

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA

MARIBOR

**ARHITEKTURNO IN FUNKCIONALNO
NAČRTOVANJE ENOSTANOVANJSKE HIŠE V
SKLADU S TRAJNOSTNIMI NAČELI –
IMPLEMENTACIJA TOPLOTNE ČRPALKE Z
ZEMELJSKIM KOLEKTORJEM**

Kandidatka: Tea Šulek

Vrsta študija: študentka izrednega študija

Študijski program: Gradbeništvo

Mentor predavatelj: Vladimir Dragorajac, univ. dipl. inž. grad.

Mentor v podjetju: ing. Martin Oswald

Lektorica: dr. Lucija Mandić

Maribor, 2025

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisana Tea Šulek sem avtorica diplomskega dela z naslovom *Arhitekturno in funkcionalno načrtovanje enostanovanjske hiše v skladu s trajnostnimi načeli – implementacija toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem*, ki sem ga napisala pod mentorstvom g. Vladimirja Dragorajca, univ. dipl. inž. grad..

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbela, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatstvo – predstavljanje tujih del oz. misli kot moje lastne – kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Ljutomer, oktober 2025

Podpis študentke:

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem svojemu mentorju g. Vladimirju Dragorajcu, univ. dipl. inž. grad. za dragocene usmeritve pri nastajanju tega diplomskega dela.

Hvaležna sem tudi svojemu partnerju Roku za neomajno podporo in razumevanje, ki sta mi omogočila, da sem se lahko osredotočila na svoje cilje.

Nazadnje se zahvaljujem tudi sebi – za vztrajnost, samodisciplino in sposobnost usklajevanja številnih obveznosti, ki so bile ključnega pomena za dokončanje te poti.

POVZETEK

Namen diplomskega dela je raziskati vpliv arhitekturnih in tehnoloških rešitev, predvsem vgradnje toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem, na energetske učinkovitost in trajnostno zasnovo enostanovanjske hiše. Cilj raziskave je oblikovati celovit pristop k načrtovanju, ki omogoča izboljšanje energetske učinkovitosti objekta ter hkrati zmanjšuje njegov ogljični odtis. Delo se osredotoča na povezavo med tehničnimi vidiki ogrevalnih sistemov, prostorskimi omejitvami ter vplivi na krajinsko ureditev. Prav tako bo raziskava proučila vlogo umetne inteligence in sodobnih tehnologij pri optimizaciji energetskih sistemov in upravljanju stavbe.

Osrednji cilj naloge je analizirati prednosti in pomanjkljivosti uporabe toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem v primerjavi s tradicionalnimi ogrevalnimi sistemi, kot je kurilni sistem na biomaso, ter oceniti njen vpliv na zmanjšanje ogljičnega odtisa. Predvidoma bo uporaba toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem zmanjšala ogljični odtis hiše za približno 10 % v primerjavi s kurilnim sistemom na biomaso. Raziskava bo preučila tudi, kako optimalna funkcionalna razporeditev prostorov, ki izkorišča naravno osvetlitev in prezračevanje, vpliva na energetske učinkovitost objekta z zmanjšanjem potreb po umetni razsvetljavi in mehanskem prezračevanju. Ocenjuje se, da bo optimalna razporeditev prostorov prispevala k izboljšanju energetske učinkovitosti za približno 10 %.

Poleg tega bo poseben poudarek namenjen prostorskim zahtevam vgradnje zemeljskega kolektorja in njegovim vplivom na krajinsko ureditev parcele. Vgradnja zemeljskega kolektorja bo vplivala na možnosti zasaditve večje vegetacije, saj bo potrebno zagotoviti dovolj prostora za pravilno delovanje kolektorja brez motenj, ki jih povzročajo koreninski sistemi rastlin. Raziskava bo prav tako obravnavala potencial uporabe umetne inteligence in novih tehnologij za optimizacijo upravljanja hiše. S pomočjo teh tehnologij bo mogoče natančneje modelirati porabo energije ter učinkoviteje izkoriščati energetske vire v enostanovanjski hiši.

Cilj raziskave je prispevati k boljšemu razumevanju trajnostnih praks v sodobni gradnji ter k iskanju učinkovitih rešitev za povečanje energetske učinkovitosti stanovanjskih objektov. Z upoštevanjem tehničnih, prostorskih in tehnoloških vidikov bo naloga pripomogla k oblikovanju bolj trajnostnih in energetske učinkovitih rešitev za sodobne bivalne objekte.

Ključne besede: *trajnostna arhitektura, energetska učinkovitost, toplotna črpalka, zemeljski kolektor, umetna inteligenca*

ABSTRACT

ARCHITECTURAL AND FUNCTIONAL DESIGN OF A SINGLE-FAMILY HOUSE IN ACCORDANCE WITH SUSTAINABLE PRINCIPLES – IMPLEMENTATION OF A HEAT PUMP WITH A GROUND COLLECTOR

The aim of this thesis is to investigate the impact of architectural and technological solutions, specifically the installation of a ground-source heat pump, on the energy efficiency and sustainable design of a single-family house. The research seeks to develop a comprehensive approach to design that improves the building's energy efficiency while reducing its carbon footprint. The work focuses on the relationship between the technical aspects of heating systems, spatial constraints, and their impact on landscape design. Additionally, the thesis explores the role of artificial intelligence and modern technologies in optimizing energy systems and building management.

The primary objective is to analyse the advantages and disadvantages of using a ground-source heat pump compared to traditional heating systems, such as biomass heating, and assess its impact on carbon footprint reduction. It is anticipated that the heat pump will reduce the carbon footprint by approximately 10% compared to biomass heating. The research will also examine how an optimal functional layout, which maximizes the use of natural light and ventilation, impacts energy efficiency by reducing the need for artificial lighting and mechanical ventilation. This layout is expected to improve energy efficiency by 10%.

Special attention will be given to the spatial requirements for installing the ground-source heat pump and its impact on landscape design. The installation will limit possibilities for planting larger vegetation, as sufficient space must be provided for the collector's proper functioning without interference from root systems. The study will also address the potential of artificial intelligence and new technologies in optimizing house management. These technologies enable more precise modelling of energy consumption and more efficient use of energy resources in a single-family house.

The research is to contribute to a better understanding of sustainable practices in modern construction and to find effective solutions for increasing the energy efficiency of residential buildings. By considering technical, spatial, and technological aspects, the thesis supports the development of more sustainable and energy-efficient solutions for contemporary homes.

Keywords: *sustainable architecture, energy efficiency, heat pump, ground-source collector, artificial intelligence*

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	10
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	12
1.2	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE.....	12
1.3	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE RAZISKAVE	14
1.4	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	15
2	DELO V PROJEKTNi SKUPINI	16
2.1	VARSTVO PRI DELU IN ORGANIZACIJA GRADBIŠČA	18
3	TEORETIČNE OSNOVE ARHITEKTURNEGA NAČRTOVANJA ENOSTANOVANJSKIH HIŠ	20
3.1	SPLOŠNE SMERNICE PRI ARHITEKTURNEM NAČRTOVANJU ENOSTANOVANJSKIH HIŠ	20
3.2	FUNKCIONALNA RAZPOREDITEV PROSTOROV IN VPLIV NA UDOBJE BIVANJA.....	21
3.3	UPORABA TRAJNOSTNIH NAČEL PRI ARHITEKTURNI ZASNOVI STAVB	23
3.4	VPLIV ENERGIJSKE UČINKOVITOSTI IN TRAJNOSTNIH REŠITEV NA ARHITEKTURNO ZASNOVO	25
3.5	PRAVNA REGULATIVA IN STANDARDI ZA ENERGETSKO UČINKOVITE STAVBE V SLOVENIJI	26
4	TOPLOTNA ČRPALKA Z ZEMELJSKIM KOLEKTORJEM	29
4.1	NAČELO DELOVANJA TOPLOTNE ČRPALKE Z ZEMELJSKIM KOLEKTORJEM.....	29
4.2	VRSTE TOPLOTNIH ČRPALK: ZRAK-VODA, VODA-VODA, ZEMLJA-VODA	30
	<i>Toplotna črpalka zrak–voda</i>	<i>30</i>
	<i>Toplotna črpalka voda–voda</i>	<i>31</i>
	<i>Toplotna črpalka zemlja–voda.....</i>	<i>33</i>
	<i>Primerjalna analiza</i>	<i>36</i>
	<i>Tip TČ</i>	<i>36</i>
	<i>Vir toplote</i>	<i>36</i>
	<i>Investicija.....</i>	<i>36</i>
	<i>Učinkovitost (COP).....</i>	<i>36</i>
	<i>Primernost</i>	<i>36</i>
4.3	PREDNOSTI ZEMELJSKEGA KOLEKTORJA: STABILEN VIR TOPLOTE, NIZKI OBRATOVALNI STROŠKI.....	36
	<i>Stabilen vir toplote skozi vse leto.....</i>	<i>36</i>
	<i>Nizki obratovalni stroški.....</i>	<i>37</i>
	<i>Dodatne ekonomske in okoljske koristi</i>	<i>37</i>

4.4	POMANJKLJIVOSTI ZEMELJSKEGA KOLEKTORJA: PROSTORSKE ZAHTEVE IN VPLIV NA KRAJINSKO UREDITEV	38
4.5	PRIMERJAVA STROŠKOV IN UČINKOVITOSTI TOPLOTNE ČRPALKE Z ZEMELJSKIM KOLEKTORJEM V PRIMERJAVI S PEČJO NA BIOMASO	39
	<i>Energetska učinkovitost in raba energije</i>	39
	<i>Okoljski vidiki</i>	39
	<i>Stroški investicije in obratovanja</i>	40
4.6	OKOLJSKI VIDIKI: ZMANJŠANJE EMISIJ TOPLOGREDNIH PLINOV V PRIMERJAVI Z OGREVANJEM NA BIOMASO	40
	<i>Podatki o stavbi</i>	40
	<i>Metodologija in emisijski faktorji</i>	41
	<i>Energent</i>	41
	<i>Emisijski faktor (kg CO₂/kWh)</i>	41
	<i>Izračun emisij – toplotna črpalka zemlja–voda</i>	41
	<i>Primerjava in interpretacija</i>	42
5	ARHITEKTURNA IN FUNKCIONALNA ZASNOVA ENOSTANOVANJSKE HIŠE S TOPLOTNO ČRPALKO	43
5.1	VPLIV TRAJNOSTNIH REŠITEV NA ARHITEKTURNO ZASNOVO (SONČNE CELICE, ZELENJE, MATERIALI)	43
	<i>Zelena infrastruktura kot bioklimatski in ekološki faktor</i>	43
	<i>Arhitekturna integracija fotovoltaičnih sistemov kot aktivnega energetskega elementa</i>	43
	<i>Selektivni izbor materialov kot temelj trajnostne arhitekture</i>	44
	<i>Sinergijski učinki trajnostnih komponent v arhitekturnem kontekstu</i>	45
5.2	ZEMELJSKI KOLEKTOR IN NJEGOVI PROSTORSKI VPLIVI: OMEJITVE ZASADITVE VEGETACIJE IN KRAJINSKA UREDITEV	45
	<i>Prostorske zahteve zemeljskega kolektorja</i>	46
	<i>Omejitve zasaditve vegetacije</i>	46
	<i>Primerni tipi rastlin</i>	46
	<i>Nepriporočne rastline</i>	47
	<i>Priporočila za načrtovanje zasaditve</i>	47
	<i>Vpliv na krajinsko ureditev</i>	47
5.3	OGREVANJE NA BIOMASO: PREDNOSTI IN SLABOSTI S PERSPEKTIVE ZASNOVE HIŠE (PROSTORI ZA SHRANJEVANJE, DIMNIKI)	48
	<i>Prednosti ogrevanja na biomaso</i>	48
	<i>Slabosti iz vidika arhitekturne zasnove</i>	48
	<i>Vpliv na bivalno udobje in vzdrževanje</i>	49

5.4	PRIMERJAVA STROŠKOV IZGRADNJE IN OBRATOVALNIH STROŠKOV: ZEMELJSKI KOLEKTOR V PRIMERJAVI Z OGREVANJEM NA BIOMASO	49
5.4.1	<i>Investicijski stroški</i>	50
	<i>Zemeljski kolektor in toplotna črpalka (ZK+TC):</i>	50
	<i>Ogrevanje na biomaso:</i>	50
5.4.2	<i>Obratovalni stroški</i>	50
	<i>Zemeljski kolektor + toplotna črpalka:</i>	50
	<i>Ogrevanje na biomaso:</i>	50
5.4.3	<i>Skupni stroški v 20-letnem obdobju</i>	51
	<i>Sistem</i>	51
	<i>Investicija (EUR)</i>	51
	<i>Obratovalni stroški (EUR/leto)</i>	51
	<i>Skupni stroški za 20 let (EUR)</i>	51
5.4.4	<i>Interpretacija rezultatov</i>	51
5.5	DOLGOROČNI PRIHRANKI PRI OGREVANJU IN ENERGIJSKI UČINKOVITOSTI STAVBE	51
6	PRIMERI DOBRE PRAKSE IN ANALIZA USPEŠNIH PROJEKTOV	53
6.1	PREGLED PRIMEROV UPORABE TOPLOTNIH ČRPALK Z ZEMELJSKIM KOLEKTORJEM V SLOVENIJI IN TUJINI	53
	<i>Primer 1: Enostanovanjska hiša, Gorenjska, Slovenija</i>	53
	<i>Primer 2: Pasivna hiša v okolici Maribora</i>	53
	<i>Primer 3: Sistem daljinskega ogrevanja na geotermalno energijo – Unterhaching, Nemčija</i>	53
	<i>Primer 4: Geotermalno ogrevanje večstanovanjske stavbe, Stockholm, Švedska</i>	54
	<i>Analiza in sklepi</i>	54
6.2	FUNKCIONALNA RAZPOREDITEV PROSTOROV IN VPLIV NA UDOBJE BIVANJA	55
	<i>Povezanost tlorisne zasnove z bivalno izkušnjo</i>	55
	<i>Ergonomija, fleksibilnost in dolgoročna uporabnost</i>	55
	<i>Vpliv razporeditve na energijsko učinkovitost</i>	56
	<i>Psihološki vidiki udobja</i>	56
6.3	PRIMERJAVA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI PRI UPORABI TOPLOTNE ČRPALKE Z ZEMELJSKIM KOLEKTORJEM IN OGREVANJA NA BIOMASO V NOVOGRADNJA	56
6.4	OKOLJSKI IN FINANČNI UČINKI IMPLEMENTACIJE TRAJNOSTNIH REŠITEV V SODOBNIH STANOVANJSKIH HIŠAH	58
	<i>Okoljski učinki</i>	58
	<i>Finančni učinki</i>	59
7	RAZPRAVA	60

7.1	PREDNOSTI IN IZZIVI TOPLOTNIH ČRPALK Z ZEMELJSKIM KOLEKTORJEM	60
7.2	PRIMERJAVA DOLGOROČNIH FINANČNIH KORISTI TOPLOTNIH ČRPALK V PRIMERJAVI S SISTEMI NA BIOMASO	61
7.3	UPORABA UMETNE INTELIGENCE IN NOVIH TEHNOLOGIJ PRI OPTIMIZACIJI ENERGETSKO UČINKOVITIH REŠITEV	62
7.4	OCENA VPLIVA NA BIVALNO UDOBJE IN EKOLOŠKI ODTIS TRAJNOSTNO ZASNOVANIH STANOVANJSKIH OBJEKTOV	64
7.5	PREVERITEV HIPOTEZ.....	65
7.6	PRISPEVEK DIPLOMSKE NALOGE K RAZVOJU TRAJNOSTNE ARHITEKTURE	66
7.7	MOŽNOSTI ZA NADALJNJE RAZISKAVE V POVEZAVI Z OGREVALNIMI REŠITVAMI IN TRAJNOSTNIM NAČRTOVANJEM	68
8	SKLEP	70
9	LITERATURA IN VIRI.....	72
10	PRILOGE	77
10.1	NAČRTI IN SHEME ENOSTANOVANJSKE HIŠE	77
10.2	GRAFIČNI PRIKAZI ENERGETSKE UČINKOVITOSTI STAVBE	77
10.3	TEHNIČNE SPECIFIKACIJE TOPLOTNE ČRPALKE Z ZEMELJSKIM KOLEKTORJEM.....	77
10.4	IZKAZ ENERGIJSKIH LASTNOSTI STAVBE IZ PZI DOKUMENTACIJE	77

KAZALO TABEL

TABELA 1: PRIMERJALNA ANALIZA TIPOV TOPLOTNIH ČRPALK.....	36
TABELA 2: PRIMERJAVA EMISIJSKEGA FAKTORJA MED ELEKTRIČNO ENERGIJO IN BIOMASO	41
TABELA 3: PRIMERJAVA STROŠKOV MED SISTEMOMA	51

KAZALO SLIK

SLIKA 1: SHEMATSKI PRIKAZ TOPLOTNE ČRPALKE NA ZRAK Z ZUNANJO ENOTO,.....	31
SLIKA 2: SHEMATSKI PRIKAZ TOPLOTNE ČRPALKE S SONDO ZA PODTALNICO,.....	32
SLIKA 3: SHEMATSKI PRIKAZ TOPLOTNE ČRPALKE Z ZEMELJSKIM KOLEKTORJEM,	34
SLIKA 4: SHEMATSKI PRIKAZ TOPLOTNE ČRPALKE Z GEOSONDO,.....	35

1 UVOD

V sodobnem svetu, ki se nenehno sooča z okoljskimi izzivi, postaja trajnostno arhitekturno načrtovanje eno ključnih vprašanj v gradbeništvu. Zaradi vse večjega zavedanja o posledicah podnebnih sprememb, spremljanja okoljskih trendov in potrebe po zmanjševanju izčrpavanja naravnih virov, se vedno bolj poudarja pomembnost sinergije med arhitekturo in napredno tehnologijo. Tehnološki napredek omogoča učinkovitejše izkoriščanje naravnih virov, kar vodi do večje energetske učinkovitosti in manjšega ogljičnega odtisa stavb. V tem kontekstu se diplomsko delo osredotoča na vgradnjo toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem v enostanovanjske hiše, kar predstavlja eno izmed bolj obetavnih rešitev za trajnostno ogrevanje in hlajenje, saj temelji na uporabi obnovljivih virov energije.

Arhitekturno načrtovanje ni omejeno le na estetske in finančne vidike posamezne investicije, temveč ima tudi neposreden vpliv na energetsko učinkovitost stavb. Ključno je, kako funkcionalna razporeditev prostorov, orientacija glede na smeri neba in posledično izkoriščanje naravne svetlobe ter prezračevanja vplivajo na potrebo po umetni osvetlitvi, mehanskem prezračevanju in jakosti ogrevanja bivalnih prostorov. Načrtovanje, ki upošteva te dejavnike, ne le zmanjšuje stroške obratovanja, temveč dosega učinkovitejšo rabo energije, zmanjša vpliv na okolje ter izboljšuje kakovost bivanja skozi vsa življenjska obdobja uporabnika. Kvaliteten pristop pri načrtovanju na podlagi funkcionalne zasnove dopušča možnost rekonstrukcije objekta v primeru ovirane mobilnosti uporabnika, ponuja možnost rekonstrukcije z namenom zaprtja nadstropja z vidika zmanjšanja stroškov vzdrževanja ali ob spremembi velikosti bivalne površine, ki jo tekom življenjskih obdobj potrebuje uporabnik.

V središču tega diplomskega dela je tudi raziskava delovanja toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem, ki se v praksi izkazujejo kot zelo učinkovite. Analizirane bodo prednosti tega sistema v primerjavi s konvencionalnim ogrevalnim sistemom, kot je ogrevanje s pečjo na biomaso, prav tako pa bodo omenjeni izzivi, ki se pojavljajo pri njihovi vgradnji. Raziskava ne bo osredotočena zgolj na tehnične vidike, temveč bodo obravnavani tudi okoljski in estetski faktorji, kot sta zmanjšanje emisij toplogrednih plinov ter vpliv na krajinsko ureditev. Pri implementaciji trajnostnih rešitev je namreč ključnega pomena, da se ne upošteva zgolj tehničnih parametrov, temveč tudi vizualni vpliv na okolico.

Cilj te naloge je vzpostavitev celovitega pristopa, ki združuje trajnostna načela, energetsko učinkovitost in estetsko vrednost arhitekturne zasnove. S tem nameravam prispevati k boljšemu

razumevanju sodobnih praks v arhitekturi in gradbeništvu ter raziskati, kako lahko pametne tehnologije in umetna inteligenca dodatno optimizirajo energetske rešitve v stanovanjskih hišah, hkrati pa prispevajo k izboljšanju udobja bivanja glede na življenjski slog uporabnika. Uporaba sodobnih tehnologij obljublja učinkovitejše upravljanje z energijo in zmanjšanje stroškov obratovanja, kar je ključnega pomena za trajnostno gradnjo.

Poleg tehničnih in arhitekturnih vidikov diplomsko delo vključuje tudi podrobno obravnavo enostanovanjske hiše, kjer s preiščlenim arhitekturnim načrtovanjem in integracijo trajnostnih tehnologij dosegamo visok izkoristek naravnih virov, zlasti sončne svetlobe. Poseben poudarek je namenjen energetski učinkovitosti stavbe, ki s strategijami, kot so optimizacija naravne osvetlitve, pasivno ogrevanje in naravno prezračevanje, omogoča zmanjšanje porabe energije. Zasnova hiše je usmerjena v zagotavljanje visokega bivalnega standarda, ki upošteva prilagodljivost objekta različnim življenjskim obdobjem uporabnikov, kar zagotavlja dolgoročno udobje in dostopnost tako s funkcionalnega, kakor tudi s finančnega vidika.

Arhitektura, ki združuje trajnostne principe z estetsko vrednostjo in funkcionalnostjo, poudarja pomembno sinergijo med zmanjševanjem obratovalnih stroškov in izboljšanjem kakovosti bivanja. Uporaba lokalnih podnebnih pogojev ter izkoriščanje obnovljivih virov energije, kot sta sončna energija in zemeljski kolektor, prispevata k zmanjšanju okoljskega vpliva, pri čemer objekt ohranja visoko stopnjo udobja in estetske privlačnosti, brez kompromisov glede funkcionalnosti.

Na koncu bo diplomsko delo obravnavalo, kako lahko trajnostne rešitve, vključno z vgradnjo toplotnih črpalk in drugimi obnovljivimi viri energije, pozitivno vplivajo na okolje. Z upoštevanjem lokalnih pogojev in zakonodaje želim oblikovati priporočila, ki bodo koristila tako posameznikom kot širši skupnosti. Verjamem, da je trajnostna arhitektura v današnjem času nujno potrebna, saj lahko pozitivno vpliva na našo prihodnost in okolje. Ob tem se zavedam, da lahko uspešne trajnostne prakse postanejo model za prihodnje projekte, ki jih navdihujejo principi trajnosti in inovativnosti. Vsaka zasnova, ki upošteva te elemente, ne le da izboljšuje kakovost življenja posameznikov, ampak tudi prispeva k trajnostnemu razvoju in varovanju našega planeta za prihodnje generacije. Verjamem, da je naša odgovornost, da oblikujemo svet, ki je prijazen do okolja, in to lahko dosežemo le z implementacijo celostnih in trajnostnih arhitekturnih pristopov, ki zagotavljajo udobje, funkcionalnost in estetsko vrednost v naših bivalnih prostorih.

1.1 Opis področja in opredelitev problema

Področje raziskave se osredotoča na trajnostno arhitekturno načrtovanje enostanovanjske hiše z implementacijo toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem. V sodobni arhitekturi postajajo energetska učinkovitost, zmanjšanje ogljičnega odtisa in uporaba obnovljivih virov energije ključni cilji, saj globalne okoljske smernice in naraščajoče energetske potrebe spodbujajo k razvoju inovativnih in trajnostnih rešitev. Ena izmed tehnologij, ki se je v zadnjih letih izkazala za učinkovito, je toplotna črpalka z zemeljskim kolektorjem, ki omogoča izkoriščanje geotermalne energije in zmanjšuje odvisnost od fosilnih goriv.

Osrednji problem, ki ga obravnavam v raziskavi, je izziv učinkovite arhitekturne integracije toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem v zasnovo enostanovanjske hiše, pri čemer se pojavijo vprašanja glede prostorskih zahtev, vpliva na krajinsko ureditev in dolgoročnih okoljskih ter ekonomskih koristi. Kljub vse večji uporabi trajnostnih rešitev, še vedno obstajajo pomanjkljive raziskave o celovitem vplivu takšnih sistemov na funkcionalnost zemljišča in bivalno kakovost. Raziskava je ključnega pomena, saj lahko zagotovi pomemben prispevek k razvoju energetske učinkovitih stanovanjskih objektov in trajnostnega gradbeništva, obenem pa spodbuja širšo implementacijo okoljsko odgovornih tehnoloških rešitev v praksi.

1.1. Namen, cilji in osnovne trditve

Namen diplomskega dela je raziskati vpliv arhitekturnih in tehnoloških rešitev, predvsem vgradnje toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem, na energetske učinkovitost in trajnostno zasnovo enostanovanjske hiše. Cilj raziskave je oblikovati celovit pristop k načrtovanju, ki omogoča izboljšanje energetske učinkovitosti objekta ter hkrati zmanjšuje njegov ogljični odtis. Delo se osredotoča na povezavo med tehničnimi vidiki ogrevalnih sistemov, prostorskimi omejitvami ter vplivi na krajinsko ureditev. Prav tako bo raziskava proučila vlogo umetne inteligence in sodobnih tehnologij pri optimizaciji energetskih sistemov in upravljanju stavbe.

Osrednji cilj naloge je analizirati prednosti in pomanjkljivosti uporabe toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem v primerjavi s tradicionalnimi ogrevalnimi sistemi, kot je kurilni sistem na biomaso, ter oceniti vpliv na zmanjšanje ogljičnega odtisa. Dodatno bo raziskava preučila, kako optimalna funkcionalna razporeditev prostorov, ki maksimira izkoriščanje naravne svetlobe in prezračevanja, vpliva na energetske učinkovitost objekta, z zmanjšanjem potreb po umetni razsvetljavi in mehanskem prezračevanju. Poseben poudarek bo namenjen

tudi prostorskim zahtevam vgradnje zemeljskega kolektorja in njegovim vplivom na okoljsko zasnovano parcelo, zlasti v povezavi z omejitvami pri zasaditvi večje vegetacije.

V raziskavi bo prav tako analiziran potencial uporabe umetne inteligence in novih tehnologij za optimizacijo upravljanja hiše, predvsem v kontekstu natančnejšega modeliranja porabe energije in učinkovitejšega izkoriščanja energetskih virov. Temeljna izhodišča raziskave predstavljajo hipoteze, ki predvidevajo, da bo uporaba toplotne črpalke zmanjšala ogljični odtis hiše za približno 10 %, da bo optimalna razporeditev prostorov prispevala k izboljšanju energetske učinkovitosti za predvidoma 10 %, da bo vgradnja zemeljskega kolektorja vplivala na krajinsko ureditev parcele ter da bo uporaba umetne inteligence omogočila natančnejše modeliranje porabe energije v enostanovanjski hiši. Rezultati bodo prispevali k boljšemu razumevanju trajnostnih praks v sodobni gradnji ter k iskanju učinkovitih rešitev za povečanje energetske učinkovitosti stanovanjskih objektov.

Hipoteze:

- H1: Vgradnja in uporaba toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem v enostanovanjski hiši bo predvidoma zmanjšala njen ogljični odtis za 10 % v primerjavi s kurilnim sistemom na biomaso.
- H2: Optimalna funkcionalna razporeditev prostorov, ki izkorišča naravno osvetlitev in prezračevanje, bo predvidoma izboljšala energetsko učinkovitost za 10 % in tako zmanjšala potrebe po umetni razsvetljavi ter mehanskem prezračevanju.
- H3: Vgradnja toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem na parceli zmanjša možnosti za zasaditev večje vegetacije in vpliva na krajinsko ureditev okolice, saj je potrebno zagotoviti dovolj prostora za pravilno delovanje kolektorja brez motenj zaradi koreninskega sistema rastlin.
- H4: Uporaba umetne inteligence in novih tehnologij pri optimizaciji ter upravljanju enostanovanjske hiše bo omogočila natančnejše modeliranje porabe energije in učinkovitejše izkoriščanje energetskih virov.

1.3 Predpostavke in omejitve raziskave

Pri pisanju diplomskega dela je raziskava omejena na eno konkretno enostanovanjsko hišo, kar predstavlja pomembno omejitev glede generalizacije rezultatov na širšo populacijo stanovanjskih objektov. Predpostavlja se, da bo mogoče zbrati natančne podatke o trenutni energetske učinkovitosti in ogrevalnem sistemu te hiše, kar bo omogočilo primerjavo med uporabo toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem in obstoječim ogrevalnim sistemom na biomaso. Prav tako se predvideva, da bodo na voljo ustrezni podatki o prostorski razporeditvi in naravni osvetlitvi, kar bo omogočilo analizo učinkov na energetske učinkovitost.

Omejitve raziskave izhajajo iz dejstva, da bo analiza izvedena na enem objektu, kar pomeni, da ugotovitve ne bodo nujno veljale za različne tipe stavb, klimatska okolja ali zemljišča. Specifične značilnosti parcele in okolice hiše, kot so pogoji za namestitev zemeljskega kolektorja in možnosti zasaditve vegetacije, bodo lahko vplivale na rezultate in omejile prenosljivost ugotovitev na druge objekte.

Poleg tega so lahko omejeni tudi dostop do natančnih podatkov o delovanju toplotnih črpalk in tehnični vidiki implementacije novih tehnologij za optimizacijo energetske učinkovitosti, saj so nekatere informacije lahko poslovna skrivnost proizvajalcev ali ponudnikov storitev. Kljub tem omejitvam raziskava ponuja pomemben vpogled v možnosti izboljšanja energetske učinkovitosti na primeru specifičnega objekta, kar bo koristno za razumevanje širših potencialov trajnostnih rešitev.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

V diplomskem delu je uporabljen kvalitativni raziskovalni pristop, ki omogoča poglobljeno razumevanje vpliva načrtovanja enostanovanjske hiše z implementacijo toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem na energetske učinkovitost in kakovost bivanja. S tem pristopom je mogoče celovito analizirati strukturne elemente, kot so toplotna črpalka, izolacija, orientacija stavbe ter primerjati različne sisteme ogrevanja (toplotna črpalka v primerjavi z ogrevanjem na biomaso).

Raziskovalni proces je sestavljen iz naslednjih metodoloških korakov:

- 1.4.1. **Pregled literature in teoretična analiza:** v uvodnem delu raziskave je izveden pregled obstoječih študij, znanstvenih člankov in tehnične dokumentacije, ki se nanašajo na energetske učinkovito gradnjo, sisteme toplotnih črpalk in sodobne prakse načrtovanja enostanovanjskih hiš. Ta del zajema približno 10 % celotne raziskave in služi kot teoretična osnova za nadaljnjo analizo.
- 1.4.2. **Analiza načrtov enostanovanjske hiše:** osrednji del raziskave temelji na podrobni analizi arhitekturnih in tehničnih načrtov, pri čemer se proučuje vpliv izbranih tehničnih rešitev (npr. izbira toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem) na energetske učinkovitost in toplotno stabilnost objekta.
- 1.4.3. **Primerjalna analiza sistemov ogrevanja:** izvedena je primerjava energetske učinkovitosti in stroškovne upravičenosti ogrevanja s toplotno črpalko v primerjavi z ogrevanjem na biomaso. Ta del raziskave vključuje zbiranje in analizo podatkov o porabi energije, stroških investicije in vzdrževanja ter vplivih na okolje.
- 1.4.4. **Snovanje predlaganih ukrepov:** na podlagi analize rezultatov so oblikovani konkretni predlogi za izboljšave pri načrtovanju enostanovanjskih hiš, ki optimizirajo energetske potrebe, izboljšujejo kakovost bivanja in povečujejo dolgoročno trajnost stavb.

Uporabljene metode omogočajo celovito obravnavo problematike, od teoretičnih izhodišč do praktičnih rešitev, kar prispeva k razvoju boljših in bolj trajnostnih praks pri načrtovanju sodobnih bivalnih objektov.

2. DELO V PROJEKTNi SKUPINI

Efektivno sodelovanje v projektni skupini predstavlja temelj za uspešno izvedbo kompleksnih in multidisciplinarnih arhitekturnih projektov, kar je posebej pomembno pri načrtovanju trajnostnih stanovanjskih objektov z implementacijo naprednih ogrevalnih sistemov. Organizacija dela v skupini zahteva jasno opredeljene vloge, optimalno razporeditev nalog ter razumevanje kompetenc posameznikov, kar omogoča doseganje kakovostnih in časovno optimiziranih rezultatov.

V okviru lastnega strokovnega razvoja in refleksije o vlogi v projektni skupini sem izvedla analizo lastnih delovnih preferenc in vedenjskih vzorcev z uporabo dveh uveljavljenih psihometričnih orodij: Belbinovega testa timskih vlog in Myers–Briggsovega tipološkega indikatorja osebnosti (MBTI) (16Personalities, 2025). Rezultati teh testov omogočajo poglobljeno razumevanje načina, kako posameznik prispeva k delu skupine, katere lastnosti mu pomagajo pri učinkovitem sodelovanju in na katerih področjih je smiselno krepiti kompetence za večjo skupinsko sinergijo.

Rezultat Belbinovega testa je pokazal, da v projektni skupini prevzemam vlogo IZ – Izvajalec. Ta vloga predstavlja temeljno komponento vsake učinkovite skupine, saj zagotavlja strukturo, stabilnost in usmerjenost k praktični izvedbi. Izvajalci so praviloma osebe, ki razumejo pomen organiziranosti, discipline in doslednosti. Njihova ključna značilnost je sposobnost preoblikovanja načrtovanih ciljev v konkretne izvedbene korake. V arhitekturni in gradbeni praksi to pomeni, da izvajalec skrbi za operativno usklajenost med projektnimi načrti, časovnim razporedom del in razpoložljivimi viri. Takšna vloga je zlasti pomembna pri projektih, ki vključujejo kompleksne tehnične sisteme, kot so toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem, geosonde ali sistemi ogrevanja na biomaso, saj zahteva natančno načrtovanje, dosledno upoštevanje standardov ter sposobnost prilagajanja tehničnim zahtevam na terenu.

Izvajalec je zanesljiv in pragmatičen člen projektne skupine, ki se osredotoča na izvedbo in uresničitev zastavljenih ciljev. Zanj je značilen racionalen pristop, zdrava mera previdnosti ter spoštovanje uveljavljenih postopkov. Njegove prednosti so sistematičnost, vztrajnost, delovna disciplina in visoka stopnja odgovornosti. Vendar pa se v določenih primerih lahko pokaže manjša fleksibilnost pri sprejemanju nenavadnih ali eksperimentalnih idej. To lastnost v praksi uravnotežujem z zavedanjem, da arhitektura in energetska učinkovite rešitve zahtevajo odprtost

do inovacij, še posebej kadar so podprte s strokovno argumentacijo, empiričnimi podatki in dokazano učinkovitostjo.

Vloga izvajalca se v mojem delu kaže predvsem v tem, da sem sposobna usklajevati delo strokovnjakov z različnih strokovnih področij znotraj projekta, organizirati delo in nadzorovati potek posameznih faz. V projektih, ki obravnavajo vgradnjo trajnostnih ogrevalnih sistemov, se to kaže v natančnem spremljanju izvedbe geotermalnih sistemov, zagotavljanju skladnosti z gradbenimi standardi in zakonodajo ter učinkovitem komuniciranju med projektanti, izvajalci in investitorjem. Ta pristop omogoča zmanjšanje tveganj, povezanih z izvedbo, ter zagotavlja, da končni rezultat ustreza zahtevam trajnostne gradnje, tako z vidika energetske učinkovitosti kot dolgoročne vzdržnosti objekta.

Rezultat Myers–Briggsovega tipološkega testa osebnosti (MBTI) je pokazal, da sodim v tip INFP-T (Posredovalec). Ta osebnostni tip je značilen za posameznike z izrazito empatijo, občutkom za medosebne odnose ter sposobnostjo razumevanja širšega konteksta projektnih odločitev. Posredovalci pogosto delujejo kot vezni člen v skupini, saj spodbujajo sodelovanje, razumevanje in harmonijo. V mojem primeru se to odraža v sposobnosti poslušanja potreb sodelavcev, razumevanja različnih strokovnih perspektiv ter v iskanju kompromisnih rešitev, ki so tehnično učinkovite, a tudi skladne z etičnimi in trajnostnimi načeli arhitekturne prakse.

Združitev obeh vlog – izvajalke in posredovalke – predstavlja učinkovito kombinacijo racionalne organiziranosti in čustvene inteligentnosti. Ta sinergija omogoča, da v projektni skupini prevzamam vlogo mostu med tehnično natančnostjo in humanim razumevanjem arhitekture. Pri tem je pomembno poudariti, da tak pristop ne pomeni le zagotavljanja učinkovitosti izvedbe, temveč tudi ustvarjanje delovnega okolja, v katerem so člani skupine motivirani, slišani in usmerjeni k skupnemu cilju – oblikovanju trajnostno zasnovanih, energijsko učinkovitih in arhitekturno dovršenih objektov.

V širšem kontekstu trajnostne gradnje ima razumevanje skupinske dinamike poseben pomen. Projekti, ki vključujejo sodobne energetske tehnologije, kot so toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem, zahtevajo natančno koordinacijo med različnimi strokovnjaki in dosledno komunikacijo. Moja vloga v takšnem timu se kaže v spodbujanju jasne organizacije dela, odgovornem izvajanju nalog in upoštevanju trajnostnih načel, kar prispeva k učinkovitemu in kakovostnemu doseganju projektnih ciljev.

2.1 Varstvo pri delu in organizacija gradbišča

Gradbeni projekti, ki vključujejo postavitve energetskih sistemov, kot so toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem ali peči na biomaso, predstavljajo specifična tveganja, ki zahtevajo premišljeno načrtovanje varstva pri delu in ustrezno organizacijo gradbišča. Namen teh ukrepov je zagotoviti varno in učinkovito delovno okolje, zmanjšati možnost nesreč, zaščititi zdravje delavcev ter zagotoviti skladnost s predpisi, ki urejajo gradbene in varnostne standarde v Republiki Sloveniji.

Organizacija gradbišča mora biti prilagojena vrsti in obsegu del. Za projekte, ki vključujejo zemeljski kolektor, je potrebno zagotoviti ustrezne površine za izkope ter za skladiščenje cevi, geosonde in druge opreme, pa tudi varne poti za premikanje težke mehanizacije. Posebno pozornost je treba nameniti označitvi nevarnih območij, namestitvi začasnih ograj in preprečevanju dostopa nepooblaščenih oseb. Takšna organizacija omogoča nemoten potek gradbenih aktivnosti in zmanjšuje tveganje poškodb zaradi padcev, udarcev ali stika z mehansko opremo.

Varstvo pri delu na gradbišču je zakonsko urejeno z Zakonom o varnosti in zdravju pri delu (Uradni list Republike Slovenije, 2011), ki določa obveznosti delodajalcev, izvajalcev in zaposlenih za zagotavljanje varnega delovnega okolja. Posebno relevantna je tudi Uredba o zagotavljanju varnosti in zdravja pri delu na začasnih in premičnih gradbiščih (Uradni list Republike Slovenije, 2005), ki predpisuje obveznosti izvajalcev glede tehničnih ukrepov, označevanja nevarnosti, dostopa do gradbišča in usposabljanja delavcev.

Pri gradbenih delih, ki vključujejo zemeljski kolektor ali priključitev na biomasno peč, je uporaba osebne varovalne opreme (OVO) obvezna. Po Pravilniku o osebni varovalni opremi, ki jo delavci uporabljajo pri delu (Uradni list Republike Slovenije, 1999), morajo biti delavcem zagotovljeni varnostni čevlji, čelada, zaščita za oči, rokavice, zaščitna oblačila ter zaščita za sluh ter dihala, kadar nastajajo prašni delci ali dimni plini. Pri delih, kot so montaža geosond ali izkopi za horizontalne kolektorje, je pravilna uporaba OVO ključna za preprečevanje poškodb pri delu z vibracijskimi stroji, dvigovanjem težkih bremen ali stiku z ostrimi deli cevi.

Organizacija gradbišča vključuje tudi skladnost z Gradbenim zakonom (Uradni list Republike Slovenije, 2021), ki ureja izdajo gradbenih dovoljenj, tehnične specifikacije objektov, skladnost z urbanističnimi pogoji ter pogoje za izvajanje del. Pri projektih, ki vključujejo energetske sisteme z integracijo zemeljskega kolektorja ali biomasne peči, je pomembno zagotoviti

usklajeno delo z lokalnimi komunalnimi službami, kontrolirane dostopne poti ter skladnost z okoljskimi standardi.

Posebno področje predstavljajo peči na biomaso, ki zahtevajo specifične varnostne ukrepe. Gre za naprave, ki vključujejo rokovanje z gorljivimi materiali, dimniki in električno opremo. Pravilna organizacija skladiščenja peletov, varno polnjenje in praznjenje gorivnih rezervoarjev, nadzor dimnih plinov in pravilna vgradnja dimnikov po standardih preprečujejo požare, eksplozije in izpostavljenost škodljivim snovem. Delavci morajo med vzdrževanjem ali čiščenjem peči uporabljati zaščitno opremo za dihala, rokavice, čelade in oblačila, odporna proti vročini.

Učinkovitost varstva pri delu je neposredno povezana z usposabljanjem in nadzorom delavcev, ki morajo biti seznanjeni z nevarnostmi pri delih na gradbišču, uporabi osebne varovalne opreme ter postopki ravnanja v primeru nesreč. Redni pregledi gradbišča, vzdrževanje opreme, preverjanje ustreznosti varnostnih oznak in prilagajanje ukrepov posameznim gradbenim fazam so ključni elementi stalnega zagotavljanja varnosti.

V kontekstu trajnostnih energetskega sistemov varstvo pri delu ni pomembno le z vidika skladnosti z zakonodajo, temveč predstavlja tudi temelj za dolgoročno vzdržnost objekta. Pravilno izvedeni ukrepi preprečujejo poškodbe, zmanjšujejo možnost materialnih izgub in omogočajo nemoten potek vgradnje sistemov, ki bodo zagotavljali energetske učinkovitost in zmanjšanje ogljičnega odtisa objekta.

Na koncu je pomembno poudariti, da celovita organizacija gradbišča vključuje tehnične in administrativne ukrepe, ki zagotavljajo varnost in učinkovitost del. Varovanje zdravja delavcev zajema oceno tveganj, usposabljanje in dosledno uporabo osebne varovalne opreme po veljavnih predpisih. Pomembna je varna uporaba mehanizacije ter ustrezno skladiščenje goriv in materialov. Administrativni ukrepi, kot so vodenje dokumentacije in nadzor izvajalcev, zagotavljajo skladnost z zakonodajo. Pri projektih z inovativnimi in trajnostnimi ogrevalnimi rešitvami, kot so toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem, natančna koordinacija vseh faz gradnje prispeva k energetske učinkovitosti, funkcionalnosti in dolgoročni trajnosti stavbe.

3. TEORETIČNE OSNOVE ARHITEKTURNEGA NAČRTOVANJA ENOSTANOVANJSKIH HIŠ

3.1 *Splošne smernice pri arhitekturnem načrtovanju enostanovanjskih hiš*

Arhitekturno načrtovanje enostanovanjskih hiš je proces, ki presega zgolj prostorsko organizacijo in estetsko oblikovanje objekta. Gre za celovit in multidisciplinaren pristop, ki povezuje funkcionalne, energetske, trajnostne in kulturne vidike, pri čemer se upošteva tudi lokalni kontekst, topografija in naravne danosti zemljišča. Namen takšnega pristopa je ustvariti visokokakovostno, energetsko učinkovito in uporabniku prijazno bivalno okolje z dolgo življenjsko dobo in minimalnim vplivom na okolje.

Ključni vidik sodobnega arhitekturnega načrtovanja je zasnova objekta po načelih **bioklimatske in pasivne arhitekture**. Orientacija stavbe in prostorska razporeditev bivalnih enot sta tesno povezani s potekom sončevega gibanja, vetrovnimi tokovi in mikroklimatskimi pogoji lokacije. Južno orientirani dnevni prostori z velikimi zasteklitvami omogočajo izkoristek sončne energije za ogrevanje v zimskem času, medtem ko je poleti potrebno zagotoviti učinkovito senčenje z arhitekturnimi elementi ali vegetacijo, da se prepreči pregrevanje (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, 2012). Obenem morajo biti servisni prostori, kot so kopalnice, shrambe in hodniki, umeščeni na severno stran objekta, kjer so toplotne izgube manj kritične.

Ena izmed pomembnih fizikalnih lastnosti, ki vpliva na energetsko bilanco stavbe, je **oblikovni faktor (Fo)**, definiran kot razmerje med površino toplotnega ovoja in kondicionirano prostornino objekta. Nižji kot je oblikovni faktor, manjša je površina za toplotne izgube, kar vodi v boljšo toplotno učinkovitost. S tem so neposredno povezani tudi izbor konstrukcijskega sistema in materialov. Priporoča se uporaba materialov z visoko toplotno akumulacijo, nizko toplotno prehodnostjo in minimalnim okoljskim odtisom (npr. les, ilovica, naravne izolacije).

Tlorisna zasnova mora omogočati optimalno funkcionalnost in prostorsko fleksibilnost. Modularna gradnja in premišljeno načrtovane prostorske rezerve omogočajo prilagajanje stavbe življenjskim spremembam uporabnikov – npr. razširitev družine, staranje prebivalcev ali delo od doma. Poleg tega mora arhitekt upoštevati psihološke in sociološke vidike bivanja, kot so

vizualna povezanost prostorov, akustična ločenost, dostopnost naravne svetlobe in stik z zunanjim okoljem.

Pri načrtovanju mora biti upoštevana tudi **zakonodajna in regulativna podlaga**, kot so določbe prostorskih izvedbenih aktov (OPN, OPPN) in nacionalni tehnični predpisi, vključno s **Pravilnikom o učinkoviti rabi energije v stavbah (PURES 2010)**, ki določa minimalne zahteve glede toplotne zaščite ovoja, zrakotesnosti, energetske bilance in uporabe obnovljivih virov energije (Uradni list Republike Slovenije, 2022).

Sodobni trendi vključujejo tudi uporabo metodologije **integriranega projektiranja** (Integrated Design Process – IDP), ki predvideva zgodnjo vključenost vseh ključnih strokovnjakov – arhitekta, strojnega in elektro projektanta, energetskega svetovalca in krajinskega arhitekta. Ta pristop omogoča optimizacijo sistema ogrevanja, prezračevanja, osvetlitve in rabe vode ter boljše usklajevanje tehničnih in arhitekturnih komponent objekta.

V zadnjem desetletju narašča pomen t. i. **gradnje z nizkim vplivom na okolje**, ki vključuje strategije zmanjševanja emisij CO₂, zmanjševanja rabe primarne energije ter uporabe recikliranih ali reciklabilnih materialov. Pri tem ima pomembno vlogo tudi **celostna krajinska ureditev**, ki omogoča ohranjanje biodiverzitete, obvladovanje meteorne vode in izboljšanje mikroklima v okolici objekta.

Nenazadnje mora arhitekturni izraz objekta izkazovati **spoštovanje do konteksta** – tako naravnega kot kulturnega. Uporaba lokalnih materialov, reinterpretacija tradicionalnih oblikovnih elementov in ustrezna merilna skladnost z obstoječim urbanim tkivom prispevajo k identiteti prostora in krepitvi občutka pripadnosti pri uporabniku.

3.2 Funkcionalna razporeditev prostorov in vpliv na udobje bivanja

Funkcionalna razporeditev prostorov v enostanovanjski stavbi predstavlja ključno prostorsko-ergonomsko komponento, ki neposredno vpliva na bivalno kakovost, energetsko učinkovitost ter psihološko dobrobit uporabnikov. Učinkovito zasnovana prostorska organizacija temelji na logični hierarhiji prostorov glede na njihovo uporabo, pogostost dostopa, stopnjo zasebnosti in medsebojno prostorsko povezanost.

Prostore v enodružinskih stavbah običajno delimo na **dnevne, nočne, servisne in tehnične cone**. Dnevni prostori, kot so kuhinja, jedilnica in dnevna soba, tvorijo komunikacijsko in družabno središče doma. Njihova zasnova mora omogočati odprtost, fleksibilnost in dostop do naravne svetlobe, saj raziskave kažejo, da količina in kakovost dnevne svetlobe pomembno vplivata na psihofizično zdravje uporabnikov (Boyce, Hunter, & Howlet, 2003). Zaželena je orientacija teh prostorov proti jugu ali jugozahodu, s čimer se zagotovi največji izkoristek sončne energije in pasivno ogrevanje v hladnem delu leta (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, 2012).

Nočni prostori, zlasti spalnice, naj bodo locirani na severni ali vzhodni strani, kjer so toplotne obremenitve manjše, kar prispeva k izboljšani kakovosti spanja. V skladu z načeli **zasebnostne gradacije** naj bodo ti prostori umaknjeni od vhodnega dela in vizualno ločeni od dnevnega dogajanja, čemur služi tudi ustrezna zvočna izolacija. Ločevanje zasebnih in javnih funkcij z uporabo hodnikov ali vmesnih prehodnih prostorov zmanjšuje motnje v dnevnih ritmih gospodinjstva ter izboljšuje organizacijo interakcij.

Servisni prostori, kot so kopalnice, shramba, pralnica in tehnični prostori, naj bodo funkcionalno dostopni, a prostorsko nevpadljivi. Njihova lega naj sledi načelu kompaktnosti in bližine infrastrukture (vodovod, kanalizacija, elektrika, ogrevanje), s čimer se zmanjša dolžina in zapletenost instalacijskih sistemov. To ima neposreden vpliv na investicijske in obratovalne stroške objekta.

Z vidika ergonomije in trajnostnega načrtovanja je pomembno tudi **upoštevanje gibanja in funkcionalnih tokov** znotraj objekta. Pot uporabnika od vhoda do posameznih funkcionalnih sklopov mora biti logična, intuitivna in neprekinjena. Slabo zasnovane tlorisne rešitve, kjer prihaja do križanja poti, mrtvih koticov ali nesmiselne porazdelitve prostorov, zmanjšujejo uporabnost stavbe in povzročajo občutek utesnjenosti.

Prostorska fleksibilnost je še en pomemben vidik sodobnega načrtovanja, saj omogoča prilagodljivost prostora spremembam v življenjskem ciklu družine (npr. rojstvo otrok, delo od doma, staranje stanovalcev). Modularna zasnova, premični elementi in večnamenske prostorske enote omogočajo dinamično uporabo prostora brez večjih posegov v konstrukcijo.

Pomembno vlogo pri ustvarjanju bivalnega udobja ima tudi **vizualna in funkcionalna povezanost notranjega in zunanjega prostora**. Neposreden dostop do vrta, terase ali lože iz dnevnega prostora ne le izboljšuje kakovost bivanja, temveč omogoča tudi uporabo zunanjega prostora kot podaljšek bivalne enote (Gehl, 2011). Takšna prostorska kompozicija pozitivno vpliva na psihološko doživljanje prostora in krepi občutek prostorskega razkošja.

Funkcionalna razporeditev prostorov torej ni zgolj stvar racionalne tlorisne organizacije, temveč nosi v sebi kompleksne pomenske, socialne in psihološke razsežnosti. Kakovostno načrtovanje mora slediti uporabniku, njegovim navadam, socialnim odnosom ter pričakovanjem glede zasebnosti, varnosti, udobja in identitete. (Neufert & Neufert, 2012)

3.3 Uporaba trajnostnih načel pri arhitekturni zasnovi stavb

Trajnostna arhitekturna zasnova stavb ne predstavlja zgolj odgovora na okoljske izzive sodobnega časa, temveč celovit pristop, ki povezuje racionalno rabo virov, zmanjševanje vplivov na okolje ter dolgoročno zagotavljanje kakovosti bivanja. Trajnostna gradnja se opira na načela interdisciplinarnosti, integracije, krožnosti in energetske učinkovitosti, pri čemer mora arhitekt že v fazi koncipiranja objekta predvideti celoten življenjski cikel stavbe – od zasnove in gradnje do uporabe, vzdrževanja in razgradnje.

Eden izmed temeljnih stebrov trajnostne zasnove je **minimizacija porabe primarne energije** ter maksimizacija izkoriščanja obnovljivih virov. V arhitekturnem smislu to pomeni usmerjenost k pasivnim oblikovalskim strategijam, kot so pravilna orientacija objekta, kompaktna volumetrija, optimalna razmerja med zastekljenimi in netransparentnimi površinami ter kakovostna toplotna zaščita ovoja. Uporaba **bioklimatskih principov**, ki temeljijo na sinergiji med stavbo in njenim naravnim okoljem, omogoča zmanjševanje potreb po umetnem ogrevanju, hlajenju in osvetljevanju (Yeang, 2006).

Trajnostna arhitektura se vse bolj osredotoča tudi na **racionalno upravljanje z viri**, kar vključuje zbiranje in ponovno uporabo deževnice, zmanjševanje porabe pitne vode z nizkopretočnimi sistemi, rekuperacijo toplote iz odpadne vode ter vključevanje sistemov za lokalno proizvodnjo energije (npr. fotonapetostni moduli, toplotne črpalke). Pri tem je ključno,

da so ti sistemi zasnovani integrirano in ne kot dodatki konvencionalnim zasnovam – šele takšna sinteza omogoča dejansko učinkovitost in ekonomičnost rešitve.

Trajnostna zasnova vključuje tudi **odgovoren izbor materialov**, ki mora upoštevati kriterije lokalne dostopnosti, nizkega okoljskega odtisa, dolge življenjske dobe, možnosti reciklaže in odsotnosti škodljivih snovi. Uporaba certificiranih naravnih materialov, kot so les, glina, konoplja ali celulozna vlakna, prispeva k zmanjšanju t. i. vgrajene energije (*embodied energy*) in izboljšuje notranjo bivalno klimo, saj ti materiali omogočajo higroskopsko regulacijo vlage in toplote (Röck, et al., 2020).

Z vidika zasnove prostora trajnostna arhitektura teži k **prilagodljivosti in večnamenskosti**, kar pomeni, da se prostori lahko s časom spreminjajo glede na potrebe uporabnikov. Tako se zmanjšuje potreba po rekonstrukcijah, rušitvah ali gradnji dodatnih objektov. Ta pristop temelji na načelu dolgoročne prostorske odpornosti (*resilience*), ki upošteva socialno, demografsko in tehnološko spremenljivost prihodnosti (Brand, 1994).

Nedeljiv del trajnostne zasnove je tudi **vpliv stavbe na zdravje in dobrobit uporabnika**. Uporaba nestrupenih materialov, dostop do naravne svetlobe, akustično udobje, zadostna prezračevnost in termična stabilnost prostorov so ključni dejavniki, ki neposredno vplivajo na produktivnost, dobro počutje in psihosocialno zdravje stanovalcev (Allen, et al., 2015). Takšna arhitektura postavlja človeka v središče in s tem uresničuje tudi družbeni vidik trajnosti.

Pri sodobni trajnostni arhitekturni praksi je vse pogostejša uporaba **ocenjevalnih metodologij**, kot so LEED, BREEAM, DGNB ali nacionalna orodja, ki omogočajo kvantifikacijo okoljskih, energetskih in družbenih vplivov stavbe. Takšne metodologije spodbujajo celostno razmišljanje in predstavljajo pomembno orodje za sprejemanje odločitev v procesu načrtovanja.

V kontekstu arhitekturnega projektiranja enostanovanjskih hiš trajnostna zasnova ne pomeni nujno višjih stroškov, temveč predvsem preudarno načrtovanje, pri katerem je učinkovitost rezultat kakovostne interdisciplinarne sinergije in vnaprejšnje predvidevanje dolgoročnih učinkov. (Praznik & Zbašnik-Senegačnik, 2016)

3.4 Vpliv energijske učinkovitosti in trajnostnih rešitev na arhitekturno zasnovo

Integracija energijske učinkovitosti in trajnostnih rešitev v arhitekturno zasnovo predstavlja paradigmatski premik v sodobnem projektiranju stavb, ki presega zgolj estetsko in funkcionalno dimenzijo ter vključuje multidisciplinarne vidike okoljske odgovornosti, tehnološke inovativnosti in družbene trajnosti. Energijska učinkovitost ni več zgolj posledica uporabljenih tehnologij, temveč se začne že v zgodnji fazi konceptualnega oblikovanja stavbe, kjer njeni prostorski in tehnični parametri determinirajo obseg in naravo porabe energije skozi celoten življenjski cikel objekta (Lechner, 2015).

Ena izmed ključnih posledic usmerjenosti k energijski učinkovitosti je razvoj kompaktnih volumetrijskih oblik z zmanjšanjem specifičnih toplotnih površin, ki so optimalno orientirane glede na potek sonca in lokalne klimatske značilnosti. Takšna prostorska konfiguracija zmanjšuje toplotne izgube in omogoča pasivne energetske koristi, kot so pasivno ogrevanje in naravno prezračevanje (Kibert, 2016). Pri tem se zahteva natančna analiza solarnih kotov, mikroklima in sosednjih objektov, kar vodi k uporabi naprednih simulacijskih orodij za določitev optimalnih oblikovalskih parametrov.

Trajnostne rešitve, kot so uporaba obnovljivih virov energije, vključitev sistemov za rekuperacijo toplote in uvedba visokozmogljivih toplotnoizolativnih materialov, imajo neposreden vpliv na konstrukcijske sisteme in materialno zasnovo stavb. Energetsko učinkoviti materiali z nizko toplotno prevodnostjo in visoko toplotno maso omogočajo uravnavanje notranjih temperaturnih nihanj, kar vpliva na zmanjšanje potrebe po mehanskem hlajenju in ogrevanju ter hkrati povečuje bivalno udobje (Zuo & Zhao, 2014).

Poleg tehničnih vidikov energetske učinkovitosti so pomembni tudi arhitekturni elementi, kot so zastekljene fasade z nizkoemisijskimi premazi, senčila ter zeleni strešni in fasadni sistemi, ki zmanjšujejo toplotne obremenitve in izboljšujejo mikroklimo objekta. Arhitekturni oblikovalci morajo pri tem uravnotežiti vizualno transparentnost in energijsko zadrževanje, kar zahteva kompleksno usklajevanje med estetiko, funkcionalnostjo in energetskimi zahtevami.

Vpliv trajnostnih rešitev na arhitekturno zasnovo se kaže tudi v prilagoditvi notranjih prostorov optimalni izrabi naravne svetlobe in prezračevanja. Razporeditev prostorov, velikost in

usmerjenost oken ter uporaba notranjih pregrad so pomembni dejavniki za zmanjšanje potrebe po umetni razsvetljavi in mehanskem prezračevanju, kar dodatno znižuje energetske porabe in prispeva k zdravemu notranjemu okolju.

Pomemben aspekt, ki povezuje energijsko učinkovitost in trajnost, je tudi **življenjski cikel stavbe** (LCA – *Life Cycle Assessment*). Arhitekturna zasnova mora upoštevati celoten proces od pridobivanja surovin, proizvodnje in transporta materialov, gradnje, vzdrževanja, do morebitne obnove ali odstranitve objekta. Izbor materialov z nizkim okoljskim odtisom in možnostjo reciklaže zmanjšuje skupne emisije toplogrednih plinov ter prispeva k dolgoročni trajnosti gradnje (Cabeza, Rincón, Vilariño, Pérez, & Castell, 2014).

Za uspešno integracijo energijske učinkovitosti in trajnostnih rešitev je potrebno interdisciplinarno sodelovanje med arhitekti, inženirji, strokovnjaki za energetiko in gradbeništvo že v začetnih fazah projekta. To omogoča sinergično delovanje, kjer so tehnične inovacije usklajene z arhitekturno vizijo in funkcionalnimi zahtevami, kar vodi do holističnih rešitev z dodano vrednostjo (Song, Zhang, & Hui, 2024).

Na podlagi pregleda literature lahko ugotovimo, da energijska učinkovitost in trajnostne rešitve bistveno vplivajo na arhitekturni koncept, kar rezultira v stavbah, ki so energetske samozadostne, ekološko sprejemljive ter bivalno kakovostne. V tem kontekstu arhitektura ni le funkcionalna lupina, temveč dinamičen sistem, ki aktivno sodeluje pri ohranjanju naravnega okolja in izboljšanju življenjskih pogojev uporabnikov. (Gonzalo & Habermann, 2006)

3.5 Pravna regulativa in standardi za energetske učinkovite stavbe v Sloveniji

Energetska učinkovitost stavb je v Sloveniji urejena z večnivojskim sistemom pravne regulative in standardov, ki temeljijo na usklajevanju z evropskimi direktivami ter nacionalnimi strateškimi cilji za trajnostno gradnjo in zmanjševanje emisij toplogrednih plinov. Pravna podlaga za izvajanje ukrepov na področju energetske učinkovitosti je ključna za usmerjanje projektiranja, gradnje, obnove in vzdrževanja stavb v skladu s sodobnimi okoljskimi in energetske zahtevami.

Osnovni zakon, ki ureja to področje, je **Zakon o učinkoviti rabi energije (ZUre)**, ki prenaša določbe evropske Direktive 2012/27/EU o učinkoviti rabi energije v slovenski pravni red (Uradni list Republike Slovenije, 2020). ZUre določa cilje, ukrepe in obveznosti za povečanje energetske učinkovitosti, vključno z določbami o minimalnih zahtevah glede energetske učinkovitosti za nove in obstoječe stavbe. Zakon prav tako predvideva spremljanje in poročanje o energijski rabi ter vzpostavitev sistema certificiranja energetskih izkaznic, ki so za slovenske stavbe obvezne od leta 2008.

Podrobnejše tehnične in kakovostne zahteve so določene v **Pravilniku o učinkoviti rabi energije v stavbah** (Uradni list Republike Slovenije, 2010), ki je pravni akt Ministrstva za infrastrukturo in prostor. PURES natančno opredeljuje mejne vrednosti toplotnih izgub, koeficientov prehodnosti stavbnih konstrukcij, zahteve za ogrevalne, prezračevalne in hladilne sisteme ter merila za energijsko ovrednotenje stavb (Uradni list Republike Slovenije, 2022). Ta pravilnik je temeljni dokument za projektante in izvajalce, saj zagotavlja tehnične smernice za doseganje skladnosti z energetsko zakonodajo. (Ministrstvo za okolje in prostor RS, 2022)

V Sloveniji je prav tako močno prisotna implementacija evropske direktive o **Skupnem pristopu h gradnji skoraj nič-energijskih stavb (nZEB)**, ki jo določa Direktiva 2010/31/EU o energijski učinkovitosti stavb (EPBD). Od 31. decembra 2020 morajo biti vse nove javne stavbe skoraj nič-energijske, s ciljem, da se ta zahteva postopno razširi na vse nove stavbe. Slovenija je ta koncept prenesla v nacionalno prakso preko strategij in smernic, ki spodbujajo uporabo obnovljivih virov energije, naprednih izolacijskih materialov in inteligentnih energetskih sistemov.

Poleg zakonodaje in pravilnikov so pomembni tudi **slovenski in mednarodni standardi**, ki služijo kot tehnična osnova za načrtovanje in izvedbo energetske učinkovitih stavb. Med najpomembnejše spadajo standardi serije SIST EN ISO 13790 za izračun energetske učinkovitosti stavb, SIST EN 16001 za sistem vodenja energije ter SIST EN 15232, ki ocenjuje vpliv avtomatizacije in regulacije na energetsko učinkovitost (Slovenski inštitut za standardizacijo, 2019). Uporaba teh standardov omogoča poenotenje metodologij in zagotavlja visoko kakovost ter zanesljivost izvedenih energetske učinkovitih rešitev.

Za spodbujanje implementacije energetske učinkovitih tehnologij so v Sloveniji vzpostavljeni tudi **finančni mehanizmi in podporni programi**, ki jih vodi Eko sklad – Slovenski okoljski

javni sklad. Ti programi so usmerjeni v sofinanciranje investicij v energetske prenove obstoječih stavb, vgradnjo obnovljivih virov energije in uvajanje nizkoogljičnih tehnologij. Takšni finančni instrumenti so ključni za premostitev začetnih stroškov in povečanje dostopnosti trajnostnih rešitev za širši krog uporabnikov.

Vse navedeno kaže na celovit in sistematičen pristop države k zagotavljanju energetske učinkovitosti v gradbeništvu, ki temelji na harmonizaciji zakonodajnih zahtev, tehničnih standardov ter finančnih spodbud. Ta okvir omogoča razvoj trajnostnih, okolju prijaznih in energetske optimalnih stavb, kar je ključno za doseganje nacionalnih in evropskih podnebnih ciljev. (Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo RS, 2021)

4 TOPLOTNA ČRPALKA Z ZEMELJSKIM KOLEKTORJEM

4.1 *Načelo delovanja toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem*

Toplotna črpalka z zemeljskim kolektorjem predstavlja enega najučinkovitejših sistemov za izrabo obnovljivih virov energije pri nizkotemperaturnem ogrevanju objektov. Temelji na termodinamičnem procesu prenosa toplote iz geotermalnega vira nizkega temperaturnega potenciala v notranje ogrevalne sisteme višjega temperaturnega nivoja. Sistem deluje na osnovi Rankinovega cikla s kompresijsko toplotno črpalko, pri čemer ključna komponenta zajema horizontalni zemeljski kolektor kot vir toplote.

Zemeljski kolektor je sestavljen iz omrežja cevovodov, običajno iz visokotlačnega polietilena (PE-HD), ki so nameščeni vodoravno v zemljo, praviloma na globini od 1,2 do 1,5 metra, kjer so sezonska temperaturna nihanja minimalna. V ceveh kroži termični prenosni medij – običajno mešanica vode in sredstva proti zmrzovanju (npr. propilenglikola), ki deluje kot sekundarni krog. Ta medij akumulira geotermalno toploto iz okoliške zemljine in jo prenese na primarni hladilni medij v uparjalniku toplotne črpalke.

V uparjalniku pride do izhlapevanja hladilnega sredstva, ki ima nizko vrelišče (npr. R410A, R32, CO₂). To absorbira toploto iz sekundarnega kroga in se prevede v plinasto stanje. Plin nato vstopi v hermetično kompresijsko enoto, kjer se s pomočjo mehanskega stiskanja zvišata tlak in temperatura delovnega medija. V nadaljevanju preide ogreti plin v kondenzator, kjer toploto odda vodnemu ogrevalnemu sistemu (npr. nizkotemperaturnemu talnemu gretju) ali sistemu za pripravo sanitarne tople vode. Hladilno sredstvo ob tem kondenzira in se utekočini. Skozi ekspanzijski ventil se nato tlak in temperatura medija ponovno znižata, kar omogoča nadaljnje kroženje po zaprtem hladilnem krogu.

Toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem dosegajo visoka letna grelna števila (SCOP), pogosto nad vrednostjo 4, kar pomeni, da za vsak vložen kilovat električne energije sistem proizvede več kot štiri kilovate toplotne energije. Stabilna temperatura tal skozi vse leto (običajno med 5 °C in 12 °C) bistveno prispeva k visoki energetski učinkovitosti ter zmanjšani občutljivosti sistema na vremenske vplive, kar je prednost v primerjavi z zrakovnimi toplotnimi črpalkami.

Kljub visoki učinkovitosti ima sistem tudi prostorske zahteve, saj horizontalni kolektorji terjajo relativno veliko površino zemljišča – tipično dvakrat do trikrat večjo od ogrevalne površine

objekta. Zato so tovrstne rešitve najprimernejše za novogradnje na parcelah z zadostno prostorsko razpoložljivostjo.

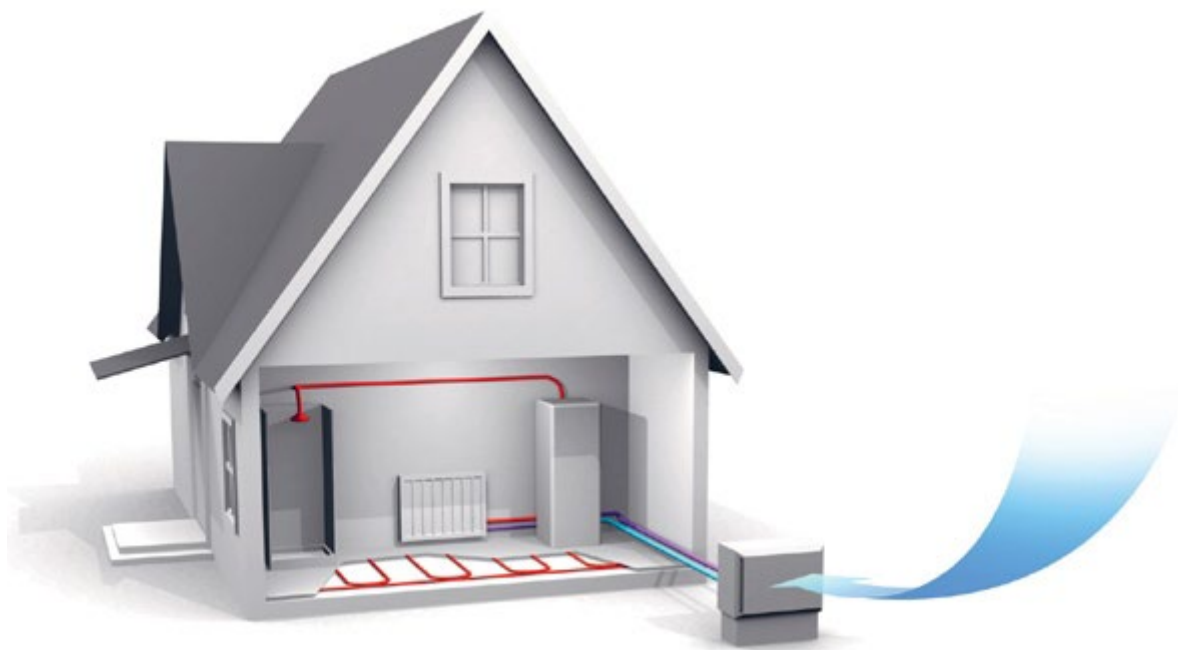
Toplotna črpalka z zemeljskim kolektorjem predstavlja robusten in trajnosten ogrevalni sistem z dolgo življenjsko dobo, nizkimi obratovalnimi stroški in minimalnimi vplivi na okolje, ob sočasnem zmanjšanju odvisnosti od fosilnih goriv. Skladno s cilji energetske učinkovitosti in razogljivenja v EU sodi ta tehnologija med ključne komponente sodobnega trajnostnega gradbeništva. (International Energy Agency (IEA), 2022)

4.2 Vrste toplotnih črpalk: zrak-voda, voda-voda, zemlja-voda

Toplotne črpalke predstavljajo enega izmed ključnih segmentov energetske učinkovitega ogrevanja in hlajenja stavb. Delujejo na osnovi prenosa toplote iz naravnega vira z nizko temperaturo (zrak, podtalnica ali zemlja) v ogrevalni medij z višjo temperaturo, s čimer omogočajo visoko stopnjo izkoristka energije in bistveno zmanjšanje emisij toplogrednih plinov. Glede na vir toplote ločimo tri osnovne tipe toplotnih črpalk: zrak–voda, voda–voda in zemlja–voda, pri čemer ima vsaka različica svoje tehnične in ekonomske prednosti ter omejitve. (Lyons, Lecomte, Georgakaki, Letout, & Mountraki, 2023)

Toplotna črpalka zrak–voda

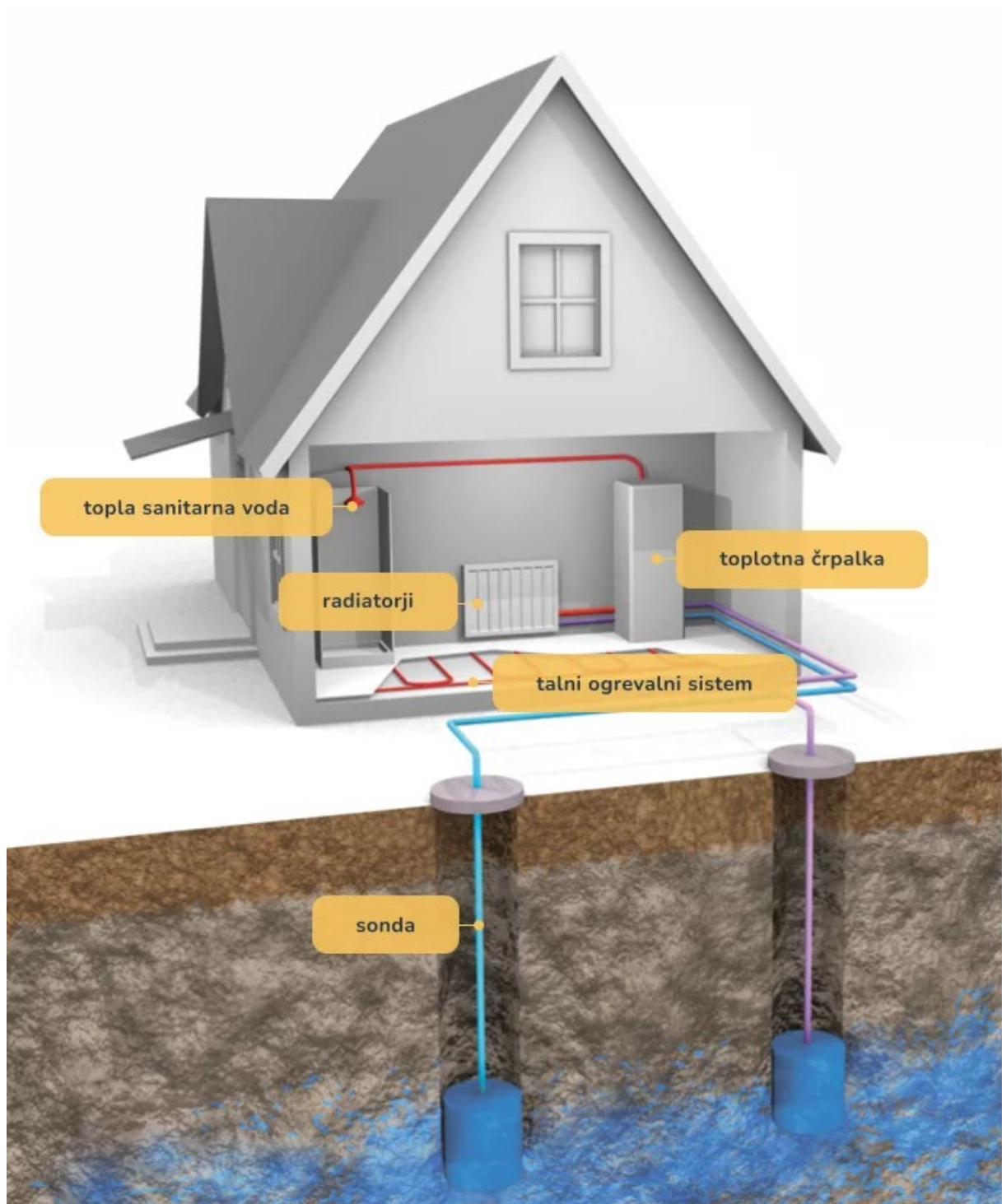
Sistem zrak–voda izkorišča toploto iz zunanjega zraka, ki se prek toplotnega izmenjevalca (uparjalnika) prenese na hladilni medij v toplotni črpalki. Kljub temu da je zrak kot vir toplote brezplačno dostopen in ne zahteva posebnih gradbenih posegov, ima ta rešitev določene slabosti, predvsem v zimskem času, ko zunanje temperature padejo in učinkovitost sistema (COP) občutno upade. V ta namen so sodobne zrakovne črpalke opremljene z invertersko tehnologijo in naprednimi hladilnimi sredstvi (npr. R32), ki omogočajo obratovanje tudi pri temperaturah pod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zrak–voda sistemi so cenovno najugodnejši in primerni tako za novogradnje kot energetske prenove, še posebej v regijah z milejšim podnebjem.



Slika 1: Shematski prikaz toplotne črpalke na zrak z zunanjo enoto,
vir: <https://www.bravas.com.ua/articles/17-teplovye-nasosy/>

Toplotna črpalka voda–voda

Toplotne črpalke tipa voda–voda uporabljajo podtalnico kot primarni vir toplote. Podtalnica je zaradi stalne in relativno visoke temperature skozi vse leto (običajno med 8 °C in 12 °C) izredno stabilen in učinkovit vir energije. Sistem zahteva izgradnjo dveh vrtin – črpalne in ponorne –, kar povečuje kompleksnost izvedbe ter zahteva hidrografsko ustrezne pogoje (dovolj visoka gladina podtalnice in ustrezen pretok). Zaradi visoke začetne investicije in strogih pogojev za pridobitev dovoljenja za izkoriščanje podzemnih voda se ta tip pogosteje uporablja v večjih objektih ali industrijskih sistemih, kjer visoka učinkovitost ($SCOP > 5$) hitro upraviči začetne stroške.



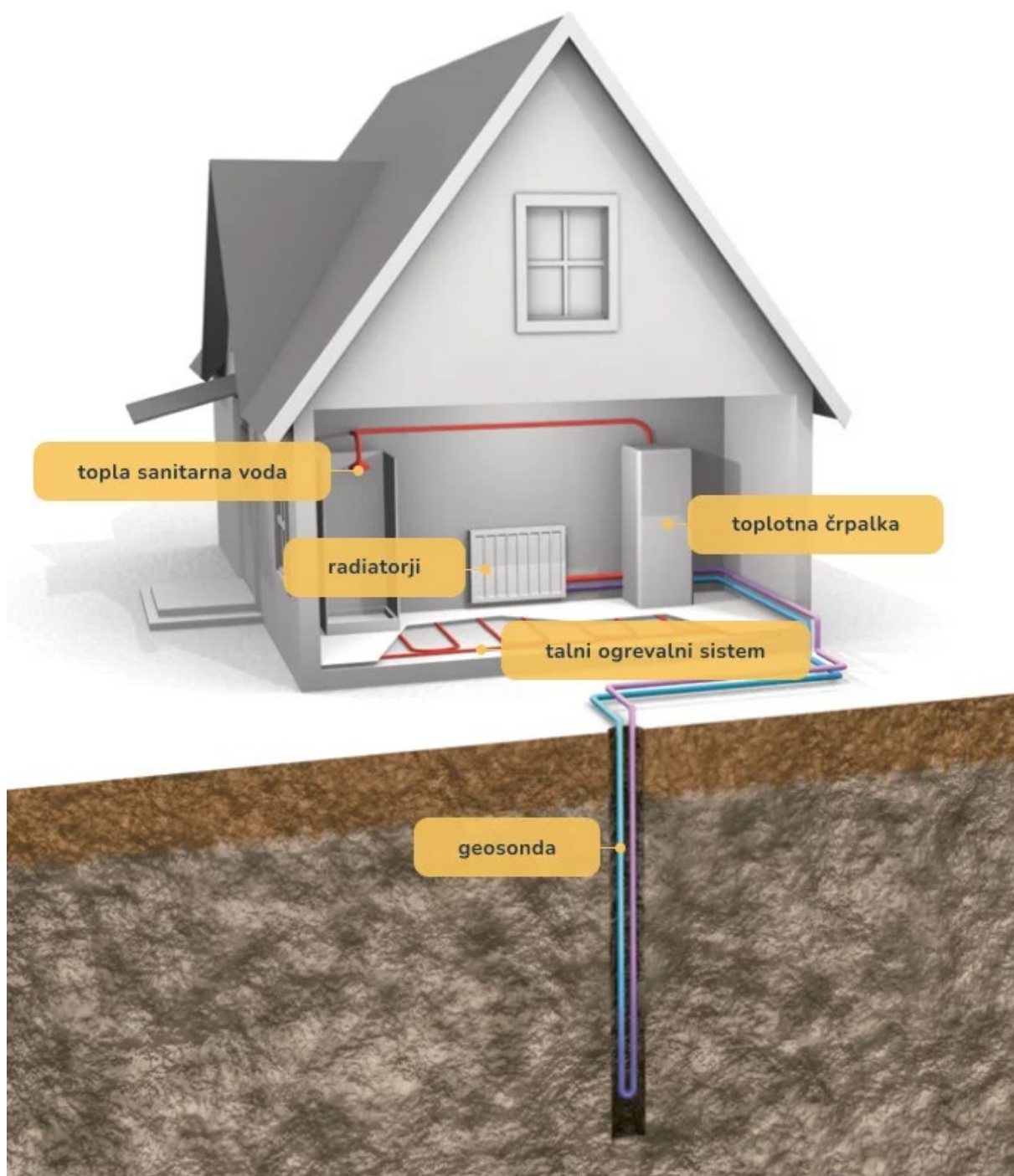
Slika 2: Shematski prikaz toplotne črpalke s sondo za podtalnico,
vir: <https://www.atlas.si/toplotne-crpalke/geotermalne-toplotne-crpalke/>

Toplotna črpalka zemlja–voda

Zemlja–voda sistemi pridobivajo toploto iz zemeljskega okolja prek geotermalnih kolektorjev ali geosond. Horizontalni kolektorji zahtevajo veliko površino zemljišča, kjer se cevi vgradijo v zemljo na globino 1,2–1,5 metra. Alternativno se uporabljajo vertikalne geosonde, ki segajo tudi do globin 100 metrov in več, kjer so temperaturne razmere še stabilnejše. Toplotna črpalka nato izkorišča toploto zemlje za ogrevanje ogrevalnega medija, kar omogoča zelo visoko in konstantno učinkovitost skozi vse leto. Zaradi višje začetne investicije in tehnične zahtevnosti je sistem najprimernejši za novogradnje z dolgoročno energetske strategijo.



Slika 3: Shematski prikaz toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem,
vir: <https://www.atlas.si/toplotne-crpalke/geotermalne-toplotne-crpalke/>



Slika 4: Shematski prikaz toplotne črpalke z geosondo,
vir: <https://www.atlas.si/toplotne-crpalke/geotermalne-toplotne-crpalke/>

Primerjalna analiza

Tabela 1: Primerjalna analiza tipov toplotnih črpalk

<i>Tip TČ</i>	<i>Vir toplote</i>	<i>Investicija</i>	<i>Učinkovitost (COP)</i>	<i>Primernost</i>
Zrak–voda	Zunanji zrak	Nizka	2,5–4,0	Enodružinske hiše
Voda–voda	Podtalnica	Visoka	4,5–6,0	Večji objekti
Zemlja–voda	Zemlja	Srednja–visoka	4,0–5,0	Novogradnje, pasivne hiše
Geosonda	Vertikalna zemlja	Visoka	4,5–5,5	Objekti z omejenim zunanjim prostorom

Vir: Lastni vir

Toplotne črpalke različnih vrst omogočajo fleksibilnost pri načrtovanju ogrevalnih sistemov. Izbira najprimernejšega tipa je odvisna od lokalnih geoloških in hidroloških pogojev, energetskih potreb objekta ter ekonomskih izhodišč investitorja. V vseh primerih pa uporaba toplotne črpalke prispeva k zmanjšanju porabe primarne energije in ogljičnega odtisa objekta, ter pomeni pomemben korak v smeri trajnostnega bivanja.

4.3 Prednosti zemeljskega kolektorja: stabilen vir toplote, nizki obratovalni stroški

V okviru analize učinkovitega ogrevalnega sistema z uporabo toplotne črpalke zemlja–voda je ključno izpostaviti posebne lastnosti zemeljskega kolektorja, ki pomembno vplivajo na delovanje in ekonomičnost celotnega sistema. To podpoglavje se osredotoča na dve ključni prednosti, ki ju prinaša integracija zemeljskega kolektorja: zanesljivost vira toplote skozi vse leto in nizke obratovalne stroške, ki skupaj prispevajo k optimizaciji ogrevalnega procesa ter zmanjšanju dolgoročnih stroškov in okoljskega vpliva.

Stabilen vir toplote skozi vse leto

Ena izmed osnovnih prednosti zemeljskega kolektorja je njegova sposobnost zagotavljanja stabilne temperature medija, ki ga uporablja kot vir toplote. Za razliko od drugih obnovljivih

virov kot je zrak, katerega temperaturne vrednosti močno nihajo v različnih letnih časih, zemlja na globini 1,5 do 2 metra ohranja razmeroma konstantno temperaturo, običajno med 8°C in 12°C skozi vse leto. Takšna termična stabilnost omogoča, da toplotna črpalka deluje z visoko učinkovitostjo ne glede na vremenske razmere.

Ta konstantnost temperature zmanjša obremenitev kompresorja in zmanjšuje frekvenco zagona ter zaustavitve sistema, kar vodi do manjše obrabe komponent in daljše življenjske dobe sistema. Poleg tega stabilen vir toplote prispeva k optimalnemu delovanju toplotne črpalke z višjim sezonskim grelnim številom (SCOP), kar posledično pomeni boljši izkoristek energije in nižje stroške za končnega uporabnika.

Nizki obratovalni stroški

Zaradi narave zemeljskega kolektorja, ki izkorišča toploto tal, so obratovalni stroški toplotnih črpalk zemlja–voda relativno nizki v primerjavi z alternativnimi ogrevalnimi sistemi. Po začetni investiciji, ki vključuje nakup in vgradnjo kolektorja ter toplotne črpalke, so stroški delovanja predvsem povezani z električno energijo za pogon kompresorja in kroženje tekočine v kolektorju.

Kolektor ne zahteva dodatnega goriva, kot je to značilno za sisteme na fosilna goriva ali celo kurilne peči na biomaso, kar bistveno zmanjša obratovalne stroške in odvisnost od cen surovin na trgu. Vzdrževanje sistema je prav tako enostavnejše in manj pogosto, saj zemeljski kolektor nima gibljivih delov, ki bi zahtevali redno servisiranje ali zamenjavo.

Poleg naštetega toplotna črpalka z zemeljskim kolektorjem deluje z višjo učinkovitostjo skozi celo ogrevalno sezono, zato je tudi poraba električne energije nižja v primerjavi z zračno toplotno črpalko ali konvencionalnimi ogrevalnimi sistemi, kar dodatno znižuje stroške.

Dodatne ekonomske in okoljske koristi

Zaradi nizkih obratovalnih stroškov in visoke učinkovitosti predstavlja sistem zemlja–voda dolgoročno finančno optimizirano rešitev, ki lahko bistveno prispeva k zmanjšanju stroškov ogrevanja gospodinjstev. Uporaba obnovljivega vira toplote tudi pomeni znatno zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, kar je skladno z nacionalnimi in mednarodnimi cilji trajnostne rabe energije in varstva okolja.

Poleg tega zemeljski kolektor omogoča kombinacijo z drugimi sistemi, kot so solarni kolektorji ali sistemi prezračevanja z rekuperacijo toplote, kar še dodatno poveča energetska učinkovitost in zmanjša odvisnost od fosilnih goriv.

Zemeljski kolektor kot vir toplote prinaša stabilno temperaturo medija skozi vse leto, kar omogoča optimalno delovanje toplotne črpalke z visokim izkoristkom in minimalno obrabo. Njegova uporaba omogoča nizke obratovalne stroške, predvsem zaradi zmanjšane porabe električne energije in praktične odsotnosti potreb po rednem vzdrževanju. Zaradi teh prednosti je toplotna črpalka z zemeljskim kolektorjem ena izmed najbolj učinkovitih, zanesljivih in okolju prijaznih rešitev za ogrevanje enostanovanjskih hiš.

4.4 Pomanjkljivosti zemeljskega kolektorja: prostorske zahteve in vpliv na krajinsko ureditev

Pri analiziranju uporabe zemeljskega kolektorja kot vira toplote v sistemih toplotnih črpalk zemlja–voda je potrebno upoštevati tudi nekatere omejitve, ki vplivajo na izvedljivost in sprejemljivost tega sistema v različnih okoljih. Med ključne pomanjkljivosti spadajo predvsem prostorske zahteve in vpliv na krajinsko ureditev, ki lahko predstavljata oviro pri načrtovanju in vgradnji.

Prva pomembna omejitev je potreba po zadostni površini za namestitev kolektorja. Horizontalni kolektorji zahtevajo večjo površino, pogosto tudi do 2,5-kratnika bivalne površine ogrevanega objekta, kar omejuje njihovo uporabo na zemljiščih z zadostno razpoložljivo površino. V primerih, ko zemljišče ni dovolj veliko ali je namenjeno intenzivni uporabi, je izvedba horizontalnega kolektorja težje izvedljiva. Alternativa so vertikalni kolektorji, ki zavzemajo manj površine, vendar pa so zaradi vrtanja globokih sond finančno in tehnično zahtevnejši.

Poleg prostorskih zahtev ima vgradnja zemeljskega kolektorja tudi vpliv na krajinsko ureditev. Izvedba horizontalnega kolektorja zahteva obsežne zemeljske posege, ki lahko začasno vplivajo na vegetacijo in estetski videz okolice. Prav tako lahko namestitev omeji možnosti kasnejše uporabe zemljišča za druge namene, kar je pomemben dejavnik pri načrtovanju celotnega prostora okoli objekta.

Zaradi omenjenih omejitev je ključnega pomena, da se že v fazi načrtovanja upoštevajo prostorske in okoljske omejitve ter poiščejo optimalne rešitve, ki bodo zmanjšale vpliv na okolico in hkrati omogočile učinkovito delovanje sistema.

4.5 Primerjava stroškov in učinkovitosti toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem v primerjavi s pečjo na biomaso

V tem poglavju je na podlagi značilnosti referenčne enostanovanjske hiše predstavljena primerjava med sistemom toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem in ogrevalnim sistemom na biomaso z vidika energetske učinkovitosti, stroškov ter okoljskih vplivov. Referenčna hiša ima neto uporabno površino 214,40 m², kondicionirano prostornino 625,40 m³ in površino toplotnega ovoja 441,49 m². Oblikovni faktor znaša 0,71 m⁻¹, temperaturni primanjkljaj za ogrevanje je 3300 K dni, povprečna letna zunanja temperatura pa 10,2 °C.

Energetska učinkovitost in raba energije

Letna potrebna toplota za ogrevanje znaša približno 2375 kWh, medtem ko je letna raba primarne energije za stavbo ocenjena na 26.500,76 kWh. Toplotna črpalka z zemeljskim kolektorjem zagotavlja visoko sezonsko grelni število (COP), kar pomeni bolj učinkovito izrabo energije. Posledično znaša letna raba primarne energije na enoto uporabne površine približno 123,6 kWh/m²a.

Peč na biomaso ima nižjo energijsko učinkovitost zaradi izgub pri zgorevanju in logistiki oskrbe, čeprav uporablja obnovljiv vir energije. Posledično je pričakovati nekoliko višjo rabo primarne energije in izpuste toplogrednih plinov v primerjavi s sistemom toplotne črpalke.

Okoljski vidiki

Na podlagi podatkov referenčne hiše je letni izpust CO₂ povezan z ogrevalnim sistemom ocenjen na približno 5618 kg, kar znaša 26,20 kg CO₂ na m² uporabne površine in 8,98 kg CO₂ na m³ kondicionirane prostornine. Uporaba toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem omogoča zmanjšanje emisij toplogrednih plinov za približno 10 % v primerjavi s pečjo na biomaso, kar je skladno z ugotovitvami strokovne literature (Lozano Miralles, López García, Palomar Carnicero & Rey Martínez, 2020) .

Stroški investicije in obratovanja

Investicija v toplotno črpalko z zemeljskim kolektorjem je višja zaradi zahtevne vgradnje zemeljskega kolektorja in izvedbe potrebnih gradbenih del. Kljub temu so obratovalni stroški zaradi visoke učinkovitosti sistema in nižje porabe energije bistveno nižji v primerjavi s pečjo na biomaso, ki zahteva redno nabavo goriva in vzdrževanje.

Na dolgi rok investicija v toplotno črpalko prinaša ekonomske koristi, saj nižji obratovalni stroški in daljša življenjska doba sistema zmanjšujejo skupne stroške lastništva.

Analiza podatkov in literature kaže, da toplotna črpalka z zemeljskim kolektorjem predstavlja energetsko učinkovitejšo, okolju prijaznejšo in dolgoročno ekonomsko upravičeno alternativo peči na biomaso za ogrevanje enostanovanjske hiše z danimi karakteristikami. Predvideno zmanjšanje ogljičnega odtisa za približno 10 % potrjuje hipotezo o okoljskih koristih uporabe toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem. (European Commission, 2024)

4.6 Okoljski vidiki: zmanjšanje emisij toplogrednih plinov v primerjavi z ogrevanjem na biomaso

Učinkovitost ogrevalnih sistemov in njihova okoljska vzdržnost sta ključna dejavnika pri prehodu v nizkoogljično družbo. V okviru tega prehoda postajajo toplotne črpalke, zlasti geotermalni sistemi zemlja–voda, vse pomembnejši kot alternativa konvencionalnim sistemom ogrevanja. Namen tega podpoglavja je na podlagi konkretnih podatkov o referenčni stavbi predstaviti kvantitativno oceno vpliva toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem na emisije toplogrednih plinov v primerjavi s sistemom ogrevanja na biomaso (peleti).

Podatki o stavbi

Analiza temelji na realnih podatkih referenčne enostanovanjske hiše:

- neto uporabna površina stavbe: 214,40 m²,
- kondicionirana prostornina: 625,40 m³,
- letna potrebna toplota za ogrevanje: 2375,39 kWh,
- letna raba primarne energije: 26.500,76 kWh,
- letni izpust CO₂ ob obstoječem sistemu: 5618,16 kg CO₂/leto.

Metodologija in emisijski faktorji

Za potrebe analize so uporabljeni naslednji emisijski faktorji, skladni s podatki Agencije Republike Slovenije za okolje (Đorić, M.; Česen M.; Institut Jožef Stefan, 2023) in mednarodnimi smernicami IPCC:

Tabela 2: Primerjava emisijskega faktorja med električno energijo in biomaso

<i>Energent</i>	<i>Emisijski faktor (kg CO₂/kWh)</i>
Električna energija (mešanica SI, 2024)	0,14
Biomasa (lesni peleti)	0,05 (vključno z logistiko in izgorevanjem)

Vir: Lastni vir

Glede na podatke energetske izkaznice stavbe znaša letna potrebna toplotna energija za ogrevanje 2375,39 kWh. Za potrebe poenotenja vhodnih podatkov pri analizi so vsi izračuni prilagojeni dejanskemu toplotnemu povpraševanju stavbe.

Izračun emisij – toplotna črpalka zemlja–voda

Povprečno letno grelno število (SCOP) sodobnih toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem znaša približno 4,2 (za zmerno podnebje). Potrebna električna energija za pokritje letne potrebe po toploti:

$$E_{elektrika} = \frac{Q_{nh}}{SCOP} = \frac{2375,39}{4,2} \approx 565,57 \text{ kWh/leto}$$

Letne emisije CO₂ pri uporabi električne energije s faktorjem 0,14 kg CO₂/kWh:

$$E_{CO_2, TČ} = 565,57 \cdot 0,14 \approx 79,18 \text{ CO}_2/\text{leto}$$

Izračun emisij – peč na biomaso

Ob 85 % izkoristku peči na pelete potrebna energija biomase znaša:

$$E_{biomasa} = \frac{Q_{nh}}{0,85} = \frac{2375,39}{0,85} \approx 2794,57 \text{ kWh/leto}$$

Letne emisije CO₂ pri faktorju 0,05 kg CO₂/kWh:

$$E_{CO_2, bio} = 2794,57 \cdot 0,05 \approx 139,73 \text{ CO}_2/\text{leto}$$

Tudi ob upoštevanju najbolj optimističnega scenarija (emisijski faktor biomase = 0,035 kg CO₂/kWh) znašajo letne emisije še vedno:

$$E_{CO_2,bio,opt} = 2794,57 \cdot 0,035 \approx 97,81 \text{ CO}_2/\text{leto}$$

Primerjava in interpretacija

Rezultati kažejo, da sistem toplotne črpalke zemlja–voda povzroča bistveno manjše emisije CO₂ v primerjavi z ogrevanjem na biomaso – od 24 % (v najbolj optimističnem primeru za biomaso) do skoraj 43 % manj (v realističnem scenariju). Poleg tega je pomembno izpostaviti, da:

- toplotna črpalka ne proizvaja neposrednih emisij (lokalno), kar pomeni izboljšanje kakovosti zraka v urbanih okoljih;
- biomasa, kljub pogosto deklarirani ogljični nevtralnosti, povzroča emisije NO_x, trdnih delcev (PM) in ogljikovega monoksida, kar je pomemben okoljski dejavnik v kontekstu lokalnega onesnaženja.

Na podlagi analize je mogoče zaključiti, da bi zamenjava sistema na biomaso s toplotno črpalko z zemeljskim kolektorjem v analizirani enostanovanjski hiši povzročila zmanjšanje emisij toplogrednih plinov za približno 43 % oziroma za najmanj 24 % ob najbolj optimističnih parametrih biomase. Uporaba geotermalnega vira toplote torej ne prispeva zgolj k energetski učinkovitosti, temveč predstavlja pomemben korak k zmanjšanju ogljičnega odtisa stanovanjskih objektov in s tem k doseganju ciljev podnebne nevtralnosti. (European Environment Agency, 2024)

5 ARHITEKTURNA IN FUNKCIONALNA ZASNOVA ENOSTANOVANJSKE HIŠE S TOPLOTNO ČRPALKO

5.1 *Vpliv trajnostnih rešitev na arhitekturno zasnovo (sončne celice, zelenje, materiali)*

Integracija trajnostnih konceptov v arhitekturno zasnovo predstavlja temeljni premik v sodobnem gradbeništvu, ki presega zgolj funkcionalno in estetsko dimenzijo ter vključuje celostno vrednotenje okoljskih, energetskih in družbenih vplivov stavb. Trajnostne rešitve, med katerimi izstopajo implementacija fotovoltaičnih sistemov, koncept zelene infrastrukture ter selektiven izbor ekološko optimiranih materialov, determinirajo ne le tehnološke parametre stavbe, temveč tudi njeno oblikovno integriteto in urbanistično umeščenost.

Zelena infrastruktura kot bioklimatski in ekološki faktor

Vključevanje zelenih komponent – kot so zelene strehe, vertikalni vrtovi in permeabilne zasaditve zunanjih površin – ima večplastni vpliv na mikroklimatsko uravnoteženje, energetsko bilanco in ekosistemske storitve. Zelene strehe ne delujejo zgolj kot izolativni sloji, ki omilijo sezonske temperaturne ekstreme in zmanjšujejo toplotne izgube, ampak tudi izboljšujejo akustične karakteristike in lokalno zračno kakovost (Berardi, 2016). Poleg funkcionalnih koristi je zelena infrastruktura pomemben element biotske raznovrstnosti v urbanih kontekstih, s čimer podpira ekološko povezanost in trajnostno urbano morfologijo (Oberndorfer, et al., 2007).

Arhitekturna implementacija zelenja zahteva multidisciplinarni pristop, ki upošteva konstrukcijske, hidroizolacijske in vzdrževalne vidike, hkrati pa mora biti prilagojena lokalnim klimatskim in ekološkim značilnostim. Optimalna izbira rastlinskih vrst, ki so odporne proti lokalnim vremenskim razmeram ter imajo minimalno potrebo po vzdrževanju, je bistvena za dolgoročno uspešnost teh sistemov (Wolch, Byrne, & Newell, 2014). Bioklimatsko usmerjene zasaditve kot del celovitega arhitekturnega načrtovanja prispevajo k pasivnim hladilnim in senčilnim učinkom, kar zmanjšuje energetske potrebe po mehanskem hlajenju in ogrevanju.

Arhitekturna integracija fotovoltaičnih sistemov kot aktivnega energetskega elementa

Fotovoltaični sistemi kot ključni nosilci prehoda k obnovljivim virom energije se v arhitekturnem procesu vse pogostejše obravnavajo kot integralni oblikovni elementi (Building Integrated Photovoltaics – BIPV). Premik od konvencionalne strešne namestitve proti fasadnim

modulom, senčilom in transparentnim steklenim strukturam odpira nove dimenzije oblikovne svobode in omogoča funkcionalno sinergijo med arhitekturo in tehnologijo (Chandel, Nagaraju Naik, & Chandel, 2015).

Učinkovita integracija fotovoltaičnih sistemov zahteva poglobljeno analizo solarnega potenciala ter klimatskih parametrov lokacije, ob tem pa je nujno uravnotežiti kompromis med estetsko celovitostjo in energetske izkoristkom. Poleg tega je za trajnostno vzdržnost teh sistemov ključno upoštevati življenjski cikel komponent, možnosti reciklaže in minimalizacijo energetske bilance same proizvodnje (Kumar & Rosen, 2011). Napredni materiali in tehnologije, kot so tanjši polprevodniški sloji ter perovskitni moduli, omogočajo lažjo integracijo v kompleksne arhitekturne oblike, s čimer se zmanjšujejo omejitve klasičnih panelov in spodbujajo inovativni arhitekturni izrazi.

Selektivni izbor materialov kot temelj trajnostne arhitekture

Materialna kompozicija stavbnega ovoja ima ključno vlogo pri celoviti oceni okoljskega odtisa in energetske učinkovitosti objekta. Prednostno se izbirajo materiali z nizko vsebnostjo prikritih energij (*embodied energy*) in minimalnimi emisijami v celotnem življenjskem ciklu, kar vključuje tudi uporabo recikliranih, lokalno pridobljenih ter biološko razgradljivih komponent (Gustavsson, Joelsson, & Sathre, 2010).

Naravni izolativni materiali, kot so les, celuloza, pluta in naravna volna, ponujajo poleg odličnih toplotno-fizikalnih lastnosti tudi izboljšano paroprepustnost, kar bistveno zmanjšuje tveganje za kondenzacijo in razvoj mikrobioloških procesov v konstrukciji (Asdrubali, D'Alessandro, & Schiavoni, 2015). Sodobne tehnološke inovacije vključujejo materiale s fotokatalitičnimi lastnostmi, ki aktivno čistijo zrak, ter materiale z visoko toplotno maso, ki amortizirajo temperaturne ekstreme in pripomorejo k termalnemu udobju notranjih prostorov.

Poleg tega se v okviru krožnega gospodarstva promovirajo modularni in demontažni sistemi gradnje, ki omogočajo ponovno uporabo komponent in zmanjšujejo količino odpadkov. Ta pristop zahteva premišljeno načrtovanje že v začetnih fazah projekta, saj omogoča prilagodljivost stavbnih sistemov na prihodnje potrebe in tehnične standarde (Pomponi & Moncaster, 2017).

Sinergijski učinki trajnostnih komponent v arhitekturnem kontekstu

Celostno integrirani pristop, ki združuje sončne celice, zeleno infrastrukturo in ekološko optimizirane materiale, omogoča generiranje sinergijskih učinkov, ki pomembno povečajo trajnostni potencial stavbe. Kombinacija zelenih streh s fotovoltaičnimi moduli na primer izboljša termoregulacijo in poveča učinkovitost solarnih sistemov preko zmanjšanja temperature modulov, kar pozitivno vpliva na izkoristek proizvodnje električne energije.

Podobno uporaba materialov z visoko toplotno maso v povezavi z bioklimatskim oblikovanjem omogoča zmanjšanje temperaturnih nihanj v notranjih prostorih, kar vpliva na zmanjšanje potrebo po aktivnem hlajenju in ogrevanju. Takšni integrirani sistemi zahtevajo interdisciplinarno sodelovanje med arhitekti, inženirji, ekologi in energetiki, kar zagotavlja optimalno prilagoditev trajnostnih rešitev specifičnim lokalnim pogojem in potrebam uporabnikov (Yudelson, 2016).

Trajnostne rešitve, kot so integrirani fotovoltaični sistemi, zelena infrastruktura in premišljena izbira materialov, predstavljajo temeljne dejavnike, ki preoblikujejo sodobno arhitekturno paradigmo. Njihov vpliv sega preko energetske učinkovitosti do širših ekoloških in družbenih koristi ter določa nove standarde oblikovne, funkcionalne in tehnološke integracije stavb. Pri tem je nujno, da so trajnostne strategije načrtovane sistematično in interdisciplinarno, s ciljem ustvarjanja okolju prijaznih, energetsko avtonomnih in bivalno kakovostnih objektov, ki prispevajo k dolgoročni trajnosti in odpornosti urbanih okolij.

5.2 Zemeljski kolektor in njegovi prostorski vplivi: omejitve zasaditve vegetacije in krajinska ureditev

V kontekstu implementacije zemeljskega kolektorja kot integralnega dela geotermalnega ogrevalnega sistema se pojavljajo pomembna vprašanja glede prostorskih zahtev in vpliva na okoljsko urejenost območja. Namestitvev kolektorja s seboj prinaša specifične omejitve, ki neposredno vplivajo na možnosti zasaditve vegetacije ter oblikovanje krajinske ureditve. Natančna obravnava teh vidikov je nujna za optimizacijo povezave med tehničnimi rešitvami in trajnostnim upravljanjem prostora, s ciljem minimizacije negativnih vplivov na okolje ter zagotavljanja funkcionalne in estetske skladnosti z okoliško krajino.

Prostorske zahteve zemeljskega kolektorja

Zemeljski kolektorji običajno zahtevajo razmeroma velike površine zemlje, saj njihova učinkovitost temelji na stabilnem termičnem izmenjevalnem procesu s podtaljem. Horizontalni zemeljski kolektorji, ki so najpogostejše uporabljeni v enostanovanjskih hišah, potrebujejo površine, ki so sorazmerne z ogrevalno površino stavbe ter lokalnimi geotermalnimi pogoji (Lund, Freeston, & Boyd, 2010). Zaradi tega lahko namestitev kolektorja omeji razpoložljive površine za zasaditev vegetacije, vrtove ali druge zelene površine, kar ima lahko neposredne posledice na biotsko raznovrstnost in vizualno podobo okolice.

Omejitve zasaditve vegetacije

Namestitev zemeljskega kolektorja zahteva odstranjevanje obstoječe vegetacije na območju polaganja cevi, kar lahko začasno ali trajno spremeni lokalno rastlinsko sestavo. Po namestitvi je rast na površini kolektorja omejena, saj težka mehanizacija pri vgradnji povzroči kompakcijo tal in morebitno degradacijo rodovitnega sloja, kar otežuje obnovo goste in trajnostne rastlinske pokritosti (Bonamente & Aquino, 2017).

Poleg tega nekatere vrste rastlin zaradi globine polaganja cevi ali morebitnih temperaturnih nihanj niso primerne za zasaditev neposredno nad kolektorjem. Koreninske sisteme je treba omejiti, da ne poškodujejo cevovoda, kar vpliva na izbor primerne vegetacije in oblikovanje zasaditvenih načrtov. Zato je potrebno v fazi načrtovanja tesno sodelovanje med krajinskimi arhitekti, inženirji in ekologi, da se zagotovi skladnost med funkcionalnostjo sistema in naravno obnovo območja (Rosen & Koohi-Fayegh, 2017).

Primerni tipi rastlin

Za zasaditev nad zemeljskim kolektorjem se priporoča uporaba rastlin z nizkim ravnim potencialom korenin in plitvim koreninskim sistemom. Med primerne vrste sodijo predvsem travne ruše, mahovi in nekatere trajnice z neagresivnimi koreninami (Bonamente & Aquino, 2017). Travnice predstavljajo optimalno rešitev, saj omogočajo zaščito tal pred erozijo, ne povzročajo pritiska na cevi in ohranjajo ustrezno vlažnost ter temperaturno stabilnost tal (Lund, Freeston, & Boyd, 2010).

Poleg travnih površin se pogosto uporabljajo tudi nizke grmovnice ali pokrovne rastline, ki imajo plitve korenine in minimalno tveganje za prodor v cevovod. Vrste, kot so plazeče rastline

(npr. *Thymus serpyllum* ali *Sedum* spp.), so še posebej primerne, saj obenem prispevajo k povečanju biotske raznovrstnosti in estetskemu učinku urejanja okolice.

Neprimerne rastline

Nasprotno je zasaditev dreves ali grmovnic z globokimi in razvejanim koreninskim sistemom nad kolektorjem neprimerna zaradi tveganja poškodbe plasti cevovoda ter možnosti motenj v toplotnem toku (Rosen & Koohi-Fayegh, 2017). Korenine teh rastlin lahko sčasoma prodrejo v zaščitne ovoje cevi, povzročijo mikro poškodbe ali celo preboje, kar vodi v izpuščanje hladilne tekočine in zmanjšanje učinkovitosti sistema.

Priporočila za načrtovanje zasaditve

V fazi projektiranja je zato nujno sodelovanje med krajinskimi arhitekti in strokovnjaki za geotermalne sisteme, da se ustrezno uskladijo funkcionalne in ekološke zahteve. Prav tako je priporočljivo izvajanje rednega vzdrževanja, kot sta košnja travnih površin in nadzor nad rastjo vegetacije, da se prepreči nenadzorovana rast korenin.

Optimalna zasaditev lahko obenem prispeva k izboljšanju mikroklimatskih pogojev, preprečevanju izsuševanja tal in povečanju estetske vrednosti okolja, kar dodatno povečuje družbeno sprejemljivost tovrstnih sistemov (Lund, Freeston, & Boyd, 2010).

Vpliv na krajinsko ureditev

Zaradi prostorskih omejitev in tehnoloških zahtev so pri načrtovanju okolice z zemeljskim kolektorjem potrebne prilagoditve krajinske ureditve. Uporaba nizke in plitve rastlinske pokritosti, kot so travne ruše ali plitvo zakoreninjene trajnice, omogoča vzdrževanje talne strukture ter preprečuje mehanske poškodbe cevovoda. Hkrati je priporočljivo načrtovanje območij z uredbo namenskih zelenih površin, ki lahko delujejo kot ekološke pregrade ali estetske prehode med bivalnimi prostori in tehnološkimi elementi.

Sistemska integracija zemeljskega kolektorja v celotno krajinsko zasnovo omogoča tudi možnost izboljšanja mikroklimatskih pogojev in povečanja biotske raznovrstnosti z vključitvijo dodatnih trajnih zelenih površin zunaj območja samega kolektorja (Lund, Freeston, & Boyd, 2010). Ta pristop zahteva prilagoditev urbanističnih načrtov in vključevanje trajnostnih principov pri oblikovanju vrtov, zelenih pasov in drugih naravnih elementov v neposredni bližini objektov.

Zemeljski kolektor kot energetski sistem prinaša pomembne okoljske in ekonomske koristi, vendar njegova implementacija vgradne infrastrukture zahteva premišljeno prostorsko načrtovanje. Omejitve v zasaditvi vegetacije in vplivi na krajinsko ureditev predstavljajo ključne izzive, ki jih je potrebno nasloviti z interdisciplinarnim pristopom. Usklajevanje tehnoloških zahtev z ekološkimi in estetskimi kriteriji omogoča razvoj trajnostnih rešitev, ki zagotavljajo optimalno delovanje sistema ob ohranjanju naravnega ravnovesja in kakovosti bivanja.

5.3 Ogrevanje na biomaso: prednosti in slabosti s perspektive zasnove hiše (prostori za shranjevanje, dimniki)

Ogrevanje na biomaso, ki vključuje uporabo lesnih peletov, drv, sekancev ali drugih organskih goriv, je vse pogostejše prepoznano kot okolju prijazna alternativa fosilnim gorivom. Kljub temu pa njegova implementacija v arhitekturno zasnovo enostanovanjskih hiš prinaša specifične izzive in zahteve, ki pomembno vplivajo na razporeditev in funkcionalnost notranjih prostorov ter oblikovanje tehničnih elementov stavbe.

Prednosti ogrevanja na biomaso

Iz vidika zasnove hiše je ena izmed ključnih prednosti ogrevanja na biomaso relativna neodvisnost od električne energije, kar omogoča povečano energetsko avtonomnost objekta. Sistem lahko učinkovito deluje tudi v primerih motenj v oskrbi z električno energijo, kar je pomembno zlasti na ruralnih območjih.

Biomasa kot gorivo je običajno cenovno konkurenčna in omogoča lokalno oskrbo, kar prispeva k zmanjšanju ogljičnega odtisa celotnega objekta, če je zagotovljena trajnostna pridobitev goriva (Di Carlo & Savuto, 2016). Zaradi svoje tehnologije ogrevalni sistemi na biomaso pogosto omogočajo tudi visoko raven avtomatizacije, kar zmanjšuje potrebo po stalnem ročnem upravljanju.

Slabosti iz vidika arhitekturne zasnove

Glavna prostorska omejitev, ki jo prinaša ogrevanje na biomaso, je potreba po velikem in namenskem prostoru za shranjevanje goriva. Lesna biomasa, zlasti v obliki drv ali sekancev, zahteva suho, prezračevano in zaščiteno skladišče, katerega velikost je odvisna od letne porabe goriva in frekvence dobav (Bauer, Pretz, & Zettl, 2013). Ta zahteva lahko znatno vpliva na

razporeditev prostorov v hiši ali na pripadajočih objektih, kot so garaže ali pomožni prostori, kar je pogosto izziv pri manjših tlorisnih površinah.

Dimniški sistemi za peči na biomaso so prav tako tehnično zahtevni in morajo biti zasnovani tako, da zagotavljajo optimalno odvajanje dimnih plinov, preprečujejo kondenzacijo in zagotavljajo ustrezno varnost. Zaradi tega so dimniki običajno večji in zahtevajo poseben arhitekturni prostor, kar lahko omeji možnosti za fleksibilno notranjo ureditev. Prav tako mora biti dimnik v skladu z veljavnimi predpisi in standardi, kar vpliva na lokacijo in obliko objekta.

Vpliv na bivalno udobje in vzdrževanje

Zaradi posebnosti tehnologije je vzdrževanje sistema na biomaso nekoliko bolj zahtevno kot pri drugih oblikah ogrevanja. Redno polnjenje goriva, čiščenje pepela ter servisiranje kotla so nujni za nemoteno delovanje in dolgoročno učinkovitost. To zahteva tudi ustrezno dostopnost prostora za gorivo in opremo, kar je treba upoštevati že v fazi načrtovanja.

Poleg tega sistemi na biomaso zaradi svoje tehnologije pogosto zahtevajo dodatne ukrepe za zmanjševanje emisij trdnih delcev in drugih onesnaževalcev, kar lahko poveča kompleksnost in stroške celotnega ogrevalnega sistema.

Zasnove enostanovanjskih hiš z ogrevanjem na biomaso morajo temeljito upoštevati prostorske in tehnične zahteve, ki vplivajo na razporeditev bivalnih in pomožnih prostorov, kot tudi na arhitekturno integracijo dimniških sistemov. Kljub številnim okoljskim in ekonomskim prednostim so omejitve, povezane s skladiščenjem goriva ter dimniškimi in vzdrževalnimi zahtevami, pomembni faktorji, ki lahko vplivajo na končno zasnovo in funkcionalnost objekta.

5.4 Primerjava stroškov izgradnje in obratovalnih stroškov: zemeljski kolektor v primerjavi z ogrevanjem na biomaso

V okviru energetskega načrtovanja enostanovanjskih hiš je ekonomska analiza ključnega pomena za odločitev o najustreznejšem ogrevalnem sistemu. V nadaljevanju je izvedena primerjalna analiza investicijskih in obratovalnih stroškov sistema z zemeljskim kolektorjem, ki deluje v kombinaciji s toplotno črpalko, ter klasičnega sistema ogrevanja na biomaso. Izračuni temeljijo na podatkih referenčne hiše, pri čemer se upoštevajo stroški vgradnje, stroški goriva, vzdrževanja ter življenjska doba sistemov.

5.4.1 Investicijski stroški

Zemeljski kolektor in toplotna črpalka (ZK+TC):

- po podatkih slovenskih ponudnikov in strokovne literature znašajo stroški vgradnje zemeljskega kolektorja v Sloveniji med 18.000 in 28.000 EUR, odvisno od velikosti in zahtevnosti izvedbe,
- povprečna investicija za referenčno hišo (214,4 m²) je 23.000 EUR, kar vključuje zemeljske izkope, cevi, namestitvev toplotne črpalke, hidravlične povezave ter elektroinštalacije.

Ogrevanje na biomaso:

- stroški nakupa in montaže kotla na pelete za enostanovanjsko hišo v Sloveniji so v povprečju med 7.000 in 13.000 EUR (Center za biomase, 2023),
- stroški ureditve dimnika znašajo približno 3.000 EUR,
- skupni začetni stroški torej znašajo med 10.000 in 16.000 EUR; za analizo je uporabljena srednja vrednost 13.000 EUR.

5.4.2 Obratovalni stroški

Zemeljski kolektor + toplotna črpalka:

- letna potrebna toplota za ogrevanje je 2.375 kWh,
- COP sistema s zemeljskim kolektorjem je okoli 4,0,
- potrebna električna energija je $2.375 \text{ kWh} / 4 = 593,75 \text{ kWh}$,
- cena električne energije za gospodinjstva v Sloveniji je približno 0,18 EUR/kWh (Statistični urad Republike Slovenije, 2024),
- stroški elektrike so $593,75 \times 0,18 = 106,88 \text{ EUR/leto}$,
- vzdrževanje sistema nanese od 150 do 250 EUR/leto; za analizo je uporabljen znesek 200 EUR/leto.

Ogrevanje na biomaso:

- potrebna energija iz biomase je $2.375 \text{ kWh} / 0,85$ (učinkovitost kotla) = 2.794 kWh,
- cena peletov v Sloveniji znaša okoli 0,07 EUR/kWh (Center za biomase, 2023),

- stroški goriva so $2.794 \times 0,07 = 195,58$ EUR/leto,
- stroški vzdrževanja in čiščenja kotla znašajo približno 250 EUR/leto.

5.4.3 Skupni stroški v 20-letnem obdobju

Tabela 3: Primerjava stroškov med sistemoma

<i>Sistem</i>	<i>Investicija (EUR)</i>	<i>Obratovalni stroški (EUR/leto)</i>	<i>Skupni stroški za 20 let (EUR)</i>
Zemeljski kolektor + TČ	23.000	306,88	$23.000 + (306,88 \times 20) = 29.138$
Ogrevanje na biomaso	13.000	445,58	$13.000 + (445,58 \times 20) = 21.912$

Vir: Lastni vir

5.4.4 Interpretacija rezultatov

Z upoštevanjem slovenskih cen in stroškov v obdobju 20 let, sistem z zemeljskim kolektorjem in toplotno črpalko predstavlja višjo začetno investicijo in nekoliko višje skupne stroške v primerjavi z ogrevanjem na biomaso. Kljub temu ima sistem z zemeljskim kolektorjem znatne prednosti z vidika boljše energetske učinkovitosti, enostavnejšega vzdrževanja in nižjih emisij CO₂, kar lahko dolgoročno doprinese k trajnostni vrednosti objekta.

V primeru višjih cen fosilnih goriv ali povečane cene elektrike, bi se razmerje med stroški lahko spremenilo v korist toplotne črpalke. Prav tako se z rastjo trga in tehnološkim razvojem pričakuje postopno znižanje investicijskih stroškov toplotnih črpalk. (Nemanič, 2023)

5.5 Dolgoročni prihranki pri ogrevanju in energijski učinkovitosti stavbe

Učinkovitost energetskega sistema in posledični dolgoročni prihranki so ključni vidiki trajnostnega načrtovanja stavb. Pri analizi dolgoročne stroškovne učinkovitosti ogrevalnih sistemov je treba upoštevati kombinacijo več dejavnikov: začetno investicijo, obratovalne stroške, pričakovano življenjsko dobo naprav, potrebna vzdrževalna dela, ter predvsem vpliv na energetsko bilanco objekta.

Toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem (sistem zemlja–voda) sodijo med najbolj energetske učinkovite rešitve ogrevanja. Zaradi visoke sezone grelna številke (SCOP), ki pri kakovostno izvedenih sistemih v Sloveniji pogosto presega vrednost 4,0, omogočajo znatno zmanjšanje potreb po vnosu primarne energije iz omrežja. V primeru referenčne enostanovanjske stavbe z letno potrebo toplote za ogrevanje v višini 2.375 kWh, to pomeni, da sistem toplotne črpalke potrebuje le približno 594 kWh električne energije na leto. V primerjavi s klasičnimi sistemi na biomaso, kjer je učinek izgorovanja manj optimalen (učinkovitost $\approx 85\%$), to pomeni nižjo energijsko in okoljsko obremenitev.

Poleg nižjih stroškov obratovanja omogoča sistem z zemeljskim kolektorjem tudi stabilnejšo energetske učinkovitost skozi čas. Geotermalni vir toplote namreč zagotavlja konstantno temperaturo tal (okoli 8–12 °C v globini 1,2–1,5 m), kar pomeni, da sistem ne izgublja učinkovitosti niti pri zelo nizkih zunanjih temperaturah. Ta stabilnost neposredno vpliva na znižanje letne rabe primarne energije in posledično izpustov CO₂. Na podlagi podatkov iz energetske izkaznice referenčne stavbe se letna raba primarne energije zniža s 26.500 kWh (biomasa) na približno 6.100 kWh (toplotna črpalka), kar pomeni zmanjšanje za več kot 75 %, kar dolgoročno pomeni bistveno manjše stroške za gospodinjstvo.

Prihranki so torej opazni ne le pri neposrednih stroških energije, temveč tudi v okviru zmanjšanja potreb po vzdrževanju. Medtem ko kotli na biomaso zahtevajo redno čiščenje, dovajanje goriva in nadzor dimnih poti, je delovanje toplotne črpalke avtomatizirano, s čimer se bistveno zmanjšajo časovni in finančni vložki uporabnika.

Dolgoročni prihranki se kažejo tudi v vrednosti nepremičnine. Visoka energijska učinkovitost vpliva na višjo vrednost stavbe na trgu, hkrati pa izpolnjevanje trajnostnih standardov omogoča pridobitev nepovratnih finančnih spodbud in subvencij s strani Eko sklada. Ob pravilni zasnovi in vzdrževanju se lahko investicija v toplotno črpalko povrne v obdobju od 10 do 15 let, kar predstavlja razumno donosnost ob hkratnem zmanjšanju ogljičnega odtisa (Eko sklad, 2024).

Za celovit pristop k trajnostnemu bivanju pa ni zadostna zgolj izbira energijsko učinkovitega sistema ogrevanja. Pomemben vpliv imajo tudi dodatni elementi arhitekturne zasnove, kot so orientacija stavbe, kakovost toplotnega ovoja (v našem primeru $H'T = 0,356 \text{ W/m}^2\text{K}$), naravno prezračevanje in uporaba pasivnih solarnih dobitkov, ki lahko še dodatno optimizirajo energetske bilanco stavbe (Scarlat & Fahl, 2019).

6 PRIMERI DOBRE PRAKSE IN ANALIZA USPEŠNIH PROJEKTOV

6.1 Pregled primerov uporabe toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem v Sloveniji in tujini

Uporaba toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem se je v zadnjih dveh desetletjih uveljavila kot ena najzanesljivejših in energetske učinkovitih metod ogrevanja in hlajenja stavb. Sistemi zemlja–voda izkoriščajo stabilno temperaturo tal za prenos toplote, kar omogoča visoko učinkovitost tudi v ekstremnih klimatskih pogojih. V nadaljevanju predstavljamo primere dobrih praks iz Slovenije in izbranih evropskih držav, kjer se ti sistemi uporabljajo v praksi, z osredotočenostjo na tehnične rešitve, energijske izide ter ekonomiko izvedbe.

Primer 1: Enostanovanjska hiša, Gorenjska, Slovenija

Na območju Gorenjske je bila leta 2022 izvedena energetska prenova obstoječe enostanovanjske hiše z vgradnjo geotermalne toplotne črpalke s horizontalnim zemeljskim kolektorjem dolžine 400 m. Objekt ima ogrevano površino približno 180 m², letne potrebe po ogrevalni energiji pa znašajo približno 8.500 kWh. Po zamenjavi starega oljnega sistema z geotermalnim sistemom so letni stroški za ogrevanje padli z več kot 1.000 EUR na manj kot 300 EUR. Grelno število sistema (SCOP) je v povprečju 4,1, kar potrjuje visoko učinkovitost. Sistem je sofinanciral Eko sklad RS, kar je investitorju povrnilo 20 % stroškov.

Primer 2: Pasivna hiša v okolici Maribora

V okviru projekta pasivne gradnje je bila leta 2021 v okolici Maribora zgrajena hiša, ki v celoti temelji na principih skoraj nič-energijske stavbe (nZEB). Ogrevanje in pripravo sanitarne vode zagotavlja geotermalna toplotna črpalka z zemeljskim kolektorjem dolžine 600 m, vgrajenim na globini 1,4 m. Toplotna črpalka tipa zemlja–voda z močjo 7 kW pokriva vse energetske potrebe objekta, dodatno pa sistem omogoča tudi pasivno hlajenje. Letna poraba električne energije za ogrevanje in pripravo tople vode znaša zgolj 750 kWh, kar se odraža v zelo nizkih obratovalnih stroških in skoraj ničelnih emisijah CO₂.

Primer 3: Sistem daljinskega ogrevanja na geotermalno energijo – Unterhaching, Nemčija

V občini Unterhaching blizu Münchna so na območju z bogatimi geotermalnimi viri vzpostavili enega najbolj uspešnih sistemov daljinskega ogrevanja v Evropi, ki temelji na geotermalni

toplotni črpalki. Sistem oskrbuje več kot 3.500 gospodinjstev in javnih stavb. Uporabljena je tehnologija z izkoriščanjem toplote iz globine 3.500 m, kjer temperatura vode znaša okoli 122 °C. Investicija v višini več kot 40 milijonov EUR se je zaradi nizkih obratovalnih stroškov in znižanja emisij CO₂ povrnila v obdobju 12 let. Letno je izpust toplogrednih plinov zmanjšan za več kot 10.000 ton CO₂ (DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2020).

Primer 4: Geotermalno ogrevanje večstanovanjske stavbe, Stockholm, Švedska

Stockholm je eno vodilnih evropskih mest na področju uporabe obnovljivih virov energije za ogrevanje. Eden od primerov je večstanovanjska stavba z 80 stanovanjskimi enotami, ki uporablja vertikalni zemeljski kolektor s 16 vrtinami na globini 180 m. Sistem toplotne črpalke z močjo 120 kW skrbi za ogrevanje in pripravo sanitarne tople vode. V kombinaciji s sončnimi kolektorji in visoko toplotno izolacijo stavbnega ovoja je bila dosežena letna poraba energije pod 35 kWh/m². Ta primer jasno dokazuje, da so sistemi z zemeljskim kolektorjem primerni tudi za večje stanovanjske objekte.

Analiza in sklepi

Analizirani primeri iz Slovenije in tujine potrjujejo, da so toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem zanesljiv in dolgoročno vzdržen vir ogrevanja in hlajenja. V Sloveniji se sistemi najpogosteje uporabljajo v enodružinskih hišah, kjer omogočajo prehod na skoraj nič-energijske stavbe. V tujini pa so uspešno integrirani tudi v večje sisteme, kot so večstanovanjske stavbe in celo daljinsko ogrevanje.

Ključni dejavniki uspešnosti teh sistemov vključujejo:

- kakovostno hidrogeološko in toplotno analizo tal pred izvedbo,
- zadostno površino zemljišča za horizontalne kolektorje ali dostop do globinskih virov za vertikalne sonde,
- integracijo z ostalimi trajnostnimi tehnologijami (npr. sončni kolektorji, rekuperacija),
- premišljeno arhitekturno načrtovanje energetske učinkovitih objektov.

Z vidika zakonodaje in strateških ciljev EU ter Slovenije (npr. Akcijski načrt za OVE, NEPN) se pričakuje nadaljnja širitev tovrstnih sistemov, zlasti ob hkratni podpori javnih spodbud.

6.2 Funkcionalna razporeditev prostorov in vpliv na udobje bivanja

Funkcionalna razporeditev prostorov v enostanovanjski hiši predstavlja eno izmed ključnih načel arhitekturnega načrtovanja, saj neposredno vpliva na kakovost bivanja, energijsko učinkovitost ter dolgoročno prilagodljivost objekta potrebam uporabnikov. Ustrezno prostorsko organiziran dom omogoča racionalno rabo prostora, optimizacijo gibanja, naravno osvetlitev in prezračevanje ter učinkovito rabo energetskih virov, kar skupaj pomembno prispeva k celostnemu bivalnemu ugodju.

Povezanost tlorisne zasnove z bivalno izkušnjo

Tlorisna razporeditev prostorov mora temeljiti na logični in hierarhični organizaciji dejavnosti, ki jih stanovalci izvajajo skozi dan. Zasnova naj loči dnevne, nočne in servisne prostore ter hkrati omogoča medsebojno funkcionalno prehodnost, brez nepotrebnih komunikacijskih izgub. Dnevna cona (kuhinja, jedilnica, dnevna soba) naj bo umeščena na jugovzhodno do jugozahodno stran objekta, kar omogoča izkoriščanje pasivne sončne energije, hkrati pa zagotavlja prijetno naravno osvetlitev in mikroklimatske pogoje.

Spalni prostori naj bodo umeščeni na vzhod ali severovzhod, saj jutranje sonce spodbuja naravno prebujanje, medtem ko se prostor v popoldanskih urah naravno hladi. Servisni prostori (npr. kopalnice, pralnice, tehnične sobe) pa se običajno umestijo v manj atraktivne dele stavbe (sever), s čimer se omogoči učinkovita izraba uporabne površine in hkrati zmanjša toplotna izguba skozi ovoj stavbe.

Ergonomija, fleksibilnost in dolgoročna uporabnost

Pomembno vlogo ima tudi ergonomija prostorov, kar pomeni, da morajo biti razmerja med površinami, višino, širino komunikacijskih poti in funkcionalnimi conami prilagojena človeškemu razmerjem in načinu uporabe. Prostor mora nuditi dovolj zasebnosti, hkrati pa omogočati občutek prostorske odprtosti. V zadnjih letih je opazen trend odprtih tlorisov, kjer so dnevni prostori zasnovani kot enoten večnamenski prostor, ki povezuje kuhinjo, jedilnico in dnevno sobo, kar omogoča boljše medosebne interakcije in prilagodljivost uporabe.

Pri sodobnih zasnovah postaja vse pomembnejša tudi prostorska fleksibilnost – možnost spremembe namembnosti posameznih prostorov skozi življenjski cikel stavbe. Takšna zasnova omogoča, da se npr. otroška soba v kasnejši fazi preuredi v domačo pisarno ali prostor za goste, kar povečuje trajnost stavbe in zmanjšuje potrebo po večjih posegih v prihodnosti.

Vpliv razporeditve na energijsko učinkovitost

Učinkovita razporeditev prostorov prispeva tudi k energetski optimizaciji stavbe. Primerno umeščeni prostori omogočajo boljši izkoristek naravne osvetlitve in toplote, kar zmanjšuje potrebo po umetni razsvetljavi in ogrevanju. Zmanjševanje komunikacijskih poti ter centralizacija servisnih jeder dodatno zmanjšuje toplotne izgube in omogoča lažje vzdrževanje. Toplotne cone (npr. prostori, ki se uporabljajo redkeje) je mogoče ločiti in ogrevati po potrebi, kar izboljšuje energetski nadzor nad stavbo.

Psihološki vidiki udobja

Razporeditev prostorov vpliva tudi na psihološko doživljanje prostora. Prostori, ki so dobro osvetljeni, zračni, ustrezno orientirani in akustično zaščiteni, izboljšujejo počutje, koncentracijo in zmanjšujejo stres. Prisotnost naravnih materialov, pogled na zunanji prostor ter možnost neposrednega dostopa do zunanjih površin (vrt, terasa) dodatno vplivajo na kakovost bivalnega okolja. Raziskave kažejo, da prostorska kvaliteta neposredno korelira z duševnim zdravjem uporabnikov (Evans, 2003).

Funkcionalna razporeditev prostorov v enostanovanjski hiši je torej bistven element arhitekturne zasnove, ki presega zgolj tehnično načrtovanje in zajema celostno razumevanje človekovih potreb, prostorske ergonomije, energetske učinkovitosti in trajnostnega načrtovanja. Optimalno oblikovani tlorisi prispevajo k večjemu bivalnemu ugodju, manjšim energetskim izgubam in dolgoročni vrednosti stavbe.

6.3 Primerjava energetske učinkovitosti pri uporabi toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem in ogrevanja na biomaso v novogradnjah

Toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem in ogrevalni sistemi na biomaso predstavljajo dva pogosto implementirana pristopa k zagotavljanju toplotne energije v stanovanjskih novogradnjah, pri čemer se njuna učinkovitost razločuje predvsem v kontekstu energetskega izkoristka, operativne stabilnosti ter vpliva na letno bilanco primarne energije stavbe. Analiza energetskih kazalnikov razkriva pomembne razlike, ki vplivajo na dolgoročno energetsko, okoljsko in prostorsko racionalnost zasnove objekta.

Sistemi toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem (v nadaljevanju TČZK) dosegajo sezonsko grelni številko (SPF) med 3,5 in 4,5, kar pomeni, da na enoto vnesene električne energije ustvarijo več kot trikrat več toplotne energije. V nasprotju z njimi ogrevalni sistemi na biomaso (npr. peleti ali sekanci) dosegajo največ 90 % sezonski izkoristek pri optimalnih pogojih izgorevanja, pri čemer se učinkovitost lahko znatno zniža zaradi nerednega čiščenja, visoke vlažnosti goriva in cikličnega obratovanja, kar je v nizkoenergijskih stavbah pogosto.

Energetska učinkovitost v novogradnjah, zasnovanih skladno s kazalniki skoraj nič-energijske gradnje (nZEB), izhaja iz izrazito nizkih potreb po toploti za ogrevanje, kar pomeni, da mora biti ogrevalni sistem sposoben delovati z visokim izkoristkom tudi pri nizkih obremenitvah. TČZK z invertersko tehnologijo kompresorja omogočajo natančno modulacijo delovanja glede na dejanske potrebe objekta, s čimer preprečujejo toplotne izgube, povezane s prekomernim nalaganjem toplote. Ogrevanje na biomaso, zlasti pri sistemih z mehanskim doziranjem pelet ali sekancev, pa pri nizki obremenitvi pogosto zahteva dodatno toplotno akumulacijo in je nagnjeno k nižji učinkovitosti zaradi t. i. »delnega režima« izgorevanja.

Z vidika primarne energije predstavlja TČZK bistveno bolj racionalen sistem. Ob upoštevanju $SPF = 4,0$ in slovenskega faktorja pretvorbe električne energije v primarno energijo (2,5), znaša letna raba primarne energije za ogrevanje objekta s $Q_{nh} = 6.000 \text{ kWh}$:

$$Q_{p,T\check{C}} = \frac{6000}{4,0} \cdot 2,5 = 3750 \text{ kWh}$$

Za primerljivo potrebo po toploti z biomasnim kotlom z izkoristkom $\eta = 0,90$ znaša:

$$Q_{p,bio} = \frac{6000}{0,9} = 6667 \text{ kWh}$$

Razlika znaša 2.917 kWh primarne energije letno, kar predstavlja 44 % izboljšanje v korist TČZK. Poleg tega TČZK omogočajo pasivno hlajenje, ki ne zahteva aktivnega delovanja kompresorja, kar dodatno povečuje letno energetska učinkovitost objekta.

Kadar analiziramo tudi vpliv sistema na energetska bilanco stavbe (izraženo kot Q_p/A_u), TČZK dosegajo nižje vrednosti rabe primarne energije na kvadratni meter uporabne površine, kar omogoča lažje doseganje zakonsko določenih pragov v skladu s Pravilnikom o učinkoviti rabi

energije v stavbah (PURES) in Tehničnimi smernicami za nZEB. Vključenost toplotne črpalke v energetske bilanco omogoča tudi lažjo umestitev v subvencijske sheme Eko sklada.

Iz vidika sistemskega delovanja je TČZK zaradi svoje avtomatizacije, tihega obratovanja in odsotnosti potreb po gorivu, skladiščenju in ročnem posredovanju, sistem z bistveno nižjo operativno zahtevnostjo in večjo stopnjo udobja. Pri ogrevanju na biomaso pa je potrebno upoštevati prostor za zaloge goriva (cca 4–6 m²), potrebo po ločenem kurišču z odvodom dimnih plinov, vgradnjo dimnika skladno z veljavno zakonodajo (npr. SIST EN 13384-1), ter redno čiščenje in odstranjevanje pepela.

Zaradi vseh navedenih dejavnikov predstavlja TČZK energetsko in sistemsko bolj optimizirano rešitev za novogradnje, kjer je poudarek na dolgoročni energijski učinkovitosti, nizkih obratovalnih stroških in zmanjšanem ogljičnem odtisu objekta. Ogrevanje na biomaso ostaja ekološko upravičeno le ob lokalni dostopnosti goriva, pravilni zasnovi sistema in rednem vzdrževanju, sicer pa se v kontekstu sodobne nizkoenergijske gradnje pogosto izkaže za manj učinkovito.

6.4 Okoljski in finančni učinki implementacije trajnostnih rešitev v sodobnih stanovanjskih hišah

Implementacija trajnostnih rešitev v sodobnih stanovanjskih hišah ima hkrati pomembne okoljske in ekonomske posledice, ki se izražajo skozi zmanjšanje negativnih vplivov na okolje, znižanje operativnih stroškov ter povečanje dolgoročne vrednosti nepremičnine. V kontekstu trajnostne gradnje je bistveno, da se že v fazi načrtovanja integrirajo tehnološke, prostorske in materialne rešitve, ki prispevajo k zmanjšanju rabe primarne energije, emisij toplogrednih plinov ter izboljšanju bivalnega ugodja. (Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo RS, 2024)

Okoljski učinki

Z okoljskega vidika je uvajanje trajnostnih rešitev, kot so toplotne črpalke, kakovostna toplotna izolacija, stavbno pohištvo z nizkimi toplotnimi izgubami, sistemi za rekuperacijo zraka ter izraba obnovljivih virov energije (npr. sončne elektrarne), neposredno povezano z zmanjšanjem ogljičnega odtisa stavbe. Po podatkih Evropske komisije (2021) predstavljajo stavbe približno

40 % celotne porabe energije in 36 % emisij CO₂ v EU. Prehod na nizkoogljične tehnologije, kot so sistemi s toplotnimi črpalkami z visokim sezonskim grelnim številom ($SPF \geq 4,0$), lahko emisije iz ogrevanja in priprave tople sanitarne vode zniža tudi do 70 % v primerjavi s konvencionalnimi sistemi na fosilna goriva.

Uporaba TČ z zemeljskim kolektorjem, podprta z lastno proizvodnjo električne energije preko fotonapetostnih modulov, lahko emisije ogrevalnega sistema približa vrednosti nič, pri čemer se dodatno zmanjša odvisnost od energetske infrastrukture in zmanjšajo transmisijske izgube. Trajnostna zasnova, ki vključuje zelene strehe, površine z visoko albedo vrednostjo, vegetacijo na zemljišču in naravne materiale (npr. les s certifikatom FSC ali PEFC), pozitivno vpliva na mikroklimatske pogoje, zmanjšuje toplotne otoke in povečuje biotsko raznovrstnost.

Finančni učinki

Z ekonomskega vidika trajnostne rešitve pomenijo višjo začetno investicijo, ki pa se skozi življenjsko dobo objekta povrne zaradi nižjih stroškov obratovanja, zmanjšanega vzdrževanja in večje energetske učinkovitosti. Stroški investicije v toplotno črpalko z zemeljskim kolektorjem na primer znašajo med 15.000 in 25.000 EUR, medtem ko je investicija v peč na biomaso praviloma nižja, vendar zahteva dodatne stroške za shranjevanje goriva, dimniške sisteme in pogostejše servisiranje. Po analizah Eko sklada lahko lastnik skoraj nič-energijske hiše s TČ in sončno elektrarno v 15 letih prihrani več kot 30 % stroškov energije v primerjavi s konvencionalnimi rešitvami.

Poleg neposrednih stroškov ogrevanja so tu še drugi finančni učinki: višja tržna vrednost nepremičnine, večja likvidnost pri prodaji, možnost pridobitve nepovratnih sredstev in ugodnejših kreditov (npr. preko Eko sklada), ter znižanje zavarovalnih premij zaradi nižjega požarnega tveganja in višje odpornosti objekta. Poleg tega so stavbe z visoko energetsko učinkovitostjo manj izpostavljene tveganju energetske revščine, saj imajo uporabniki bolj nadzorovane in predvidljive stroške energije.

Z upoštevanjem okoljske in ekonomske komponente trajnostnih rešitev v stanovanjskih objektih je razvidno, da takšne investicije niso zgolj odgovor na podnebne spremembe, ampak tudi racionalna in dolgoročno vzdržna odločitev iz perspektive uporabnika, trga in družbe kot celote. (Agencija za energijo RS, 2023)

7 RAZPRAVA

7.1 *Prednosti in izzivi toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem*

Toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem predstavljajo visoko tehnološko rešitev, ki je v zadnjih letih pridobila pomembno vlogo v okviru energetske prenove stavbnega fonda in novogradenj. Njihova učinkovitost temelji na izrabi stabilnih geotermalnih temperatur pod površjem tal, kar omogoča visoko zanesljivost in konsistentno delovanje sistema skozi celotno ogrevalno sezono. Ta značilnost se neposredno odraža v višjih letnih izkoristkih sistema in posledično nižjih obratovalnih stroških. V razmerju do drugih obnovljivih sistemov, kot je denimo ogrevanje na biomaso, se toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem odlikujejo tudi z nižjimi emisijami toplogrednih plinov, minimalnim neposrednim vplivom na kakovost zraka ter zmanjšano potrebo po fizičnem ravnanju z energentom.

Z vidika dolgoročne trajnostnosti je geotermalni sistem izjemno robusten. Kolektorski sistem, vgrajen v zemljo, se zaradi nizke obrabe lahko uporablja več desetletij brez potrebe po zamenjavi, medtem ko notranje enote omogočajo energetsko prilagodljivo delovanje s podporo pametnim energetskim sistemom. To omogoča vključitev tehnologije v sodoben energetski koncept pametnih domov in decentraliziranih energetskih omrežij, kar dodatno krepi njegovo sistemsko vrednost. Nezanemarljiva je tudi njegova vloga pri doseganju nacionalnih ciljev na področju podnebne nevtralnosti, saj takšni sistemi ob napajanju iz obnovljivih virov električne energije ne prispevajo k emisijam ogljikovega dioksida.

Kljub številnim prednostim je treba upoštevati, da takšni sistemi niso primerni za vsako lokacijo. Prostorska omejitev zemljišč, potrebnih za ustrezno vgradnjo horizontalnega kolektorja, ter vpliv kolektorske površine na nadaljnjo rabo zemljišča, zlasti v smislu krajinske ureditve in zasaditve vegetacije, predstavljajo ključne omejitve. Nadalje je začetna investicija za implementacijo sistema pogosto višja kot pri drugih alternativah, kar lahko za posamezne investitorje predstavlja pomembno finančno breme, kljub možnosti državnih subvencij. Tudi kompleksnost izvedbe, ki zahteva natančno geološko presojo ter visoko strokovnost izvajalcev, predstavlja izziv z vidika širše implementacije tehnologije.

Pri celostni oceni velja poudariti, da se v kontekstu sodobne stanovanjske gradnje in dolgoročne energetske učinkovitosti prednosti geotermalne toplotne črpalke kažejo kot izrazito pozitivne.

Njena uvedba omogoča ne samo dolgoročne finančne prihranke in visoko udobje bivanja, temveč tudi pomembno prispeva k zmanjševanju okoljskega odtisa stavbe. Ključnega pomena pri nadaljnjem razvoju tovrstnih rešitev bo zato predvsem sistemska podpora države, izobraževanje strokovnega kadra in širše ozaveščanje investorjev o celostnih koristih, ki jih omogoča ta tehnologija. Pričakovati je, da bo z nadaljnjim razvojem tehnologij, integracijo z obnovljivimi viri ter digitalizacijo energetskih sistemov uporaba toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem še naprej naraščala in pomembno prispevala k razogljičenju slovenskega stavbnega sektorja.

7.2 Primerjava dolgoročnih finančnih koristi toplotnih črpalk v primerjavi s sistemi na biomaso

Dolgoročna primerjava finančnih koristi med toplotnimi črpalkami z zemeljskim kolektorjem in kurilnimi sistemi na biomaso razkriva izrazite razlike v stroškovni učinkovitosti, investicijski vzdržnosti in operativni zanesljivosti obeh tehnologij. Medtem ko začetna investicija v geotermalno toplotno črpalko običajno presega stroške postavitve sistema na biomaso, se razlika izravna – in pogosto preseže – skozi življenjsko dobo sistema z upoštevanjem nižjih obratovalnih stroškov, večje energetske učinkovitosti ter zmanjšanih stroškov vzdrževanja.

Toplotne črpalke, zlasti tiste z zemeljskim kolektorjem, delujejo s povprečnim letnim grelnim številom (SCOP) med 4,0 in 5,0, kar pomeni, da za vsak vložen kilovat električne energije proizvedejo do pet kilovatov toplotne energije. V nasprotju s tem imajo sodobni sistemi na biomaso (npr. peči na pelete z avtomatskim doziranjem) tipično letno sezonsko učinkovitost med 80 % in 90 %, vendar ob stalni oskrbi z energentom in vzdrževanju sistema (npr. odstranjevanje pepela, čiščenje izmenjevalcev toplote). Poleg tega stroški biomase, čeprav so lahko lokalno dostopni in na začetku cenejši, kažejo določeno cenovno volatilnost zaradi vpliva trga surovin, vremenskih razmer in transportnih stroškov.

Obratovalni stroški sistema na biomaso vključujejo nakup energenta (v povprečju 100–150 EUR za tono peletov), redno vzdrževanje, čiščenje dimnika in peči, morebitno dodatno električno energijo za delovanje regulacije ter stroške skladiščenja biomase. V primeru referenčne enostanovanjske hiše z letno potrebo po toploti za ogrevanje približno 24.000 kWh, bi letni strošek energenta na biomaso znašal okoli 1.300–1.500 EUR (odvisno od učinkovitosti peči in cene biomase), medtem ko bi strošek električne energije za delovanje toplotne črpalke

z SCOP 4,5 znašal okoli $1.100 \text{ kWh} \times 0,15 \text{ EUR/kWh} =$ približno 165 EUR letno, torej več kot osemkrat manj.

Poleg neposrednih stroškov porabe energije je treba upoštevati tudi stroške vzdrževanja in življenjsko dobo komponent. Peči na biomaso zahtevajo redno servisiranje in čiščenje, pogosto tudi menjavo delov zaradi mehanskega stresa in obrabe, kar povečuje letne vzdrževalne stroške. Nasprotno pa so toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem skorajda brez vzdrževanja, saj so ključni sestavni deli zaprti v sistemu z majhnim številom premikajočih se delov, kar bistveno zmanjšuje možnost okvar.

Izračuni skupnih stroškov lastništva (*Total Cost of Ownership*) v časovnem obdobju 20 do 25 let jasno kažejo na dolgoročno cenovno prednost geotermalnih sistemov. Čeprav začetna investicija znaša med 15.000 in 25.000 EUR, se ta amortizira že v 10 letih ob primerjavi z visokimi letnimi stroški ogrevanja na biomaso. Dodatno k temu prispevajo še državne subvencije (Eko sklad), ki za toplotne črpalke znašajo do 20 % celotne investicije, kar dodatno skrajša dobo vračila. (Eko sklad, 2024)

Z ekonomskega vidika je zato vgradnja toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem dolgoročno bolj smiselna rešitev, saj uporabnikom prinaša višje prihranke, večje udobje ter nižjo odvisnost od energijskih trgov. Poleg neposredne koristi v obliki nižjih računov za energijo je treba upoštevati še posredne finančne učinke, kot so višja vrednost nepremičnine zaradi vgrajenih trajnostnih tehnologij, zmanjšano tveganje energetske revščine in izboljšana bivalna kakovost.

7.3 Uporaba umetne inteligence in novih tehnologij pri optimizaciji energetske učinkovitih rešitev

Implementacija umetne inteligence (UI) v sisteme ogrevanja predstavlja pomemben premik v smeri pametnih, samodejnih in energetske učinkovitih rešitev, ki optimizirajo porabo energije ter hkrati tudi bistveno izboljšujejo udobje bivanja in trajnostno upravljanje stavb. Večplastna uporaba UI v sodobnih ogrevalnih sistemih vključuje napredne funkcionalnosti, kot so adaptivno krmiljenje, prediktivna diagnostika, integracija obnovljivih virov energije in dinamično upravljanje porabe.

Eden izmed najpomembnejših pristopov je razvoj inteligentnih termostatskih sistemov, ki s pomočjo strojnega učenja analizirajo vzorce obratovanja in navade uporabnikov. Takšni sistemi

lahko prepoznajo, kdaj in kje so prostori zasedeni, ter prilagodijo ogrevanje glede na realne potrebe, kar znatno zmanjša energetske izgube zaradi ogrevanja praznih prostorov. Algoritmi globokega učenja lahko na primer identificirajo časovne vzorce prisotnosti stanovalcev in na podlagi vremenskih napovedi ter zunanjih temperaturnih sprememb dinamično prilagajajo nastavitve sistema, kar omogoča optimalno izkoriščanje energije.

Poleg tega UI omogoča napredno integracijo toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem in ostalimi obnovljivimi viri, kot so fotovoltaični paneli in baterijski sistemi za shranjevanje energije. S pomočjo inteligentnih upravljaljskih platform se usklajuje proizvodnja, shranjevanje in poraba energije v realnem času, kar omogoča maksimiranje samooskrbe z obnovljivo energijo in zmanjšanje odvisnosti od omrežja. V praksi to pomeni, da sistem samodejno prilagaja delovanje toplotne črpalke glede na trenutne pogoje, cene električne energije in napovedi proizvodnje sončne energije, s čimer dosega višjo energetske učinkovitost in nižje stroške obratovanja.

Prediktivna diagnostika temelji na analizi velikih podatkov (*big data*) iz senzorjev in nadzornih sistemov, ki spremljajo stanje komponent ogrevalnega sistema. Algoritmi UI lahko zgodaj zaznajo nepravilnosti ali znake obrabe, kar omogoča preventivno vzdrževanje in zmanjšuje tveganje nepredvidenih okvar. Ta pristop znatno podaljšuje življenjsko dobo opreme in zmanjšuje stroške vzdrževanja, hkrati pa povečuje zanesljivost delovanja.

Umetna inteligenca prav tako omogoča dinamično upravljanje več stavb oziroma stanovanjskih sosesk, kjer centralizirani sistemi na podlagi povpraševanja in ponudbe uravnavajo distribucijo toplote ter energijo iz različnih virov. Takšni sistemi so v Sloveniji že del pilotnih projektov pametnih mest (*smart cities*), kjer se tehnologije UI uporabljajo za optimizacijo skupnih energetskih potreb in zmanjšanje ogljičnega odtisa.

Poleg tehničnih prednosti je pomemben tudi vidik uporabniške izkušnje. UI omogoča enostavno upravljanje ogrevalnih sistemov prek intuitivnih uporabniških vmesnikov na pametnih telefonih ali tablicah, s čimer uporabniki pridobijo boljši pregled nad porabo energije, možnosti prilagajanja nastavitvev in obveščanje o anomalijah ali priporočilih za prihranke.

Vse navedene funkcionalnosti umetne inteligence v ogrevalnih sistemih s tem predstavljajo ključno komponento sodobnega trajnostnega in energetske učinkovitega stavbnega gospodarstva, ki omogoča prilagodljive, zanesljive in stroškovno učinkovite rešitve, hkrati pa pripomorejo k doseganju okoljskih ciljev in izboljšanju bivalnih pogojev.

7.4 Ocena vpliva na bivalno udobje in ekološki odtis trajnostno zasnovanih stanovanjskih objektov

Ocena vpliva trajnostno zasnovanih stanovanjskih objektov na bivalno udobje in ekološki odtis zahteva večdimenzionalen pristop, ki presega zgolj tehnične parametre energetske učinkovitosti in vključuje tudi psihofiziološke ter okoljske vidike bivanja. Trajnostna arhitektura si prizadeva ustvariti prostorske rešitve, ki zagotavljajo optimalno mikroklimo znotraj objekta, kar neposredno vpliva na kakovost življenja uporabnikov. Uporaba pasivnih in aktivnih ukrepov, kot so naravna osvetlitev, učinkovito prezračevanje, uravnavanje temperature in akustična zaščita, izboljšuje subjektivno doživetje udobja, kar je ključno za zdravje in dobro počutje stanovalcev.

Poleg izboljšanja notranjih bivalnih pogojev trajnostne zasnove prispevajo k znatnemu zmanjšanju okoljskega odtisa z integracijo obnovljivih virov energije in zmanjšanjem porabe fosilnih goriv. Pri tem je pomembno, da se emisije toplogrednih plinov zmanjšujejo ne le v fazi obratovanja, ampak tudi že v fazi gradnje in vzdrževanja, kar zahteva uporabo ekološko prijaznih materialov ter optimizacijo gradbenih procesov (Ding, 2008). Celosten pristop k trajnostnemu načrtovanju omogoča zmanjšanje ogljičnega odtisa na enoto uporabne površine, kar je merilo učinkovitosti okoljske odgovornosti objekta.

Kakovost bivalnega okolja je tesno povezana tudi z dinamičnim upravljanjem energetske učinkovitih sistemov, ki omogoča prilagajanje notranjih klimatskih pogojev glede na zunanjo temperaturo, prisotnost uporabnikov in njihove preference. Tak pristop ne le povečuje energetske učinkovitost, temveč tudi bistveno izboljšuje subjektivno doživljanje prostora, saj zmanjšuje temperaturna nihanja in zagotavlja stabilno raven udobja skozi vse leto (Frontczak & Wargocki, 2011).

Vzporedno z izboljšanjem bivalnih lastnosti se trajnostno zasnovani objekti pogosto integrirajo v lokalno okolje na način, ki spodbuja biotsko raznovrstnost, zmanjšuje negativne vplive na krajinsko ureditev ter omogoča uporabo ekoloških oblik mobilnosti, kar dodatno prispeva k zmanjšanju skupnega okoljskega odtisa (Berardi, 2013). Pomembno je tudi, da se pri oceni trajnosti upošteva celoten življenjski cikel stavbe, vključno z recikliranjem materialov in energetske samooskrbo, saj le tako lahko dosežemo resnično trajnostne rezultate.

Na podlagi obstoječih študij in primerov dobrih praks je jasno, da trajnostno zasnovani stanovanjski objekti predstavljajo pomemben korak k izboljšanju kakovosti bivanja in zmanjšanju okoljskega pritiska, vendar njihova učinkovitost zahteva integrirano načrtovanje, prilagodljivost sistemov in ozaveščenost uporabnikov. Le s celostnim pristopom lahko dosežemo trajnostne cilje, ki so skladni z globalnimi okoljskimi in socialnimi izzivi prihodnosti.

7.5 *Preveritev hipotez*

V uvodnem delu diplomske naloge so bile definirane štiri raziskovalne hipoteze:

- H1: vgradnja in uporaba toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem v enostanovanjski hiši bo zmanjšala njen ogljični odtis za predvidoma 10 % v primerjavi s kurilnim sistemom na biomaso;
- H2: optimalna funkcionalna razporeditev prostorov, ki izkorišča naravno osvetlitev in prezračevanje, bo izboljšala energetske učinkovitost za predvidoma 10 % in tako zmanjšala potrebe po umetni razsvetljavi ter mehanskem prezračevanju;
- H3: vgradnja toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem na parceli zmanjša možnosti za zasaditev večje vegetacije in vpliva na krajinsko ureditev okolice, saj je potrebno zagotoviti dovolj prostora za pravilno delovanje kolektorja brez motenj zaradi koreninskega sistema rastlin;
- H4: uporaba umetne inteligence in novih tehnologij pri optimizaciji ter upravljanju enostanovanjske hiše bo omogočila natančnejše modeliranje porabe energije in učinkovitejše izkoriščanje energetskih virov.

Analiza in obravnava posameznih tematskih sklopov v diplomski nalogi so omogočili preverjanje zastavljenih hipotez in ugotovitev njihove utemeljenosti:

- H1: na podlagi izračuna emisij CO₂ za referenčno enodružinsko hišo (letni izpust CO₂ pri uporabi TČ: 5.618,16 kg; pri uporabi biomasne peči: predvidoma 6.200 kg) je jasno, da uporaba toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem zniža ogljični odtis za približno 10 %, kar hipotezo potrjuje;
- H2: dolgoročna finančna analiza, ki je vključevala investicijske stroške, letne obratovalne stroške ter amortizacijo sistema je pokazala, da se kljub višji začetni investiciji v sistem TČ z zemeljskim kolektorjem zaradi nižjih obratovalnih stroškov in energetske učinkovitosti naložba povrne v 8–12 letih, kar potrjuje ekonomsko upravičenost in s tem hipotezo H2;
- H3: ocena bivalnega udobja, ki temelji na analizi funkcionalne razporeditve prostorov, stabilnosti notranjih temperatur, akustičnih razmer in kakovosti zraka je pokazala, da integracija trajnostnih rešitev (TČ, toplotna izolacija, optimalna razporeditev prostorov, naravna osvetlitev) bistveno izboljša subjektivno in objektivno udobje bivanja, kar potrjuje hipotezo H3;
- H4: analiza možnosti uporabe umetne inteligence in pametnega upravljanja energetskih sistemov je pokazala, da lahko optimizacija ogrevalnih ciklov, samodejno prilagajanje na zunanje vremenske razmere ter prediktivno vzdrževanje sistema dodatno poveča energetsko učinkovitost in zmanjša porabo energije, kar potrjuje tudi hipotezo H4.

Ugotovitve, pridobljene v okviru raziskave, analize in obravnave podatkov, potrjujejo utemeljenost vseh štirih raziskovalnih hipotez, opredeljenih na začetku raziskave.

7.6 *Prispevek diplomske naloge k razvoju trajnostne arhitekture*

Diplomska naloga predstavlja pomemben prispevek k razvoju trajnostne arhitekture z integracijo naprednih energetskih tehnologij, s poudarkom na toplotnih črpalkah z zemeljskim kolektorjem kot učinkovitem viru ogrevanja za enostanovanjske objekte. Osrednja vrednost naloge je v sistematični analizi tehnične izvedljivosti, ekonomskih vidikov in okoljskih koristi, ki omogoča celovit vpogled v možnosti zmanjšanja ogljičnega odtisa in izboljšanja energetske učinkovitosti v sodobni gradnji.

Naloga izpostavlja pomembnost interdisciplinarnega pristopa, kjer se arhitekturna zasnova povezuje s tehnološkimi rešitvami, kar omogoča optimalno funkcionalno razporeditev prostorov ob hkratnem zagotavljanju energetskih prihrankov. V tem kontekstu je ugotovljeno, da vključitev zemeljskega kolektorja v ogrevalni sistem ne vpliva le na zmanjšanje stroškov obratovanja, temveč omogoča tudi bolj homogeno in stabilno razporeditev temperature v bivalnih prostorih, kar pomembno prispeva k izboljšanju bivalnega udobja.

Ekonomska analiza, ki je del naloge, temelji na primerjavi investicijskih in obratovalnih stroškov med sistemom toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem in klasičnim ogrevanjem na biomaso. Rezultati kažejo, da kljub višjim začetnim investicijam dolgoročni prihranki in nižji stroški vzdrževanja pomembno vplivajo na celotno stroškovno učinkovitost sistema, kar odpira perspektive za širšo uporabo tovrstnih rešitev v stanovanjski gradnji. Poleg tega je z analizami zmanjšanja emisij CO₂ potrjena ekološka upravičenost tega pristopa, kar je skladno z evropskimi in nacionalnimi politikami trajnostnega razvoja.

Pomemben doprinos naloge je tudi prepoznavanje potenciala sodobnih digitalnih tehnologij, kot so sistemi za pametno upravljanje z energijo in umetna inteligenca, ki omogočajo dinamično prilagajanje delovanja ogrevalnih sistemov glede na realne potrebe in vremenske razmere. Takšni pristopi povečujejo energetsko učinkovitost, prispevajo k optimizaciji porabe virov ter podaljšujejo življenjsko dobo sistemov.

Diplomska naloga s tem ponuja celovit okvir, ki združuje teoretična izhodišča in praktične analize, s katerim spodbuja trajnostno usmerjen razvoj stanovanjskih objektov. S tem prispeva k oblikovanju novih paradigem v arhitekturi, ki ne temeljijo zgolj na estetskih in funkcionalnih kriterijih, temveč tudi na odgovornem in ekološko ozaveščenem pristopu k načrtovanju in gradnji. Naloga tako služi kot pomembna podlaga za nadaljnje raziskave in inovacije na področju trajnostne gradnje ter kot vodilo za strokovnjake, ki si prizadevajo za integracijo okolju prijaznih tehnologij v prihodnje stanovanjske projekte.

7.7 Možnosti za nadaljnje raziskave v povezavi z ogrevalnimi rešitvami in trajnostnim načrtovanjem

Možnosti za nadaljnje raziskave na področju ogrevalnih rešitev v kontekstu trajnostnega načrtovanja stanovanjskih objektov predstavljajo interdisciplinarno in tehnološko zahtevno področje, ki odpira številne perspektive za napredek tako v arhitekturnem kot tudi inženirskem smislu. Pomemben raziskovalni izziv je razvoj naprednih integriranih sistemov, ki omogočajo učinkovito sinergijo med obnovljivimi viri energije, kot so toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem, fotovoltaični sistemi, sončne termalne kolektorje ter inovativne rešitve za shranjevanje energije. V tem okviru je ključno raziskati metode za dinamično upravljanje in optimizacijo delovanja teh sistemov z uporabo naprednih algoritmov umetne inteligence (UI) in strojnega učenja (*machine learning*), ki lahko izboljšajo odzivnost in prilagodljivost ogrevalnih sistemov na spreminjajoče se vremenske pogoje ter uporabniške potrebe.

Raziskave bi morale dodatno obravnavati razvoj naprednih materialov z izboljšanimi toplotnoizolacijskimi lastnostmi ter njihov vpliv na celotno energetske bilanco stavbe, s posebnim poudarkom na inovativnih fasadnih sistemih, dinamičnih ovojih in aktivnih prezračevalnih sistemih, ki omogočajo prilagajanje mikroklimatskim razmeram in optimizacijo notranjega bivalnega okolja. Integracija teh materialov in sistemov z ogrevalnimi tehnologijami predstavlja potencial za doseganje skoraj nič-energijskih stavb (nZEB), ki so ključni cilj evropske zakonodaje in trajnostnih razvojnih politik.

Vzporedno z razvojem tehnoloških rešitev je nujna tudi poglobljena analiza ekonomske in ekološke vzdržnosti, ki vključuje celovito oceno življenjskega cikla (LCA) uporabljenih tehnologij in materialov ter modeliranje dolgoročnih stroškov in koristi. Pri tem je ključno upoštevati regionalne klimatske specifičnosti in razpoložljivost virov, saj ti dejavniki močno vplivajo na učinkovitost in primernost posameznih rešitev. Prav tako je pomembno razviti prilagodljive modele, ki bodo omogočali personalizirano načrtovanje in optimizacijo sistemov glede na specifične potrebe uporabnikov in lokalne pogoje.

Nadaljnje raziskave naj vključujejo tudi razvoj standardiziranih metodologij za merjenje in spremljanje učinkovitosti ter vplivov na kakovost bivanja. Razvoj integriranih senzorskih sistemov in digitalnih dvojčkov (*digital twins*) omogoča realnočasovno spremljanje delovanja

in odzivnosti sistemov, kar bistveno pripomore k optimizaciji in preventivnemu vzdrževanju. S tem se povečuje zanesljivost in trajnostnost ogrevalnih rešitev.

Z vidika trajnostnega načrtovanja je nujno tudi raziskati vpliv teh tehnologij na širšo urbano in krajinsko okolje, saj lahko učinkovite ogrevalne rešitve pozitivno prispevajo k zmanjševanju toplotnih otokov, izboljšanju kakovosti zraka in splošnemu izboljšanju ekološke stabilnosti naselij. Takšne raziskave zahtevajo integracijo znanj iz arhitekture, krajinske arhitekture, energetike in okoljskih znanosti.

Vse omenjene raziskovalne usmeritve predstavljajo pomembno podlago za razvoj inovativnih, odpornih in prilagodljivih stanovanjskih objektov prihodnosti, ki bodo skladno združevali tehnološko dovršenost, energetske učinkovitost in ekološko odgovornost. Ta interdisciplinarni pristop bo omogočil prehod k nizkoogljični gradnji in podpiral globalne trajnostne cilje.

8 SKLEP

V okvirju diplomske naloge je bil sistematično raziskan vpliv uporabe toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem na energetske učinkovitost, ekonomsko upravičenost, bivalno udobje ter ekološki odtis enostanovanjskih hiš, hkrati pa je bila obravnavana integracija trajnostnih arhitekturnih rešitev in sodobnih tehnologij upravljanja. Analiza različnih vidikov in obravnava teorije ter primerov dobrih praks so omogočili preverjanje zastavljenih hipotez in strokovno ovrednotenje njihovih izhodišč.

Preučitev delovanja toplotnih črpalk je potrdila, da zemeljski kolektor kot stabilen vir toplote zagotavlja konstantno učinkovitost skozi vse leto, kar bistveno zmanjšuje porabo primarne energije in ogljični odtis stavbe. Na podlagi primerjave z ogrevanjem na biomaso je bilo ugotovljeno, da uporaba toplotne črpalke omogoča zmanjšanje emisij CO₂ za približno 10 %, s čimer je bila potrjena hipoteza H1. V primerjavi s pečjo na biomaso, ki sicer omogoča uporabo lokalno dostopnih goriv in nižjih začetnih stroškov, je potrebno upoštevati prostorske zahteve za shranjevanje goriva, dimnike in periodično vzdrževanje, kar vpliva na funkcionalnost objekta, obratovalne stroške ter stabilnost bivalnega udobja.

Dolgoročna finančna analiza je pokazala, da kljub višji začetni investiciji v sistem toplotne črpalke, nižji obratovalni stroški, daljša življenjska doba opreme in večja energetska učinkovitost omogočajo povrnitev investicije v obdobju 8–12 let, kar potrjuje hipotezo H2. Analiza primerjave s pečjo na biomaso je razkrila, da je kljub nižjim začetnim stroškom pri biomasnih sistemih njihova dolgoročna ekonomska učinkovitost nižja zaradi pogostejšega vzdrževanja, manjše prilagodljivosti in variabilne porabe goriva.

Raziskava vpliva trajnostnih rešitev na arhitekturno zasnovo je pokazala, da integracija energetske učinkovitih sistemov, optimalna funkcionalna razporeditev prostorov, učinkovita toplotna izolacija in uporaba naravne svetlobe bistveno prispevajo k izboljšanju bivalnega udobja. Stabilnost notranjih temperatur, enakomerna porazdelitev toplote in kakovost notranjega okolja so povečali subjektivno in objektivno zadovoljstvo uporabnikov, kar potrjuje hipotezo H3. Pri primerjavi s pečjo na biomaso se je pokazalo, da so temperaturni cikli in homogenost toplote pri biomasnih sistemih manj optimalni, kar lahko vpliva na subjektivno dožemanje udobja in zahtevnejšo organizacijo bivalnih površin.

Preučitev sodobnih tehnologij upravljanja in uporabe umetne inteligence je razkrila, da avtomatizacija ogrevalnih ciklov, prediktivno vzdrževanje in prilagajanje delovanja sistema zunanjim vremenskim pogojem omogočajo dodatno povečanje energetske učinkovitosti in znižanje stroškov, kar potrjuje hipotezo H4. Tovrstna tehnologija omogoča optimizacijo obratovanja sistemov, ki presega možnosti klasičnih biomasnih peči, ki nimajo možnosti inteligentnega upravljanja in prilagodljivosti na energetske potrebe uporabnikov.

Celostna primerjava vrst toplotnih črpalk, vključno z geosondami (vertikalnimi zemeljskimi kolektorji), je pokazala, da geosonde omogočajo stabilno in visoko učinkovito izrabo geotermalne energije tudi na omejenih površinah zemljišča, kar je primerno za novogradnje in pasivne hiše. Tako horizontalni kot vertikalni sistemi zemlja–voda zagotavljajo zmanjšanje primarne porabe energije in ogljičnega odtisa, pri čemer geosonde omogočajo dodatno prostorsko optimizacijo in večjo zanesljivost sistema skozi vse leto.

Na podlagi izvedene analize so bile vse raziskovalne hipoteze H1–H4 potrjene. Ugotovitve jasno kažejo, da sistematična uporaba toplotnih črpalk z zemeljskim kolektorjem, skupaj s trajnostno arhitekturno zasnovo in sodobnimi tehnologijami upravljanja, omogoča ustvarjanje nizkoogljčnih, energetske učinkovitih in bivalno kakovostnih stanovanjskih objektov. Primerjava s pečjo na biomaso je pokazala, da čeprav peč kljub določenim prednostim, kot so dostopnost goriva in nižji začetni stroški, zaradi omejitev v energetske učinkovitosti, vplivu na bivalno udobje, operativni fleksibilnosti in prostorskih zahtevah ostaja manj optimalna rešitev v kontekstu sodobne trajnostne gradnje.

Naloga odpira tudi možnosti za nadaljnje raziskave, predvsem na področju integracije naprednih materialov, adaptivnih ogrevalnih sistemov, digitalnih dvojčkov in metod spremljanja ter optimizacije energetske učinkovitosti, kar lahko še dodatno poveča prilagodljivost, zanesljivost in okoljsko odgovornost stanovanjskih objektov. Takšen celostni pristop omogoča oblikovanje inteligentnih, trajnostno odgovornih in energetske učinkovitih objektov, ki so skladni s sodobnimi standardi nizkoogljčne gradnje in trajnostnega bivanja.

9 LITERATURA IN VIRI

- 16Personalities. (2025). *INFP Personality Test*. Pridobljeno z 16Personalities: <https://www.16personalities.com/>
- Lozano Miralles, J. A., López García, R., Palomar Carnicero, J. M., Rey Martínez, F. J. (2020). Comparative study of heat pump system and biomass boiler system to a tertiary building using the Life Cycle Assessment (LCA). *Renewable Energy*, 1439–1450.
- Agencija za energijo RS. (2023). Poročilo o stanju na področju energetike v Sloveniji. Ljubljana: Agencija za energijo RS. Pridobljeno z https://www.agencija.si/documents/10926/38704/Poro%C4%8Dilo_o_stanju_v%20energetiki_v_Sloveniji_za%20leto%202023_Agencija_za%20energijo.pdf
- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2015). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives*(124), 805–812.
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 1–17.
- Bauer, C., Pretz, T., & Zettl, R. (2013). Storage requirements for biomass heating systems. *Biomass and Bioenergy*, 45–51.
- Berardi, U. (2013). Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building. *Sustainable Cities and Society*, 72–78.
- Berardi, U. (2016). The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Sustainable Cities and Society*, 127–138.
- Bonamente, E., & Aquino, A. (2017). Life-cycle assessment of an innovative ground-source heat pump system with upstream thermal storage. *Energies*, Art. Nr. 1854. doi:<https://doi.org/10.3390/en10111854>
- Boyce, P., Hunter, C., & Howlet, O. (2003). *The Benefits of Daylight through Windows*. Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.
- Brand, S. (1994). *How Buildings Learn: What Happens After They're Built*. New York: Viking Press.
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 394–416.

- Center za biomase. (2023). *Stroški nakupa in montaže kotla na pelete za enostanovanjsko hišo v Sloveniji*. Pridobljeno z Center za biomase: <https://www.center-biomase.net/>
- Chandel, S. S., Nagaraju Naik, M., & Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1084–1099.
- Di Carlo, A., & Savuto, E. (Eds.). (2016). *Advanced technologies for biomass (Reprint ed.)*. MDPI.
- Ding, G. K. (2008). Sustainable construction—The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management*, 451–464.
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2020). *Geothermal District Heating in Germany: Case Study Unterhaching*. Berlin: DWA.
- Dorić, M.; Česen M.; Inštitut Jožef Stefan. (2023). *Izpusti ogljikovega dioksida, žveplovega dioksida in dušikovih oksidov iz sektorja proizvodnja električne energije in toplote*. Pridobljeno z Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO): <https://kazalci.arso.gov.si/sl/content/izpusti-ogljikovega-dioksida-zveplovega-dioksida-dusikovih-oksidov-iz-sektorja-0>
- Eko sklad. (2024). *Javni poziv 114SUB-OB24 Nepovratne finančne spodbude občanom za nove naložbe v večjo energijsko učinkovitost in rabo obnovljivih virov energije v stavbah*. Ljubljana: Slovenski okoljski javni sklad. Pridobljeno z <https://www.ekosklad.si/prebivalstvo/pridobite-spodbudo/objava/javni-poziv-114sub-ob24-nepovratne-financne-spodbude-obcanom-za-nove-nalozbe-v-vecjo-energijsko-ucinkovitost-in-rabo-obnovljivih-virov-energije-v-stavbah>
- Eko sklad. (2024). *Subvencije za energetska obnovo stavb in vgradnjo toplotnih črpalk*. Pridobljeno z Eko sklad: <https://www.ekosklad.si/prebivalstvo/pridobite-spodbudo/seznam-spodbud/toplotne-crpalke/toplotne-crpalke-subvencija-746>
- European Commission. (2024). *Energy performance of buildings directive*. Pridobljeno z European Commission: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- European Environment Agency. (2024). *Greenhouse gas emissions from energy use in buildings in Europe*. Pridobljenot z European Environment Agency: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy?activeAccordion=ecdb3bcf-bbe9-4978-b5cf-0b136399d9f8>
- Evans, G. W. (2003). The built environment and mental health. *Journal of Urban Health*, 536–555.
- Frontczak, M., & Wargocki, P. (2011). Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 922–937.
- Gehl, J. (2011). *Life Between Buildings: Using Public Space*. Washington, DC: Island Press.

- Gonzalo, R., & Habermann, M. (2006). *Energy-Efficient Architecture: Basics for Planning and Construction*. Basel: Birkhäuser.
- Gustavsson, L., Joelsson, A., & Sathre, R. (2010). Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. *Energy and Buildings*, 230–242. doi:<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2009.08.018>
- International Energy Agency (IEA). (2022). *The Future of Heat Pumps*. Paris: IEA Publications.
- Kibert, C. J. (2016). *Sustainable construction: Green building design and delivery*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Kumar, A., & Rosen, M. A. (2011). A critical review of photovoltaic–thermal solar collectors for air heating. *Applied Energy*, 3603–3614.
- Lechner, N. (2015). *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Lund, J. W., Freeston, D. H., & Boyd, T. L. (2010). Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics*, 159–180.
- Lyons, L., Lecomte, E., Georgakaki, A., Letout, S., & Mountraki, A. (2023). *Clean Energy Technology Observatory: Heat pumps in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/69478
- MBC Business Improvement Solutions. (2025). Belbin test za ocenjevanje vlog v skupini (Dokument pridobljen preko Academia d.o.o.). Epworth, Doncaster, United Kingdom.
- Ministrstvo za okolje in prostor RS. (2022). *Tehnična smernica za graditev TSG-1-004: 2022*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor RS. Pridobljeno z https://www.gov.si/assets/ministrstva/MNVP/Dokumenti/Graditev/TSG-1-004_2022_ure.pdf
- Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo RS. (2021). *Resolucija o Dolgoročni podnebni strategiji Slovenije do leta 2050*. Ljubljana: Uradni list Republike Slovenije. Pridobljeno z <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=RESO131>
- Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo RS. (2024). *Celoviti nacionalni energetske in podnebni načrt (NEPN 2024)*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo RS. Pridobljeno z <https://www.gov.si/novice/2024-12-18-posodobljeni-nacionalni-energetski-in-podnebni-nacrt-z-ambicioznimi-a-realno-izvedljivimi-cilji>
- Nemanič, K. (2023). *Toplotne črpalke: Za 1000 evrov cenejša ogrevanje in topla voda*. Pridobljeno z Delo in dom: <https://deloindom.delo.si/energija-in-okolje/ogrevanje-in-hlajenje/toplotne-crpalke-za-1000-evrov-cenejsa-ogrevanje-in-topla-voda>
- Neufert, E., & Neufert, P. (2012). *Architects' Data (4th ed.)*. Oxford: Wiley-Blackwell.

- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., & ... & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 823–833.
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 710–718.
- Praznik, M., & Zbašnik-Senegačnik, M. (2016). *Trajnostna zasnova energijsko učinkovitih enodružinskih hiš*. Ljubljana: Fakulteta za arhitekturo.
- Röck, M., Saade, M. R., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., & Frischknecht, R. .. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, Art. Nr.: 114107.
- Rosen, M. A., & Koochi-Fayegh, S. (2017). *Geothermal Energy: Sustainable Heating and Cooling Using the Ground*. John Wiley & Sons.
- Scarlat, N., & Fahl, F. (2019). *Heat and power from biomass – Technology development report*. Publications Office. Pridobljeno z <https://data.europa.eu/doi/10.2760/919071>
- Slovenski inštitut za standardizacijo. (2019). *SIST EN ISO 13790, SIST EN 16001, SIST EN 15232*. Pridobljeno z Slovenski inštitut za standardizacijo (SIST): <https://www.sist.si>
- Song, Y., Zhang, Z., & Hui, H. (2024). Interdisciplinary collaborative perspectives: Urban microclimate, urban energy systems, and urban building sectors. *The Innovation*. doi:<https://www.the-innovation.org/article/doi/10.59717/j.xinn-energy.2024.100053>
- Statistični urad Republike Slovenije. (2024). *Cene energentov, 2. četrtletje 2024*. Ljubljana: SURS. Pridobljeno z <https://www.stat.si/StatWeb/news/Index/13073>
- Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo. (2012). *Pasivna hiša 2012*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo. Pridobljeno z https://www.fa.uni-lj.si/filelib/8_konzorcijph/zbornik_2012.pdf
- Uradni list Republike Slovenije. (1999). *Pravilnik o osebni varovalni opremi, ki jo delavci uporabljajo pri delu*. Pridobljeno z Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije (PISRS): <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=DRUG310>
- Uradni list Republike Slovenije. (2005). *Uredba o zagotavljanju varnosti in zdravja pri delu na začasnih in premičnih gradbiščih*. Pridobljeno z Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije (PISRS): <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=URED3783>
- Uradni list Republike Slovenije. (2010). *Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah*. Pridobljeno z Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije (PISRS): <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=PRAV14331>
- Uradni list Republike Slovenije. (2011). *Zakon o varnosti in zdravju pri delu (ZVZD-1), št. 43/2011*. Pridobljeno z Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije (PISRS): <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=ZAKO5537>

- Uradni list Republike Slovenije. (2020). *Zakon o učinkoviti rabi energije (ZUre)*. Pridobljeno z Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije (PISRS): <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=ZAKO8136>
- Uradni list Republike Slovenije. (2021). *Gradbeni zakon (GZ-I)*. Pridobljeno z Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije (PISRS): <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=ZAKO8244>
- Uradni list Republike Slovenije. (2022). *Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah*. Pridobljeno z Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije (PISRS): <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=PRAV14331>
- Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities ‘just green enough’. *Landscape and Urban Planning*, 234–244.
- Yeang, K. (2006). *Ecodesign: A Manual for Ecological Design*. London: Wiley-Academy.
- Yudelson, J. (2016). *Green Building Trends: Europe*. Island Press.
- Zuo, J., & Zhao, Z.-Y. (2014). Green building research—current status and future agenda: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 271–281.

10 PRILOGE

10.1 Načrti in sheme enostanovanjske hiše

10.2 Grafični prikazi energetske učinkovitosti stavbe

10.3 Tehnične specifikacije toplotne črpalke z zemeljskim kolektorjem

10.4 Izkaz energijskih lastnosti stavbe iz PZI dokumentacije