

Usporedba termotehničkih sustava za obiteljsku kuću pogonjenih električnom energijom

Bebić, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:183053>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ante Bebić

Zagreb, 2024.godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Luka Boban, mag. ing. mech.

Student:

Ante Bebić

Zagreb, 2024.godina.

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

Zahvaljujem se prije svega mentoru na iznimnoj pomoći i rijetko viđenom susretljivošću prilikom izrade ovog rada. Također zahvaljujem svojoj obitelji na nemjerljivoj podršci tijekom čitavog studija, kao i svim kolegama i kolegicama koji su mi na bilo koji način pomogli.

Ante Bebić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski



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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Bebić**

JMBAG: **0119014591**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba termotehničkih sustava za obiteljsku kuću pogonjenih električnom energijom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of electrically powered termotechnical systems for household application**

Opis zadatka:

Cilj ovog rada je provedba analize različitih izvedbi sustava grijanja, hlađenja i pripreme potrošne tople vode (PTV) u kućanstvima, a koji kao osnovni energent koriste električnu energiju. Za obiteljsku kuću smještenu u Zagrebu, izgrađenu prema važećim zahtjevima *Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*, potrebno je provesti proračun energijskih svojstava zgrade.

Na temelju provedenog proračun potrebno je definirati i odabrati opremu na razini strojarnice te rashladno-ogrjevnna tijela. Tehnički sustavi koje je potrebno uzeti u razmatranje su: dizalica topline zrak-voda, dizalica topline tlo-voda, dizalica topline zrak-zrak te sustavi neposrednog električnog grijanja. Od rashladno-ogrjevnih tijela potrebno je obraditi površinske sustave, ventilokonvektore i niskotemperaturne radijatore.

Analizom je potrebno obuhvatiti isporučenu energiju za pogon sustava, ukupne troškove sustava u periodu od 20 godina te usklađenost sa zahtjevima *Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*.

Rad treba sadržavati:

1. Opis sustava za grijanje, hlađenje i pripremu PTV-a pogonjenih električnom energijom
2. Opis i proračun energijskih svojstava obiteljske kuće
3. Opis metodologije i kriterija za usporedbu različitih izvedbi termotehničkih sustava
4. Energetsku i ekonomsku analizu odabranih sustava
5. Zaključak o provedenoj analizi

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2023.

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

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

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Luka Boban

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. DIZALICE TOPLINE I NEPOSREDNO ELEKTRIČNO GRIJANJE	3
2.1. Dizalice topline	3
2.2. Neposredno električno grijanje	12
3. TOPLINSKA BILANCA OBITELJSKE KUĆE.....	13
3.1. Opis obiteljske kuće	13
3.2. Toplinska bilanca obiteljske kuće	14
4. OPIS METODOLOGIJE ZA USPOREDBU TERMOTEHNIČKIH SUSTAVA	17
4.1. Opis odabranih termotehničkih sustava	17
4.2. Opis modela za analizu odabranih termotehničkih sustava.....	24
5. REZULTATI USPOREDBE TERMOTEHNIČKIH SUSTAVA	32
6. ZAKLJUČAK	38
LITERATURA.....	40

POPIS SLIKA

Slika 1	Shematski prikaz osnovnih komponenti dizalice topline.....	3
Slika 2	Shematski prikaz dizalice topline s prekretnim ventilom	4
Slika 3	T-s dijagram karakterističnog ljevokretnog parnog procesa.....	5
Slika 4	Prikaz monovaletnog načina rada dizalice topline.....	6
Slika 5	Prikaz bivalentno-paralelnog načina rada dizalice topline	6
Slika 6	Prikaz bivalentno-alternativnog načina rada dizalice topline	7
Slika 7	Shema indirektnog sustava zrak-voda s rekuperatorom topline pregrijanih para za pripremu PTV-a.....	8
Slika 8	Monoblok dizalica topline zrak-voda za vanjsku ugradnju Vitocal 100-A, Viessmann	9
Slika 9	Split dizalica topline zrak-voda Vitocal 111-S, Viessmann	9
Slika 10	Električni bojler Terma Aquapro Wifi 50.....	12
Slika 11	Tlocrt obiteljske kuće.....	13
Slika 12	Jugoistočno pročelje kuće	14
Slika 13	Sjeverozapadno pročelje kuće.....	14
Slika 14	Pojednostavljeni shematski prikaz izvedbe S1	18
Slika 15	Ecoforest dizalica topline tlo-voda lijevo i Toshiba dizalica topline zrak-zrak desno.....	18
Slika 16	Vaillant ventilokonvektor lijevo i Vaillant spremnik PTV-a desno	19
Slika 17	Pojednostavljeni shematski prikaz izvedbe S2	19
Slika 18	Vaillant monoblok dizalica topline zrak-voda.....	20
Slika 19	Pojednostavljeni shematski prikaz izvedbe S3	21
Slika 20	Pojednostavljeni shematski prikaz izvedbe S4	21
Slika 21	Terma Aquapro WiFi 100 električni bojler.....	22
Slika 22	Pojednostavljeni shematski prikaz izvedbe S5	22
Slika 23	Glamox 3001 TPVD/TPA električni panelni zidni radijator	23
Slika 24	Potrebna energija za grijanje kuće po satima.....	25
Slika 25	Potrebna energija za hlađenje kuće po satima	25
Slika 26	Potrebna energija za grijanje u svakom mjesecu u karakterističnoj godini	26
Slika 27	Potrebna energija za hlađenje u svakom mjesecu u karakterističnoj godini.....	26
Slika 28	Pojednostavljeni profil dnevne potrošnje PTV-a za karakterističan dan u godini .	27
Slika 29	Vrijednosti COP-a dizalice topline zrak-voda u režimu grijanja u ovisnosti o temperaturi vanjskog zraka i djelomičnom opterećenju.....	28
Slika 30	Izračun godišnjih troškova pogona za izvedbu termotehničkog sustava S1	31
Slika 31	Učinkovitost sustava u režimu grijanja u prvom tromjesečju	32
Slika 32	Učinkovitost sustava u režimu pripreme PTV-a u prvom tromjesečju.....	33
Slika 33	Učinkovitost sustava u režimu hlađenja.....	34
Slika 34	Tijek ukupnih troškova kroz vrijeme	37

POPIS TABLICA

Tablica 1	Unutarnje projektne temperature po prostorijama	14
Tablica 2	Vrijednosti koeficijenta prolaza topline građevnih elemenata	15
Tablica 3	Rezultati proračuna gubitaka topline po prostorijama	15
Tablica 4	Rezultati proračuna dobitaka topline po prostorijama	16
Tablica 5	Odabrane izvedbe termotehničkih sustava	17
Tablica 6	COP dizalica topline pri različitim temperaturama vanjskog zraka.....	29
Tablica 7	Električna energija preuzeta iz mreže odabranih izvedbi sustava.....	34
Tablica 8	Utrošena godišnja primarna energija i godišnja emisija CO ₂	35
Tablica 9	Instalacijski troškovi pojedinih kombinacija sustava.....	36
Tablica 10	Pogonski troškovi pojedinih kombinacija sustava	36
Tablica 11	Ukupni troškovi pojedinih kombinacija sustava	36

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>COP</i>	-	Faktor grijanja
<i>EER</i>	-	Faktor hlađenja
<i>P</i>	W	Snaga kompresora
<i>k</i>	Wm ⁻² K ⁻¹	Koeficijent prolaza topline
PLR	-	Parcijalno opterećenje
<i>Q</i>	J	Toplinska energija
<i>θ</i>	°C	Celzijeva temperatura
<i>Φ</i>	W	Toplinski tok

SAŽETAK

U radu je provedena energetska i ekonomska analiza sustava grijanja, hlađenja i pripreme PTV-a obiteljske kuće na području grada Zagreba, čija je korisna površina 108 m². Energetska svojstva kuće zadovoljavaju Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama. Za analizu je odabrano 5 različitih izvedbi sustava s dizalicama topline i neposrednim električnim grijačima. U prvom koraku je u računalnom alatu IntegraCAD, u skladu s HRN EN 12831 i VDI 2078, izračunato projektno toplinsko opterećenje kuće, te ono iznosi 4,901 kW u sezoni grijanja i 5,818 kW u sezoni hlađenja. Zatim je provoden proračun godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje kuće u računalnom alatu Microsoft Office Excel pomoću jednostavne satne metode prema HRN EN 13790, te ona iznosi 37,47 kWh/m² za grijanje i 40,67 kWh/m². Također je pretpostavljen profil dnevne potrošnje PTV-a od 200 l/dan za obiteljsku kuću s 4 osobe, te je proračun godišnje potrebne energije za pripremu PTV-a integriran u satnu metodu i ona iznosi 35,38 kWh/m². U Microsoft Office Excel-u razvijen je model pomoću linearne regresije s polinomima koji izračunavaju vrijednosti COP-a i EER-a dizalica topline pri bilo kojim radnim uvjetima. Dobiveni model je integriran u jednostavnu satnu metodu i na temelju njega je izračunata utrošena električna energija odabranih sustava u svakom satu u godini. Prikupljeni su iskustveni podaci o instalacijskim troškovima pojedinih sustava, a pomoću odabranog tarifnog modela Bijeli s internet stranice HEP Elektra d.o.o. određena je cijena 1 kWh električne energije u višoj dnevnoj i nižoj noćnoj tarifi. Na kraju su izračunati ukupni troškovi instalacije i pogona u vremenskom periodu od 20 godina. Iz analize rezultata pokazalo se da je najučinkovitija i najpovoljnija glede utjecaja na okoliš kombinacija sustava s dizalicom topline zrak-voda za grijanje i pripremu PTV-a te dizalicom topline zrak-zrak za hlađenje. Ekonomski najisplativija je kombinacija sustava s dizalicom topline zrak-zrak za grijanje i hlađenje te električnim grijačem za pripremu PTV-a.

Ključne riječi: nZEB, grijanje, hlađenje, dizalica topline, energetska analiza, ekonomska analiza

SUMMARY

In this thesis an energy and economic analysis of the heating, cooling and DHW systems of a family house in Zagreb, whose net surface is 108 m², was carried out. The energy properties of the house meet the Technical Regulation on the rational use of energy and thermal protection in buildings. 5 different versions of the system with heat pumps and direct electric heaters were selected for analysis. In the first step, the design heat load of the house was calculated in IntegraCAD, in accordance with HRN EN 12831 and VDI 2078, with 4,901 kW in the heating season and 5,818 kW in the cooling season. Afterwards, the calculation of the annual energy required for heating and cooling of the house was carried out in Microsoft Office Excel using the simple hourly method taken from HRN EN 13790, and it amounts to 37.47 kWh/m² for heating and 40.67 kWh/m² for cooling. A daily DHW consumption profile of 200 l/day for a family house with 4 people was also assumed, and the annual energy budget for the preparation of DHW was integrated into the hourly method and it amounts to 35.38 kWh/m². A model was developed in Microsoft Office Excel using linear regression with polynomials that calculate COP and EER values of heat pumps for any operating condition. The obtained model was integrated into a simple hourly method and based on it, the consumed electrical energy of the selected systems was calculated in each hour of the year. After collecting empirical data on the installation costs of individual systems, using the selected tariff model Bijeli from the website of HEP Elektra d.o.o. the price of 1 kWh of electricity is determined in a higher daily and lower night rate. At the end, the total costs of installation and operation over a period of 20 years were calculated. The analysis of the results showed that the most efficient and favorable in terms of environmental impact is the system with an air-to-water heat pump for heating and DHW preparation and an air-to-air heat pump for cooling. The most cost-effective system is the combination of an air-to-air heat pump for heating and cooling and an electric heater for DHW preparation.

Keywords: nZEB, heating, cooling, heat pump, energy analysis, economic analysis

1. UVOD

Više od polovice višestambenih zgrada u Hrvatskoj smješteno je u unutrašnjosti zemlje, pri čemu je 58% ovih zgrada izgrađeno prije 1981. godine, odnosno prije uvođenja tehničkih standarda koji reguliraju potrošnju energije u zgradama. Većina tih zgrada ima slabe energetske karakteristike te im često nedostaje adekvatna potresna otpornost. U sektoru kućanstva u Hrvatskoj čak 80,69% isporučene energije troši se na grijanje prostora, hlađenje i pripremu potrošne tople vode (PTV). Ogrjevno drvo dominantan je izvor energije s udjelom od gotovo 50% u potrošnji energije kućanstava, no u višestambenim zgradama taj udio iznosi oko 35%. Europski klimatski zakon, donesen u lipnju 2021., ključan je za postizanje klimatske neutralnosti do 2050. Cilj mu je smanjiti emisije stakleničkih plinova za najmanje 55% do 2030. u odnosu na razine iz 1990. Ovaj zakon ističe potrebu za elektrifikacijom sustava grijanja i pripreme potrošne tople vode kao ključnog elementa za ostvarenje tog cilja. Elektrifikacija navedenih sustava podrazumijeva prijelaz s tradicionalnih sustava grijanja na alternativne sustave kao što su dizalice topline i druge tehnologije koje koriste električnu energiju. Države članice Europske Unije moraju razviti planove za smanjenje emisija štetnih tvari i uspostaviti sustave praćenja kako bi osigurale transparentnost i pridržavanje ciljeva. U izvještaju Europskog udruženja za dizalice topline (EHPA) iz 2023. navodi se da je tržište dizalica topline u neprestanom porastu. Godine 2022. prodano je 3 milijuna dizalica topline diljem Europe, što je porast od gotovo 40% u odnosu na 2021. godinu i pridonosi brojci od gotovo 20 milijuna instaliranih dizalica topline u članicama Europske Unije. Gradnja zgrada gotovo nulte energije, koju obvezuje europska direktiva EPBD 2010/31/EU, uvelike doprinosi stvaranju klimatski neutralne Europe do 2050. godine. Zgrada gotovo nulte energije, odnosno nearly zero-energy building (nZEB), je zgrada s iznimno velikom energetsom-účinkovitošću te troši malu količinu energije koja se u velikoj mjeri dobiva iz obnovljivih izvora energije. U Republici Hrvatskoj jedan od glavnih zakonodavnih okvira koji opisuje nZEB kriterije je Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (Narodne novine NN 128/2015), prema kojemu zgrade gotovo nulte energije ispunjavaju zahtjeve za primjenom obnovljivih izvora energije kada najmanje 30% godišnje isporučene energije za rad tehničkih sustava u zgradi potječe iz obnovljivih izvora energije ili kada najmanje 60% godišnje isporučene energije za rad tehničkih sustava u zgradi dolazi iz efikasnog sustava centraliziranog grijanja ili sustava centraliziranog grijanja i hlađenja koji koristi minimalno 50% obnovljive energije,

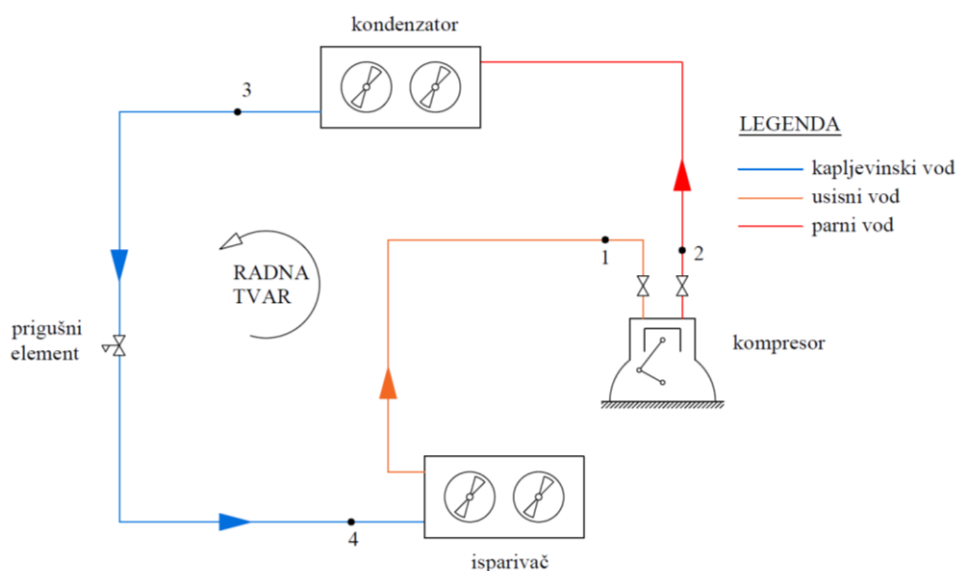
50% otpadne topline, 75% topline dobivene kogeneracijom ili 50% kombinacije navedenih izvora energije i topline. Također su u prilogu B navedenog propisa navedene najveće dopuštene vrijednosti godišnje potrebne toplinske energije za grijanje po jedinici površine korisne površine zgrade, godišnje isporučene energije po jedinici korisne površine zgrade i godišnje primarne energije po jedinici korisne površine za obiteljske kuće u novogradnji grijane i/ili hlađene na temperaturu 18°C ili više. Ovaj osvrt na energetska efikasnost stambenih objekata u Hrvatskoj, uz fokus na prijelaz prema ekološki prihvatljivim sustavima, ističe imperativ produbljenog istraživanja i razumijevanja tehnologije dizalica topline. Raznovrsne konfiguracije dizalica topline, svaka sa svojim karakteristikama u kontekstu investicijskih i operativnih troškova, nude bogat izbor opcija u potrazi za energetska efikasnošću i klimatskom odgovornošću. Cilj ovog rada je usporedba najčešće korištenih izvedbi dizalica topline i neposrednog električnog grijanja na primjeru novogradnje s naglaskom na troškove izvođenja, pogona, održavanja i potrebne energije u vremenskom periodu od 20 godina te na mogućnost zadovoljavanja zahtjeva Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama.

2. DIZALICE TOPLINE I NEPOSREDNO ELEKTRIČNO GRIJANJE

U ovom poglavlju opisan je princip rada te najčešće izvedbe i primjene sustava grijanja, hlađenja i pripreme potrošne tople vode koji koriste električnu energiju.

2.1. Dizalice topline

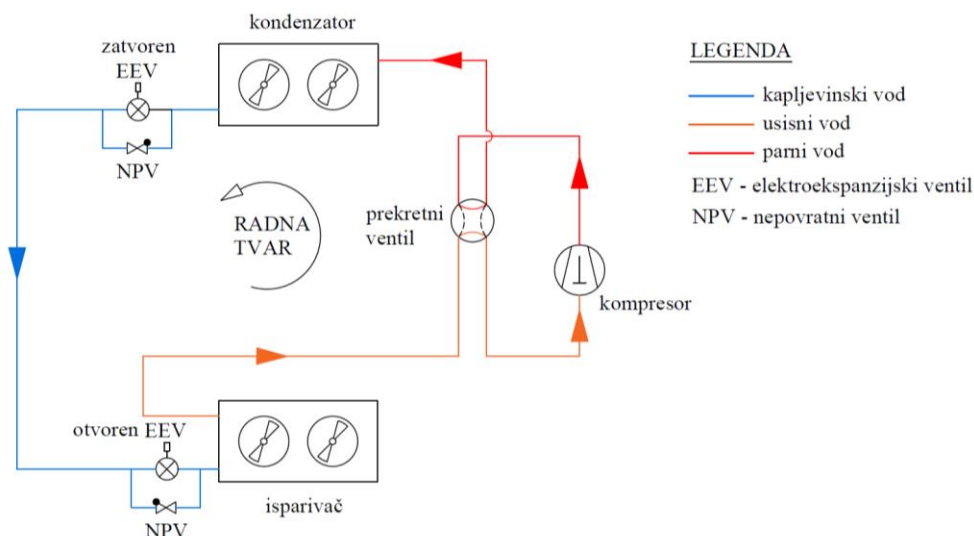
Među različitim komponentama sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije (u daljnjem tekstu GViK), kao i sustava pripreme potrošne tople vode (u daljnjem tekstu PTV), dizalice topline se ističu kao svestrani uređaji s energetski učinkovitim rješenjima za stambene i komercijalne primjene. U današnje vrijeme, uz sveprisutno globalno zagrijavanje, primjena dizalica topline je sve veća s ciljem smanjenja štetnih utjecaja na okoliš. Prije svega, korištenjem električne energije kao izvora energije ne proizvode se lokalni zagađivači zraka, poput dušikovih oksida i sumporovog dioksida u slučaju sustava grijanja koji koristi fosilno gorivo kao izvor energije. Smanjena je i emisija stakleničkih plinova, budući da se iz jednog kWh električne energije može dobiti nekoliko kWh ogrjevnog ili rashladnog učina. Osim toga, ovi uređaji se mogu jednostavno integrirati s instalacijama koje koriste obnovljive izvore energije, kao što su solarni fotonaponski sustavi. Očekivani životni vijek opreme je u rasponu od 15 do 25 godina.



Slika 1 Shematski prikaz osnovnih komponenti dizalice topline

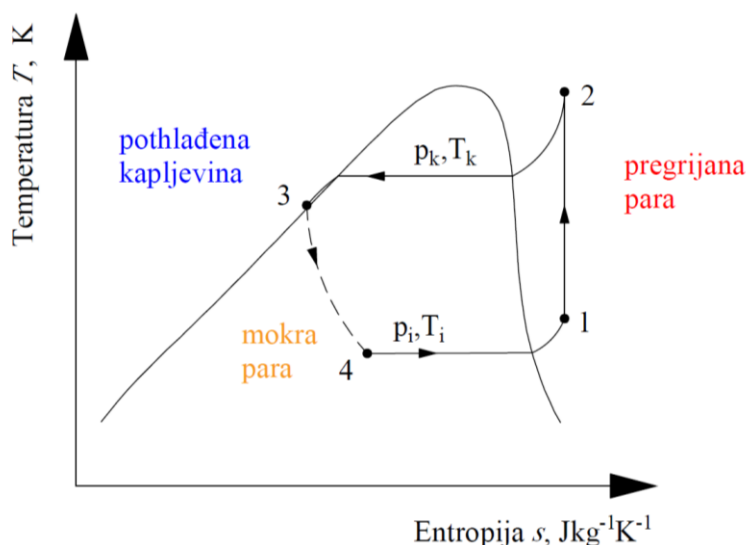
Slika 1.1. prikazuje osnovne komponente dizalice topline: kompresor, kondenzator, prigušni element i isparivač. Kroz uređaj cirkulira radna tvar koja u isparivaču preuzima toplinu iz

toplinskog spremnika niže temperature i u kondenzatoru ju predaje toplinskom spremniku više temperature, što se odvija na kondenzatoru. Budući da je prijenos topline s toplinskog spremnika niže na toplinski spremnik više temperature protivan drugom glavnom stavku termodinamike, da bi se mogao ostvariti, potreban je dodatani utrošak rada u obliku privedene kompenzacijske energije, a koja je najčešće mehanička kod dizalica topline pogonjenih elektromotornim kompresorom ili toplinska kod apsorpcijskih uređaja pogonjenih generatorom pare.



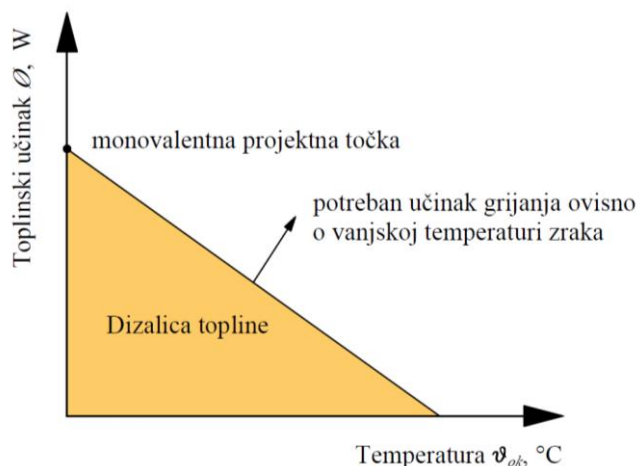
Slika 2 Shematski prikaz dizalice topline s prekretnim ventilom

Pomoću prekretnog ventila (slika 1.2.) dizalice topline mogu, ovisno o sezoni, raditi u režimu grijanja ili u režimu hlađenja, pri čemu kondenzator i isparivač zamjenjuju uloge uz zadržavanje usisa radne tvari u kompresor s iste strane, što je nužno zbog same konstrukcije kompresora.



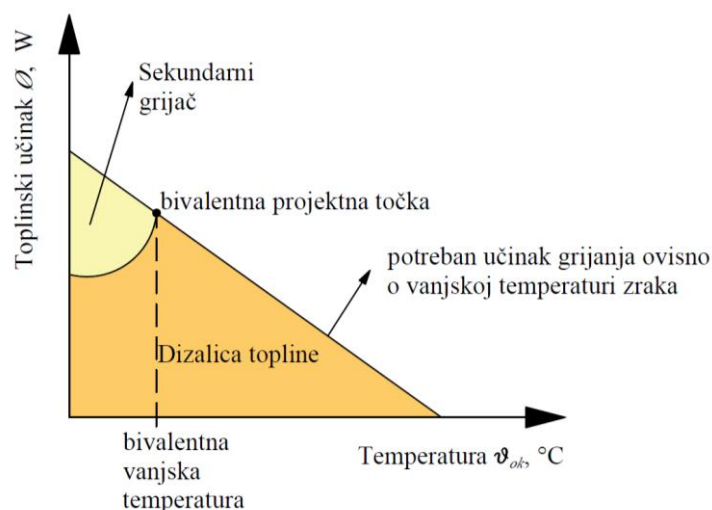
Slika 3 T-s dijagram karakterističnog ljevokretnog parnog procesa

Temeljni princip rada dizalice topline, prikazan na slici 1.3. sa četiri karakteristične točke, je ljevokretni rashladni parni proces u kojem radna tvar mijenja svoje agregatno stanje pri prolasku kroz isparivač i kondenzator. Kompresor usisava pregrijanu paru radne tvari niske temperature i tlaka, točka 1, te ju kompresijom podiže na visoku temperaturu, što zbog karakteristika radnih tvari korištenih u dizalicama topline rezultira i povišenjem tlaka. Pregrijana para radne tvari nakon kompresora, sada visoke temperature i tlaka u točki 2, ulaze u kondenzator, gdje predaje toplinu visokotemperaturnom toplinskom spremniku uz promjenu agregatnog stanja radne tvari iz plinovitog u kapljevito. Iz kondenzatora izlazi blago pothlađena kapljevita radna tvar, točka 3, jer je za prigušni element bitno da radi s čistom kapljevinom kako bi mogao precizno kontrolirati protok i pregrijanje. Nakon pothlađenja, kapljevita radna tvar prolazi kroz prigušni element, pri čemu joj ekspanzijom pada tlak, a posljedično i temperatura, te prelazi u stanje mokre pare, točka 4. U stanju mokre pare, radna tvar ulazi u isparivač, gdje preuzima toplinu od niskotemperaturnog toplinskog spremnika i isparava. Iz isparivača izlazi blago pregrijana para radne tvari kako bi se osiguralo da na usisu kompresora nema kapljica radne tvari, kako bi se spriječili hidraulički udari i oštećenje kompresora, budući da je kapljevina nestlačiva. Ovisno o načinu povezivanja unutar GViK sustava, dizalice topline mogu biti izvedene kao monovalentne, bivalentno-paralelne i bivalentno alternativne. Kod monovalentne izvedbe (slika 1.4.), predviđeno je da dizalica topline pokriva cjelokupno toplinsko opterećenje objekta.



Slika 4 Prikaz monovalentnog načina rada dizalice topline

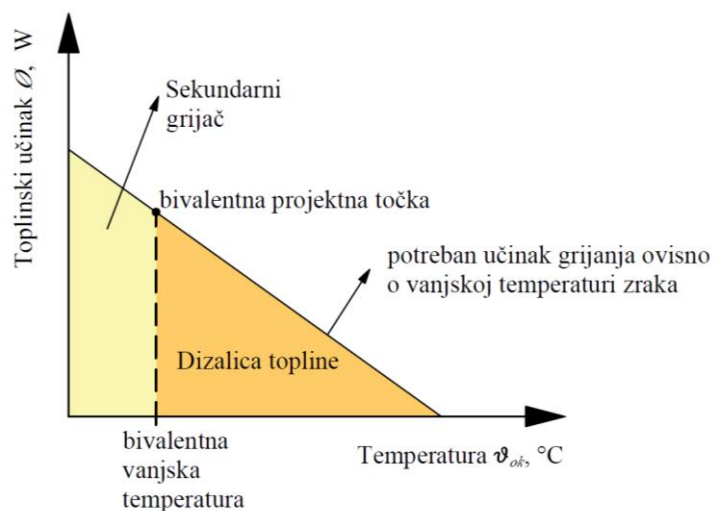
Kod bivalentno-paralelne izvedbe (slika 1.5.), dizalica topline pokriva toplinsko opterećenje do bivalentne projektne vanjske temperature kod koje se uključuje sekundarni izvor topline poput plinskog kotla ili električnog grijača. Tako se nadomješta kapacitet dizalice topline pri niskim vanjskim temperaturama i preventira predimenzioniranje uređaja kod viših temperatura okolišnog zraka. Ovakva rješenja su tipična za gotovo sve sustave kod kojih se koristi dizalica topline zrak-voda.



Slika 5 Prikaz bivalentno-paralelnog načina rada dizalice topline

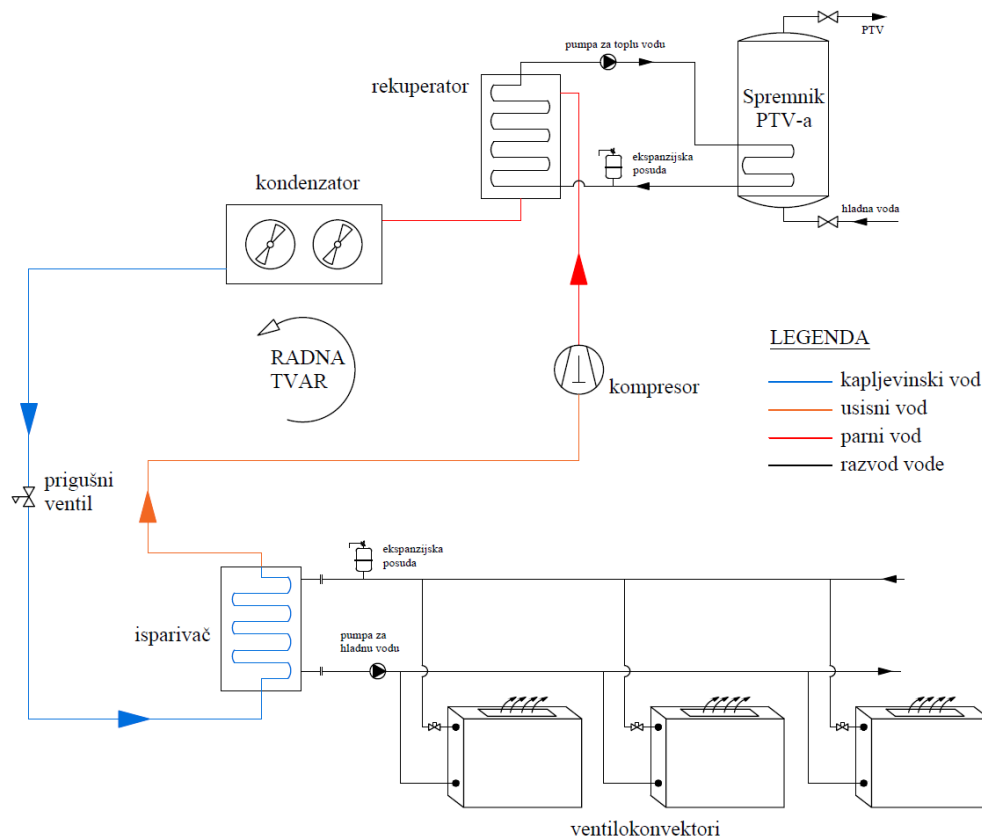
Kod bivalentno-alternativne izvedbe (slika 1.6.), kada vanjska temperatura dosegne bivalentnu projektnu točku, dizalica topline se gasi i cjelokupno toplinsko opterećenje preuzima

sekundarni izvor topline. Klasična primjena ove izvedbe je za radijatorske sustave kod obnove strojarnice.



Slika 6 Prikaz bivalentno-alternativnog načina rada dizalice topline

Dizalice topline mogu biti instalirane u direktnim ili indirektnim sustavima. U direktnom sustavu, radna tvar izmjenjuje toplinu neposredno s zrakom u prostoru koji se kondicionira. U indirektnom sustavu (slika 1.7.), radna tvar zagrijava/hladi posredni prijenosnik energije, poput vode ili glikolne otopine na lokacijama s opasnošću od smrzavanja u rashladniku kapljevine (eng. chiller), kojim se dalje zagrijava/hladi zrak u ogrjevnim i rashladnim tijelima postavljenim po prostorijama objekta. Često se pregrijane pare radne tvari na izlazu iz kompresora provode kroz rekuperator topline, tzv. desuperheater, u kojem se zagrijava PTV. Prednost direktnog sustava je veća energetska učinkovitost jer nema dodatnog izmjenjivača topline, ali u indirektnom sustavu su kraći cjevovodi radne tvari i posljedično manji padovi tlaka.



Slika 7 Shema indirektnog sustava zrak-voda s rekuperatorom topline pregrijanih para za pripremu PTV-a

Dva su tipa konstrukcijskih rješenja dizalica topline: monoblok uređaji (slika 1.8.), kod kojih se sve komponente nalaze u jednom kućištu, i split uređaji (slika 1.9.) s vanjskom jedinicom u kojoj se nalazi izmjenjivač koji izmjenjuje toplinu sa zrakom, kompresor i prigušni ventil te unutarnjom jedinicom sa izmjenjivačem koji izmjenjuje toplinu s vodenim krugom. Često su u primjeni i multisplit sustavi koji imaju jednu vanjsku jedinicu spojenu na više unutarnjih jedinica, omogućujući kontrolu temperature u više prostorija nezavisno jedna od druge.



Slika 8 Monoblok dizalica topline zrak-voda za vanjsku ugradnju Vitocal 100-A, Viessmann



Slika 9 Split dizalica topline zrak-voda Vitocal 111-S, Viessmann

Toplinski spremnici dizalica topline mogu biti zrak, otpadna toplina, tlo i voda. Dizalice topline koje koriste zrak povoljne su glede prostora za smještaj, jednostavno se ugrađuju u GviK sustave i značajno su jeftinije od drugih izvedbi. Prednost zraka kao toplinskog spremnika je

njegova pristupačnost, međutim, temperatura vanjskog zraka za vrijeme zime, kada je grijanje najpotrebnije, je najniža, a za vrijeme sezone hlađenja je najviša. Također se često u sezoni grijanja zbog niske temperature vanjskog zraka zaleđuje isparivač, što uzrokuje dodatne troškove energije za njegovo odleđivanje. Ventilatori vanjskih jedinica koje izmjenjuju toplinu sa zrakom su i primjetan izvor buke. Dizalice topline zrak-zrak nemaju spremnik topline već izravno zagrijavaju ili hlade zrak u unutarnjim prostorima. Ovi sustavi su uobičajen izbor za hlađenje, ali se mogu koristiti i grijanju obiteljskih kuća u split ili multisplit izvedbi. Dizalice topline zrak-voda obično imaju vodeni spremnik unutar zgrade za pohranu topline i zagrijavaju ili hlade vodu koja cirkulira kroz ogrjevna tijela postavljena po pojedinim prostorijama, kao što su radijatori, ventilokonvektori i površinska ogrjevno-rashladna tijela. Dodatno se integriraju u monovalentne i bivalentne sustave pripreme PTV-a. Obje izvedbe dizalica topline sa zrakom su manje učinkovite u ekstremno hladnim uvjetima, zbog navedenih karakteristika temperature vanjskog zraka. Dizalice topline tlo-voda koriste geotermalnu energiju tla za grijanje i hlađenje tako što se polažu cijevi na većoj površini zemlje i dubini od oko 1,5 metara u horizontalnoj izvedbi (zemni kolektori) ili se cijevi spuštaju u bušotine duboke i do 100 metara u vertikalnoj izvedbi, ovisno o dostupnom prostoru i potrebama sustava. Temperatura tla na dubini na kojoj se postavljaju cijevi je relativno konstantna tijekom cijele godine, između 4 i 10 °C, čime se osigurava konzistentnost i visoka učinkovitost sustava u svim vremenskim uvjetima. Izvedbe tlo-voda su skuplje od zrak-zrak i zrak-voda sustava zbog potrebne infrastrukture na strani tla, poput bušotina ili zemnih kolektora.

Kod odabira dizalice topline koja će biti prikladna za željenu aplikaciju provodi se usporedba različitih parametara, prije svega učinkovitost putem nekoliko faktora. Među najvažnijima su:

- COP (eng. Coefficient of Performance) – faktor grijanja, koji iskazuje omjer isporučenog toplinskog učina na kondenzatoru (kW) i privedene kompenzacijske snage (kW),

$$COP = \frac{\phi_k}{P} \quad (1.1.)$$

- EER (eng. Energy Efficiency Ratio) – faktor hlađenja, koji iskazuje omjer odvedenog toplinskog učina na isparivaču (kW) i privedene kompenzacijske snage (kW),

$$EER = \frac{\phi_i}{P} \quad (1.2.)$$

COP i EER faktori prikazuju učinkovitost dizalice topline pri standardnim radnim točkama. Da bi se procijenila učinkovitost dizalice topline u različitim uvjetima okoliša tijekom cijele godine, koriste se sezonski faktori grijanja i hlađenja, SCOP i SEER, koji iskazuju omjer isporučene, odnosno odvedene toplinske energije (kWh) i privedene električne energije (kWh) tijekom čitave sezone grijanja, odnosno hlađenja. U tehničkim specifikacijama danih od proizvođača, za svaku dizalicu topline se u skladu s normom HRN EN 14511 navode radne točke koje opisuju njezinu učinkovitost u standardiziranim uvjetima rada. Radne točke označavaju se slovom koje predstavlja izvor odnosno ponor topline i brojem koji predstavlja temperaturni režim medija. Na primjer, oznaka A7/W35 predstavlja polaznu temperaturu zraka na isparivaču 7 °C i izlaznu temperaturu vode iz kondenzatora 35 °C. Također, svaka dizalica topline ima energetska naljepnicu koja sadrži maksimalni kapacitet uređaja u kW za grijanje, hlađenje i/ili pripremu PTV-a, godišnju potrošnju energije u kWh i energetska razred, od A+++ do D. Naravno, stvarni uvjeti rada mogu znatno varirati od optimalnih zbog raznih faktora kao što su temperatura okoline, protok fluida kroz sustav, starost, stanje opreme i uvjeti instalacije te se isti trebaju uzeti u obzir prilikom odabira odgovarajuće dizalice topline.

2.2. Neposredno električno grijanje

Rad električnih grijača zasniva se na propuštanju električne struje kroz materijal velikog električnog otpora, kao što je nikrom žica izrađena od legure nikla i kroma, pri čemu dolazi do pretvorbe električne energije u toplinsku. Ovi uređaji su jednostavni za ugradnju i ne zahtijevaju kompleksne radove kao što može biti slučaj s dizalicama topline. Mogu brzo zagrijati prostoriju jer proizvode toplinu odmah nakon što se uključe neovisno o toplinskom stanju prostorije. Budući da se koristi električna energija, nema potrebe za spremnicima goriva ili instalacijom cjevovoda za transport energije. Glavni nedostatak je velika potrošnja električne energije i posljedično visoki troškovi pogona. Električni grijači se mogu koristiti kao pomoćni grijači ili kao primarni grijači u obliku električnih radijatora i konvektora, električnih podnih grijanja te električnih bojlera za pripremu PTV-a (slika 1.10.). Električni bojleri, kao i dizalice topline, imaju svoju energetska naljepnicu koja prikazuje klasu energetske učinkovitosti bojlera, godišnju potrošnju električne energije u kWh, od proizvođača zadanu temperaturu ekonomičnog i komfornog radnog režima, maksimalnu temperaturu na koju se može podesiti termostat električnog bojlera i količinu tople (miješane) vode na 40 °C u litrama.



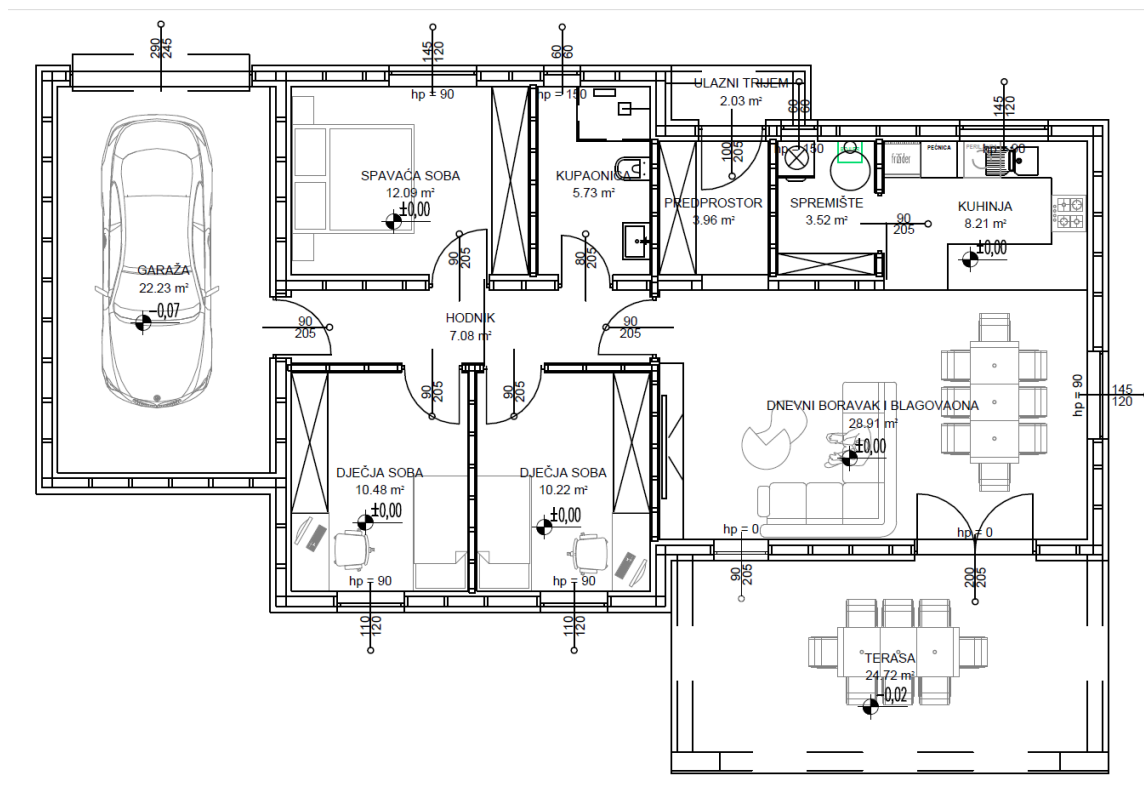
Slika 10 Električni bojler Terma Aquapro Wifi 50

3. TOPLINSKA BILANCA OBITELJSKE KUĆE

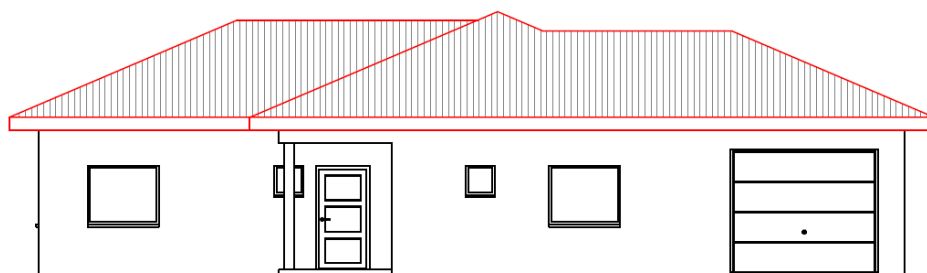
Za obiteljsku kuću odabranu za analizu u sklopu ovog rada opisane su građevne karakteristike te je izvršen energetski proračun u računalnom programu IntegraCAD.

3.1. Opis obiteljske kuće

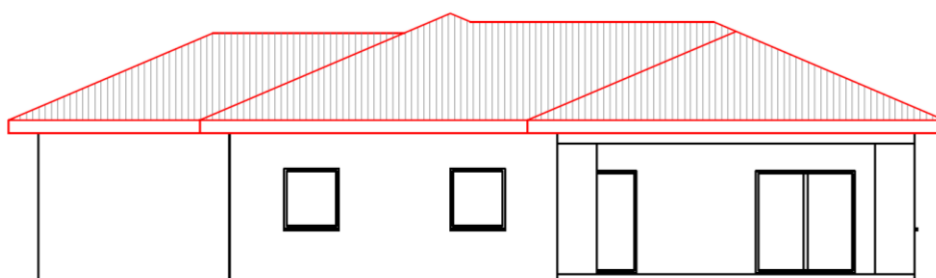
Obiteljska kuća smještena je u kontinentalnoj Hrvatskoj, na području grada Zagreba. Sastoji se od jedne etaže s kosim krovom, u kojoj se nalazi velika prostorija koja služi kao dnevni boravak, blagavaona i kuhinja u jednom, tri spavaće sobe i kupaonica, prolazni hodnik, spremište te garaža. Također, u vanjskom dijelu prizemlja nalaze se natkriveni ulazni trijem i terasa. Kuća je duga 18 m, široka 9 m i visoka 5,5 m. Pretpostavlja se da su sve unutarnje prostorije osim garaže grijane i hladene, te da se kupaonica ne hladi. Bruto površina kuće iznosi 166 m², dok je korisna površina grijanog dijela kuće 108 m². Na slici 3.1.1. prikazan je tlocrt kuće, a na slikama 3.1.2. i 3.1.3. jugoistočno i sjeverozapadno pročelje kuće, preuzeti iz arhitektonskih podloga.



Slika 11 Tlocrt obiteljske kuće



Slika 12 Jugoistočno pročelje kuće



Slika 13 Sjeverozapadno pročelje kuće

3.2. Toplinska bilanca obiteljske kuće

Cjelokupni proračun energetskih potreba kuće proveden je u računalnom programu IntegraCAD, za sezonu grijanja prema HRN EN 12831 i sezonu hlađenja prema VDI 2078.

Vanjska projektna temperatura za sezonu grijanja odabrana je prema podacima propisanim od Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja te za lokaciju grada Zagreba (meteorološka postaja Maksimir) ona iznosi $-12,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odabrane projektne temperature pojedinih grijanih prostorija u skladu s normom dane su u tablici 3.1.1:

Tablica 1 Unutarnje projektne temperature po prostorijama

Prostorija	Unutarnja projektna temperatura, $^{\circ}\text{C}$
Spavaća soba	20
Kupaona	24
Kuhinja+dnevni+ulaz	20
Dječja soba lijevo	20
Dječja soba desno	20
Hodnik	20
Spremište	20

Za koeficijente prolaza topline građevinskih elemenata (tablica 3.1.2.) korištene su vrijednosti koje zadovoljavaju trenutne energetske standarde, uvećane za $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ s pretpostavkom da su toplinski mostovi projektirani u skladu s katalogom dobrih rješenja toplinskih mostova.

Tablica 2 Vrijednosti koeficijenata prolaza topline građevnih elemenata

Građevni element	Koeficijent prolaza topline, $\text{W/m}^2\text{K}$
Vanjski zid	0,185
Zid prema garaži	0,185
Unutarnji zid	0,245
Pod	0,245
Strop	0,155
Unutarnja vrata	2
Vanjska vrata	2
Prozor/Staklena stijena	1,2

Broj izmjena zraka za prostorije uzet je prema higijenskom minimumu: 1,5 po satu za kupaonicu i 0,5 po satu za ostale prostorije. Proračunom se dobije da ukupni toplinski gubici iznose $4,901 \text{ kW}$, odnosno $55,7 \text{ W}$ po m^2 korisne površine grijanog dijela kuće, a rezultati proračuna prikazani su u tablici 3.1.3:

Tablica 3 Rezultati proračuna gubitaka topline po prostorijama

Prostorija	Φ_{HL} , W	Φ_{HL} po m^2 , W/m^2
Spavaća soba	620	51,67
Kupaona	529	89,36
Kuhinja+dnevni+ulaz	2263	59,58
Dječja soba lijevo	484	46,72
Dječja soba desno	522	49,53
Hodnik	313	41,02
Spremište	170	47,62
Ukupno	4901	55,69

U proračunu toplinskih dobitaka u sezoni hlađenja odabrana je klimatska zona 1 koja se približno poklapa s podacima za grad Zagreb. Za unutarnju projektnu temperaturu odabrano je 22 °C. U tablici 3.1.4. dani su rezultati proračuna za 23. srpanj kao projektni dan u 16 h. Ukupni toplinski dobitci kuće iznose 5,818 kW, odnosno 70,88 W po m² korisne površine.

Tablica 4 Rezultati proračuna dobitaka topline po prostorijama

Prostorija	Φ_{CL} , W	Φ_{CL} po m ² , W/m ²
Spavaća soba	772	64,33
Kupaona	0	0
Kuhinja+dnevni+ulaz	2882	75,88
Dječja soba lijevo	660	63,71
Dječja soba desno	690	65,46
Hodnik	503	65,92
Spremište	311	87,11
Ukupno	5818	70,88

4. OPIS METODOLOGIJE ZA USPOREDBU TERMOTEHNIČKIH SUSTAVA

U ovom poglavlju odabrane su različite kombinacije termotehničkih sustava pogonjenih električnom energijom te je opisan model izrađen u svrhu energetske i ekonomske analize odabranih sustava.

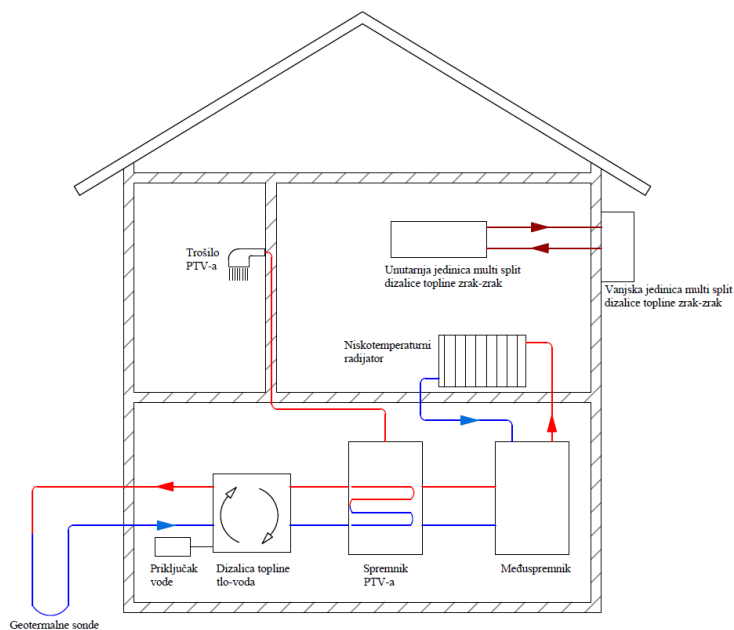
4.1. Opis odabranih termotehničkih sustava

U tablici 4.1.1. navedene su kombinacije termotehničkih sustava odabrane za energetske i ekonomske analize:

Tablica 5 Odabrane izvedbe termotehničkih sustava

Oznaka	Grijanje	Hlađenje	PTV
S1	tlo-voda	zrak-zrak	tlo-voda
S2	zrak-voda	zrak-voda	zrak-voda
S3	zrak-voda	zrak-zrak	zrak-voda
S4	zrak-zrak	zrak-zrak	električni grijač
S5	električni grijač	zrak-zrak	električni grijač

U izvedbi S1 (slika 4.1.1.) za grijanje i pripremu PTV-a odabrana je dizalica topline tlo-voda ecoGEO⁺ B1 PRO proizvođača Ecoforest s učinkom grijanja i hlađenja 6 kW, dok je za hlađenje odabrana multi split dizalica topline zrak-zrak Shorai Premium RAS-B22J2KVRG-E/RAS-22J2AVRG-E proizvođača Toshiba s učinkom grijanja 7 kW i učinkom hlađenja 6,1 kW. Odabrani uređaji prikazani su na slici 4.1.2.



Slika 14 Pojednostavljeni shematski prikaz izvedbe S1



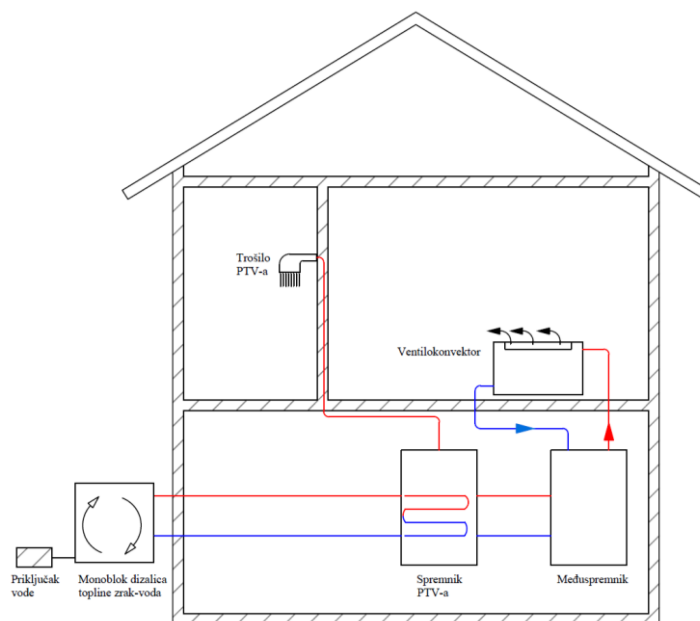
Slika 15 Ecoforest dizalica topline tlo-voda lijevo i Toshiba dizalica topline zrak-zrak desno

Kao ogrjevna tijela u kondicioniranim prostorijama odabrani su ventilokonvektori aroVAIR VA 2-015 CN proizvođača Vaillant, kombiniranog ogrjevnog učinka 6,28 kW i kombiniranog rashladnog učinka 6 kW, dok je za akumulaciju PTV-a odabran spremnik uniSTOR VIH R 120/6 B proizvođača Vaillant, zapremnine 117 l. Navedeni uređaji prikazani su na slici 4.1.3.



Slika 16 Vaillant ventilokonvektor lijevo i Vaillant spremnik PTV-a desno

U izvedbi S2 (slika 4.1.4.) za grijanje, hlađenje i pripremu PTV-a –odabrana je monoblok dizalica topline zrak-voda aroTHERM plus VWL 65/6 A S3 proizvođača Vaillant s učinkom grijanja 8,5 kW i učinkom hlađenja 7,2 kW. Odabrana dizalica toplina prikazana je na slici 4.1.5.

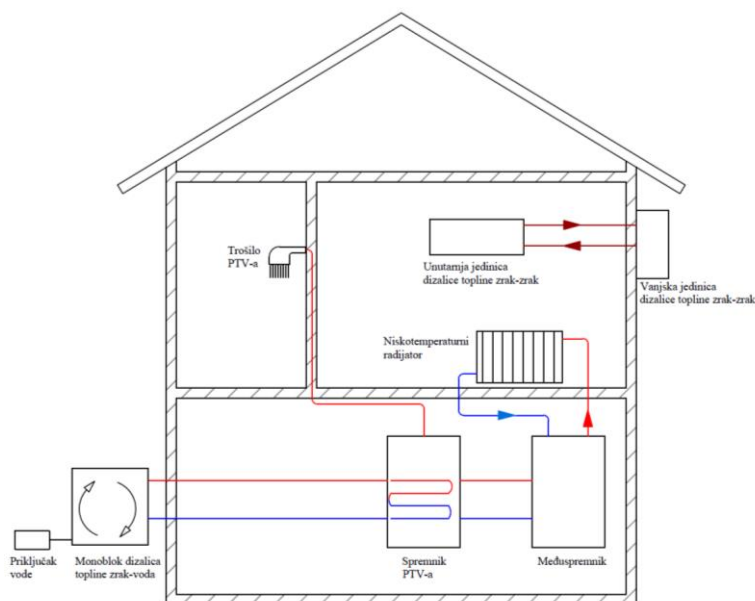


Slika 17 Pojednostavljeni shematski prikaz izvedbe S2



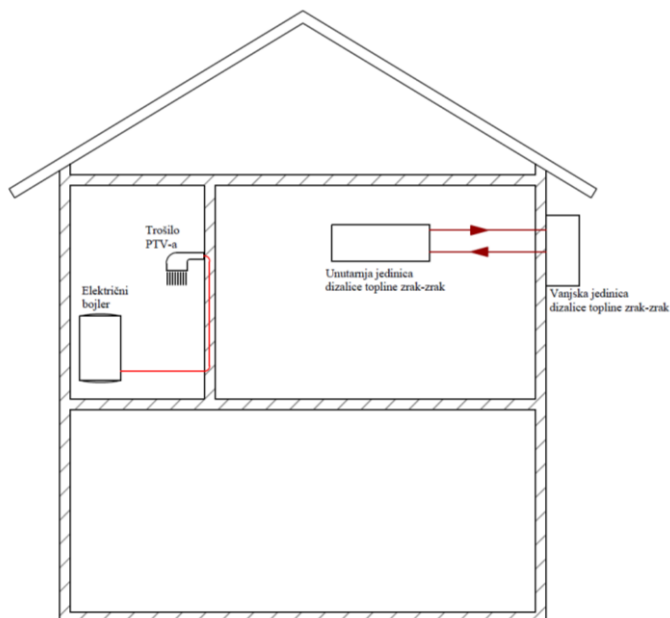
Slika 18 Vaillant monoblok dizalica topline zrak-voda

Kao ogrjevno-rashladna tijela u kondicioniranim prostorijama odabrani su ventilokonvektori proizvođača Vaillant kao u izvedbi S1. Za akumulaciju PTV-a je odabran spremnik proizvođača Vaillant iz izvedbe S1. Za grijanje i pripremu PTV-a u izvedbi S3 (slika 4.1.7.) odabrana je dizalica topline zrak-voda proizvođača Vaillant iz izvedbe S2, dok je za hlađenje odabrana dizalica topline zrak-zrak proizvođača Toshiba iz izvedbe S1. Kao ogrjevna tijela odabrani su ventilokonvektori proizvođača Vaillant iz izvedbe S1 te spremnik za akumulaciju PTV-a proizvođača Vaillant, također iz izvedbe S1.



Slika 19 Pojednostavljeni shematski prikaz izvedbe S3

U izvedbi S4 (slika 4.1.8.) za grijanje i hlađenje odabrana je dizalica topline zrak-zrak proizvođača Toshiba iz izvedbe S1, a za pripremu PTV-a odabran je električni bojler Aquapro WiFi 100 (slika 4.1.9.) proizvođača Terma s učinkom grijača od 2000 W i zapreminom spremnika za PTV od 93 l.

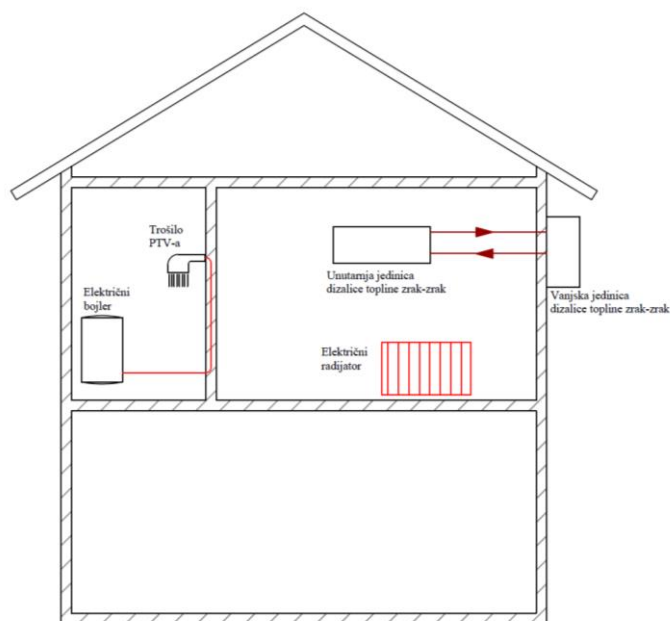


Slika 20 Pojednostavljeni shematski prikaz izvedbe S4



Slika 21 Terma Aquapro WiFi 100 električni bojler

Za grijanje u izvedbi S5 (slika 4.1.10.) odabrani su električni panelni zidni radijatori proizvođača Glamox (slika 4.1.11.), 3001 TPVD za kupaonu i 3001 TPA 04/06/08/15 za ostale kondicionirane prostorije obiteljske kuće kombiniranog ogrjevnog učinka 5,4 kW. Pripremu PTV-a vrši električni bojler proizvođača Terma iz izvedbe S4, a hlađenje dizalica topline zrak-zrak proizvođača Toshiba iz izvedbe S1.



Slika 22 Pojednostavljeni shematski prikaz izvedbe S5



Slika 23 Glamox 3001 TPVD/TPA električni panelni zidni radijator

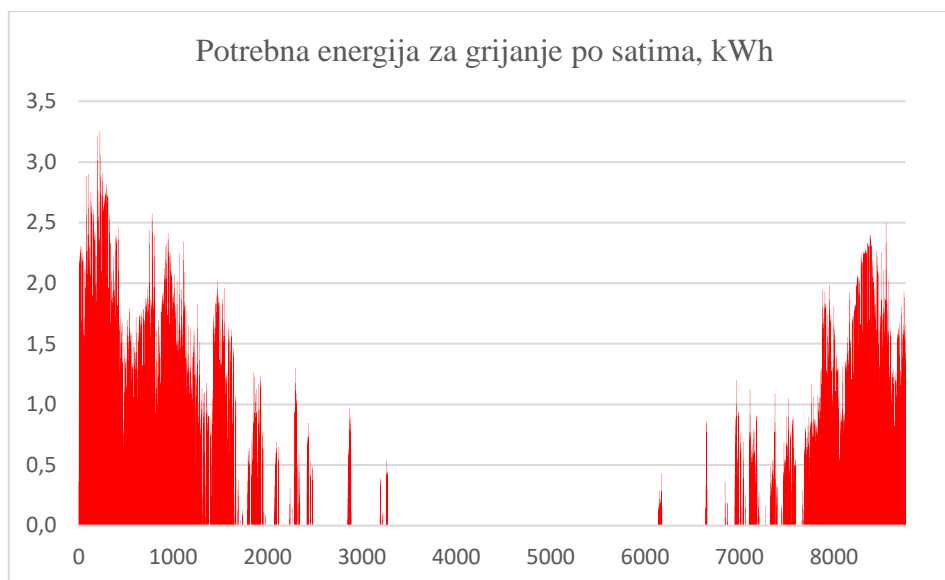
4.2. Opis modela za analizu odabranih termotehničkih sustava

GviK sustav se, u skladu s HRN EN 12831 i VDI 2078, dimenzionira prema projektnim toplinskim gubicima i dobicima koji se javljaju samo nekoliko puta u godini. Da bi se mogli odrediti pogonski troškovi termotehničkog sustava na godišnjoj razini potrebno je odrediti godišnju potrebnu energiju za grijanje, hlađenje i pripremu PTV-a. U tu svrhu iskorištena je jednostavna satna metoda iz Algoritma za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, kojom je proračunata potrebna energija za grijanje i hlađenje obiteljske kuće u svakom satu u karakterističnoj godini. Također, u jednostavnu satnu metodu integriran je proračun isporučene energije za pripremu PTV-a na temelju pretpostavljenog profila potrošnje PTV-a karakterističnog dana u godini.

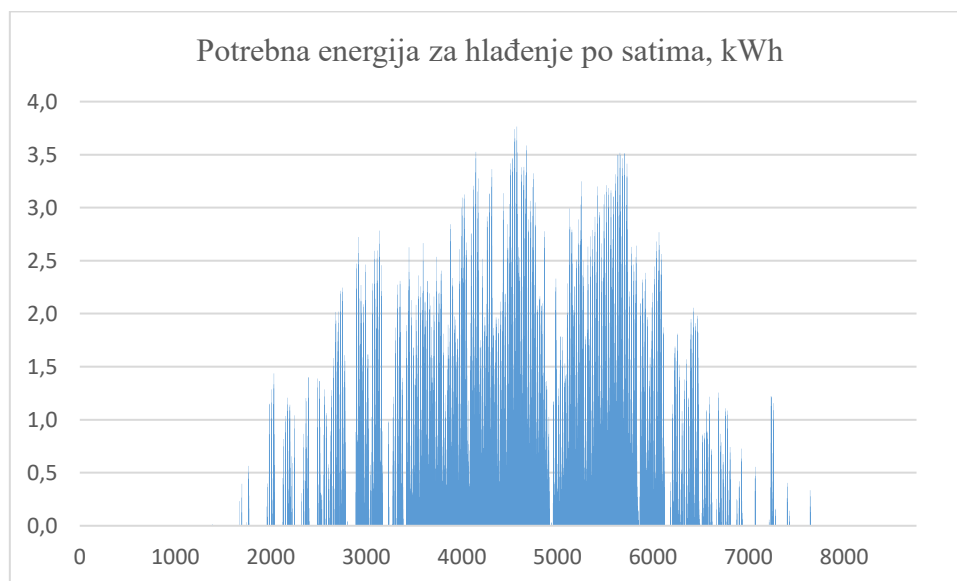
Ulazni podaci za proračun su satni klimatski podaci o vanjskoj temperaturi zraka, sunčevom ozračenju na nagnutu i ravnu plohu ovisno o geografskoj orijentaciji, preuzeti iz meteoroloških podataka za meteorološku stanicu Zagreb – Maksimir sa stranica Ministarstva prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine; te građevinski podaci koji se mogu naći u 3. poglavlju u tablici 3.1.2.

Postupak proračuna jedostavne satne metode sastoji se od 3 osnovna koraka za svaki sat u godini. Pretpostavljena je unutarnja projektna temperatura od 20°C u sezoni grijanja i 22°C u sezoni hlađenja u skladu s normom za kontinentalnu Hrvatsku. U 1. koraku provodi se proračun kako bi se provjerilo postoji li potreba za grijanjem/hlađenjem. U 2. koraku, ukoliko potreba za grijanjem/hlađenjem postoji, određuje se stvarna potreba za grijanjem/hlađenjem. U 3. koraku se provodi korekcija isporučene energije za grijanje/hlađenje u skladu s dostupnom snagom izvora topline i ogrjevnih/rashladnih tijela. Sam postupak je iterativan, budući da se prilikom proračuna metoda poziva na vrijednosti unutarnje proračunske temperature zraka dobivene u prethodnom vremenskom koraku, a prilikom proračuna početnog sata u godini u prvoj iteraciji vrijednost unutarnje temperature zraka mora se pretpostaviti.

Proračun je proveden u Microsoft Office Excel- cije, te su rezultati potrebne energiju za grijanje i hlađenje kuće po satima u godini grafički prikazani na slikama 4.2.1. i 4.2.2.

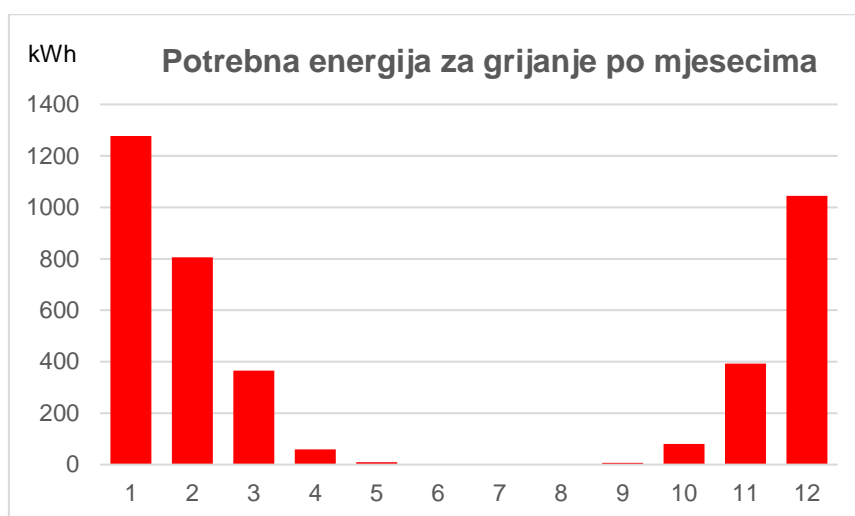


Slika 24 Potrebna energija za grijanje kuće po satima

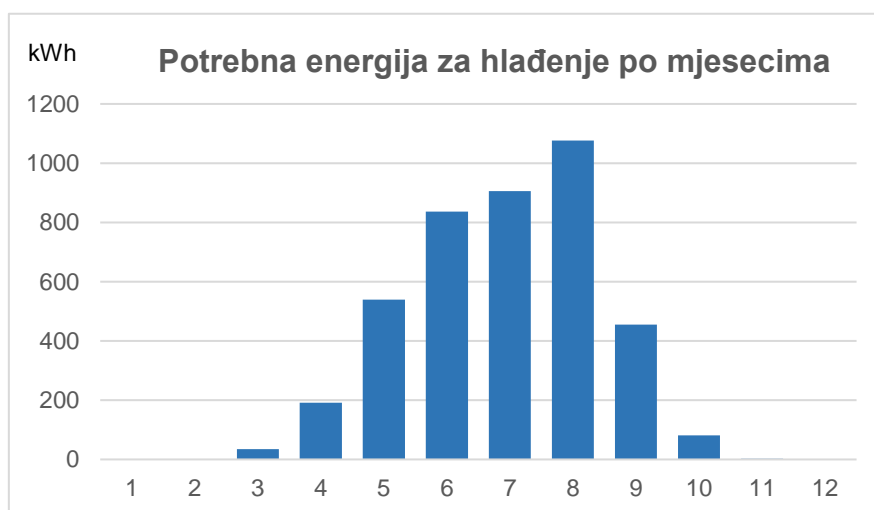


Slika 25 Potrebna energija za hlađenje kuće po satima

Godišnja potrebna energija za grijanje iznosi 4040,63 kWh, odnosno 37,47 kWh po m² korisne površine kuće što zadovoljava zahtjev za najvećom dopuštenom vrijednošću od 45,78 kWh/m². Godišnja potrebna energija za hlađenje iznosi 4122,75 kWh, odnosno 40,67 kWh po m² korisne površine kuće. Na slikama 4.2.3. i 4.2.4. su također prikazane mjesečne potrebne energije za grijanje i hlađenje iz kojih se može vidjeti da je najveća potreba za grijanjem u siječnju i iznosi 1277,86 kWh, a za hlađenjem u kolovozu te iznosi 1076,57 kWh.

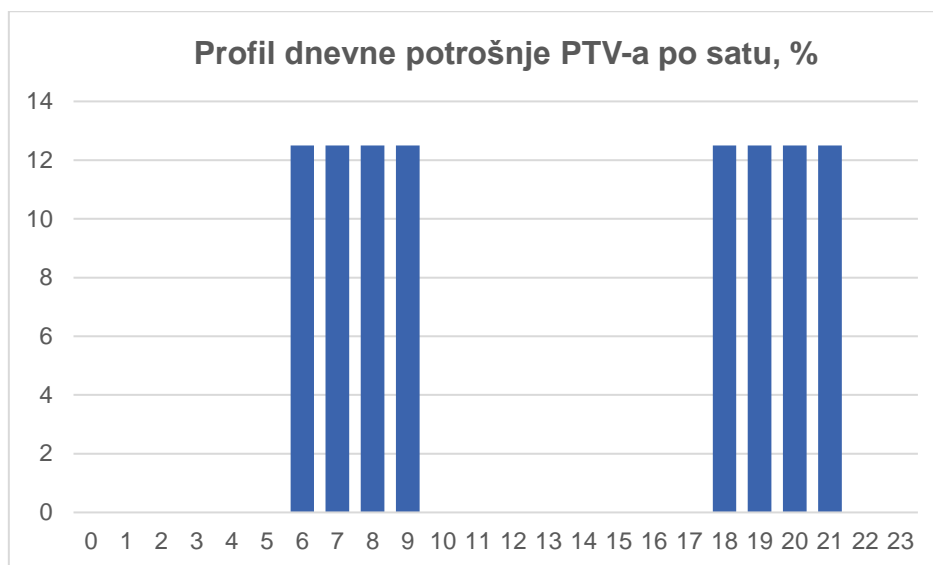


Slika 26 Potrebna energija za grijanje u svakom mjesecu u karakterističnoj godini



Slika 27 Potrebna energija za hlađenje u svakom mjesecu u karakterističnoj godini

Za proračun potrebne energije za pripremu PTV-a pretpostavljen je profil dnevne potrošnje PTV-a za karakterističan dan u godini (slika 4.2.3.), prema kojem se 50-% dnevne potrošnje odvija ujutro od 06:00 do 10:00 h, a ostatak navečer od 18:00 do 22:00 h, uz dnevnu potrošnju od 200 litara za obiteljsku kuću s 4 osobe, odnosno 50 litara dnevno po osobi. Godišnja potrebna energija za pripremu PTV-a iznosi 3820,64 kWh.



Slika 28 Pojednostavljeni profil dnevne potrošnje PTV-a za karakterističan dan u godini

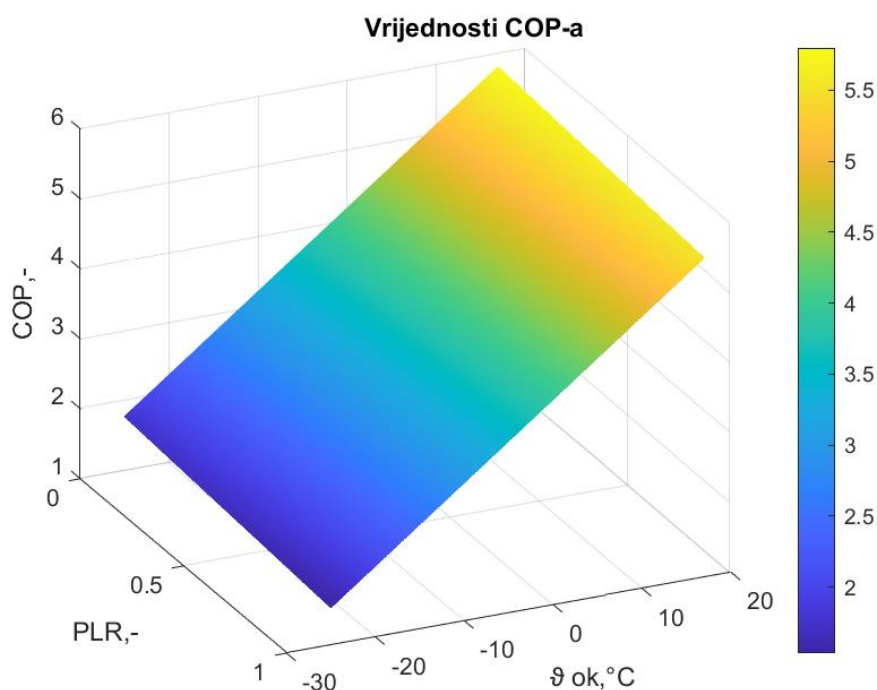
Idući korak u izradi metodologije je izrada modela faktora grijanja (COP) i faktor hlađenja (EER) u ovisnosti o vanjskoj temperaturi zraka (ϑ_{ok}) i djelomičnom opterećenju (PLR) dizalice topline. Obzirom da dimenzioniranje svih komponenti sustava nije bilo u opsegu ovog rada, pretpostavljena je konstantna temperatura polaza vode od 35°C u režimu grijanja, 55°C u režimu pripreme PTV-a i 7°C u režimu hlađenja. Također, pretpostavljeno je da dizalica topline u režimu pripreme PTV-a radi pri konstantnom djelomičnom opterećenju od 50%.

Model je integriran u jednostavnu satnu metodu na način da je pretpostavljeno da dizalica topline radi 24 sata u danu, te se na početku svakog sata, ako postoji potreba za pripremom PTV-a, prebacuje u režim pripreme PTV-a i tek nakon što isporuči potrebnu energiju za PTV, prebacuje u režim grijanja/hlađenja u ostatku tog sata te isporučuje odgovarajući ogrjevn/rashladni učinak u skladu s trenutnim vrijednostima ϑ_{ok} , PLR-a i raspoloživog vremena.

Na temelju podataka dobivenih od proizvođača dizalica topline razvijeni su polinomi 1. reda za procjenu COP-a i EER-a putem linearne regresije, odnosno metodom najmanjih kvadrata, pomoću alata Data Analysis u Microsoft Office Excelu, s ciljem maksimalne pogreške od 10% u odnosu na referentne vrijednosti parametara dobivenih od proizvođača.

Kao reprezentativan primjer dobivenih polinoma u računalnom alatu MATLAB izrađen je grafički prikaz vrijednosti COP-a (slika 4.2.5.) u ovisnosti o ϑ_{ok} i PLR-u režimu grijanja za odabranu dizalicu topline zrak-voda, a s jed. (4.2.1.) dana je funkcija kojom su te vrijednosti izračunate.

$$COP = 4,16889591 - 0,237775076 * PLR + 0,095841331 * \vartheta_{ok} \quad (4.2.1.)$$



Slika 29 Vrijednosti COP-a dizalice topline zrak-voda u režimu grijanja u ovisnosti o temperaturi vanjskog zraka i djelomičnom opterećenju

S ciljem minimiziranja odstupanja modela COP-a i EER-a od stvarnih vrijednosti, u određenim rasponima regulacije su po potrebi razvijena 2 polinoma, jedan za područje nižeg parcijalnog opterećenja u kojem COP i EER blago rastu porastom PRL-a, a drugi u području većeg parcijalnog opterećenja u kojem COP i EER blago padaju porastom PLR-a. U tablici 4.2.1. prikazane su vrijednosti COP-a u režimu grijanja izračunatih putem razvijenog modela odabranih dizalica topline pri 100% parcijalnog opterećenja za 3 različite temperature vanjskog zraka ϑ_{ok} . Temperatura $-12,3^{\circ}\text{C}$ odabrana je za sat najvećeg toplinskog opterećenja kuće izračunatog satnom metodom, a temperatura $12,2^{\circ}\text{C}$ za sat najmanjeg toplinskog opterećenja kuće u sezoni grijanja, te 0°C kao srednja vrijednost između tih dvaju ekstrema. Iz tablice 4.2.1. vidi se kako COP-ovi dizalica topline rastu s porastom temperature okoliša, te da je pri najnižoj

temperaturi najučinkovitija dizalica topline tlo-voda, dok najmanju učinkovitost pokazuje dizalica topline zrak-zrak. Pri najvišoj temperaturi najučinkovitija je dizalica topline zrak-voda, a dizalica topline tlo-voda pokazuje najmanju učinkovitost.

Tablica 6 COP dizalica topline pri različitim temperaturama vanjskog zraka

ϑ_{ok}	tlo-voda	zrak-voda	zrak-zrak
-12,3	3,29	2,75	2,32
0	3,49	3,93	3,11
12,2	3,69	5,1	3,9

U polinomima za režime grijanja i hlađenja za situacije u kojima bi dizalica topline prema proračunu radila izvan svog regulacijskog raspona napravljena je korekcija pomoću jednadžbi iz norme HRN EN 14825:2019 s vrijednošću degradacijskog faktora C_d od 0,9. Uređaj radi ciklički „ON/OFF“ pri minimalnom parcijalnom opterećenju unutar pripadajućeg regulacijskog raspona. Korekcijska jednažba COP-a za dizalicu topline tlo-voda (regulacijski raspon 25-100%) i dizalicu topline zrak-voda (regulacijski raspon 33-100%):

$$COP_{cyc} = COP_i * \frac{PLR_i}{C_d * PLR_i + (1 - C_d)} \quad (4.2.2.)$$

Korekcijska jednadžba COP-a za dizalicu topline zrak-zrak (regulacijski raspon 25-100%):

$$COP_{cyc} = COP_i * (1 - C_d * (1 - PLR_i)) \quad (4.2.3.)$$

Za korekciju EER-a kod odabranih dizalica topline primijenjena je slijedeća jednadžba:

$$EER_{cyc} = EER_i * \frac{PLR_i}{C_d * PLR_i + (1 - C_d)} \quad (4.2.4.)$$

U prethodno navedenim jednadžbama COP_i i EER_i predstavljaju izračunate vrijednosti faktora grijanja i hlađenja pri parcijalnom opterećenju PLR_i koje odgovara minimalnoj vrijednosti unutar regulacijskog raspona odabranih uređaja. Za dizalicu topline tlo-voda, u skladu s Algoritmom za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama (Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode), pri proračunu COP-a i

EER-a napravljena je korekcija za temperaturu izvora/ponora topline, u ovom slučaju tla, prema jed. (4.2.5.).

$$\vartheta_{tla} = 0,15 * \vartheta_{ok} + 1,5 \quad (4.2.5.)$$

Jed. (4.2.5.) ujedno je i razlog smanjenje učinkovitosti, odnosno manjih vrijednosti COP-a dizalice topline tlo-voda prema razvijenom modelu, budući da se njome dobiva proračunska temperatura tla u iznosu od -1 do 7°C, te ona iznosi više od 3°C samo 312 sati u godini od ukupno 3342 sata u režimu grijanja, a prema podacima dobivenima od proizvođača Ecoforest, odabrani uređaj pri nižim temperaturama tla radi sa znatno smanjenom učinkovitošću. Da bi se odredili pogonski troškovi odabranih izvedbi termotehničkih sustava potrebno je za svaki sat u godini izračunati utrošenu električnu energiju putem jed. (1.1.) i (1.2.) zasebno za režim grijanja, režim hlađenja i režim pripreme PTV-a te sumirati dobivene vrijednosti za sve sate u godini. Podrazumijeva se da je isporučeni toplinski učinak neposrednih električnih grijača ekvivalentan utrošenoj električnoj energiji. Prilikom određivanja cijene 1 kWh električne energije upotrijebljen je informativni izračun za kućanstvo putem kalkulatora na internetskim stranicama HEP ELEKTRA d.o.o. Na slici 4.2.6. može se za izvedbu termotehničkog sustava S1 iz poglavlja 4.1. vidjeti izračun godišnjih troškova pogona u tarifnom modelu Bijeli koji uzima u obzir obračun po višoj dnevnoj tarifi i nižoj noćnoj tarifi.

Informativni izračun - kućanstvo

Tarifni model:

bijeli

samo korištenje mreže

Broj mjeseci

1

3

6

9

12

Potrošnja (kWh):

3358,48754

500

50000

VT

2344,9092

NT

1013,57834

69%

odnos više i niže tarife

Izračun

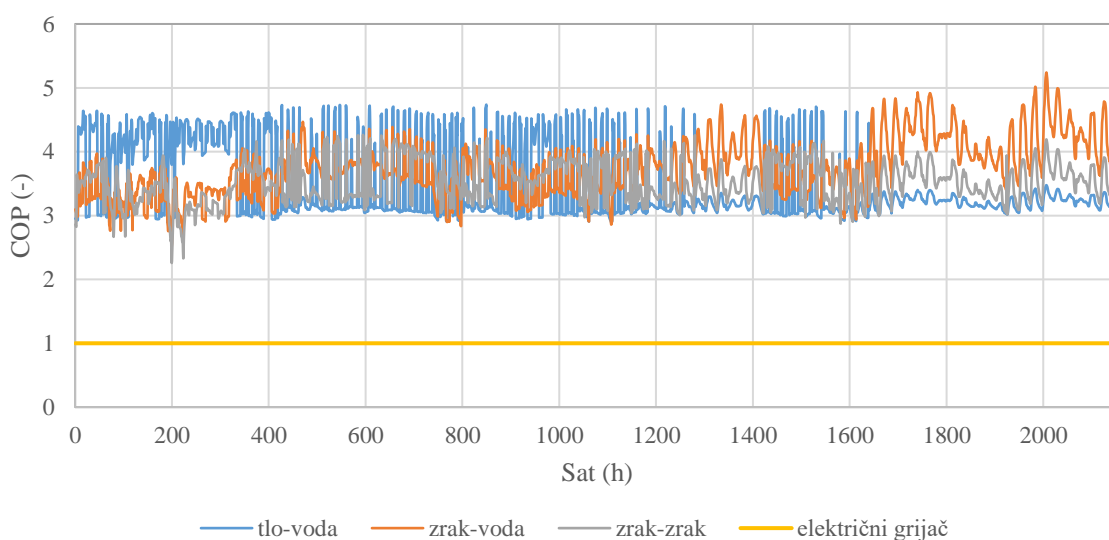
Stavka	Količina [kWh]	Cijena [EUR]	Iznos [EUR]
➤ energija	3358.48754		212.57
➤ prijenos	3358.48754		47.19
➤ distribucija	3358.48754		97.06
			356.82
opskrba	12 mj.	0.9820	11.78
mjerno mjesto	12 mj.	1.5400	18.48
oie	3358.48754	0.013936	46.80
osnovica za PDV			433.88

Slika 30 Izračun godišnjih troškova pogona za izvedbu termotehničkog sustava S1

Za izračun ukupnih troškova pojedinih kombinacija termotehničkih sustava potrebno je još odrediti instalacijske troškove koji su raščlanjeni na troškove izvora topline, troškove ogrjevnorashladnih tijela, troškove opreme u strojarnici te troškove transporta i montaže prema iskustvenim podacima.

5. REZULTATI USPOREDBE TERMOTEHNIČKIH SUSTAVA

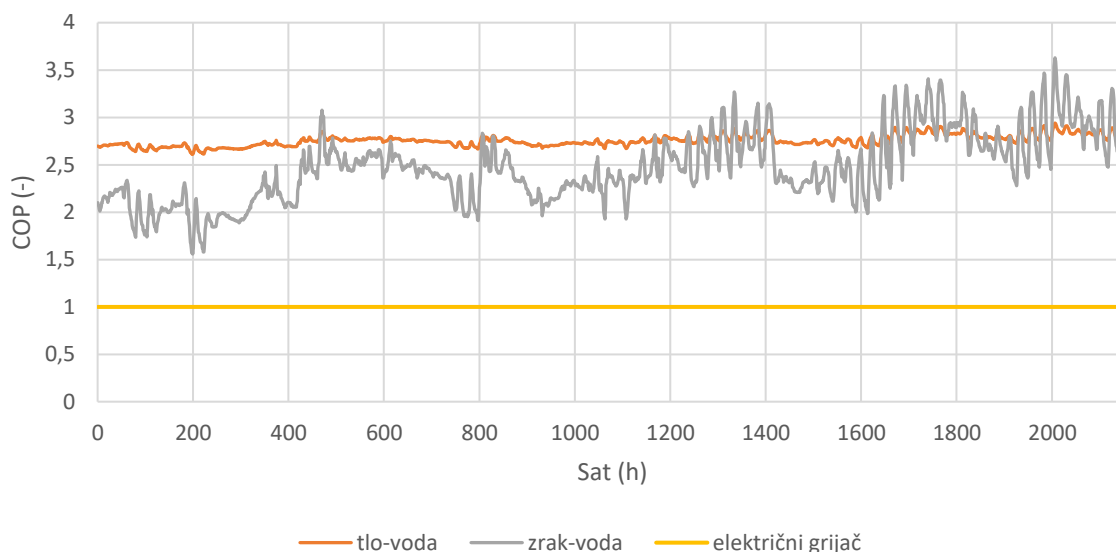
Za obiteljsku kuću na području grada Zagreba provedena je usporedba 5 različitih kombinacija sustava grijanja, hlađenja i pripreme PTV-a s ciljem provedbe energetske analize te određivanja pogonskih i ukupnih troškova sustava. Kao kriterij usporedbe razmatrani su vrijednosti COP-a i EER-a u različitim režimima, potrebna isporučena energija za pogon toplinskog izvora, utrošena primarna energija, ekvivalentne emisije CO₂ te troškovi investicije i pogona. Za usporedbu učinkovitosti odabranih sustava u režimu grijanja i režimu pripreme PTV-a na slikama 5.1. i 5.2. prikazano je ponašanje COP-a različitih izvedbi sustava u svakom satu u režimu grijanja i režimu PTV-a za prva tri mjeseca godine.



Slika 31 Učinkovitost sustava u režimu grijanja u prvom tromjesežju

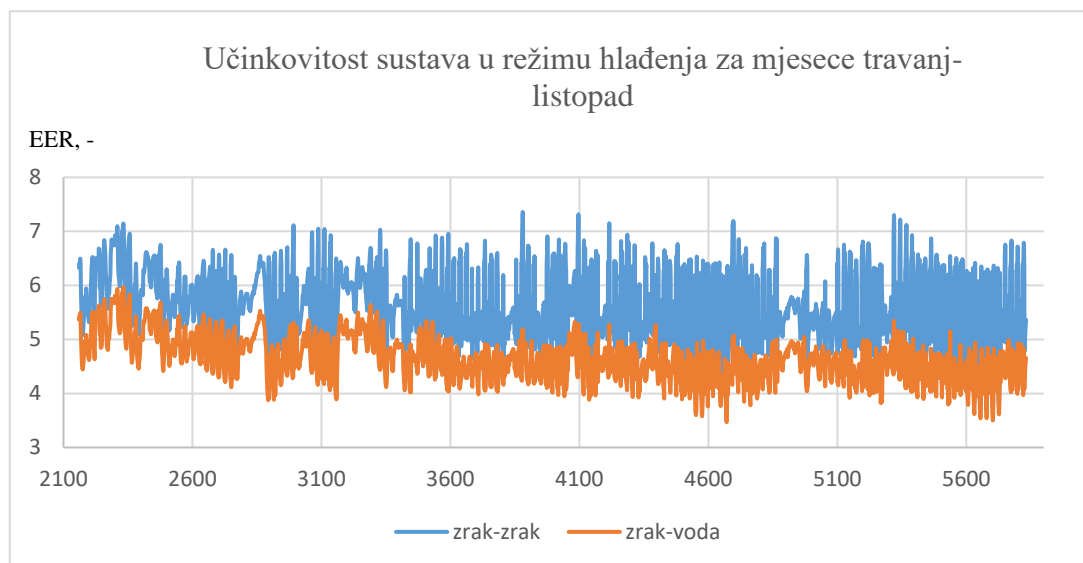
Slika 5.1. pokazuje kako u režimu grijanja dizalica topline zrak-voda ima najveću učinkovitost 1106 sati prvog tromjesečja. Dizalica topline tlo-voda je najučinkovitija 47% sati manje, a dizalica topline zrak-zrak 57,7% sati manje nego dizalica topline zrak-voda. Dizalica topline zrak-voda ima najveću učinkovitost na kraju prvog tromjesečja zbog povišenih temperatura vanjskog zraka. Dizalica topline tlo-voda inače u praksi ima relativno stabilnu učinkovitost zbog stabilne temperature tla tijekom godine u odnosu na temperaturu vanjskog zraka, dok ovdje pokazuje znatne skokove u učinkovitosti iz sata u sat iz razloga što se u određenim satima dana prebacuje u režim PTV-a, te nakon isporuke učina za pripremu PTV-a, u ostatku sata

isporučuje potrebni toplinski učin za grijanje s većim parcijalnim opterećenjem zbog čega COP u tom satu, u skladu s razvijenim modelom blago raste.



Slika 32 Učinkovitost sustava u režimu pripreme PTV-a u prvom tromjesečju

Na slici 5.2. može se vidjeti da je u režimu pripreme PTV-a dizalica topline tlo-voda najučinkovitiji sustav 1753 sata prvog tromjesečja. Također, dizalica topline zrak-voda je najučinkovitiji sustav krajem prvog tromjesečja zbog povišenih temperatura vanjskog zraka u tom vremenskom razdoblju. Učinkovitost odabranih sustava u režimu hlađenja prikazana je na slici 5.3. za vremenski period od travnja do listopada. Dizalica topline zrak-zrak se u režimu hlađenja pokazuje učinkovitijom izvedbom od dizalice topline zrak-voda s 20,4% veći EER-om u prosjeku za odabrani vremenski period. Skokovite vrijednosti EER-a, posebno dizalice topline zrak-zrak, mogu se povezati s oscilacijama dnevne temperature vanjskog zraka.



Slika 33 Učinkovitost sustava u režimu hlađenja

U tablici 1. prikazane su vrijednosti električne energije preuzete iz mreže odabranih sustava iz kojih se može vidjeti da je najveći utrošak električne energije u izvedbi S5 s dizalicom topline zrak-zrak za hlađenje i električnim grijačima za grijanje i pripremu PTV-a u iznosu od 8765,74 kWh, odnosno 81,16 kWh po m² korisne površine kuće. U odnosu na izvedbu S1, utrošak električne energije izvedbe S1 je 62,3% manji, a izvedbe S3 62,8% manji.

Tablica 7 Električna energija preuzeta iz mreže odabranih izvedbi sustava

sustav/režim	S1	S2	S3	S4	S5
grijanje	1155,03	1133,89	1133,89	1152,83	4087,99
ptv	1347,26	1323,68	1323,68	3820,64	3820,64
hlađenje	767,11	945,40	767,11	767,11	767,11
ukupno	3269,40	3402,96	3224,68	5740,58	8675,74

Na temelju podataka Ministarstva prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine za faktore primarne energije i emisije CO₂ izračunate su vrijednosti utrošene godišnje primarne energije i godišnje emisije CO₂. Za sustave pogonjene električnom energijom faktor primarne energije iznosi 1,614, a emisija CO₂ 234,81 kg CO₂ po MWh električne energije preuzete iz mreže. Rezultati su prikazani u tablici 2.

Tablica 8 Utrošena godišnja primarna energija i godišnja emisija CO₂

sustav	primarna energija	emisija CO ₂
S1	5276,82	767,69
S2	5492,38	799,05
S3	5204,63	757,19
S4	9265,29	1347,95
S5	14002,64	2037,15

Najveći utrošak primarne energije na godišnjoj razini u iznosu od 14002,64 kWh, odnosno 129,65 kW po m² korisne površine kuće, i emisiju CO₂ u iznosu od 2037,15 kg pokazuje izvedba S5. Najmanje iznose pokazuje izvedba S3, za kojom slijede izvedba S1 te izvedba S2, što je u skladu s proračunom električne energije preuzete iz mreže. Bitno je napomenuti da se utrošak energije odnosi samo na dizalice topline i električni grijač, odnosno cirkulacijske pumpe nisu uzete u obzir. S druge strane, kod sustava s električnim grijačima, temperaturni režim kruga grijanja bi mogao biti drukčiji (veća temperatura polaza, veći pad temperature na grijaču) bez utjecaja na učinkovitost što bi doprinijelo manjoj potrošnji cirkulacijskih pumpi. Shodno prikazanim rezultatima, izvedba S5 ne zadovoljava zahtjeve o najvećim dopuštenim godišnjim vrijednostima isporučene energije iz mreže u iznosu od 80 kWh/m² i utrošene primarne energije u iznosu od 115 kWh/m². Instalacijski troškovi pojedinih kombinacija termotehničkih sustava prikazani su tablicom 3 iz koje se vidi da je najskuplja instalacija izvedbe S1 s iznosom od 30107,34 €. Izvedba S4 je jeftinija za čak 92,79%, a izvedba S5 za 88,49%.

Tablica 9 Instalacijski troškovi pojedinih kombinacija sustava

troškovna stavka	S1	S2	S3	S4	S5
trošak dizalice topline tlo-voda	7150	0	0	0	0
trošak dizalice topline zrak-zrak	1290,07	0	1290,07	1290,07	1290,07
trošak dizalice topline zrak-voda	0	3726	3726	0	0
troškovi bušotine	5695,326	0	0	0	0
trošak razvoda ventilokonvektora	2675,8	2675,8	2675,8	0	0
trošak električnog bojlera	0	0	0	206,25	206,25
trošak električnih radijatora	0	0	0	0	893,5
troškovi opreme na razini strojarnice	5720	3167,1	2980,8	0	300
transport i montaža	7576,142	4784,45	4802,702	673,344	910,419
ukupni instalacijski troškovi	30107,34	14353,35	15475,37	2169,664	3600,239

Tablicom 4 prikazani su pogonski troškovi vremenskim periodima od jedne i dvadeset godina iz kojih se može vidjeti da najveće pogonske troškove ima izvedba S5, koji nakon 20 godina iznose 21175,6 €. U odnosu na izvedbu S5, najjeftinija je izvedba S3 koja generira 60,39% manje pogonske troškove.

Tablica 10 Pogonski troškovi pojedinih kombinacija sustava

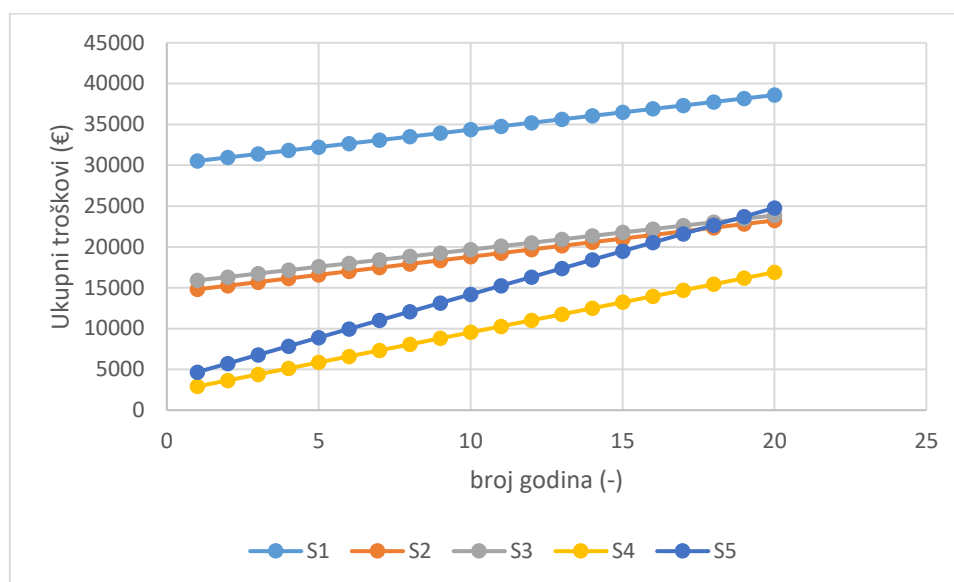
vremenski period	S1	S2	S3	S4	S5
1 godina	424,78	444,27	419,43	736,56	1058,78
20 godina	8495,6	8885,4	8388,6	14731,2	21175,6

Ukupni troškovi pojedinih kombinacija sustava prikazani su tablicom 5, iz koje je vidljivo da kako najveći porast ukupnih troškova nakon 20 godina u odnosu na ukupne troškove prve godine ima izvedba S5, a najmanji porast troškova ima izvedba S3.

Tablica 11 Ukupni troškovi pojedinih kombinacija sustava

vremenski period	S1	S2	S3	S4	S5
1 godina	30532,12	14797,62	15894,8	2906,224	4659,019
20 godina	38602,94	23238,75	23863,97	16900,86	24775,84

Slikom 5.5 prikazan je tok ukupnih troškova pojedinih kombinacija sustava po godinama, te se iz njega može vidjeti kako bez obzira što je izvedba S5 najjeftinija u kontekstu instalacijskih troškova, zbog visokih pogonskih troškova, s ukupnim troškovima već nakon prve godine premašuje ukupne troškove izvedbe S4, a nakon 18 godina ukupne troškove izvedbe S2 i S3.



Slika 34 Tijek ukupnih troškova kroz vrijeme

Iz provedene analize može se vidjeti da je investicijski najpovoljnija izvedba S4, dok je najpovoljnija kombinacija sustava S3 glede troškova pogona na period od 20 godina. Zbog najmanje vrijednosti godišnje emisije CO₂, najpovoljnija kombinacija sustava u vidu utjecaja na okoliš je izvedba S3, koja je ujedno i najučinkovitija izvedba s najmanjim utroškom primarne energije na godišnjoj razini.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bila je energetska i ekonomska analiza različitih izvedbi sustava grijanja, hlađenja i pripreme PTV-a pogonjenih električnom energijom na primjeru novogradnje, odnosno obiteljske kuće s energetskim svojstvima koji zadovoljavaju zahtjeve Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, na lokaciji grada Zagreba. Kuća je jednoetažna, korisne površine grijanog dijela u iznosu 108 m². Energetske potrebe kuće izračunate su skladu s HRN EN 12831 i VDI 2078 u računalnom alatu IntegraCAD te je projektno toplinsko opterećenje kuće u sezoni grijanja 4,901 kW a u režimu hlađenja 5,818 kW. U skladu s tim proračunom, odabrano je 5 različitih izvedbi termotehničkih sustava na kojima je provedena energetska i ekonomska analiza. Za analizu je provedena jednostavna satna metoda prema EN13790. Satnom metodom dobiveni su podaci o potrebnoj energiji za grijanje, hlađenje i pripremu PTV-a kuće u svim satima u godini, pri čemu je godišnja potrebna energija za grijanje kuće 4040,63 kWh, odnosno 37,47 kWh po m² korisne površine kuće, dok godišnja potrebna energija za hlađenje iznosi 4122,75 kWh, odnosno 40,67 kWh po m² korisne površine. Za određivanje potrebne energije za pripremu PTV-a pretpostavljen je profil dnevne potrošnje PTV-a s potrošnjom od 200 l/dan za obiteljsku kuću s 4 osobe, te je proračun integriran u satnu metodu i dobiven je godišnja potrebna energija za pripremu PTV-a u iznosu od 3820,64 kWh. Za izradu modela koji vrši procjenu COP-a i EER-a različitih izvedbi u svakom satu u godini razvijeni su u računalnom alatu Microsoft Office Excel-u pomoću podataka dobivenih od proizvođača polinomi koji opisuju ovisnost COP-a i EER-a o temperaturi okoliša i djelomičnom opterećenju dizalice topline, dok je temperatura polazne vode pretpostavljena konstantnom za svaki režim zasebno. Model je integriran u satnu metodu i na temelju njega je proračunata utrošena električna energija odabranih sustava u svakom satu u godini. Korištenjem cijene 1 kWh električne energije s internet stranica HEP Elektra d.o.o. za višu dnevnu i nižu dnevnu tarifu izračunati su pogonski troškovi svakog sustava na period od 20 godina, a na temelju iskustvenih podataka prikazani su i instalacijski troškovi. Iz analize rezultata pokazalo se da je najučinkovitija i najpovoljnija glede utjecaja na okoliš kombinacija sustava s dizalicom topline zrak-voda za grijanje i pripremu PTV-a te dizalicom topline zrak-zrak za hlađenje s godišnjom utrošenom primarnom energijom u iznosu od 5204,63 kWh, odnosno 48,19 kWh/m² što je ispod najvećih dopuštenih vrijednosti prema Tehničkom propisu, i emisijom CO₂ od 757,19kg.. Ekonomski najisplativija kombinacija sustava pokazala se izvedba s dizalicom topline zrak-zrak za grijanje i hlađenje te električnim grijačem za pripremu PTV-a s ukupnim troškovima na period od 20 godina u iznosu od 16900,86 €. Kombinacija sustava s dizalicom

topline tlo-voda pokazala se manje učinkovito od očekivanog zbog utjecaja korekcijske jednadžbe za temperaturu tla kao izvor topline, smanjujući vrijednosti temperature tla na vrijednosti pri kojima uređaj radi sa smanjenom učinkovitošću.

LITERATURA

- [1] URL: [Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790](#)
- [2] Soldo V.: Podloge za predavanja iz kolegija “Dizalice topline”, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [3] URL: [Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama - Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode](#)
- [4] I. Balen: Podloge za predavanja iz kolegija „Grijanje“,FSB, Zagreb
- [5] URL: [Reprezentativna godina Zagreb Maksimir](#)
- [6] URL: [Meteorološki parametri u tablicama po postajama](#)
- [7] URL: [Faktori primarne energije i emisija CO2 \(u primjeni od 30. rujna 2017.\)](#)
- [8] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama