

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE STAVBARSTVO

Ljubljana, 2024

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

MATJAŽ KRAVANJA

**VPLIV TOPLOTNE MASE STAVBNEGA OVOJA NA
TOPLOTNI ODZIV ENODRUŽINSKE HIŠE V
ZNAČILNIH PODNEBJIH SLOVENIJE**

Magistrsko delo št.:

**THE IMPACT OF THE THERMAL MASS OF THE
BUILDING ENVELOPE ON THE THERMAL RESPONSE
OF A SINGLE-FAMILY HOUSE IN CHARACTERISTIC
CLIMATES OF SLOVENIA**

Graduation – Master Thesis No.:

Mentor/-ica:

izr. prof. dr. Mitja Košir

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil mentorju dr. Mitji Koširju za posvečen čas, nasvete in strokovno pomoč pri izdelavi magistrske naloge.

Zahvaljujem se tudi svoji družini, puncu in prijateljem, ki so verjeli vame in mi nudili podporo ter potrpežljivost v času študija in pisanja magistrske naloge.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	699.86:728.3(497.4)(043.3)
Avtor:	Matjaž Kravanja, dipl. inž. grad. (UN)
Mentor:	izr. prof. dr. Mitja Košir
Naslov:	Vpliv toplotne mase stavbnega ovoja na toplotni odziv enodružinske hiše v značilnih podnebjih Slovenije
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	83 str., 34 pregl., 11 sl., 8 graf., 4 en., 1 pril., 62 vir.
Ključne besede:	toplotna masa, toplotni odziv, stavbni ovoj, EnergyPlus, model adaptivnega toplotnega udobja

Izvleček

V magistrski nalogi smo s pomočjo programskega orodja EnergyPlus analizirali toplotni odziv enodružinske stanovanjske stavbe z različno toplotno maso stavbnega ovoja v treh značilnih podnebjih Slovenije. Rezultate analiz toplotnega odziva računskih modelov stavb s štirimi variantami stavbnega ovoja smo vrednotili na podlagi metode adaptivnega toplotnega udobja po standardu SIST EN 16798-1 in na podlagi poteka notranjih temperatur.

V drugem delu naloge smo izvedli občutljivostno analizo ključnih vplivnih parametrov povezanih z zasnovo stavbnega ovoja in notranjosti stavbe. Preverjali smo vpliv masivnih notranjih sten, intenzitete nočnega prezračevanja, toplotne mase toplotne izolacije, faktorja solarne absorptivnosti notranjih površin in toplotne mase talnih oblog.

Rezultati analiz so pokazali pomemben vpliv toplotne mase na toplotni odziv stavb. Ugotovili smo, da je toplotna masa izjemnega pomena tako za trajanje toplotnega udobja kot za potek notranjih temperatur, ki pa sta med seboj neposredno povezana. Pomembnost uporabe masivnega stavbnega ovoja še posebej velja za topli del leta in toplejša podnebja, kjer se razlike med masivnimi ovoji in lahko varianto povečujejo.

Najboljše rezultate je dosegla varianta stavbnega ovoja, ki predstavlja kombinacijo visoke toplotne mase in nizke toplotne prehodnosti stavbnega ovoja. Od lahke variante z nizko toplotno prehodnostjo, ki je imela najslabši toplotni odziv, je bila v dveh od treh analiziranih podnebij boljša za 20 odstotnih točk. Iz rezultatov občutljivostne analize ključnih parametrov stavbnega ovoja in notranjosti stavbe, ki imajo vpliv na toplotno maso oz. njeno delovanje, smo ugotovili, da je lahek stavbni ovoj veliko bolj občutljiv na spremembe v zasnovi stavbe. Pri lahkem stavbnem ovoju imajo ukrepi, ki povečajo toplotno maso, pozitiven vpliv na toplotni odziv. Pri masivnejših stavbnih ovojih pa je vpliv prilagoditev z izjemo intenzitete nočnega prezračevanja zanemarljiv.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 699.86:728.3(497.4)(043.3)
Author: Matjaž Kravanja, B. Sc. (UN)
Supervisor: Assoc. Prof. Mitja Košir, ph. D.
Title: The impact of the thermal mass of the building envelope on the thermal response of a single-family house in characteristic climates of Slovenia
Document type: Master thesis
Notes: 83 p., 34 tab., 11 fig., 8 graph., 4 eq., 1 ann., 62 ref.
Keywords: thermal mass, thermal response, building envelope, EnergyPlus, adaptive thermal comfort model

Abstract

In this master's thesis, we utilized the EnergyPlus software tool to analyse the thermal response of a single-family residential building with different thermal mass in the building envelope across three characteristic climates of Slovenia. The results of the thermal response analyses of building models with four variants of the building envelope were evaluated based on the adaptive thermal comfort model according to the standard SIST EN 16798-1 and the internal temperature profiles.

In the second part of the thesis, we conducted a sensitivity analysis of key influencing parameters related to the design of the building envelope and the interior of the building. We examined the influence of massive internal walls, the intensity of night-time ventilation, the thermal mass of thermal insulation, the solar absorptivity factor of internal surfaces, and the thermal mass of floor coverings.

The analysis showed a significant impact of thermal mass on the thermal response of buildings. We found that thermal mass is crucial for both the duration of thermal comfort and the internal temperature profiles, which are directly interconnected. The importance of using a massive building envelope is particularly pronounced during the warmer part of the year and in warmer climates, where differences between massive and lightweight variants become more apparent. The variant of the building envelope that combines high thermal mass and low thermal transmittance achieved the best results. It was better than the lightweight variant with low thermal transmittance, which had the poorest thermal response by 20 percentage points in two out of three analysed climates.

From the results of the sensitivity analysis of key parameters influencing the thermal mass or its operation, we concluded that a lightweight building envelope is much more sensitive to changes in the building design. For lightweight building envelopes, measures that increase thermal mass positively impact thermal response. The influence of adjustments, except for nighttime ventilation, is negligible for more massive building envelopes.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO

POPRAVKI – ERRATA.....	I
ZAHVALA.....	III
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VII
KAZALO SLIK.....	XI
KAZALO PREGLEDNIC	XIII
KAZALO GRAFIKONOV.....	XV
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS.....	XVII
SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK.....	XIX
1 UVOD	1
1.1 Analizirana tema in namen	2
1.2 Cilji in hipoteze.....	3
2 TEORETIČNE OSNOVE IN METODE	5
2.1 Izbira modela za vrednotenje toplotnega udobja.....	6
2.1.1 Model adaptivnega toplotnega udobja.....	6
2.1.2 Analiza poteka notranjih temperatur.....	9
2.2 Lokacija in podnebje.....	9
2.3 Računski model stavbe	11
2.3.1 Geometrijska zasnova stavbe.....	11
2.3.2 Tipi stavbnega ovoja.....	13
2.3.3 Zasnova konstrukcijskih sklopov stavbnih ovojev	14
2.3.3.1 Tla na terenu.....	14
2.3.3.2 Zunanja stena	15
2.3.3.2.1 Varianta 1.....	15
2.3.3.2.2 Varianta 2.....	16
2.3.3.2.3 Varianta 3.....	17
2.3.3.2.4 Varianta 4.....	19
2.3.3.3 Ravna streha.....	19
2.3.3.3.1 Varianta 1.....	19
2.3.3.3.2 Varianta 2.....	20
2.3.3.3.3 Varianta 3.....	21
2.3.3.3.4 Varianta 4.....	21
2.3.3.4 Notranje stene	22
2.3.4 Stavbno pohištvo.....	23
2.3.4.1 Okna.....	23
2.3.4.2 Senčila.....	24
2.3.4.3 Vrata.....	25
2.3.5 Parametri notranjega okolja	25
2.3.5.1 Notranji toplotni viri	25
2.3.5.2 Prezračevanje	26
2.4 Študija občutljivosti vhodnih podatkov	28

2.5	Programska orodja.....	30
2.5.1	DesignBuilder	30
2.5.2	EnergyPlus	30
2.5.3	Ubakus	30
2.5.4	WINDOW	31
3	REZULTATI.....	33
3.1	Toplotni odziv in toplotno udobje na podlagi modela adaptivnega toplotnega udobja ...	33
3.1.1	Toplotno udobje v času uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja glede na standard SIST EN 16798-1	34
3.1.2	Vpliv podnebnih tipov na toplotni odziv variant stavbnega ovoja.....	38
3.2	Analiza poteka notranjih temperatur.....	39
3.3	Rezultati občutljivostne analize.....	45
3.3.1	Vpliv toplotne mase notranjih sten.....	45
3.3.2	Vpliv intenzitete nočnega prezračevanja.....	48
3.3.3	Vpliv toplotne mase toplotne izolacije.....	52
3.3.3.1	Vpliv pozicije toplotne izolacije z visoko toplotno maso.....	54
3.3.4	Vpliv spremembe solarne absorptivnosti notranjih površin.....	55
3.3.5	Vpliv različnih vrst talnih oblog.....	58
4	RAZPRAVA.....	63
4.1	Toplotni odziv po metodi adaptivnega toplotnega udobja.....	63
4.2	Vloga različnih podnebij pri toplotnem odzivu	65
4.3	Potek notranjih temperatur.....	66
4.4	Občutljivostna analiza.....	67
4.4.1	Masivne notranje stene.....	68
4.4.2	Nočno prezračevanje.....	68
4.4.3	Toplotna izolacija z visoko toplotno kapaciteto.....	70
4.4.3.1	Vpliv pozicije toplotne izolacije v konstrukcijskem sklopu.....	71
4.4.4	Faktor solarne absorptivnosti notranjih površin.....	71
4.4.5	Talne obloge.....	72
4.4.6	Kombinacija ukrepov	72
5	ODGOVORI NA HIPOTEZE	75
6	ZAKLJUČEK	77
VIRI		79

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz strukture poglavja Teoretične osnove in metode.	5
Slika 2: Optimalna operativna temperatura v odvisnosti od notranje operativne temperature in od tekočega dnevnega povprečja temperature zunanjega zraka. Vir: [16].	8
Slika 3: Značilna podnebja Slovenije po Köppen-Geigerjevi podnebni klasifikaciji s tipičnimi lokacijami. Vir: [25].	10
Slika 4: Tloris stavbe. Vir: [28].	12
Slika 5: Računski 3D model stavbe, izdelan s programskim orodjem DesignBuilder.	12
Slika 6: Grafični prikaz posameznih variant stavbnega ovoja.	14
Slika 7: Tipična sestava zunanje stene pri Slovenskih ponudnikih montažnih lesenih hiš. Vir: [33]. ..	15
Slika 8: Opečnat zidak Poroton T16. Vir [34].	16
Slika 9: Izgled butane zemlje omogoča uporabo vidnih konstrukcijskih elementov. Vir [35].	18
Slika 10: Grafični prikaz dinamičnega predikativnega modela izolativnosti obleke na podlagi zunanjih temperatur zraka izmerjenih ob 6.00. Vir [19].	26
Slika 11: Legenda barvnih slogov. Legenda velja za vse preglednice v poglavju 3.3.	45

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Maksimalne dovoljene toplotne prehodnosti konstrukcijskih elementov toplotnega ovoja.....	14
Preglednica 2: Sestava in značilnosti konstrukcijskega sklopa tla na terenu. Vir:[32].....	15
Preglednica 3: Sestava in značilnosti konstrukcijskega sklopa zunanja stena varianta 1. Vir:[32].....	16
Preglednica 4: Sestava in značilnosti konstrukcijskega sklopa zunanja stena varianta 2. Vir:[32].....	17
Preglednica 5: Primerjava fizikalnih lastnosti butane zemlje, naravnega kamna (apnenca) in armiranega betona. Vir: Ubakus.	17
Preglednica 6: Sestava konstrukcijskega sklopa zunanja stena, varianta 3. Vir:[32].	18
Preglednica 7: Sestava konstrukcijskega sklopa zunanja stena, varianta 4. Vir:[32].	19
Preglednica 8: Sestava konstrukcijskega sklopa ravna streha, varianta 1. Vir:[32].	20
Preglednica 9: Sestava konstrukcijskega sklopa ravna streha, varianta 2. Vir:[32].	20
Preglednica 10: Sestava konstrukcijskega sklopa ravna streha, varianta 3. Vir:[32].	21
Preglednica 11: Sestava konstrukcijskega sklopa ravna streha, varianta 4. Vir:[32].	22
Preglednica 12: Sestava konstrukcijskega sklopa notranja stena. Vir:[32].	23
Preglednica 13: Vrednost parametrov oken. Izračun izveden s programom WINDOW [56].	23
Preglednica 14: Notranji viri povzeti iz aneksa C standard SIST EN 16798-1. Vrednosti za stanovanjsko stavbo – enodružinsko hišo. Viri: [16],[40].	25
Preglednica 15: Parametri prezračevanja. Vir: [16], [44].	26
Preglednica 16: Primerjava lastnosti toplotno izolacijskih materialov osnovnih variant in lesenih vlaken. Gostote izolacij iz lesenih vlaken variirajo med 70 in 270 kg/m ³ . Izbere se srednjo vrednost. Vir: [32].	29
Preglednica 17: Vrste in lastnosti talnih oblog, ki jih bomo analizirali. Vir [32],[53],[54],[55]. Pri parketu je emisivnost odvisna od vrste lesa in tipa obdelave. Izbere se povprečna vrednost.	30
Preglednica 18: Prikaz časa v urah in odstotkih po posameznih lokacijah, ko je model adaptivnega toplotnega udobja po standardu SIST EN 16798-1 uporaben (T_{rm} je med 10 °C in 30 °C).	33
Preglednica 19: Rezultati analize toplotnega odziva osnovnih variant stavbnega ovoja, izraženi v času in odstotkih, ko je v času uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja doseženo toplotno udobje.	34
Preglednica 20: Primerjava toplotnega odziva štirih osnovnih variant stavbnega ovoja v času uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja in skozi celotno leto. Toplotno udobje je izraženo v odstotkih, ko je v posameznem obdobju doseženo toplotno udobje glede na model adaptivnega toplotnega udobja.	38
Preglednica 21: Prikaz projektnih dni in pripadajočih ekstremnih temperatur glede na vremenske podatke v obdobju 2009–2021.	39

Preglednica 22: Nihanja notranje operative temperature v °C za posamezne variante stavbnega ovoja na različne projektne dni in lokacije.....	43
Preglednica 23: Prikaz vrednosti mediane dnevnih notranjih operativnih temperatur za posamezne variante stavbnega ovoja na različne projektne dni in lokacije.	44
Preglednica 24: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v odstotnih točkah in sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur ob uporabi masivnih notranjih sten. V Ljubljani odstotek spremembe trajanja toplotnega udobja predstavlja 44,4 ur, v Portorožu 53,5 ur, v Ratečah pa 25,9 ur. Legenda je prikazana na sliki 11.	46
Preglednica 25: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja izraženih v odstotnih točkah za različne stopnje nočnega prezračevanja 0,7–14 h ⁻¹ . Legenda je prikazana na sliki 11.	49
Preglednica 26: Prikaz sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur za različne stopnje nočnega prezračevanja: 0,7–3 h ⁻¹ . Legenda je prikazana na sliki 11.....	50
Preglednica 27: Prikaz sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur za različne stopnje nočnega prezračevanja: 4–14 h ⁻¹ . Legenda je prikazana na sliki 11.....	51
Preglednica 28: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v odstotnih točkah in sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur ob uporabi toplotne izolacije iz lesenih vlaken. Legenda je prikazana na sliki 11.	53
Preglednica 29: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v odstotnih točkah v odvisnosti od pozicije toplotne izolacije iz lesenih vlaken znotraj konstrukcijskega sloja. Analiza je izvedena v Ljubljani. Legenda je prikazana na sliki 11.....	55
Preglednica 30: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v odstotnih točkah in sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur pri visoki vrednosti faktorja solarne absorptivnosti notranjih površin, $\alpha = 0,8$. Legenda je prikazana na sliki 11.	56
Preglednica 31: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v odstotnih točkah in sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur pri nizki vrednosti faktorja solarne absorptivnosti notranjih površin, $\alpha = 0,2$. Legenda je prikazana na sliki 11.	57
Preglednica 32: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja izraženih v odstotnih točkah pri uporabi različnih talnih oblog. Legenda je prikazana na sliki 11.....	58
Preglednica 33: Prikaz sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur pri uporabi preproge. Legenda je prikazana na sliki 11.	60
Preglednica 34: Prikaz prilagoditev osnovnega modela variante 1.....	72

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primerjava trajanja toplotnega udobja pri različnih variantah stavbnega ovoja po metodi adaptivnega toplotnega udobja za Ljubljano, Portorož in Rateče.	35
Grafikon 2: Prikaz poteka notranjih operativnih temperatur različnih variant stavbnega ovoja na poletni projektni dan v Ljubljani, Portorožu in Ratečah.	40
Grafikon 3: Prikaz poteka notranjih operativnih temperatur različnih variant stavbnega ovoja na tipični projektni dan v Ljubljani, Portorožu in Ratečah.	41
Grafikon 4: Prikaz poteka notranjih operativnih temperatur različnih variant stavbnega ovoja na zimski projektni dan v Ljubljani, Portorožu in Ratečah.	42
Grafikon 5: Prikaz spremembe poteka notranjih operativnih temperatur pri uporabi masivnih notranjih sten na poletni projektni dan v Ljubljani.	47
Grafikon 6: Prikaz poteka notranjih operativnih temperatur pri povečanju intenzitete nočnega prezračevanja na 7 h^{-1} v primerjavi s 4 h^{-1} . Potek notranjih operativnih temperatur je prikazan za poletni projektni dan v Portorožu.	52
Grafikon 7: Prikaz spremembe poteka notranjih operativnih temperatur pri uporabi toplotne izolacije iz lesenih vlaken na poletni projektni dan v Ljubljani.	54
Grafikon 8: Prikaz spremembe poteka notranjih operativnih temperatur pri uporabi preproge na poletni projektni dan v Portorožu.	61

»Ta stran je namenoma prazna.«

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

Simboli:

T_{op}	operativna temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
T_{rm}	tekoče sedemdnevno povprečje zunanjih temperatur zraka suhega termometra [$^{\circ}\text{C}$]
α	konstanta z vrednostjo med 0 in 1
T_{com}	optimalna notranja operativna temperatura, pri kateri je doseženo toplotno udobje [$^{\circ}\text{C}$]
U-faktor	Toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa, ki nam pove, koliko toplote preide v časovni enoti skozi površino 1 m^2 konstrukcije ob razliki temperatur zraka na obeh straneh konstrukcije 1 K [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
g-faktor	Prepustnost zasteklitve za celoten sončni spekter
LT faktor	Prepustnost zasteklitve za vidni del sončnega spektra.
ΔT_{OP}	Razlika med najvišjo in najnižjo notranjo dnevno operativno temperaturo [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{OP\text{ MEAN}}$	Mediana dnevne notranje operativne temperature [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{OP\text{ MAX}}$	Najvišja notranja dnevna operativna temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{OP\text{ MIN}}$	Najnižja notranja dnevna operativna temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

Okrajšave:

IEA	<i>angl.</i> International Energy Agency – Mednarodna agencija za energijo
PMV	<i>angl.</i> Predicted Mean Vote – indeks pričakovane presoje toplotnega udobja
PPD	<i>angl.</i> Predicted Percentage of Dissatisfied – odstotek skupine ljudi, ki občuti dano okolje kot prevroče ali prehladno
EPW	<i>angl.</i> EnergyPlus Weather File – vremenska / podnebna datoteka
WFR	<i>angl.</i> Window to Floor Ratio – razmerje med skupno površino zastekljenih odprtih in uporabno tlorisno površino prostora
WWR	<i>angl.</i> Window to Wall Ratio – razmerje med skupno površino zastekljenih odprtih in površino zunanje stene v kateri so vgrajene
ACH	<i>angl.</i> Air changes per hour – število izmenjav volumna zraka na uro

»Ta stran je namenoma prazna.«

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Toplotna masa (stavbnega ovoja) oziroma toplotna kapaciteta – lastnost mase stavbnega ovoja, ki omogoča shranjevanje toplotne energije v stavbnem ovoju in povečuje temperaturno stabilnost notranjega okolja.

Prosti tek (stavbe) – obdobje, v katerem stavba deluje brez aktivnih sistemov ogrevanja ali hlajenja, ki za delovanje rabijo energijo

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Glavni namen gradnje stavb je zaščititi njene uporabnike pred spremenljivimi vplivi v okolici, predvsem v atmosferi ter jim omogočiti udobno bivanje. Ljudje tako že od pojava gradnje same gradijo stavbe z namenom ločevanja notranjega okolja od zunanjega. Namen stavbnega ovoja, ki služi kot pregrada med zunanjim in notranjim okoljem kljub temu v večini primerov ni popolna izolacija obeh okolij, temveč zmanjšanje razlik med zunanjimi atmosferskimi pogoji in notranjimi pogoji, ki so ugodni za bivanje [1], [2]. Stavbni ovoj tako omogoča komunikacijo med zunanjim in notranjim okoljem na podlagi prenosa energije, snovi in informacij. Nivo izolacije oziroma zmanjšanja razlik med zunanjimi in notranjimi pogoji pa je odvisen od posameznih parametrov (zahtev) notranjega okolja. Notranje okolje želimo povsem izolirati od vplivov, ki škodijo zdravju, hkrati pa omogočiti komunikacijo parametrov, ki omogočajo udobno bivanje [2].

Danes ljudje v urbanem okolju povprečno v stavbah preživimo 86,9 % časa in kar 68,7 % v stanovanjskih stavbah [3]. V notranjem okolju hočemo tako doseči ugodne razmere za bivanje in s tem zagotoviti udobje uporabnikov. Udobje je definirano kot: stanje, za katero je značilen obstoj materialnih dobrin, ki zadovoljujejo potrebe povprečnega človeka po ugodju [4]. Ganesh *et al.* [5] so pri pregledu literature o faktorjih, ki vplivajo na udobje uporabnikov v stavbah ugotovili, da raziskave s tega področja kažejo, da je udobje v tem pomenu zelo kompleksen pojem, ki ga sestavljajo tako fizični, kot tudi socialno psihološki faktorji. V glavnem delimo notranje okolje v stavbah na akustično, toplotno in vizualno okolje, zelo pomembno vlogo pa imata tudi kvaliteta notranjega zraka in ergonomija prostora. Študije na tem področju so dokazale veliko povezanost med posameznimi področji in velik vpliv notranjega okolja na psihofizično zdravje uporabnikov, njihovo udobje in produktivnost. Kljub temu pa kot kaže različna literatura (Košir [2], Ganesh *et al.* [5]) stroka za najpomembnejše področje notranjega okolja izpostavlja toplotno okolje za kar obstajata dva glavna razloga in sicer vpliv na zdravje uporabnikov ter vpliv na zasnovo stavb.

Toplotno udobje temelji na toplotni zaznavi človeka, ki je odvisna od toplotne bilance človeškega telesa. Toplotna bilanca človeškega telesa je proces termoregulacije s katerim telo vzdržuje stalno temperaturo jedra telesa $36,5 \pm 1$ °C [6]. Toplotna bilanca je odvisna od človeških (internih) in okolijskih (eksternih) parametrov. Človeški parametri so metabolizem, stopnja obleke in individualne značilnosti, kot so spol, zdravstveno stanje, itd. Med okolijske parametre pa sodijo temperatura zraka, srednja sevalna temperatura okolice, hitrost gibanja zraka in vlažnost zraka (ISO 7730 [7]). Telo tako doseže toplotno ravnovesje na podlagi človeških dejavnikov, kjer nastaja toplota s pomočjo termogeneze (procesi presnove in kemične reakcije v telesu) in s pomočjo obleke, ki služi kot izolacija. Hkrati pa ves čas poteka izmenjava toplote z okolico na podlagi kondukcije, konvekcije in radiacije, kjer telo toploto prejema ali oddaja [8]. V kolikor človeško telo ne more vzdrževati stalne temperature telesa, lahko pride do poslabšanja zdravstvenega stanja in v najhujšem primeru do smrti, kar je prvi razlog za veliko pomembnost toplotnega udobja v stavbah.

Drugi razlog zakaj je toplotno okolje tako pomembno pa je, da ima od vseh področij notranjega okolja v splošnem največji vpliv na zasnovo stavb. Kot izpostavljajo Ganesh *et al.* [5] sta najpomembnejša faktorja toplotnega okolja temperatura in hitrost gibanja zraka. Vseeno pa je v večini primerov stavb pomen temperature zraka večji, saj je pri vplivu gibanja zraka v večini primerov ključno le, da ga omejimo na hitrosti manjše od 0,5 m/s. Optimalno notranjo temperaturo pa lahko dosežemo z aktivnimi ali pasivnimi ukrepi, ki so ključni pri zasnovi stavb in imajo direkten vpliv na rabo energije v stavbah.

Aktivni in pasivni ukrepi se med seboj ne izključujejo, temveč so komplementarni. Razlika je le v viru energije potrebne za delovanje.

Aktivni ukrepi so tisti, ki za delovanje rabijo energijo (ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, razsvetljava, itd.). Zadnja analiza, ki jo je izvedla Evropska komisija leta 2020 [9] namreč kaže, da stavbe v Evropi porabijo kar 40 % vse proizvedene energije. Glavni porabniki pa so ogrevanje, hlajenje in razsvetljava. Problematika rabe energije in negativnih vplivov na okolje pa je v zadnjem času ena najaktualnejših tem. Večino energije se namreč še vedno proizvede iz fosilnih in neobnovljivih virov energije, pri rabi katerih v večini primerov prihaja do izpustov toplogrednih plinov. Hkrati gre za energente, katerih zaloga naglo kopni. Po podatkih Eurostata je bilo leta 2021 kar 68,4 % vse energije v Evropski uniji proizvedene iz neobnovljivih virov, 12,7 % iz jedrskih virov in le 17,4% iz obnovljivih virov energije [10]. Svetovno povprečje je po podatkih Mednarodne agencije za energijo (IEA) še bistveno slabše [11]. Toplogredni plini pa imajo negativen vpliv na okolje in človeško zdravje. So namreč glavni povzročitelj segrevanja ozračja, ki smo mu priča v zadnjih desetletjih, in vseh njegovih negativnih posledic. IEA v prihodnosti na podlagi različnih scenarijev napoveduje še višjo rabo energije. Številne države, med drugimi tudi države Evropske unije, so se v luči negativnih vplivov rabe neobnovljivih virov in negativnih napovedi za prihodnost že zavezale k zmanjšanju rabe energije. Na tem mestu pa pri stavbah igrajo ključno vlogo pasivni ukrepi, ki predstavljajo drugo možnost, kako doseči ugodno toplotno okolje.

Pasivni oz. bioklimatski ukrepi so načrtovalski pristop, pri katerem se stavba tako kot celota, kot tudi njeni posamezni elementi, oblikujejo na takšen način, da omogočajo čim večje izkoriščanje danosti lokacije za zagotavljanje primerne notranjega bivalnega okolja. V širšem pogledu so del strategije načrtovanja stavb, ki ji pravimo bioklimatsko načrtovanje. Gre za holističen proces načrtovanja stavb, kjer se pri zasnovi stavb zasnujejo pasivni oz. bioklimatski ukrepi na nivoju stavbe, ki upoštevajo podnebni, tehnološki in sociološki kontekst z namenom zagotavljanja udobja uporabnikov in doseganja čim nižje rabe energije v stavbi [12]. Ne gre torej le za strategijo nižanja rabe energije, ampak na prvem mestu za doseganje udobja uporabnikov, ki je, kot je bilo omenjeno na začetku, v stavbah najpomembnejše. Bioklimatsko načrtovanje je danes tako temelj večine strategij za zmanjšanje rabe energije v stavbah in doseganje udobja uporabnikov. Evropska unija je s ciljem zmanjšanja rabe energije v stavbah predpisala Direktiva (EU) 2018/844 Evropskega parlamenta in sveta o energijski učinkovitosti stavb [13]. Direktiva v svojem prvem členu navaja osnove bioklimatskega načrtovanja kot temelj svoje strategije.

1.1 Analizirana tema in namen

Ob omenjenem se postavlja vprašanje, kako s pomočjo pasivnih oz. bioklimatskih načrtovalskih ukrepov na nivoju stavbe zagotoviti čim večje toplotno udobje in hkrati čim nižjo rabo energije oziroma, kateri pasivni načrtovalski ukrepi so učinkovitejši. Pasivnih načrtovalskih ukrepov poznamo veliko, definirajo pa jih bioklimatske načrtovalske strategije. Kljub že omenjeni kompleksnosti področja, pa kot ugotavlja Košir [2], obstajajo le štiri bioklimatske strategije. Strategiji zadrževanja in zajemanja toplote, ki omogočata pasivno ogrevanje ter izključevanje in odvajanje toplote, ki omogočata pasivno hlajenje. Pasivnih načrtovalskih ukrepov, ki so primerni za izvajanje vseh štirih možnih bioklimatskih strategij pa je bistveno manj. Eden od takih ukrepov je visoka toplotna masa stavbnega ovoja.

Toplotna masa stavbnega ovoja ima velik vpliv na toplotno kapaciteto, ki omogoča skladiščenje toplote, s tem pa zmanjšanje dnevnega periodičnega nihanja notranjih temperatur ob delovanju zunanjih

podnebnih vplivov (zunanje temperature in sončno sevanje). Gre za najosnovnejši izmed pasivnih načrtovalskih ukrepov na nivoju stavbnega ovoja in ima direkten vpliv na toplotni odziv stavbe. Toplotna masa stavbnega ovoja je namreč močno pogojena z izbiro nosilne konstrukcije, ki je ključni del vsake stavbe in se posledično določi v začetnih fazah načrtovanja predvsem z izborom materiala in sistema nosilne konstrukcije. V splošnem stavbe delimo na lahke endoskeletne z majhno toplotno maso in masivne eksoskeletne stavbe z veliko toplotno maso. Prva vrsta stavbnega ovoja omogoča hiter odziv na spreminjanje zunanjih temperaturnih pogojev, medtem ko druga vrsta omogoča akumulacijo toplote in počasen odziv na spremembe, kar omogoča bolj konstantne razmere v notranjosti. Kuczynski in Staszczuk [14] sta pri analizi toplotnega odziva stanovanjskih stavb z različno toplotno maso stavbnega ovoja v zmernem podnebj ugotovila, da poleti masivna stavba porabi do 75 % manj energije za hlajenje. Hkrati pa ima večja masa tudi pozitiven vpliv na toplotno okolje, saj so bile notranje temperature pri masivni stavbi nižje. Ob pregledu literature ugotovimo, da je pasivna strategija toplotne mase stavbnega ovoja kljub pomembnosti relativno slabo raziskana. Na eni strani je sicer dobro raziskan vpliv toplotne mase pri preprečevanju pregrevanja v stavbah, na drugi strani pa je manj analiz izvedenih za hladen del leta. Poleg tega je večina obstoječih analiz izvedenih na podlagi primerjave energije potrebne za hlajenje in ogrevanje, manj raziskav pa je narejenih na podlagi analiz toplotnega udobja. V tem magistrskem delu bomo tako analizirali vpliv pasivne strategije stavbnega ovoja z visoko toplotno maso pri zagotavljanju primerne toplotnega udobja.

Učinkovitost posameznih pasivnih načrtovalskih ukrepov je v veliki meri odvisna od podnebnih danosti lokacije. Enako velja tudi za pasivno strategijo stavbnega ovoja z visoko toplotno maso. Strazzeri in Karrech [15] sta analizirala toplotni odziv masivnih stavb iz butane zemlje z dodatkom toplotno izolativnih materialov v različnih podnebjih zahodne Avstralije. Rezultati so pokazali velika odstopanja med različnimi podnebj in tudi različne rezultate glede na dodane materiale. Pri analizi se bomo osredotočili na značilna podnebja Slovenije, saj je bilo do sedaj na to temo pri nas narejenih malo raziskav.

Namen magistrskega dela je tako ugotoviti razliko med toplotnim odzivom enodružinske stanovanjske stavbe z različno toplotno maso stavbnega ovoja v različnih podnebjih Slovenije. V treh značilnih podnebjih Slovenije bomo na podlagi modela adaptivnega toplotnega udobja iz standarda SIST EN 16798-1 [16] in časovnega poteka notranjih temperatur analizirali toplotni odziv modela enodružinske hiše s štirimi različnimi variantami stavbnega ovoja. V drugem delu naloge bomo izvedli občutljivostno analizo ključnih vplivnih parametrov povezanih z zasnovo stavbnega ovoja. Za izvedbo analiz bo uporabljeno programsko orodje EnergyPlus [17]. Na območju Slovenije bo to sploh prva analiza, ki bo direktno primerjala toplotni odziv stavb z različno toplotno maso stavbnega ovoja skozi celotno leto in vpliv na toplotno udobje uporabnikov.

1.2 Cilji in hipoteze

V sklopu tega magistrskega dela smo si zastavili naslednje raziskovalne cilje:

- 1.) Na podlagi posplošenega modela enodružinske stanovanjske stavbe določiti toplotni odziv stavb s štirimi različnim tipi stavbnega ovoja.
- 2.) Določiti razlike v toplotnem odzivu na podlagi modela adaptivnega toplotnega udobja in analize časovnega poteka notranjih temperatur.
- 3.) Določiti vpliv različnih slovenskih tipov podnebja na toplotni odziv posameznih variant stavbnega ovoja.

- 4.) Izvesti občutljivostno analizo vhodnih podatkov, ki vplivajo na toplotni odziv analiziranih zasnov stavb.
- 5.) Na podlagi rezultatov analiz podati priporočila za optimalno zasnovo stavbnega ovoja enodružinskih stanovanjskih stavb v kontekstu analiziranih podnebij ter z vidika toplotnega udobja.

Na podlagi raziskovalnih ciljev in rezultatov, ki jih pričakujemo, smo zastavili sledeči hipotezi:

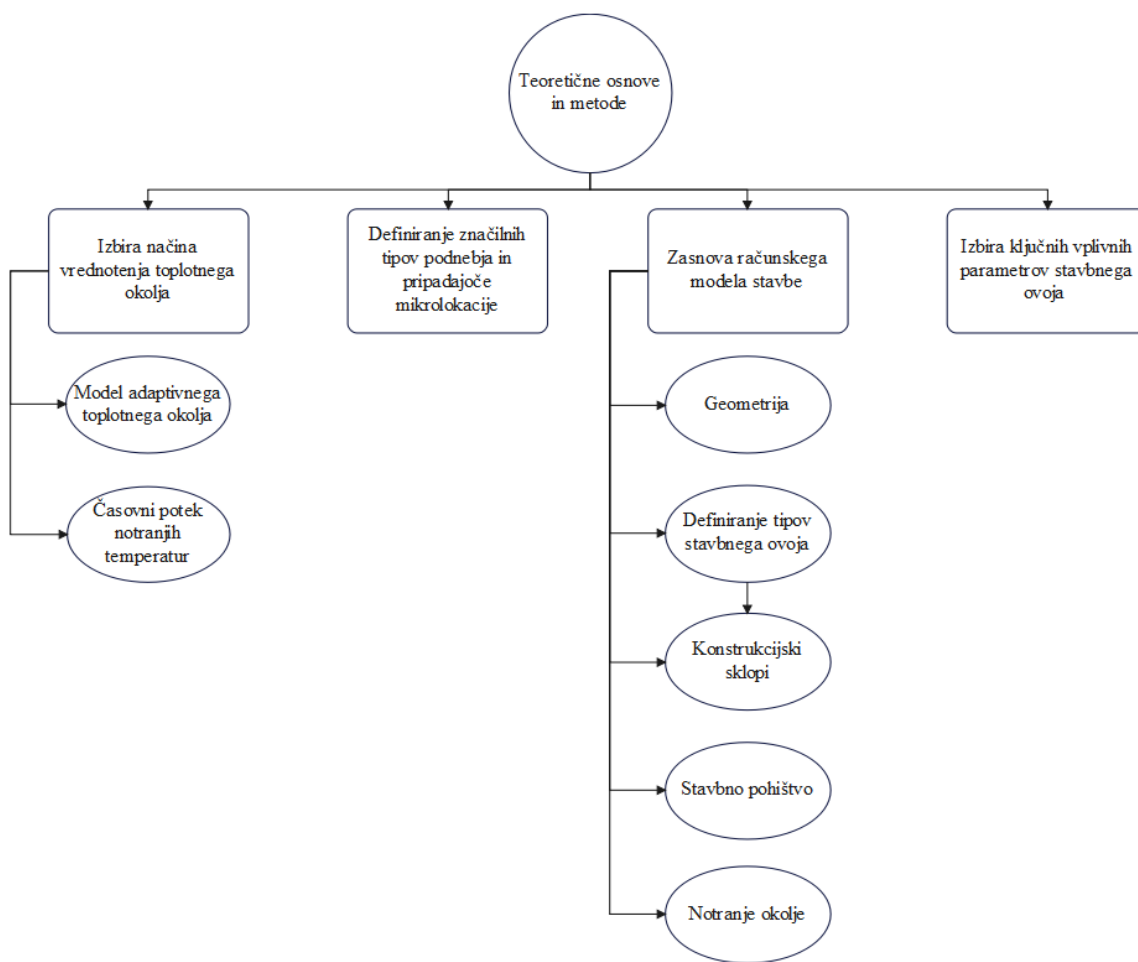
- 1.) Za vse analizirane podnebne lokacije v Sloveniji bo najdaljše trajanje notranjega toplotnega udobja na podlagi modela adaptivnega toplotnega udobja v prostem teku stavbe doseženo pri uporabi stavbnega ovoja z visoko toplotno maso in nizko toplotno prehodnostjo.
- 2.) Vpliv toplotne mase stavbnega ovoja na doseganje notranjega toplotnega ugodja v stavbi v prostem teku bo bolj izrazit v toplejšem podnebj.

2 TEORETIČNE OSNOVE IN METODE

V sklopu poglavja teoretične osnove in metode je za potrebe izvedbe predvidene analize potrebno:

- 1.) Izbrati način vrednotenja toplotnega okolja.
- 2.) Definirati značilna podnebja Slovenije in izbrati tipične pripadajoče mikrolokacije, kjer bomo izvedli analize.
- 3.) Zasnovati računski model enodružinske stanovanjske stavbe.
- 4.) Določiti ključne vplivne parametre stavbnega ovoja in notranjosti stavbe, ki imajo pomembno vlogo pri toplotnem odzivu stavbe, s pomočjo katerih se bo izvedla občutljivostna analiza.

Struktura poglavja je shematsko prikazana na sliki 1.



Slika 1: Shematski prikaz strukture poglavja Teoretične osnove in metode.

2.1 Izbira modela za vrednotenje toplotnega udobja

Da lahko izvedemo predvidene analize, rezultati pa imajo na koncu univerzalni pomen, moramo najprej razumeti in definirati način vrednotenja toplotnega udobja. Toplotno okolje namreč sestavlja veliko parametrov. Ti se med seboj povezujejo in tvorijo različne sumarne klimatske indekse, na podlagi katerih lahko ocenimo toplotno udobje. V splošnem obstajata dva pristopa vrednotenja toplotnega udobja [2]:

- 1.) Fiziološki, deterministični pristop. Toplotno udobje se definira na podlagi razmerij med različnimi okoljskimi in človeškimi parametri. V tem primeru se predpostavi, da so parametri toplotnega okolja konstantni, udobje pa je doseženo, ko je toplotna bilanca človeškega telesa enaka 0 [2]. Na podlagi tega pristopa toplotno udobje definirata standarda ISO 7730 [7] in ASHRAE 55 [18]. Oba za določitev toplotnega udobja predpisujeta uporabo PMV (*angl.* Predicted Mean Vote) in PPD (*angl.* Predicted Percentage Dissatisfied) indeksov. PMV indeks temelji na toplotnem ravnotežju človeškega telesa, kjer je proizvodnja toplote enaka oddaji. PPD indeks pa je odstotek skupine ljudi, ki občuti okolje kot prevroče ali prehladno in je močno odvisen od PVM indeksa. Oba se določi z uporabo preglednic [7] osnovanih na obsežnih laboratorijskih eksperimentih. Metoda je primerna za stavbe s konstantnimi okoljskimi parametri (ogrevane in hlajene stavbe ter stavbe z mehanskim prezračevanjem).
- 2.) Metoda adaptivnega toplotnega udobja. Gre za novejšo metodo, ki temelji na spreminjajočih se parametrih toplotnega okolja v realnem okolju in času. V nasprotju s prvo metodo ta metoda upošteva tudi, da uporabniki s svojim početjem ali prilagajanjem okolju aktivno sodelujejo pri doseganju toplotnega udobja [2]. To metodo v dveh različicah podajata standarda ASHRAE 55 in SIST EN 16798-1 [16]. Metoda se je pokazala kot primerna za stavbe v prostem teku in stavbe, ki so naravno ali hibridno (kombinacija mehanskega in naravnega prezračevanja) prezračevane.

Ob pregledu literature je moč zaznati veliko raziskav, kjer se na podlagi determinističnega pristopa določi optimalne razmere toplotnega udobja in se jih vzdržuje z aktivnimi sistemi. Pasivne ukrepe se v tem primeru vrednoti na podlagi količine energije, ki se porabi pri različnih pasivnih ukrepih. Ti rezultati nam sicer veliko povedo o učinkovitosti posameznih pasivnih ukrepov, ni pa upoštevana zmožnost prilagoditve uporabnika na dinamične spremembe toplotnega okolja. Na drugi strani pa je z uporabo metode adaptivnega toplotnega udobja narejenih manj raziskav kljub temu, da so rezultati s to metodo pri stavbah v prostem teku boljši približek realnemu stanju. Ker je cilj magistrske naloge ugotoviti koliko časa lahko zagotovimo toplotno udobje samo s pomočjo pasivnih ukrepov, se pri analizah aktivni sistemi ne bodo uporabljali. To pomeni, da v določenem času toplotno udobje ne bo doseženo. Stavba bo tako ves čas v prostem teku in naravno prezračevana. Posledično smo za vrednotenje toplotnega udobja izbrali metodo adaptivnega toplotnega udobja. Na ta način se kar se da približamo realnemu stanju pri oceni toplotnega udobja v stavbi.

2.1.1 Model adaptivnega toplotnega udobja

Ker se v študiji toplotni odziv stavb z različno toplotno maso stavbnega ovoja preverja za različna podnebja Slovenije, se uporabi model določen v standardu SIST EN 16798-1 [16]. Model adaptivnega toplotnega udobja na podlagi tega standarda vrednotenje toplotnega udobja določa z uporabo občutene oziroma operativne temperature T_{op} v stavbi v odvisnosti od tekočega sedemdnevnega povprečja

temperature zunanjega zraka suhega termometra T_{rm} . T_{rm} je definirana v enačbi (1), kjer je faktor α konstanta z vrednostjo med 0 in 1. Standard priporoča vrednost 0,8. $T_{out(d-x)}$ pa je povprečna zunanja temperatura suhega zraka prejšnjih dni. Zaradi večje natančnosti se uporabi tekoče povprečje zadnjih sedmih dni. T_{op} je definirana kot konstantna temperatura virtualnega prostora (ovoj ima značilnost črnega telesa), v katerem bo uporabnik izmenjal enak delež toplote s sevanjem in konvekcijo kot v dejanskem spremenljivem prostoru. Če je relativna hitrost zraka manjša od 0,2 m/s, se T_{op} izračuna kot povprečna vrednost temperature zraka in srednje sevalne temperature prostora. Srednja sevalna temperatura temelji na konceptu izmenjave toplote med človekom in okoljem in je odvisna od okoliških površinskih temperatur [7]. Programsko orodje EnergyPlus, ki ga bomo uporabljali za analizo, operativno temperaturo izračuna direktno, vendar samo za vsak posamezen prostor v analizirani stavbi. T_{op} za celotno stavbo pa se nato določi kot povprečna operativna temperatura posameznih prostorov na podlagi volumenskih razmerij prostorov po enačbi (2). Posplošitev definira inženirski referenčni priročnik za EnergyPlus [19].

$$T_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \{ T_{out(d-1)} + \alpha \cdot T_{out(d-2)} + \alpha^2 \cdot T_{out(d-3)} + \alpha^3 \cdot T_{out(d-4)} + \alpha^4 \cdot T_{out(d-5)} + \alpha^5 \cdot T_{out(d-6)} + \alpha^6 \cdot T_{out(d-7)} \} \quad (1)$$

$$T_{op} = \frac{\sum (T_{op} \cdot V_{cone})}{\sum V_{cone}} \quad (2)$$

Standard SIST EN 16798-1 optimalno notranjo operativno temperaturo T_{com} določa z enačbo (3). Enačba je določena na podlagi obsežnih raziskav, kjer so iskali povezavo med povprečno zunanjo temperaturo in udobjem v stavbi [2].

$$T_{com} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 \quad (3)$$

Standard dopušča temperaturno odstopanje od T_{com} , v katerem smo še vedno v coni toplotnega udobja. Standard glede na namembnost stavb in želeno stopnjo udobja dopušča tri kategorije odstopanja od T_{com} . V nalogi smo kot relevantne uporabili tolerance II. kategorije toplotnega udobja, definirane v enačbi (4) in prikazane na sliki 2. II. kategorija je v standardu SIST EN 16798-1 namreč definirana kot primerna za naravno prezračevane stavbe v prostem teku in predstavlja 80 % sprejemljivost, kar pomeni, da se 80 % uporabnikov ob takem odstopanju od T_{com} še vedno počuti udobno. Ta kategorija predstavlja srednjo stopnjo toplotnega udobja in velja za novogradnje.

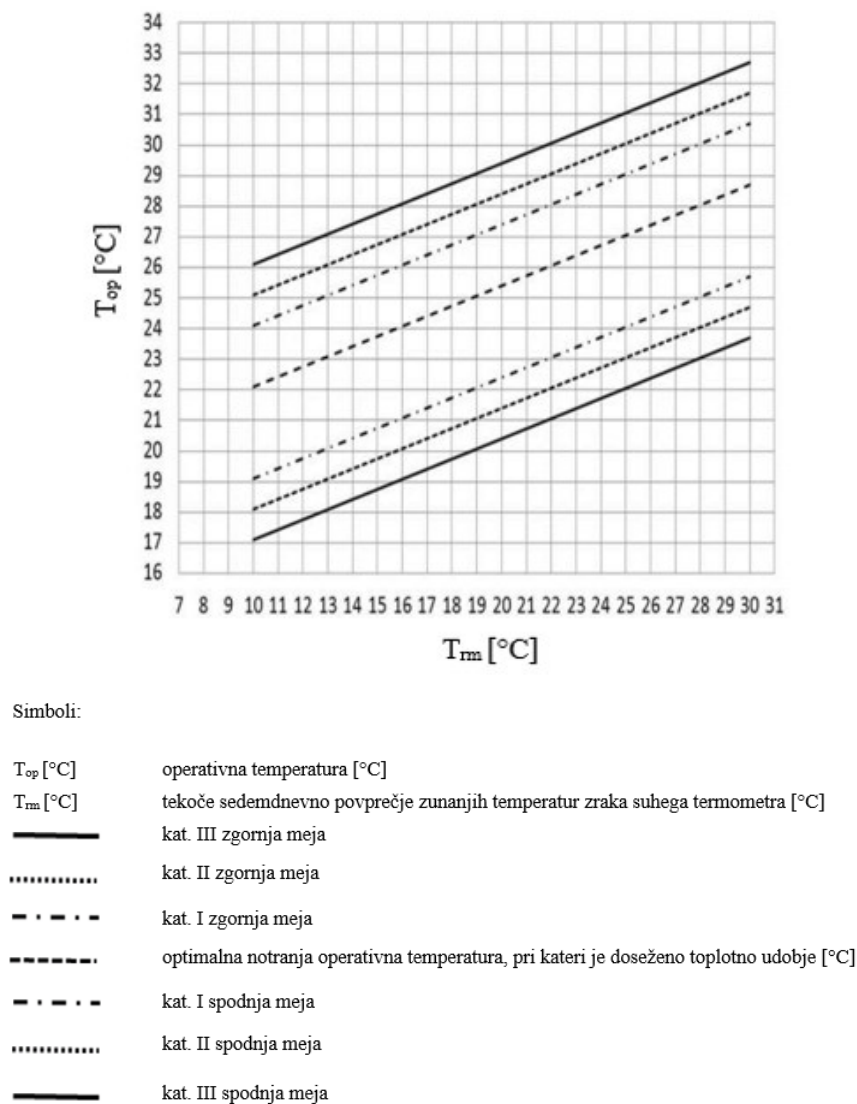
$$\text{Zgornja meja: } T_{com} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 + 3 \quad (4)$$

$$\text{Spodnja meja: } T_{com} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 - 4$$

$$\text{Enačba velja samo v primeru, ko velja: } 10\text{ °C} \leq T_{rm} \leq 30\text{ °C}$$

Glavna omejitev tega modela pa je, kot vidimo iz pogoja iz enačbe (4), da model ni primeren za obdobja, ko je T_{rm} nižja od 10 °C ali višja od 30 °C. Na sliki 2 vidimo, da je toplotno udobje linearno odvisno od zunanjih razmer, na obeh koncih pa je graf odrezan. Toplotno udobje izven območja 10–30 °C seveda tudi obstaja, vendar kot izpostavljata de Dear in Brager [20] se stroka ne more uskladiti, kako vrednotiti udobje pri zunanjih temperaturah pod 10 °C in nad 30 °C. Obstajajo različna mnenja, kako naj bi se vrednotilo toplotno udobje izven cone 10–30 °C. Nekateri so mnenja, da bi se lahko linearna odvisnost uporabljala tudi pri bolj ekstremnih temperaturah, drugi predlagajo horizontalen potek odvisnosti za

območja izven cone 10–30 °C. Stroka se sicer strinja, da je interpolacija cone udobja izven temperaturnega območja zunanjih temperatur 10–30 °C možna, vendar je kompleksna in kontroverzna. Tako za enkrat ostaja omejitev, ki jo določa standard. V kolikor bi želeli določiti toplotno udobje pri zunanjih temperaturah izven območja 10–30 °C, bi morali to storiti na podlagi PVM indeksa, ki pa pri takšnih temperaturah ravno tako velja za nenatančno metodo.



Slika 2: Optimalna operativna temperatura v odvisnosti od notranje operativne temperature in od tekočega dnevnega povprečja temperature zunanjega zraka. Vir: [16].

V luči omenjenih omejitev smo se v nadaljevanju odločili za upoštevanje metode in omejitev, kot to predpisuje standard SIST EN 16798-1. Toplotno udobje se izraža v času, ko je T_{op} znotraj dovoljenega odstopanja od T_{com} ob upoštevanju omejitve modela adaptivnega toplotnega udobja na razpon T_{rm} med 10 in 30 °C.

2.1.2 Analiza poteka notranjih temperatur

Zaradi predhodno omenjene omejitve metode adaptivnega toplotnega udobja bomo toplotni odziv stavbe preverjali sočasno še na podlagi analize časovnega poteka notranjih temperatur. Z analizo notranjih temperatur se bo na podlagi diagramov poteka notranjih temperatur ugotovilo, kako se stavba odziva tudi v času, ko so zunanje temperature nižje od 10 °C ali višje od 30 °C. Na podlagi analize poteka temperatur se tako oceni odstopanje od cone udobja in hitrost odziva stavbe na spremembe v zunanjem okolju. Zaželeno je, da je potek temperatur v notranjosti čim bolj zvezen. Tako kot pri metodi adaptivnega toplotnega udobja se za vrednotenje toplotnega okolja preverja operativno temperaturo, ki zajema največ parametrov toplotnega okolja.

Potek notranjih temperatur bomo analizirali za ekstremne dneve v letu. Na podlagi uporabljenih podnebnih datotek (*angl.* EPW – EnergyPlus Weather File) smo identificirali:

- 1.) Najhladnejši mesec v letu (najnižja mesečna povprečna temperatura zunanjega zraka), znotraj katerega se določi najhladnejši dan, ki predstavlja najhladnejše robne pogoje.
- 2.) Najtoplejši mesec v letu (najvišja mesečna povprečna temperatura zunanjega zraka), znotraj katerega se poišče najtoplejši dan, ki predstavlja najtoplejše robne pogoje.
- 3.) Povprečni mesec v letu (mesečna povprečna temperatura zunanjega zraka najbližja letni povprečni temperaturi zunanjega zraka), znotraj katerega se določi najbolj povprečen dan, ki predstavlja tipičen dan v letu.

Na ta način določimo tako imenovane projektne dneve (*angl.* Design Day), ki predstavljajo ekstremne temperaturne pogoje na podlagi preteklih vremenskih podatkov. Običajno se projektne dneve uporablja za dimenzioniranje aktivnih sistemov hlajenja in ogrevanja, v našem primeru pa se jih uporabi za analizo toplotnega odziva stavbe v temperaturnih območjih, ko model adaptivnega toplotnega udobja ni v uporabi. Hkrati se v teh dneh analizira hitrost odziva različnih tipov stavbnega ovoja na spremembe v zunanjem okolju. Tipičen dan v tem primeru ne predstavlja ekstrema, temveč služi za primerjavo časovnega poteka notranjih temperatur v povprečnih temperaturnih razmerah.

2.2 Lokacija in podnebje

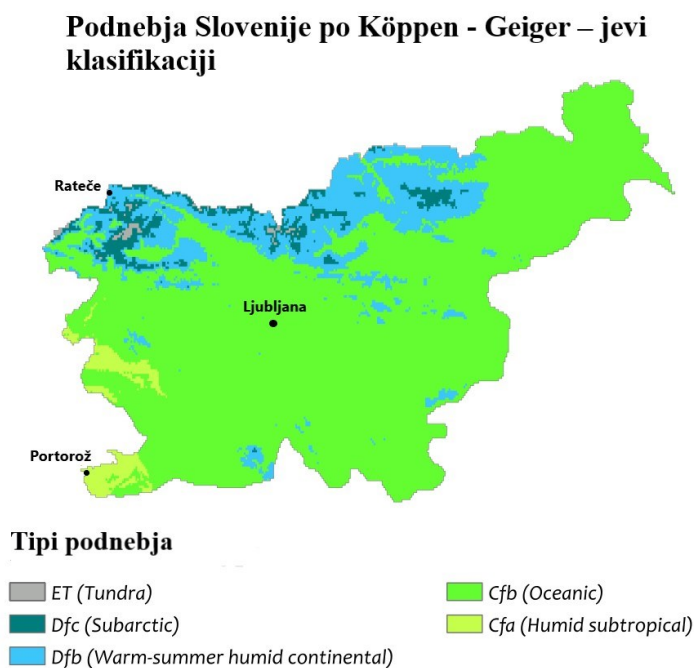
Analiza se izvede na področju Slovenije, in sicer na treh različnih lokacijah, ki predstavljajo tri najpogostejše podnebne tipe značilne za Slovenijo prikazane na sliki 3. Razlog za to je, da je Slovenija podnebno zelo raznolika država, kjer se na majhnem geografskem območju pojavlja veliko različnih naravnih enot in ob tem tudi različnih podnebnih tipov. V preteklosti so se na podlagi tega na različnih področjih uporabljali različni tipi bioklimatsko prilagojenih stavb, danes pa se po celotni Sloveniji gradijo stavbe s podobnimi ali enakimi pasivnimi ukrepi. Cilj je tako določiti vpliv različnih tipov podnebja na toplotni odziv posameznih variant stavbnega ovoja z različno toplotno maso. Takšna analiza za področje Slovenije še ne obstaja.

Tri izbrane tipične lokacije in njihova podnebja so:

- 1.) Ljubljana (46°03'55"N, 14°30'44"E), zmerno celinsko podnebje. Gre za najpogostejši tip podnebja v Sloveniji in sicer tip Cfb po Köppen-Geigerjevi podnebni klasifikaciji [21]. Povprečne temperature najhladnejšega meseca januarja v Ljubljani so okoli 0 °C, in sicer med –2 in 4 °C, medtem ko so za najtoplejši mesec julij značilne temperature med 15 in 26 °C. Največ sončne energije prejme Ljubljana v poletnih mesecih juniju in juliju, in sicer povprečno globalno obsevanje na horizontalni ravnini 6,6 kWh/m² na dan [22].

- 2.) Portorož (45°28'24"N, 13°36'54"E) ima submediteransko podnebje. Gre za tip Cfa po Köppen-Geigerjevi podnebni klasifikaciji [21]. Toplejše podnebje značilno za jugozahod Slovenije s povprečnimi temperaturami najhladnejšega meseca januarja nad 0 °C. Poletja so vroča in vlažna s povprečnimi temperaturami med 17 in 28 °C. Najbolj vroč mesec je tudi v tem primeru julij. Gre za lokacijo z največ prejetega sončnega sevanja v Sloveniji. Globalno obsevanje na horizontalni ravnini je največje junija in julija, ko je v enem dnevu povprečno 6,9 kWh/m² na dan [22].
- 3.) Rateče (46°29'49"N, 13°42'46"E) imajo gorsko podnebje. Po Köppen-Geigerjevi podnebni klasifikaciji gre za tip Dfb [21]. Je najhladnejše od treh podnebij Slovenije in hkrati najmanj zastopano. Za najhladnejši mesec januar so značilne povprečne temperature pod 0 °C, medtem ko je povprečna temperatura najvišja julija, in sicer 15,9 °C. Od vseh treh lokacij Rateče prejmejo najmanj sončne energije. Globalno obsevanje na horizontalni ravnini je tudi v tem primeru največje junija in julija, in sicer 6,4 kWh/m² na dan [22],[23].

Uporabili smo najnovejše meteorološke podatke, ki so bili dostopni v času izvajanja analize, in sicer za obdobje 2009–2021 [24].



Slika 3: Značilna podnebja Slovenije po Köppen-Geigerjevi podnebni klasifikaciji s tipičnimi lokacijami. Vir: [25].

2.3 Računski model stavbe

Za izvedbo študije smo izdelali računski model stavbe, na podlagi katerega smo izvajali analize. V tem poglavju je določena geometrijska zasnova enodružinske stavbe, definirani so konstrukcijski sklopi in stavbno pohištvo ter parametri notranjega okolja, ki so izjemno pomembni za našo analizo.

2.3.1 Geometrijska zasnova stavbe

Za analizo smo izbrali stanovanjsko enodružinsko pritlično hišo. Za stanovanjsko stavbo smo se odločili, ker ljudje v njih preživimo največ časa, in sicer kar 68,7 % [3]. Pritlično hišo smo izbrali zaradi enostavnejšega modela, možnosti za napake pa so manjše. Predvsem pa je prednost pritlične hiše v tem, da iz analize izločimo vpliv toplotne mase medetažne konstrukcije, ki ima lahko velik vpliv na rezultate. Hkrati se ob tem zanemari prenos toplote med etažami, ki je odvisen tudi od naravne konvekcije, pogojene z gradientom notranjih temperatur, kar lahko pripelje do dodatne razlike med rezultati posameznih variant, ki niso odvisne le od toplotne mase stavbnega ovoja.

Uporabi se stavba z odprtim tlorisom značilnim za sodobne arhitekturne trende, ki je hkrati dovolj enostaven, da omogoča lažjo in hitrejšo analizo. Izbran tloris je prikazan na sliki 4. Vsak fizično ločen prostor v stavbi je modeliran kot ločena toplotna cona. Daljša stranica z večjo površino zasteklitve je orientirana v smeri juga, s čimer se prilagodi osnovnemu pristopu načrtovanja bioklimatskih stavb v slovenskem okolju – optimizaciji pritokov sončnega sevanja v hladnem delu leta.

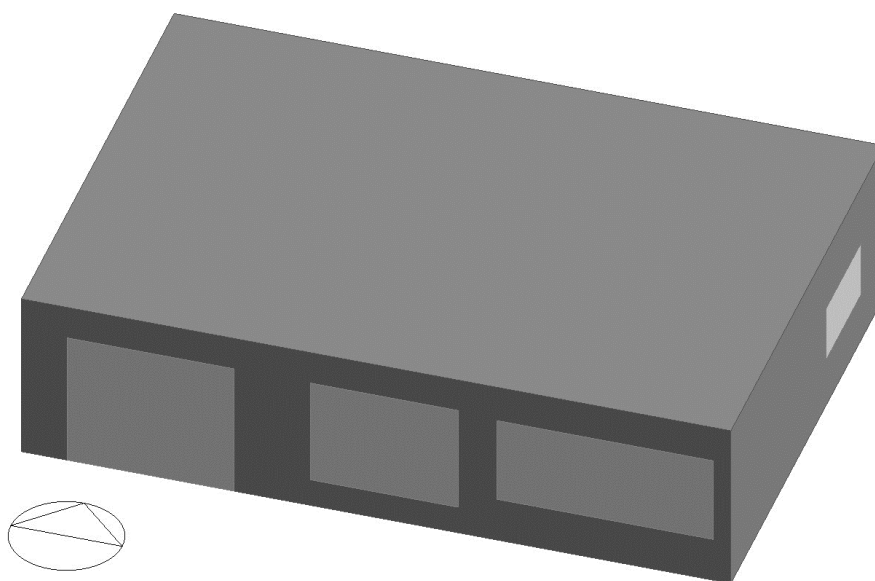
Velikost okenskih površin glede na izhodiščni tloris je bila prilagojena tako, da stavba izpolnjuje zahteve Pravilnika o minimalnih tehničnih zahtevah za graditev stanovanjskih stavb in stanovanj [26], ki navaja, da mora biti faktor razmerja med površino oken in uporabno tlorisno površino (WFR, *angl.* Window to Floor Ratio) vsaj 20 %. WFR faktor smo za potrebe lažjega modeliranja in primerjave s strokovno literaturo pretvorili v splošno pogostejše uporabljen faktor razmerja med površino oken in celotno površino stene, v kateri je vgrajeno okno (WWR, *angl.* Window to Wall Ratio). WWR se tako določi za vsak prostor ločeno in sicer, da ta ustreza zahtevi 20 % WFR. Izjema je južno orientirana fasada, kjer se uporabi višji WWR faktor. Košir *et al.* [27] so namreč pri raziskavi optimalnega WWR faktorja za podnebje Ljubljane ugotovili, da je za južno orientirane odprtine stanovanjskih stavb najbolj optimalen WWR 50 %. V analizi so sicer preverjali rabo energije, vendar je ta zelo povezana tudi s toplotnim udobjem in lahko privzamemo podoben scenarij, kjer je ravno tako priporočen visok WWR v hladnem delu leta, v toplem delu pa manjši WWR za preprečitev pregrevanja, celotno gledano pa je najbolj optimalen WWR 50 %. Prostor 5 na sliki 4 je tako skladno s sodobnimi arhitekturnimi trendi osvetljen bolj kot ostali. Za potrebe določitve površin zahodno orientiranih odprtin smo prostor navidezno razdelili na kuhinjo in jedilnico. V obeh prostorih sta zahodni odprtini dimenzionirani tako, da izpolnujeta zahtevo WFR 20 %. Južno orientirana stena jedilnice pa ima WWR 50 %.

Ker WWR stavbe močno vpliva na njen toplotni odziv (spada med pasivne strategije), slednje pomeni, da je optimalen WWR odvisen od podnebja, zasnove stavbe in njene uporabe in ga je potrebno optimizirati za vsak primer ločeno. Ne glede na navedeno smo zaradi lažje primerljivosti rezultatov pri osnovni zasnovi modela za vse analizirane lokacije uporabili zahteve veljavne zakonodaje in priporočila stroke.



Slika 4: Tloris stavbe. Vir: [28].

Na spodnji sliki 5 pa je prikazan računski 3D model stavbe izdelan v programu DesignBuilder [17].



Slika 5: Računski 3D model stavbe, izdelan s programskim orodjem DesignBuilder.

2.3.2 Tipi stavbnega ovoja

Določili in analizirali smo štiri variante stavbnega ovoja z različno toplotno maso in U-faktorjem:

- 1.) **Varianta 1:** Izolirana lahka lesena endoskeletna konstrukcija z nizkim U-faktorjem.

Varianta 1 predstavlja tipično moderno montažno leseno enodružinsko stavbo, ki izpolnjuje zahteve Pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah (PURES) [29].

- 2.) **Varianta 2:** Izolirana masivna eksoskeletna opečnata konstrukcija z nizkim U-faktorjem.

Ta varianta predstavlja za Slovenijo najpogostejši tip enodružinskih stavb. Danes se sicer za gradnjo opeka uporablja vedno manj, a še vedno predstavlja najpogostejši tip nosilne konstrukcije pri gradnji enodružinskih stavb. Gre za klasično masivno zidano nosilno konstrukcijo iz modularne opeke. Analizira se izolirano varianto, saj se neizolirane stavbe glede na PURES ne smejo več graditi, hkrati pa se počasi energetske prenavlja tudi obstoječ stavbni fond.

- 3.) **Varianta 3:** Neizolirana zelo masivna eksoskeletna konstrukcija iz butane zemlje z visokim U-faktorjem.

Varianta 3 predstavlja gradnjo z uporabo zelo velike toplotne mase bolj značilno za bioklimatske stavbe vročih podnebij. Pri nas so v preteklosti primer takšne gradnje predstavljale stavbe iz butane zemlje in kamnite stavbe, ki so se gradile še do druge polovice prejšnjega stoletja. Kot material nosilne konstrukcije se ne izbere pri nas bolj pogost kamen, ampak bolj redko uporabljena butana zemlja. Butana zemlja se je v preteklosti uporabljala za gradnjo stavb v Prekmurju. V tem delu se je zemlja kot gradbeni material uporabljala na sledeče načine [30]:

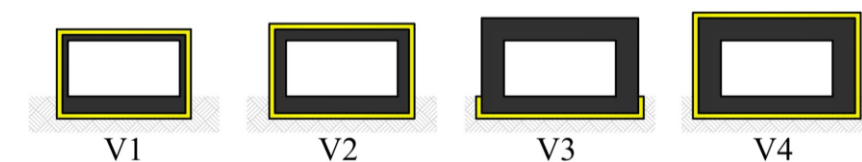
- 1.) Ročno gnetena glina – »blatnjača«.
- 2.) Butana gradnja oziroma butana zemlja – »butanca«. Pri taki gradnji so v opaz z nogami ali koli nabili zemljino.
- 3.) Na zraku sušeni glinasti zidaki – »čepiči«. Slednji način gradnje je najbolj redek.
- 4.) Hibridni pristop masivne lesene hiše ometane z debelo slojnim ometom iz gline pomešane s slamo – »cimprača«.

Razlog za izbiro butane zemlje je, da se kamen kot material nosilne konstrukcije v sodobnem gradbeništvu ne uporablja več. Na drugi strani pa se drugje po svetu butana zemlja ponovno uporablja pri gradnji novih stavb. Predvsem je njena uporaba pogosta v Avstraliji, Aziji in Severni Ameriki [31]. Ima namreč boljše toplotno in zvočno izolativne lastnosti, večjo toplotno kapaciteto od kamna in betona ter je v nasprotju z betonom povsem naraven material. Hkrati v svetu poteka tudi veliko raziskav, kako izboljšati posamezne lastnosti butane zemlje z dodajanjem različnih materialov [15]. Varianta je zanimiva, saj kot ugotavljata Strazzeri in Karrech [15] lahko tudi s tako stavbo dosežemo dobro toplotno udobje in nizko rabo energije po zahtevah standardov, kljub temu da konstrukcijski sklopi z vidika toplotne prehodnosti ne ustrezajo zahtevam pravilnikov za novogradnje.

- 4.) **Varianta 4:** Izolirana zelo masivna stavba iz butane zemlje z nizkim U-faktorjem.

Pri tej varianti gre za precej netipičen stavbni ovoj z zelo visoko maso in nizkim U-faktorjem. Cilj je preveriti, kako se odziva zelo masivna stavba iz butane zemlje ob dodatku toplotne izolacije, s čimer takšen stavbni ovoj izpolnjuje zahteve trenutno veljavnega slovenskega pravilnika PURES.

Grafično je shematska zasnova variant prikazana na spodnji sliki 6.



Slika 6: Grafični prikaz posameznih variant stavbnega ovoja.

2.3.3 Zasnova konstrukcijskih sklopov stavbnih ovojev

Na podlagi zgoraj definiranih variant stavbnega ovoja se v tem poglavju posamezni konstrukcijski sklopi natančno definirajo tako, da dosežemo želeno stopnjo toplotne mase in toplotne prehodnosti. Za izločitev vpliva različnih faktorjev na rezultate je ključno, da so si uporabljeni konstrukcijski sklopi stavbnega ovoja med seboj čim bolj podobni. Tako se pri vseh variantah definirajo konstrukcijski sklopi z enakim U-faktorjem, ki se določi skladno z minimalnimi zahtevami PURES-a [29], ki so prikazane v preglednici 1. Izjema je varianta 3, ki je neizolirana. V vseh primerih je bila debelina toplotne izolacije prilagojena tako, da se ohranja velikost notranjega volumna, spreminja pa se zunanje dimenzije, saj majhne razlike v zunanji geometriji nimajo bistvenega vpliva na rezultate. Kjer je to mogoče, se uporablja enake materiale z izjemo nosilne konstrukcije. Konstrukcijske sklope se poenostavi, kolikor je to mogoče, na način, da se vse manj pomembne sloje, kot je npr. sloj lepila, zanemari. Ohranijo pa se ločilni sloji in sloji hidroizolacije, ki vplivajo na difuzijo vodne pare. Na ta način omejimo napake in nezaželene vplive na rezultate. Konstrukcijski sklopi so zasnovani in analizirani s programskim orodjem Ubakus [32].

Preglednica 1: Maksimalne dovoljene toplotne prehodnosti konstrukcijskih elementov toplotnega ovoja stavbe po zahtevah PURES-a. Vir: [29].

Konstrukcijski sklop	U _{dovoljen} [W/(m ² K)]
Zunanje stene in stene proti prostorom s stalno temperaturo pod lediščem	0,18
Tla proti terenu, tla nad neogrevano kletjo ali neogrevanim prostorom	0,35
Ravne in poševne strehe	0,15
Okna, vgrajena v zunanji zid; balkonska vrata, zastekljene fasade z okvirjem iz lesa, kovine ali umetnih mas	1,00
Vhodna vrata v ogrevane prostore, vetrolovi	1,60

2.3.3.1 Tla na terenu

Tla na terenu so enaka pri vseh variantah. Razlog za takšno izbiro je, da so proti terenu robni pogoji precej bolj konstantni, hkrati pa pri gradnji enodružinskih stavb v Sloveniji vse bolj prevladuje izvedba z armirano betonsko temeljno ploščo in plavajočim podom tako pri lahkih kot masivnih stavbah. Sestava konstrukcijskega sklopa in fizikalne lastnosti posameznih slojev so prikazane v preglednici 2. Plavajoči pod predstavlja masivni element, ki deluje kot hranilnik toplote. V hladnem delu leta absorbira sončno energijo, ki podnevi preko transparentnih elementov stavbnega ovoja pade na površino tal. Nato s časovnim zamikom toploto oddaja nazaj v prostor. Učinkovitost takšnega delovanja pa je v veliki meri pogojena z lastnostmi finalne obdelave ter razporeditvijo pohištva v stavbi.

Debelino toplotne izolacije, ki je prikazana v spodnji preglednici 2, smo v programskem orodju DesignBuilder nekoliko prilagodili zaradi drugačne metode izračuna končnega U-faktorja konstrukcijskega sklopa, ki jo uporablja programsko orodje. Odstopanja so do 10 mm. Majhna razlika v debelini ima zanemarljiv vpliv na rezultate. Enako velja tudi pri ostalih konstrukcijskih sklopih. Koeficient absorpcije sončnega sevanja α je za analizo pomemben le pri notranjem sloju.

Preglednica 2: Sestava in značilnosti konstrukcijskega sklopa tla na terenu. Vir: [32].

Sloj (od notri na ven)	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m³]	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Keramične ploščice	1,3	1,2	840	2000	0,5
Cementni estrih	5	1,4	1000	2000	/
PE folija	0,02	0,036	1500	30	/
EPS	8,95	0,4	1800	930	/
Hidroizolacija	0,52	0,17	1700	1100	/
Armirano betonska plošča	30	2,5	880	2400	/

Grafični prikaz:

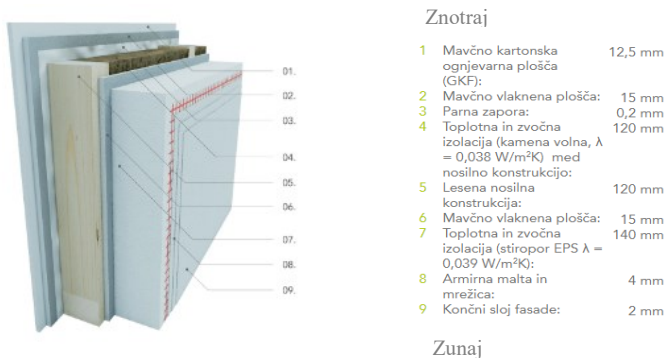
U-faktor: 0,35 W/(m²K)

① Keramične ploščice (13 mm) ④ EPS (89,5 mm) ⑦ Soil
② Cementni estrih (50 mm) ⑤ Hidroizolacija
③ PE folija ⑥ Armirano betonska plošča (300 mm)

2.3.3.2 Zunanja stena

2.3.3.2.1 Varianta 1

Ob pregledu ponudbe slovenskih ponudnikov lesenih montažnih hiš (Rihter, Jelovica, Marles, Žiher, Promles, itd.) ugotovimo, da se kot najbolj pogosta zasnova zunanje stene ali njena variacija pri večini ponudnikov pojavlja sestava, kot je prikazana na sliki 7.



Slika 7: Tipična sestava zunanje stene pri Slovenskih ponudnikih montažnih lesenih hiš. Vir:[33].

Za potrebe analize je bilo v tem primeru zaradi poenostavitve in omejitve programskega orodja EnergyPlus potrebnih precej poenostavitev. Poenostavljena sestava je prikazana v preglednici 3. Programsko orodje EnergyPlus namreč pri izračunu U-faktorja ne upošteva endoskeletne konstrukcije, ki se nahaja v ravnini drugega materiala, v tem primeru v toplotni izolaciji. Nosilna konstrukcija se v tem primeru pri izračunu U-faktorja zanemari, ob tem pa se fiktivno zmanjša debelina toplotne izolacije za 33 mm. Toplotna masa lesene konstrukcije je v takšni sestavi relativno majhna in njena izključitev iz konstrukcijskega sklopa nima bistvenih vplivov na rezultate. Fazni zamik sklopa izračunan s programom Ubakus se namreč spremeni za manj kot 6 minut na dan. Toplotno maso v takšni sestavi predstavljata le toplotna izolacija in mavčno kartonaste plošče.

V kolikor bi želeli, da ima takšen konstrukcijski sklop večjo toplotno maso, je potrebno izbrati toplotno izolacijski material s čim večjo specifično toploto ali spremeniti lastnosti finalne obdelave.

Preglednica 3: Sestava in značilnosti konstrukcijskega sklopa zunanja stena varianta 1. Vir: [32].

Sloj (od notri na ven)	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m ³]	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Mavčno kartonasta plošča Knauf GKF (2 krat)	1,25	0,23	1100	800	0,5
Parna ovira	0,05	0,22	1700	260	/
Kamena volna	12,0	0,035	840	40	/
Mavčno kartonasta plošča	0,05	0,22	1700	260	/
EPS	7,8	0,04	1500	30	/
Zunanji zaključni sloj	0,6	0,93	1000	1750	0,7

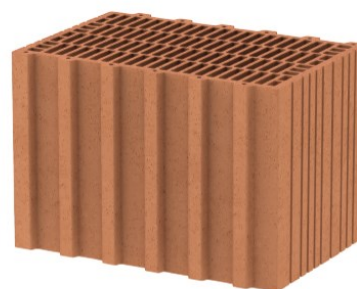
Grafični prikaz:

U-faktor: 0,175 W/(m²K)

① Mavčno kartonasta plošča, Knauf GKF (12,5 mm)
 ② Mavčno kartonasta plošča, Knauf GKF (12,5 mm)
 ③ Parna ovira
 ④ Kamena volna 035 (120 mm)
 ⑤ Mavčno kartonasta plošča, Knauf GKF (12,5 mm)
 ⑥ EPS 040 (78 mm)
 ⑦ Zaključni sloj (6 mm)

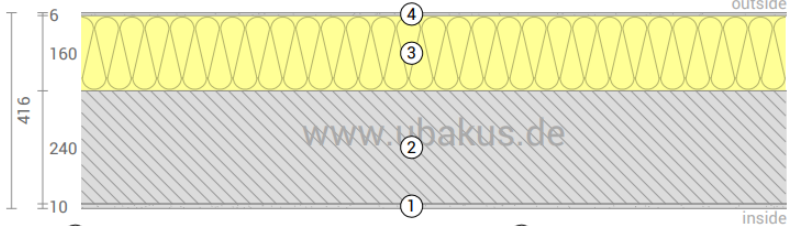
2.3.3.2.2 Varianta 2

Kot že omenjeno, se kot material nosilne konstrukcije izbere modularni opečnat zidak. Za izračun se uporabi modularni zidak Poroton T16 iz Ubakusove knjižnice materialov. Prikazan na sliki 8. Toplotna izolacija in zaključna sloja sta enaka kot pri varianti 1. Sestava je prikazana v preglednici 4. Takšna sestava v Sloveniji predstavlja najpogostejšo varianto izolirane zunanje stene enodružinskih stavb. Hkrati se takšna toplotna izolacija najpogosteje uporablja tudi pri energetskih sanacijah tako eno kot večstanovanjskih stavb.



Slika 8: Opečnat zidak Poroton T16. Vir [34].

Preglednica 4: Sestava in značilnosti konstrukcijskega sklopa zunanja stena varianta 2. Vir: [32].

Sloj (od notri na ven)	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m³]	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Notranji omet	0,6	0,33	1000	1200	0,5
Modularna opeka – Poroton T16	24,0	0,16	1000	800	/
EPS	7,8	0,04	1500	30	/
Zunanji zaključni sloj	0,6	0,89	1000	1480	0,7
Grafični prikaz: U-faktor: 0,175 W/(m²K) 					
① Notranji omet (10 mm) ③ EPS 040 (160 mm) ② Modularni opečnat zidak - Poroton T16 (240 mm) ④ Zaključni sloj (6 mm)					

2.3.3.2.3 Varianta 3

Gre za zelo masivno varianto zunanje stene debeline 60 cm iz butane zemlje. Butana zemlja je material z gostoto 2000 kg/m³ in specifično toploto 1260 J/(kgK), kar je, kot je razvidno iz preglednice 5, primerljivo z naravnim kamnom, kot je apnenec, ki se je v preteklosti pogosteje uporabljal za gradnjo stavb v slovenskem okolju. Je pa butana zemlja toplotno precej bolj izolativen material s toplotno prevodnostjo 1,0 W/(mK), kar je za 0,4 W/(mK) manj, kot pri kamnu. Precej nižjo toplotno prevodnost in višjo toplotno kapaciteto ima tudi v primerjavi s pogosto uporabljenim armiranim betonom. Razlog za takšno izbiro debeline stene je, da s tem dosežemo učinek ekstremne toplotne mase, zmanjšamo U-faktor stene in hkrati uporabimo podobno debelino, kot pri starih stavbah iz butane zemlje in kamna v Sloveniji. Omet se tu zanemari, saj se butana zemlja zaradi svojega estetskega izgleda, kot vidimo na sliki 9 velikokrat uporabi kot vidna površina brez dodatnih zaključnih slojev. Stena sicer, kot vidimo v preglednici 6, ne dosega zahtev PURES-a, vendar je zasnova zanimiva, saj bo morda analiza za slovensko okolje pokazala podobne rezultate, kot sta jih dosegla Strazzeri in Karrech [15] kjer stavbe iz butane zemlje kažejo dobre rezultate glede rabe energije skladne s pravilniki, kljub temu da ne izpolnjujejo zahtev za minimalno toplotno prehodnost konstrukcijskih sklopov.

Preglednica 5: Primerjava fizikalnih lastnosti butane zemlje, naravnega kamna (apnenca) in armiranega betona. Vir: [32].

Material	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m³]
Butana zemlja	1,0	1260	2000
Apnenec	1,4	1000	2000
Armiran beton	2,5	880	2400



Slika 9: Izgled butane zemlje omogoča uporabo vidnih konstrukcijskih elementov. Vir [35].

Material se za gradnjo v Sloveniji sicer še ne uporablja, vendar je primeren tudi za podnebje in seizmično območje Slovenije. Sama konstrukcija iz butane zemlje sicer ni potresno odporna, vendar lahko z dodatnim armiranjem ali pa uporabo betonskih elementov, kot ugotavljajo Nguyen *et al.* [36], bistveno izboljšamo potresno varnost stavbe tudi na območjih z visokimi vrednostmi pospeška tal. Gre za odporen material, ki je lahko izpostavljen podnebnim dejavnikom. Kljub temu pa ni odporen na daljšo izpostavljenost vlagi in bi bil sklop v takšni sestavi v Sloveniji primeren samo za submediteransko podnebje. Zaščito pred vlago bi lahko zagotovili že s pravilno izbiro zaključnega sloja, ki pa nima večjih vplivov na rezultate in ga lahko v tej raziskavi zanemarimo. Poenostavljen konstrukcijski sklop je tako prikazan v preglednici 6.

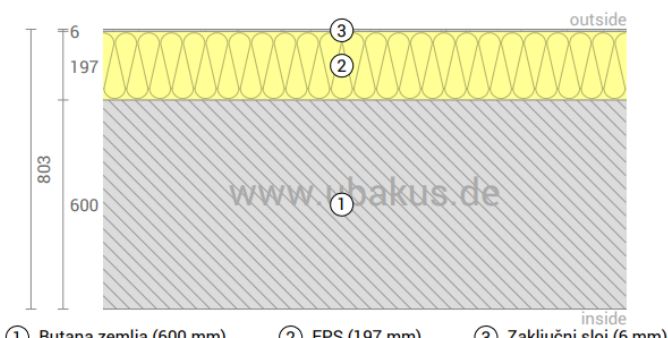
Preglednica 6: Sestava konstrukcijskega sklopa zunanja stena, varianta 3. Vir: [32].

Sloj	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m ³]	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Butana zemlja	60	1,0	1260	2000	0,5
Grafični prikaz:					
U-faktor: 1,299 W/(m²K)					

2.3.3.2.4 Varianta 4

Ta varianta predstavlja izolirano verzijo variante 3, da U-faktor ustreza zahtevam PURES-a. Gre za v praksi redko viden konstrukcijski sklop. Kljub temu pa bo omenjena zasnova preverjena, saj naj bi imela v teoriji dober toplotni odziv, poleg tega pa se s tem preveri tudi smiselnost zahtev veljavne zakonodaje za izjemno masivne zasnove konstrukcijskih sklopov. Uporabili smo enako vrsto toplotne izolacije in zaključnega sloja, kot pri variantah 1 in 2. Zasnova konstrukcijskega sklopa je prikazana v spodnji preglednici 7.

Preglednica 7: Sestava konstrukcijskega sklopa zunanja stena, varianta 4. Vir: [32].

Sloj (od notri na ven)	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m ³]	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Butana zemlja	60	1,0	1260	2000	0,5
EPS	19,7	0,04	1500	30	/
Zunanji zaključni sloj	0,6	0,93	1000	1750	0,7
Grafični prikaz: U-faktor: 0,175 W/(m²K)  ① Butana zemlja (600 mm) ② EPS (197 mm) ③ Zaključni sloj (6 mm)					

2.3.3.3 Ravna streha

Pri vseh variantah se predpostavi topla oz. neprezračevana ravna streha z bitumensko hidroizolacijo s tankoslojno zaščito pred sončnim sevanjem. Nasutja na strehi ni. Streha se zaradi lažje analize modelira brez napušča.

2.3.3.3.1 Varianta 1

Sestava konstrukcijskega sklopa temelji na klasični poševni strehi z leseno konstrukcijo, ki je v Sloveniji pri vseh enostanovanjskih hišah najpogostejša varianta. Medprostor med lesenimi konstrukcijskimi elementi se zapolni s stekleno volno, na zunanjo stran pa se zaradi boljšega odziva in zmanjšanja linijskih toplotnih mostov namesti dodatno toplotno izolacijo iz XPS-a, ki hkrati služi tudi kot naklonski sloj. Na leseno konstrukcijo se namesti OSB ploščo, na katero se mehansko pritrdi XPS. Na XPS se nato hladno lepi samolepljivo bitumensko hidroizolacijo. Tankoslojna zaščita pred vremenskimi vplivi in mehanskimi poškodbami se predpostavi s posipom, ki pri računu nima vpliva, vpliva pa na koeficient absorpcije sončnega sevanja. Dodatna toplotna izolacija zaradi naklona se pri določitvi U faktorja zanemari. Sestava je prikazana v preglednici 8.

Preglednica 8: Sestava konstrukcijskega sklopa ravna streha, varianta 1. Vir: [32].

Sloj (od notri na ven)	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m ³]	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Mavčno kartonasta plošča Knauf GKF	1,25	0,23	1100	800	0,5
Parna zapora	0,2	0,4	1800	930	/
Steklena volna	18,0	0,032	830	30	/
OSB plošča	1,8	0,13	1700	650	/
XPS	3,6	0,04	1450	35	/
Bitumenska hidroizolacija npr. Izoself	0,5	0,23	1000	1100	0,87

Grafični prikaz:

U-faktor: 0,145 W/(m²K)

① Mavčno kartonasta plošča - Knauf GKF (12,5 mm) ④ OSB plošča (18 mm)
 ② Parna zapora ⑤ XPS 040 (36 mm)
 ③ Stekljena volna (180 mm) ⑥ Bitumenska hidroizolacija - npr. Izoself

2.3.3.3.2 Varianta 2

Pri ravni strehi variante 2 smo za material nosilne konstrukcije namesto opeke izbrali armiran beton, saj armirano betonska plošča v Sloveniji predstavlja najpogostejši tip nosilne konstrukcije ravne strehe pri enodružinskih stavbah. Material nosilne konstrukcije je v tem primeru sicer drugačen kot pri zunanji steni, vendar gre kot vidimo iz preglednic 4 in 5 še vedno za masivno konstrukcijo s primerljivo specifično toploto in veliko večjo gostoto. V kolikor bi želeli za nosilno konstrukcijo izbrati opeko, bi izbrali »Monta strop«, ki pa je v Sloveniji manj pogost. Notranji omet zanemarimo in predpostavimo vidni beton. Na armirano betonski plošči je nameščena parna zapora. Nato enako kot pri varianti 1, sledita XPS, ki se mehansko pritrdi v konstrukcijo, in samolepljiva bitumenska hidroizolacija s posipom.

Preglednica 9: Sestava konstrukcijskega sklopa ravna streha, varianta 2. Vir: [32].

Sloj (od notri na ven)	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m ³]	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Armirano betonska plošča	15	2,5	880	2400	0,5
Parna zapora	0,2	0,4	1800	930	/
XPS	26,8	0,04	1450	35	/
Bitumenska hidroizolacija	0,5	0,23	1000	1100	0,87

Grafični prikaz:

U-faktor: 0,145 W/(m²K)

① Armirano betonska plošča (150 mm) ③ XPS (268 mm)
 ② Parna zapora ④ Bitumenska hidroizolacija - Izoself

2.3.3.3.3 Varianta 3

Z butano zemljo je nemogoče zasnovati nosilno horizontalno konstrukcijo, saj nima ustrezne natezne trdnosti. Obstajajo sicer določeni sistemi, podobni »Monta stropu«, z armirano betonskimi nosilci in bloki iz butane zemlje, vendar gre za zelo redko uporabljen in malo razvit sistem. Da se ohrani velika masa stavbnega ovoja, se izvede 20 cm debela armirana betonska plošča, na katero se položi 30 cm debele plošče iz butane zemlje. Nad ploščami iz butane zemlje se izvede naklonski beton za potrebe odvodnjavanja, na katerega se lepi bitumenska hidroizolacija s posipom. Gre sicer za nenavadno in dokaj teoretično zasnovo strehe, ki pa je v kontekstu zasnove raziskave še vedno zanimiva. Sestava je prikazana v spodnji preglednici 10. U-faktor tako kot pri zunanji steni variante 3, ne ustreza zahtevam PURES-a.

Preglednica 10: Sestava konstrukcijskega sklopa ravna streha, varianta 3. Vir: [32].

Sloj (od notri na ven)	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m³]	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Armirano betonska plošča	15	2,5	880	2400	0,5
Parna zapora	0,2	0,4	1800	930	/
Butana zemlja	30	1,0	1260	2000	/
Naklonski beton	5	2,0	950	2400	
Bitumenska hidroizolacija	0,5	0,23	1000	1100	0,87
Grafični prikaz:					
U-faktor: 1,726 W/(m²K) ① Armirano betonska plošča (200 mm) ② Parna zapora ③ Butana zemlja (300 mm) ④ Naklonski beton (50 mm) ⑤ Bitumenska hidroizolacija					

2.3.3.3.4 Varianta 4

Kot pri zunanji steni gre tudi v primeru ravne strehe za enako sestavo kot pri varianti 3, le da se doda toplotna izolacija, s čimer izpolnimo zahteve PURES-a. Zasnova konstrukcijskega sklopa je prikazana v spodnji preglednici 11.

Preglednica 11: Sestava konstrukcijskega sklopa ravna streha, varianta 4. Vir: [32].

Sloj (od notri na ven)	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m ³]	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Armirano betonska plošča	15	2,5	880	2400	0,5
Parna zapora	0,2	0,4	1800	930	/
Butana zemlja	30	1,0	1260	2000	/
Naklonski beton	5	2,0	950	2400	
XPS	25,2	0,04	1450	35	/
Bitumenska hidroizolacija	0,5	0,23	1000	1100	0,87
Grafični prikaz:	U-faktor: 0,145 W/(m²K)				

2.3.3.4 Notranje stene

Gre za konstrukcijski sklop, ki sicer ni del zunanjega stavbnega ovoja, vendar je njegova vloga pri toplotnem odzivu stavbe pomembna. Toplotna masa notranjih sten stavbe tako nosilnih kot nenosilnih namreč predstavlja zelo učinkovit pristop k zagotavljanju pasivne toplotno akumulacijske sposobnosti stavbe. Sistem visoke toplotne mase v notranjosti je primeren za podnebja, kjer se pojavlja tako potreba po ogrevanju kot tudi po hlajenju [2]. V hladnem delu leta namreč s pomočjo direktnega zajema sončnega sevanja preko južno orientiranih transparentnih delov stavbnega ovoja podnevi v predelne stene shranjujemo toploto. Ta se nato zvečer in ponoči sprošča nazaj v prostor. Učinkovitost sicer ni odvisna le od mase notranjih sten, temveč tudi od razporeditve odprtin in pohištva v stavbah. V toplem delu leta pa lahko v kombinaciji z nočnim prezračevanjem bistveno zmanjšamo potrebo po hlajenju. Toplota se namreč čez dan akumulira v masivnih stenah v nočnem času pa jo s prezračevanjem odvedemo iz stavbe. V kolikor nam nato čez dan uspe čim bolj preprečiti solarne dobitke in zmanjšati vdor zunanje zraka v notranjost lahko dosežemo bistveno nižje notranje temperature in počasnejše segrevanje stavbe [2]. Obe strategiji veljata tudi za zunanje stene stavbnega ovoja, vendar je predvsem strategija pasivnega ogrevanja v tem primeru zaradi ne izpostavljenosti sončnemu sevanju precej manj učinkovita.

Kljub velikemu potencialnemu vplivu toplotne mase notranjih sten na toplotni odziv stavbe pa je ob pregledu literature moč zaznati relativno slabo strokovno raziskanost teme. Ob pregledu literature namreč ni bilo moč zaznati niti ene raziskave, kjer bi se ločeno preverjal vpliv toplotne mase stavbnega ovoja in notranjih sten. Običajno se pri podobnih analizah kot je ta, predpostavi, da so notranje stene v podobni sestavi kot zunanje, vendar to v tem primeru ne pride v poštev, saj lahko predpostavimo, da bi slednje močno vplivalo na rezultate. Hkrati se je pri takšnih raziskavah preverjal le en tip stavbnega ovoja.

Ker je vpliv lahko velik, raziskav in smernic za analize pa ni, smo se odločili, da bomo pri analizi vpliv notranjih sten na toplotni odziv kar se da zmanjšali. Tako se pri računskem modelu predpostavi, da so vse notranje stene nenosilne in se pri vseh štirih variantah uporabi lahki suho montažni sistem iz aluminijastih profilov, steklene volne in enojne mavčno kartonaste plošče na vsaki strani v skupni debelini 15 cm, kot je prikazano v preglednici 12.

Z izjemo notranjih sten je stavba modelirana kot prazna, saj ima tudi pohištvo svojo toplotno maso in lahko precej vpliva na rezultate tako v smislu akumulacije toplote, kot tudi z vidika vpliva na zračne tokove znotraj con.

Preglednica 12: Sestava konstrukcijskega sklopa notranja stena. Vir: [32].

Sloj	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Specifična toplota c [J/kgK]	Gostota ρ [kg/m³]	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Mavčno kartonasta plošča Knauf GKF	1,25	0,23	1100	800	0,5
Steklena volna	12,5	0,037	840	16	/
Mavčno kartonasta plošča Knauf GKF	1,25	0,23	1100	800	0,5
Grafični prikaz:					

2.3.4 Stavbno pohištvo

2.3.4.1 Okna

Za toplotni odziv stavbe je zelo pomemben tudi transparentni del stavbenega ovoja. Ta namreč omogoča vstop direktnega sončnega sevanja v notranjost stavbe in nato shranjevanje energije, na drugi strani pa mora onemogočiti prehod toplote med zunanostjo in notranjostjo. Ima tudi zelo pomembno funkcijo pri vizualnem udobju in zagotavljanju osvetljenosti z naravno svetlobo. Tudi pri zasnovi stavbnega pohištva se upošteva zahteve PURES-a. Lastnosti uporabljenih oken so podane preglednici 13.

Preglednica 13: Vrednost parametrov oken. Izračun izveden s programom WINDOW [56].

Parameter	Vrednost
Vrsta zasteklitve	Troslojna
Debelina stekla [mm]	Zunanje steklo: 4, notranji stekli: 4,8
Debelina medstekelnega prostora [mm]	12
Plin v medsteklenm prostoru	90 % Argon, 10 % Zrak
U-faktor okna [W/(m²K)]	0,985
U-faktor zasteklitve [W/(m²K)]	1,008
U-faktor okvirja [W/(m²K)]	0,840
Debelina okvirja [mm]	117
g-faktor	0,484
LT faktor	0,746

Za sestavo okna smo uporabili materiale iz knjižnice programa WINDOW. Izbrali smo lesen okvir debeline 117 mm z nizkim U-faktorjem in izoliranim distančnikom v medstekelnem prostoru. Zasteklitev je troslojna, kar omogoča večjo stopnjo toplotne izolativnosti. Gre za sodobno, običajno sestavo, kjer je notranje steklo prevlečeno z nizko emisijskim (*angl.* low-E) nanosom. Za g in LT faktor se izbere srednja vrednost. LT faktor v tem primeru niti ni pomemben saj vpliva le na vizualno udobje. Pomemben pa je g-faktor, ki določi koliko sončne energije lahko preide skozi zasteklitev. Odvisen je od vrste in debeline stekla, slojnosti zasteklitve, debeline medstekelnega prostora, nanosov na steklih itd. Običajno se z nižanjem U-faktorja niža tudi g-faktor zasteklitve. Kljub pomembnosti parametra pa je preliminarne študija pokazala, da tudi v primeru nerealno visoke vrednosti g-faktorja to bistveno ne spremeni rezultatov. Odstopanja pri različnih variantah so bila do 2 %. Medstekelni prostor je napolnjen z mešanico argona (90 %) in zraka (10 %) v debelini 12 mm, kar pri predvideni plinski mešanici omogoča največjo možno toplotno izolativnost.

2.3.4.2 Senčila

Senčila so zelo pomemben del stavbnega ovoja, saj predstavljajo pasiven ukrep za preprečevanje pregrevanja zaradi vpliva sončnega sevanja v toplem delu leta. Kot so v svoji raziskavi ugotovili Košir *et al.* [27] lahko s senčenjem v Ljubljani pri večjih površinah zasteklitve zmanjšamo potrebno energijo za hlajenje tudi za 79,4 %. Velika razlika pa je tudi med uporabo fiksnih ali pomičnih senčil. Ugotavljajo, da se s pomičnimi senčili dosega bistveno boljše rezultate. V primeru toplejših klim je senčenje še pomembnejše saj je tam sončno sevanje intenzivnejše, zunanje temperature pa višje. Za računski model se tako predvidi uporaba zunanjih pomičnih žaluzij z visoko reflektivnostjo. Predpostavi se fiksni naklon lamel pod kotom 45 ° ko so senčila v uporabi (spuščena). Določitev načina delovanja senčil pa je bolj kompleksna. Standard ISO 52016-1 [37] določa, da lahko načrtujemo delovanje pomičnih senčil na podlagi letnega časa, zasedenosti z uporabniki, notranje operativne temperature ali jakosti sončnega sevanja v ravnini zasteklitve. Kot ugotavljajo Yun *et. al* [38] je izbira načina delovanja senčil odvisna od podnebja, v katerem se stavba nahaja, od učinka, ki ga hočemo doseči s senčenjem, od orientacije stavbe in od WWR faktorja. V svoji raziskavi so določili mejno vrednost jakosti sončnega sevanja v ravnini zasteklitve za doseganje najboljših rezultatov senčenja s pomičnimi žaluzijami v odvisnosti od omenjenih parametrov. Za podnebja tipa C po Köppen-Geigerjevi podnebni klasifikaciji ugotovili, da je najprimernejša mejna vrednost za aktivacijo senčil 100 W/m². Tudi v naši raziskavi bomo za modeliranje senčenja kot mejno vrednost uporabili prejeta sončno sevanje v ravnini zasteklitve, saj omogoča enostavno in natančno modeliranje senčenja. Za mejno vrednost, pri kateri se avtomatsko aktivirajo senčila, smo določili 200 W/m². Na podlagi ugotovitev, do katerih so prišli Yun *et. al.*, je to namreč optimalna mejna vrednost za južno orientirano fasado s WWR faktorjem 50 % za primer, ko želimo čim bolj zmanjšati energijo potrebno za hlajenje oz. v našem primeru, kjer želimo poleti tekom dneva zagotoviti čim nižje temperature, da ostanemo v coni toplotnega udobja. Hkrati je to tudi mejna vrednost, ki jo za avtomatsko nadzorovana senčila določa standard ISO 52016-1 [37]. V preliminarni študiji smo sicer ugotovili, da nekoliko nižja vrednost daje boljše rezultate v hladnem delu leta, saj se pri mejni vrednosti 200 W/m² v določenih obdobjih pojavlja pregrevanje. To bi lahko rešili na način, da bi za aktivacijo senčil dodali še pogoj, da se ta aktivirajo, ko je presežena določena notranja operativna temperatura. Za takšno pogojevanje se nismo odločili, saj je zmanjšanje udobja zaradi pregrevanja v hladnem delu leta zelo majhno, hkrati pa standard ISO 52016-1 delovanje senčil z več pogoji predvidi le za visoko avtomatizirane in optimizirane stavbe, kar pa naša stavba ni.

Za vsa tri podnebja se predpostavi enaka mejna vrednost, saj je razlika med obravnavnimi podnebjami majhna, geografska razlika med izbranimi lokacijami pa je z gledišča solarne geometrije majhna.

2.3.4.3 Vrata

Zunanja vrata so v tem primeru netransparenten element in je pomemben le U-faktor. U-faktor vrat se določi po PURES-u in znaša $1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Izbere se lesena vrata debeline 8,65 cm s toplotno prevodnostjo $0,19 \text{ W}/(\text{mK})$.

2.3.5 Parametri notranjega okolja

Gre za vhodne podatke, s katerimi definiramo režim delovanja stavbe in navade uporabnikov. Večina parametrov notranjega okolja se določi na podlagi standarda SIST EN 16798-1 [16], ki spada v skupino EPB standardov, katerih cilj je na podlagi enotne metodologije in vhodnih podatkov doseči konsistenco, transparentnost in univerzalnost raziskav. Parametri, ki za toplotno okolje niso pomembni, se ne definirajo.

2.3.5.1 Notranji toplotni viri

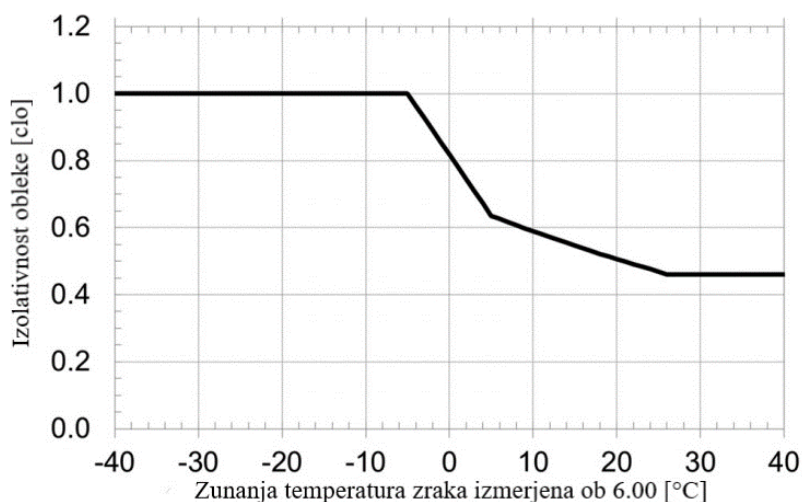
Kot ugotavljajo Claesa *et al.* [39] imajo notranji toplotni viri poleg prezračevanja največji vliv na notranje toplotno okolje. Ker je cilj računski model čim bolj približati realnemu stanju, je pravilno modeliranje notranjih virov zelo pomembno. Notranji viri, ki jih za enodružinsko hišo določa standard SIST EN 16798-1, so prikazani v preglednici 14. Izjema je razsvetljava, za katero standard ne podaja vrednosti, pridobljena vrednost pa je bila določena na podlagi izkušenj projektantov umetne razsvetljave.

Preglednica 14: Notranji viri povzeti iz aneksa C standard SIST EN 16798-1. Vrednosti za stanovanjsko stavbo – enodružinsko hišo. Viri: [16], [40].

Notranji vir	Vrednost [W/m^2]
Uporabniki	4,4 oz. 120 W/uporabnika
Naprave	2,4
Razsvetljava	1,5

Toplota, ki jo oddaja uporabnik, je odvisna od stopnje metabolizma. Standard SIST EN 16798-1 sicer predpisuje zasedenost stavbe $42,5 \text{ m}^2/\text{uporabnika}$ oz. $0,024 \text{ uporabnika}/\text{m}^2$ in proizvedeno energijo v vrednosti $2,8 \text{ W}/\text{m}^2$, kar predstavlja energijo proizvedeno pri stopnji metabolizma 1,2 met, kar je enako 120 W/osebo. Glede na velikost naše stavbe ter ob upoštevanju, da je stavba projektirana za 3 osebe, ta vrednost v našem primeru znaša $27,4 \text{ m}^2/\text{uporabnika}$ oz. $0,036 \text{ uporabnika}/\text{m}^2$. Toplota, ki jo oddaja uporabnik, je še vedno 120 W/osebo, kar za naš primer pomeni vrednost $4,4 \text{ W}/\text{m}^2$. Stopnja aktivnosti se tekom dneva spreminja, kar določa urnik aktivnosti uporabnikov, ki ga ravno tako predpisuje standard SIST EN 16798-1. Urnik je definiran tudi za naprave in razsvetljava. Urniki so prikazani v prilogi A. Izolativnost obleke se določi na podlagi dinamičnega predikativnega modela izolativnosti obleke, ki jo definira standard ASHRAE 55 [18]. Standard SIST EN 16798-1 namreč pri stavbah brez aktivnih sistemov ogrevanja in hlajenja dopušča prosto prilagajanje stopnje izolativnosti obleke na podlagi zunanjih in notranjih temperaturnih razmer. Izolativnost se po dinamičnem modelu, ki sta ga leta 2013 razvila Schiavon in Lee [41], določi na podlagi baz standardov ASHRAE RP-884 [42] in ASHRAE RP-

921 [43]. Ta podajata 6333 možnih scenarijev toplotnega udobja in stopnje obleke na podlagi zunanje temperature zraka izmerjene ob 6.00 [41]. Kot vidimo iz spodnje slike 10, je pri zunanjih temperaturah nižjih od -5°C izolativnost obleke 1 clo. Pri zunanjih temperaturah višjih od 26°C pa je izolativnost obleke 0,46 clo. Za zunanje temperature med -5°C in 26°C pa se izolativnost obleke določi kot funkcijo zunanje temperature zraka merjene ob 6.00.



Slika 10: Grafični prikaz dinamičnega predikativnega modela izolativnosti obleke na podlagi zunanjih temperatur zraka izmerjenih ob 6.00. Vir [19].

2.3.5.2 Prezračevanje

Predvideno je naravno prezračevanje. Standard določa minimalno velikost odprtih za naravno prezračevanje, ki znaša 100 cm^2 za kuhinjo in jedilnico ter 60 cm^2 za bivalne in spalne prostore. Glede na izbran WWR faktor posameznih prostorov in tipa odpiranja oken je ta zahteva izpolnjena. Parametri prezračevanja so podani v preglednici 15.

Preglednica 15: Parametri prezračevanja. Vir: [16], [44].

Parameter	Vrednost
Hitrost zraka	0,1 m/s
Skupen dovod zraka: prezračevanje + infiltracija	$0,5\text{ l/s}\cdot\text{m}^2 = 0,6\text{ h}^{-1}$
Infiltracija	$0,28\text{ h}^{-1}$
Prezračevanje	$0,32\text{ h}^{-1}$
Minimalno prezračevanje ko je stavba prazna (brez infiltracije)	$0,1\text{ l/(s}\cdot\text{m}^2) = 0,12\text{ h}^{-1}$
Nočno prezračevanje (za topli del leta)	$4,0\text{ h}^{-1}$

Standard SIST EN 16798-1 definira 3 načine, kako lahko definiramo prezračevanje. V tej analizi smo uporabili metodo predpostavljenega dotoka zraka. Določi se skupno vrednost izmenjav prostornine zraka v prostorih $0,6\text{ h}^{-1}$, kar vključuje tudi infiltracijo. Infiltracija zraka je namreč zelo pomemben parameter. Gre za pretok zunanjega zraka v zgradbo skozi razpoke in druge nenamerne odprtine, ki je v glavnem odvisen od zrakotesnosti stavbnega ovoja, temperaturnih razlik med notranjostjo in zunanostjo ter od koeficienta pritiska vetra. Kot so v svoji raziskavi ugotovili Charisi *et al.* [45], je predvsem

koeficient pritiska vetra izjemno pomemben faktor. Odvisen je od oblike stavbe, smeri vetra, izpostavljenosti fasade in predvsem od mikrolokacije. Ugotovili so, da uporaba različnih koeficientov pritiska vetra povzroči različne vrednosti infiltracije, kar pri izračunih lahko privede do velikih napak. Standard SIST EN 16798-1 za naravno prezračevane stavbe ne podaja vrednosti infiltracije ampak le skupno vrednost dovoda zraka, ki vsebuje tudi infiltracijo. Takšno metodo predpisuje tudi Tehnična smernica TSG-1-004 Energijska učinkovitost stavb [44], ki je pri nas obvezna za uporabo. Hkrati pa tudi podaja metodo za izračun infiltracije. V našem primeru se predpostavi vrednost $0,28 \text{ h}^{-1}$ [46], ki se uporabi na vseh lokacijah, čeprav bi bila v realnosti drugačna. S tem je izpolnjen tudi pogoj, da je za potrebe odvoda emisij materialov vedno prisotno minimalno prezračevanje $0,12 \text{ h}^{-1}$. To velja tudi za čas ko uporabnikov v stavbi ni. Infiltracija, ki hkrati predstavlja minimalno potrebno prezračevanje je tako prisotna ves čas v vrednosti $0,28 \text{ h}^{-1}$, ostali dovod zraka v vrednosti $0,32 \text{ h}^{-1}$ (v nadaljevanju prezračevanje), ki je potreben da izpolnimo zahteve standarda pa je vezan na urnik uporabnikov. V kolikor je zasedenost stavbe 100 % oziroma $0,036 \text{ uporabnika/m}^2$ je definirano naravno prezračevanje v vrednosti $0,32 \text{ h}^{-1}$. Ta vrednost pa se nato zmanjša glede na odstotek zmanjšanja prisotnosti uporabnikov.

V topli polovici leta smo definirali pasivno hlajenje s pomočjo nočnega prezračevanja. Gre za izjemno pomembno pasivno strategijo hlajenja. Shaviv *et al.* [47] so analizirali vpliv nočnega prezračevanja na toplotni odziv štirih različno masivnih stavb v različnih podnebjih Izraela. Dokazali so da je znižanje maksimalne notranje temperature odvisno od števila izmenjav zraka na uro, toplotne mase stavbe in nihanja zunanjih temperatur. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi Sun *et al.* [48], ki so analizirali kombinacije toplotne mase in nočnega prezračevanja v različnih Kitajskih podnebjih. Ugotavljajo, da je glede na različna podnebja optimalna drugačna stopnja toplotne mase in različna intenziteta nočnega prezračevanja. Hkrati opozarjajo na velik vpliv teh dveh parametrov na toplotno udobje. Glede na pregled literature [49],[50], smo se odločili, da se pri osnovnem modelu določi konstantno nočno prezračevanje $4,0 \text{ h}^{-1}$, ki se izvaja od 31. 5. do 5. 9. med 20.00 in 7.00 uro in velja za vse tri lokacije in vse variante stavbnega ovoja. Med 20.00 in 22.00 uro se prezračevanje izvaja s polovično intenziteto, med 22.00 in 7.00 pa s polno. Obdobje smo določili na podoben način, kot se določi kurilna sezona. Predpostavili smo pogoj, da se nočno prezračevanje začne izvajati, ko je 3 dni zapored zunanja temperatura zraka ob 22.00 nad $18,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Z nočnim prezračevanjem nato začnemo četrty dan. Z nočnim prezračevanjem pa zaključimo četrty dan, ko je zunanja temperatura zraka ob 22.00 tri dni zapored pod $18,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperaturo $18,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ smo določili na podlagi enačbe (4), saj $18,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ predstavlja 4 večji del T_{com} . Obdobje smo določili za vsako lokacijo posebej in nato prevzeli povprečno vrednost. Samo na ta način namreč dobimo nevtralne rezultate, s katerimi je moč potrditi ali ovreči zastavljeno hipotezo. Se je pa potrebno zavedati omejitve, ki jo takšni vhodni podatki prinašajo. Obstaja namreč velika verjetnost, da bo na določeni lokaciji ob določenem času zaradi takšnih vhodnih podatkov prišlo do negativnega vpliva na toplotni odziv. V določenih primerih lahko pride do podhlajevanja, na drugi strani pa do neučinkovitosti zaradi previsokih zunanjih temperatur, na kar opozarjajo tudi Sun *et al.* Pogoji bodo kljub temu enaki za vse variante, kar nam bo omogočilo, da ugotovimo razliko med toplotnimi odzivi posameznih variant znotraj posameznih podnebj. Prehod zraka med posameznimi toplotnimi conami je onemogočen, saj to dokazano zelo vpliva na toplotni odziv, hkrati pa je prehod zraka zelo odvisen od vetrnih razmer mikrolokacije. Učinkovitost prezračevanja se namreč v odvisnosti od prehoda zraka med conami lahko bistveno izboljša ali pa tudi poslabša.

2.4 Študija občutljivosti vhodnih podatkov

V drugem delu naloge bomo izvedli občutljivostno analizo ključnih vplivnih parametrov povezanih z zasnovo stavbnega ovoja in notranjosti stavbe, ki imajo pomembno vlogo pri toplotnem odzivu stavbe. Preverja se ukrepe, ki ne posegajo v geometrijo stavbe in sicer:

- 1.) **Toplotna masa notranjih sten:** Poveča se toplotna masa notranjih sten. To dosežemo z uporabo masivnega konstrukcijskega sklopa. Suho montažni sistem se nadomesti s predelno steno iz peno betona s specifično toploto 1000 J/(kgK) . Gostota peno betona pa se giblje med 300 in 700 kg/m^3 . Izbere se srednja vrednost 500 kg/m^3 . Toplotna prevodnost znaša $0,108 \text{ W/(mK)}$. Omet se zanemari. Toplotna masa notranjih sten je namreč izjemnega pomena tako za pasivno ogrevanje kot hlajenje kar so potrdili tudi Shaviv *et al.* [47]. Pri eni izmed variant analizirane stavbe so povečali samo masivnost predelnih sten, kar je znižalo maksimalno temperaturo za približno $0,5 \text{ °C}$ na pram enakemu modelu z lahkimi predelnimi stenami. Do podobnih ugotovitev sta prišla tudi Long in Ye [51]. V svoji raziskavi sicer ugotavljata, da je toplotna masa notranjih sten manj pomembna kot pri zunanjih stenah, vendar ima kljub temu veliko vlogo pri toplotnem odzivu in priporočata uporabo masivnih notranjih sten.
- 2.) **Nočno prezračevanje:** Preveri se vpliv intenzitete nočnega prezračevanja na toplotni odziv stavbe in poišče optimalne vrednosti. Za vsako lokacijo in varianto stavbnega ovoja se poišče optimalno intenziteto nočnega prezračevanja. Različna literatura [47],[48],[49], ki je omenjena v prejšnjih poglavjih, izpostavlja pomembnost lokacije, toplotne mase stavbe in intenzitete nočnega prezračevanja na toplotni odziv stavbe. Vpliv intenzitete nočnega prezračevanja na toplotni odziv stavbe bomo analizirali na enak način, kot so to v svoji analizi izvedli Pajek *et al.* [49]. Analizira se šest različnih stopenj nočnega prezračevanja in sicer $0,7 \text{ h}^{-1}$, $1,5 \text{ h}^{-1}$, 3 h^{-1} , 5 h^{-1} , 7 h^{-1} in 14 h^{-1} . Urnik nočnega prezračevanja ostane enak. Gre za edini analiziran organizacijski ukrep – ukrep, ki je povezan z uporabo stavbe in ne z njeno gradbeno-arhitekturno zasnovo.
- 3.) **Toplotna masa toplotne izolacije:** Analizira se vpliv toplotne kapacitete toplotne izolacije na toplotni odziv enodružinske stavbe. To se doseže z uporabo toplotne izolacije iz lesenih vlaken z visoko specifično toploto in gostoto. Gre namreč za snovni lastnosti materiala, ki neposredno vplivata na toplotno kapaciteto. Lastnosti toplotno izolacijskih materialov so prikazane v preglednici 16. Pri osnovnem modelu se namreč pri vseh variantah uporabljajo materiali z nizko toplotno kapaciteto. Toplotna masa izolacije pa ima poleg toplotne prevodnosti največji vpliv na toplotni odziv (Yousefi in Tariku [52]). Še posebej to velja za lahke endoskeletne stavbe. Pajek *et al.* [49] so v svoji raziskavi analizirali vpliv različnih ukrepov za izboljšanje toplotnega odziva lahkega endoskeletnega konstrukcijskega sklopa. Ugotovili so, da ima uporaba toplotne izolacije iz lesenih vlaken, ki je povečala toplotno kapaciteto lahkega konstrukcijskega sklopa, poleg uporabe fazno spremenljivih materialov (*angl.* PCM) največji vpliv na toplotni odziv konstrukcijskega sklopa. Poleg konstrukcije stavbnega ovoja lahko toplotna izolacija potencialno največ prispeva k toplotni masi celotnega sklopa, saj je to sloj z največjo debelino. To kot ugotavljajo Pajek *et al.* še posebej velja pri uporabi toplotne izolacije z večjo toplotno kapaciteto, saj ima takšna izolacija običajno večjo toplotno prevodnost in potrebujemo za zagotavljanje enake toplotne prehodnosti debelejši sloj izolacije, kar še dodatno poveča toplotno kapaciteto.

Pajak *et al.* so ugotovili, da takšen ukrep sam po sebi na nivoju posameznega konstrukcijskega sklopa ni dovolj, da dosežemo tako dober toplotni odziv, kot z masivnim eksoskeletnim konstrukcijskim sklopom. Zato bomo v naši analizi preverili vpliv takšnega ukrepa na nivoju celotne stavbe. Hkrati bomo tudi preverili, kako toplotna izolacija z visoko toplotno maso vpliva na toplotni odziv masivnega konstrukcijskega sklopa. Spremeni se samo toplotno izolacijo konstrukcijskih sklopov zunanje stene in ravne strehe. Pri lahki stavbi, kjer se pri obeh sestavah pojavljata dva različna toplotno izolacijska materiala, se preveri tudi vpliv pozicije masivne toplotne izolacije, saj je pozicija, kot to ugotavljajo Pajak *et al.* pomemben faktor.

Preglednica 16: Primerjava lastnosti toplotno izolacijskih materialov osnovnih variant in lesenih vlaken. Gostote izolacij iz lesenih vlaken variirajo med 70 in 270 kg/m³. Izbere se srednjo vrednost. Vir: [32].

Vrsta toplotne izolacije	Gostota [kg/m ³]	Specifična toplota [J/(kgK)]
EPS	30	1500
XPS	35	1450
Steklena volna	30	830
Kamena volna	40	840
Lesena vlakna	160	2100

Predpostavi se, da ima toplotna izolacija iz lesenih vlaken toplotno prevodnost 0,04 W/(mK). Običajne vrednosti so med 0,04 W/mK in 0,05 W/mK. Izbrali smo nižjo vrednost, saj je enaka kot pri EPS in XPS materialih in se lahko debelina pri menjavi teh slojev ohranja. Na ta način pri teh slojih preverimo samo vpliv povečane toplotne kapacitete, ki jo pridobimo z menjavo materiala, ne pa tudi zaradi povečane debeline konstrukcijskega sklopa.

- 4.) **Solarna absorptivnost notranjih površin:** Vpliv solarne absorptivnosti notranjih površin na toplotni odziv se preveri tako, da se preveri, kako se modeli obnašajo v primeru visoke absorptivnosti (0,8) in v primeru nizke absorptivnosti (0,2). Gre za dva ekstrema, ki ju lahko dosežemo z barvami in materiali, ki se običajno uporabljajo v notranjosti stanovanjskih stavb. Čeprav je pomembnost solarne absorptivnosti zunanjega ovoja dobro raziskano področje, je namreč o vplivu solarne absorptivnosti notranjih površin na toplotni odziv stavb narejenih manj raziskav. Solarno absorptivnost se spremeni na vseh notranjih površinah.
- 5.) **Materialne lastnosti talnih oblog:** Analizira se vpliv različnih vrst talnih oblog na toplotni odziv stavbe. Gre za površino, na katero v hladnem delu leta pade največ sončnega sevanja in ima pomembno vlogo pri pasivnem ogrevanju. Ker vemo, da toplotna masa služi kot akumulator toplote, bi morale bolj masivne talne obloge v kombinaciji z masivnim tlakom plavajočega poda pokazati boljše rezultate. Na to temo je bilo narejenih že več raziskav, vendar se te običajno osredotočijo na primerjavo različnih talnih oblog z vidika toplotne prehodnosti ter učinkovitosti v sklopu sistemov talnega gretja in rabe energije. V naši analizi pa bomo preverili, kako na toplotno udobje celotne stavbe vplivajo različne vrste talnih oblog. Analizirane talne obloge in njihove materialne lastnosti pomembne za našo analizo so prikazane v spodnji preglednici 17.

V programu EnergyPlus smo za modeliranje distribucije sončnega sevanja izbrali minimalno senčenje, kar daje bolj konservativne rezultate. Tla namreč v tem primeru prejmejo nekoliko manj sončnega sevanja, kot ga v resnici, stene in strop pa več.

Preglednica 17: Vrste in lastnosti talnih oblog, ki jih bomo analizirali. Vir [32],[53],[54],[55]. Pri parketu je emisivnost odvisna od vrste lesa in tipa obdelave. Izbere se povprečna vrednost.

Talna obloga	Debelina [cm]	Toplotna prevodnost λ [W/(mK)]	Gostota [kg/m ³]	Specifična toplota [J/(kg·K)]	Emisivnost ϵ	Koeficient absorpcije sončnega sevanja α
Keramika (osnovni model)	1,30	1,20	840	2000	0.90	0,5
Lesen parket (trdi les)	1,00	0,233	700	2100	0,90	0,5
Kamnita obloga (granit)	2,00	1,59	2700	1140	0.90	0,5
Vinilne plošče	0,20	0,40	800	1000	0,93	0,5
Preproga	0,94	0,06	186	1360	0,98	0.5

V modelu se keramika iz osnovnega modela nadomesti s posamezno finalno oblogo. Lepila se pri tem zanemarijo. Na koncu se preveri še, kako se odziva model, ko na keramična tla iz osnovne variante dodamo sloj, ki predstavlja preprogo. Predpostavi se preprogo po celotnem prostoru kot npr. tapison.

2.5 Programska orodja

2.5.1 DesignBuilder

Model smo generirali z uporabo grafičnega uporabniškega vmesnika DesignBuilder (verzija 5.5.0.12). DesignBuilder deluje na osnovi programskega orodja EnergyPlus in omogoča 3D modeliranje, dinamično analizo kakovosti notranjega okolja, osvetljenosti, prezračevanja, rabe energije, senčenja ter izvedbo različnih simulacij. Programsko orodje je izjemno primerno za izvedbo parametričnih študij [17].

2.5.2 EnergyPlus

Simulacijo toplotnega odziva stavbe smo izvedli s programskim orodjem EnergyPlus (verzija 9.6.0). EnergyPlus je celovito simulacijsko programsko orodje za izvedbo energijskih analiz. Uporablja se za simuliranje in analizo energijskih tokov, rabe energije, toplotnega odziva, prezračevanja, osvetljenosti, sistemov ogrevanja in hlajenja ter ostalih procesov v stavbah [17]. Model smo generirali s programskim orodjem DesignBuilder, saj ta omogoča lažje modeliranje, analize pa smo zaradi preglednejšega nadzora nad robnimi pogoji ter potekom analize izvedli s programskim orodjem EnergyPlus.

2.5.3 Ubakus

Za zasnovu konstrukcijskih sklopov in izračun toplotne prehodnosti smo uporabili programsko orodje Ubakus. Gre za interaktivno programsko orodje, ki omogoča izračun toplotne prehodnosti, analizo prehoda toplote in difuzije vodne pare [32]. Program vsebuje obsežno knjižnico materialov, ki smo jo

uporabili za sestavo konstrukcijskih sklopov, da ti ustrezajo zasnovanim tipom stavbnega ovoja in zahtevam PURES-a.

2.5.4 WINDOW

Za določitev optičnih in toplotnih lastnosti oken smo uporabili program WINDOW (verzija 7.7). Gre za program namenjen zasnovi toplotnih (U-faktor), optičnih (LT faktor) in solarnih (g faktor) lastnosti zasteklitev, sistemov zasteklitev in oken [56]. Program vsebuje širok nabor zasteklitev, plinov, okvirjev in senčil, s pomočjo katerih smo zasnovali okno, ki ustreza zahtevam PURES-a. Program za uporabo pri zasnovi oken in zasteklitev priporoča tudi inženirski referenčni priročnik za EnergyPlus [19].

»Ta stran je namenoma prazna.«

3 REZULTATI

Rezultati so prikazani v dveh sklopih. V prvem delu so v poglavjih 3.1–3.3 na podlagi metode adaptivnega toplotnega udobja in poteka notranjih temperatur prikazani rezultati osnovnih modelov, v drugem delu pa so v poglavju 3.4 predstavljeni rezultati občutljivostne analize. Izračun parametrov toplotnega okolja se je izvajal vsakih 15 minut.

3.1 Toplotni odziv in toplotno udobje na podlagi modela adaptivnega toplotnega udobja

Zaradi omejitve modela adaptivnega toplotnega udobja, ki jo predpisuje standard SIST EN 16798-1, so rezultati prikazani na dva načina, da lahko izpolnimo zadane cilje. V tem poglavju se upošteva omejitev standarda SIST EN 16798-1, ki pravi, da je model uporaben le v območju zunanjih temperatur 10 °C–30 °C. V tem primeru smo določili odstotek časa v obdobju uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja, ko je doseženo toplotno udobje. Tako prikažemo razlike med toplotnim odzivom posameznih variant na podlagi učinkovitosti posamezne variante znotraj različnih podnebij. Obdobje v katerem je model uporaben, se v tem primeru glede na lokacije precej razlikuje, kot vidimo v preglednici 18. V Ratečah je npr. model zaradi nižjih temperatur uporaben približno polovico časa manj, kot je uporaben v Portorožu. Zato smo v naslednjem poglavju za primerjalno obdobje vzeli celotno leto. Za obdobje, ko so zunanje temperature pod 10 °C in nad 30 °C, smo predpostavili, da velja toplotno neudobje. S tem smo določili enotno primerjalno osnovo, ki omogoča direktno primerjavo toplotnega odziva posameznih variant med različnimi lokacijami. Tako lahko določimo vpliv različnih tipov podnebja na toplotni odziv posameznih variant stavbnega ovoja in tako izpolnimo še en zadani cilj.

Preglednica 18: Prikaz časa v urah in odstotkih po posameznih lokacijah, ko je model adaptivnega toplotnega udobja po standardu SIST EN 16798-1 uporaben (T_{rm} je med 10 °C in 30 °C).

Lokacija	Hladni del leta 1.1.–30.4. in 1.11.–31.12. (4368 h)		Topli del leta 1.5.–31.10. (4392 h)		Celotno leto (8760 h)	
	[h]	[%]	[h]	[%]	[h]	[%]
Ljubljana	600	13,8 %	3840	86,9 %	4440	50,7 %
Portorož	960	22,1 %	4392	99,5 %	5352	61,1 %
Rateče	0	0,0 %	2592	58,7 %	2592	29,6 %

Rezultati so prikazani tako za celotno leto, kot tudi ločeno za hladni in topli del leta. Rezultati za celotno leto predstavljajo glavne rezultate naših analiz, medtem ko so rezultati za topli in hladni del leta pomembni z različnih vidikov. Kot je bilo omenjeno, analiziramo pasiven načrtovalski ukrep na nivoju stavbnega ovoja, ki ima tako funkcijo pasivnega hlajenja, kot tudi pasivnega ogrevanja. Zato je pomembno, da vpliv toplotne mase obravnavamo tudi ločeno z vidika obeh pasivnih strategij. Toplo in hladno polovico leta smo določili na podlagi zunanjih povprečnih mesečnih temperatur. Topli del leta predstavlja šest najtoplejših mesecev, hladni del pa šest najhladnejših mesecev v letu. V Portorožu in Ratečah so najtoplejši meseci maj, junij, julij, avgust, september in oktober, medtem ko so v Ljubljani to april, maj, junij, julij, avgust in september. Glede na to, da je v Ljubljani razlika med povprečno aprilsko in oktobrsko temperaturo le 0,7 °C, se za topli del leta za vse lokacije privzame obdobje od 1. 5. do 31. 10. V Ratečah model v hladnem delu leta, kot lahko vidimo iz preglednice 18 ni uporaben. V tem primeru primerjava med hladnim in toplim delom leta ni možna, rezultati toplega dela leta pa tako predstavljajo letno vrednost toplotnega udobja.

3.1.1 Toplotno udobje v času uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja glede na standard SIST EN 16798-1

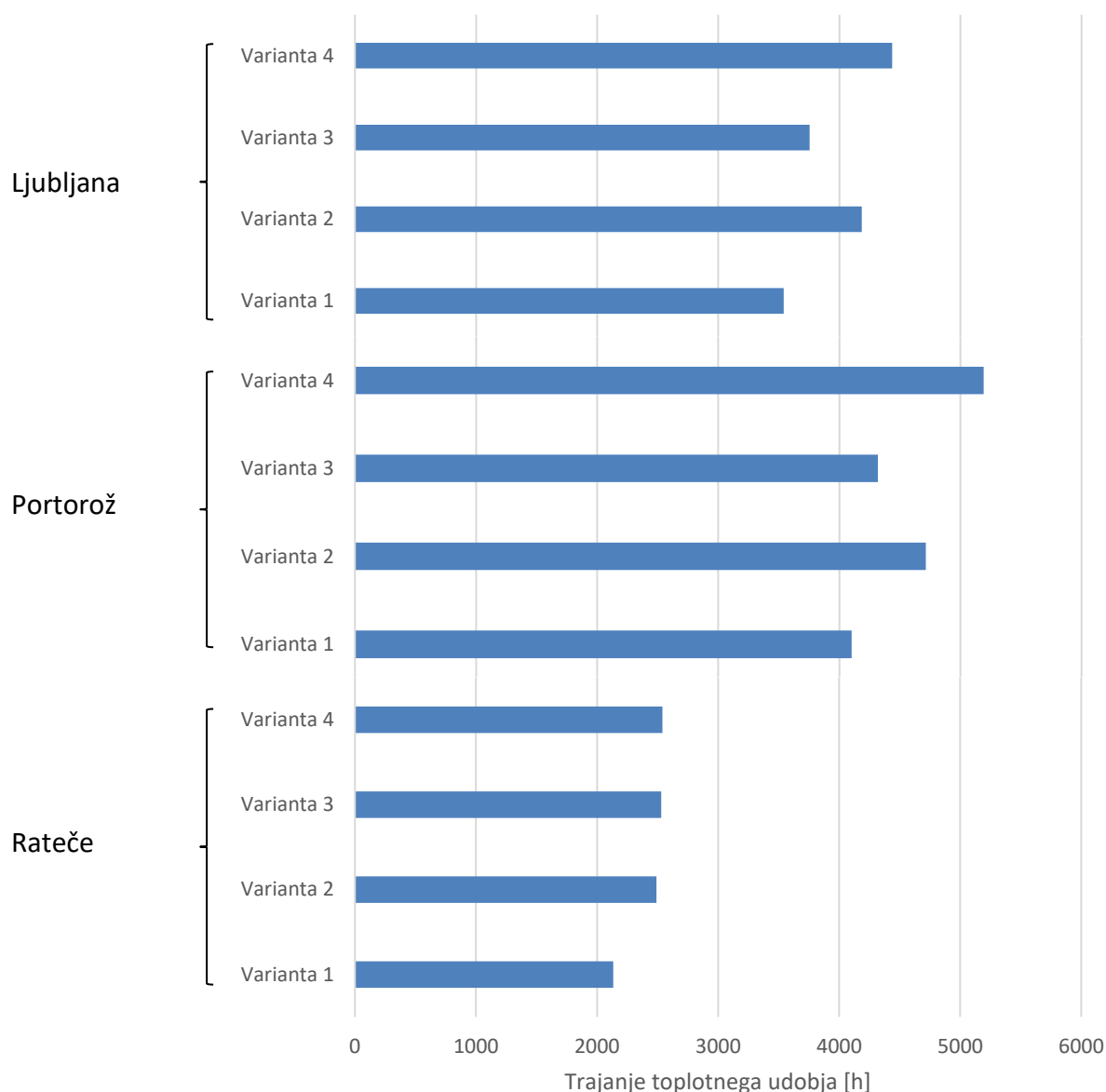
V preglednici 19 so prikazani rezultati analize toplotnega odziva računskih modelov z osnovnimi variantami stavbnega ovoja. Rezultati so izraženi v času, ko je v obdobju uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja doseženo toplotno udobje. Čas je hkrati prikazan v odstotkih, kjer 100 % predstavlja čas uporabnosti modela iz preglednice 18. Na splošno lahko ugotovimo, da so bile na vseh lokacijah v času aplikabilnosti modela dosežene visoke stopnje toplotnega udobja (72,7 %–100 %). Pričakovano je največ časa v letu toplotno udobje doseženo v Portorožu (5192,5 h), najmanj časa pa v Ratečah (2133 h), kar je posledica razlik v trajanju obdobja, ko je model uporaben (preglednica 18). Posledica razlik v trajanju uporabnosti modela je tudi ta, da je v toplem delu leta toplotno udobje doseženo bistveno več časa, kot pa v hladnem delu leta.

Preglednica 19: Rezultati analize toplotnega odziva osnovnih variant stavbnega ovoja, izraženi v času in odstotkih, ko je v času uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja doseženo toplotno udobje.

		Hladni del leta		Topli del leta		Celotno leto	
		[h]	[%]	[h]	[%]	[h]	[%]
Ljubljana	V1	568,00	94,7	2972,75	77,4	3540,75	79,7
	V2	600,00	100,0	3584,25	93,3	4184,25	94,2
	V3	463,25	77,2	3290,50	85,7	3753,75	84,5
	V4	600,00	100,0	3837,00	99,9	4437,00	99,9
Portorož	V1	909,25	94,7	3193,00	72,7	4102,25	76,6
	V2	960,00	100,0	3755,75	85,5	4715,80	88,1
	V3	775,00	80,7	3543,50	80,7	4318,50	80,7
	V4	960,00	100,0	4232,50	96,4	5192,50	97,0
Rateče	V1	/	/	2133,00	82,3	2133,00	82,3
	V2	/	/	2492,00	96,1	2492,00	96,1
	V3	/	/	2529,75	97,6	2529,75	97,6
	V4	/	/	2540,25	98,0	2540,25	98,0
Grafični prikaz variant stavbnega ovoja	 V1  V2  V3  V4						

Analiza je pokazala, da ima varianta 4 pričakovano najboljši toplotni odziv ne glede na vse lokacije, kar je prikazano tudi na grafikonu 1. V Ljubljani je pri varianti 4 doseženo toplotno udobje kar 99,9 % časa, ko je model aplikabilen, kar predstavlja 4437 ur oz. 184,9 dni v letu. V hladnem delu leta je odstotek doseženega toplotnega udobja celo 100 %, kar pomeni, da je ves čas, ko je model adaptivnega toplotnega udobja uporaben, doseženo toplotno udobje. V toplem delu leta se toplotnega udobja pri varianti 4 ne doseže le v treh urah. Tri urno obdobje toplotnega neudobja se pojavlja v času najvišjih poletnih temperatur. V Portorožu je sicer toplotno udobje doseženo več časa (5192,5 ur), kot v Ljubljani (4437ur), vendar tu stavbni ovoj ni tako učinkovit. Udobje je namreč doseženo 97 % časa, kar je za 2,9 odstotne točke manj kot v Ljubljani. Gre za posledico pregrevanja, ki se v podnebjem Portoroža

pojavlja pogostejše. V Ratečah je sicer toplotno udobje doseženo v 98 % časa, kar je več kot v Portorožu, vendar je količina ur (2540,25 ur) tu bistveno manjša. V Ratečah je v nasprotju s Portorožem in Ljubljano vzrok za toplotno neudobje v toplem delu leta prenizka temperatura. To v Ratečah velja tudi za ostale variante. Tako v Ljubljani, kot tudi v Portorožu je pri varianti 4 odstotek, ko dosežemo toplotno udobje v času aplikabilnosti modela, večji v hladnem delu leta. Na obeh lokacijah je toplotno udobje v hladnem delu leta doseženo kar v 100 % časa, ko je model uporaben. Je pa v hladnem delu leta model uporaben le v času prehodnih obdobji (april in november). V Ratečah ta primerjava ni možna, saj model adaptivnega toplotnega udobja v hladnem delu leta zaradi prenizkih zunanjih temperatur ni uporaben.



Grafikon 1: Primerjava trajanja toplotnega udobja pri različnih variantah stavbnega ovoja po metodi adaptivnega toplotnega udobja za Ljubljano, Portorož in Rateče.

Varianti 4 po učinkovitosti v Ljubljani in Portorožu pričakovano sledi varianta 2, ki ravno tako predstavlja kombinacijo nizke toplotne prehodnosti in visoke toplotne mase, le da je toplotna kapaciteta

manjša, kot pri varianti 4. V Ratečah je presenetljivo drugi najboljši rezultat dosegla varianta 3. Varianta 2 na splošno gledano še vedno zagotavlja visoko stopnjo toplotnega udobja. V Ljubljani traja toplotno udobje 4184,25 ur, kar predstavlja 94,2 % časa uporabnosti modela. To pomeni, da toplotno udobje v Ljubljani traja 252,75 ur (5,7 odstotnih točk) manj v primerjavi z varianto 4. Razlika med variantama 2 in 4 je v Portorožu večja in znaša 476,7 ur (8,9 odstotnih točk). V Ratečah pa je razlika le 48,25 ur (1,9 odstotne točke), čeprav je varianta 2 tu po času trajanja toplotnega udobja na tretjem mestu. Razlika do druge najboljše variante 3 je zanemarljiva in znaša le 37,75 ur (1,5 odstotne točke). Tako kot za varianto 4, tudi za varianto 2 velja, da večjo stopnjo toplotnega udobja doseže v hladnem delu leta. Tudi varianta 2 se v hladni polovici leta izkaže z zelo dobrim toplotnim odzivom in nudi udobje ves čas uporabnosti modela. Toplotni odziv variant 2 in 4 je tako glede na metodo adaptivnega toplotnega udobja v hladnem delu leta enak in dodatno povečevanje toplotne mase po tej metodi v hladnem delu leta nima učinka.

Toplotni odziv variante 3 je presenetljivo dober. Z vidika doseženih ur toplotnega udobja v Ljubljani in Portorožu varianta 3 zavzema tretje mesto za variantama 2 in 4. V Ratečah pa, kot smo že omenili, celo doseže drugi najboljši rezultat. Predvsem izstopa dejstvo, da je toplotni odziv variante 3 na vseh lokacijah boljši od variante 1. Kljub presenetljivo dobremu odzivu pa trajanje udobja v Ljubljani in Portorožu precej zaostaja za variantama 2 in 4. V Ljubljani pri varianti 3 toplotno udobje traja 3753,75 ur, kar predstavlja 84,5 % časa uporabnosti modela adaptivnega udobja. V primerjavi z varianto 4 je to 683,25 ur (15,4 odstotnih točk) manj, medtem ko razlika do variante 2 znaša 430,5 ur (9,7 odstotnih točk). V Portorožu se razlika do variante 4 poveča, pri čemer se sicer odstotna razlika zdi podobna kot v Ljubljani (16,3 odstotnih točk), vendar je absolutna razlika v urah bistveno večja in znaša 874 ur (36,42 dni). Gre za posledico različnega obdobja uporabnosti modela na različnih lokacijah. Razlika do variante 2 je v Portorožu manjša kot v Ljubljani in znaša 7,4 odstotnih točk oz. 397,3 ur. Slednje nakazuje na manjšo občutljivost variante 3 na spremembe toplotnega odziva ob premiku v toplejše podnebje v primerjavi z varianto 2.

V Ratečah je toplotni odziv variante 3 nad pričakovanji, kar je v glavni meri posledica pomanjkanja rezultatov za hladni del leta, kjer se običajno varianta 3 zaradi višjega U-faktorja obnaša slabše. V primerjavi z najboljšo varianto 4 ima varianta 3 le za 0,4 odstotne točke krajše trajanje toplotnega udobja, kar na tej lokaciji predstavlja zgolj 19,5 ur manj. Splošno gledano so si toplotni odzivi v Ratečah zelo podobni. Eden izmed glavnih razlogov za to je zelo kratko časovno obdobje, ko je model adaptivnega toplotnega udobja tu uporaben (29,6 % leta v primerjavi s 50,7 % v Ljubljani in 61,1 % v Portorožu). Izhodiščni čas uporabnosti modela, ki nam je na voljo, je tu tako bistveno manjši. Tako je tudi razlika variante 3 pred varianto 2 tu majhna in znaša le 37,75 ur. Razlika variante 3 do variante 1 pa je v Ratečah po odstotkih precej večja, kot na ostalih lokacijah, in znaša 15,3 odstotnih točk (359 ur). V Ljubljani je ta razlika namreč 4,8 odstotne točke (213 ur), v Portorožu pa 4,1 odstotne točke (216,25 ur). Ob pregledu ostalih rezultatov iz preglednice 19 lahko sklepamo, da gre za posledico neuporabnosti modela v hladnem delu leta v Ratečah. Na ostalih lokacijah se namreč varianta 3 v hladnem delu leta obnaša slabše od variante 1, v toplem delu leta pa bolje. Letna razlika se nato temu primerno zmanjša zaradi nesorazmerja v času uporabnosti modela v različnih delih leta. V Ratečah, kjer v hladnem delu leta model ni uporaben, tako razlika naraste.

Če natančneje pogledamo obnašanje variante 3 v hladnem in toplem delu leta, ugotovimo, da je varianta 3 edina, ki se v hladnem delu leta obnaša slabše kot v toplem. Toplotno udobje je v Ljubljani v hladnem delu leta doseženo v 77,2 % časa uporabnosti modela, v toplem delu leta pa v 85,7 %. V Portorožu je ta odstotek v obeh obdobjih leta zanimivo enak in znaša 80,7 %. Splošno gledano ima varianta 3 v hladnem

delu leta najslabši toplotni odziv med vsemi variantami. Udobje je v Ljubljani v hladnem delu leta doseženo 136,75 ur (22,8 odstotnih točk) manj, kot pri variantah 2 in 4 ter 104,75 ur (17,5 odstotnih točk) manj, kot pri varianti 1. V Portorožu pa je varianta 3 od variant 2 in 4 slabša za 185 ur (19,3 odstotnih točk), od variante 1 pa za 134,25 ur (14 odstotnih točk). V toplem delu leta je toplotni odziv variante 3 bistveno boljši in precej bližje variantama 2 in 4. Od variante 4 je namreč slabši za 14,2 odstotnih točk (546,5 ur) od variante 2 pa za 7,6 odstotnih točk (293,75 ur). V toplem delu leta je varianta 3 precej boljša od variante 1. V Ljubljani je razlika 8,3 odstotnih točk (317,75 ur), v Portorožu pa 8 odstotnih točk (350,5 ur). V Portorožu je razlika do variante 4 nekoliko večja in znaša 15,7 odstotnih točk (689 ur). Razlika do variante 2 pa je precej manjša in znaša 4,8 odstotne točke (212,25 ur). Rezultati kažejo dober odziv variante 3 v toplem delu leta kljub pomanjkanju toplotne izolacije.

Če analiziramo še rezultate variante 1, je iz grafikona 1 jasno razvidno, da ima varianta 1 na vseh lokacijah najslabši toplotni odziv v prostem teku stavbe. Zanimivo je, da se varianta 1 kljub nižji toplotni prehodnosti stavbnega ovoja odziva slabše tudi od variante 3. Gre za posledico slabšega odziva variante 1 v toplem delu leta, ki bistveno prispeva k letnemu rezultatu. Razlika med obema variantama sicer v Ljubljani ni tako velika. Varianta 1 doseže 213 ur toplotnega udobja manj kot varianta 3, kar predstavlja razliko 4,8 odstotnih točk. Podobne razlike so tudi v Portorožu, kjer je varianta 1 slabša od variante 3 za 4,1 odstotnih točk, kar tu predstavlja 216,25 ur. V Ratečah pa je razlika nekoliko večja in znaša 359 ur (15,3 odstotnih točk). Slednje je posledica neuporabnosti modela v hladnem delu leta. Razlika variante 1 do variant 2 in 4 pa je bistveno večja. V Portorožu je razlika v doseženem toplotnem udobju med najboljšo varianto 4 in najslabšo varianto 1 kar 1090,25 ur (45,4 dni), kar predstavlja največjo razliko iz med vsemi rezultati. Gre za 20,4 odstotnih točk slabši toplotni odziv. Od variante 2 pa je v Portorožu slabša za 613,55 ur (11,5 odstotnih točk). V Ljubljani so razlike manjše, vendar še vedno pomembne. Varianta 4 namreč toplotno udobje doseže kar 896,25 ur (37,3 dni) več časa, kar predstavlja razliko 20,2 odstotnih točk, varianta 2 pa je tu boljša za 14,5 odstotne točke (643,5 ur oz. 26,8 dni). V Ratečah se razlike pričakovano glede na krajše obdobje uporabnosti modela zmanjšajo. Tu je varianta 1 za 407,25 ur (15,7 odstotnih točk) slabša od variante 4, za 359 ur (15,3 odstotnih točk) slabša od variante 3 in za 359 ur (13,8 odstotnih točk) slabša od variante 2.

Če pogledamo toplotni odziv variante 1 v toplem in hladnem letu, ugotovimo, da se varianta 1 v hladnem delu leta odziva dobro. V hladnem delu leta je namreč varianta 1 tako v Ljubljani kot v Portorožu slabša od variant 2 in 4 le za 5,3 odstotne točke. V Ljubljani to pomeni 32 ur, v Portorožu pa 50,75 ur. Zanimivo je neudobje posledica pregrevanja v drugi polovici aprila, kar bi lahko glede na ugodne zunanje temperature rešili z dodatnim prezračevanjem. V primerjavi z varianto 3 pa ima varianta 1 v hladnem delu leta pričakovano boljši toplotni odziv. V Ljubljani namreč varianta 1 toplotno udobje dosega 104,75 ur (17,5 odstotnih točk) več kot varianta 3, v Portorožu pa 134,25 ur (14 odstotnih točk). Posledica prej omenjenega bistveno slabšega celoletnega toplotnega odziva variante 1 pa je zelo slab odziv v toplem delu leta. Medtem ko varianta 1 v Ljubljani v hladnem delu leta toplotno udobje doseže 94,7 % časa, ko je model uporaben, je ta odstotek v toplem delu leta le 77,4 % (razlika 17,3 odstotnih točk), v Portorožu pa je razlika še večja in znaša 22 odstotnih točk. Razlika je v Portorožu pričakovano večja zaradi višjih zunanjih temperatur. V Portorožu je tako varianta 1 od najboljše variante 4 v toplem delu leta slabša za kar 23,7 odstotne točke (1039,5 ur). Od variante 2 je slabša za 562,75 ur (12,8 odstotne točke), od variante 3 pa za 350,5 ur (8 odstotnih točk). V Ljubljani so razlike nekoliko manjše. Tu je varianta 1 od variante 4 slabša za 864,25 ur (21,6 odstotne točke), od variante 2 za 612 ur (15,9 odstotne točke), od variante 3 pa za 317,75 ur (8,3 odstotne točke).

3.1.2 Vpliv podnebnih tipov na toplotni odziv variant stavbnega ovoja

Kot smo videli v prejšnjem poglavju so razlike v odstotkih med posameznimi lokacijami podobne, medtem ko so razlike v urah precej drugačne. Posledično lokacij med seboj ne moremo direktno primerjati, saj je osnova za izračun učinkovitosti posameznih variant glede na lokacije različna. Zato smo v tem poglavju za primerjalno obdobje vzeli celotno leto. Na ta način smo določili enotno primerjalno osnovo, ki nam omogoča direktno primerjavo toplotnega odziva posameznih variant med različnimi lokacijami. Z določitvijo odstotka časa v celotnem letu, ko je doseženo toplotno udobje, lahko določimo, kako na toplotni odziv posameznih variant stavbnega ovoja vplivajo različna podnebja. Za obdobje, ko je tekoče sedemdnevno povprečje zunanjih temperatur zraka suhega termometra pod 10 °C in nad 30 °C, smo predpostavili, da velja toplotno neudobje. Rezultati so prikazani v preglednici 20.

Preglednica 20: Primerjava toplotnega odziva štirih osnovnih variant stavbnega ovoja v času uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja in skozi celotno leto. Toplotno udobje je izraženo v odstotkih, ko je v posameznem obdobju doseženo toplotno udobje glede na model adaptivnega toplotnega udobja.

	V obdobju uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja [%]		V celotnem letu [%]
Ljubljana	V1	79,7	40,4
	V2	94,2	47,8
	V3	84,5	42,9
	V4	99,9	50,7
Portorož	V1	76,6	46,8
	V2	88,1	53,8
	V3	80,7	49,3
	V4	97,0	59,3
Rateče	V1	82,3	24,3
	V2	96,1	28,4
	V3	97,6	28,9
	V4	98,0	29,0
Grafični prikaz variant stavbnega ovoja			
	V1	V2	V3
	V1	V2	V3
	V1	V2	V3

Število ur doseženega toplotnega udobja se ne spremeni, zato si variante na posamezni lokaciji po učinkovitosti sledijo v enakem vrstnem redu kot v prejšnjem poglavju. Odstotek časa celotnega leta, ko dosežemo toplotno udobje, se tekom celotnega leta v primerjavi s časom uporabnosti modela pričakovano bistveno zmanjša. Največ časa je toplotno udobje doseženo pri varianti 4 v Portorožu (59,3 % časa), najmanj pa pri varianti 1 v Ratečah, kjer je udobje doseženo le 24,3 % časa v letu. V Ljubljani variante dosegajo presenetljivo visoko stopnjo udobja, ki je primerljiva s Portorožem. V Ljubljani je namreč udobje doseženo med 40,4 % in 50,7 % časa v letu.

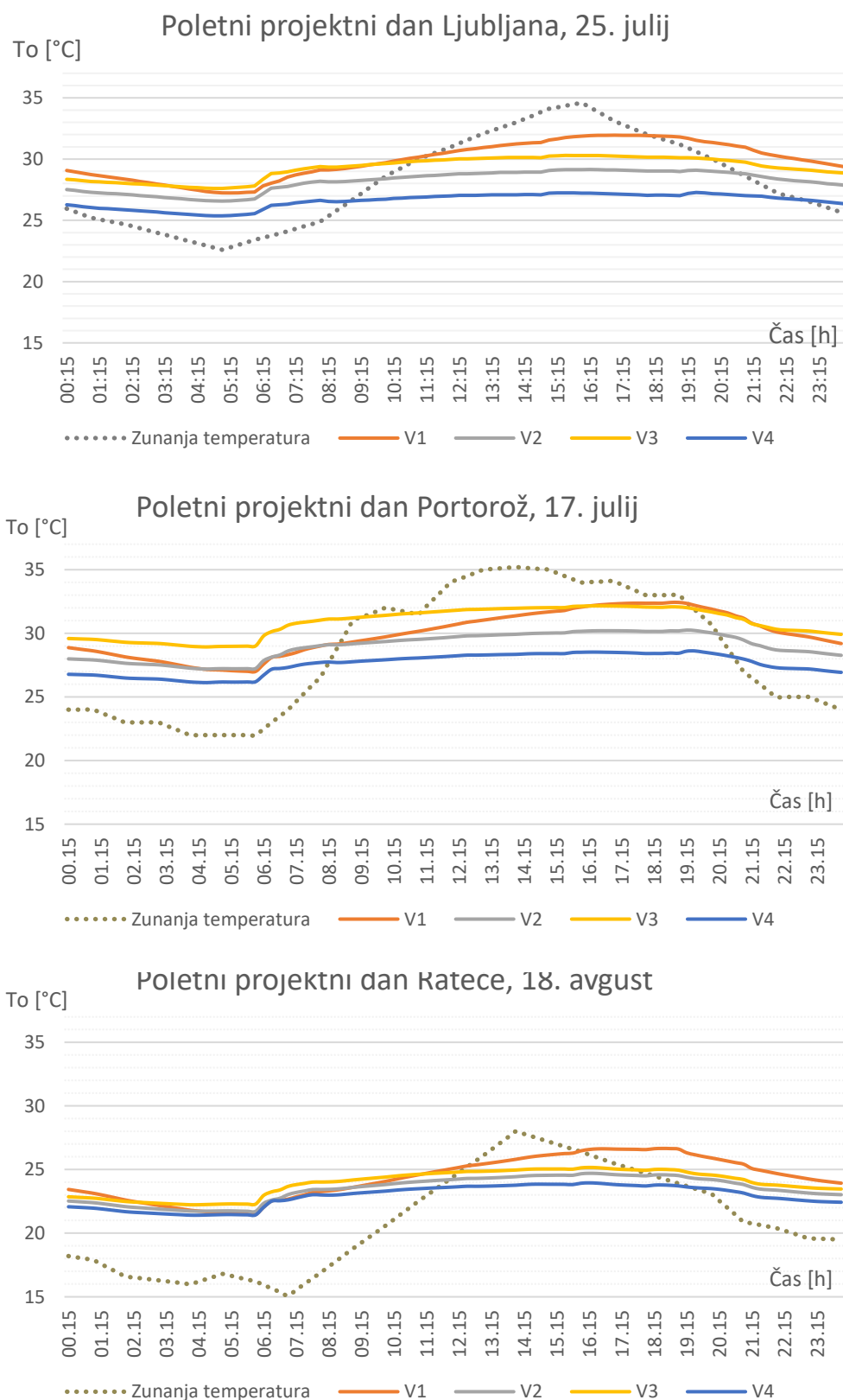
V kolikor analiziramo razlike med posameznimi variantami, ugotovimo, da se razlike med posameznimi variantami v celotnem letu zmanjšajo in ne presegajo 12,5 odstotnih točk. Vidimo lahko, da se razlike med variantami večajo z daljšanjem obdobja, ko je model uporaben. V Ratečah je razlika med najboljšo varianto 4 in najslabšo varianto 1 zgolj 4,7 odstotne točke, v Ljubljani 10,3 odstotne točke, v Portorožu pa 12,5 odstotne točke. Toplejše kot je podnebje, večja je torej razlika med najboljšo varianto 4 z visoko toplotno maso in varianto 1, kar pomeni, da je toplotna masa pomembnejša pri toplejših podnebjih. Podoben trend lahko na letni ravni opazimo tudi pri razliki variante 4 do variant 2 in 3, le da so tu razlike manjše. V Ratečah so razlike zelo majhne. Varianta 4 je boljša od variante 2 za 0,6 odstotne točke od variante 3 pa za 0,1 odstotne točke. V Ljubljani je razlika do variante 2 2,9 odstotne točke, do variante 3 pa 7,8 odstotne točke. V Portorožu se razlike povečajo, vendar se razlika med varianto 2 in 4 poveča za več, kot razlika med variantama 3 in 4. Razlika med varianto 2 in 4 je namreč v Portorožu 5,5 odstotne točke (sprememba Ljubljana – Portorož za 2,6 odstotne točke) razlika med variantama 3 in 4 pa 10 odstotnih točk (sprememba Ljubljana – Portorož za 2,2 odstotne točke). Pri masivnejših variantah se torej trajanje toplotnega udobja ob premiku v toplejše podnebje spremeni manj, kot pri lahki varianti. Ob pregledu časa, ko je doseženo toplotno udobje v celotnem letu, lahko vidimo še eno zanimivost, ki v prejšnjem poglavju ni bila tako razvidna. Vidimo namreč, da imata varianti 2 in 4 v Ljubljani celo boljši toplotni odziv, kot nekatere variante v Portorožu, kljub temu, da je v Portorožu obdobje uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja daljše za kar 912 ur oz. 10,4 odstotne točke. Varianta 2 ima namreč v Ljubljani boljši toplotni odziv, kot varianta 1 v Portorožu in sicer za 82 ur. Toplotni odziv variante 4 pa v Ljubljani presega tako toplotni odziv variante 1, kot tudi variante 3 v Portorožu. Slednje nakazuje na veliko prednost stavbnega ovoja s kombinacijo visoke toplotne mase in nizke toplotne prehodnosti.

3.2 Analiza poteka notranjih temperatur

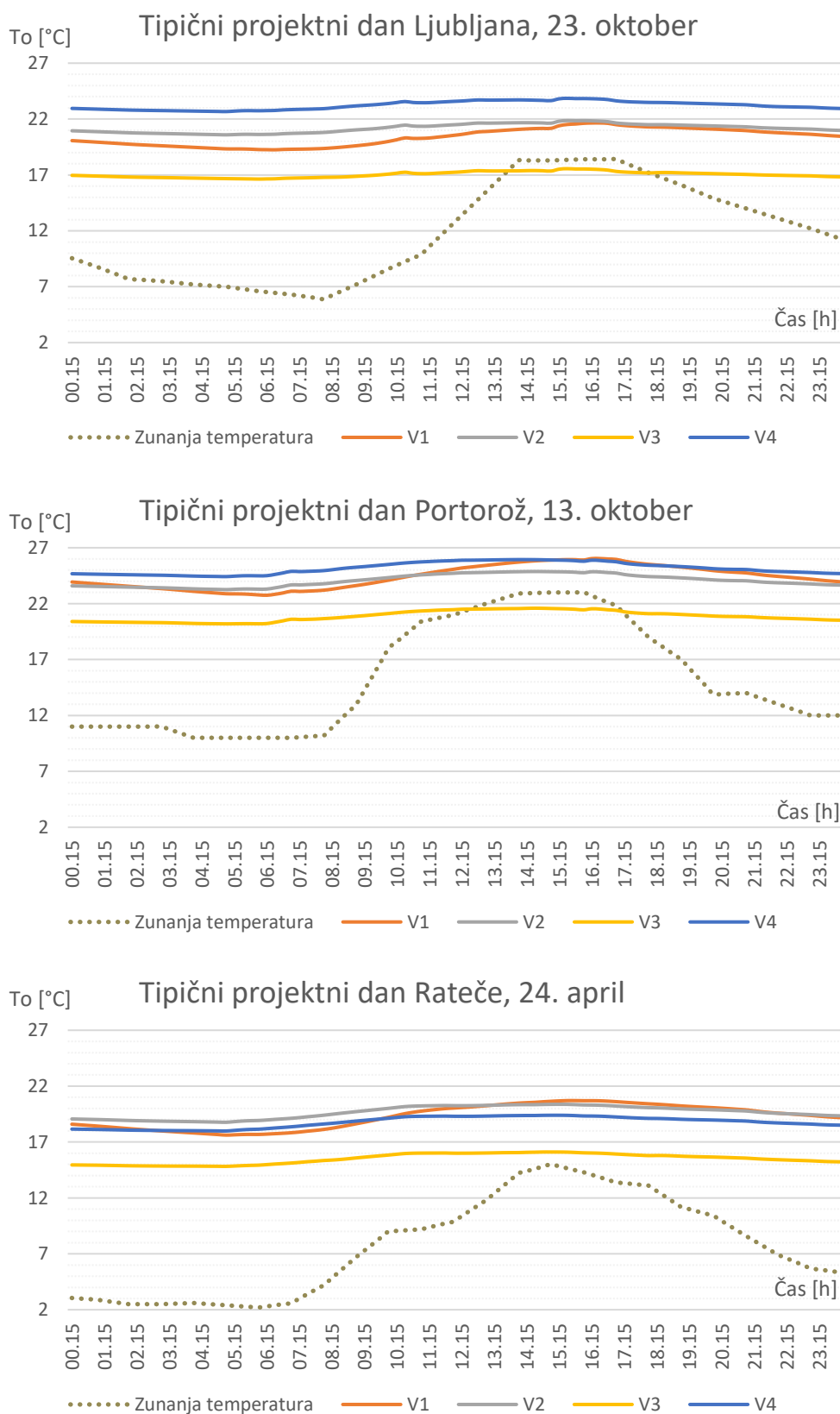
V preglednici 21 so prikazani projektni dnevi s pripadajočimi ekstremnimi temperaturami. Tudi tu lahko vidimo, da sta si podnebji Ljubljane in Portoroža bližji, medtem ko je podnebje v Ratečah hladnejše. Zanimivo so ekstremne temperature pri poletnem projektnem dnevu v Ljubljani in Portorožu primerljive. Razlika med obema podnebjema se tu najbolj kaže šele v hladnejšem delu leta in prehodnih obdobjih, kjer pa so v Ljubljani prisotne bistveno nižje temperature. Rezultati poteka notranjih temperatur so prikazani na grafikonih 2 do 4 v obliki dnevnega poteka notranje operative temperature za posamezen projektni dan.

Preglednica 21: Prikaz projektnih dni in pripadajočih ekstremnih temperatur glede na vremenske podatke v obdobju 2009–2021.

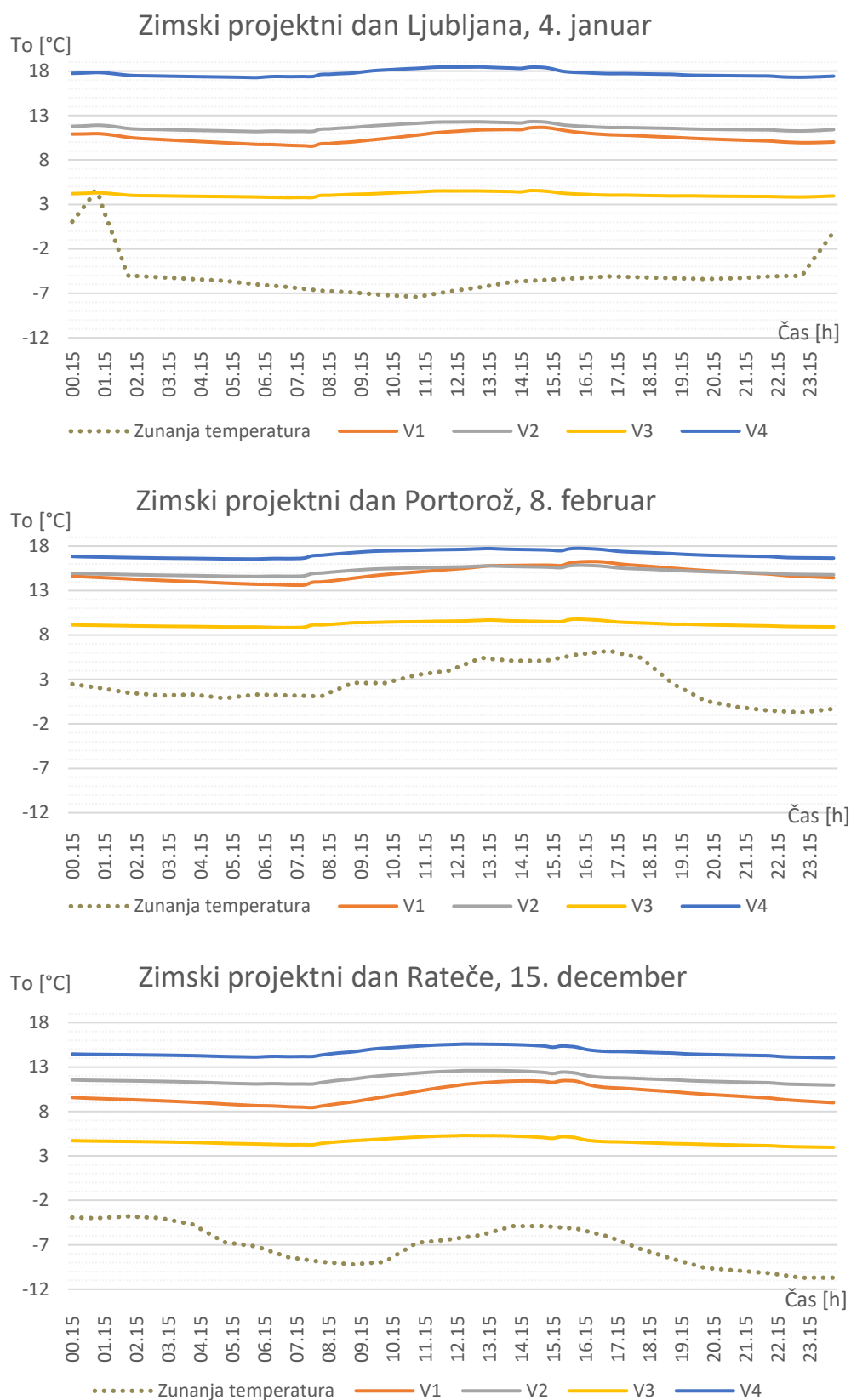
	Poletni projektni dan			Tipičen projektni dan			Zimski projektni dan		
	Datum	Max temp. [°C]	Min temp. [°C]	Datum	Max temp. [°C]	Min temp. [°C]	Datum	Max temp. [°C]	Min temp. [°C]
Ljubljana	25. 7.	34,6	22,6	23. 10.	18,4	5,9	4. 1.	4,5	–7,4
Portorož	17. 7.	35,2	22,0	13. 10.	23,0	10,0	9. 2.	6,2	–0,7
Rateče	18. 8.	28,0	15,1	24. 4.	15,0	2,2	15. 12.	–3,8	–10,7



Grafikon 2: Prikaz poteka notranjih operativnih temperatur različnih variant stavbnega ovoja na poletni projektni dan v Ljubljani, Portorožu in Ratečah.



Grafikon 3: Prikaz poteka notranjih operativnih temperatur različnih variant stavbnega ovoja na tipični projektni dan v Ljubljani, Portorožu in Ratečah.



Grafikon 4: Prikaz poteka notranjih operativnih temperatur različnih variant stavbnega ovoja na zimski projektni dan v Ljubljani, Portorožu in Ratečah.

Iz grafikonov 2 do 4 je jasno razvidno, da so nihanja notranje operative temperature pričakovano manjša pri variantah z večjo toplotno maso. Variante 2, 3 in 4 so iz tega vidika med seboj primerljive in bistvene razlike med njimi ni. To velja kljub različni toplotni masi stavbnega ovoja variante 2 v primerjavi z variantama 3 in 4 ter pomanjkanju toplotne izolacije pri varianti 3. Razlike med najvišjimi in najnižjimi notranjimi operativnimi temperaturami so podrobno prikazane v preglednici 22. Razlika med variantami 2, 3 in 4 je namreč v povprečju 0,3 °C. Največja razlika se pojavi pri poletnem projektnem dnevu v Ljubljani med variantama 3 in 4 in znaša 0,8 °C. Na splošno vidimo, da so nihanja večja pri podnebjih Portoroža in Rateč, kjer so prisotne bolj ekstremne zunanje temperature. Tako iz grafikonov 2 do 4, kot iz preglednice 22 pa lahko razberemo, da se pri varianti 1 pojavljajo bistveno večja nihanja notranjih operativnih temperatur, kar je z vidika notranjega toplotnega udobja neugodno. Toplejše kot je podnebje in toplejši kot je projektni dan, v katerem smo izvajali analizo, večje je nihanje temperature. Največja razlika med najnižjo in najvišjo temperaturo je tako pri varianti 1 na poletni projektni dan v Portorožu in znaša 5,4 °C, najmanjša pa na zimski projektni dan v Ljubljani (2,1 °C).

Preglednica 22: Nihanja notranje operative temperature v °C za posamezne variante stavbnega ovoja na različne projektne dni in lokacije.

	Poletni projektni dan ΔT_{OP} [°C]			Tipičen projektni dan ΔT_{OP} [°C]			Zimski projektni dan ΔT_{OP} [°C]		
	Ljubljana	Portorož	Rateče	Ljubljana	Portorož	Rateče	Ljubljana	Portorož	Rateče
V1	4,7	5,4	5,2	2,4	3,3	3,1	2,1	2,7	3,0
V2	2,6	3,1	3,0	1,3	1,6	1,6	1,1	1,3	1,6
V3	2,7	3,2	2,9	0,9	1,4	1,3	0,8	1,0	1,3
V4	1,9	2,5	2,5	1,2	1,5	1,4	1,2	1,2	1,5

Druga ugotovitev, ki izhaja iz grafikonov 2 do 4, je, da so dosežene notranje operative temperature pri nekaterih variantah bistveno bolj ugodne kot pri drugih. Najugodnejše notranje temperature so v vseh primerih pri varianti 4. V zimskih projektih dneh so pri varianti 4 dosežene najvišje temperature. Nasprotno pa so na poletne projektne dni dosežene najnižje temperature. V primeru tipičnih projektih dni pa so notranje temperature variante 4 nekoliko visoke, vendar to z vidika toplotnega udobja ne predstavlja problema, saj lahko po potrebi v primeru toplotnega neudobja temperature znižamo s prezračevanjem. Zunanje temperature tipičnih dni so namreč z izjemo časa okoli 15. ure precej nižje. Varianta 4 ima tako tudi iz vidika poteka notranjih temperatur, enako kot pri metodi adaptivnega toplotnega udobja, najboljši toplotni odziv.

Na nasprotni strani varianta 3 kaže najbolj neugoden potek notranjih temperatur, kar je v nasprotju z rezultati metode adaptivnega toplotnega udobja, kjer je imela najslabši toplotni odziv varianta 1. V primeru zimskih in tipičnih projektih dni so temperature pri varianti 3 bistveno nižje, kot pri ostalih treh variantah in so z izjemo Portoroža precej pod vrednostmi, pri katerih bi lahko dosegli toplotno udobje. V kolikor pogledamo preglednico 23, kjer so prikazane mediane dnevnih notranjih operativnih temperatur, lahko vidimo, da so za zimske projektne dni značilne temperature pod 10 °C, kar velja tudi za najtoplejše podnebje Portoroža. V Ljubljani in Ratečah je mediana 4 oz. 4,6 °C, kar je zelo nizko in za 4,3 oz. 5 °C manj, kot pri varianti 1. Na tipični projektni dan je srednja vrednost temperatur sicer nekoliko višja in v Ljubljani znaša 17,0 °C, v Portorožu 20,8 °C in v Ratečah 15,6 °C. V Portorožu, kjer

je temperatura najvišja, je še vedno za 3,5 °C nižja od najbližjih preostalih variant. V primeru poletnega projektnega dne pa se situacija spremeni in je mediana notranjih temperatur višja od ostalih variant. Temperature so v tem primeru previsoke, da bi lahko dosegli toplotno udobje. Kljub temu pa v tem primeru varianta 3 ni najslabša. Najvišjo mediano notranjih temperatur ima namreč varianta 1 z izjemo Portoroža, kjer višje notranje temperature dosega varianta 3, kar je posledica pomanjkanja toplotne izolacije stavbnega ovoja. Je pa varianta 3 tu slabša od variante 1 le za 1,3 °C. Mediana notranjih temperatur se pri variantah 1 in 3 poleti giba okoli 30 °C, kar je zelo visoko. V kontekstu poletnega projektnega dneva je potrebno opozoriti, da varianta 4 dosega sicer najboljše rezultate, vendar ne moremo govoriti o udobnih temperaturah. V Portorožu, kjer so temperature najvišje, namreč mediana znaša 27,8 °C, v Ljubljani pa 1 °C manj. Podobno velja za varianto 2, ki ima kljub temu, da kaže drugi najboljši rezultat, mediano bližje variantama 1 in 3 kot pa varianti 4. V ekstremnih dneh tako samo s pasivnimi ukrepi ne moremo doseči ugodnih notranjih temperatur.

Na zimski projektni dan lahko vidimo izjemno učinkovitost kombinacije nizke toplotne prehodnosti in visoke toplotne mase. Varianta 4 ima na vseh treh lokacijah na zimski projektni dan precej višje temperature od ostalih variant. V Ratečah ima varianta 4 mediano 14,4 °C, ki je za 2,9 °C višja, kot pri varianti 2 in za 4,8 °C višja, kot pri varianti 1. V Ljubljani in Portorožu so vrednosti še višje in je varianta 4 edina varianta, ki bi lahko potencialno dosegla toplotno udobje. Varianta 1 ima presenetljivo tudi v zimskem projektnem dnevu relativno slab toplotni odziv in ima višjo mediano le od variante 3, od katere pa je bistveno boljša, saj razlika znaša 5 °C–6 °C, odvisno od lokacije. Iz preglednice 23 presenetljivo ugotovimo, da so notranje temperature v Ljubljani in Ratečah na zimski projektni dan zelo podobne. Razlog za takšen odziv je v zunanjih temperaturah predhodnega dne, ki zaradi faznega zamika vplivajo tudi na temperature obravnavanega dneva. V Ratečah je najhladnejši dan precej hladnejši kot v Ljubljani, vendar je predhodni dan v Ratečah povsem primerljiv s predhodnim dnem v Ljubljani. Toplotni odziv v notranjosti je namreč, kot vidimo iz grafikona 4, zakasnen, kar ima največji vpliv pri varianti 3, ki ima najpočasnejši odziv.

V primeru tipičnih projektnih dni pa so notranje temperature variant 1, 2 in 4 primerljive. Varianta 4 ima tako tudi iz vidika poteka notranjih temperatur najboljši toplotni odziv. Izjema je nekoliko presenetljivo le v Ratečah, kjer imata varianti 1 in 2 za 0,6 oz. 0,8 °C višjo mediano notranjih temperatur. V prehodnih obdobjih, kjer je prisotno večje nihanje zunanjih temperatur, povprečje pa se nahaja v coni udobja, je hiter odziv variante 1 na temperaturne spremembe ugoden in daje primerljivo ugodne vrednosti notranjih operativnih temperatur kot varianta 2.

Preglednica 23: Prikaz vrednosti mediane dnevnih notranjih operativnih temperatur za posamezne variante stavbnega ovoja na različne projektne dni in lokacije.

	Poletni projektni dan TOP MEAN			Tipičen projektni dan TOP MEAN			Zimski projektni dan TOP MEAN		
	[°C]			[°C]			[°C]		
	Ljubljana	Portorož	Rateče	Ljubljana	Portorož	Rateče	Ljubljana	Portorož	Rateče
V1	30,0	29,9	24,4	20,5	24,3	19,5	10,4	14,8	9,6
V2	28,4	29,2	23,6	21,2	24,0	19,7	11,6	15,1	11,5
V3	29,5	31,2	24,2	17,0	20,8	15,6	4,0	9,1	4,6
V4	26,8	27,8	23,1	22,9	25,1	18,9	17,6	17,0	14,4

3.3 Rezultati občutljivostne analize

Rezultati občutljivostnih analiz vhodnih podatkov so predstavljeni v dveh oblikah, in sicer v obliki relativnih razlik v trajanju toplotnega udobja skladno z metodo adaptivnega toplotnega udobja po standardu SIST EN 16798-1 v času, ko je model uporaben. V drugem primeru pa v obliki sprememb pomembnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur projektnih dni. Relativne razlike so določene v primerjavi z rezultati osnovnih modelov.

3.3.1 Vpliv toplotne mase notranjih sten

Rezultati vpliva toplotne mase notranjih sten na toplotni odziv obravnavanih variant stavbnega ovoja so prikazani v preglednici 24. Rezultati so za potrebe lažjega pregleda pogojno oblikovani z uporabo barvnih slogov, ki so prikazani na sliki 11. Legenda velja za vsa poglavja občutljivostne analize. Potrebno je omeniti, da en odstotek spremembe trajanja toplotnega udobja na različnih lokacijah ne predstavlja enakega števila ur, saj so obdobja aplikabilnosti modela različna. Odstotek spremembe trajanja toplotnega udobja predstavlja v Ljubljani 44,4 ure, v Portorožu 53,5 ure, v Ratečah pa 25,9 ure. Pri prikazu sprememb parametrov poteka notranjih temperatur so prikazane spremembe mediane, in spremembe najvišje in najnižje notranje operativne temperature za posamezne projektne dni.

Pri rezultatih metode adaptivnega toplotnega udobja vidimo, da uporaba masivnih notranjih sten povsod povzroči povečanje trajanja toplotnega udobja. Izjema je varianta 3 v hladnem delu leta v Ljubljani, kjer se toplotno udobje zmanjša za 0,21 odstotne točke.

Pričakovano največje izboljšanje trajanja toplotnega udobja dosežemo pri varianti 1. V Ljubljani se trajanje toplotnega udobja poveča za 1,84 odstotne točke, v Portorožu za 1,78 in v Ratečah za 2,46 odstotne točke. Kljub temu, da je sprememba v Ratečah v odstotkovnih točkah sicer največja, je izboljšanje v urah tu manjše, kot v Ljubljani in Portorožu, ki pa sta si med seboj primerljiva. Varianti 1 sledi varianta 2, ki na vseh lokacijah beleži drugo največje izboljšanje. Varianta 2 največjo spremembo beleži v Portorožu (1,07 odstotne točke), najmanjšo pa v Ratečah (0,4 odstotne točke). Z večanjem mase stavbe se nato učinek masivnih notranjih sten še naprej manjša. Sledita varianta 3 in varianta 4, kjer pa je sprememba že precej majhna in znaša manj kot eno odstotno točko.

Vidimo, da je učinek dodatne toplotne mase zaradi notranjih sten v hladnem in toplem delu leta primerljiv. V Ljubljani je pri varianti 1 vpliv celo večji v hladnem delu leta. Glede na rezultate osnovnih modelov bi pričakovali, da je razlika večja v toplem delu leta, kjer je toplotna masa pomembnejša. Pri variantah 2 in 4 sicer v hladnem delu leta ni spremembe, vendar je to posledica zelo dobrega toplotnega odziva osnovnih modelov, kjer je toplotno udobje že doseženo 100 % časa uporabnosti modela in možnosti za izboljšavo po tej metodi ni in ukrepa ne moremo ovrednotiti.



Slika 11: Legenda barvnih slogov. Legenda velja za vse preglednice v poglavju 3.3.

Preglednica 24: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v odstotnih točkah in sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur ob uporabi masivnih notranjih sten. V Ljubljani odstotek spremembe trajanja toplotnega udobja predstavlja 44,4 ur, v Portorožu 53,5 ur, v Ratečah pa 25,9 ur. Legenda je prikazana na Slika 11.

		Hladni del leta	Topli del leta	Celotno leto	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan
		Δ Trajanja toplotnega udobja [odstotne točke]			$\Delta T_{OP\ MEAN}$ [°C]			$\Delta T_{OP\ MAX}$ [°C]			$\Delta T_{OP\ MIN}$ [°C]		
Ljubljana	V1	2,13	1,79	1,84	-0,15	-0,29	0,04	-0,36	-0,59	-0,04	0,02	0,41	0,11
	V2	0,00	0,92	0,80	-0,11	-0,23	0,15	-0,17	-0,29	0,09	-0,03	0,06	0,15
	V3	-0,21	0,61	0,50	-0,08	-0,20	0,07	-0,11	-0,32	0,03	0,00	-0,06	0,07
	V4	0,00	0,04	0,03	-0,05	-0,27	0,09	-0,05	-0,26	0,01	0,00	0,01	0,08
Portorož	V1	1,64	1,82	1,78	-0,08	-0,03	0,45	-0,32	-0,18	0,13	0,16	0,11	-0,05
	V2	0,00	1,31	1,07	-0,07	0,03	0,25	-0,12	-0,02	0,03	0,01	0,07	-0,05
	V3	0,65	0,89	0,85	-0,06	0,01	0,04	-0,11	-0,05	-0,11	0,03	0,03	-0,12
	V4	0,00	0,57	0,47	-0,05	0,01	0,16	-0,06	-0,05	0,02	0,01	0,04	-0,08
Rateče	V1	/	2,46	2,46	-0,10	-0,06	0,15	-0,32	-0,17	-0,03	0,12	0,10	0,27
	V2	/	0,40	0,40	-0,05	0,02	0,10	-0,12	-0,04	0,02	0,03	0,06	0,11
	V3	/	0,20	0,20	-0,05	0,01	0,05	-0,09	-0,04	0,01	0,03	0,04	0,09
	V4	/	0,38	0,38	-0,04	-0,02	0,05	-0,08	-0,07	-0,02	0,02	0,01	0,06

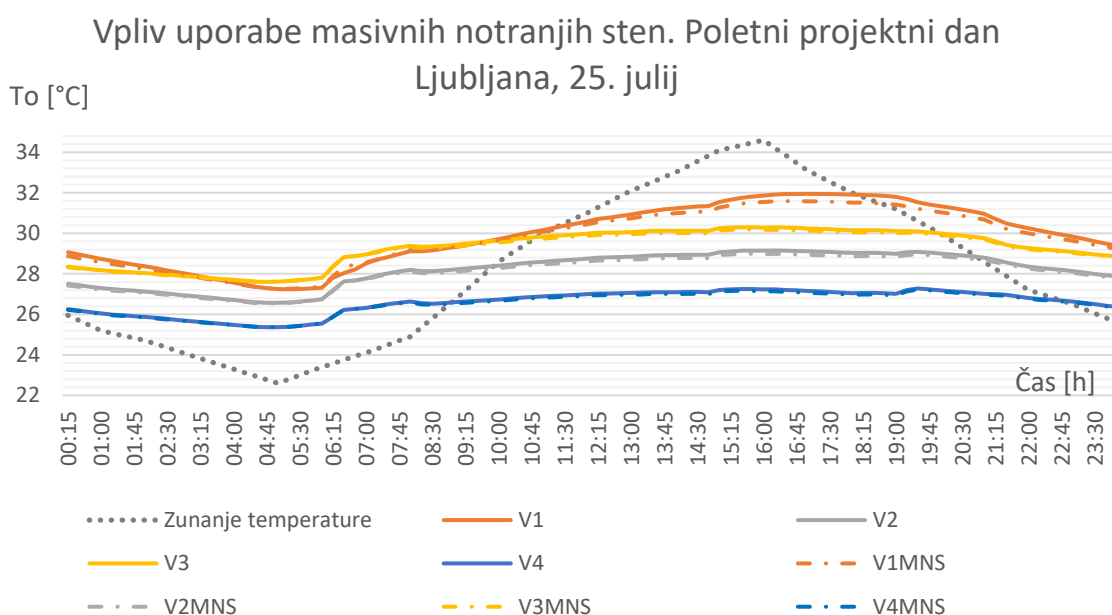
Spremembe parametrov poteka notranjih operativnih temperatur so v primerjavi s spremembami trajanja toplotnega udobja presenetljivo majhne. Kot vidimo iz zgornje preglednice, so tudi tu spremembe pri varianti 1 precej večje kot pri ostalih, vendar so te zelo majhne. Spremembe median so zanemarljivo majhne in ne znašajo več kot 0,29 °C. Spremembe srednje vrednosti se nato, enako kot spremembe v času trajanja udobja, manjšajo z večanjem toplotne mase stavbnega ovoja. Izjema je le tipičen projektni dan v Ljubljani, kjer si velikost sprememb variant 2, 3 in 4 zanimivo sledi v nasprotnem vrstnem redu. Kljub majhnim spremembam v mediani notranjih temperatur se temperature spreminjajo ugodno, kar je skladno z rezultati metode adaptivnega toplotnega udobja. V primeru poletnega projektnega dne se

notranje operativne temperature povsod znižajo, v primeru zimskega projektnega dne pa se povsod zvišajo. Slednje velja tudi za varianto 3 v Ljubljani, ki je v sklopu metode adaptivnega toplotnega udobja kazala negativno spremembo. Je pa dvig mediane notranje temperature zanemarljivo majhen.

Nekoliko večje pa so spremembe maksimalnih dnevnih notranjih temperatur. Na zimski in tipični projektni dan se sicer maksimalne temperature spremenijo zanemarljivo malo. Izjema je nekoliko le tipičen projektni dan v Ljubljani, kjer smo že pri mediani zabeležili presenetljiv padec temperatur. Enako je tudi v primeru maksimalnih temperatur, kjer se te v primeru variante 1 znižajo za kar 0,57 °C. Spremembe pri ostalih variantah se gibajo okoli 0,29 °C. Pozitiven učinek masivnih notranjih sten se pokaže na poletni projektni dan. S tem ukrepom se namreč pri vseh variantah znižajo najvišje notranje temperature. Učinek je ponovno največji pri varianti 1, kjer najvišja temperatura pade za 0,36 °C, spremembe pa ponovno padajo z večanjem mase stavbnega ovoja. Spremembe so tako pri variantah 3 in 4 že povsem zanemarljive in znašajo 0,11 °C ali manj. Pri varianti 2 pa je učinek nekoliko večji le v Ljubljani, vendar je sprememba vseeno zelo majhna in znaša 0,17 °C.

Spremembe minimalnih notranjih temperatur so ravno tako zanemarljivo majhne. Na zimski projektni dan se minimalne temperature z izjemo Portoroža minimalno dvignejo, kar je ugodno. Največja sprememba je pri varianti 1 v Ratečah, kjer se najnižja notranja temperatura dvigne za 0,27 °C.

Minimalne temperature tipičnih projektnih dni se ravno tako minimalno dvignejo, kar je ravno tako ugodno. V primeru poletnega projektnega dneva pa se minimalne temperature ne spremenijo oz. se dvignejo za manj kot 0,16 °C, kar je zanemarljivo.



Grafikon 5: Prikaz spremembe poteka notranjih operativnih temperatur pri uporabi masivnih notranjih sten na poletni projektni dan v Ljubljani.

Vpliv uporabe masivnih notranjih sten lahko vidimo tudi iz poteka notranjih operativnih temperatur na poletni projektni dan v Ljubljani, ki je prikazan na grafikonu 5. Uporaba masivnih notranjih sten ima vpliv predvsem pri varianti 1, kjer zmanjša nihanje notranjih temperatur in zmanjša najvišje notranje temperature. Fazni zamik se zanimivo ne spremeni. Najvišja notranja temperatura je v obeh primerih pri varianti 1 dosežena ob 16.45.

3.3.2 Vpliv intenzitete nočnega prezračevanja

Preverili smo, kakšen vpliv na toplotno udobje in potek notranjih temperatur ima intenziteta nočnega prezračevanja. Gre za edini analiziran organizacijski ukrep. Rezultati so prikazani le za topel del leta in za poletni projektni dan, saj je nočno prezračevanje aktivno le v tem obdobju.

Iz preglednice 25 lahko vidimo, da ima lahko intenziteta nočnega prezračevanja izjemen vpliv na trajanje toplotnega udobja. Hkrati opazimo, da je za različne lokacije in različne variante stavbnega ovoja optimalna različna intenziteta nočnega prezračevanja. V Ljubljani namreč vidimo, da je optimalna intenziteta prezračevanja med 4 in 7 h⁻¹. V Portorožu so ugodnejše višje vrednosti, med 5 in 14 h⁻¹, v Ratečah pa precej nižje vrednosti, in sicer med 1,5 in 4 h⁻¹.

Pri varianti 1 je razpon optimalnih vrednosti manjši kot pri ostalih variantah. V Ljubljani je optimalna intenziteta 5 h⁻¹, medtem ko je v Ratečah 3 h⁻¹. V Portorožu je zaradi toplejšega podnebja ta vrednost pričakovano višja in znaša 7 h⁻¹. Vidimo, da pri varianti 1 z ekstremnimi intenzitetami toplotno udobje lahko bistveno poslabšamo, na drugi strani pa optimalna vrednost nočnega prezračevanja bistveno ne izboljša trajanja toplotnega udobja. V Portorožu, kjer je učinek največji, se namreč toplotno udobje podaljša za 3,85 odstotne točke, kar sicer ni malo, vendar precej manj kot pri variantah 2 in 3. Pri varianti 1 se v hladnejšem podnebjem Rateč toplotno udobje izboljša najbolj od vseh variant in sicer za 3,93 odstotnih točk. Sledi varianta 2 z 3,79 odstotnih točk, sprememba pri variantah 3 in 4 pa je okoli 2 odstotni točki.

Pri varianti 4 na vseh lokacijah ravno tako beležimo majhne pozitivne spremembe, vendar to ne pomeni, da intenziteta nočnega prezračevanja pri varianti 4 nima vpliva, ampak je že osnovni model v toplem delu leta dosegal izjemno dobre rezultate in je možnosti za izboljšavo zelo malo. Da je intenziteta prezračevanja pomemben dejavnik tudi pri varianti 4, kažejo nizke vrednosti nočnega prezračevanja. Pri 0,7 h⁻¹ namreč varianta 4 v Portorožu doseže največjo negativno spremembo in se trajanje toplotnega udobja zmanjša za kar 48,08 odstotnih točk, kar predstavlja 2572,3 ur. Velik vpliv se kaže še pri 0,7 h⁻¹ v Ljubljani in pri visokih stopnjah v Ratečah. Pri varianti 4 tako iz analize težje določimo optimalne vrednosti prezračevanja. To še posebej velja za Ljubljano, kjer imajo intenzitete 4–7 h⁻¹ skoraj enak vpliv na toplotni odziv. V tem primeru so nižje vrednosti ugodnejše, saj jih lažje dosežemo, hkrati pa zaradi nižje hitrosti gibanja zraka manj vplivajo na udobje. V Portorožu pa lahko vidimo, da je optimalna vrednost variante 4 višja in znaša 7 h⁻¹, v Ratečah pa so optimalne nižje vrednosti. Najboljši rezultat smo tu pridobili z intenziteto 1,5 h⁻¹.

Intenzivnost prezračevanja ima opazno večji vpliv pri varianti 2. V Ljubljani se pri najbolj optimalni izmenjavi 7 h⁻¹ toplotno udobje podaljša za 1,86 odstotne točke. V Portorožu je sprememba največja pri 7 h⁻¹ (6,06 odstotne točke). V Ratečah je vpliv spet manjši, vendar največji od vseh variant na tej lokaciji. Pri najbolj optimalni vrednosti 1,5 h⁻¹ se tu toplotno udobje podaljša za 3,72 odstotne točke. Na nasprotni strani pa pri ekstremnih vrednostih intenzitet prezračevanja (0,7 in 14 h⁻¹) varianta 2 tako kot varianta 4 beleži veliko poslabšanje rezultatov. Slednje kaže, da se stavbni ovoji s kombinacijo visoke toplotne mase in nizke toplotne prehodnosti pri ekstremno nizkih in visokih intenzitetah nočnega prezračevanja obnašajo precej slabše od lahkega in neizoliranega masivnega stavbnega ovoja.

Največji učinek ima spreminjanje intenzitete nočnega prezračevanja pri varianti 3. Največjo spremembo (10,4 odstotne točke) dosežemo v Portorožu z intenziteto 14 h⁻¹. Intenziteta 14 h⁻¹ je najboljša tudi v Ljubljani, kjer dosežemo izboljšanje trajanja toplotnega udobja za 6,73 odstotne točke. V Ratečah so tudi v tem primeru bolj optimalne nižje intenzitete. Pri intenziteti 1,5 se doseže najboljši rezultat, kjer se toplotno udobje poveča za 2,4 odstotni točki. V Ljubljani in Portorožu je potrebno omeniti, da

intenziteta 14 h⁻¹ najverjetneje ni optimalna, ampak višjih intenzitet nismo preverjali. Vseeno pa naknadno povečanje intenzivnosti ne prinaša nujno dodatnih izboljšav Pri ostalih variantah je namreč jasno razvidno, da pri določeni intenziteti naknadno večanje povzroči skrajšanje toplotnega udobja.

Preglednica 25: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja izraženih v odstotnih točkah za različne stopnje nočnega prezračevanja 0,7–14 h⁻¹. Legenda je prikazana na Slika 11.

		Sprememba trajanja toplotnega udobja v toplem delu leta [odstotne točke]					
		0,7 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹	3 h ⁻¹	5 h ⁻¹	7 h ⁻¹	14 h ⁻¹
Ljubljana	V1	-22,90	-11,44	-2,11	0,60	0,44	-1,99
	V2	-38,92	-17,66	-2,55	1,38	1,86	-2,21
	V3	-20,09	-12,39	-3,45	2,56	5,59	6,73
	V4	-36,11	-15,49	-1,17	0,08	-0,05	-3,67
Portorož	V1	-26,72	-14,81	-3,58	2,31	3,85	3,27
	V2	-42,37	-24,50	-4,78	3,01	6,06	5,13
	V3	-22,27	-14,72	-4,83	3,39	6,43	10,40
	V4	-48,08	-28,30	-5,55	1,87	3,34	2,20
Rateče	V1	-12,77	2,45	3,93	-4,82	-12,58	-26,27
	V2	-8,53	3,72	2,92	-3,86	-13,38	-33,02
	V3	1,47	2,40	1,46	-1,51	-4,87	-18,75
	V4	1,28	2,00	1,87	-4,62	-14,87	-32,03

V preglednicah 26 in 27 so prikazane še spremembe ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur na poletni projektni dan. Pri stopnjah prezračevanja nižjih od 4 h⁻¹ lahko vidimo zvišanje notranjih temperatur, pri višjih intenzitetah pa se temperature znižajo. Gre za povsem pričakovan rezultat, saj pasivni ukrep nočnega prezračevanja služi ravno zniževanju notranjih temperatur v nočnem času, ko so zunanje temperature nižje od notranjih. Tako srednje, kot tudi najvišje in najnižje vrednosti notranjih temperatur, se na vseh lokacijah enakomerno povečujejo z nižanjem intenzitet prezračevanja oz. padajo s povečevanjem intenzitete. Hkrati vidimo, da tudi v tem primeru velja, da se pri spremembi intenzitete prezračevanja največja sprememba v temperaturah zgodi pri varianti 1, ne glede na lokacijo in intenziteto prezračevanja. Varianti 1 nato sledita varianti 2 in 4. Varianta 3 pa je presenetljivo najmanj občutljiva na spremembe intenzitete. Slednje je nepričakovano, ker je pri spremembi trajanja toplotnega

udobja ravno varianta 3 kazala največje spremembe. Izjema je le najvišja intenziteta prezračevanja 14 h^{-1} , kjer je učinek sicer še vedno največji pri varianti 1, medtem ko ostale tri variante dosegajo zelo spremenljive rezultate, iz katerih ni razvidnega jasnega vzorca vpliva toplotne mase na spremembe temperatur.

Vidimo lahko, da ima spreminjanje intenzitete nočnega prezračevanja na notranje temperature bistveno večji vpliv, kot pa masivne notranje stene v prejšnjem poglavju. Že minimalna sprememba intenzitete na 3 oz. 5 h^{-1} povzroči večje spremembe, kot ukrep iz prejšnjega poglavja. Pri ekstremnih vrednostih intenzitet pa dosežemo že zelo velike spremembe, kjer se srednje vrednosti notranjih temperatur pri najnižji intenziteti $0,7\text{ h}^{-1}$ povečajo za $1\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$, na drugi strani pa se pri najvišji intenziteti 14 h^{-1} zmanjšajo za $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hkrati je razvidno, da je za toplotno udobje v Ratečah ugodno povišanje notranjih temperatur, v Ljubljani in Portorožu pa znižanje.

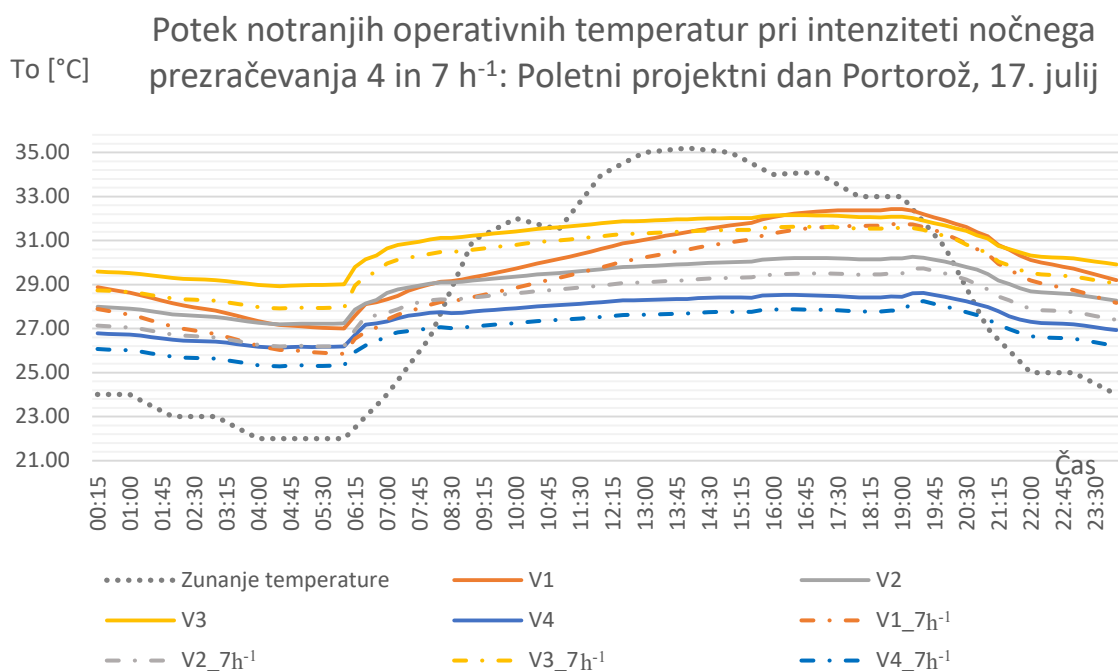
Preglednica 26: Prikaz sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur za različne stopnje nočnega prezračevanja: $0,7\text{--}3\text{ h}^{-1}$. Legenda je prikazana na Slika 11.

		$\Delta T_{\text{OP MEAN}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$\Delta T_{\text{OP MAX}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$\Delta T_{\text{OP MIN}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$\Delta T_{\text{OP MEAN}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$\Delta T_{\text{OP MAX}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$\Delta T_{\text{OP MIN}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$\Delta T_{\text{OP MEAN}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$\Delta T_{\text{OP MAX}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$\Delta T_{\text{OP MIN}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$
		$0,7\text{ h}^{-1}$			$1,5\text{ h}^{-1}$			3 h^{-1}		
Ljubljana	V1	2,03	1,67	2,72	1,26	1,03	1,69	0,38	0,31	0,50
	V2	1,90	1,82	2,45	1,14	1,11	1,49	0,34	0,33	0,44
	V3	0,84	0,90	1,67	0,67	0,60	1,10	0,22	0,20	0,36
	V4	1,75	1,79	2,17	1,10	1,13	1,35	0,32	0,32	0,40
Portorož	V1	2,62	1,98	3,42	1,64	1,22	2,16	0,49	0,37	0,64
	V2	2,32	2,06	2,96	1,43	1,26	1,84	0,3	0,34	0,55
	V3	1,37	1,14	2,26	0,91	0,76	1,50	0,30	0,25	0,49
	V4	1,86	1,68	2,38	1,18	1,04	1,50	0,36	0,26	0,46
Rateče	V1	2,83	2,29	3,71	1,75	1,43	2,30	0,52	0,41	0,68
	V2	2,77	2,53	3,44	1,72	1,59	2,16	0,52	0,48	0,66
	V3	1,28	1,08	2,08	0,85	0,72	1,38	0,29	0,24	0,46
	V4	3,26	2,57	3,33	1,70	1,64	2,10	0,52	0,51	0,64

Preglednica 27: Prikaz sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur za različne stopnje nočnega prezračevanja: 4–14 h⁻¹. Legenda je prikazana na Slika 11.

		$\Delta T_{OP\ MEAN}\ [^{\circ}C]$	$\Delta T_{OP\ MAX}\ [^{\circ}C]$	$\Delta T_{OP\ MIN}\ [^{\circ}C]$	$\Delta T_{OP\ MEAN}\ [^{\circ}C]$	$\Delta T_{OP\ MAX}\ [^{\circ}C]$	$\Delta T_{OP\ MIN}\ [^{\circ}C]$	$\Delta T_{OP\ MEAN}\ [^{\circ}C]$	$\Delta T_{OP\ MAX}\ [^{\circ}C]$	$\Delta T_{OP\ MIN}\ [^{\circ}C]$
		5 h ⁻¹			7 h ⁻¹			14 h ⁻¹		
Ljubljana	V1	-0,28	-0,23	-0,39	-0,66	-0,55	-0,93	-1,31	-1,09	-1,82
	V2	-0,23	-0,23	-0,32	-0,54	-0,44	-0,77	-1,00	-0,63	-1,49
	V3	-0,18	-0,16	-0,28	-0,44	-0,39	-0,72	-0,90	-0,76	-1,55
	V4	-0,23	-0,18	-0,30	-0,55	-0,38	-0,71	-1,08	-0,67	-1,36
Portorož	V1	-0,38	-0,28	-0,47	-0,92	-0,68	-1,15	-1,81	-1,20	-2,25
	V2	-0,31	-0,24	-0,42	-0,74	-0,52	-1,03	-1,45	-0,82	-2,01
	V3	-0,25	-0,21	-0,40	-0,64	-0,53	-1,02	-1,37	-1,03	-2,21
	V4	-0,26	-0,16	-0,35	-0,65	-0,37	-0,85	-1,31	-0,52	-1,67
Rateče	V1	-0,41	-0,32	-0,52	-0,97	-0,76	-1,24	-1,91	-1,50	-2,43
	V2	-0,38	-0,37	-0,49	-0,90	-0,87	-1,19	-1,78	-1,71	-2,34
	V3	-0,23	-0,20	-0,36	-0,59	-0,51	-0,93	-1,29	-1,10	-2,01
	V4	-0,40	-0,38	-0,48	-0,97	-0,93	-1,17	-1,87	-1,82	-2,32

Na grafikonu 6 je prikazana še primerjava poteka notranjih operativnih temperatur med osnovnimi modeli in modeli z intenziteto nočnega prezračevanja 7 h⁻¹, ki je optimalna za večino variant. Primerjava je prikazana v Portorožu, kjer okvirno gledano pride do največjih sprememb. Vidimo lahko bistveno spremembo notranjih temperatur pri vseh variantah stavbnega ovoja. Časovni potek je sicer podoben kot pri intenziteti 4 h⁻¹, vendar so temperature v primeru intenzitete 7 h⁻¹ bistveno nižje. To velja tako za nočne kot tudi dnevne temperature.



Grafikon 6: Prikaz poteka notranjih operativnih temperatur pri povečanju intenzitete nočnega prezračevanja na 7 h⁻¹ v primerjavi s 4 h⁻¹. Potek notranjih operativnih temperatur je prikazan za poletni projektni dan v Portorožu.

3.3.3 Vpliv toplotne mase toplotne izolacije

V nadaljevanju so v preglednici 28 prikazane spremembe toplotnega odziva pri uporabi toplotne izolacije iz lesenih vlaken. Toplotna izolacija iz lesenih vlaken ima večjo toplotno kapaciteto v primerjavi s toplotno izolacijo, ki se je uporabljala pri osnovnih modelih. Iz spremembe trajanja toplotnega udobja je jasno razvidno, da ukrep pozitivno vpliva na toplotni odziv lahke variante 1, medtem ko je vpliv pri variantah 2 in 4 zanemarljiv ali celo negativen. Negativen vpliv pri masivnih variantah se kaže predvsem v toplejšem podnebnju. Variante 3 nismo analizirali, saj stavbni ovoj ni izoliran.

Pri varianti 1 ima uporaba toplotne izolacije z večjo toplotno kapaciteto zanimivo večji vpliv kot uporaba masivnih notranjih sten. V Ljubljani se namreč trajanje toplotnega udobja ob uporabi lesenih vlaken podaljša za kar 2,56 odstotni točki. V Portorožu je ta vrednost sicer manjša in izboljšava znaša 1,17 odstotne točke, v Ratečah pa je učinek največji, kjer se toplotno udobje podaljša za kar 4,2 odstotne točke. To nakazuje, da je uporaba masivne toplotne izolacije učinkovitejša v hladnejših podnebnjih, na kar nakazuje tudi rezultat primerjave učinka v toplem in hladnem delu leta. V Ljubljani in Portorožu vidimo, da je sprememba v hladnem delu leta večja, kot v toplem delu leta.

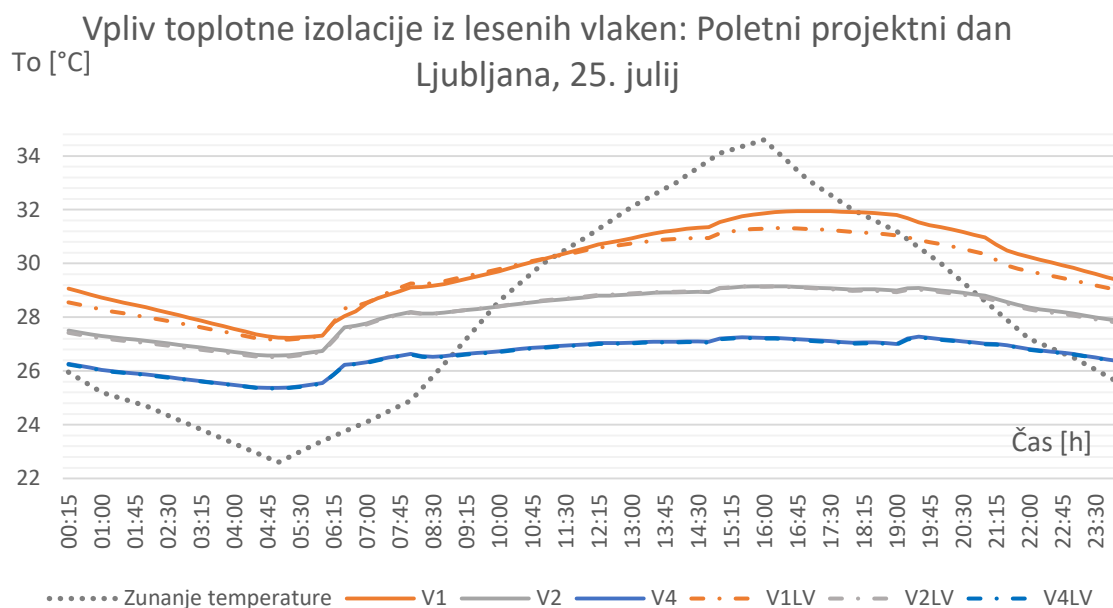
Pri notranjih temperaturah lahko opazimo podobne spremembe kot pri trajanju toplotnega udobja. Spremembe srednjih vrednosti notranjih temperatur so z izjemo poletnega in zimskega projektnega dne pri varianti 1 povsem zanemarljive. Spremembe so namreč manjše od 0,1 °C. Pri variantah 2 in 4 se tudi najvišje in najnižje dnevne temperature projektnih dni spremenijo zanemarljivo malo. Slednje je sicer zanimivo, saj bi pri precejšnjemu poslabšanju trajanja toplotnega udobja pri variantah 2 in 4 v Portorožu pričakovali večje spremembe notranjih temperatur.

Preglednica 28: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v odstotnih točkah in sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur ob uporabi toplotne izolacije iz lesenih vlaken. Legenda je prikazana na Slika 11.

		Hladni del leta	Topli del leta	Celotno leto	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan
		Δ Trajanja toplotnega udobja [odstotne točke]			$\Delta T_{OP\ MEAN}$ [°C]			$\Delta T_{OP\ MAX}$ [°C]			$\Delta T_{OP\ MIN}$ [°C]		
Ljubljana	V1	3,29	2,45	2,56	-0,24	0,05	0,29	-0,63	-0,04	0,34	-0,08	0,29	0,49
	V2	0,00	0,07	0,06	0,00	-0,05	-0,08	-0,01	-0,01	-0,05	-0,05	-0,02	-0,11
	V4	0,00	-0,28	-0,24	-0,02	0,10	-0,03	-0,02	0,10	-0,03	-0,02	0,10	-0,03
Portorož	V1	1,51	1,09	1,17	-0,01	-0,06	0,10	-0,57	-0,18	0,00	0,19	0,24	0,35
	V2	0,00	-1,02	-0,84	0,07	-0,07	-0,11	0,01	0,00	-0,07	0,00	-0,07	-0,10
	V4	0,00	-0,58	-0,48	-0,05	0,05	0,03	-0,05	0,05	0,04	-0,04	0,05	0,03
Rateče	V1	/	4,20	4,20	-0,15	0,15	0,47	-0,48	0,17	0,45	0,13	0,34	0,75
	V2	/	0,30	0,30	0,04	0,04	-0,07	0,05	0,08	-0,02	-0,02	-0,01	-0,07
	V4	/	-0,05	-0,05	-0,03	0,06	0,08	-0,03	0,05	0,08	-0,03	0,05	0,07

Pri varianti 1 so tudi spremembe notranjih temperatur tako kot spremembe trajanja toplotnega udobja nekoliko večje. Vidimo, da se že srednje vrednosti notranjih temperatur spremenijo ugodno, vendar so spremembe majhne. Nekoliko večje spremembe se pojavljajo le v Ljubljani in Ratečah na zimski projektni dan, kjer se mediana v Ratečah poveča za 0,47 °C, v Ljubljani pa za 0,29 °C. Največji učinek uporabe toplotne izolacije iz lesenih vlaken pri varianti 1 pa se kaže pri spremembi ekstremnih temperatur in znižanju nihanja notranjih temperatur. Najvišje notranje temperature se na poletni projektni dan na vseh lokacijah precej zmanjšajo. Največji padec je v Ljubljani, kjer najvišja temperatura pade za 0,63 °C, najmanjša sprememba pa je v Ratečah in znaša 0,48 °C. V Ratečah je manjši padec temperatur ugoden, saj smo v prejšnjem poglavju ugotovili, da so tu ugodne višje temperature. Nasprotno se najvišje temperature na zimski projektni dan povečajo, kar je ravno tako ugodno. V Ljubljani sprememba znaša 0,34 °C, v Ratečah 0,45 °C, v Portorožu pa spremembe zanimivo ni. Tudi s tega vidika je ugodno, da je dvig temperatur največji ravno v Ratečah, kjer so prisotne najnižje temperature. Podobno kot najvišje temperature se spreminjajo tudi najnižje. Na zimski projektni dan pride do precejšnjega zvišanja najnižjih temperatur. Te v Portorožu zrastejo za 0,35 °C, v Ljubljani za 0,49 °C, v Ratečah pa za 0,75 °C. Na poletni projektni dan se minimalne temperature zanimivo povečajo.

Za Rateče je to sicer ugoden pojav, kar pa ne velja za Portorož, kjer je dvig za $0,19\text{ }^{\circ}\text{C}$ za toplotni odziv neugoden.



Grafikon 7: Prikaz spremembe poteka notranjih operativnih temperatur pri uporabi toplotne izolacije iz lesenih vlaken na poletni projektni dan v Ljubljani.

Pozitiven vpliv uporabe toplotne izolacije iz lesnih vlaken pri varianti 1 je jasno razviden tudi iz grafikona 7. Vidimo, da je nihanje temperatur pri varianti 1 ob uporabi toplotne izolacije iz lesenih vlaken na poletni projektni dan v Portorožu precej manjše. Nihanje temperatur je v tem primeru manjše za $0,76\text{ }^{\circ}\text{C}$. Predvsem se precej znižajo najvišje notranje temperature, kar je zelo ugodno. Spremembe pri variantah 2 in 4 so medtem povsem zanemarljive oz. jih ni. Bistvene spremembe faznega zamika tudi v tem primeru podobno kot pri masivnih notranjih stenah ni. Fazni zamik pojava najvišje notranje temperature se pri varianti 1 ob uporabi toplotne izolacije iz lesenih vlaken skrajša za le 15 minut.

3.3.3.1 Vpliv pozicije toplotne izolacije z visoko toplotno maso

Preverili smo še kakšen vpliv na toplotni odziv ima pozicija toplotne izolacije z visoko toplotno kapaciteto znotraj konstrukcijskih sklopov pri varianti 1. Rezultati so prikazani v preglednici 29. Analizo smo izvedli za podnebje Ljubljane. Vidimo, da je pozicija toplotne izolacije z visoko kapaciteto izjemno pomembna. Toplotna izolacija deluje učinkovito, v kolikor je pozicionirana na notranji strani konstrukcijskega sklopa. Učinek je v tem primeru skoraj enak, kot če toplotno izolacijo iz lesenih vlaken namestimo tako na notranjo kot na zunanjo stran konstrukcijskega sklopa. Razlika je zgolj $0,01$ odstotne točke. Sicer lahko vidimo, da tudi v primeru, ko toplotno izolacijo iz lesenih vlaken uporabimo samo na zunanji strani, dosežemo izboljšanje toplotnega udobja, vendar se trajanje podaljša le za $0,54$ odstotne točke, kar je $89,7$ ur manj, kot če lesena vlakna namestimo na notranjo stran.

Hkrati smo preverili tudi, kakšen je vpliv, če toplotno izolacijo iz lesenih vlaken uporabimo samo pri določenem konstrukcijskem sklopu. Ugotovimo, da je uporaba lesenih vlaken na strehi učinkovitejša, kot pa pri steni za $0,68$ odstotne točke. Pri pozicioniranju izolacije na zunanjo stran je situacija obratna.

Preglednica 29: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v odstotnih točkah v odvisnosti od pozicije toplotne izolacije iz lesenih vlaken znotraj konstrukcijskega sloja. Analiza je izvedena v Ljubljani. Legenda je prikazana na Slika 11.

Pozicija toplotne izolacije iz lesenih vlaken:	Hladni del leta	Topli del leta	Celotno leto
	Δ Trajanja toplotnega udobja [odstotne točke]		
Povsod	3,29	2,45	2,56
Zunanja stran : streha + stena	0,67	0,52	0,54
Zunanja stran: streha	0,13	0,20	0,19
Zunanja stran: stena	0,42	0,31	0,33
Notranja stran: streha + stena	3,21	2,45	2,55
Notranja stran: streha	2,00	1,54	1,60
Notranja stran: stena	1,33	0,86	0,92

3.3.4 Vpliv spremembe solarne absorptivnosti notranjih površin

V preglednici 30 so prikazani rezultati analize, kjer smo pri notranjih površinah uporabili visok faktor solarne absorptivnosti ($\alpha = 0,8$), medtem ko so v preglednici 31 prikazani rezultati uporabe nizkega faktorja solarne absorptivnosti ($\alpha = 0,2$). Iz rezultatov je razvidno, da uporaba visokega faktorja solarne absorptivnosti toplotno udobje skrajša, medtem ko uporaba nizke vrednosti toplotno udobje podaljša. Izjema so Rateče, kjer boljše rezultate dobimo pri uporabi višjega faktorja, kar je pričakovano. Višji faktor solarne absorptivnosti namreč površini omogoča večjo absorpcijo energije sončnega sevanja. Na ostalih lokacijah sicer uporaba višjega faktorja povzroči negativno spremembo tudi v hladnem delu leta, vendar je to posledica pregrevanja v prestopnih obdobjih.

Največje spremembe se ponovno pojavijo pri varianti 1. Pri uporabi visokega faktorja se rezultati tu najbolj poslabšajo (za 1,04 odstotno točko), medtem ko se pri uporabi nizkega faktorja trajanje toplotnega udobja precej podaljša (za 3,4 odstotne točke). Sicer pa največjo spremembo beležimo pri varianti 2, kjer se pri nizkem faktorju solarne absorptivnosti v Portorožu toplotno udobje izboljša za 3,6 odstotne točke. Na splošno se največje spremembe pojavijo v Portorožu, kar je pričakovano, saj je to lokacija z največ prejetega sončnega sevanja in uporaba nižjega faktorja solarne absorptivnosti zniža absorpcijo toplotne. Po velikosti sprememb nato sledi Ljubljana, v Ratečah pa so spremembe zanemarljivo majhne. Je pa v Ratečah toplotni odziv variant nekoliko drugačen. Največje izboljšanje trajanja toplotnega udobja tu opazimo pri varianti 4, medtem ko je največje poslabšanje odziva pri varianti 1. Pri variantah 2 in 3 se tu v obeh primerih rezultati nekoliko poslabšajo, kar pomeni, da so tu optimalne srednje vrednosti faktorja solarne absorptivnosti.

Preglednica 30: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v odstotnih točkah in sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur pri visoki vrednosti faktorja solarne absorptivnosti notranjih površin, $\alpha = 0,8$. Legenda je prikazana na Slika 11.

		Hladni del leta	Topli del leta	Celotno leto	Hladni del leta	Topli del leta	Celotno leto	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan
$\alpha = 0,8$		Δ Trajanja toplotnega udobja [odstotne točke]			$\Delta T_{OP\ MEAN}$ [°C]			$\Delta T_{OP\ MAX}$ [°C]			$\Delta T_{OP\ MIN}$ [°C]		
Ljubljana	V1	-1,00	-0,72	-0,75	0,05	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,03	0,07	0,07
	V2	0,00	-0,59	-0,51	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04
	V3	0,00	-0,09	-0,08	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
	V4	0,00	-0,12	-0,11	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02
Portorož	V1	-0,94	-1,06	-1,04	0,05	0,07	0,06	0,06	0,07	0,03	0,03	0,06	0,05
	V2	0,00	-1,24	-1,02	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,04
	V3	0,23	-0,30	-0,20	0,95	0,72	0,59	0,08	0,08	0,05	0,01	0,01	0,01
	V4	0,00	-0,59	-0,49	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
Rateče	V1	/	0,16	0,16	0,05	0,08	0,07	0,06	0,10	0,05	0,03	0,07	0,05
	V2	/	-0,05	-0,05	0,04	0,07	0,04	0,04	0,07	0,05	0,03	0,06	0,05
	V3	/	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	0,01	-0,02	-0,02	-0,02	0,01	0,01	0,02
	V4	/	0,18	0,18	0,04	0,05	0,05	0,04	0,06	0,04	0,03	0,05	0,05

Pri pregledu preglednice 30 lahko opazimo še nekoliko nenavaden odziv variante 3. V Portorožu se namreč ob uporabi visokega faktorja solarne absorptivnosti trajanje toplotnega udobja podaljša. Gre za edini primer izboljšanja trajanja toplotnega udobja ob uporabi visokega faktorja solarne absorptivnosti v Ljubljani in Portorožu. Sicer obstaja verjetnost, da bi izboljšanje videli tudi pri variantah 2 in 4, vendar sta ti varianti že v sklopu osnovnega modela dosegali toplotno udobje v celotnem času uporabnosti modela adaptivnega toplotnega udobja in možnosti za izboljšavo po tej metodi ni. Vidimo pa lahko, da poslabšanja pri teh dveh variantah v hladnem delu leta ni.

Preglednica 31: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v odstotnih točkah in sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur pri nizki vrednosti faktorja solarne absorptivnosti notranjih površin, $\alpha = 0,2$. Legenda je prikazana na Slika 11.

$\alpha = 0,2$		Hladni del leta	Topli del leta	Celotno leto	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan
		Δ Trajanja toplotnega udobja [odstotne točke]			$\Delta T_{OP\ MEAN}$ [°C]			$\Delta T_{OP\ MAX}$ [°C]			$\Delta T_{OP\ MIN}$ [°C]		
Ljubljana	V1	2,00	2,15	2,13	-0,14	-0,20	-0,20	-0,21	-0,21	-0,20	-0,09	-0,18	-0,18
	V2	0,00	1,94	1,68	-0,13	-0,19	-0,17	-0,16	-0,19	-0,15	-0,12	-0,20	-0,16
	V3	0,63	0,16	0,23	-0,02	-0,05	-0,04	-0,02	-0,01	0,00	-0,05	-0,05	-0,04
	V4	0,00	0,07	0,06	-0,14	-0,17	-0,07	-0,15	-0,16	-0,06	-0,12	-0,18	-0,07
Portorož	V1	2,19	3,67	3,40	-0,15	-0,21	-0,18	-0,20	-0,24	-0,21	-0,09	-0,17	-0,15
	V2	0,00	4,38	3,60	-0,13	-0,19	-0,17	-0,15	-0,18	-0,13	-0,11	-0,18	-0,15
	V3	-3,20	1,44	0,61	-0,06	-0,08	-0,06	-0,07	-0,07	-0,04	-0,06	-0,07	-0,06
	V4	0,00	1,78	1,46	-0,13	-0,17	-0,13	-0,15	-0,16	-0,10	-0,12	-0,16	-0,12
Rateče	V1	/	-0,41	-0,41	-0,15	-0,27	-0,20	-0,19	-0,32	-0,21	-0,09	-0,21	-0,15
	V2	/	-0,39	-0,39	-0,13	-0,24	-0,16	-0,15	-0,25	-0,15	-0,11	-0,23	-0,18
	V3	/	-0,17	-0,17	-0,04	-0,09	-0,05	-0,02	-0,04	-0,01	-0,06	-0,08	-0,05
	V4	/	-0,69	-0,69	-0,13	-0,21	-0,16	-0,14	-0,22	-0,13	-0,12	-0,21	-0,16

Spremembe notranjih temperatur so povsod zanemarljivo majhne. Izjema je le varianta 3 v Portorožu, kjer se mediana pri faktorju solarne absorptivnosti 0,8 poveča za 0,95 °C. Tu se nekoliko dvigneta tudi najvišja (za 0,72 °C) in najnižja temperatura (za 0,59 °C). Sicer pa se vse notranje temperature pri uporabi višjega faktorja solarne absorptivnosti povečajo, pri uporabi nižjega faktorja pa zmanjšajo. Pri tem je ponovno izjema varianta 3, kjer se pri uporabi višjega faktorja solarne absorptivnosti v Ratečah srednje vrednosti in najvišja temperatura celo znižajo, vendar je sprememba zanemarljiva.

Ob analizi dnevnega poteka notranjih operativnih temperatur za faktor solarne absorptivnosti notranjih površin, $\alpha = 0,2$ na poletni projektni dan v Portorožu, kjer so spremembe največje, smo ugotovili, da bistvenih sprememb ni. Temperature pri vseh variantah v primerjavi z osnovnim modelom sicer rahlo padejo, vendar so spremembe zanemarljive. Največje znižanje temperatur je opazno pri varianti 1.

3.3.5 Vpliv različnih vrst talnih oblog

V preglednici 32 so prikazane spremembe trajanja toplotnega udobja ob uporabi različnih talnih oblog. Vidimo, da so masivnejše obloge bolj primerne. Keramične ploščice, ki smo jih uporabili pri osnovnem modelu, namreč dajejo boljše rezultate od manj masivnega parketa in vinila. Na drugi strani uporaba še bolj masivne talne obloge v obliki kamna toplotno udobje še dodatno izboljša.

Od lažjih oblog omogoča boljši toplotni odziv vinil. Zmanjšanje časa trajanja toplotnega udobja je tu manjše kot pri parketu. Ponovno pride do največjih sprememb pri varianti 1. Do največjega zmanjšanja toplotnega udobja pride v Ratečah, kjer se čas zmanjša za 1,61 odstotne točke. V Ljubljani se čas zmanjša za 1 odstotno točko, v Portorožu pa za 0,7 odstotne točke. Spremembe so pri variantah 2, 3 in 4 zanemarljivo majhne. Kljub temu pa velikost sprememb opazno pada od variante 2 do variante 4. Spremembe so večje v hladnem delu leta.

Preglednica 32: Prikaz sprememb trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja izraženih v odstotnih točkah pri uporabi različnih talnih oblog. Legenda je prikazana na Slika 11.

		Hladni del leta	Topli del leta	Celotno leto	Hladni del leta	Topli del leta	Celotno leto	Hladni del leta	Topli del leta	Celotno leto	Hladni del leta	Topli del leta	Celotno leto
		Δ Trajanja toplotnega udobja [odstotne točke]:			Δ Trajanja toplotnega udobja [odstotne točke]:			Δ Trajanja toplotnega udobja [odstotne točke]:			Δ Trajanja toplotnega udobja [odstotne točke]:		
		Parket			Kamen			Vinil			Preproga		
Ljubljana	V1	-1,67	-1,71	-1,71	1,25	0,96	1,00	-1,58	-0,90	-1,00	-5,00	-5,47	-5,41
	V2	0,00	-0,70	-0,61	0,00	0,55	0,48	0,00	-0,42	-0,36	0,00	-2,12	-1,83
	V3	0,08	-0,51	-0,43	-0,13	0,23	0,19	0,08	-0,32	-0,26	0,04	-1,67	-1,44
	V4	0,00	-0,17	-0,15	0,00	0,01	0,01	0,00	-0,07	-0,06	0,00	-0,79	-0,69
Portorož	V1	-2,45	-1,78	-1,90	0,96	0,67	0,72	-1,17	-0,60	-0,70	-7,27	-5,96	-6,19
	V2	0,00	-1,65	-1,35	0,00	0,67	0,55	0,00	-0,71	-0,58	0,00	-4,62	-3,79
	V3	-0,83	-0,14	-0,26	0,00	1,09	0,90	-1,09	0,09	-0,12	-1,02	-1,49	-1,40
	V4	0,00	-0,65	-0,53	0,00	0,20	0,16	0,00	-0,22	-0,18	0,00	-2,29	-1,88
Rateče	V1	/	-1,73	-1,73	/	1,72	1,72	/	-1,61	-1,61	/	-4,97	-4,97
	V2	/	-0,35	-0,35	/	0,29	0,29	/	-0,45	-0,45	/	-0,81	-0,81
	V3	/	-0,13	-0,13	/	0,13	0,13	/	-0,10	-0,10	/	-0,39	-0,39
	V4	/	-0,14	-0,14	/	0,24	0,24	/	-0,18	-0,18	/	-0,37	-0,37

Pri parketu opazimo enak trend spreminjanja trajanja toplotnega udobja kot pri vinilu, le da je poslabšanje toplotnega odziva nekoliko večje. Ponovno so spremembe večje v hladnem delu leta, varianta 1 je najbolj občutljiva, velikost sprememb pa nato pada od variante 2 do 4. Pri varianti 1 je tokrat največje zmanjšanje trajanja toplotnega udobja v Portorožu, kjer se le to zmanjša za 1,9 odstotne točke. Spremembe pri variantah 3 in 4 so tudi v tem primeru zanemarljivo majhne. Nekoliko večje pa so spremembe ob uporabi parketa pri varianti 2 v Portorožu, kjer beležimo zmanjšanje trajanja toplotnega udobja za 1,35 odstotne točke in v Ljubljani, kjer je poslabšanje 0,61 odstotne točke.

Red velikosti sprememb je pri uporabi kamnite talne obloge povsem primerljiv z vinilom, le da se tu trajanje toplotnega udobja poveča. Ponovno so spremembe največje pri varianti 1, velikost sprememb pa se manjša s povečevanjem mase in toplotne izolativnosti stavbnega ovoja. V Ratečah, kjer je sprememba največja se toplotno udobje pri varianti 1 podaljša za 1,72 odstotne točke, Ljubljani je sprememba 1,0 odstotna točka, v Portorožu pa 0,72 odstotne točke, kar je zanemarljivo. Zanimivo je v Portorožu pri varianti 3 sprememba trajanja toplotnega udobja večja kot pri varianti 1. Pri varianti 3 se tu udobje podaljša za največ časa in sicer za 0,90 odstotne točke.

Presenetljivi so rezultati ob simuliranju uporabe preproge. Predvsem pri varianti 1 opazimo drastično zmanjšanje trajanja toplotnega udobja. V Portorožu, kjer je sprememba največja, se udobje skrajša za kar 6,19, v Ljubljani za 5,19, v Ratečah pa za 4,97 odstotne točke. Tako v hladnem, kot v toplem delu leta pride pri varianti 1 do podobnega poslabšanja toplotnega udobja, kar pa zanimivo ne velja za ostale variante. V hladnem delu leta namreč lahko zmanjšanje trajanja toplotnega udobja opazimo le še pri varianti 3 v Portorožu (1,02 odstotno točko), medtem ko pri ostalih variantah in lokacijah v hladnem delu leta ni nikakršnih sprememb. Prihaja pa tudi pri ostalih variantah do precejšnjega poslabšanja v toplem delu leta. Zmanjšanje časa trajanja udobja je namreč tudi pri varianti 2 precej veliko. V Portorožu se trajanje udobja skrajša za 3,97 odstotne točke, v Ljubljani za 1,83 odstotno točko, v Ratečah pa za 0,81 odstotne točke. V Ratečah so pri vseh variantah z izjemo variante 1 spremembe zelo majhne. Varianti 2 nato sledita varianti 3 in 4. V Ljubljani in Portorožu lahko tudi pri teh dveh variantah opazimo nekoliko večje poslabšanje udobja, medtem ko so spremembe v Ratečah zanemarljive (manj od 0,4 odstotne točke).

Spremembe notranjih operativnih temperatur so z izjemo preproge zanemarljive. Pri ostalih talnih oblogah so namreč spremembe povsod manj kot 0,22 °C. Najvišje spremembe so sicer pričakovane tudi v tem primeru pri varianti 1. Pri ostalih variantah so spremembe še manjše (manj od 0,1 °C). Pri uporabi vinila in parketa se srednje in najvišje temperature rahlo dvignejo, najmanjše temperature pa se rahlo znižajo. Pri kamniti talni oblogi je situacija obratna. Srednje in najvišje temperature se tu z izjemo zimskih projektne dni rahlo znižajo, najmanjše temperature pa se rahlo zvišajo.

V preglednici 33 so prikazane še spremembe notranjih operativnih temperatur pri uporabi preproge. Vidimo, da so spremembe srednje temperature pri vseh variantah in lokacijah podobne. Na poletni projektne dan se pri vseh variantah povišajo za cca. 0,2 °C, na tipični projektne dan za cca. 0,05 °C, na zimski projektne dan pa se zmanjšajo za cca 0,2 °C. Spremembe so, kot vidimo zanemarljivo majhne.

Spremembe ekstremnih temperatur so glede na rezultate trajanja toplotnega udobja nekoliko nepričakovane. Najvišje temperature se povsod povečajo. Glede zmanjšanja trajanja toplotnega udobja v hladnem delu leta bi tu pričakovali padec najvišjih temperatur na zimski projektne dan. Obratno pa je pri najnižjih temperaturah, kjer bi poleti glede na trajanje toplotnega udobja pričakovali povečanje minimalnih notranjih temperatur. Največje spremembe ponovno beležimo pri varianti 1. Najvišje temperature tu na vseh treh lokacijah poleti zrastejo za cca. 0,9 °C, na tipičen projektne dan za cca. 0,6 °C, na zimski projektne dan pa od 0,31–0,55 °C. Vidimo, da je ravno v Ratečah dvig največji, kar je

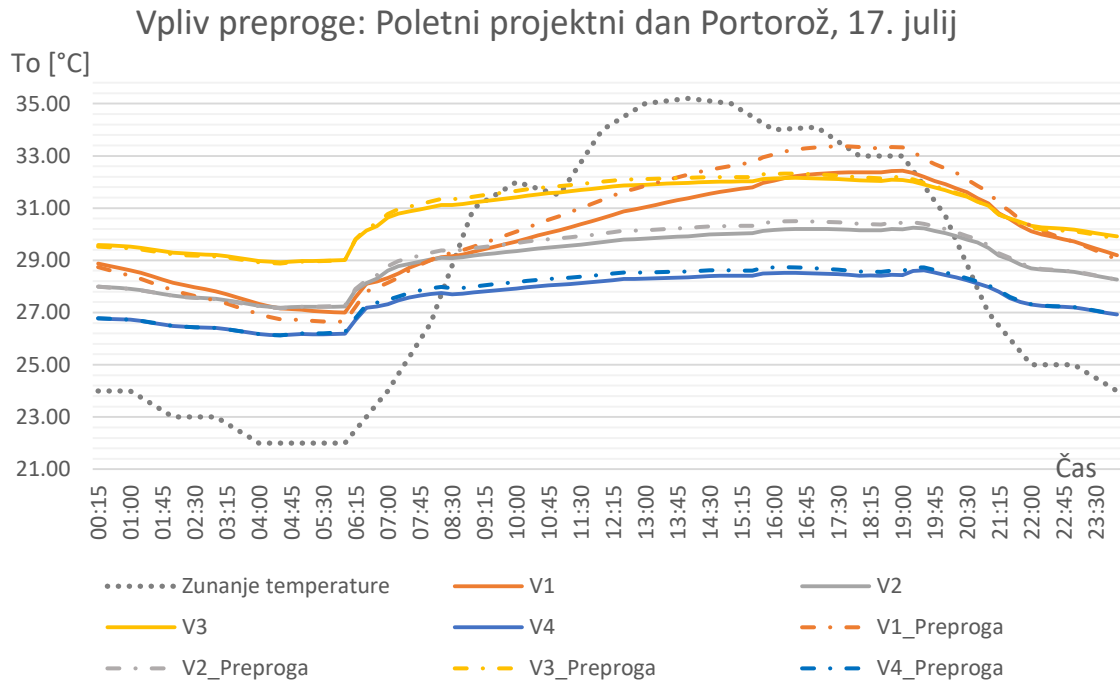
povsem v nasprotju z ostalimi rezultati raziskave, kjer so običajno temperature v Ratečah najnižje. Spremembe najnižjih temperatur pri varianti 1, se gibajo med 0,37 in 0,51 °C. Spremembe ekstremnih temperatur so pri ostalih variantah bistveno manjše in po večini zanemarljive.

Preglednica 33: Prikaz sprememb ključnih parametrov poteka notranjih operativnih temperatur pri uporabi preproge. Legenda je prikazana na Slika 11.

		Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan	Poletni projektni dan	Tipičen projektni dan	Zimski projektni dan
		$\Delta T_{OP\ MEAN}$ [°C]			$\Delta T_{OP\ MAX}$ [°C]			$\Delta T_{OP\ MIN}$ [°C]		
Ljubljana	V1	0,24	0,07	-0,25	0,88	0,53	0,31	-0,33	-0,26	-0,51
	V2	0,21	0,06	-0,14	0,28	0,21	0,09	0,02	-0,01	-0,15
	V3	0,17	-0,02	-0,15	0,20	0,10	0,04	-0,01	-0,04	-0,14
	V4	0,15	0,11	-0,06	0,17	0,22	0,10	0,02	0,06	-0,06
Portorož	V1	0,26	0,02	-0,08	0,94	0,66	0,46	-0,35	-0,40	-0,37
	V2	0,29	0,04	-0,07	0,25	0,23	0,13	-0,02	0,02	-0,08
	V3	0,17	-0,03	-0,09	0,16	0,07	0,05	-0,05	-0,03	-0,11
	V4	0,22	0,08	-0,01	0,13	0,22	0,14	0,00	0,07	-0,04
Rateče	V1	0,19	0,01	-0,25	0,91	0,55	0,55	-0,41	-0,45	-0,45
	V2	0,24	0,04	-0,15	0,27	0,14	0,12	-0,04	-0,04	-0,20
	V3	0,11	-0,04	-0,15	0,17	0,05	0,05	-0,06	-0,04	-0,18
	V4	0,15	-0,01	-0,08	0,20	0,08	0,15	-0,03	-0,03	-0,10

Potek temperatur pri uporabi preproge pa je prikazan na grafikonu 8. Analizo smo izvedli za poletni projektni dan v Portorožu, kjer je prišlo do največjega poslabšanja trajanja toplotnega udobja. Vidimo, da se dnevne operativne temperature pri vseh variantah dvignejo, najbolj pa je to opazno pri varianti 1. V nočnem času zanimivo sprememb z izjemo variante 1 ni. Pri vseh variantah lahko opazimo tudi zmanjšanje faznega zamika. Zanimivo večje skrajšanje faznega zamika opazimo pri variantah z nizko toplotno prehodnostjo stavbnega ovoja. Najbolj pa se fazni zamik skrajša pri variantah 2 in 4, kjer stavbni ovoj predstavlja kombinacijo visoke toplotne mase in nizke toplotne prehodnosti. Največje

skrajšanje faznega zamika se zgodi pri varianti 4, ki ima večjo toplotno maso od variante 2. Tu se fazni zamik zmanjša za kar 3 ure. Pri varianti 2 se zmanjša za 2.45 h, pri varianti 1 za 1.3 h, pri varianti 3 pa le za 30 minut.



Grafikon 8: Prikaz spremembe poteka notranjih operativnih temperatur pri uporabi preproge na poletni projektni dan v Portorožu.

»Ta stran je namenoma prazna.«

4 RAZPRAVA

4.1 Toplotni odziv po metodi adaptivnega toplotnega udobja

Na splošno ugotovimo, da je ne glede na varianto stavbnega ovoja pričakovano največ časa toplotno udobje doseženo v Portorožu, najmanj časa pa v Rateča, kar je posledica omejitve metode adaptivnega toplotnega udobja. Kot lahko vidimo v preglednici 18 je namreč razlika v času uporabnosti modela med različnimi lokacijami tako velika, da je težko pričakovati, da bi lahko z uporabljenimi pasivnimi strategijami in izbranimi vhodnimi podatki npr. v Ratečah dosegali podobno trajanje toplotnega udobja kot v Ljubljani.

Na vseh lokacijah so bile v času aplikabilnosti modela dosežene visoke stopnje toplotnega udobja (72,7 %–100 %). Modeli so zasnovani na podlagi veljavne zakonodaje, standardov in priporočil različne strokovne literature, katere ugotovitve temeljijo na analizah in študijah dejanskih primerov. Tako je pričakovano, da imajo zasnovane stavbe dober toplotni odziv in visoko doseženo udobje v prostem teku. Hkrati pa je to posledica tudi že omenjene omejitve uporabljene metode, da je ta uporabna le v času, ko so zunanje temperature med 10 °C in 30 °C, takrat pa se lažje približamo optimalni operativni temperaturi. Do podobnih vrednosti toplotnega udobja je v svoji analizi prišel tudi Možina [57], ki je na podlagi metode adaptivnega toplotnega udobja analiziral vpliv posameznih ukrepov na toplotni odziv brunarice v okolici Ljubljane.

Ob pregledu rezultatov smo ugotovili, da pričakovano najvišjo stopnjo toplotnega udobja na vseh lokacijah doseže varianta 4, ki predstavlja kombinacijo izjemno visoke toplotne mase in nizke toplotne prehodnosti. Izjemno visoke vrednosti (97 %–100 %) toplotnega udobja doseže tako v hladnem, kot v toplem delu leta, kar kaže, da varianta 4, ob uporabi metode adaptivnega toplotnega udobja izčrpa praktično celoten bioklimatski potencial za zagotavljanje ugodnih temperaturnih pogojev. Varianti 4 sledi varianta 2, ki ravno tako na vseh lokacijah dosega zelo visoke stopnje toplotnega udobja, za varianto 4 pa zaostaja od 1,5 do 8,9 odstotnih točk, odvisno od lokacije. Presenetljiv je izjemno dober odziv variante 3. Ob pomanjkanju toplotne izolacije smo pričakovali, da se bo ta varianta obnašala najslabše. Zlasti to velja za hladen del leta, vendar bistvenega poslabšanja v primerjavi s toplim delom leta ni in je razlika manjša od pričakovanega. Vseeno pa je iz rezultatov jasno razviden pomen toplotne izolacije v hladnem delu leta, saj je varianta 3 edina, ki se je v hladnem delu leta obnašala slabše kot v toplem delu. Odstotek doseženega toplotnega udobja se sicer v Portorožu v hladnem delu leta v primerjavi z Ljubljano poveča, vendar je to posledica toplejšega podnebja v Portorožu. Kljub nepričakovano dobremu odzivu variante 3 je čas trajanja toplotnega udobja z izjemo Rateč bistveno krajši, kot pri variantah 2 in 4, in sicer za 9,5–16,3 odstotnih točk. V Ratečah so razlike med variantami manjše, med variantami 2, 3 in 4 pa zanemarljive. V Portorožu se v primerjavi z Ljubljano razlika med variantama 2 in 3 skrajša, kar nakazuje na velik pomen toplotne mase v toplejših podnebjih.

Najslabše od analiziranih variant se je odzivala varianta 1. Dosega bistveno nižje stopnje toplotnega udobja, kot varianti 2 in 4, predvsem pa je zanimiv slabši toplotni odziv v primerjavi z neizolirano varianto 3. Od variante 3 je namreč v Ljubljani slabša za 4,8 odstotne točke, od variante 2 za 14,5 odstotne točke, od variante 4 pa za 20,2 odstotne točke. V Portorožu so razlike podobne. Od variante 3 je varianta 1 tu slabša za 4,1 odstotne točke, od variante 2 za 11,5, od variante 4 pa za 20,4 odstotne točke. V Ratečah je razlika variante 1 do ostalih treh variant 16 odstotnih točk. Analiza je tako pokazala precejšnjo razliko med najboljšo varianto 4 in najslabšo varianto 1. V toplejšem podnebjem Portoroža,

kjer je razlika med variantama največja, toplotno udobje pri varianti 4 v celotnem letu traja za kar 45,4 dni več kot pri varianti 1.

Kljub zgoraj omenjenim rezultatom pa ne smemo trditi, da je varianta 1 splošno gledano bistveno slabša od ostalih. To velja le v okviru metode adaptivnega toplotnega udobja. Najslabši toplotni odziv ima varianta 1 le v toplem delu leta. V kolikor podrobneje pogledamo toplotne odzive v hladnem delu leta, vidimo, da je varianta 1 precej boljša od variante 3, za variantama 2 in 4, ki imata v hladnem delu leta enako trajanje toplotnega udobja, pa na obeh lokacijah zaostaja le za 5,3 odstotne točke. Tu je potrebno izpostaviti dejstvo, da je ta razlika posledica pregrevanja variante 1 v drugi polovici aprila. V kolikor bi model zastavili drugače, bi lahko to reševali z dodatnim prezračevanjem, saj so zunanje temperature v času pregrevanja nižje. Tako bi lahko tudi pri varianti 1 v hladnem delu leta toplotno udobje dosegli 100 % časa uporabnosti modela, kar pomeni, da se varianta 1 v hladnem delu leta odziva zelo dobro. Letni rezultat je posledica velikega nesorazmerja med količino ur, ko je model adaptivnega toplotnega udobja v posamezni polovici leta uporaben. Razlika je npr. v Ljubljani kar 73,1 %, v Ratečah pa v hladnem delu leta model celo ni uporaben. Na skupni rezultat, ki predstavlja skupno količino ur v celotnem letu, tako bistveno bolj vpliva toplotni odziv v toplem delu leta. Tako lahko trdimo, da je varianta 1 v vseh pogledih slabša od variant 2 in 4, saj je slabša tako v hladnem, kot tudi v toplem delu leta. Ne moremo pa trditi, da je na letnem nivoju slabša od variante 3. Slednje lahko trdimo le za topli del leta oz. na letni ravni v okviru metode adaptivnega toplotnega udobja in vseh njenih omejitev. Sklepamo, da bi, v kolikor bi bil model v hladnem in toplem delu leta uporaben enako časa, varianta 1 imela primerljiv oz. boljši toplotni odziv od variante 3, razlika do variant 2 in 4 pa bi bila bistveno manjša. Iz tega lahko povzamemo, da je metoda adaptivnega toplotnega udobja za potrebe vrednotenja učinkovitosti posameznih pasivnih ukrepov, ki imajo v toplem in hladnem delu leta različen učinek primernejša za podnebja, kjer je čas uporabnosti modela v toplem in hladnem delu leta primerljiv. V nasprotnem primeru je metoda primerna le za vrednotenje ukrepov v posameznem delu leta. Gre za precejšnjo pomanjkljivost metode, na katero so opozorili že Carlucci *et al.* [58], ki so izvedli obsežen pregled delovanja metod adaptivnega toplotnega udobja, ki jih podajajo različni standardi. Ugotovili so, da noben izmed standardov ne določa obdobja, v katerem je pri posameznem podnebjem smiselna uporaba te metode. Posledično se toplotnega odziva v času, ko metoda ni uporabna, ne da ovrednotiti, kar lahko pripelje do nepopolnih rezultatov, napačnih interpretacij in zatekanja k uporabi drugih metod za določitev toplotnega udobja. Težava izhaja iz že omenjenega problema, ki sta ga izpostavila de Dear in Brager [20], da se stroka ne more uskladiti, kako vrednotiti udobje pri zunanjih temperaturah pod 10 °C in nad 30 °C. Za večjo zanesljivost metode za vrednotenje posameznih pasivnih ukrepov, ki imajo v toplem in hladnem delu leta različen učinek, so tako potrebne izboljšave metode adaptivnega toplotnega udobja.

Še ena omejitev metode adaptivnega toplotnega udobja je, da je metoda manj univerzalna, saj je pogojena tudi s kulturološkim kontekstom, ki determinira pričakovanja uporabnikov. Tako tudi iz tega vidika ne smemo preveč posploševati pridobljenih rezultatov, saj je v realnosti toplotno udobje subjektivno pogojeno, na kar so tudi opozorili Carlucci *et al.*

Kot smo že omenili, je iz rezultatov hladnega in toplega dela leta razvidno, da v hladnem delu varianta 1 niti ni bistveno slabša od variant 2 in 4, medtem ko je varianta 3 daleč najslabša. V toplem delu leta pa je najslabša varianta 1, medtem ko se varianti 3 bistveno izboljša toplotni odziv in se že približa variantama 2 in 4. Iz tega lahko sklepamo, da je v hladnem delu leta nizka toplotna prehodnost stavbnega ovoja pomembnejši pasivni ukrep od visoke toplotne mase. Na drugi strani pa je v toplem delu leta toplotna masa pomembnejša. Rezultati se ujemajo z ugotovitvami podobnih raziskav. Hudobivnik *et al.*

[59] so ob izvajanju analiz za podnebje Ljubljane v toplem delu leta prišli do enakih zaključkov. Ugotovili so, da se masivnejši stavbni ovoj obnaša bolje kljub nizki toplotni prehodnosti lahkega ovoja. Preverjali so sicer stavbni ovoj brez transparentnih elementov, pri čimer so izpostavili, da bi se lahko toplotni odziv stavbnega ovoja s transparentnimi elementi poslabšal, vendar smo v tej študiji ugotovili, da temu ni tako in se masivni stavbni ovoj še vedno obnaša bistveno bolje od lahkega kljub prisotnosti odprtín. Vseeno pa vidimo, da tudi samo toplotna masa v toplem delu leta ni dovolj. Trajanje udobja pri varianti 3 v Portorožu v primerjavi z Ljubljano v toplem delu leta pade bolj, kot pri variantah 2 in 4. Slednje kaže, da pri toplejših podnebjih sama toplotna masa ne učinkuje več tako dobro in je nujno potrebna tudi toplotna izolacija. Najboljše rezultate kažeta namreč stavbna ovoja variant 2 in 4, ki predstavljata kombinacijo nizke toplotne prehodnosti in visoke toplotne mase. Slednje ugotovitve kažejo na pomanjkljivost veljavne zakonodaje v Sloveniji. PURES in Tehnična smernica TSG-1-004, ki je po pravilniku obvezna za uporabo namreč jasno predpisujeta stroge zahteve za nizko toplotno prehodnost stavbnega ovoja, medtem ko toplotna masa stavbnega ovoja ni nikjer predpisana. V trenutno veljavni zakonodaji je toplotna masa stavbe omenjena le pri izračunu dovedene toplote za ogrevanje oz. hlajenje. Ta problem sta v svoji analizi izpostavila tudi Strazzeri in Karrech [15], ki sta ugotovila, da neizolirana stavba iz butane zemlje, ki ne izpolnjuje minimalnih zahtev avstralske zakonodaje za toplotno prehodnost stavbnega ovoja v treh od petih analiziranih podnebjih izpolnjuje zahteve zakonodaje za nizko rabo energije. V naši študiji sicer rabe energije nismo preverjali, vendar sta toplotno udobje in raba energije kot ugotavljajo Yang *et al.* [60] močno povezana. Iz obsežnega pregleda literature ugotavljajo, da predvsem ob implementaciji adaptivnega toplotnega udobja lahko bistveno znižamo potrebe po rabi energije, vendar je učinkovitost hkrati zelo odvisna od kulturološkega in subjektivnega determiniranja toplotnega udobja. Lahko pa pri stavbah, kjer več časa dosežemo toplotno udobje, pričakujemo tudi nižjo rabo energije.

4.2 Vloga različnih podnebij pri toplotnem odzivu

Ugotovili smo, da so razlike med posameznimi variantami ob uporabi enakega primerjalnega obdobja za vse lokacije večje v toplejših podnebjih. Največje so v Portorožu, sledi Ljubljana, najmanjše razlike pa so v Ratečah, kjer je podnebje najhladnejše. To nakazuje, da je pravilna raba toplotne mase in nizke toplotne prehodnosti pomembnejša pri toplejših podnebjih, kar je skladno z ugotovitvami različnih študij, ki so preučevale vpliv toplotne mase stavbnega ovoja na toplotni odziv (npr. [14], [47], [48], [49] in [59]).

Iz rezultatov vidimo, da je pričakovano varianta 1 v najhladnejšem podnebj v Ratečah najbližje variantama 2 in 4. Na drugi strani pa toplejše kot je podnebje, slabši je odziv variante 1 in večja je razlika do variant 2 in 4. Slednje kaže, da so lažje stavbe bolj primerne za hladnejša podnebja. Učinkovitost posameznih variant sicer s premikom v toplejša podnebja pada, vendar lahko vidimo, da večja kot je toplotna masa stavbnega ovoja (ob kombinaciji z nizko toplotno prehodnostjo), manjša je sprememba. To nakazuje na manjšo občutljivost masivnih stavb na spremembe podnebja in dvig zunanjih temperatur. Tako lahko pričakujemo, da bi se razlike med najslabšo varianto 1 in najboljšo varianto 4 v še toplejšem podnebj dodatno povečale. Za potrditev te domneve so potrebne nadaljnje analize, saj lahko ob določeni spremembi podnebja pričakujemo tudi bistveno poslabšanje toplotnega odziva variante 4. To hkrati predstavlja tudi eno izmed omejitev študije. V študiji se namreč ni preveril toplotni odziv stavb v prihodnosti, kjer se napoveduje dvig povprečnih temperatur. V luči podnebnih sprememb namreč obstajajo različni scenariji, kako se bo spreminjalo podnebje v prihodnosti. Vse raziskave pa

predvidevajo povišanje povprečnih temperatur. Collins *et al.* [61] na primer do konca enaindvajsetega stoletja predvidijo dvig povprečne temperature za 4 °C. Da gre za pomemben vpliv na toplotni odziv je v svoji raziskavi dokazal tudi Možina [57], ki je ugotovil, da se ob uporabi enakih pasivnih ukrepov pri brunarici na podlagi projekcij podnebnih sprememb do konca stoletja lahko toplotno udobje uporabnikov zmanjša za 13,3 % v primerjavi z obdobjem 2010–2040.

Omeniti je potrebno še eno zanimivost, ki jo lahko opazimo iz rezultatov preglednici 20. Varianti 2 in 4 imata toliko boljši toplotni odziv v primerjavi z ostalima variantama, da v Ljubljani dosežeta toplotno udobje dlje časa, kot varianti 1 in 3 v Portorožu, kljub dejstvu, da ima Portorož na voljo kar 9,4 odstotnih točk več časa, ko je model uporaben. Slednje je še en dokaz, da je kombinacija visoke toplotne mase in nizke toplotne prehodnosti stavbnega ovoja izjemnega pomena. Neustrezna zasnova stavbnega ovoja namreč lahko, kot vidimo tudi v podnebjih z bolj ugodnimi zunanji temperaturami, privede do slabšega toplotnega odziva, kot pri dobro zasnovanem stavbnem ovoju v bolj neugodnem podnebjih.

4.3 Potek notranjih temperatur

Nihanje notranjih temperatur je pri variantah z masivnim stavbnim ovojem bistveno manjše. Variante 2, 3 in 4 so z vidika nihanja notranjih temperatur primerljive in bolj stabilne od variante 1. V povprečju je nihanje notranjih temperatur pri teh variantah manjše od variante 1 za 2 °C. To velja tudi za neizolirano varianto 3, kar nakazuje, da je nihanje notranjih temperatur v večji meri pogojeno s toplotno maso, kot pa z nizko toplotno prehodnostjo stavbnega ovoja. Dejstvo, da je nihanje notranjih temperatur pri variantah 2, 3 in 4 povsem primerljivo oz. je pri varianti 2 v nekaj primerih celo manjše, pa pomeni, da na neki točki nadaljnjo povečevanje toplotne mase nima več vpliva na zmanjševanje nihanja notranjih temperatur. Podoben pojav je moč opaziti tudi pri analizi, ki so jo izvedli Hudobivnik *et al.* [59]. Pri zunanji kamniti steni debeline 50 cm in opečnati steni iz polne opeke debeline 36 cm je bila razlika v nihanju notranjih temperatur le 0,25 °C.

Iz pregleda različnih lokacij ugotovimo, da je temperaturno nihanje večje pri toplejših podnebjih, kar ponovno nakazuje na večjo pomembnost toplotne mase pri toplejših podnebjih, kar je skladno z rezultati podobnih raziskav [47], [49]. Največje nihanje notranje temperature je tako pri varianti 1 na poletni projektni dan v Portorožu in znaša 5,4 °C. Nihanja temperatur so nekoliko večja, kot so jih pridobili Pajek *et al.* [49], ki so analizirali samo vpliv toplotne mase pri zunanji steni, medtem ko so bili za ostale robne pogoje predpostavljeni adiabatni pogoji. Slednje nakazuje, da pri dejanski stavbi, kjer se vpliv toplotne mase analizira pri več konstrukcijskih sklopih, prihaja do superpozicije vplivov in bolj neugodnih rezultatov.

Poleg manjšega nihanja notranjih temperatur opazimo pri masivnejših variantah tudi ugodnejše vrednosti. Najugodnejše temperature so v vseh primerih dosežene pri varianti 4, ki ima poleti najnižje temperature, pozimi pa najvišje. Sledi ji varianta 2, ki pa že ima bolj neugodne notranje temperature. Iz primerjave variant 2 in 4 tako vidimo, da ima v nasprotju z nihanjem temperatur dodatno povečevanje toplotne mase stavbnega ovoja pozitiven vpliv na notranje temperature. Zanimivo slednje še posebej velja za zimske projektne dni.

Iz rezultatov vidimo, da je za ugoden nivo notranjih temperatur tako v toplem, kot hladnem delu leta pri ekstremnih temperaturah ključna kombinacija visoke toplotne mase in nizke toplotne prehodnosti stavbnega ovoja, saj imata varianti 2 in 4 v vseh primerih najugodnejše notranje temperature. Iz notranjih temperatur variant 1 in 3 pa sta ponovno jasno vidni vlogi toplotne izolacije in visoke toplotne mase. Pri varianti 3 vidimo, da na poletne projektne dni ta še dosega relativno ugodne notranje temperature, vendar

pa pomanjkanje toplotne izolacije na zimski in tudi tipični projektni dan povzroči izjemno nizke notranje temperature in najbolj neugodne notranje temperature od vseh variant, kar nakazuje, da samo toplotna masa ni dovolj za doseganje ugodnih vrednosti notranjih temperatur in je v hladnem delu leta pomembna nizka toplotna prehodnost stavbnega ovoja. Poleti je vpliv toplotne izolacije manjši, saj varianta 3 že samo z visoko toplotno maso dosega ugodnejše notranje temperature. Na drugi strani pa pri varianti 1 ob pomanjkanju toplotne mase poleti beležimo najvišje notranje temperature. V primeru zimskih projektnih dni je varianta 1 boljša od variante 3. Na tipične projektne dni, ko so zunanje temperature zmerne, imajo variante 1, 2 in 4 primerljive vrednosti notranjih temperatur. Varianta 3 ima precej nižje notranje temperature, kar nakazuje, da je v prehodnem obdobju za ugoden toplotni odziv pomembnejša nizka toplotna prehodnost. Ugotovitve analize so skladne z zaključki podobnih raziskav (npr. [14], [49] in [59]), kjer različni avtorji ugotavljajo, da so vrednosti notranjih temperatur ugodnejše pri masivnejših variantah fasad in stavbnih ovojev.

Rezultati poteka notranjih temperatur potrjujejo naše sklepanje, da bi bil toplotni odziv variante 1 po metodi adaptivnega toplotnega udobja bistveno boljši, v kolikor bi bil čas uporabnosti modela v hladnem delu leta daljši. Varianta 3 pa bi na drugi strani dosegla bistveno slabše rezultate. Že na tipičen projektni dan se tu namreč pojavijo bistveno nižje temperature, kot pri ostalih variantah, na zimski projektni dan pa so te daleč najbolj neugodne. To potrjuje, da je dober odziv variante 3 po metodi adaptivnega toplotnega udobja v veliki meri posledica dobrega toplotnega odziva v toplem delu leta. Hkrati se je izkazalo, da srednje vrednosti notranjih temperatur pri varianti 1 niso bistveno bolj neugodne od ostalih variant, kar pomeni, da je slabši toplotni odziv po metodi adaptivnega toplotnega udobja v večji meri posledica bistveno večjih ekstremnih vrednosti in večjega nihanja notranjih temperatur.

4.4 Občutljivostna analiza

V splošnem smo iz izvedenih analiz prišli do ugotovitev, da vsi ukrepi, ki povečajo maso stavbnega ovoja ali v notranjosti stavbe, pri lahki varianti 1 povzročijo izboljšanje toplotnega odziva. Hkrati smo opazili, da je varianta 1 bistveno bolj občutljiva na spremembe vhodnih podatkov v primerjavi z masivnimi variantami.

V večini primerov opazimo, da se velikost sprememb rezultatov zmanjšuje od variante 1 proti varianti 4, pri čemer so v večini primerov spremembe pri variantah 2, 3 in 4 zanemarljive. Izjema so le primeri, ko sprememba vhodnih podatkov močno vpliva na delovanje toplotne mase kot je npr. nočno prezračevanje in faktor solarne absorptivnosti. Slednje kaže, da je toplotna masa najpomembnejši parameter za doseganje odpornosti stavbe na spremembe v zasnovi. Varianta 2, ki ima manjšo toplotno maso, a nižjo toplotno prehodnost od variante 3, je namreč manj robustna.

Iz sprememb notranjih temperatur smo ugotovili, da je izboljšanje toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja v največji meri posledica ugodnih sprememb ekstremnih vrednosti notranjih temperatur in drugačnih faznih zamikov, medtem ko so spremembe srednjih vrednosti notranjih temperatur zanemarljive. Slednje še posebej velja za varianto 1, kjer so spremembe srednjih temperatur tako kot pri ostalih variantah zanemarljive, se pa nihanje temperatur bistveno zmanjša. Glede na raziskavo, ki so jo opravili Pajek *et al.* [49], lahko trdimo, da gre za običajen pojav pri lahkih konstrukcijah.

Po podrobnejšem pregledu sprememb notranjih temperatur in trajanja toplotnega udobja pri različnih parametrih smo opazili, da se pri izboljšanju toplotnega udobja vedno pojavljajo enaki vzorci. V toplem delu leta opazimo nižje jutranje temperature in počasnejše segrevanje, kar povzroči kasnejši pojav

toplotnega neudobja. Najvišje notranje temperature so nato v najtoplejšem delu dneva nižje. Posledično se stavba po začetku ohlajanja hitreje shladi pod mejo, ki predstavlja toplotno udobje. V določenih primerih je zamik tako velik, najvišja temperatura pa toliko nižja, da že sama najvišja notranja temperatura v dnevu pade v cono toplotnega udobja in se v tem dnevu v nasprotju z osnovnim modelom toplotno neudobje sploh ne pojavi. V hladnem delu leta sicer opazimo povečanje najnižjih notranjih temperatur, vendar je izboljšanje toplotnega udobja v tem obdobju posledica preprečitve pregrevanja v drugi polovici aprila. V hladnem delu leta opazimo tudi ugoden vpliv parametrov, ki v popoldanskih urah podaljšajo fazni zamik in se notranjost počasneje ohlaja. Edini ukrep, ki ima nekoliko drugačen vpliv na toplotni odziv je nočno prezračevanje. Vpliv posameznih ukrepov je podrobneje predstavljen v nadaljevanju.

4.4.1 Masivne notranje stene

Gre za prilagoditev stavbe, ki povzroči izboljšanje toplotnega udobja tako v hladnem kot toplem delu leta. Sprememba rezultatov je največja pri varianti 1, kar je bilo glede na rezultate osnovnih modelov pričakovano, saj smo ugotovili, da so imele variante z večjo stopnjo toplotne mase boljše rezultate. Tako pričakovano tudi uporaba toplotne mase v notranjosti izboljša toplotni odziv, vendar je učinek bistveno manjši kot v primeru, da je toplotna masa pozicionirana v stavbnem ovojju. Kljub izboljšavi pri varianti 1 je namreč trajanje toplotnega udobja še vedno bistveno manjše kot pri osnovnih variantah 2, 3 in 4. S tem smo potrdili trditev avtorjev Long in Ye [51], ki sta izpostavila, da je toplotna masa notranjih sten pomembna, vendar manj kot pri zunanjih stenah. Vidimo, da je razlika ogromna, vendar je pri lahkih stavbnih ovojih uporaba notranjih masivnih sten kljub temu priporočljiva, saj nekoliko izboljša toplotni odziv. Spremembe so nekoliko večje še pri varianti 2, pri ostalih pa so zanemarljive. Pri varianti 3 lahko v hladnem delu leta v Ljubljani celo opazimo poslabšanje toplotnega udobja, kar nakazuje, da prekomerna uporaba toplotne mase ob odsotnosti toplotne izolacije v hladnejših podnebjih ni priporočljiva.

Uporaba masivnih notranjih sten večjih razlik v spremembi notranjih operativnih temperatur ne povzroči. Kljub temu pa gre za pasiven ukrep s pozitivnim vplivom na toplotni odziv, saj poleti zmanjša najvišje notranjih temperatur, v hladnem delu leta pa zviša najnižje temperature. Največji učinek je tudi v tem primeru pri varianti 1, kjer se ugodno zmanjša nihanje temperatur.

4.4.2 Nočno prezračevanje

Od analiziranih ukrepov ima nočno prezračevanje največji vpliv na toplotno udobje in notranje temperature. Nočno prezračevanje ima večji pomen pri toplejših podnebjih, kjer z višjo intenziteto dosežemo večje spremembe toplotnega odziva, kar so ugotovili tudi Shaviv *et al.* [47].

Učinek in odziv variant je tu drugačen kot pri ostalih ukrepih. Največji vpliv pri izvajanju nočnega prezračevanja je v nočnem času, kar pa ima posledice tekom celotnega dne. Ob ustrezni intenziteti nočnega prezračevanja namreč lahko pri vseh variantah pri zelo vročih dneh v nočnem času povsem preprečimo pojav toplotnega neudobja, saj z zadostnim nočnim prezračevanjem dosežemo bistveno nižje notranje temperature. Pogoji so dovolj nizke zunanje temperature. Ker ponoči stavbo bolj shladimo, je v dnevnem času nato potreben večji dvig notranjih temperatur, da dosežemo toplotno udobje. Ker se notranji viri in prehod toplote skozi konstrukcijske sklope ne spreminjajo, je čas, ko nastopi neudobje bistveno kasneje. Hkrati so največje temperature tudi v tem primeru nižje, saj notranjost ne prejme dovolj toplote, da bi se iz nižjega izhodišča segrela na enako vrednost kot pri osnovnem modelu. Tako

tudi ohlajanje v popoldnevu traja manj časa. V Ratečah je situacija drugačna. Tam je toplotno neudobje v toplem delu leta posledica prenizkih notranjih temperatur. Zato je za to lokacijo primernejša nižja intenziteta nočnega prezračevanja. Na ta način se notranjost manj shladi in toplotno neudobje v nočnem času nastopi redkeje.

Idealna vrednost intenzitete nočnega prezračevanja je tako močno odvisna od lokacije in njenih zunanjih temperatur. V primeru nižjih zunanjih temperatur so primernejše nižje intenzitete, v primeru toplejših podnebj pa višje intenzitete. Gre za zelo pomembno ugotovitev, saj iz pregleda literature opazimo, da so povezave med nočnim prezračevanjem in adaptivnim toplotnim udobjem zelo slabo raziskane. Obstoječe analize se namreč osredotočajo na spremembe notranjih temperatur in potrebe po energiji za hlajenje. V tem primeru seveda najboljše rezultate dosegajo večje intenzitete nočnega prezračevanja, kar lahko vidimo v preglednici 25. Maksimalne notranje temperature se pri višjih intenzitetah znižajo bistveno bolj. Temperature se seveda v primeru povečevanja intenzitete prezračevanja lahko nižajo dokler ne dosežejo vrednosti zunanjih temperatur. To je ugodno z vidika nižanja notranjih temperatur in rabe energije za hlajenje. Vidimo pa da ima prekomerno povečevanje intenzitete prezračevanja negativni vpliv na trajanje toplotnega udobja, saj pri previsokih intenzitetah prezračevanja pride do podhlajevanja. Nižje, kot so nočne temperature na lokaciji, bolj izrazit je ta pojav in bolj moramo biti pozorni na izbiro intenzitete nočnega prezračevanja.

V kolikor določene intenzitete prezračevanja dajejo podobne rezultate, je iz več razlogov primernejša nižja intenziteta. Slednje je namreč lahko zelo pomemben faktor v primeru aktivnih sistemov in rabe energije. Li *et al.* [62] so namreč preverjali povezavo med stopnjo intenzitete nočnega prezračevanja, energijo potrebno za hlajenje in energijo potrebno za mehansko prezračevanje. Ugotovili so, da višje intenzitete sicer vedno pozitivno vplivajo na rabo energije za hlajenje, vendar mehansko prezračevanje pri višjih intenzitetah porabi toliko energije, da se skupna raba energije poveča. Za nadaljnje študije bi bilo primerno izvesti analizo, kjer se preverja povezava intenzitete nočnega prezračevanja, rabe energije in toplotnega udobja. Hkrati pa je potrebno upoštevati še hitrost zraka, ki je v naši analizi nismo upoštevali in ima lahko potencialno velik vpliv na toplotno udobje. Standard SIST EN 16798-1 namreč ob večjih hitrostih zraka predvideva korekcijo operativnih temperatur do 2,2 °C. Pri naši raziskavi smo to zanemarili in predpostavili hitrost zraka manjšo od 0,1 m/s. Ob upoštevanju korekcije bi toplotno neudobje pri višjih intenzitetah v nočnem času nastopilo bistveno hitreje, saj je hitrost zraka pri višjih intenzitetah večja.

Dodatno izboljšavo trajanja toplotnega udobja bi lahko na posamezni lokaciji dosegli z različnimi mesečnimi stopnjami nočnega prezračevanja. Li *et al.* [62] so namreč izpostavili tudi dejstvo, da je za različne mesece optimalna različna intenziteta nočnega prezračevanja kar je povsem skladno z našo ugotovitvijo, da je optimalna intenziteta odvisna od zunanjih temperatur. Pomembna je tudi dolžina obdobja, ko je predvideno nočno prezračevanje. V Ratečah bi bilo idealno obdobje krajše, v Portorožu pa daljše.

Poleg že omenjene odvisnosti od lokacije in zunanjih temperatur pa je optimalna intenziteta nočnega prezračevanja odvisna tudi od tipa stavbnega ovoja. Variante se na enakih lokacijah namreč odzivajo precej različno, kar so pri svoji analizi izpostavili tudi Hudobivnik *et al.* [59], ki so ugotovili, da ima sprememba intenzitete glede na tip stavbnega ovoja različen vpliv na spremembo notranjih temperatur. V svoji analizi so izpostavili, da ima intenziteta prezračevanja najmanjši vpliv pri masivni neizolirani zunanji steni. To je potrdila tudi naša analiza. Na nasprotni strani beleži varianta 1 največje spremembe notranjih temperatur, saj se pri večjih intenzitetah najhitreje ohladi, pri nižjih pa se notranje temperature najbolj povišajo. Razlog je v tem, da odvečne toplote, ki se čez dan nabere v notranjosti zaradi nizke

toplotne prehodnosti stavbnega ovoja in nizke intenzitete ponoči, ne moremo odvesti iz stavbe. Vpliv je večji kot pri ostalih variantah, ker so najvišje dnevne notranje temperature pri varianti 1 višje. Varianti 2 in 4 pa imata z vidika spremembe temperatur zelo podoben odziv, s tem da so spremembe pri varianti 4 pričakovano manjše kot pri varianti 2. Velikost sprememb pri variantah 2 in 4 je nekje vmes med variantama 1 in 3.

Zanimivo pa sprememba trajanja toplotnega udobja pri različnih variantah ne odraža zgoraj opisanih sprememb temperatur in zaključka, ki so ga podali Hudobivnik *et al.*, da so lahki konstrukcijski sklopi najbolj dovzetni na spremembe robnih pogojev, masivni pa najmanj. Situacija je namreč v tem primeru zanimivo zrcalna. Varianta 2 in 4 tudi tu predstavlja vmesne vrednosti. To je predvsem razvidno iz poslabšanja pri nižjih intenzitetah v Ljubljani in Portorožu, saj so pri varianti 4 izboljšave toplotnega udobja zelo majhne, ker že osnovni model dosega toplotno udobje v skoraj 100 % časa, ki je na voljo. Pri intenziteti $0,7 \text{ h}^{-1}$ pa dosežeta varianti zelo podobne vrednosti, ki predstavljajo celo največje zmanjšanje toplotnega udobja od vseh variant. Razlog za neugodno delovanje kombinacije visoke toplotne mase in toplotne izolacije je, da se toplota, ki tekom dneva preide v stavbo, akumulira v toplotno maso stavbnega ovoja. Ponoči toplotna izolacija preprečuje odvajanje toplote v zunanost, v notranjosti pa je intenziteta $0,7 \text{ h}^{-1}$ premajhna, da bi s prezračevanjem iz stavbe odvedli toploto. Pri varianti 1 je namreč akumulirane veliko manj toplote in se ta prej odda v okolico in odvede iz stavbe. Pri varianti 3 pa odsotnost toplotne izolacije omogoča oddajanje toplote tudi v zunanost. V Ratečah je situacija obratna in se varianti 2 in 4 ponoči pri intenziteti 14 h^{-1} preveč shladita in podnevi rabita dlje časa, da se notranjost segreje na ugodne temperature.

Pri varianti 3, ki je imela najmanjše temperaturne spremembe se toplotno udobje v toplejših podnebjih najbolj podaljša. Varianta 1 pa ima najmanjše spremembe trajanja toplotnega udobja kljub največjim temperaturnim spremembam. Razlog je ponovno v delovanju toplotne mase. Varianta 3 je imela od vseh variant pri osnovnem modelu najvišje notranje temperature v nočnem in jutranjem času. Ob višjih intenzitetah pa se te temperature bistveno bolj približajo ostalim variantam in je podnevi zaradi velike toplotne mase sedaj potrebno več toplote, da se stavba segreje do te mere, da nastopi neudobje. Razlog za majhne spremembe pri varianti 1 pa je v hitrem odzivu lahkega stavbnega ovoja. Zaradi pomanjkanja toplotne mase, ki bi v nočnem času oddajala toploto, se varianta 1 shladi bistveno hitreje kot ostale variante in že pri nižjih intenzitetah hitro doseže nižje notranje temperature. Tako dodatno večanje intenzitete ob odsotnosti toplotne mase, ki bi podnevi ohranjala nižjo notranjo temperaturo, nima vpliva na toplotno udobje. Toplotno udobje se tako pri varianti 1 pri višjih intenzitetah podaljša samo za čas, ki je potreben da se notranjost shladi na udobno temperaturo.

4.4.3 Toplotna izolacija z visoko toplotno kapaciteto.

Pri masivnih variantah 2 in 4 ima uporaba toplotne izolacije iz lesenih vlaken z visoko toplotno kapaciteto povsem zanemarljiv ali pa celo negativen vpliv na toplotni odziv. Toplotno udobje se zniža zaradi pregrevanja v prehodnih obdobjih, saj je odziv stavbe na zunanje spremembe ob povečanju toplotne kapacitete stavbnega ovoja prepočasen. Glede na rezultate analize je tako uporaba toplotne izolacije z visoko toplotno kapaciteto pri masivnih eksoskeletnih konstrukcijskih sklopih z vidika adaptivnega toplotnega udobja odsvetovana.

Pri lahki varianti 1 pa ob uporabi toplotne izolacije iz lesenih vlaken opazimo precejšnje izboljšanje toplotnega odziva. Od vseh analiziranih ukrepov je uporaba toplotne izolacije z visoko toplotno

kapaciteto povzročila celo največje izboljšanje trajanja toplotnega udobja. Izboljšanje opazimo tako v hladnem, kot toplem delu leta, pri čemer je izboljšanje v hladnem delu leta večje.

Ugotovili smo, da uporaba toplotne izolacije z visoko toplotno kapaciteto izgublja vpliv pri višjih zunanjih temperaturah. Gre za posledico nespremenjene intenzitete nočnega prezračevanja v primerjavi z osnovnim modelom. Tudi v toplejšem podnebjju je namreč učinek lesenih vlaken ugoden in se notranje temperature znižajo. Vendar pa se stavbni ovoj ob uporabi lesenih vlaken v času nočnega prezračevanja zaradi večje toplotne kapacitete počasneje ohlaja in notranje temperature do jutra ne dosežejo tako nizkih vrednosti, kot pri osnovnem modelu. S povečanjem intenzitete nočnega prezračevanja, bi tako lahko povzročili dodatno izboljšanje toplotnega odziva.

V toplem delu leta imamo v času najvišjih zunanjih temperatur ob uporabi toplotne izolacije iz lesenih vlaken bistveno nižje notranje temperature. Fazni zamik se podaljša, neudobje nastopi kasneje, hkrati pa se stavba zaradi nižjih temperatur tudi prej shladi nazaj na ugodno temperaturo. V veliko primerih pa neudobje pri varianti 1 ob uporabi lesenih vlaken poleti sploh ne nastopi.

V času zimskega projektnega dne se najnižje notranje temperature ugodno zvišajo, s tem da je učinek večji pri hladnejših podnebjih. Vpliv toplotne izolacije z večjo toplotno kapaciteto se v hladnem delu leta kaže predvsem v popoldanskih urah, kjer se podaljša fazni zamik in se notranjost počasneje ohlaja. Toplotno neudobje tako nastopi kasneje kot pri osnovnem modelu. Hkrati toplotna izolacija iz lesenih vlaken v prehodnih obdobjih preprečuje pojav pregrevanja v času najvišjih zunanjih temperatur.

4.4.3.1 Vpliv pozicije toplotne izolacije v konstrukcijskem sklopu

Ugotovili smo, da je pozicija toplotne izolacije z visoko toplotno kapaciteto znotraj konstrukcijskega sklopa izjemnega pomena. Toplotna izolacija mora biti za največji učinek nameščena na notranji strani konstrukcijskega sklopa. Pozicioniranje na zunanji strani sicer nekoliko izboljša toplotni odziv, vendar je vpliv zanemarljiv, kar izpostavljajo tudi Hudobivnik *et al.* [59]. Kot lahko vidimo iz njihove analize, je razlog za boljši odziv ob pozicioniranju na notranji strani delovanje konstrukcijskega sistema v času nočnega prezračevanja. Na notranji strani namreč lahko toplotna izolacija, ki podnevi akumulira veliko toplote, to toploto odda v času nočnega prezračevanja. V dopoldnevu pa se shlajena toplotna masa dlje časa segreva in toplotno neudobje nastopi kasneje. V kolikor toplotno izolacijo z visoko toplotno kapaciteto namestimo na zunanjo stran, izgubimo sloj toplotne mase v notranjosti, ki bi sprejel dodatno toploto iz notranjosti in faznega zamika tu ni [59].

Opazili smo tudi, da je uporaba toplotne izolacije z visoko toplotno kapaciteto pomembnejša pri strehi kot pri steni. Uporaba pri strehi namreč doprinese 63 % izboljšanja trajanja toplotnega udobja, medtem ko stena predstavlja le 37 %. Ob uporabi pri obeh sklopih se sicer toplotno udobje še dodatno poveča za 0,03 %.

4.4.4 Faktor solarne absorptivnosti notranjih površin

Ugotovili smo, da je pravilna izbira vrednosti faktorja solarne absorptivnosti predvsem odvisna od lokacije, medtem ko je tip stavbnega ovoja manj pomemben. Več sončnega sevanja kot prejme lokacija, bolj pomembna je izbira faktorja solarne absorptivnosti. Sprememba rezultatov je namreč največja v Portorožu, medtem ko je v Ljubljani in Ratečah zanemarljiva. V toplejših podnebjih Ljubljane in Portoroža uporaba visokega faktorja solarne absorptivnosti toplotno udobje poslabša, medtem ko uporaba nizke vrednosti toplotno udobje izboljša. V Ratečah pa je situacija obratna.

Spremembe notranjih temperatur so ob spremembi faktorja solarne absorptivnosti zanemarljive. Izboljšanje trajanja toplotnega udobja pa je v glavnem posledica manjšega pregrevanja v prehodnih obdobjih, saj se v času dvignjenih senčil v notranjosti absorbira manj energije sončnega sevanja. V manjši meri pa nižji faktor povzroči tudi zmanjšanje časa toplotnega neudobja v najtoplejšem delu dneva, skrajšanje časa ohlajanja stavbe in zamik pri nastopu toplotnega neudobja. V hladnem delu sprememb pri variantah 2 in 4 ne beležimo, saj tu ni več prostora za izboljšave. Glede na rezultate analize je priporočena uporaba nižjih vrednosti faktorja solarne absorptivnosti, kar dosežemo predvsem z uporabo svetlih barv.

4.4.5 Talne obloge

Talne obloge imajo pri toplotnem odzivu zanemarljiv vpliv. Nekoliko večje spremembe rezultatov lahko opazimo le pri varianti 1, kjer se trajanje obdobja spreminja za približno odstotno točko. V splošnem pa lahko opazimo, da je toplotni odziv boljši pri uporabi masivnih talnih oblog, kar je povsem pričakovano. Dodatna toplotna masa na notranji strani namreč poveča akumulacijo toplote v tleh, kar deluje ugodno tako v toplem, kot v hladnem delu leta. Predvsem se pozitiven vpliv kaže v hladnem delu leta, kjer se absorbira več sončne energije. Izjema, kjer pride do bistvenega poslabšanja trajanja toplotnega udobja, pa je uporaba preproge. Pri masivnih variantah je negativni učinek izrazitejši v hladnem delu leta, medtem ko je pri lahki varianti učinek v obeh delih leta primerljiv. Razlog za poslabšanje toplotnega odziva je v tem, da preproga deluje kot tanek sloj toplotne izolacije, ki onemogoča ustrezno delovanje toplotne mase v tleh. Pri lahki varianti to precej poveča dnevna nihanja temperatur. Pri varianti 1 je učinek toliko večji, ker tla predstavljajo edini masivni konstrukcijski sklop v stavbi. Pri ostalih variantah pa ostali sklopi še vedno zagotavljajo dovolj toplotne mase. Je pa tu potrebno omeniti omejitev glede načina modeliranja preproge v programskem orodju EnergyPlus. Pojavlja se namreč vprašanje, ali preproga kot tkanina res deluje enakovredno kot enako debel sloj toplotne izolacije. S tega vidika bi bile potrebne nadaljnje raziskave.

4.4.6 Kombinacija ukrepov

Za konec smo na podlagi rezultatov občutljivostne analize preverili kakšen vpliv ima na toplotni odziv združevanje ukrepov. Osnovni model variante 1, ki se je izkazal za najbolj občutljivega, smo prilagodili skladno z ukrepi, ki izboljšujejo toplotni odziv. Spremembe parametrov so prikazane v preglednici 34.

Preglednica 34: Prikaz prilagoditev osnovnega modela variante 1.

	Parameter				
	Notranje stene	Intenziteta nočnega prezračevanja	Toplotna izolacija (notranja stran)	Faktor solarne absorptivnosti	Talna obloga
Osnovni model varianta 1	Lahke	4 h ⁻¹	Steklena volna	0,5	Keramika
Prilagojen model varianta 1	Masivne	5 h ⁻¹	Lesena vlakna	0,2	Kamnita obloga

Analizo smo izvedli v Ljubljani, rezultate pa smo preverili z vidika trajanja toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja. Rezultati so pokazali, da z uporabo vseh ukrepov v hladnem delu leta

toplotni odziv izenačimo z variantama 2 in 4. Tako tudi varianta 1 sedaj dosega toplotno udobje v celotnem času, ki je na voljo skladno z metodo adaptivnega toplotnega udobja. V toplem delu leta pa se čas trajanja toplotnega udobja podaljša za 8,6 odstotne točke. V celotnem letu to predstavlja izboljšavo za 8,2 odstotne točke. V toplem delu leta ima sedaj varianta 1 tretji najboljši toplotni odziv in je boljša od variante 3 za 0,4 odstotne točke. V celotnem letu pa je sedaj boljša od variante 3 za 3,4 odstotne točke. Na drugi strani pa je še vedno precej slabša od variant 2 in 4, kar potrjuje ugotovitev, ki so jo za poenostavljen model podali Pajek *et al.* [49], in sicer da z nobeno prilagoditvijo lahkega konstrukcijskega sklopa ne moremo doseči enakega odziva kot pri masivnem konstrukcijskem sklopu z enako toplotno prehodnostjo.

»Ta stran je namenoma prazna.«

5 ODGOVORI NA HIPOTEZE

Za vse analizirane podnebne lokacije v Sloveniji bo najdaljše trajanje notranjega toplotnega udobja na podlagi modela adaptivnega toplotnega udobja v prostem teku stavbe doseženo pri uporabi stavbnega ovoja z visoko toplotno maso in nizko toplotno prehodnostjo.

Na podlagi pridobljenih rezultatov lahko hipotezo potrdimo. Varianta 4, ki predstavlja stavbni ovoj s kombinacijo nizke toplotne prehodnosti in zelo visoke toplotne mase, je imela na vseh lokacijah najdaljše trajanje toplotnega udobja. Delno to velja tudi za varianto 2, ki predstavlja kombinacijo nizke toplotne prehodnosti in visoke toplotne mase, vendar je ta manjša kot pri varianti 4. Varianto 2 je prehitela samo varianta 3 v hladnem podnebju v Ratečah, vendar je ta rezultat posledica omejitve metode adaptivnega toplotnega udobja, da pri zunanjih temperaturah pod 10 °C metoda ni uporabna. Model tako v hladni polovici leta v Ratečah ni uporaben, varianta 3 pa ima v hladnem delu leta na ostalih dveh lokacijah zaradi pomanjkanja toplotne izolacije najslabši toplotni odziv. V kolikor bi bil model v Ratečah uporaben tudi v hladnem delu leta bi imela varianta 2 tudi tu drugi najboljši odziv, kar smo v nadaljevanju potrdili z analizo poteka notranjih temperatur. Pri tem je potrebno omeniti še, da sta varianti 2 in 4 v zmernem celinskem in submediteranskem podnebju bistveno boljši od ostalih dveh variant. To še posebej velja za topli del leta.

Vpliv toplotne mase stavbnega ovoja na doseganje notranjega toplotnega ugodja v stavbi v prostem teku bo bolj izrazit v toplejšem podnebju.

Rezultati pričakovano potrdijo tudi drugo hipotezo. Variante 2, 3 in 4 so bile v vseh treh obravnavanih podnebjih v toplem delu leta bistveno boljše od variante 1. To velja tudi za neizolirano varianto 3, pri kateri je toplotno udobje v Ljubljani v toplem delu leta trajalo 8,3 odstotnih točk več časa kot pri varianti 1. Razlika je v Portorožu 8 odstotnih točk, v Ratečah pa 15,3 odstotnih točk. Varianti 2 in 4 pa sta še bistveno boljši. V hladnem delu leta pa toplotno udobje pri varianti 3 v Ljubljani traja 17,5 odstotnih točk manj časa in 14 odstotnih točk v Portorožu, medtem ko je varianta 1 od variant 2 in 4 na obeh lokacijah slabša le za 5,3 odstotne točke. Ugotovili smo torej, da je vpliv toplotne mase stavbnega ovoja izrazitejši v toplejšem podnebju. V hladnem podnebju je toplotna masa ravno tako pomembna, vendar vidimo, da je tu pomembnejša nizka toplotna prehodnost stavbnega ovoja. Optimalne rezultate pa daje stavbni ovoj, ki predstavlja kombinacijo nizke toplotne prehodnosti in visoke toplotne mase.

»Ta stran je namenoma prazna.«

6 ZAKLJUČEK

V luči aktualne energetske problematike, velikega pomena toplotnega udobja in porasta priljubljenosti lahkih endoskeletnih stavb, smo v tej magistrski nalogi preverili vpliv toplotne mase stavbnega ovoja na toplotni odziv enodružinske stavbe v značilnih podnebnih Slovenije. Rezultate analiz toplotnega odziva računskih modelov stavb s štirimi variantami stavbnega ovoja, ki smo jih izvedli s programskim orodjem EnergyPlus, smo vrednotili na podlagi metode adaptivnega toplotnega udobja po standardu SIST EN 16798-1 ter na podlagi poteka notranjih temperatur.

Rezultati analiz so pokazali pomemben vpliv toplotne mase na toplotni odziv stavb. Ugotovili smo, da je toplotna masa izjemnega pomena tako za trajanje toplotnega udobja kot za potek notranjih temperatur, ki pa sta med seboj neposredno povezana. Pomembnost uporabe masivnega stavbnega ovoja še posebej velja za topli del leta in toplejša podnebja, kjer se razlike med masivnimi in lahko varianto povečujejo. V toplem delu leta se je neizoliran masivni stavbni ovoj odzival bolje od lahkega stavbnega ovoja, kar nakazuje, da je v toplem delu leta v toplih podnebnih visoka toplotna masa pomembnejša od nizke toplotne prehodnosti. Predvsem je pri lahkem ovojju problematično veliko nihanje notranjih temperatur. Sicer pa se je stavbni ovoj, ki je predstavljal kombinacijo nizke toplotne prehodnosti in visoke toplotne mase, v vseh primerih izkazal za najboljšega. Prednost pred lahkim in neizoliranim masivnim stavbnim ovojem je precejšnja. Ob povečevanju toplotne mase stavbnega ovoja opazimo izboljšanje toplotnega odziva, vendar se tu pojavlja vprašanje, do kakšne mere je z ekonomskega vidika smiselno povečevati toplotno maso. Na drugi strani pa imamo še vpliv stavb na okolje, kjer imajo masivne stavbe zaradi materialov, s katerimi zagotavljamo toplotno maso, večji utelešeni okoljski vpliv, kot lahke (predvsem lesene) stavbe. Je pa glede na rezultate potrebno izpostaviti pomanjkljivost veljavne zakonodaje, ki predpisuje le zahteve za nizko toplotno prehodnost stavbnega ovoja. Glede na dokazan velik vpliv toplotne mase in na dejstvo, da je neizolirana masivna varianta v toplem delu leta kazala precej boljše rezultate, bi bilo zakonodajo smiselno dopolniti z zahtevami za minimalno toplotno kapaciteto, ki jo morajo imeti načrtovane stavbe. To še posebej velja v luči podnebnih sprememb, kjer projekcije podnebnij napovedujejo dvig temperatur in lahko pričakujemo vedno večji problem pregrevanja stavb in potrebo po aktivnem hlajenju.

Analiza toplotnega udobja po metodi adaptivnega toplotnega udobja je pokazala, da je čas trajanja toplotnega udobja v vseh obravnavanih podnebnih na letni ravni najkrajši pri lahki varianti, najdaljši pa pri izjemno masivni varianti z nizko toplotno prehodnostjo. Kljub temu je potrebno omeniti, da so rezultati v veliki meri tudi posledica številnih omejitev metode adaptivnega toplotnega udobja. Največjo težavo namreč predstavlja omejitev, da metoda ni uporabna, ko je tekoče sedemdnevno povprečje zunanjih temperatur pod 10 °C oz. nad 30 °C in v tem času predpostavlja toplotno neudobje. V obravnavanih podnebnih prihaja do velikih nesorazmerji med toplim in hladnim delom leta, ko je metoda uporabna. V hladnem delu leta je namreč čas uporabnosti metode bistveno manjši in so letni rezultati v veliki meri odvisni od odziva v toplem delu leta. Posledično je udobje pri lahkem stavbnem ovojju trajalo manj časa kot pri neizoliranem masivnem, kljub temu, da je bil lahek stavbni ovoj v hladnem delu leta bistveno boljši, kar je pokazala tudi analiza poteka notranjih temperatur. Metoda tako ni primerna za celoletno vrednotenje pasivnih ukrepov in strategij, ki vplivajo na toplotni odziv tako v hladnem kot toplem delu leta, ampak je obdobja leta potrebno obravnavati ločeno. Tako je potrebno opozoriti, da takšni rezultati predvsem z vidika primerjave lahke in neizolirane masivne stavbe veljajo le z vidika metode adaptivnega toplotnega udobja. Lahko pa kljub temu trdimo, da je kombinacija masivnega stavbnega ovoja in nizke toplotne prehodnosti najbolj optimalna, saj sta bila takšna ovoja najboljša tako

v toplem kot hladnem delu leta. Druga omejitev metode je, da rezultatov na posameznih lokacijah med seboj ne moremo direktno primerjati zaradi različnega časa, ko je metoda na posamezni lokaciji uporabna. Poleg tega je metoda adaptivnega toplotnega udobja manj univerzalna, saj je pogojena tudi s kulturološkim kontekstom, ki determinira pričakovanja uporabnikov. V osnovi gre za dober pristop k vrednotenju toplotnega udobja pri stavbah v prostem teku in bi lahko metoda z nadaljnjimi izboljšavami bistveno pridobila na univerzalnosti in uporabnosti.

Iz rezultatov občutljivostne analize ključnih parametrov stavbnega ovoja in notranjosti stavbe, ki imajo vpliv na toplotno maso oz. njeno delovanje, smo ugotovili, da je lahek stavbni ovoj veliko bolj občutljiv na spremembe v zasnovi stavbe. Pri lahkem stavbnem ovoju imajo ukrepi, ki povečajo toplotno maso, pozitiven vpliv na toplotni odziv. Ti ukrepi predvsem vplivajo na zmanjšanje temperaturnih nihanj, ki so, kot smo ugotovili največja slabost lahkih stavb in so glavni razlog za pojav toplotnega neudobja v primerjavi z masivnimi stavbami. Pri masivnejših stavbnih ovojih, kjer toplotna masa že predstavlja visoko toplotno kapaciteto, je vpliv prilagoditev zanemarljiv, v nekaterih primerih pa lahko celo negativen. Pri zasnovi notranjosti lahkih stavb se priporoča uporaba masivnih notranjih sten, svetlih barv in masivnih talnih oblog. Vsekakor pa se odsvetuje uporaba preprog, saj so rezultati pokazali drastično zmanjšanje trajanja toplotnega udobja tako pri lahki, kot tudi pri masivnih variantah. Za izjemno pomembno strategijo se je izkazalo nočno prezračevanje, ki ima velik pomen za toplotni odziv in je v veliki meri odvisno od lokacije in toplotne mase stavbnega ovoja. Pri toplejših podnebjih in masivnejših variantah so primernejše višje intenzitete nočnega prezračevanja. Pomembno je, da za doseganje optimalnega toplotnega odziva pri zgoraj omenjenih prilagoditvah, ki povečajo toplotno maso stavb, temu primerno povečamo tudi intenziteto nočnega prezračevanja, kar je še posebej pomembno pri toplejših podnebjih.

Ugotovitve študije služijo kot priporočila za ustrezno zasnovo stavb. Hkrati pa kažejo potencial obstoječega stavbnega fonda v obravnavanih podnebjih, ki ga v veliki meri predstavljajo neizolirane masivne stavbe. Z ustrezno izolacijo stavbnega ovoja lahko bistveno povečamo toplotno udobje v stavbah in zmanjšamo potrebo po aktivnih sistemih. Na drugi strani služi raziskava kot podloga za nadaljnje raziskave vpliva toplotne mase in posameznih prilagoditev. Predvsem bi bilo zanimivo preveriti toplotne odzive glede na podnebne projekcije. Vendar se ob tem pojavlja vprašanje, ali bo model enako uporaben tudi za ljudi v prihodnosti, saj je tudi kulturološko pogojen. Izpostavljene omejitve metode adaptivnega toplotnega udobja pa služijo kot pomoč pri interpretaciji rezultatov ob uporabi metode in tudi izpostavljajo področja za izboljšavo metode.

VIRI

- [1] Kesik, TJ. 2016. Building enclosure design principles and strategies.
<https://www.wbdg.org/resources/building-enclosure-design-principles-and-strategies>
(Pridobljeno 9.2.2023.)
- [2] Košir, M. 2019. Climate Adaptability of Buildings: Bioclimatic Design in the Light of Climate Change: 48 -50, 147-181.
- [3] Klepeis, NE., Nelson, WC., Ott, WR., Robinson, JP., Tsang, AM., Switzer, P., Behar, JV., Hern, SC., Engelmann, WH. 2001. The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. J Expo Sci Environ Epidemiol 11: 231–252.
<https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- [4] Fran.si - Udobje
<https://fran.si/130/sskj-slovar-slovenskega-knjiznega-jezika/3607687/udobje?View=1&Query=udobje&All=udobje&FilteredDictionaryIds=130>
(Pridobljeno 13.2.2023.)
- [5] Ganesh, GA., Sinha, SL., Verma, TN., Dewangan, SK. 2021. Investigation of indoor environment quality and factors affecting human comfort: A critical review. Build. Environ. 204. 1-3: 5-7: 12.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108146>
- [6] Pohl, J. 2011. Building science: Concepts and application: 259-265 str.
<https://doi.org/10.1002/9781444392333.refs>
- [7] EN ISO 7730:2006. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpolation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [8] Dovjak, M. 2017. Bivalno okolje – Fiziologija človeka. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente.
- [9] Europa.eu – European Commission – In focus: Energy efficiency in buildings, 2020:
https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en
(Pridobljeno 28.02.2024.)
- [10] Europa.eu – Eurostat, Energy statistics – an overview, 2021
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Primary_energy_production (Pridobljeno 11.05.2023.)
- [11] IEA.org - Key World Energy Statistics 2021
<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply> (Pridobljeno 11.05.2023.)
- [12] Košir, M. 2018: Bioklimatsko načrtovanje – Pasivna solarna arhitektura. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente.
- [13] Direktiva (EU) 2018/844 EVROPSKEGA PARLAMENTA IN SVETA z dne 30. maja 2018 o spremembi Direktive 2010/31/EU o energetske učinkovitosti stavb in Direktive 2012/27/EU o energetske učinkovitosti. Uradni list Evropske unije št.156.
<https://eurlex.europa.eu/legalcontent/SL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&qid=1559130714115&from=SL> (Pridobljeno 11.05.2023.)

-
- [14] Kuczyński, T., Staszczuk, A. 2020. Experimental study of the influence of thermal mass on thermal comfort and cooling energy demand in residential buildings. *Energy* 195, 9-10.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116984>
- [15] Strazzeri, V., Karrech, A. 2021 Energy and thermal performance of a typical rammed earth residential building in Western Australia. *Energy Build.* 260, 2: 18-19.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111901>
- [16] SIST EN 16798-1:2019. Energijske lastnosti stavb – Prezračevanje stavb – 1. del: Vstopni podatki notranjega okolja za projektiranje in ocenjevanje energijskih lastnosti stavb glede kakovosti notranjega zraka, toplotnega okolja, razsvetljave in akustike – Modul M1-6.
- [17] Altensis.com – Design builder software
<https://www.altensis.com/en/services/designbuilder-software/> (Pridobljeno 1.06.2023.)
- [18] ANSI/ASHRAE Standard 55:2022. Thermal environmental conditions for human occupancy.
- [19] Bigladdersoftware.com – Application Guide for EMS – EnergyPlus 8.4
<https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-4/ems-application-guide/example-1-whole-building-average-zone-air.html> (Pridobljeno 27.05.2023.)
- [20] de Dear, R.J., Brager, G.S. 2002. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy Build.* 36, 9.
[https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(02)00005-1)
- [21] Plantmaps.com – Europe Köppen Climate Classification Map
<https://www.plantmaps.com/koppen-climate-classification-map-europe.php>
(Pridobljeno 27.05.2023.)
- [22] Weatherspark.com – Climate and Average Weather Year Round in Ljubljana
<https://weatherspark.com/y/77419/Average-Weather-in-Ljubljana-Slovenia-Year-Round>
(Pridobljeno 30.05.2023.)
- [23] Meteo.arso.gov.si – Meteorološka postaja Rateče
<https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/stations/Rate%C4%8De.pdf>
(Pridobljeno 30.05.2023.)
- [24] Climate one building. org – Slovenia
https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/SVN_Slovenia/index.html
(Pridobljeno 12.12.2022.)
- [25] Wikimedia commons.org – Slovenia Köppen.svg
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Slovenia_K%C3%B6ppen.svg (Pridobljeno 24.09.2023.)
- [26] Pravilnik o minimalnih tehničnih zahtevah za graditev stanovanjskih stavb in stanovanj. Uradni list RS št. 1/11, 61/17 – GZ, 199/21 – GZ-1, 205/21 in 29/22.
- [27] Košir, M., Gostiša, T., Kristl, Ž. 2018. Influence of architectural building envelope characteristics on energy performance in Central European climatic conditions. *J. Build.* 15, 282: 285–288.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.11.023>
- [28] Marles.com – Mila 1
https://www.marles.com/hise/h/klasik/mila-109_2 (Pridobljeno 1.06.2023.)

- [29] Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. Uradni list RS št. 70/22 in 161/22.
- [30] Juvanec, B. 2019. Slovenija, arhitektura in dediščina. 1. izd., 1. natis. Ljubljana, Slovenska akademija znanosti in umetnosti.
- [31] Vyncke, J., Kupers, L., Denies, N. 2018. Earth as Building Material – an overview of RILEM activities and recent Innovations in Geotechnics. MATEC Web Conf 149, 2–3.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201714902001>
- [32] Bk-wood.nl – Ubakus
<https://bk-wood.nl/ubakus-software-online/> (Pridobljeno 30.09.2023.)
- [33] Rihter.si – Hiša 081
<https://www.rihter.si/house/hisa-081/> (Pridobljeno 6.06.2023.)
- [34] Schlagmann.de – Planziegel Poroton
<https://www.schlagmann.de/de/Produkte/Planziegel> (Pridobljeno 05.06.2023.)
- [35] Pinterest.com – Rammed earth
<https://www.pinterest.com/pin/39688040450142727/> (Pridobljeno 05.06.2023.)
- [36] Nguyen, TD., Bui, TT., Limam, A., Bui, TL., Bui, QB. 2021. Evaluation of seismic performance of rammed earth building and improvement solutions. J. Build. 43, 23–24.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103113>
- [37] ISO 52016-1:2017. Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 1: Calculation procedures
- [38] Yun, G., Park, DY., Kim, KS. 2017. Appropriate activation threshold of the external blind for visual comfort and lighting energy saving in different climate conditions. Build Environ. 113, 248.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.021>
- [39] Claes, K., De Boever, L., Breesch, H. 2015. Design Recommendations for Robust Thermal Summer Comfort in Residential Lightweight Buildings in a Moderate Climate. Energy Procedia 78, 2836-2837.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.643>
- [40] Kruljc, U. 2023. Vrednost gostote moči notranje razsvetljave na podlagi projektantskih izkušenj podjetja Intralightning. Osebna komunikacija. (26.06.2023.)
- [41] Schiavon, S., Kwang Ho Lee, HK. 2013. Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures. Build. Environ. 59, 250–251: 259.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.024>
- [42] De Dear, R., Brager, G., Cooper, D. 1997. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference - Final report on RP-884. ASHRAE Transactions. 104.
- [43] Cena, K., de Dear, R. 1998. Field study of occupant comfort and office thermal environments in a hot-arid climate. Final report ASHRAE, RP-921. ASHRAE Transactions. 105.
- [44] Tehnična smernica za graditev TSG-1-004:2022. Energijska učinkovitost stavb.
- [45] Charisi, S., Waszczuk, M., Thomas, K. 2017. Investigation of the pressure coefficient impact on the air infiltration in buildings with respect to microclimate. Energy Procedia 122, 642.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.362>

- [46] Lenassi, M. 2015. Osnovno o infiltraciji zraka. Arhiv.izs.si.
<http://arhiv.izs.si/fileadmin/dokumenti/aktualno/aktualno-let-2015/Novica-osnovno-o-infiltraciji-18-8-15.pdf> (Pridobljeno 21.06.2023.)
- [47] Shaviv, E., Yezioro, A., Capeluto IG. 2001. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renewable Energy* 24, 447–451.
[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00027-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00027-1)
- [48] Sun, H., Calautit, JK., Jimenez-Bescos, C. 2022 Examining the regulating impact of thermal mass on overheating, and the role of night ventilation, within different climates and future scenarios across China. *Clean. Eng. Technol.* 9, 6–12.
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100534>
- [49] Pajek, L., Hudobivnik, B., Kunič, R., Košir, M. 2017. Improving thermal response of lightweight timber building envelopes during cooling season in three European locations. *J. Clean. Prod.* 156, 946-950.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.098>
- [50] Santamouris, M., Sfakianaki, A., Pavlou, K. 2010. On the efficiency of night ventilation techniques applied to residential buildings. *Energy Build.* 42, 1310–1313.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.024>
- [51] Long, L., Ye, H. 2016. The roles of thermal insulation and heat storage in the energy performance of the wall materials: a simulation study. *Sci Rep* 6, 5–6.
<https://doi.org/10.1038/srep24181>
- [52] Yousefi, Y., Tariku, F. 2021. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Insulation materials at Different Mean Temperatures. *J. Phys. Conf. Ser.* 2069, 1.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012090>
- [53] Chandrashekar, R., Kumar, B. 2023. Experimental investigation of thermally activated building system under the two different floor covering materials to maximize the underfloor cooling efficiency. *Int. J. Therm. Sci.* 188, 4.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108223>
- [54] Iesv.com – Table 6 Thermal Conductivity, Specific Heat Capacity and Density
https://help.iesve.com/ve2021/table_6_thermal_conductivity_specific_heat_capacity_and_density.htm (Pridobljeno 24.10.2023.)
- [55] Fccid.io – FLIRE6390 Infrared Camera User Manual FLIR Systems AB
<https://fccid.io/ZLV-FLIRE6390/User-Manual/User-Manual-3315915> (Pridobljeno 28.11.2023)
- [56] Windows.lbl.gov – WINDOW 7 User Manual
<https://windows.lbl.gov/sites/default/files/software/WINDOW/WINDOW7UserManual.pdf> (Pridobljeno 4.11.2023.)
- [57] Možina, M., 2022. Podnebne spremembe in nevarnost pregrevanja v brunarici: primerjava pasivnih ukrepov hlajenja z umerjenim modelom. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [58] Carlucci, S., Bai, L., de Dear, R., Yang, L. 2018. Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Build. Environ.* 137, 81.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>

- [59] Hudobivnik, B., Pajek, L., Kunič, R., Košir, M. 2016. FEM thermal performance analysis of multi-layer external walls during typical summer conditions considering high intensity passive cooling. *Appl. Energy* 178, 370: 373.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.036>
- [60] Yang, L., Yan, H., Lam, J.C. 2014. Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. *Appl. Energy* 115, 170.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>
- [61] Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G., Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility: IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- [62] Xu Li, X., Liang Huang, K., Feng, G.H., Li, W.Y., Wei, JX. 2022: Night ventilation scheme optimization for an Ultra-low energy consumption building in Shenyang, China. *Energy Rep.* 8, 8433–8435.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.059>

»Ta stran je namenoma prazna.«

PRILOGA A: URNIKI

h	Stopnja delovanja /zasedenosti									
	Delovni dnevi					Vikend /praznik				
	Uporabniki	Naprave	Razsvetljava	Prezračevanje	Nočno prezračevanje (31. 5. do 5. 9.)	Uporabniki	Naprave	Razsvetljava	Prezračevanje	Nočno prezračevanje (31. 5. do 5. 9.)
1	1	0,5	0	1	1	1	0,5	0	1	1
2	1	0,5	0	1	1	1	0,5	0	1	1
3	1	0,5	0	1	1	1	0,5	0	1	1
4	1	0,5	0	1	1	1	0,5	0	1	1
5	1	0,5	0	1	1	1	0,5	0	1	1
6	1	0,5	0	1	1	1	0,5	0	1	1
7	0,5	0,5	0,15	0,5	1	0,8	0,5	0,15	0,8	1
8	0,5	0,7	0,15	0,5	0	0,8	0,7	0,15	0,8	0
9	0,5	0,7	0,15	0,5	0	0,8	0,7	0,15	0,8	0
10	0,1	0,5	0,15	0,1	0	0,8	0,5	0,15	0,8	0
11	0,1	0,5	0,05	0,1	0	0,8	0,5	0,05	0,8	0
12	0,1	0,6	0,05	0,1	0	0,8	0,6	0,05	0,8	0
13	0,1	0,6	0,05	0,1	0	0,8	0,6	0,05	0,8	0
14	0,2	0,6	0,05	0,2	0	0,8	0,6	0,05	0,8	0
15	0,2	0,6	0,05	0,2	0	0,8	0,6	0,05	0,8	0
16	0,2	0,5	0,05	0,2	0	0,8	0,5	0,05	0,8	0
17	0,5	0,5	0,2	0,5	0	0,8	0,5	0,2	0,8	0
18	0,5	0,7	0,2	0,5	0	0,8	0,7	0,2	0,8	0
19	0,5	0,7	0,2	0,5	0	0,8	0,7	0,2	0,8	0
20	0,8	0,8	0,2	0,8	0,5	0,8	0,8	0,2	0,8	0,5
21	0,8	0,8	0,2	0,8	0,5	0,8	0,8	0,2	0,8	0,5
22	0,8	0,8	0,2	0,8	0,5	0,8	0,8	0,2	0,8	0,5
23	1	0,6	0,15	1	1	1	0,6	0,15	1	1
24	1	0,6	0,15	1	1	1	0,6	0,15	1	1