiti kako je složenost izvedbe sustava iznimno visoka.

Kroz cijelo vrijeme rada sustava treba zadržavati visoku kvalitetu vode, odnosno stanja zdenaca. Osim redovitih godišnjih održavanja i održavanja potopne pumpe, provodi se revitalizacija zdenaca svakih nekoliko godina. Prema [25] revitalizacija zdenca podrazumijeva sve postupke kojima je cilj poboljšanje hidrauličkih svojstava zdenca (pad specifične izdašnosti zdenca tijekom njegova rada) koja su narušena korištenjem zdenca. Kao i kod dizalica topline

koje koriste tlo kao toplinski spremnik, voda također predstavlja stabilan toplinski spremnik, što omogućava minimalnu potrošnju električne energije. Dodatan pogonski trošak predstavlja koncesijska naknada za zahvatom vode. Naime, za vodoistražne radove i korištenje topline podzemne vode za grijanje i hlađenje potrebno je ishoditi vodopravne uvjete od Hrvatskih voda. Tablica 19 sadrži ukupne troškove sustava s dizalicom topline voda-voda.

Tablica 18. Ukupni troškovi izvedbe s dizalicom topline voda-voda

Opis stavke	Cijena [€]
SPECIFIČNI ZAHTJEVI ZA TOPLINSKI SPREMNIK	
Vodoistražni radovi	15 000
INVESTICIJSKI TROŠKOVI	
Radovi izrade i pripreme zdenaca (pripremni radovi, bušenje, ugradnja komponenti, tamponiranje i šljunčanje, osvajanje, itd.)	69 620
Izrada sabirnog sustava zdenaca (građevinski radovi, dobava i ugradnja sustava glave i konstrukcije utisnih i proizvodnih zdenaca, itd.)	79 575
Cjevovod u bunarima za spoj pumpe i ispust	20 876
Potopne pumpe izvora topline	9 364
Niskotemperaturne dizalice topline voda-voda	61 718
Visokotemperaturna dizalica topline	58 289
Trošak ugradnje dizalica topline	24 000
Izmjenjivači topline	20 000
Σ	358 442
TROŠKOVI RADA (troškovi održavanja + pogonski troškovi)	
Redovito godišnje održavanje dizalice topline	1 200
Održavanje potopne pumpe	350

Revitalizacija zdenaca (svedeno na jednu godinu)	2 800
Cijena električne energije za rad dizalica topline	16 700
Obračunska vršna radna dizalica topline	4 800
Zahvat podzemne vode	1 100
Σ	26 950

5.3. Usporedba razmatranih sustava

U Tablici 20 zajednički su prikazani troškovi koji obuhvaćaju sve aspekte vezane uz pojedinu izvedbu dizalica topline te energetska analiza pojedine izvedbe.

Tablica 19. Energetska i ekonomska analiza pojedine izvedbe dizalice topline

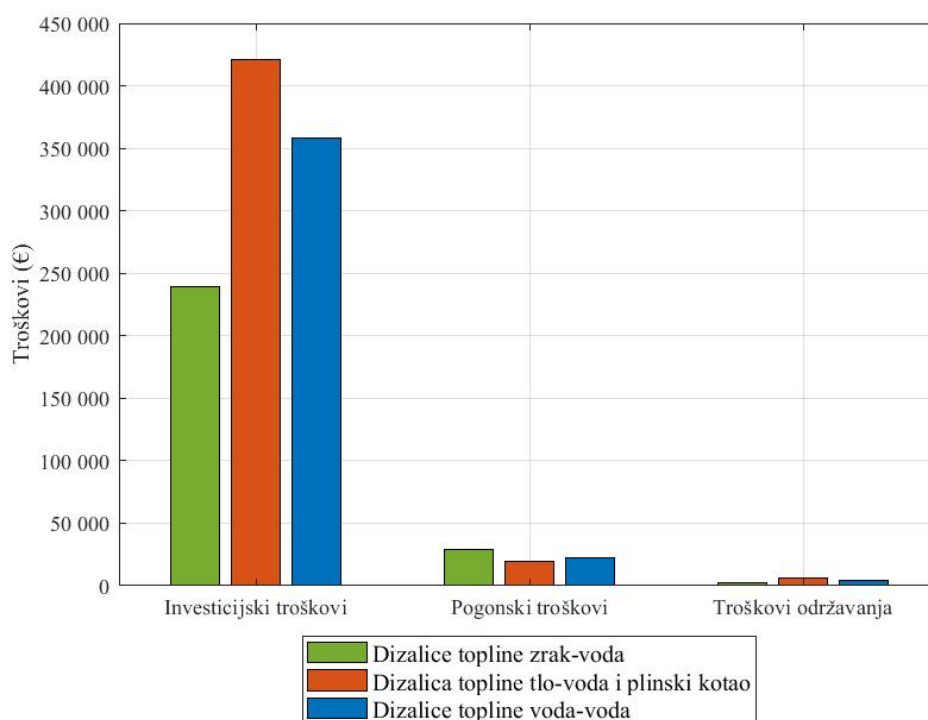
	Izvedba zrak-voda	Izvedba tlo-voda + Plinski kotao	Izvedba voda-voda
Primarna energija [kWh]	270 219	235 034	195 129
Emisije CO ₂ [kg]	39 312	41 962	28 388
Ukupni investicijski troškovi [€]	239 684	420 740	390 854
Ukupni godišnji troškovi održavanja [€]	2 500	6 200	4 350
Ukupni godišnji pogonski troškovi [€]	29 238	19 475	22 600

Ako se rezultati iz Tablice 20 analiziraju iz dva aspekta - ekološkog (energetska analiza) i financijskog (ekonomska analiza) dolazi se do sljedećih zaključaka.

Tehničkom propisom [12] najveća dopuštena godišnja vrijednosti primarne energije prilikom rekonstrukcije predmetne zgrade iznosi 90 kWh/m^2 . Analizom primarnih energija pojedine izvedbe zaključuje se da se izračunate vrijednosti nalaze unutar dopuštenih granica. Najveća vrijednost primarne energije iznosi za dizalice topline zrak-voda ($46 \text{ kWh/m}^2\text{a}$), dok je najniža vrijednost za izvedbu s dizalicama topline voda-voda ($33 \text{ kWh/m}^2\text{a}$). Oporezivanje emisija CO_2 smatra se još jednim načinom za postizanje klimatskih ciljeva. Budući da je predmetna zgrada veliki potrošač energije, informacija o emisijama CO_2 bitan je podatak zbog dodatnih troškova koji se mogu očekivati u budućnosti. Kombinacijom električne energije i plina (dizalica topline tlo-voda i plinski kotao) dolazi do najvećih emisija CO_2 . Prema [26] jedno je stablo u mogućnosti apsorbirati 24 kg/CO_2 , što znači da je u slučaju izvedbe tlo-voda i plinskog kotla potrebno posaditi 110 stabala više da se apsorbira jednaka količina emisija CO_2 kao u slučaju zrak – voda. Čak je 566 stabala više potrebno posaditi da se apsorbira jednaka količina emisija CO_2 izvedbom dizalica topline voda-voda.

Najniži investicijski troškovi iznose za izvedbu zrak-voda, jer ne zahtijevaju složene radove i dodatnu opremu (izmjenjivači, pumpe, itd.). Rezultati iz Tablice 14 ukazuju na niske vrijednosti *SCOP*-a i *SEER*-a, što objašnjava visoke pogonske troškove. Nestabilnost zraka kao toplinskog spremnik također dovodi u pitanje primjenu dizalica topline zrak-voda za veće sustave. Primjetne godišnje promjene klime dovode u pitanje koliko brzo se tehnologija može prilagoditi i razvijati u takvim uvjetima te postoji li želja stručnjaka u ažuriranju meteoroloških (i drugih) podataka kako bi se dobila slika stvarnog stanja sustava prilikom rada. Kao bitni razlozi niskih vrijednosti *SCOP*-a i *SEER*-a u ovom radu ističu se zanemarivanje krivulje grijanja/hlađenja te neprecizna selekcije opreme prema stvarnim potrebama zgrade. Veće učinkovitosti postigle bi se u bivalentnom radu s plinskim kotlom te točnijom selekcijom ovisno o potrebama zgrade. Iako bi se bivalentnim radom postigle više učinkovitosti, analiza je pokazala da investicijski i pogonski troškovi plinskog kotla dovode do približavanja ukupnih troškova efikasnijim sustavima (tlo-voda, voda-voda). Plinski kotao u kombinaciji s dizalicom topline tlo-voda odabran je zbog pothlađivanja tla (u slučaju dizalice topline kao samostalnog izvora), prostornog ograničenja te količine bušotinskih izmjenjivača topline u slučaju samostalnog izvora (ukupna duljina izmjenjivača 2,6 veća u slučaju tla kao samostalnog izvora). Visoki investicijski troškovi posljedica su troškova plinskog kotla kao zasebne tehnologije. Pogonski troškovi su najniži zbog toga što se toplinsko opterećenje u najhladnijim mjesecima pokriva plinskim kotlom i zemnim plinom kao energentom (jeftinije energent od električne energije).

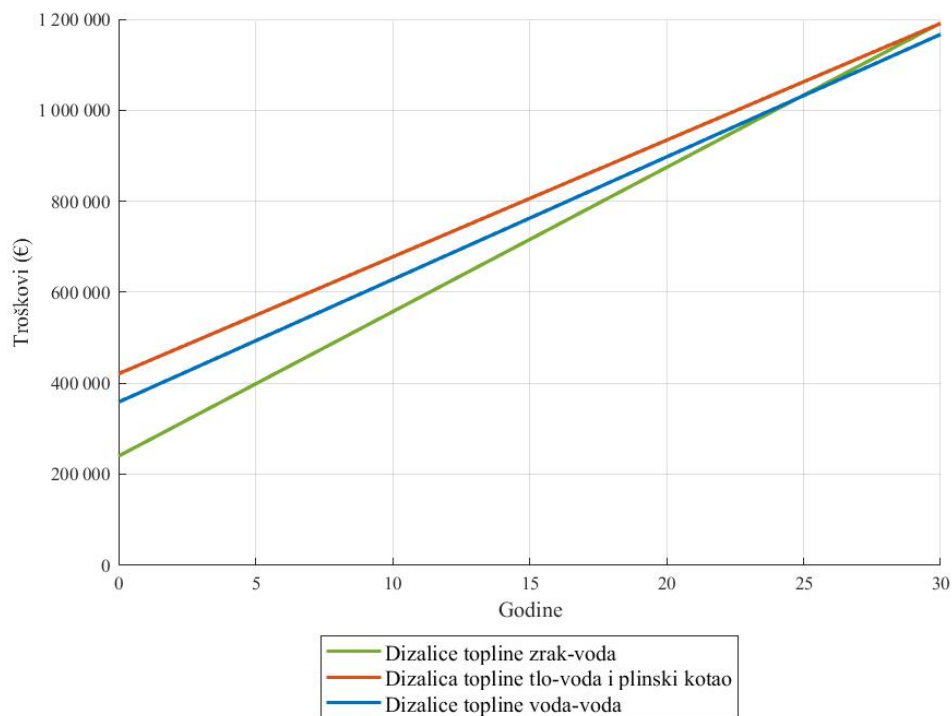
Prema rezultatima, troškovi održavanja dizalice topline tlo-voda, isključujući plinski kotao (4 500 €) iznose 1 700 €. Uspoređujući s dizalicama topline voda-voda upravo je najveće ograničenje u korištenju izvedbe voda-voda u visokim troškovima održavanja zbog složenosti sustava. Međutim, to ne mora nužno predstavljati ograničenje. Redovito i pravilno održavanje može povećati trajnost i sigurnost opreme, naglašavajući važnost sustava i osiguravajući njegov dugoročan rad. Grafički prikaz troškova iz Tablice 20 prikazan je na Slici 19.



Slika 19. Prikaz troškova po kategorijama za analizirane izvedbe sustava

Predviđeno kretanje troškova za 25 godina rada sustava prikazuje Slika 20. Najprihvatljivije rješenje prema kretanju troškova do približno 25. godine je izvedba zrak-voda. Nakon tog razdoblja troškovi dizalice topline zrak-voda dominiraju nad troškovima izvedbe voda-voda i tlo-voda s plinskim kotlom. Konačno, najbolje rješenje je odabir dizalica topline voda-voda. Dizalice topline voda-voda kompaktne su, smještaju se u strojarnicu te emitiraju manje buke od dizalica topline zrak-voda. Prema ranije spomenutim opisima nedostataka izvedbe zrak-voda, odabir sustava voda-voda tehnički je bolje i sigurnije rješenje, unatoč višim pogonskim

troškovima. U objektima gdje je veća potreba za hlađenjem, dizalica topline voda-voda postigla bi veće vrijednosti *SEER*-a te posljedično veće uštede pogonskih troškova.



Slika 20. Predviđeno kretanje ukupnih troškova analiziranih sustava

6. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA KORIŠTENJA „BOOSTER“ DIZALICE TOPLINE I PLINSKOG KOTLA ZA VISOKOTEMPERATURNO GRIJANJE

Za visokotemperaturno grijanje postojećeg dijela analizirana je ugradnja visokotemperaturne „Booster“ dizalice topline voda-voda i plinskog kotla na zemni plin. U idućim potpoglavljima prikazana je energetska i ekonomska analiza pojedine tehnologije.

6.1. Energetska i ekonomska analiza

Prilikom energetske analize uvodi se iduća pretpostavka:

- potrebna energija za grijanje postojećeg dijela zgrade opskrbljuje se isključivo visokotemperaturnom dizalicom topline voda-voda ili plinskim kotlom

Potrebna energija za grijanje ($Q_{H,nd}$) postojećeg dijela zgrade iznosi 231 130 kWh/god. Potrošnja električne energije za rad visokotemperaturne dizalice topline izračunata je u poglavlju 5 i iznosi 51 864 kWh/god. Potrošnja zemnog plina za rad plinskog kotla izračunata je korištenjem iduće jednadžbe:

$$E_{HW,del} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_{kotao}} \quad (6.1)$$

gdje su:

- $E_{HW,del}$ - godišnja isporučena energija za grijanje i PTV [kWh/god.];
- $Q_{H,nd}$ - godišnja potrebna energija za grijanje postojećeg dijela [kWh/god.];
- η_{kotao} - učinkovitost plinskog kotla [-];

Pretpostavljena je učinkovitosti plinskog kotla u iznosu od 0,85. Izračunata potrošnja zemnog plina iznosi 272 156 kWh/god.

Pomoću faktora primarne energije i specifične emisije CO₂ [12] izračunate su godišnje vrijednosti primarne energije i povezane emisije CO₂ pojedine tehnologije. Rezultati su prikazani u Tablici 21.

Tablica 20. Energetska analiza razmatranih sustava

Tehnologija	Primarna energija, E_{prim} [kWh]	Emisije CO₂ [kg]
Visokotemperaturna dizalica topline („Booster“) voda-voda	83 708	12 178
Plinski kotao	298 010	59 930

Za izračun pogonskih troškova preuzete su cijene električne energije i zemnog plina definirane u poglavlju 5. Ukupni troškovi visokotemperaturne dizalice topline voda-voda prikazani su u Tablici 22.

Tablica 21. Ukupni troškovi visokotemperaturne „Booster“ dizalice topline voda-voda

Opis stavke	Cijena [€]
INVESTICIJSKI TROŠKOVI	
Visokotemperaturna dizalica topline	58 289
Ugradnja dizalice topline	8 700
Σ	69 949
TROŠKOVI RADA (troškovi održavanja + pogonski troškovi)	
Redovito godišnje održavanje	600
Cijena električne energije za rad visokotemperaturne dizalice topline	7 168
Cijena električne energije za rad niskotemperaturne dizalice topline voda-voda	6 400
Obračunska vršna radna snaga dizalice topline	1 300
Σ	15 468

Za rad visokotemperaturne dizalice topline u sustavu potrebno je uzeti u obzir pogonske troškove niskotemperaturne dizalice topline voda-voda.

Ukupni troškovi plinskog kotla prikazani su u Tablici 23.

Tablica 22. Ukupni troškovi plinskog kotla

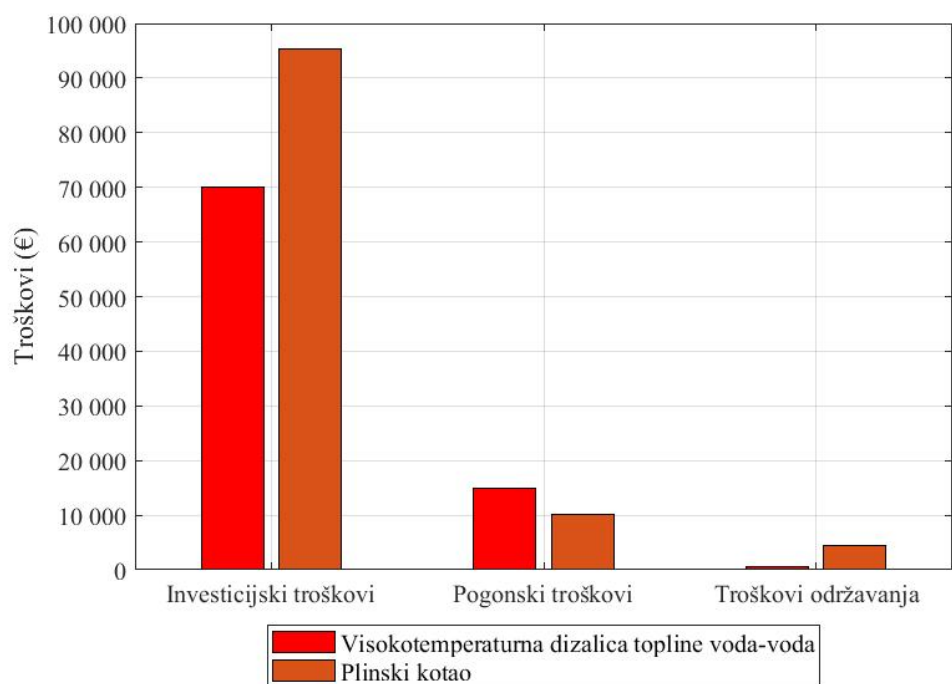
Opis stavke	Cijena [€]
INVESTICIJSKI TROŠKOVI	
Dobava i ugradnja kotla u kućištu za vanjsku ugradnju	65 409
Dobava i ugradnja dimnjaka	5 851
Spoj na plinski priključak, plinska mjerno-regulacijska stanica, razvod mjerenog priključka	24 050
Σ	95 310
TROŠKOVI RADA (troškovi održavanja + pogonski troškovi)	
Redovito godišnje održavanje kotla	4 500
Cijena zemnog plina	10 210
Σ	14 710

6.2. Usporedba razmatranih sustava

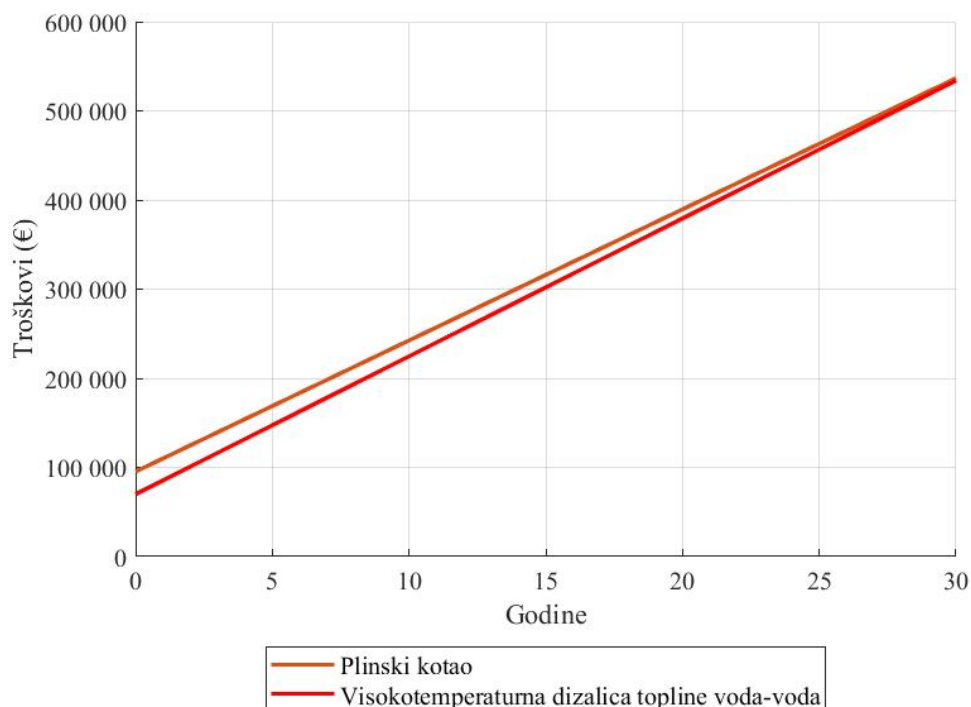
Prema rezultatima Tablice 22 i Tablice 23 investicijski troškovi visokotemperaturne „Booster“ dizalice topline iznose 74% investicijskih troškova plinskog kotla, uz napomenu da je sustav s niskotemperaturnom dizalicom topline već izveden. Troškovi održavanja iskazani su za jednu godinu i redovito održavanje. Pogonski troškovi plinskog kotla iznose 69% pogonskih troškova visokotemperaturne dizalice topline. Naime, za rad sustava s visokotemperaturnom dizalicom topline potrebno je uključiti pogonske troškove niskotemperaturne dizalice topline kojom se podiže temperatura polaznog medija. Plin je još uvijek najpovoljniji na tržištu energenata te nema potrebe za obračunom vršne snage koja se plaća kod dizalica topline. Grafički prikaz troškova prema kategoriji i za obje izvedbe prikazuje Slika 21.

Nakon 25 godina rada sustava, troškovi visokotemperaturne dizalice topline voda-voda približavaju se troškovima plinskog kotla, kako prikazuje Slika 22. Iako Slika 21 i Slika 22 ukazuju na prednosti visokotemperaturne dizalice topline voda-voda, važno je napomenuti da su svi izračuni temeljeni na pretpostavci o već izvedenoj niskotemperaturnoj dizalici topline za

rad i konstantnu temperaturu polaza ogrjevne vode 45 °C. Uključivanjem ukupnih troškova niskotemperaturne dizalice topline, ekonomski gledano, plinski kotao predstavlja bolji izbor.



Slika 21. Prikaz troškova po kategorijama za analizirane sustave visokotemperaturnog grijanja



Slika 22. Predviđeno kretanje troškova analiziranih sustava visokotemperaturnog grijanja

7. TEHNIČKI OPIS ODABRANOG SUSTAVA

U idućim poglavljima opisani su odabrani tehnički sustav i osnovna oprema na razini strojarnice. S obzirom na to da se za postojeći dio zgrade koristi niskotemperaturni režim grijanja kada je vanjska temperatura zraka viša od +6 °C, provedena je analiza s ciljem definiranja minimalne vanjske temperature kod koje je moguće osigurati projektnu unutarnju temperaturu zraka. Analiza je provedena za dvije reprezentativne prostorije s obzirom na namjenu zgrade.

7.1. Ograničenja u primjeni niskotemperaturnog režima grijanja za postojeći dio zgrade

U sklopu diplomskog rada treba na temelju proračuna potrebne energije za grijanje te toplinskih bilanci definirati minimalnu vanjsku temperaturu kod koje je moguće osigurati projektnu unutarnju temperaturu zraka za postojeći dio škole korištenjem niskotemperaturnog režima grijanja.

Analiza je napravljena za jednu učionicu sa sjevernom i jednu učionicu s južnom orijentacijom kao reprezentativnim prostorijama s obzirom na namjenu zgrade.

U Tablici 24 prikazani su osnovni podaci učionica.

Tablica 23. Osnovni podaci analiziranih učionica

	A_K [m ²]	V [m ³]	A_w [m ²]
Učionica – sjever	75,85	252,32	25,92
Učionica – jug	59,34	189,88	19,04

gdje su:

- A_K - korisna površina grijanog dijela zgrade [m²];
- V - obujam grijanog zraka [m³];
- A_w - površina ostakljenja [m²].

Prema [27] očitane su vrijednosti ogrjevnog učina ugrađenih grijačih tijela za obje učionice pri projektnim uvjetima: vanjska temperatura -15 °C i temperaturni reži 70/55 °C. Ogrjevni učini radijatora iznose 8,44 kW za sjevernu i 6,78 kW za južnu učionicu. Uz pretpostavku da pri unutarnjoj temperaturi zraka od 20 °C nema potrebe za grijanjem, linearnom regresijom

određena je ovisnost potrebnog ogrjevnog učina o vanjskoj temperaturi. Navedeno predstavlja pojednostavljenje, s obzirom na to da toplinska bilanca zgrade nije samo posljedica vanjske temperature zraka, već i unutarnjih toplinskih dobitaka i dobitaka od insolacije. Stoga je za očekivati kako neće biti potrebe za grijanjem pri vanjskim temperaturama nižim od 20 °C. Jednadžba pravca za sjevernu učionicu dana je jednadžbom 7.1., a za južnu učionicu jednadžbom 7.2:

$$\phi_S = -0,24114 \cdot \vartheta_{ok} + 4,8228 \quad (7.1)$$

$$\phi_J = -0,19371 \cdot \vartheta_{ok} + 3,8420 \quad (7.2)$$

gdje su:

- ϕ - potreban ogrjevni učin [kW];
 ϑ_{ok} - temperatura vanjskog zraka [°C].

Za potrebe usporedbe, proveden je proračun toplinske bilance za zimsko razdoblje prema normi HRN EN 12831 koristeći *IntegraCAD*[®]. Potreban učin grijanja za sjevernu učionicu iznosi 5,13 kW te 4,03 kW za južnu učionicu. Rezultati ukazuju na predimenzioniranost ugrađenih ogrjevnih tijela, a što je u skladu s očekivanjima s obzirom na period izgradnje zgrade.

Poznati učin ogrjevnih tijela pri jednom režimu moguće je preračunati za druge režime koristeći jednadžbu (7.3). Pomoću te jednadžbe izračunate su vrijednosti ogrjevnog učina pri niskotemperaturnom režimu 40/32 °C:

$$\phi_{40/32} = \phi_{70/55} \left(\frac{\Delta t_{m,40/32}}{\Delta t_{m,70/55}} \right)^n \quad (7.3)$$

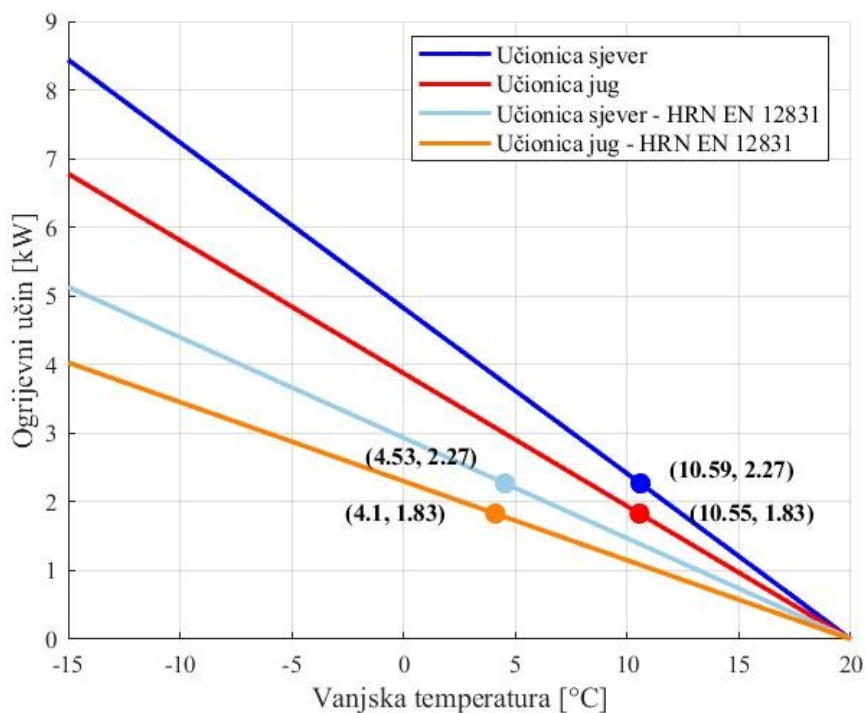
- $\phi_{40/32}$ - ogrjevni učin pri temperaturnom režimu 40/32 °C [W];
 $\phi_{70/55}$ - ogrjevni učin pri temperaturnom režimu 70/55 °C [W];
 $\Delta t_{m,40/32}$ - srednja temperaturna razlika između ogrjevnog tijela (pri temperaturnom režimu 40/32 °C) i zraka u prostoriji [°C];
 $\Delta t_{m,70/55}$ - srednja temperaturna razlika između ogrjevnog tijela (pri temperaturnom režimu 70/55 °C) i zraka u prostoriji [°C];
 n - eksponent grijača [-].

Rezultati proračuna prema normi te proračun učina ugrađenih ogrjevnih tijela za različite temperaturne režime prikazani su u Tablici 25.

Tablica 24. Rezultati proračuna učina prema normi i učina ugrađenih ogrjevnih tijela za različite temperaturne režime

	ϕ_{GR} [kW]	$\phi_{70/55}$ [kW]	$\Delta t_{m,70/55}$	n	$\Delta t_{m,40/32}$	$\phi_{40/32}$ [kW]
Učionica – sjever	5,13	8,44	42	1,33	16	2,27
Učionica – jug	4,03	6,78	42	1,33	16	1,83

Iz dijagrama sa Slike 23, koji prikazuje ovisnost ogrjevnog učina o vanjskoj temperaturi, zaključuje se kako bi se na temelju podataka o ugrađenim ogrjevnim tijelima tek pri vanjskim temperaturama višima od približno 11 °C mogli postići unutarnje projektne temperature dviju učionica niskotemperaturnim režimom 40/32 °C. Vrijednost potrebnog učina niskotemperaturnim režimom za sjevernu (2,27 kW) i južnu učionicu (1,83 kW) označena je na krivuljama ogrjevnog učina (crvena i plava boja). Preslikavanjem ogrjevnog učina (2,27 kW za sjevernu i 1,83 kW za južnu učionicu) pri niskotemperaturnom režimu na pravce učina definiranih normom HRN EN 12831 (svijetloplava za sjevernu i narančasta za južnu učionicu) utvrđeno je moguće postizanje unutarnjih projektih temperatura i pri nižim vanjskim temperaturama (oko 4 °C). Naime, postojeći dio škole projektiran je u periodu kada se broj radijatora određivao prema broju vanjskih prozora, a dužina radijatora prema duljini prozora. Takav pristup rezultira značajnim predimenzioniranjem radijatora te potencijalno pogrešnim odabirom vrijednosti vanjske temperature za postizanje unutarnjih projektih temperatura niskotemperaturnim režimom.



Slika 23. Ovisnost ogrjevnog učina o vanjskoj temperaturi

(Vrijednosti u zgradama predstavljaju temperature vanjskog zraka u °C kojima odgovara potreban učin niskotemperaturnim režimom grijanja u kW)

Kako bi se provjerila pretpostavka pri kojoj vanjskoj temperaturi, zbog dobitaka topline, nije potrebno grijanje, dodatno je provedena detaljnija analiza kroz izračun potrebne energije na satnoj razini. Kao u poglavlju 4, satne vrijednosti potrebne energije za grijanje učionica izračunate se u *TRNSYS*[®]-una. Obradom podataka u *MATLAB*[®]-u dobivene su vrijednosti potrebne energije za grijanje u ovisnosti o vanjskoj temperaturi te je za tako uređene podatke provedena linearna regresija. Jednadžba 7.4 opisuje ovisnosti potrebne energije za grijanje o temperaturi okoliša za učionicu orijentiranu prema sjeveru:

$$Q_H = -0,1609 \cdot \vartheta_{ok} + 2,9730 \quad (7.4)$$

$$R^2 = 0,7412$$

dok za južnu učionicu vrijedi:

$$Q_H = -0,1259 \cdot \vartheta_{ok} + 2,0974 \quad (7.5)$$

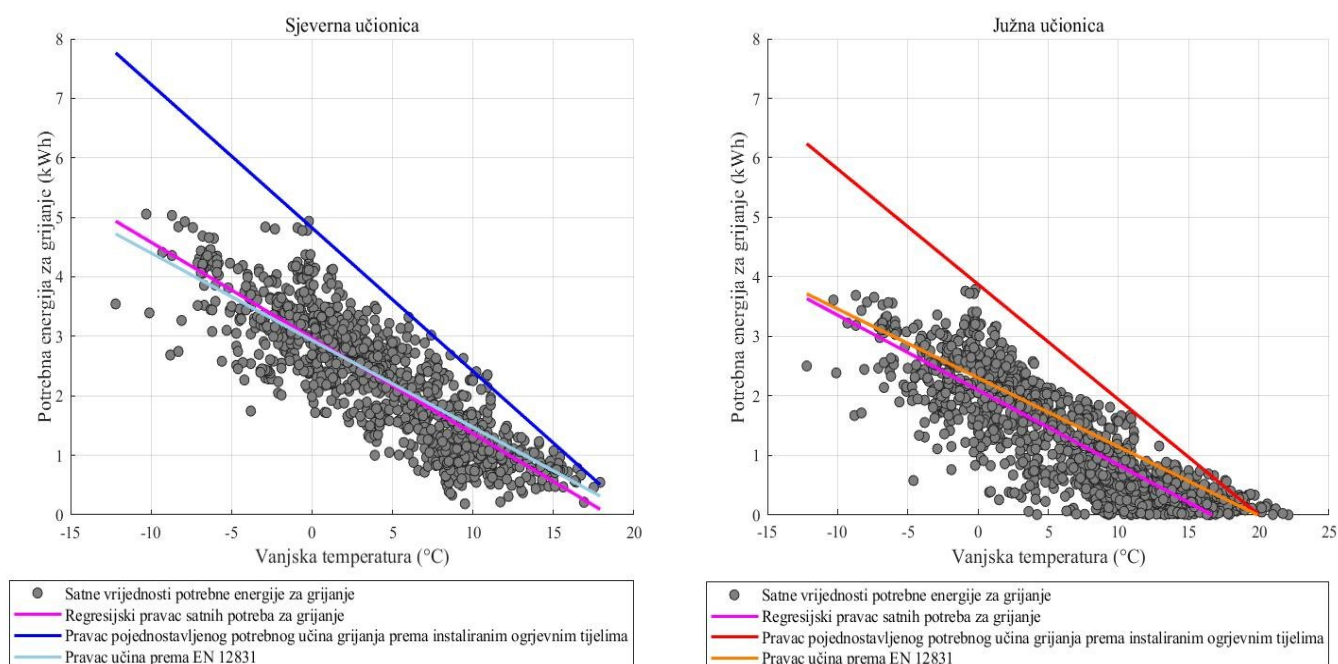
$$R^2 = 0,7364$$

gdje su:

- Q_H - potrebna energija za grijanje [kWh];
- ϑ_{ok} - temperatura okoliša [°C];
- R^2 - koeficijent determinacije [-].

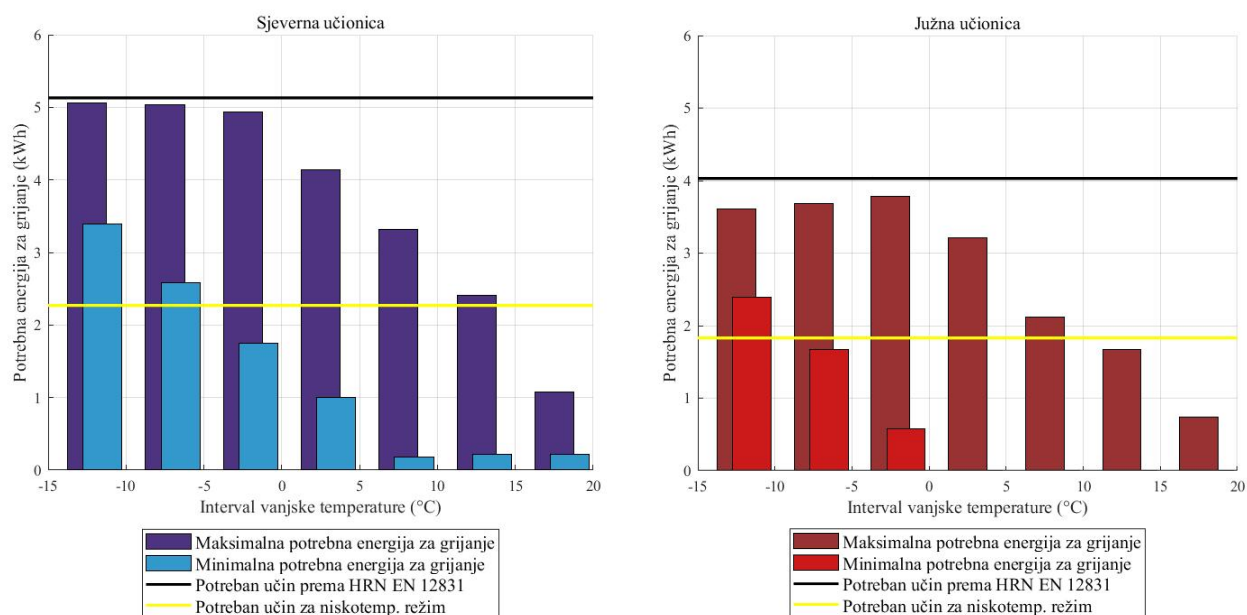
Analizom jednadžbi (7.4) i (7.5) primjećuje se odstupanje u odnosu na prethodnu aproksimaciju, koja je pretpostavljala ogrjevni učin jednak 0 kW pri vanjskoj temperaturi od 20 °C. Za sjevernu učionicu određena je vanjska temperatura od približno 18 °C te za južnu učionicu, više izloženu insolaciji i povezanim dobitcima, vanjska temperatura od približno 16 °C pri kojoj će ogrjevni učin biti jednak 0 kW. Posljedično, vanjske temperature kod kojih će se postići unutarnje projektne temperature niskotemperaturnim režimom 40/32 °C bit će niže od 11 °C, odnosno 4 °C, a koje su utvrđene ranijim pojednostavljenjem pri linearnoj regresiji.

Iz analize satnih podataka (Slika 24) slijedi kako se 51% satnih vrijednosti potrebne energije za grijanje nalazi ispod aproksimacijskog pravca učina prema HRN EN 12831 te 99,5% ispod pravca pojednostavljenog potrebnog učina grijanja prema instaliranim ogrjevnim tijelima. Za učionicu s južnom orijentacijom 69% satnih vrijednosti potrebne energije za grijanje nalazi se ispod pravca učina prema HRN EN 12831 te 98,5% ispod pravca pojednostavljenog potrebnog učina grijanja prema instaliranim ogrjevnim tijelima.



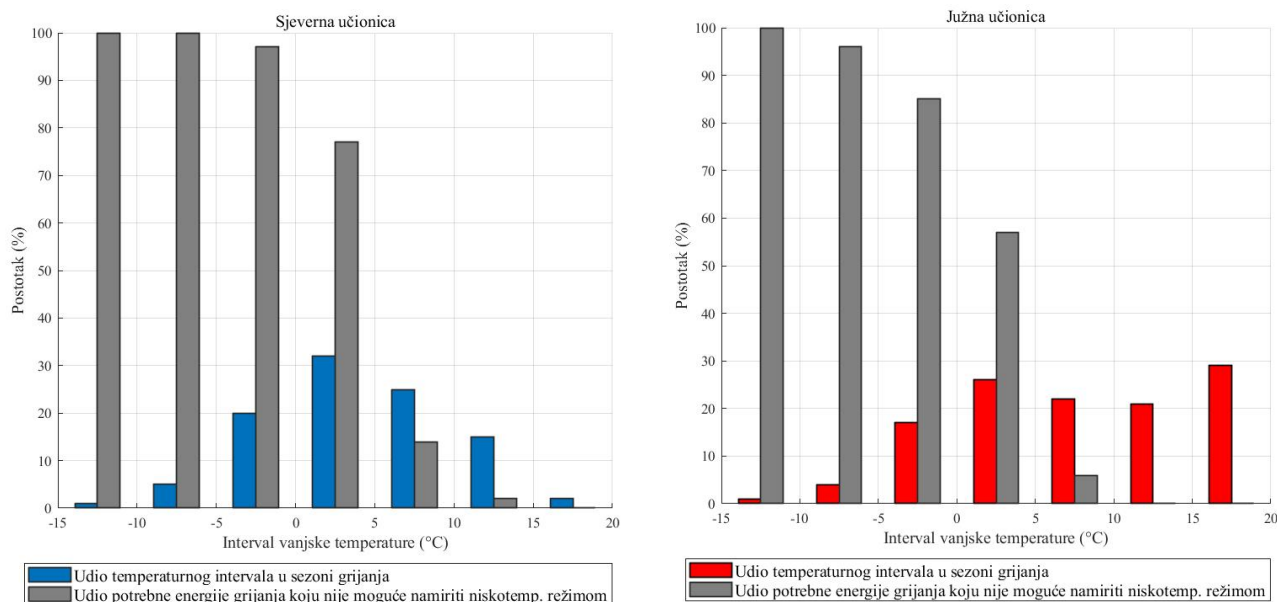
Slika 24. Satne vrijednosti potrebne energije za grijanje sjeverne i južne učionice

S obzirom na različiti raspon pojavnosti potrebnih energija za grijanje pri svakoj temperaturi vanjskog zraka, na Slici 25 prikazane su vrijednosti maksimalne i minimalne satne potrebne energije za grijanje u nekom satu tijekom perioda grijanja. Vrijednosti su prikazane za raspon temperatura u razredima od po 5 °C (Slika 25). Veće vrijednosti iznose za sjevernu učionicu, zbog orijentacije, veće površine i manjih solarnih dobitaka. Minimalne vrijednosti za južnu učionicu u intervalima od 0 do 20 °C nisu grafički vidljive jer su jednake nuli. Slika također prikazuje i potreban učin ogrjevnih tijela prema HRN EN 12381 te učine postojećih ogrjevnih tijela (crna boja) pri nisko-temperaturnom režimu (žuta boja).



Slika 25. Maksimalne i minimalne potrebne energije za temperaturne intervale dviju učionica

Na temelju Slike 25 unutarnja projektna temperatura za sjevernu učionicu i niskotemperaturni režim grijanja postiže se u intervalu 15 do 20 °C te za južnu učionicu u intervalu 10 do 15 °C (većim brojem razreda može se i preciznije odrediti granična temperatura). Za ostale raspone temperatura u nekom trenutku (satu) pojavit će se vrijednost potrebne energije viša od raspoloživog učina niskotemperaturnog režima grijanja. Udio takvih sati su određeni analizom izračunate satne potrebne energije za grijanje u *MATLAB*[®]-u. Na Slici 26 prikazano je koliko često se određeni temperaturni interval pojavljuje u sezoni grijanja, kao i vrijednosti potrebne energije za grijanje veće od učina niskotemperaturnog režima u spomenutim temperaturnim intervalima.



Slika 26. Udio temperaturnog intervala u sezoni grijanja i potrebne energije koju nije moguće namiriti niskotemperaturnim režimom grijanja

Za sjevernu učionicu temperaturni interval od 10 do 15 °C javlja se tijekom 15% vremena perioda grijanja. U tom temperaturnom intervalu, potrebna energija za grijanje koja prelazi učin niskotemperaturnog režima iznosi svega 2%. Temperaturni interval od 5 do 10 °C pojavljuje se 25% vremena grijanja, pri čemu je udio potrebne energije za grijanje veći od raspoloživog učina niskotemperaturnog režima jednak 14% ukupne potrebne energije za grijanje u tom intervalu. Temperaturni interval od 0 do 5 °C pojavljuje se tijekom 32% vremena perioda grijanja, no u tom temperaturnom rasponu udio energije za grijanje koja prelazi raspoloživi učin niskotemperaturnog režima je 77%. Za vanjske temperature ispod 0 °C, koje se pojavljuju u 26% vremena perioda grijanja, 90% energija za grijanje nije moguće osigurati primjenom niskotemperaturnog režima.

Primjenjujući isti princip na južnu učionicu, temperaturni interval od 10 do 15 °C pojavljuje u 21% vremena perioda grijanja, pri čemu se zadovoljavaju potrebe učionica niskotemperaturnim režimom grijanja. Temperaturni interval od 5 do 10 °C pojavljuje se 22% vremena perioda

grijanja, pri čemu je udio energije potrebne za grijanje koji se ne može osigurati primjenom niskotemperaturnog režima 6%. U 22% vremena grijanja pojavljuju se vanjske temperature niže od 0 °C, pri čemu su vrijednosti potrebne energije grijanja koje prelaze učin niskotemperaturnog režima značajne.

Zaključno, uzimajući u obzir vremensku učestalost pojedinog temperaturnog intervala i postotak slučajeva u kojem potrebna energija grijanja prelazi raspoloživi učin niskotemperaturnog režima grijanja, optimalni raspon temperatura za odabir bivalentne temperature iznosi između 5 i 10 °C. U potonjem intervalu za obje učionice određeni postotak potrebne energije za grijanje ipak prelazi učin niskotemperaturnog režima. Budući da se radi o minimalnom postotku (14% za sjevernu i 6% za južnu učionicu), pretpostavlja se kako u trenucima većih potreba neće doći do primjetnog smanjenja kvalitete boravka korisnika u prostorijama. Pri tome se odstupanje od $\pm 0,5$ °C od unutarnje projektne temperature smatra prihvatljivim. Važno je napomenuti kako je analiza provedena samo za dvije učionice te da bi se isti postupak trebao primijeniti na različite tipove prostora prema njihovoj namjeni i položaju unutar zgrade. Nadalje, analiza je provedena koristeći tipičnu meteorološku godinu, dok realni klimatski podaci mogu više ili manje odstupati od iste te nije razmatrana krivulja grijanja, odnosno promjena temperature polaza u funkciji vanjske temperature. Rezultat ove analize je preporuka granične temperature, koja je postavna veličina u sustavu upravljanja i korisnik sustava tijekom rada sustava može mijenjati njenu vrijednost temperature te tako osigurati da su u svim prostorijama zadovoljeni unutarnji projektni uvjeti pri realnim radnim uvjetima.

7.2. Opis tehničkog sustava i odabrane opreme na razini strojarne

Na temelju provedene tehno-ekonomske analize, ali i drugih kvalitativnih pokazatelja (povećanje udjela obnovljivih izvora energije, smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima, smanjenje emisije stakleničkih plinova, sveopćeg pozitivnog utjecaja na okoliš, smanjenje emisija buke uzrokovano drugim uređajima, povećan komfor boravka ljudi efikasnijim i stabilnijim sustavom, sigurnost i trajnost opreme itd.) predložena je implementacija sustava s dizalicama topline voda-voda za grijanje i hlađenje predmetne zgrade. Mogućnost eksploatacije i utiskivanja podzemne vode Đurđevačkog vodonosnog sustava na lokaciji objekta potvrđena je na temelju *Elaborata idejnog korištenja plitke geotermalne energije za grijanje i hlađenje u strojarском projektu* [24]. Očekivana temperatura podzemnih voda iznosi 12-14 °C tijekom zimskih i 14-16 °C tijekom ljetnih mjeseci, s obzirom na dubinu zahvata vode od 8 do 16 m.

Na Slici 27 prikazan je mogući smještaj proizvodnih i utisnih zdenaca uz pretpostavku minimalne udaljenosti od 60 m između zdenaca. Dva proizvodna zdenca za zahvat podzemne vode predviđena su na sjevernoj/jugozapadnoj strani parcele, dok su dva utisna zdenca za povrat vode planirana na istočnoj strani parcele [24].



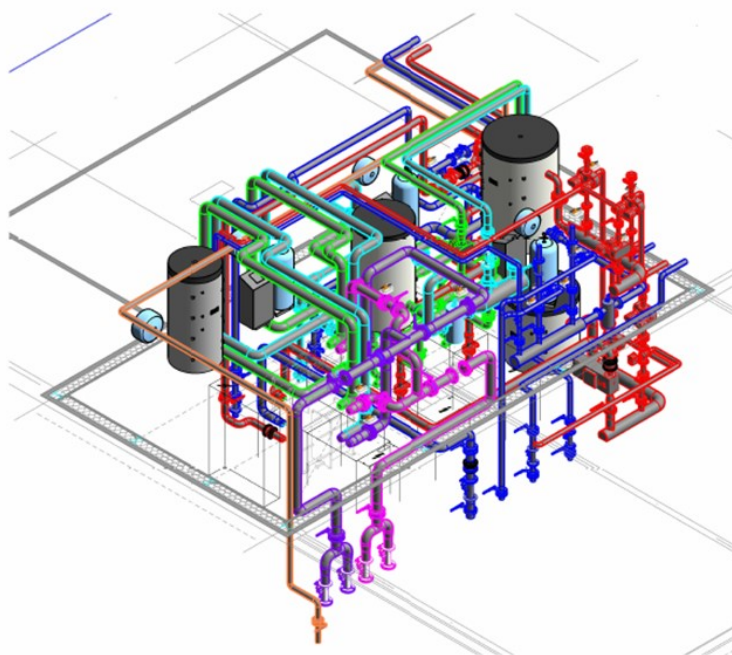
Slika 27. Predloženi položaj proizvodno-utisnih parova zdenaca uz naznačen smjer kretanja podzemne vode (žuto) [24]

Oba proizvodna zdenca predviđena su za paralelni rad pri vršnom protokom od 15 l/s pri punom opterećenju. Svaki zdenac se oprema potopnom pumpom koja se montira ispod razine podzemne vode kako bi se izbjegli prekidi rada zbog oštećenja koja nastaju kada pumpa nije uronjena u vodu te na dovoljnoj visini od dna zdenca kako bi se izbjeglo usisavanje taloga. U slučaju kvara jedne od pumpi ili redovnog servisa, druga pumpa je sposobna isporučiti do 20 l/s protoka te osigurati kontinuiranu opskrbu podzemnom vodom.

Opskrba zgrade toplinskom/rashladnom energijom predviđena je upotrebom dviju niskotemperaturnih i jedne visokotemperaturne „Booster“ dizalice topline voda-voda. Niskotemperaturne dizalice topline kao radnu tvar koriste R32 (GWP = 675) dok je R134a radna tvar visokotemperaturne dizalice topline (GWP = 1 430).

Unatoč tome što je sustav zamišljen kao samostalni izvor toplinske energije, planirano je zadržavanje postojeće plinske instalacije zemnog plina za plinski toplovodni kotao. Kotao se dimenzionira u svrhu pregrijavanja PTV-a radi zaštite od legionele te kao rezervni izvor topline

u slučaju ekstremnih vremenskih uvjeta ili pregleda/popravka dizalica topline. Smještaj dizalica topline i ostale opreme planiran je u dvoetažnu strojarnicu prema opisu u poglavlju 3.3. Plinski kotao smješta se u slobodnu okolinu. Na Slici 28 prikazan je izometrijski prikaz cjevovoda i opreme buduće strojarnice.



Slika 28. Izometrijski prikaz planirane strojarnice

Od ostale opreme u strojarnicu se smještaju i izolirani akumulacijski spremnici toplinske i rashladne energije. Akumulacijski spremnici služe za pohranu toplinske/rashladne energije u trenucima kada je proizvodnja veća od potrošnje. Na taj način se akumulirana toplina može koristiti kasnije, što omogućuje ravnomjernu i fleksibilnu opskrbu toplinom te povećava učinkovitost sustava zbog duljeg rada sustava. Dva rastavljiva pločasta protusmjerna izmjenjivača topline smještaju se za razdvajanje podzemne vode na primarnoj strani i radnog medija na sekundarnoj strani. Za pripremu PTV-a predviđa se toplinski izoliran monovalentni spremnik zapremnine 1 000 litara i stojeće izvedbe.

Razdjelnici i sabirnici dijele se u tri kategorije:

1. Razdjelnici i sabirnici sustava hlađenja: služe za distribuciju rashladne vode do kruga ventilokonvektora i hladnjaka klima komora.

2. Niskotemperaturni razdjelnici i sabirnici ogrjevne vode: služe za distribuciju ogrjevne vode sustavu podnog grijanja i grijačima klima komora u dograđenom dijelu zgrade. Također se koriste za distribuciju ogrjevne vode postojećem radijatorskom grijanju škole i sportske dvorane kada je vanjska temperatura viša od +6 °C.
3. Visokotemperaturni razdjelnici i sabirnici: služe za distribuciju ogrjevne vode prema sustavu postojećeg radijatorskog grijanja škole i sportske dvorane kada je vanjska temperatura niža od +6 °C.

Potopne pumpe su u potpunosti izrađene od nehrđajućeg čelika, frekventno upravljane s ugrađenim nepovratnim ventilom. Cirkulacijske pumpe za cirkulaciju vode u sustavu odabrane su na osnovu izračunatog protoka i otpora cjevovoda. Sve ugrađene pumpe su s regulacijom broja okretaja.

Promjenjiv protok ogrjevne i rashladne vode postiže se ugradnjom regulacijskih ventila. Regulacijski ventili primaju signal od regulatora te ovisno o dobivenom informaciji podešavaju svoju otvorenost. Postavljaju se ispred grupe potrošača kako bi se omogućila individualna kontrolna protoka za svaki dio sustava.

Ekspanzijske posude i sigurnosni ventili ugrađuju se na primarni i sekundarni dio instalacije kako bi osigurali stabilan rad sustava. Za potrebe preuzimanja ekspanzije vode u primarnom dijelu instalacije (izmjenjivači topline, dizalice topline), predviđena je ugradnja zatvorene ekspanzijske posude kapaciteta 25 ili 50 litara, maksimalnog radnog tlaka 6 bara, a za zaštitu dizalica topline i primarnog dijela instalacije ugradnja sigurnosnih ventila. Ventili se postavljaju na povratni vod ogrjevne vode u dizalicama topline kako bi se osigurala sigurnost sustava i spriječilo prekoračenje tlaka. U sekundarnom dijelu instalacije (niskotemperaturno i visokotemperaturno grijanje, sustav hlađenje) predviđa se ugradnja zatvorenog ekspanzijskog uređaja za precizno održavanje tlaka. Sustav se sastoji od uređaja za precizno održavanje tlaka, primarne ekspanzijske posude (600 litara za sustav grijanja, 200 litara za sustav hlađenja) s butilnim mjehom, ekspanzijske posude volumena 50 litara (preuzimanje manjih dilatacija i sprječavanja hidrauličkog udara prilikom uključivanja pumpi unutar uređaja) i zaštitnika povratnog toka (uključuje zaporni ventil, filter, nepovratni ventil i sigurnosni ventil).

Radi sprječavanja taloženja kamenca iz tvrde vode u sustavima ogrjevne, rashladne i potrošne tople vode, predviđena je montaža automatskog demineralizatora vode. Količina vode koju uređaj obrađuje očitava se na vodomjeru. Kada se postigne nominalna vrijednost, vrši se

regeneracija uređaja. Demineraliziranom vodom se vrši punjenje sustava grijanja i hlađenja, čime se osigurava dugotrajna učinkovitost i pouzdanost sustava te smanjuje rizik od taloženja kamenca i oštećenja komponenti. Odabir i dimenzioniranje sve ostale opreme, poput zaporne armature, nepovratne armature, filtera za odvajanje nečistoća, armature za punjenje/pražnjenje sustava, odzračne armature, mjerila potrošnje podzemne vode, mjerila toplinske energije, osjetnika temperature i tlaka, cjevovoda, a koja je također ključna za pravilan rad sustava, nije predmet ovog rada te nije detaljno opisana. Izvedba ogrjevnih i rashladnih tijela po prostorijama te sustava klimatizacije i ventilacije dograđenog i postojećeg dijela zgrade detaljno je opisana u poglavlju 3 te se neće rekapitulirati. U prilogu je dana funkcionalna shema spajanja opreme na razini strojarnice.

8. ZAKLJUČAK

Za potrebe izvedbe nove strojarnice Osnovne škole Đurđevac analizirane su dizalice topline u različitim izvedbama toplinskog spremnika kao zamjena za postojeću plinsku kotlovnici. Cilj je predložiti prihvatljivo rješenje izvedbe toplinskog spremnika dizalice topline za predmetnu zgradu kako bi se povećao udio obnovljivih izvora energije, smanjile emisije stakleničkih plinova, smanjila ovisnosti o fosilnim gorivima, ukupna potrošnja energije te dobio dugotrajan i pouzdan sustav.

Na temelju arhitektonskih podloga, projektnog zadatka i postojeće dokumentacije prikupljene su osnovne informacije o zgradi za provođenje svih proračuna. Toplinsko opterećenje postojećeg dijela zgrade preuzeto je iz postojeće strojarske dokumentacije dok je izračun za dograđeni dio proveden prema normi HRN EN 12831. Rashladno opterećenje dograđenog dijela izračunato je prema normi VDI 2078. Oba proračuna provedena su računalnim izračunom i korištenjem programa *BricsCAD AX3000*[®].

Godišnja potrebna energija za grijanje ($Q_{H,nd}$) i hlađenje ($Q_{C,nd}$) cijele zgrade izračunate su pomoću računalnog programa *TRNSYS*[®] i programskog jezika *MATLAB*[®], uz korištenje *Algoritma za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790*. Potrebna energija za grijanje dograđenog dijela zgrade iznosi 204 983 kWh/god te 231 130 kWh/god za postojeći dio. Potrebna energija za hlađenje dograđenog dijela iznosi 58 147 kWh/god i 5 684 kWh/god za postojeći dio. Potrebne energije obuhvaćaju potrebnu energiju za pripremu zraka u vodenim grijačima i hladnjacima za potrebe mehaničke ventilacije.

U svrhu provođenja tehno-ekonomskih analiza različitih izvedba dizalica topline, izračunate su satne vrijednosti *COP*-a i *EER*-a, a zatim i isporučena energije te *SCOP* i *SEER* pojedine izvedbe. Izračunate vrijednosti *SCOP*-a i *SEER*-a uvjetovane su početnim pretpostavkama analize, modelom satnih izračuna vrijednosti *COP*-a i *EER*-a, potrebama zgrade te karakteristikom dizalica topline odabranog proizvođača opreme.

Preuzete dizalice topline iz selekcije u režimu hlađenja predimenzionirane su zbog malog opterećenja. Korištenjem više dizalica topline manjeg kapaciteta ili više dizalica topline različitih kapaciteta postigao bi se u režimu hlađenja rad pri višim djelomičnim opterećenjima i boljim *EER*-ovima. Nadalje, na razini modeliranja, više vrijednosti sezonske učinkovitosti grijanja i hlađenja postigle bi se korištenjem krivulje grijanja/hlađenja pri izračunu.

Za postojeći dio zgrade koji zadržava visokotemperaturni sustav grijanja provedena je tehnoko-ekonomski analiza korištenja visokotemperaturne „Booster“ dizalice topline voda-voda i plinskog kotla. Odabrana je visokotemperaturna „Booster“ dizalica topline voda-voda čiji investicijski troškovi čine 74% investicijskih troškova plinskog kotla. Pogonski troškovi visokotemperaturne dizalice topline za 6% su veći od pogonskih troškova plinskog kotla. Ukupni troškovi obaju sustava postaju gotovo jednaki nakon otprilike 30 godina rada. Niskotemperaturni režim predviđen je i za pokrivanje dijela potreba postojeće dijela škole gdje su zadržana visokotemperaturna ogrjevnja tijela. Analizom minimalne vanjske temperature kod koje je moguće osigurati projektnu unutarnju temperaturu zraka za postojeći dio škole korištenjem niskotemperaturnog režima grijanja 40/32 °C određen je temperaturni interval između 5 i 10 °C. U odabranom intervalu određeni postotak potrebne energije za grijanje ipak prelazi učin niskotemperaturnog režima, ali se radi o minimalnom postotku (14% za sjevernu i 6% za južnu učionicu), koji neće dovesti do primjetnog smanjenja kvalitete boravka korisnika u prostorijama. Konačan odabir granične temperature varirat će u vremenu jer je funkcija sustava upravljanja te ju korisnik može mijenjati tijekom rada sustava u ovisnosti o potrebama zgrade.

Za odabir prihvatljivog rješenja izvora topline provedena je tehnoko-ekonomski analiza dizalica topline zrak-voda, dizalice topline tlo-voda i plinskog kotla te dizalica topline voda-voda. Izvedbom voda-voda postižu se najniže vrijednosti godišnje primarne energije (33 kWh/m²a) i povezanih emisija CO₂ (28 388 kg). Najviši investicijski troškovi odnose se na izvedbu dizalice topline s tлом i plinskim kotlom pri čemu su za 76% veći od investicijskih troškova izvedbe zrak-voda te 8% od investicijskih troškova izvedbe voda-voda. Plinski kotao predstavlja tehnologiju za sebe te tako povećava investicijski trošak izvedbe s tлом. Najniži ukupni troškovi, prema trenutnim cijenama energenata i opreme te izvedbe sustava, zabilježeni su za izvedbu zrak-voda, pri čemu je ta razlika manja od 4% u odnosu sustav voda-voda. Za izvedbu zrak-voda izračunati su najviši pogonski troškovi. Voda, za razliku od zraka, predstavlja stabilan izvor toplinske/rashladne energije što povećava učinkovitost sustava. Troškovi održavanja na strani voda-voda značajni su, ali je oprema kompaktnija, dugotrajnija i sigurnija. U objektima s većom potrebom za hlađenjem, izvedbom voda-voda ostvaruje se još veće pogonske uštede. S obzirom na postojeću rezervu za proširenje sustava hlađenja na postojeći dio zgrade, očekuje se da će to u budućnosti rezultirati dodatnim smanjenjem pogonskih troškova. Na temelju opisanog predlaže se korištenje dizalica topline voda-voda.

LITERATURA

- [1] https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en [pristupljeno 9.4.2024.]
- [2] <https://eur-lex.europa.eu/HR/legal-content/summary/renewable-energy.html> [pristupljeno 9.4.2024.]
- [3] <https://www.ehpa.org/> [pristupljeno 9.4.2024.]
- [4] <https://ec.europa.eu/eurostat/en/> [pristupljeno 9.4.2024.]
- [5] <https://www.fzoeu.hr/hr/energetska-obnova-javnih-zgrada/7699> [pristupljeno 9.4.2024.]
- [6] <https://mpgi.gov.hr/o-ministarstvu/djelokrug-50/graditeljstvo-98/obnova-od-potresa-privatnih-zgrada-i-kuca-10668/financijska-sredstva-za-obnovu/nacionalni-plan-oporavka-i-otpornosti-inicijativa-obnova-zgrada/11856> [pristupljeno 9.4.2024.]
- [7] Soldo, V.; predavanja iz kolegija *Projektiranje rashladnih sustava*, Zagreb, 2022.
- [8] Boban, L., Herceg, S., Soldo, V.; Iskustva u projektiranju dizalica topline voda-voda i tlo-voda. II. radionica projekta PLIGES. 2024. Zagreb.
- [9] <https://www.hudit.hr/?tehnologija#tipovi> [pristupljeno 19.04.2024.]
- [10] SANGRAD d.o.o. Mapa arhitektonskog projekta. 2024. Zagreb
- [11] Biluš, M., Arhitektonski projekt – projekt fizike zgrade. ZOP – ĐOŠ. 2024. Zagreb.
- [12] Narodne novine (2020.), Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama. Zagreb: Narodne novine d.d., NN 102/2020.
- [13] HS-ing d.o.o., Glavni strojarski projekt energetske obnove. 2022. Bjelovar.
- [14] HRN EN 12831-1:2017, Energijska svojstva zgrada - Metoda proračuna projektnog toplinskog opterećenja.
- [15] VDI 2078, *Calculation of thermal loads and room temperatures (design cooling load and annual simulation)*, 2015.
- [16] Soldo V., Novak S., Horvat I., Dović D.: Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790. 2021.
- [17] Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine (2016.), Meteorološki podaci, Zagreb.
- [18] 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.

-
- [19] 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.
- [20] Narodne novine (2013.), Pravilnik o označavanju energetske učinkovitosti klima uređaja. Zagreb: Narodne novine d.d., NN 48/2013.
- [21] Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine (2017.): Faktori primarne energije i emisije CO₂ za izračun energetskog svojstva zgrada, Zagreb.
- [22] <https://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-1578/1578> [pristupljeno 4.7.2024.]
- [23] <https://medjimurje-plin.hr/> [pristupljeno 4.7.2024.]
- [24] TermoGea j.d.o.o. Elaborat idejnog korištenja plitke geotermalne energije za grijanje i hlađenje u strojarskom projektu. 2024. Zagreb.
- [25] Novosel, P. (2018), Revitalizacija zdenaca Z-6 na crpilištu Vinogradi. Diplomski rad, Rudarsko – geološko - naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- [26] <https://www.encon.eu/en/calculation-co2> [pristupljeno 9.7.2024.]
- [27] Klimaproing d.o.o., Izvješće o provedenom energetskom pregledu građevine. 2014. Zagreb

PRILOZI

- I. Projektno toplinsko i rashladno opterećenje prostorija dograđenog dijela zgrade
- II. Tehnička dokumentacija: Funkcionalna shema spajanja sustava i automatske regulacije

PRILOG I - Projektno toplinsko i rashladno opterećenje prostorija dograđenog dijela zgrade

PRILOG GRIJANJE

Oznaka prostorije	Opis	A_i [m ²]	ϑ_e [°C]	$\vartheta_{int,i}$ [°C]	Φ_{HL} [W]
PRIZEMLJE					
00.01	Učionica	62,9	-15	20	2 104
00.02	Kabinet	32,2	-15	20	1 265
00.03	Učionica	62,1	-15	20	1 426
00.04	Učionica	62,1	-15	20	1 913
00.05	Kabinet	31,9	-15	20	1 253
00.06	Učionica	62,1	-15	20	1 913
00.07	WC Ž	12,7	-15	20	193
00.08	WC Inv.	4,7	-15	20	49
00.09	WC M.	9,8	-15	20	196
00.10	Dizalo	4,0	-	-	-
00.11	Hodnik	29,7	-15	20	1 285
00.12	Hodnik	124,4	-15	20	5 116
00.13	Stubište	31,7	-15	20	1 569
00.14	Hodnik	58,8	-15	20	2 591
00.15	Spremište	35,8	-15	15	837

00.16	Mala Dvorana	82,7	-15	18	1 797
00.17	Hodnik	15,2	-15	20	657
00.18	Garderoba	15,4	-15	24	294
00.19	WC	4,5	-15	20	84
00.20	Tuš	9,1	-15	24	196
00.21	Tuš	8,7	-15	24	187
00.22	WC	3,3	-15	20	61
00.23	Garderoba	16,1	-15	24	307
00.24	Hodnik	15,4	-15	20	669
00.25	Čist.	3,8	-15	20	70
00.26	WC INV.	4,6	-15	20	86
00.27	Tuš INV.	5,1	-15	24	109
00.28	WC Ž	4,4	-15	20	82
00.29	WC M	4,4	-15	20	82
00.30	Kab.Nast.	5,7	-15	20	152
00.31	Tuš Nast.	4,4	-15	24	94
00.32	Ulazni Prostor	40,4	-15	20	2 979
00.33	Velika Dvorana	602,1	-15	18	19 637
00.34	Blagovaonica	230,8	-15	20	9 525

00.35	Vjetrobran	11,6	-15	20	715
00.36	Kuhinja	85,1	-15	18	2 032
00.37	Spremište	11,8	-15	15	237
00.38	Komora	3,5	-15	-	-
00.39	Ekonom.	14,8	-15	20	667
00.40	Garderoba	7,6	-15	24	169
00.41	Hodnik	4,4	-15	20	398
00.42	Kuhinjski otpad	9,4	-	-	-
00.43	Strojarnica	48,5	-	-	-
PRVI KAT					
01.01	Učionica	62,9	-15	20	1 958
01.02	Kabinet	32,2	-15	20	1 200
01.03	Učionica	62,1	-15	20	1 300
01.04	Učionica	62,1	-15	20	1 787
01.05	Kabinet	31,9	-15	20	1 188
01.06	Učionica	62,1	-15	20	1 787
01.07	WC Ž	12,7	-15	20	176
01.08	WC INV.	4,7	-15	20	39
01.09	WC M	10,1	-15	20	247

01.10	Dizalo	4,0	-	-	-
01.11	Hodnik	29,7	-15	20	1 305
01.12	Hodnik	127,5	-15	20	6 178
01.13	Stubište	31,7	-15	20	1 505
DRUGI KAT					
02.01	Učionica	62,89	-15	20	2 484
02.02	Učionica	62,11	-15	20	2 306
02.03	Učionica	77,56	-15	20	3 167
02.04	Kabinet	16,79	-15	20	752
02.05	Kabinet	16,79	-15	20	755
02.06	Učionica	77,22	-15	20	3 160
02.07	WC Ž	12,68	-15	20	271
02.08	WC Inv.	4,68	-15	20	76
02.09	WC M	9,80	-15	20	254
02.10	Dizalo	4,00	-	-	-
02.11	Hodnik	30,48	-15	20	1 438
02.12	Hodnik	128,05	-15	20	10 694
02.13	Stubište	33,00	-15	20	1 953
Σ					108 955

PRILOG HLADENJE

Oznaka prostorije	Opis	A_i [m²]	ϑ_e [°C]	$\vartheta_{int,i}$ [°C]	Φ_{CL} [W]
PRIZEMLJE					
00.01	Učionica	62,9	+32	26	4 163
00.02	Kabinet	32,2	+32	26	1 589
00.03	Učionica	62,1	+32	26	3 322
00.04	Učionica	62,1	+32	26	4 118
00.05	Kabinet	31,9	+32	26	1 582
00.06	Učionica	62,1	+32	26	4 118
00.16	Mala Dvorana	82,7	+32	26	4 902
00.33	Velika Dvorana	602,1	+32	26	38 433
00.34	Blagovaonica	230,8	+32	26	31 184
00.36	Kuhinja	85,1	+32	26	3 051
PRVI KAT					
01.01	Učionica	62,9	+32	26	4 173
01.02	Kabinet	32,2	+32	26	1 577
01.03	Učionica	62,1	+32	26	3 299
01.04	Učionica	62,1	+32	26	4 095
01.05	Kabinet	31,9	+32	26	1 570

01.06	Učionica	62,1	+32	26	4 095
DRUGI KAT					
02.01	Učionica	62,89	+32	26	4 317
02.02	Učionica	62,11	+32	26	4 240
02.03	Učionica	77,56	+32	26	5 099
02.04	Kabinet	16,79	+32	26	759
02.05	Kabinet	16,79	+32	26	759
02.06	Učionica	77,22	+32	26	5 099
					Σ 135 544