

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



## **MAGISTRSKO DELO**

### **MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE STAVBARSTVO**

Ljubljana, 2022

Univerza  
v Ljubljani

*Fakulteta za  
gradbeništvo in  
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Magistrsko delo št.:

Master thesis No.:

**Mentor/-ica:**

**Predsednik komisije:**

**Somentor/-ica:**

**Član komisije:**

Ljubljana, \_\_\_\_\_

**STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

| <b>Stran z napako</b> | <b>Vrstica z napako</b> | <b>Namesto</b> | <b>Naj bo</b> |
|-----------------------|-------------------------|----------------|---------------|
|-----------------------|-------------------------|----------------|---------------|

## BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

|                         |                                                                                                                   |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UDK:</b>             | 624.011.1:697.13(497.4)(043.3)                                                                                    |
| <b>Avtor:</b>           | Matic Možina, dipl. inž. grad. (UN)                                                                               |
| <b>Mentor:</b>          | izr. prof. dr. Mitja Košir                                                                                        |
| <b>Somentorja:</b>      | asist. dr. Luka Pajek<br>dr. Manoj Kumar Singh                                                                    |
| <b>Naslov:</b>          | Podnebne spremembe in nevarnost pregrevanja v brunarici: primerjava pasivnih ukrepov hlajenja z umerjenim modelom |
| <b>Tip dokumenta:</b>   | Magistrsko delo                                                                                                   |
| <b>Obseg in oprema:</b> | 55 str., 13 pregl., 13 graf., 15 sl., 1 pril.                                                                     |
| <b>Ključne besede:</b>  | podnebne spremembe, pregrevanje stavb, pasivno hlajenje, umerjanje modela stavbe, EnergyPlus                      |

### Izvleček

V tej študiji sem predstavil dopolnjen postopek umerjanja toplotnega odziva naravno prezračevane enodružinske stavbe, s pomočjo programskega orodja DesignBuilder (EnergyPlus). Meritve temperature suhega zraka in površinske temperature zunanjih sten, na podlagi katerih sem umeril računski model stavbe, sem izvajal od sredine aprila do sredine julija 2020. Dejanski toplotni odziv stavbe v tem obdobju sem predvidel z natančnostjo  $\pm 1\text{ °C}$  v 71.6 % oz.  $\pm 2\text{ °C}$  v 98.4 % časa.

Na osnovi zgodovinskih meteoroloških podatkov iz obdobja 1982–1999, sem nato izdelal projekcije podnebja v okolici Ljubljane za bodoča obdobja: 2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100. Pri napovedih sem upošteval scenarij podnebnih sprememb SRES, A2. V nadaljevanju sem nato analiziral vpliv spremenjenega podnebja na toplotni odziv umerjenega modela stavbe, hkrati pa sem analiziral različne prilagoditve na nivoju stavbe in organizacijske ukrepe kot pasivne metode hlajenja stavbe.

Prišel sem do zaključka, da predstavljajo organizacijski ukrepi zelo učinkovito rešitev za hlajenje stavbe, medtem ko so rezultati prilagoditev na nivoju stavbe občutno skromnejši. Ukrep senčenja predstavlja primerno rešitev samo v prvem prihodnjem obdobju, medtem ko je ukrep nočnega zračenja (s senčenjem) priporočljiv v vseh treh obdobjih. Pri izvajanju slednjega sicer obstaja nevarnost pojava podhlajevanja stavbe, ki je prisotna predvsem v prvem prihodnjem obdobju. Od obravnavanih stavbnih adaptacij so za omiljevanje pojava pregrevanja najbolj primerne adaptacija z vgrajenimi dodatnimi senčili, adaptacija z nižjo solarno absorptivnostjo strešnikov, ter adaptacija z dodatno toplotno maso (2. stopnja). Za omiljevanje pojava podhlajevanja stavbe med izvajanjem nočnega zračenja pa je najbolj primerna adaptacija z dodatno toplotno izoliranimi zunanjimi stenami.



## BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

|                       |                                                                                                                       |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UDC:</b>           | 624.011.1:697.13(497.4)(043.3)                                                                                        |
| <b>Author:</b>        | Matic Možina, B. Sc. (UN)                                                                                             |
| <b>Supervisor:</b>    | Assoc. Prof. Mitja Košir, ph. D.                                                                                      |
| <b>Co-advisors:</b>   | assist. Luka Pajek, ph. D.<br>Manoj Kumar Singh, ph. D.                                                               |
| <b>Title:</b>         | Climate change and loghouse overheating risk: comparison of passive cooling measures with a calibrated building model |
| <b>Document type:</b> | Master thesis                                                                                                         |
| <b>Notes:</b>         | 55 p., 13 tab., 13 graph., 15 fig., 1 ann.                                                                            |
| <b>Key words:</b>     | climate change, building overheating, passive cooling, building model calibration, EnergyPlus                         |

### Abstract

In this study, a novel procedure for calibrating the thermal response of a naturally ventilated single-family building with DesignBuilder (EnergyPlus) software is presented. From mid-April to mid-July 2020, I performed measurements of dry-bulb temperatures and wall surface temperatures, based on which I performed the calibration. With the calibrated model I managed to predict the actual building thermal response, with an accuracy of  $\pm 1$  °C in 71.6 % and  $\pm 2$  °C in 98.4 % of the time.

Based on historical meteorological data from 1982 to 1999, I then produced future climate projections for the city of Ljubljana for the periods: 2011–2040, 2041–2070, and 2071–2100. Next, I analyzed the impact that the changing climate will have on the building model thermal response, while also analyzing various building adaptations and organizational efforts as passive cooling methods.

I found that organizational efforts function very well as passive cooling solutions, while building adaptations are not quite as effective in this regard. Shading is only effective in the first future period, while night ventilation is recommended in all three periods. The latter can however lead to overcooling of the building, especially in the first future period. Of the considered building adaptations, the most suitable for mitigating the overheating phenomenon are: adaptation with additional external blinds, adaptation with lower solar absorptivity of roof tiles, and adaptation with increased thermal mass in the building envelope. To mitigate the building overcooling problem during night ventilation, it is recommended to increase the thermal resistance of the building envelope.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorjem dr. Mitji Koširju, asist. Luki Pajku in dr. Manoju K. Singhu za strokovno usmerjanje, odzivnost in podporo pri magistrski nalogi.

Zahvaljujem se tudi svoji družini, ki mi je dajala podporo in omogočila študij.

## KAZALO VSEBINE

|                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA</b>                                    | <b>I</b>   |
| <b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK</b>              | <b>II</b>  |
| <b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT</b>       | <b>III</b> |
| <b>ZAHVALA</b>                                                      | <b>IV</b>  |
| <br>                                                                |            |
| <b>1 UVOD</b>                                                       | <b>1</b>   |
| <b>2 ORODJA IN METODE</b>                                           | <b>1</b>   |
| 2.1 Potek študije                                                   | 3          |
| 2.2 Lokacija in stavba                                              | 4          |
| 2.2 Umerjanje računskega modela                                     | 7          |
| 2.2.1 Kriteriji in metode za umeritev modela stavbe                 | 7          |
| 2.2.2 Meritve za umerjanje modela stavbe                            | 10         |
| 2.2.3 Opis programskega orodja                                      | 13         |
| 2.2.4 Izhodiščni model stavbe                                       | 13         |
| 2.2.5 Umerjanje modela stavbe                                       | 13         |
| 2.2.5.1 Režim delovanja stavbe                                      | 13         |
| 2.2.5.1.1 Prezračevanje in senčenje stavbe                          | 15         |
| 2.2.5.1.2 Notranji toplotni viri v stavbi                           | 16         |
| 2.2.5.2 Koeficienti pritiska vetra                                  | 19         |
| 2.2.5.3 Gradient temperature zraka v stavbi                         | 20         |
| 2.2.5.4 Zrakotesnost stavbnega ovoja                                | 21         |
| 2.2.5.5 Opis celotnega procesa umerjanja modela stavbe              | 21         |
| 2.3 Študija vpliva podnebnih sprememb na toplotno udobje            | 23         |
| 2.3.1 Obseg študije                                                 | 23         |
| 2.3.2 Projekcije podnebnih sprememb                                 | 23         |
| 2.3.3 Prilagoditev stavbe na podnebne spremembe                     | 24         |
| 2.3.3.1 Prilagoditve na nivoju stavbe                               | 24         |
| 2.3.3.2 Organizacijski ukrepi                                       | 26         |
| 2.3.4 Vrednotenje prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov    | 29         |
| <b>3 REZULTATI</b>                                                  | <b>31</b>  |
| 3.1 Umerjanje računskega modela                                     | 31         |
| 3.2 Analiza vpliva podnebnih sprememb na pojav pregrevanja v stavbi | 35         |
| 3.2.1 Projekcije podnebnih sprememb                                 | 35         |
| 3.2.3 Rezultati prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov      | 38         |
| 3.2.3.1 Toplotno (ne)udobje uporabnikov                             | 38         |
| 3.2.3.2 Toplotno udobje uporabnikov                                 | 43         |
| 3.2.3.3 Toplotni odziv modelov stavbe                               | 45         |
| 3.2.3.4 Pogostost izvajanja organizacijskih ukrepov                 | 48         |
| <b>4 DISKUSIJA</b>                                                  | <b>49</b>  |

|                  |                                                        |           |
|------------------|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.1</b>       | <b>Umerjanje računskega modela.....</b>                | <b>49</b> |
| <b>4.2</b>       | <b>Prilagoditev modela na podnebne spremembe .....</b> | <b>50</b> |
| <b>4.3</b>       | <b>Odgovori na raziskovalna vprašanja .....</b>        | <b>52</b> |
| <b>5</b>         | <b>ZAKLJUČEK.....</b>                                  | <b>55</b> |
| <b>VIRI.....</b> |                                                        | <b>56</b> |

## KAZALO PREGLEDNIC

|                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Preglednica 1:</b> Poglavitne informacije o geometriji stavbe .....                                                                                                                                                                                      | 6  |
| <b>Preglednica 2:</b> Kriteriji in priporočila za vrednotenje negotovosti umerjenih modelov stavb .....                                                                                                                                                     | 8  |
| <b>Preglednica 3:</b> Tehnične informacije o vseh uporabljenih merilcih .....                                                                                                                                                                               | 11 |
| <b>Preglednica 4:</b> Bistvene informacije o vseh izvedenih meritvah .....                                                                                                                                                                                  | 12 |
| <b>Preglednica 5:</b> Parametri CFD simulacije modela stavbe.....                                                                                                                                                                                           | 19 |
| <b>Preglednica 6:</b> Parametri za simulacijo odziva ekstenzivne zelene strehe v modelu stavbe .....                                                                                                                                                        | 26 |
| <b>Preglednica 7:</b> Povprečne vrednosti statističnih kazalnikov umerjenosti in S-M odstopanj, za vse<br>merjene temperaturne spremenljivke v končni različici modela stavbe.....                                                                          | 31 |
| <b>Preglednica 8:</b> Kazalniki izjemne vročine za izhodiščno in obravnavana prihodnja obdobja v<br>Ljubljani .....                                                                                                                                         | 36 |
| <b>Preglednica 9:</b> Grafične oznake analiziranih organizacijskih ukrepov in prilagoditev stavbe .....                                                                                                                                                     | 38 |
| <b>Preglednica 10:</b> Pričakovano povečanje trajanja toplotnega neudobja uporabnikov zaradi previsokih<br>notranjih temperatur, za vse kombinacije prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, kjer je ta<br>negativni pojav prisoten .....            | 42 |
| <b>Preglednica 11:</b> Prispevki k trajanju toplotnega udobja so prikazani za 6 najbolj učinkovitih<br>kombinacij prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, v vsakem izmed treh prihodnjih obdobj 52                                                  |    |
| <b>Preglednica 12:</b> Vrednosti skrajšanega trajanja toplotnega udobja na letni ravni, napram<br>primerjalnemu modelu stavbe, so prikazane za vse kombinacije prilagoditev stavbe in organizacijskih<br>ukrepov, kjer je ta negativni pojav prisoten ..... | 53 |
| <b>Preglednica 13:</b> Poenostavljeni rezultati toplotnega udobja uporabnikov, za vse tri nivoje<br>sprejemljivosti po standardu prEN 16798-1 .....                                                                                                         | 54 |

## KAZALO GRAFIKONOV

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Grafikon 1:</b> Rezultati umerjenosti modela stavbe za statistični kazalnik NMBE na ravni urnih in mesečnih intervalov po kriterijih ASHRAE 14-2014 .....                                                                                                                                                     | 32 |
| <b>Grafikon 2:</b> Rezultati umerjanja temperature suhega zraka v kleti, pritličju in zgornjem nadstropju stavbe.....                                                                                                                                                                                            | 33 |
| <b>Grafikon 3:</b> Rezultati umerjanja površinske temperature zunanjih sten v pritličju in zgornjem nadstropju stavbe.....                                                                                                                                                                                       | 34 |
| <b>Grafikon 4:</b> Primerjava izmerjenih in predvidenih meteoroloških parametrov (temperatura suhega zraka in jakost globalnega sončnega obsevanja) za Ljubljano .....                                                                                                                                           | 35 |
| <b>Grafikon 5:</b> Rezultati toplotnega odziva izhodiščnega modela stavbe za obravnavana prihodnja obdobja.....                                                                                                                                                                                                  | 37 |
| <b>Grafikon 6:</b> Primerjava rezultatov toplotnega neudobja uporabnikov, za vse možne kombinacije obravnavanih prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, izraženih v obliki deleža časa v letu, ko bi bilo uporabnikom ali prevroče ali premrzlo. Rezultati so prikazani za zgornje nadstropje stavbe ... | 39 |
| <b>Grafikon 7:</b> Primerjava rezultatov toplotnega neudobja uporabnikov, za vse možne kombinacije obravnavanih prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, izraženih v obliki deleža časa v letu, ko bi bilo uporabnikom ali prevroče ali premrzlo. Rezultati so prikazani za pritličje stavbe. ....        | 40 |
| <b>Grafikon 8:</b> Primerjava rezultatov toplotnega neudobja uporabnikov, za vse možne kombinacije obravnavanih prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, izraženih v obliki deleža časa v letu, ko bi bilo uporabnikom ali prevroče ali premrzlo. Rezultati so prikazani za klet stavbe .....             | 41 |
| <b>Grafikon 9:</b> Rezultati prikazujejo deleže leta, ko bi uporabniki stavbe predvidoma občutili toplotno udobje, za vse možne kombinacije obravnavanih prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov. Rezultati so prikazani za zgornje nadstropje in pritličje stavbe. ....                                  | 44 |
| <b>Grafikon 10:</b> Rezultati prikazujejo deleže leta, ko bi uporabniki stavbe predvidoma občutili toplotno udobje, za vse možne kombinacije obravnavanih prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov. Rezultati so prikazani za klet stavbe .....                                                            | 45 |
| <b>Grafikon 11:</b> 30-dnevno povprečno odstopanje operativne temperature adaptiranih stavbnih modelov, merjene v zgornjem nadstropju, napram neadaptiranim različicam modelov (del 1/2) .....                                                                                                                   | 46 |
| <b>Grafikon 12:</b> 30-dnevno povprečno odstopanje operativne temperature adaptiranih stavbnih modelov, merjene v zgornjem nadstropju, napram neadaptiranim različicam modelov (del 2/2) .....                                                                                                                   | 47 |
| <b>Grafikon 13:</b> Pogostost izvajanja organizacijskih ukrepov, na letni ravni, za vsa obravnavana prihodnja obdobja.....                                                                                                                                                                                       | 48 |

## KAZALO SLIK

|                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Slika 1:</b> Shematski prikaz študijskega dela.....                                                                                                                                                                     | 3  |
| <b>Slika 2:</b> Prikaz obravnavane stavbe z bližnjo okolico .....                                                                                                                                                          | 4  |
| <b>Slika 3:</b> Fasadni pas stavbe.....                                                                                                                                                                                    | 5  |
| <b>Slika 4:</b> Shematski prikaz tipičnega okna na stavbi.....                                                                                                                                                             | 6  |
| <b>Slika 5:</b> Metodologija umerjanja računskega modela stavbe na izmerjene vrednosti temperature suhega zraka in površinske temperature sten .....                                                                       | 9  |
| <b>Slika 6:</b> Shematski prikaz uporabljenih grafičnih tehnik za določitev relevantnih stavbnih in okoliških parametrov za umeritev modela stavbe.....                                                                    | 10 |
| <b>Slika 7:</b> EMS programska koda za uporabo .csv urnikov v EnergyPlus simulacijah toplotnega odziva stavb .....                                                                                                         | 14 |
| <b>Slika 8:</b> Parametri za izračun ekvivalentnega intervala zračenja za delno odprto okno in okno s spuščnimi žaluzijami .....                                                                                           | 16 |
| <b>Slika 9:</b> Postopek izračuna približne oddane toplote radiatorjev.....                                                                                                                                                | 18 |
| <b>Slika 10:</b> Postopek izračuna povprečnih vrednosti koeficientov pritiska vetra na stavbne transparentne površine .....                                                                                                | 20 |
| <b>Slika 11:</b> Shematski prikaz celotnega postopka umerjanja modela stavbe.....                                                                                                                                          | 22 |
| <b>Slika 12:</b> Detajli prilagoditev stavbe z bistvenimi lastnostmi novovgrajenih materialov .....                                                                                                                        | 25 |
| <b>Slika 13:</b> Prvi del EMS programske kode za upravljanje naravnega prezračevanja in senčenja modela stavbe, na podlagi povprečnih temperatur notranjega in zunanjega suhega zraka v določenem časovnem intervalu.....  | 27 |
| <b>Slika 14:</b> Drugi del EMS programske kode za upravljanje naravnega prezračevanja in senčenja modela stavbe, na podlagi povprečnih temperatur notranjega in zunanjega suhega zraka v določenem časovnem intervalu..... | 28 |
| <b>Slika 15:</b> EMS programska koda za izračun povprečnih temperatur suhega zraka znotraj posameznih toplotnih con računskega model stavbe .....                                                                          | 30 |

**KRATICE**

| Kratice        | Angleški pomen                                                            | Slovenski pomen                                                       |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| HDD            | heating degree days                                                       | ogrevalni stopinjski dnevi (temperaturni primanjkljaj)                |
| CDD            | cooling degree days                                                       | hladilni stopinjski dnevi (temperaturni presežek)                     |
| NMBE           | normalized mean bias error                                                | normalizirana srednja napaka pristranskosti                           |
| CV(RMSE)       | coefficient of variation of root-mean squared error                       | koeficient variacije korena srednje kvadratne napake                  |
| $R^2$          | coefficient of determination                                              | koeficient determinacije                                              |
| ASHRAE         | American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers | Ameriško združenje inženirjev za ogrevanje, hlajenje in klimatizacijo |
| ARSO           | Slovenian environment agency                                              | Agencija Republike Slovenije za okolje                                |
| S-M odstopanje | deviation between simulated and measured values                           | odstopanje simuliranih vrednosti od merjenih vrednosti                |
| KPV            | wind pressure coefficient                                                 | koeficient pritiska vetra                                             |
| CFD            | computational fluid dynamics                                              | računalniška dinamika tekočin                                         |



## SIMBOLI

### 1.1.1 Kriteriji in metode za umeritev modela stavbe

|                   |                                                                                                                                                                |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $NMBE$            | normalizirana srednja napaka pristranskosti                                                                                                                    |
| $CV(RMSE)$        | koeficient variacije korena srednje kvadratne napake                                                                                                           |
| $R^2$             | koeficient determinacije                                                                                                                                       |
| $n(t; T_{out})$   | število izmerjenih vrednosti znotraj intervala ocene negotovosti ( $t = v$ odvisnosti od časa; $T_{out} = v$ odvisnosti od temperature zunanjega suhega zraka) |
| $p$               | število nastavljenih parametrov modela (za $NMBE = 0$ ; za $CV(RMSE) = 1$ )                                                                                    |
| $s_i(t; T_{out})$ | simulirana $i$ -ta vrednost ( $t = v$ odvisnosti od časa; $T_{out} = v$ odvisnosti od temperature zunanjega suhega zraka)                                      |
| $m_i(t; T_{out})$ | izmerjena $i$ -ta vrednost ( $t = v$ odvisnosti od časa; $T_{out} = v$ odvisnosti od temperature zunanjega suhega zraka)                                       |
| $f(t)$            | povprečno S-M odstopanje po urah dneva                                                                                                                         |
| $h(T_{out})$      | povprečno S-M odstopanje po temperaturi suhega zunanjega zraka                                                                                                 |

### 1.1.5.1.2 Prezračevanje in senčenje stavbe

|             |                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $A_f$       | prosta površina okna oz. odprtine                                        |
| $A_{f,i}$   | $i$ -ta prosta površina okna                                             |
| $A_{f,max}$ | največja prosta površina okna                                            |
| $L$         | dolžina notranjega robu okenskega okvirja pravokotnega na os odpiranja   |
| $H$         | dolžina notranjega robu okenskega okvirja vzporednega osi odpiranja      |
| $\theta$    | kot med ravnino zunanje stene in okenskim krilom                         |
| $C_d$       | koeficient pretoka                                                       |
| $t'_{int}$  | ekvivalentni interval zračenja določenega okna                           |
| $t_{int}$   | dejanski interval zračenja določenega okna                               |
| $\Phi$      | delež vidnega horizonta skozi okno pri spuščeni zunanji žaluziji         |
| $\Phi_i$    | $i$ -ti delež vidnega horizonta skozi okno pri spuščeni zunanji žaluziji |
| $\alpha$    | naklon lopatic zunanjih žaluzij                                          |

### 1.1.5.1.3 Notranji toplotni viri v stavbi

|                  |                                                                               |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $P_{dev}(t)$     | toka odvečne toplote električnih naprav (v odvisnosti od časa)                |
| $P_{max}$        | največja obratovalna električna moč naprave                                   |
| $\eta_{heat}(t)$ | brezdimenzijski količnik deleža oddane odvečne toplote (v odvisnosti od časa) |
| $F_R$            | Delež radiacijsko oddane toplote                                              |
| $F_C$            | Delež konvekcijsko oddane toplote                                             |

|                   |                                                                                                             |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $T_{w,hot}(t)$    | temperatura vroče vode v radiatorju (v odvisnosti od časa)                                                  |
| $T_{w,cold}(t)$   | temperatura hladne vode v radiatorju (v odvisnosti od časa)                                                 |
| $T_{sur,r}(t)$    | Površinska temperatura stene radiatorja (v odvisnosti od časa)                                              |
| $T_{sur,hot}(t)$  | površinska temperatura dovoda vroče vode v radiator (v odvisnosti od časa)                                  |
| $T_{sur,cold}(t)$ | površinska temperatura odvoda hladne vode iz radiatorja (v odvisnosti od časa)                              |
| $P_{tank}(t)$     | toplotni tok iz hranilnika toplote (v odvisnosti od časa)                                                   |
| $T_{w,tank}(t)$   | temperatura vode v hranilniku toplote (v odvisnosti od časa)                                                |
| $T_{ai,z}(t)$     | temperatura suhega zraka v toplotni coni, znotraj katere se hranilnik toplote nahaja (v odvisnosti od časa) |
| $r_1$             | notranji premer hranilnika toplote                                                                          |
| $r_2$             | zunanji premer hranilnika toplote                                                                           |
| $\lambda_{tank}$  | toplotna prevodnost ovoja hranilnika toplote                                                                |
| $h_{tank}$        | višina hranilnika toplote                                                                                   |
| $\alpha$          | prestopni koeficient toplote                                                                                |

#### 1.1.5.2 Koeficienti pritiska vetra

|                    |                                                                           |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $\bar{c}_{p,\chi}$ | povprečne vrednosti koeficientov pritiska vetra po določeni površini      |
| $S$                | območje transparentne površine                                            |
| $p_{\chi}(S)$      | funkcija pritiska vetra za določeno smer vetra (v odvisnosti od površine) |
| $\chi$             | smer vetra                                                                |
| $\rho$             | gostota zraka                                                             |
| $U_{max}$          | največja hitrost vetra v simulaciji                                       |

#### 1.1.5.3 Gradient temperature zraka v stavbi

|              |                                                                                                                             |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $g(T_{out})$ | funkcija gradienta temperature suhega zraka v stavbi (v odvisnosti od temperature zunanjega suhega zraka)                   |
| $T_{out}(t)$ | temperatura zunanjega suhega zraka (v odvisnosti od časa)                                                                   |
| $\Delta T_i$ | povprečni izmerjeni vertikalni gradient temperature suhega zraka v notranjosti stavbe pri temperaturi zunanjega zraka $T_i$ |
| $T_1, T_2$   | Konstanti za umeritev funkcije gradienta temperature suhega zraka v stavbi                                                  |

#### 1.1.4 Vrednotenje prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov

|                |                                                                                                                 |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $T_{rm}$       | tekoče povprečje temperature zunanjega suhega zraka (7 dnevno povprečje)                                        |
| $T_c$          | optimalna operativna temperatura za doseg toplotnega udobja                                                     |
| $T_{op}$       | izmerjena operativna temperatura v stavbi                                                                       |
| $T_{out}(d-i)$ | povprečna temperatura suhega zraka za n-ti dan pred obravnavanim dnem                                           |
| $\alpha$       | brezdimenzijska konstanta za izračun tekočega povprečja temperature zunanjega suhega zraka (priporočila se 0,8) |

*Ta stran je namenoma prazna.*

## 1 UVOD

Antropogene podnebne spremembe so glavni vzrok vse pogostejših in intenzivnejših vročinskih vremenskih ekstremov v zadnjih 70. letih [1]. Glede na letno poročilo WMO (angl. World meteorological organization) o stanju globalnega podnebja, je bilo leto 2020 med tremi najtoplejšimi leti v zgodovini meritev, saj je bila povprečna globalna temperatura zraka za približno 1,2 °C višja od povprečnega stanja iz predindustrijske dobe [2]. Zadnje desetletje (2011–2020) je bilo najtoplejše v zgodovini meritev, s čimer se nadaljuje trend, ki traja že od leta 1950, kjer je vsako naslednje desetletje toplejše od prejšnjega [2].

Toplejše podnebje nedvomno že vpliva na toplotni odziv in energijsko učinkovitost obstoječega stavbnega fonda, ti učinki pa se bodo v prihodnosti le še stopnjevali v odvisnosti od koncentracije toplogrednih plinov v ozračju. Z vidika rabe energije v stavbah bo imelo globalno segrevanje tako pozitivne, kot tudi negativne posledice. To je razvidno v študiji, kjer so in Mima *et al.* [3] analizirali vpliv predvidenih podnebnih sprememb na število dni s temperaturnim primanjkljajem ali presežkom<sup>1</sup> v prihodnosti na področju Evrope, pri čemer so ugotovili, da naj bi se potreba po ogrevanju stavb zmanjšala, hkrati pa naj bi se potreba po hlajenju znatno povečala. Ker se za hlajenje stavb večinoma uporabljajo klimatske naprave [4], se pri tem poraja vprašanje o potencialnih posrednih izpustih toplogrednih plinov, ki so povezani z rabo električne energije za delovanje klimatskih naprav. Te spremembe lahko vodijo v brezizhodno situacijo, kjer je hlajenje stavb hkrati posledica in vzrok podnebnih sprememb [5]. Pri zmanjšanju izpustov toplogrednih plinov v ozračje lahko primerni pasivni ukrepi za hlajenje stavb igrajo ključno vlogo [5] in s tem pripomorejo k dosegu cilja Evropske unije glede ogljične nevtralnosti držav članic do leta 2050 [6]. Podnebne spremembe pa ne vplivajo le na rabo energije v stavbah, temveč predstavljajo tudi resnejšo grožnjo zdravju (predvsem starejših) oseb. Najhujši primer te nevarnosti predstavlja vročinski val v Evropi leta 2003, ki velja za eno izmed največjih naravnih katastrof v zgodovini Evrope, v katerem zaradi vročinske obremenitve umrlo več kot 30.000 oseb [7]. Iz tega razloga so raziskave na področju prilagoditve obstoječega stavbnega fonda na podnebne spremembe izrednega pomena.

Eno izmed zgodnejših študij na tem področju sta opravila Vidrih in Medved [8], in sicer sta analizirala vpliv toplotne mase<sup>2</sup> stavbnega ovoja na potrebno energijo za ogrevanje in hlajenje nizko-energijske enodružinske stavbe v Ljubljani (Slovenija) do sredine stoletja. Njuni rezultati so pokazali, da naj bi visoka toplotna masa stavbnega ovoja bistveno zmanjšala potrebo po hlajenju stavbe v prihodnosti. Rodrigues *et al.* [9] so zasnovali močno izolirano enodružinsko stavbo, z nizko toplotno maso stavbnega ovoja, za katero so analizirali tveganje za pojav pregrevanja do konca stoletja v Nottinghamu (Anglija). V sklopu študije so preučili zunanje senčenje, naravno prezračevanje in toplotno črpalko zemlja-zrak. Zaključili so, da tudi s hkratno uporabo vseh naštetih ukrepov naj ne bi bilo mogoče v celoti preprečiti pojava pregrevanja stavbe v prihodnosti. Še eno podobno raziskavo so opravili van Hoff *et al.* [10], ki pa so obravnavali vrsto pasivnih adaptacij in ukrepov - nižjo toplotno prevodnost in višjo solarno odbojnost<sup>3</sup> stavbnega ovoja, ozelenjeno streho, ter zunanje senčenje in naravno prezračevanje - za primer tipične nizozemske enodružinske stavbe. Ker je toplotna masa ovoja obravnavane stavbe zelo visoka, so avtorji preverili tudi kaj bi se zgodilo če bi le-to zmanjšali. Ugotovili so, da naj bi bila potrebna energija za hlajenje najvišja v primeru različice stavbe z izboljšano toplotno izolativnostjo ovoja, vendar pa naj bi bilo možno le-to znatno zmanjšati z izvajanjem ukrepov senčenja in naravnega prezračevanja. Nižja toplotna masa stavbnega ovoja naj bi prav tako negativno vplivala na potrebno energijo za hlajenje, medtem ko naj bi bil učinek višje solarne odbojnosti zunanosti ovoja in zelene strehe v tem primeru zanemarljiv.

---

<sup>1</sup> **Ogrevalni/hladilni stopinjski dnevi:** vsota razlik med povprečno dnevno temperaturo zunanjega suhega zraka Tout in temperaturo 18 °C, za vse dni v letu ko je Tout nižja/višja od 18 °C

<sup>2</sup> **Toplotna masa (stavbnega ovoja):** med prehajanjem toplote skozi neki konstrukcijski sklop, se določen delež le-te absorbira v sklopu. Toplotna masa je lastnost tega sklopa, ki določa kolikšen je ta delež (enota: J/m<sup>2</sup>K)

<sup>3</sup> **Solarna odbojnost:** lastnost površine, da odbije določen delež sončnega sevanja

Dodoo in Gustavsson [11] sta opravila študijo vpliva podnebnih sprememb na toplotni odziv, ter na rabo primarne energije za ogrevanje in hlajenje treh različnih večstanovanjskih stavb na Švedskem. Njuni rezultati so pokazali, da naj bi bilo tveganje za pojav pregrevanja nekoliko večje pri stavbah z visokim razmerjem med okenskimi površinami in skupno tlorisno površino stavbe. Pri tem sta analizirala tudi različne aktivne in pasivne ukrepe hlajenja, in sicer naj bi ukrep senčenja z vidika rabe primarne energije predstavljal najbolj učinkovito rešitev, medtem ko naj bi se, z vidika omejevanja pojava pregrevanja, kot najbolj učinkovito izkazalo kombiniranje ukrepov senčenja in zračenja. Podobno raziskavo so izvedli tudi Berger *et al.* [12], ki so preverili vpliv dodatne toplotne izolacije, ter izboljšane učinkovitosti električnih naprav in razsvetljave (nižja toplotna obremenitev) na rabo energije za ogrevanje in hlajenje štirih večjih pisarniških stavb na Dunaju (Avstrija) do sredine stoletja. Prišli so do zaključka, da naj bi imela odvečna toplota, ki jo med delovanjem oddajajo električne naprave in razsvetljava, bistveno večji vpliv na potrebno energijo za hlajenje pisarniških stavb, kot pa predvideno segrevanje ozračja v prihodnosti. Kar pa se tiče izboljšanja toplotne izolativnosti ovoja obravnavanih stavb, naj bi le-to sicer malenkostno poslabšalo učinkovitost nočnega hlajenja s prezračevanjem, vendar pa so pri tem avtorji poudarili, da je ta pojav možno negirati s primerno načrtovanim prezračevalnim sistemom.

Kot je razvidno iz pregleda literature so raziskave na tem področju večinoma osredotočene ali na večje mehansko prezračevane poslovne in večstanovanjske stavbe, ali pa na močno toplotno izolirane enodružinske stavbe. Energijsko manj učinkovite naravno prezračevane enodružinske stavbe z nizko toplotno maso stavbnega ovoja so pri tem bistveno manj preučene. Glede na raziskavo Pajka in Koširja [13], ki sta preučila povezavo med energijsko učinkovitostjo (za ogrevanje) stavb in njihovo odpornostjo proti pojavu pregrevanja v prihodnosti (na območju Ljubljane), so energijsko najbolj učinkovite stavbe v povprečju tudi najbolj dovzetne za pregrevanje. Vendar pa je po njunih navedbah toplotni odziv energijsko manj učinkovitih stavb bistveno manj predvidljiv, in sicer je pri določenih stavbnih zasnovah tveganje za pojav pregrevanja skoraj petkrat višje od povprečja. Pri tem je potrebno izpostaviti tudi raziskavo, ki so jo izvedli Hudobivnik *et al.* [14], ki so dokazali, da je v primeru velikih dnevnih nihanj temperature zunanjega zraka, toplotni odziv stavb z visoko toplotno maso zunanjega ovoja znatno bolj stabilen, kot pa v primeru stavb z nizko toplotno maso ovoja. Te raziskave kažejo na to, da predstavljata kombinacija nizke energijske učinkovitosti in nizke toplotne mase ovoja stavbe veliko tveganje za pojav pregrevanja. Kljub temu med pregledom literature nisem zasledil nobene raziskave, ki bi se osredotočila na dejanski primer takšnega tipa stavbe, za katero bi preverila pričakovan toplotni odziv v prihodnjih podnebnih razmerah. V sklopu te študije sem hotel razširiti znanje na tem področju, in sicer sem analiziral leseno brunarico v okolici Ljubljane, zgrajeno leta 2012, ki se že sedaj v poletnem obdobju pogostokrat pregreva. Glavni cilj naloge je bil določiti najboljše pasivne rešitve, s katerimi bi v bližnji in daljni prihodnosti lahko omejili pojav pregrevanja v obravnavani stavbi. Problematike sem se lotil iz dveh različnih smeri, in sicer sem po eni strani analiziral različne pasivne prilagoditve podnebnju na nivoju ovoja in notranjosti stavbe, medtem ko sem po drugi strani preveril kako bi se obnesli različni ukrepi, ki bi jih izvajali uporabniki stavbe – t.i. organizacijski ukrepi. Ker je obravnavana stavba v poletnem obdobju v prostem teku<sup>4</sup>, sem učinkovitost vseh rešitev lahko ovrednotil le z vidika toplotnega udobja uporabnikov. Za razrešitev predstavljenega problema sem si zastavil sledeča raziskovalna vprašanja:

- 1.) *Katere so, z vidika toplotnega udobja uporabnikov, najbolj učinkovite kombinacije prilagoditev na nivoju stavbe in organizacijskih ukrepov za preprečevanje pregrevanja obravnavane stavbe v prihodnosti?*
- 2.) *Ali bo v prihodnosti v stavbi možno zagotoviti toplotno udobje v poletnem obdobju, brez uporabe mehanskega hlajenja?*
- 3.) *Ali lahko določene kombinacije prilagoditev na nivoju stavbe in organizacijskih ukrepov negativno vplivajo na toplotno udobje?*

---

<sup>4</sup> Prosti tek (stavbe): obdobje, ko stavba deluje brez uporabe aktivnih sistemov ogrevanja in hlajenja

## 2 ORODJA IN METODE

### 2.1 Potek študije

Delo, ki sem ga opravil v študiji se v glavnem deli na naslednje korake, ki so shematsko prikazani na Sliki 1:

- 1) Pridobivanje podatkov o stavbi, ki so: geometrija in orientacija stavbe, sestava in gradbeno-fizikalne lastnosti stavbnega ovoja in notranjosti, pozicije transparentnih površin in ostalih odprtin, ter lastnosti notranjih toplotnih virov v stavbi (radiatorji, električne naprave in hranilnik toplote). Ta korak vključuje tudi pridobivanje podatkov o okolici stavbe, ki so: topologija, geometrija in orientacija sosednjih objektov in dreves, ter lastnosti zunanjih površin.
- 2) Predhodne meritve in analize, ki pripomorejo k zmanjšanju negotovosti pri umerjanju modela stavbe. V študiji sem podrobneje preučil delovanje radiatorjev v stavbe (za določitev njihove približne oddane toplote), izvedel numerično simulacijo toka zraka okoli stavbe (za zmanjšanje negotovosti pri simuliranju naravnega prezračevanja stavbe), ter določil funkcijo gradienta temperature suhega zraka v stavbi (v odvisnosti od temperature zunanjega zraka).
- 3) Meritve toplotnega odziva stavbe (v nadaljevanju umerjevalne meritve). Med izvajanjem le-teh sem meril tudi zunanje vremenske razmere (delno na lokaciji, delno s sosednjih vremenskih postaj), ter beležil vse notranje spremenljivke, ki so vplivale na toplotni odziv stavbe, ki so: odpiranje in senčenje oken, prisotnost stanovalcev, ter delovanje električnih naprav in ostalih virov toplote (radiatorji in hranilnik toplote).
- 4) Zasnova računskega modela stavbe in umerjanje simuliranega toplotnega odziva modela na dejanski izmerjeni toplotni odziv stavbe.
- 5) Definiranje prilagoditev na nivoju stavbe in organizacijskih ukrepov, ki naj bi v prihodnosti preprečevale pregrevanje stavbe. V študiji sem analiziral skupno 28 različic modela stavbe.
- 6) Projekcije podnebnih sprememb za okolico Ljubljane. Le-te sem izvedel na podlagi zgodovinskih meteoroloških podatkov in scenarija podnebnih sprememb SRES A2. Projekcije sem pripravil za tri bodoča obdobja: 2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100.
- 7) Analize predvidenega toplotnega odziva stavbe v vseh treh prihodnjih obdobjih.
- 8) Vrednotenje učinkovitosti prilagoditev na nivoju stavbe in organizacijskih ukrepov, po posameznih prihodnjih obdobjih, na podlagi toplotnega udobja stanovalcev.



Slika 1: Shematski prikaz študijskega dela

Figure 1: Schematic depiction of the study workflow

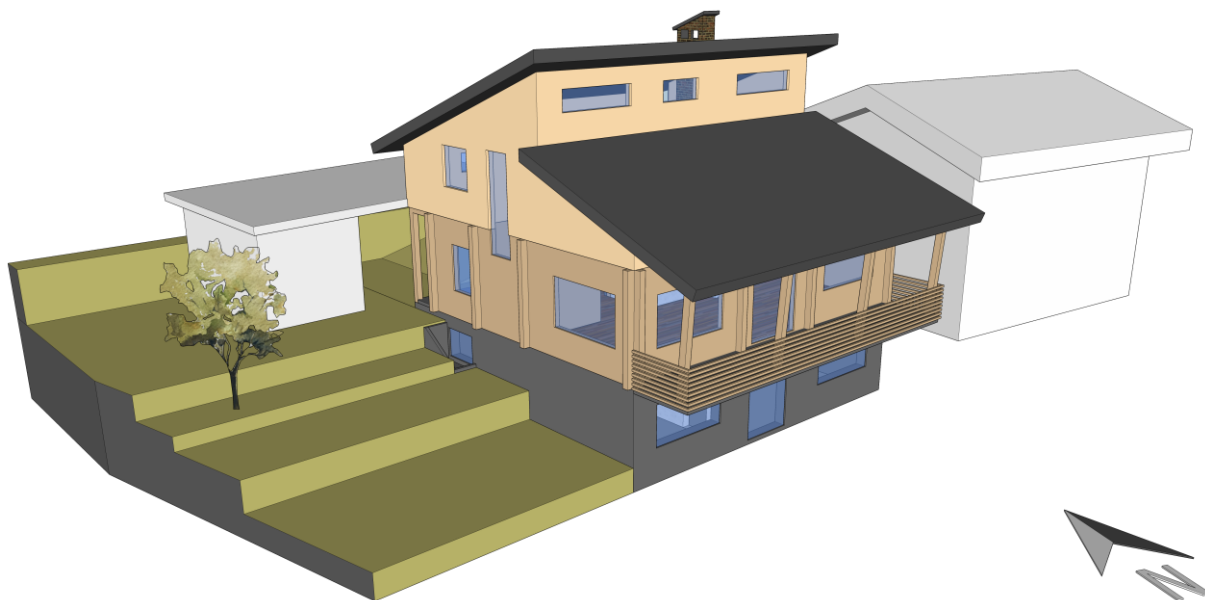
## 2.2 Lokacija in stavba

Obravnavana stavba, shematsko prikazana na sliki 2, se nahaja v okolici Ljubljane v Osrednji Sloveniji. Stavba, ki je bila zgrajena leta 2012, se po etažah in sestavi zunanjih zidov deli na naslednje tri dele:

- delno vkopana klet: eksoskeletna nosilna konstrukcija, sestavljena iz votlih betonskih zidakov in toplotno izolirana z XPS (ekstrudiran polistiren) ploščami debeline 7 cm,
- pritličje: eksoskeletna nosilna konstrukcija, sestavljena iz lepljenih borovih brun, debeline 18 cm. Zunanja stena iz brun ni toplotno izolirana, in
- zgornje nadstropje: endoskeletna lesena nosilna konstrukcija, toplotno izolirana (v jedru) z mehko ovčjo volno debeline 14 cm. Na zunanji strani stene je izvedena prezračevana fasada z lesenim opažem.

Fasadni pas stavbe je vključno z izračunanimi U faktorji<sup>5</sup> vseh netransparentnih konstrukcijskih sklopov prikazan na sliki 3. Transparentni stavbni ovoj sestavljajo lesena okna s troslojno zasteklitvijo, njihova skupna površina znaša 50,2 m<sup>2</sup> (WWR<sup>6</sup> 14,6 %). Material okenskih okvirjev je bor. Medstekelni prostor oken je zapolnjen z mešanico 90 % Argona in 10 % zraka, stekla nimajo nanešenih nobenih nizko emisijskih premazov za izboljšanje energijske učinkovitosti oken. Večina oken ima nameščene zunanje žaluzije, z izjemo treh oken v slemenu, ter vseh oken v kleti. Tipično okno in žaluzije so podrobneje prikazane in opisane na sliki 4. Vse poglobljene informacije o geometriji stavbe so zbrane v preglednici 1. Stavba se ogreva s pomočjo naslednjih treh sistemov:

- peč na drva, ki se uporablja za ogrevanje vode v radiatorjih. Peč je umeščena izven toplotnega ovoja stavbe.
- solarni kolektorji, ki se prav tako uporabljajo za ogrevanje vode v radiatorjih. Kolektorji v času izvajanja študije niso delovali.
- manjša peč na drva, ki se uporablja za ogrevanje zraka v prostorih.

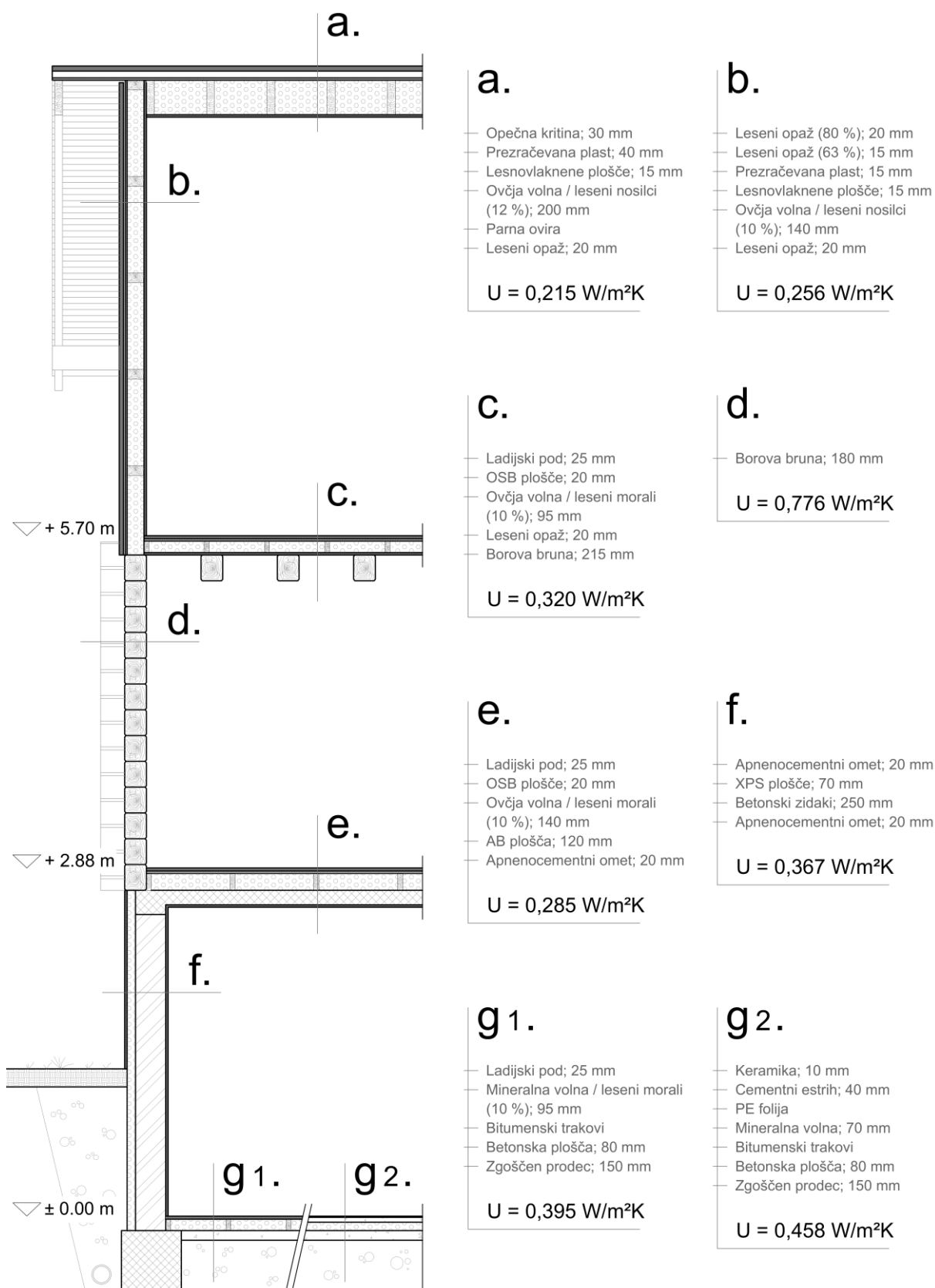


Slika 2: Prikaz obravnavane stavbe z bližnjo okolico

Figure 2: Illustration of the studied building with its surrounding environment

<sup>5</sup> U faktor: toplotna prehodnost (konstrukcijskega elementa)

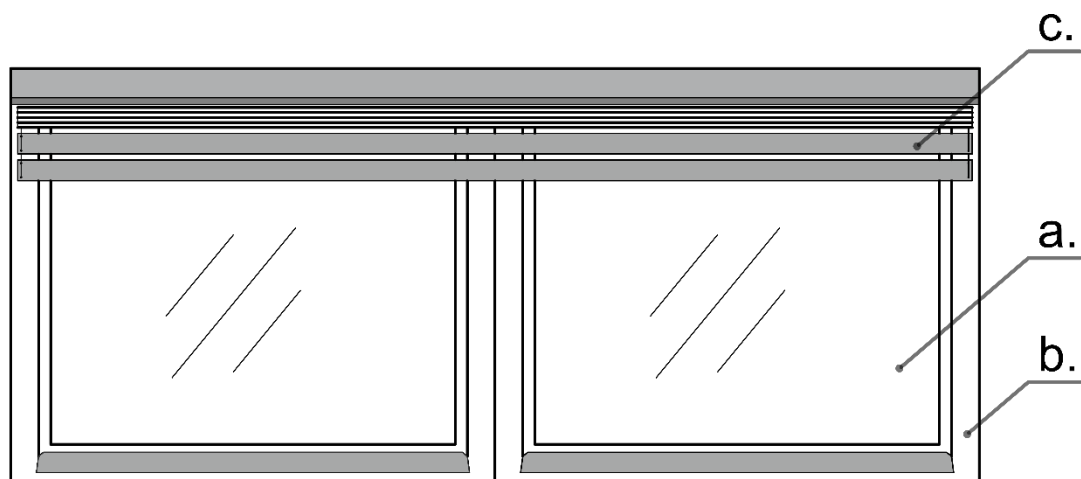
<sup>6</sup> WWR (angl. window to wall ratio): razmerje med vsoto okenskih površin in celotno površino stene



**Slika 3:** Fasadni pas stavbe, vključno z izračunanimi vrednostmi U faktorjev vseh netransparentnih nosilnih konstrukcijskih sklopov

**Figure 3:** Building facade section, including calculated U-values of all opaque load-bearing structural assemblies





a.

- Troslojna zasteklitev
- Dimenzije: 4/12/4/12/4
- Medstekelni plin: 90 % Ar in 10 % zrak
- Prepustnost dnevne svetlobe (LT): 75 %
- Prepustnost celotnega sončnega sevanja (g): 70 %
- Brez low-e premazov

b.

- Material okvira: Borov les
- Širina okvira: 80 - 135 mm
- Višina okvira: 115 mm
- Toplotna prevodnost: ~ 0.16 W/mK
- Solarna absorptivnost: ~ 0.30

c.

- ALU zunanje žaluzije
- Barva: Temno siva
- Refleksivnost lopatic: ~ 0.25
- Odmik od okna: 90 mm
- Debelina lopatic: 0.7 mm
- Toplotna prevodnost lopatic: 230 W/mK

**Slika 4:** Shematski prikaz tipičnega okna na stavbi, z bistvenimi podatki o geometriji in materialni sestavi okna in zunanjih žaluzij

**Figure 4:** Schematic representation of a typical building window, with fundamental information on the geometry and material composition of the window and external Venetian blinds

#### Preglednica 1: Poglavitne informacije o geometriji stavbe

**Table 1:** Primary building geometry information

| Geometrijske karakteristike stavbe |                          |                     |       |                                |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------|-------|--------------------------------|
| Bruto / neto tlorisna površina     | 279 / 240 m <sup>2</sup> | Površina oken (WWR) | Sever | 5.7 m <sup>2</sup> ( 6.9 % )   |
| Število nadstropij                 | 3                        |                     | Vzhod | 12.0 m <sup>2</sup> ( 14.2 % ) |
| Bruto volumen stavbe               | 928 m <sup>3</sup>       |                     | Jug   | 22.6 m <sup>2</sup> ( 22.5 % ) |
| Bruto površina fasade              | 343 m <sup>2</sup>       |                     | Zahod | 9.9 m <sup>2</sup> ( 11.6 % )  |
| Površina fasade nad terenom        | 294 m <sup>2</sup>       | Faktor oblike       |       | 0.64 m <sup>-1</sup>           |
| Površina strehe                    | 181 m <sup>2</sup>       |                     |       |                                |

## 2.2 Umerjanje računskega modela

### 2.2.1 Kriteriji in metode za umeritev modela stavbe

V smernici ASHRAE 14-2014 [15] je umerjanje računskega modela stavbe definirano kot: »*postopek odpravljanja negotovosti računskega modela stavbe, s primerjanjem predvidenih izhodov modela izpostavljenega določenim razmeram, z dejanskimi podatki izmerjenimi v enakih razmerah. (...) postopek umerjanja vključuje upoštevanje predpisanih postopkov, ki določajo katere parametre modela je možno prilagajati, izbiranje sprejemljivega nivoja natančnosti oz. negotovosti modela, ter dokumentiranje celotnega postopka in rezultatov*«. Rezultat umerjanja je tako računski model stavbe, s katerim je mogoče, z določno mero negotovosti, napovedati toplotni odziv dejanske stavbe pri znanih vremenskih razmerah in režimu delovanja le-te. Za oceno negotovosti oz. natančnosti modela se najpogosteje uporabljajo naslednji trije statistični indikatorji: normalizirana srednja napaka pristranskosti (NMBE), koeficient variacije korena srednje kvadratne napake (CV(RMSE)) in koeficient determinacije ( $R^2$ ) [16]. Indikatorji NMBE, CV(RMSE) in  $R^2$  so definirani v enačbah (1), (2) in (3), kjer so  $m_i$  izmerjena  $i$ -ta vrednost,  $s_i$  simulirana  $i$ -ta vrednost in  $n$  število izmerjenih vrednosti znotraj intervala ocene negotovosti [16, 17]. V enačbah (1) in (2) je  $p$  število nastavljenih parametrov modela, za katerega se, za potrebe umerjanja modelov stavb, priporoča, da je enak 0 pri izračunu NMBE oz. enak 1 pri izračunu CV(RMSE) [18].

$$NMBE = \frac{n}{\sum_{i=1}^n m_i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)}{n - p} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$CV(RMSE) = \frac{n}{\sum_{i=1}^n m_i} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{n - p}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$R^2 = \left( \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot s_i - \sum_{i=1}^n m_i \cdot \sum_{i=1}^n s_i}{\sqrt{(n \cdot \sum_{i=1}^n m_i^2 - (\sum_{i=1}^n m_i)^2) \cdot (n \cdot \sum_{i=1}^n s_i^2 - (\sum_{i=1}^n s_i)^2)}} \right)^2 \quad (3)$$

Razpon vrednosti indikatorja NMBE teoretično sega od  $-\infty$  do  $\infty$ , medtem ko vrednosti CV(RMSE) segajo od 0 do  $\infty$ . V primeru popolnega ujemanja izmerjenih in simuliranih podatkov je vrednost obeh indikatorjev enaka 0. Razpon vrednosti indikatorja  $R^2$  teoretično sega od 0 do 1, kjer slednja vrednost pomeni popolno ujemanje podatkov [16]. Vsi trije statistični indikatorji imajo svoje prednosti in slabosti, zaradi česar jih je pri umerjanju smiselno upoštevati prav vse. Prednost NMBE je v tem, da njegova vrednost direktno prikaže ali simulirani model stavbe precenjuje ali podcenjuje izmerjeno stanje. V enačbi (1) se izmerjene vrednosti odštevajo od simuliranih vrednosti, zaradi česar pozitivne vrednosti indikatorja kažejo na precenjevanje modela stavbe in obratno za negativne vrednosti. Slabost NMBE je v napaki, ki se pojavi zaradi izničevanja pozitivnih in negativnih vrednosti razlik simuliranih in izmerjenih vrednosti, kar zmanjša absolutno vrednost indikatorja [16]. Bolj kot je model stavbe umerjen, večji je učinek te napake, saj so simulirane vrednosti vedno bližje izmerjenim [16]. Ta napaka se pri indikatorju CV(RMSE) ne pojavlja, saj se v enačbi (2), razlike med simuliranimi in izmerjenimi vrednostmi kvadrirajo. Posledično, zaradi omenjenega kvadriranja, iz vrednosti indikatorja ni razvidno ali je model stavbe precenjen ali podcenjen. Indikator  $R^2$  pokaže kako blizu so simulirane vrednosti regresijski črti izmerjenih vrednosti [16].

Kriteriji in priporočila za vrednotenje negotovosti umerjenega modela stavbe po ASHRAE 14-2014 [15, 19], ki sem jih upošteval v procesu umerjanja modela stavbe, so prikazani v preglednici 2. Kriteriji so podani v obliki največjih oz. najmanjših dovoljenih vrednosti indikatorjev NMBE in CV(RMSE) na

mesečni in urni ravni. V študiji so umerjevalne meritve trajale 94,5 dni, kar predstavlja skupno 2268 urnih ali 3 mesečne intervale, za skupno 5 merjenih temperaturnih spremenljivk. Zaradi velikega števila podatkov je »umerjenost« modela stavbe v nadaljevanju izražena v obliki deleža urnih in mesečnih intervalov, v katerih so izpolnjeni podani kriteriji. S tem je mogoče hitro primerjati posamezne variante modela stavbe, ki je ustrezno umerjen šele, ko so ti kriteriji izpolnjeni za vse merjene spremenljivke za celotni čas meritev. V preglednici 2 je podana tudi priporočena vrednost indikatorja  $R^2$  [19], ki naj za nobeno od merjenih spremenljivk, ne bi smel biti manjši od 0,75. Indikator se izračuna za celotni čas umerjevalnih meritev oz. 1 interval.

**Preglednica 2:** Kriteriji in priporočila za vrednotenje negotovosti umerjenih računskih modelov stavb po ASHRAE [15, 19]

**Table 2:** Criteria and recommendations for assessing calibrated building model uncertainty by ASHRAE [15, 19]

| Interval ocene negotovosti | Statistični kazalniki |          |            |
|----------------------------|-----------------------|----------|------------|
|                            | NMBE                  | CV(RMSE) | $R^2$      |
| Urnih intervali            | $\pm 10 \%$           | 30 %     | -          |
| Mesečni intervali          | $\pm 5 \%$            | 15 %     | -          |
| Celotni čas meritev        | -                     | -        | $> 0.75^a$ |

<sup>a</sup> Priporočene vrednosti (niso pogoj za ustrezno umerjen model stavbe)

Po Reddyju je umerjanje modela stavbe v sami osnovi proces reševanja nedoločenega sistema, v katerem je število neznank mnogo večje od števila enačb. Umerjevalec mora na podlagi lastne presoje oceniti vrednosti nekaterih stavbnih parametrov, s čimer zmanjša število prostostnih stopenj računskega modela stavbe, ter nato umeriti preostanek parametrov. Zaradi tega končna rešitev ni nikoli edinstvena, saj je v veliki meri odvisna od znanja in izkušenj umerjevalca [20]. Prav zaradi tega ni nobenega zagotovila, da bodo vsi stavbni parametri nastavljeni pravilno, saj je po navedbah Fabrizia in Monetti možno kriterije, ki so podani v preglednici 2, doseči z različnimi računskimi modeli stavbe. Zaradi tega avtorja opozarjata na to, da so statistični indikatorji le pokazatelji ujemanja simuliranih in izmerjenih podatkov, ne predstavljajo pa tudi metodologije za umerjanje modela stavbe [21]. Z drugimi besedami: statistični indikatorji pokažejo kako dobro je umerjen model stavbe, ne pa tudi katere stavbne parametre je potrebno spreminjati za doseg končnega cilja. Clark *et al.* so definirali naslednje štiri metodologije za umerjanje modela stavbe, ki sta jih podrobneje razčlenila Fabrizio in Monetti [21, 22]:

- metode ročnega iterativnega umerjanja (»trial and error« metode),
- grafične metode umerjanja,
- metode umerjanja, ki temeljijo na rezultatih različnih preizkusov in analiz, ter
- avtomatizirane metode umerjanja, ki temeljijo na analitičnih in matematičnih pristopih.

V sklopu študije primera sem sledil grafični metodologiji, v kombinaciji z metodologijo izvajanja dodatnih preizkusov in analiz. Celotna metodologija umerjanja modela stavbe, ki sem jo delno povzel po delu Rafteryja, Keanea in Coste [23], je prikazana na sliki 5. Metodologija se deli na dve fazi, in sicer na uvodno in osrednjo. Cilj uvodne faze je izhodiščni model stavbe, končni cilj po zaključeni osrednji fazi pa ustrezno umerjen model stavbe. V uvodni fazi je potrebno definirati vse stavbne in okoliške parametre, ki jih je mogoče izmeriti, ali pa dovolj točno oceniti na podlagi izkušenj, tehničnih listov in strokovne literature. S tem se v čimvečji meri zmanjša negotovost modela stavbe. Ti parametri se v grobem delijo na geometrijo in orientacijo stavbe z bližnjo okolico, lastnosti konstrukcijskih sklopov in okolice stavbe, ter na vremenske razmere v času meritev. Ko so vsi »znani« parametri združeni v izhodiščnem modelu stavbe, se lahko začne osrednja faza metodologije. Gre za 4-koračni iterativni proces, ki se ponavlja dokler niso, za vseh 5 merjenih temperaturnih spremenljivk, izpolnjeni kriteriji in priporočila za vrednotenje negotovosti umerjenega modela stavbe, podani v preglednici 2. V prvem koraku se s pomočjo programskega orodja DesignBuilder [24] izvede simulacija toplotnega odziva

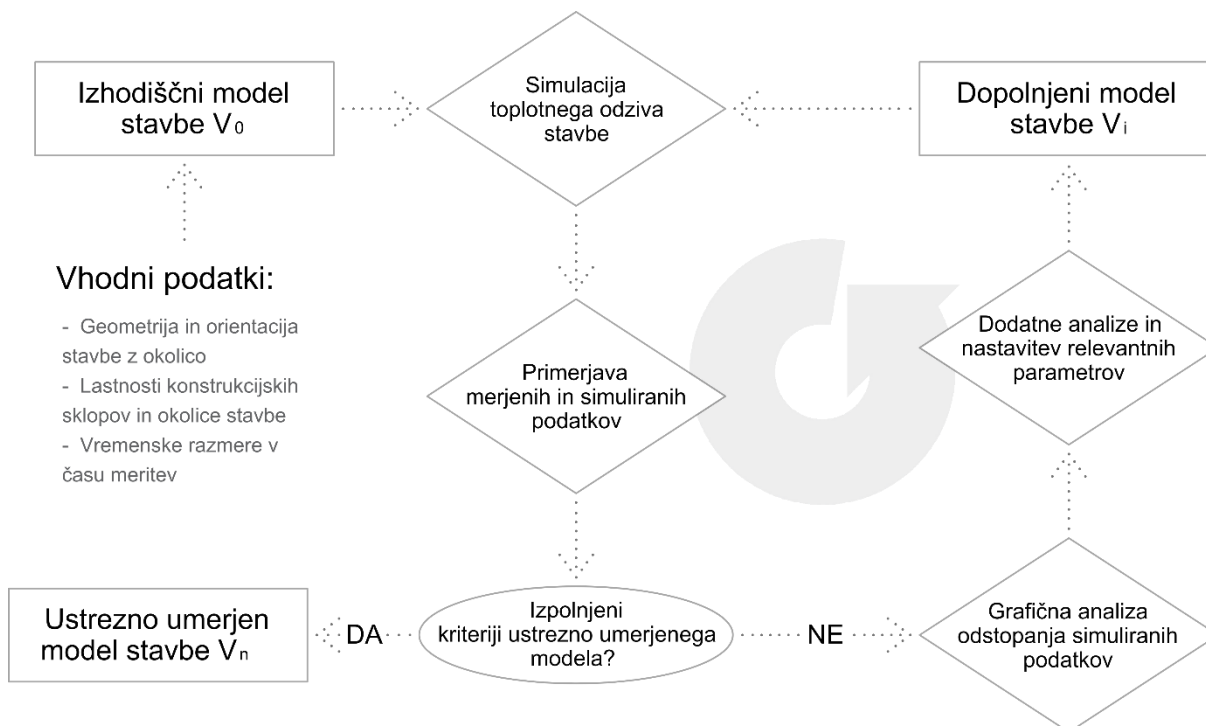
modela stavbe, kateremu v drugem koraku sledi statistična primerjava merjenih in simuliranih temperaturnih spremenljivk, z indikatorji NMBE, CV(RMSE) in  $R^2$ . V kolikor v tem koraku zadani kriteriji še niso izpolnjeni, nato sledi tretji korak, v katerem se izvede grafična analiza odstopanja simuliranih podatkov. S pomočjo le-te se lažje določijo bistveni še neumerjeni parametri modela. V sklopu grafične analize sem uporabljal sledeče tehnike primerjave podatkov:

- Histogram odstopanja simuliranih vrednosti od izmerjenih vrednosti (v nadaljevanju S-M odstopanje), ki sem ga delno povzel po delu Gucyeterja [25]. S to tehniko sem lahko analiziral kako spreminjanje posameznih parametrov vpliva na porazdelitev odstopanja simuliranih vrednosti, in sicer predvsem na mediano ( $Q_2$ ), kvartilni razmik ( $Q_1$ - $Q_3$ ; razlika med prvim in tretjim kvartilom), ter na variacijski razmik ( $Q_0$ - $Q_4$ ; razlika med najmanjšo in največjo vrednostjo).
- Povprečno S-M odstopanje po urah dneva, ki je definirano v enačbi (4). Povprečje sem računal v urnih intervalih.

$$f(t) = \frac{\sum_{i=1}^n [s_i(t) - m_i(t)]}{n(t)} \quad (4)$$

- Povprečno S-M odstopanje po temperaturi suhega zunanjega zraka, ki je definirano v enačbi (5). Tehnika je na las podobna prejšnji, le-da je S-M odstopanje izraženo v odvisnosti od drugačne spremenljivke; na podlagi primerjave rezultatov obeh tehnik pa sem lahko z večjo gotovostjo določil najbolj smiselne parametre modela za umeritev. Povprečje sem računal v eno-stopinjskih intervalih.

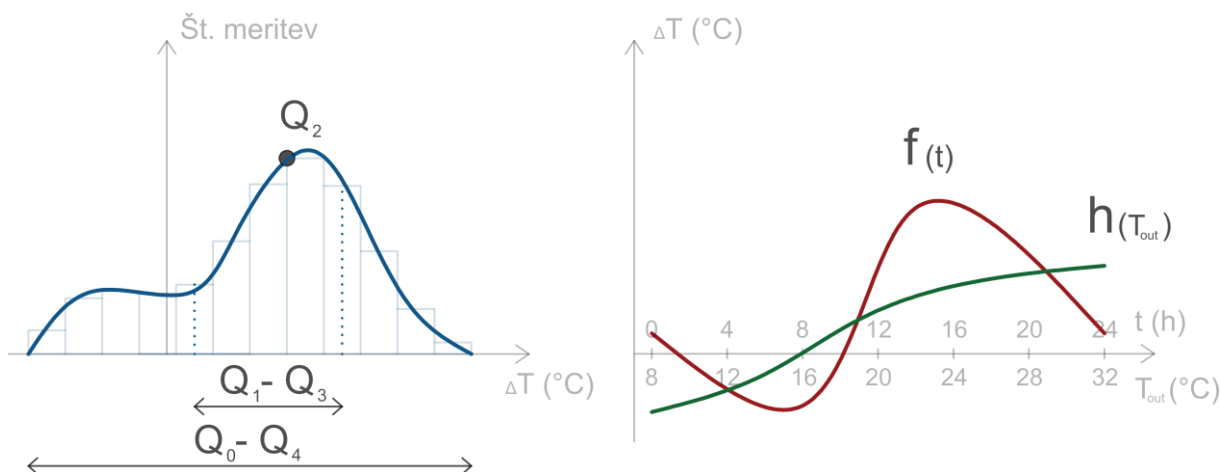
$$h(T_{out}) = \frac{\sum_{i=1}^n [s_i(T_{out}) - m_i(T_{out})]}{n(T_{out})} \quad (5)$$



**Slika 5:** Metodologija umerjanja računskega modela stavbe na izmerjene vrednosti temperature suhega zraka in površinske temperature sten [23]

**Figure 5:** Methodology for calibrating building model to measured dry bulb temperatures and wall surface temperatures [23]

Shematski prikaz vseh treh uporabljenih grafičnih tehnik je prikazan na sliki 6. Grafični analizi nato sledi še zadnji četrti korak, v katerem se lahko po potrebi izvedejo še dodatni preizkusi in analize, ter nastavitve vseh relevantnih parametrov modela v dopolnjenem modelu stavbe. Po končanem procesu umerjanja je model stavbe nato pripravljen za nadaljnje analize toplotnega odziva stavbe v predvideni prihodnosti.



**Slika 6:** Shematski prikaz uporabljenih grafičnih tehnik za določitev relevantnih stavbnih in okoliških parametrov za umeritev modela stavbe. S-M odstopanje je podano v obliki histograma (na sliki levo), ter povprečnih funkcij po času dneva  $f(t)$  in po temperaturi zunanjega suhega zraka  $h(T_{out})$  (na sliki desno)

**Figure 6:** Illustration of the graphic techniques used to determine the appropriate building and environmental parameters for building model calibration. The S-M deviation is given in the form of a histogram (pictured left) and average functions by day time  $f(t)$  and by outside air dry-bulb temperature  $h(T_{out})$  (pictured right)

## 2.2.2 Meritve za umerjanje modela stavbe

V okviru študije sem meritve v stavbi izvajal od sredine aprila do sredine julija 2020 (skupno 94,5 dni). Pri tem sem meril temperaturo suhega zraka v vsakem od treh nadstropij, ter površinsko temperaturo notranje strani zunanje stene v zgornjih dveh nadstropjih. Temperaturo suhega zraka sem meril približno na sredini vsakega nadstropja na višini cca. 2,30 m od kote tal. Površinsko temperaturo sten sem meril na zahodni strani stavbe. Sočasno sem v 1. nadstropju meril tudi relativno vlažnost zraka, vendar pa le-te zaradi omejitev računalniškega programa za simulacijo toplotnega odziva stavbe, modela ni bilo mogoče umeriti na izmerjene podatke. Meritve so potekale v 10-minutnih intervalih. V času izvajanja glavnih »umerjevalnih« meritev, sem v stavbi izvajal tudi vrsto dodatnih meritev, ki so pripomogle k zmanjšanju negotovosti modela. Te meritve so naslednje:

- meritve površinske temperature stene radiatorja v 1. nadstropju, na podlagi katerih sem lahko izračunal približno oddano toploto vseh radiatorjev v stavbi v času umerjevalnih meritev. Meritve so potekale v 10-minutnih intervalih,
- meritve temperature vode hranilniku tople vode v kleti, na podlagi katerih sem lahko izračunal približno oddano toploto hranilnika v času umerjevalnih meritev. Meritve so potekale v 30-minutnih intervalih, in
- beleženje senčenja in odpiranja oken, delovanja elektronskih naprav in prisotnosti uporabnikov v stavbi. Te informacije so uporabniki (stanovalci) beležili sami med uporabo stavbe. Beleženje odpiranja oken so uporabniki izvajali s približno minutno natančnostjo, senčenje oken in uporabo naprav s približno 5-minutno natančnostjo, ter prisotnost s približno 30-minutno natančnostjo.

Dva dni pred začetkom izvajanja umerjevalnih meritev, sem v okolici stavbe začel izvajati tudi meritve temperature in relativne vlažnosti zunanjega zraka. Ostale vremenske podatke sem pridobil iz javnega

spletnega arhiva ARSO [26], ti so: temperatura in relativna vlažnost zraka v času pred izvajanjem meritev v okolici stavbe, hitrost in smer vetra, atmosferski tlak, ter prejeta globalno in difuzno sončno sevanje na horizontalni ravnini. Te podatke sem črpal iz spletne baze meritev naslednjih dveh vremenskih postaj:

- samodejna vremenska postaja Vrhnika, ki se nahaja na nadmorski višini 365 m (51 m višje od stavbe) in je od stavbe oddaljena cca. 7,6 km, in
- glavna meteorološka postaja Ljubljana, ki se nahaja na nadmorski višini 299 m (15 m nižje od stavbe) in je od stavbe oddaljena cca. 14,1 km.

Tehnične informacije o natančnosti in resoluciji vseh merilcev in zapisovalnikov podatkov, ki so bili uporabljeni v okviru študije, so podane v preglednici 3. Osnovne informacije o vseh izvedenih umerjevalnih, dodatnih in vremenskih meritvah, so podane v preglednici 4.

**Preglednica 3:** Tehnične informacije o vseh uporabljenih merilcih

**Table 3:** Technical information of all used sensors

| Zapisovalnik podatkov | Merilec                            | Merjena veličina                                              | Natančnost                                                                       | Resolucija         |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| HOBO U12-011          | HOBO U12-011                       | Temperatura suhega zraka                                      | $\pm 0,35$ K                                                                     | 0,03 K (pri 25 °C) |
|                       | HOBO U12-011                       | Relativna vlažnost zraka                                      | $\pm 2,5$ % (tipično),<br>$\pm 3,5$ % (največje)                                 | 0,03 %             |
| ALMEMO 2690-8A        | Termočlen tipa K (NiCr-Ni)         | Temperatura suhega zraka in površinska temperatura radiatorja | $\pm 0,05$ K $\pm 0,05$ % (merilec) $\pm 0,02$ % (zapisovalnik) merjene količine | 0,10 K             |
|                       | Termočlen Pt100 FPA 686            | Notranja površinska temperatura zunanjih sten                 | $\pm 0,05$ K $\pm 0,05$ % (merilec) $\pm 0,02$ % (zapisovalnik) merjene količine | 0,10 K             |
| SELTRON WDC20         | Potopno temperaturno tipalo PT1000 | Temperatura vode v zalogovniku toplote                        | $\pm \sim 0,05$ K $\pm \sim 2,50$ K meritvene napake                             | 2,00 K             |

**Preglednica 4:** Bistvene informacije o vseh izvedenih meritvah**Table 4:** Essential information on all performed measurements

| Merjena veličina                              | Interval meritev | Pozicija merilca           | Merilec                                  |
|-----------------------------------------------|------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| Temperatura suhega zraka                      | 10 min           | Klet in pritličje          | Termočlen tipa K                         |
|                                               | 10 min           | 1. nadstropje              | HOBO U12-011                             |
| Notranja površinska temperatura zunanjih sten | 10 min           | Pritličje in 1. nadstropje | Termočlen Pt100 FPA 686                  |
| Temperatura in relativna vlažnost zraka       | 60 min           | Okolica stavbe             | HOBO U12-011                             |
|                                               | 60 min           | Vrhnika                    | Vremenska postaja Vrhnika <sup>a</sup>   |
| Hitrost in smer vetra                         | 60 min           | Vrhnika                    | Vremenska postaja Vrhnika <sup>a</sup>   |
| Globalno in difuzno sončno sevanje            | 60 min           | Ljubljana–Bežigrad         | Vremenska postaja Ljubljana <sup>a</sup> |
| Atmosferski tlak                              | 60 min           | Ljubljana–Bežigrad         | Vremenska postaja Ljubljana <sup>a</sup> |
| Površinska temperatura radiatorja             | 10 min           | 1. nadstropje              | Termočlen tipa K                         |
| Temperatura vode v hranilniku tople vode      | 30 min           | Klet                       | Potopno temperaturno tipalo PT1000       |
| Število uporabnikov stavbe                    | ~ 30 min         | Celotna stavba             | Ročno beleženje uporabnikov              |
| Delovanje naprav v stavbi                     | ~ 5 min          | Celotna stavba             | Ročno beleženje uporabnikov              |
| Senčenje oken                                 | ~ 5 min          | Pritličje in 1. nadstropje | Ročno beleženje uporabnikov              |
| Odpiranje oken                                | ~ 1 min          | Celotna stavba             | Ročno beleženje uporabnikov              |

<sup>a</sup> Podatki vremenskih postaj so javno dostopni na spletnem arhivu ARSO [26]

### 2.2.3 Opis programskega orodja

V študiji sem za simulacijo toplotnega odziva stavbe uporabljal programsko orodje DesignBuilder (verzija 6.1) [24], z omogočenim spreminjanjem EMS izvirne kode in izvajanjem CFD analiz. DesignBuilder je grafični uporabniški vmesnik, ki deluje na podlagi programske opreme EnergyPlus. EnergyPlus je mednarodno priznано orodje, ki ga načrtovalci stavb in raziskovalci uporabljajo za simulacije toplotnega odziva stavb oz. rabe energije za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, razsvetljavo in ostale procese, kot tudi za porabo vode v stavbah [27, 28].

### 2.2.4 Izhodiščni model stavbe

Na osnovi načrtov in meritev na lokaciji sem v programskem orodju DesignBuilder oblikoval karseda natančen model stavbe z bližnjo okolico. Model stavbe je definiran na podlagi zunanjih mer, prostornina zraka v notranjosti pa je, na podlagi debeline konstrukcijskih sklopov, izračunana samodejno. Z izjemo notranjih nosilnih in predelnih sten, je notranjost izhodiščnega modela prazna. Vsaka soba v modelu predstavlja svojo toplotno cono, le-te so medsebojno povezane z odprtinami in vrati. Simulacijo sem začel en dan pred začetkom umerjevalnih meritev, da sem lahko uskladil simulirani toplotni odziv modela (samo za temperaturo suhega zraka), z dejanskim izmerjenim odzivom stavbe. Po preteku uvodnega dne sem izklopil sistema aktivnega ogrevanja in hlajenja (potrebna za usklajitev temperatur) in pustil model stavbe delovati v popolnem prostem teku do izteka umerjevalnih meritev.

Pri vnosu lastnosti materialov v model sem gostoto, specifično toploto, toplotno prevodnost in difuzijsko upornost upošteval po slovenski Tehnični smernici za graditev TSG-1-004:2021 [29], približne vrednosti emisivnosti materialov pa po spletni bazi Engineering Toolbox [30]. Energijski in materialni tokovi v modelu se računajo v minutnih intervalih, medtem ko se osončenost zunanosti modela računa v 5-dnevnih intervalih. Pretok zraka v modelu, zaradi prezračevanja in infiltracije, se računa na podlagi odpiranja oken, velikosti navideznih infiltracijskih razpok v stavbnem ovoju, ter hitrosti in smeri vetra.

### 2.2.5 Umerjanje modela stavbe

#### 2.2.5.1 Režim delovanja stavbe

V prvem koraku procesa umerjanja modela stavbe, sem v model uvozil vse urnike senčenja in odpiranja oken, prisotnosti uporabnikov, ter delovanja električnih naprav in ostalih toplotnih virov, ki so jih uporabniki in merilci beležili v času umerjevalnih meritev. Urnike sem v .csv datoteke vnesel v naslednjih časovnih intervalih: 30-minutni za hranilnik tople vode v kleti, 15-minutni za prisotnost uporabnikov, 10-minutni za radiatorje, 5-minutni za senčenje oken in delovanje naprav, ter 1-minutni za odpiranje oken. Skupno sem v model stavbe uvozil 19 urnikov odpiranja oken, 12 urnikov aktivacije (8) in naklona (4) senčil, 15 urnikov naprav in luči, 3 urnike hranilnika tople vode in radiatorjev, ter urnik prisotnosti uporabnikov v stavbi. Primer programske kode za uporabo .csv urnikov v EnergyPlus simulacijah je prikazan na sliki 7. Pred uvozom urnikov sem v modelu definiral t.i. »slepe« urnike in jih povezal s pripadajočimi stavbnimi sistemi. Programska koda deluje tako, da v prvem koraku uvozi .csv urnike, ki jih preberejo in shranijo senzorji v modelu. V drugem koraku pa nato aktuator vrednosti »slepih« urnikov zamenja z vrednostmi uvoženih urnikov, pri čemer se povezave urnikov in stavbnih sistemov ohranijo. Za namen kontrole senzor v zadnjem koraku še prebere in izvozi vrednosti novih urnikov. Uvoženi urniki se v modelu ne shranijo, ampak jih je potrebno pri vsaki simulaciji toplotnega odziva stavbe vsakič ponovno uvoziti.



```

EnergyManagementSystem:Sensor,           ! Senzor EMS spremenljivk
  Sen_Imp_Sched,                          ! Ime senzorja
  Imp_Sched,                             ! Ime uvoženega .csv urnika
  Schedule Value;                        ! Tip EMS spremenljivke

EnergyManagementSystem:Actuator,         ! Aktuator EMS spremenljivk
  Act_Sched,                             ! Ime aktuatorja
  Exa_Sched,                             ! Ime »slepega« urnika
  Schedule:Compact,                      ! Tip »slepega« urnika
  Schedule Value;                       ! Tip EMS spremenljivke

Schedule:File,                           ! Uvoz .csv urnikov
  Imp_Sched,                             ! Ime uvoženega .csv urnika
  Any Number,                           ! Oblika vrednosti v .csv urniku
  C:\Program Files\...\Schedules.csv,    ! Direktorij, kjer se .csv urnik nahaja
  3,                                     ! Številka stolpca z urnikom
  1,                                     ! Število vrstic za »preskočiti«
  8760,                                 ! Število ur v letu (8760 ali 8784)
  Comma,                                ! Ločilo stolpcev (Comma, Semicolon, ipd.)
  No,                                   ! Interpolacija vrednosti (Yes ali No)
  15;                                  ! Število minut na vrednost

EnergyManagementSystem:ProgramCallingManager, ! Upravljalca programov
  SchChange,                            ! Ime upravljalca programov
  BeginTimeStepBeforePredictor,         ! Nadzor trenutka delovanja programa
  Exa_Sched;                            ! Ime »slepega« urnika

EnergyManagementSystem:Program,         ! Program za spremembo urnika
  Exa_Sched,                            ! Ime »slepega« urnika
  Set t = Sen_Imp_Sched,                ! Zapis vrednosti iz .csv urnika v »slepi«
  Set Act_Sched = t;                   urnik

Output:Variable,                        ! Izvoz EMS spremenljivk
  Exa_Sched,                            ! Ime spremenjenega urnika
  Schedule Value,                      ! Tip EMS spremenljivke
  Timestep;                            ! Frekvenca javljanja vrednosti urnika
                                       (Timestep, Hourly, Daily, RunPeriod, ipd.)

```

**Slika 7:** EMS programska koda za uporabo .csv urnikov v EnergyPlus simulacijah toplotnega odziva stavb (na sliki levo), z razlago posameznih elementov kode (na sliki desno). Deli kode, ki se po potrebi lahko spreminjajo so označeni z rdečo

**Figure 7:** EMS program code for employing .csv schedules in EnergyPlus building thermal response simulations (pictured left), with an explanation of individual code elements (pictured right). The parts of the code that can be modified if necessary are marked in red

### 2.2.5.1.1 Prezračevanje in senčenje stavbe

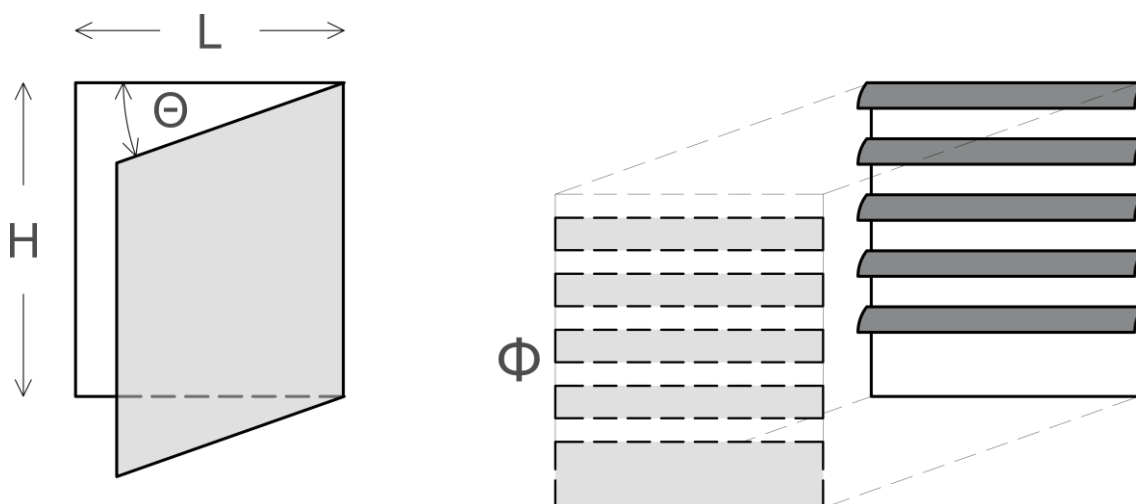
V času umerjevalnih meritev so uporabniki stavbe beležili odpiranje in zapiranje oken, z običajno natančnostjo  $\pm 30$  sekund. V sklopu teh meritev so beležili tudi približen kot med okenskim krilom in ravnino zunanje stene. Poleg meritev prezračevanja so uporabniki beležili tudi čas uporabe zunanjih žaluzij, z običajno natančnostjo  $\pm 150$  sekund, ter približen delež vidnega horizonta skozi žaluzije  $\Phi$ . V EnergyPlus simulacijah je pretok zraka skozi okenske odprtine izračunan na podlagi njihove »efektivne površine« in tlačne razlike na območju odprtine [31]. »Efektivna površina« oken je zmnožek njihove »proste površine«  $A_f$  in koeficienta pretoka  $C_d$  [32]. Vsa okna v obravnavani stavbi se odpirajo okoli spodnje ali stranske osi; za takšen tip oken je  $A_f$  približno enak vsoti površin treh navideznih ploskev med obodom okenskega krila in notranjim robom okvirja, dokler je le-ta manjša od površine odprtine popolnoma odprtega okna [33, 34].  $C_d$  je brezdimenzijski koeficient s katerim je v izračunih pretoka zraka zajeto zoženje tokovnic zraka pri prehodu skozi okensko odprtino [32]. V simulacijah sem upošteval privzeto vrednost  $C_d$  za okna, ki je 0,65. Prosta površina za okna, ki se odpirajo okoli ene osi je definirana v enačbi (6), kjer so  $L$  dolžina notranjega robu okenskega okvirja pravokotnega na os odpiranja,  $H$  dolžina notranjega robu okenskega okvirja vzporednega osi odpiranja, ter  $\theta$  kot med ravnino zunanje stene in okenskim krilom [33, 34].

$$A_f = \min \begin{cases} L \cdot H \\ L^2 \cdot \sin \theta + L \cdot H \cdot \sqrt{2 \cdot (1 - \cos \theta)} \end{cases} \quad (6)$$

Velika pomanjkljivost pri modeliranju zračenja z odpiranjem oken v EnergyPlus okolju je v tem, da med simulacijo ni mogoče prilagajati proste površine oken. Odpiranje oken v simulacijah deluje po ON/OFF principu; okna so tako v določenem času lahko ali zaprta ali pa popolnoma odprta. Težava pri tem je, da so bila nekatera okna med umerjevalnimi meritvami določen čas povsem odprta, spet drugič pa so bila odprta samo delno, dodatno so bile pri nekaterih oknih med zračenjem spuščene zunanje žaluzije. Prosta površina takšnih oken se je med meritvami tako večkrat spremenila. Težavo sem zaobšel tako, da sem v takšnih primerih izračunal ekvivalentne intervale zračenja. Okna v modelu stavbe so bila tako vseeno popolnoma odprta, vendar pa so bili, za toliko kolikor se je zmanjšala prosta površina oken, skrajšani tudi intervali zračenja. Ekvivalentne intervale sem razdelil na več nekaj-minutnih podintervalov, le-te pa sem enakomerno razporedil skozi dejanske intervale zračenja. Ekvivalentni interval zračenja, za določeno okno, je definiran v enačbi (7), kjer so  $A_{f,i}$  i-ta prosta površina okna,  $\Phi_i$  i-ti delež vidnega horizonta skozi okno pri spuščeni zunanjih žaluzijah,  $A_{f,max}$  največja prosta površina okna skozi celoten čas umerjevalnih meritev in  $t_{int}$  interval dejanskega zračenja. Vsi parametri potrebni za modeliranje zračenja pri delno odprtih oknih, ter oknih s spuščeni zunanjimi žaluzijami, so prikazani na Sliki 8.

$$t'_{int} = \frac{A_{f,i} \cdot \Phi_i}{A_{f,max}} \cdot t_{int} \quad (7)$$

Uporabniki stavbe kratkotrajnega odpiranja vhodnih vrat pri prehajanju v in izven stavbe niso beležili, so pa beležili intervale, ko so bila le-ta odprta dolgotrajno (minimalno 1 minuto). Vhodna vrata v kleti in pritličju sem v modelu definirala kot okna z ekvivalentnimi lastnostmi, saj je med simulacijo možno odpiranje samo notranjih vrat. Za notranja vrata sem v modelu upošteval, da so skozi celoten čas simulacije polovično odprta.



**Slika 8:** Parametri za izračun ekvivalentnega intervala zračenja za delno odprto okno (na sliki levo) in okno s spuščnimi žaluzijami (na sliki desno)

**Figure 8:** Parameters for calculating the equivalent ventilation interval for a partially open window (pictured left) and for a window with lowered Venetian blinds (pictured right)

Senčenje oken se v modelu zajel z uporabo naslednjih tipov urnikov:

- urnik aktivacije senčil: ON/OFF urnik, ki deluje po enakem principu kot urnik odpiranja oken, in sicer, ko je vrednost urnika enaka nič so žaluzije dvignjene oz. popolnoma spuščene, ko je vrednost urnika večja od nič, ter
- urnik rotacije žaluzij: večtočkovni urnik, s katerim je mogoče natančno prilagajati naklon lopatic žaluzij. Vrednosti urnika so zapisane v obliki kota med horizontalno ravnino in normalo lopatic, ki je usmerjena stran od okna. Na podlagi deleža vidnega horizonta skozi okno  $\Phi$  sem naklon lopatic  $\alpha$  izračunal po enačbi (8).

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin(1 - \Phi) \quad (8)$$

#### 2.2.5.1.2 Notranji toplotni viri v stavbi

V času umerjevalnih meritev so uporabniki stavbe svojo prisotnost beležili z običajno natančnostjo  $\pm 15$  minut, hkrati pa so beležili tudi uporabo določenih električnih naprav, in sicer z običajno natančnostjo  $\pm 150$  sekund. V slednje meritve so bile vključene naslednje naprave: indukcijska kuhalna plošča, pečica, pomivalna stroja, hladilnika, pralni stroj, namizni računalniki, prenosni računalniki, TV, ter večje luči. Poleg časa so v primeru kuhalne plošče in pečice uporabniki beležili tudi intenzivnost delovanja, in sicer v obliki izbranega programa (jakosti) po posameznih kuhalnih poljih v primeru kuhalne plošče oz. v obliki izbrane temperature v primeru pečice. Za izračun toka odvečne toplote električnih naprav  $P_{dev}$ , sem definiral enačbo (9), kjer so  $P_{max}$  največja obratovalna električna moč naprave,  $\eta_{heat}$  brezdimenzijski količnik deleža oddane toplote po času, ter  $F_R$  in  $F_C$  deleža radiacijsko in konvekcijsko oddane toplote.

$$P_{dev}(t) = P_{max} \cdot \eta_{heat}(t) \cdot (F_R + F_C) \quad (9)$$

V količniku  $\eta_{\text{heat}}$  so zajeti vplivi intenzitete uporabe in ciklov delovanja naprav, ter odvajanja toplote skozi stavbni ovoj pri določenih tipih naprav (kuhalna plošča in napa, pralni in pomivalni stroj, ipd.), na končno količino odvečne toplote naprav, ki med in po njihovem delovanju ostane v stavbi. Podatke za izračun količnikov  $\eta_{\text{heat}}$  sem pridobil iz del Issija in Kaplana [35], Suszanowicza [36], ter iz priročnika ASHRAE Fundamentals 2009 [37]. Iz slednjega sem črpal tudi vrednosti deležev radiacijsko in konvekcijsko oddane toplote naprav  $F_R$  in  $F_C$ .

Poleg električnih naprav sem v modelu stavbe upošteval tudi radiatorje, ki so v zgornjih dveh nadstropjih delovali v začetku umerjevalnih meritev. Pred začetkom umerjevalnih meritev sem na enem izmed radiatorjev izvedel dodatne meritve, na podlagi rezultatov katerih sem lahko izračunal približne vrednosti toplotnega toka iz vseh radiatorjev v stavbi, v času umerjevalnih meritev, v odvisnosti od razlike med njihovo površinsko temperaturo in temperaturo suhega zraka v toplotni coni, znotraj katere se le-ti nahajajo. Celoten postopek izračuna približne oddane toplote radiatorjev je razdeljen v naslednje 4 korake, ki so shematsko prikazani na sliki 9:

- 1) Predhodne podrobne temperaturne meritve celote radiatorja in njegove bližnje okolice. V meritvah, ki so v 5-minutnih intervalih potekale 10 dni, so bili vključeni trije merilci površinske temperature stene radiatorja, merilca površinske temperature dovoda tople vode in odvoda hladne vode v oz. iz radiatorja, ter merilca temperature suhega zraka na višini radiatorja in v sredini cone, znotraj katere se le-ta nahaja.
- 2) Izračun moči radiatorja v različnih pogojih tekom predhodnih meritev. Zaradi visoke toplotne prevodnosti in majhne debeline stene radiatorja, sem v izračunih predpostavil, da je temperatura vroče vode v radiatorju po času  $T_{w,hot}(t)$ , enaka izmerjenim vrednostim površinske temperature stene radiatorja  $T_{sur,r}(t)$ . Naslednja predpostavka, ki sem jo naredil v izračunih je ta, da je razlika med temperaturo vroče vode  $T_{w,hot}(t)$  in hladne vode  $T_{w,cold}(t)$  v radiatorju po času, enaka razliki med izmerjenimi vrednostmi površinske temperature dovoda vroče vode  $T_{sur,hot}(t)$  in odvoda hladne vode  $T_{sur,cold}(t)$  v oz. iz radiatorja. Obe predpostavki sta definirani v enačbah (10) in (11). Na osnovi testov, ki jih je izvedel proizvajalec radiatorjev, sem iz vrednosti vroče in hladne vode v radiatorju, ter temperature suhega zraka v okolici le-tega, lahko določil toplotni tok oz. moč radiatorja v kateremkoli trenutku predhodnih meritev.
- 3) Izračun funkcije moči radiatorjev. Vrednosti moči radiatorja v različnih trenutkih predhodnih meritev sem primerjal z razliko med izmerjenimi vrednostmi površinske temperature stene radiatorja in temperature suhega zraka v coni le-tega  $T_{ai,z}$ , tako da sem dobil funkcijo moči radiatorja v odvisnosti od spremenljivk, ki sem jih meril kasneje v sklopu umerjevalnih meritev. Ob upoštevanju dejstva, da so vsi radiatorji v stavbi vezani vzporedno, zaradi česar so temperaturne razlike med njimi zanemarljive, sem lahko na osnovi podatkov iz testov proizvajalca določil funkcije moči še za vse ostale modele radiatorjev v stavbi.
- 4) Glavne umerjevalne meritve celotne stavbe in dela enega izmed radiatorjev. V meritvah, ki so v 10-minutnih intervalih potekale 94,5 dni, so bili med drugim vključeni merilci temperature suhega zraka v središču vsakega nadstropja stavbe, in merilec površinske temperature stene radiatorja v zgornjem nadstropju. Z uporabo funkcij moči radiatorjev, sem lahko izmerjene vrednosti direktno prevedel v toplotni tok iz vsakega radiatorja v stavbi.

$$T_{w,hot}(t) \approx T_{sur,r}(t) \quad (10)$$

$$T_{w,cold}(t) \approx T_{w,hot}(t) - (T_{sur,hot}(t) - T_{sur,cold}(t)) \quad (11)$$

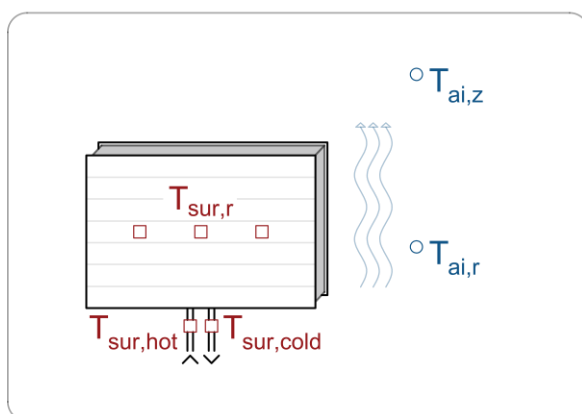
Ob radiatorjih je v stavbi prisoten še en nezanemarljiv vir toplote, to je hranilnik tople vode v kleti. Voda, ki je ogrevana izven toplotnega ovoja stavbe, je nato shranjena v hranilniku kapacitete 2000 litrov, pri čemer vsa toplota, ki je izgubljena skozi toplotni ovoj hranilnika, prispeva k energijski bilanci stavbe. Temperaturo vode v hranilniku  $T_{w,tank}$  sem v času umerjevalnih meritev, v 30-minutnih intervalih, meril

s potopnim merilcem temperature. Znotraj vsakega intervala sem, zaradi počasnih temperaturnih sprememb v notranjosti in okolici hranilnika, predpostavil stacionarne razmere prehoda toplote. Toplotni tok iz hranilnika  $P_{\text{tank}}(t)$  sem tako lahko izračunal s formulo za toplotni tok iz cilindra, pri konstantnih temperaturnih pogojih, definirano v enačbi (12), kjer so  $T_{w,\text{tank}}(t)$  temperatura vode znotraj hranilnika,  $T_{\text{ai},z}(t)$  temperatura suhega zraka v coni znotraj katere se le-ta nahaja,  $r_2$  in  $r_1$  zunanji oz. notranji premer hranilnika,  $h$  njegova višina,  $\lambda$  toplotna prevodnost ovoja hranilnika in  $\alpha$  prestopni koeficient toplote. V izračunu sem prehod toplote skozi vrh hranilnika zanemarl, saj je bistveno bolj izoliran od ostalih delov hranilnika.

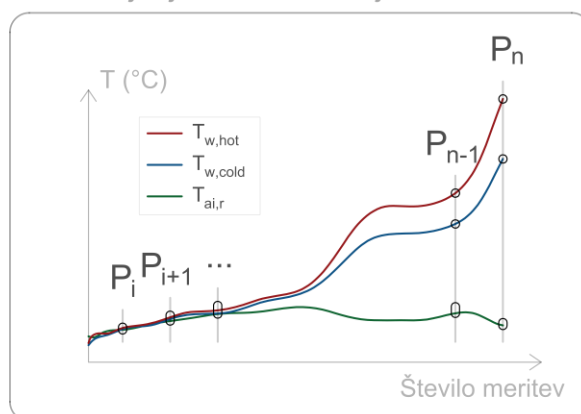
$$P_{\text{tank}}(t) = (T_{w,\text{tank}}(t) - T_{\text{ai},z}(t)) \cdot \left( \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \cdot \lambda \cdot h} + \frac{1}{2\pi \cdot \alpha \cdot r_2 \cdot h} \right)^{-1} \quad (12)$$

V modelu stavbe sem vse antropogene vire toplote definiral v obliki največjega toplotnega toka, ki so ga le-ti zmnožni oddajati, nato pa sem z večtočkovnimi urniki (vrednosti od 0 do 1) te vrednosti uravnaval na dejanske vrednosti, izmerjene v času umerjevalnih meritev.

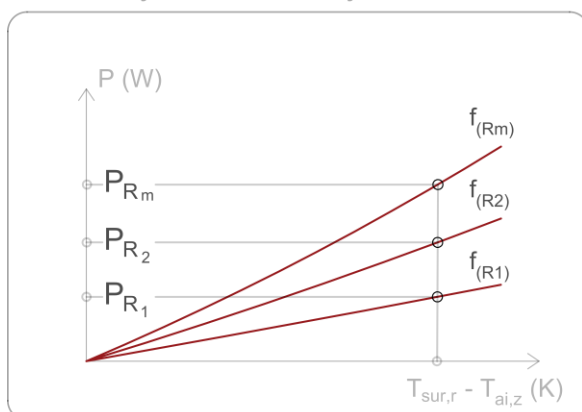
### I. Predhodne meritve



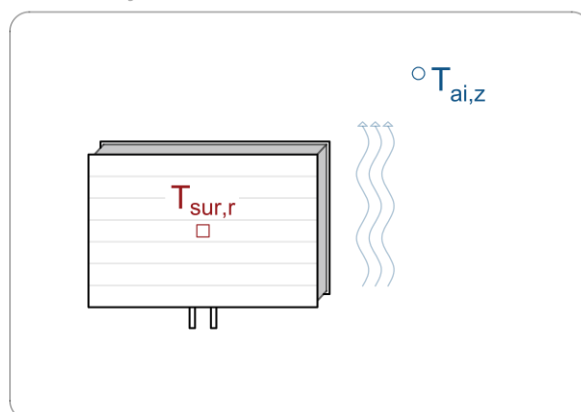
### II. Umerjanje moči radiatorja



### III. Funkcije moči radiatorjev



### IV. Umerjevalne meritve



**Slika 9:** Postopek izračuna približne oddane toplote radiatorjev, v odvisnosti od njihove površinske temperature in temperature suhega zraka v coni

**Figure 9:** Procedure for calculating approximate emitted heat of radiators, in dependence of their surface temperature and zone dry bulb temperature

### 2.2.5.2 Koeficienti pritiska vetra

Ko veter naleti na površino stavbe, se na tej površini ustvari pozitiven pritisk, ki žene zunanji zrak v notranjost stavbe [38]. Določen delež energije vetra je pri tem izgubljen, v odvisnosti od smeri vetra, oblike površine in izpostavljenosti fasade [12]. Vpliv teh dejavnikov je zajet v koeficientu pritiska vetra (v nadaljevanju KPV), ki predstavlja razmerje med največjim možnim pritiskom vetra pri določeni hitrosti in dejanskim pritiskom v izbrani točki [39]. Programsko orodje DesignBuilder upošteva tipične vrednosti KPV, določene v laboratorijskih preizkusih [40], za izračun dejanskih pritiskov na stavbni ovoj, v odvisnosti od smeri in hitrosti vetra [31]. Dodatna funkcija, ki je vgrajena v programsko orodje DesignBuilder, je CFD (računalniška dinamika fluidov) simulacija modela stavbe, ki omogoča hiter in dokaj natančen [38] izračun pritiskov vetra na stavbnem ovoju. Naslednji korak v procesu umerjanja modela stavbe je povezan z nastavitvijo koeficientov pritiska vetra vseh transparentnih delov stavbnega ovoja, za zmanjšanje negotovosti modela stavbe z vidika prezračevanja in infiltracije. Celoten postopek izračuna približnih vrednosti KPV transparentnih površin je razdeljen v naslednje 4 korake ki so shematsko prikazani na sliki 10:

- 1) CFD simulacije modela stavbe z bližnjo okolico. Simulacije sem izvedel v skupno štirih smereh, pravokotnih na ravnine fasad stavbe. Vsi parametri simulacij so podani v preglednici 5.
- 2) Izračun funkcij pritiska vetra vseh transparentnih površin stavbnega ovoja, za vse štiri karakteristične smeri vetrov. Smeri vetrov so določene relativno glede na zunanje lice transparentne površine, kot je prikazano na sliki 10.
- 3) Izračun povprečnih koeficientov pritiska vetra v štirih karakterističnih smereh vetrov. Formulo za izračun KPV v eni točki [39], sem prevedel v obliko za izračun povprečne vrednosti KPV po določeni površini  $\bar{c}_{p,\chi}$ , ki je definirana v enačbi (13), kjer so  $S$  območje transparentne površine,  $p_{\chi}(S)$  funkcija pritiska vetra po površini za določeno smer vetra  $\chi$ ,  $\rho$  gostota zraka v simulaciji in  $U_{\max}$  največja hitrost vetra v simulaciji.
- 4) Izračun koeficientov pritiska vetra za vse smeri neba. V modelu stavbe so KPV definirani v  $45^\circ$  presledkih oz. 8 smereh neba. Za izračun vrednosti KPV v preostalih smereh neba, sem upošteval empirično določeno formulo [12], ki je definirana v enačbi (14), in ki interpolira med povprečnimi vrednostmi karakterističnih KPV:  $\bar{c}_{p,0^\circ}$ ,  $\bar{c}_{p,90^\circ}$ ,  $\bar{c}_{p,180^\circ}$  in  $\bar{c}_{p,270^\circ}$ .

$$\bar{c}_{p,\chi} = \frac{\int^S p_{\chi}(S) \cdot (0.5 \cdot \rho \cdot U_{\max}^2)^{-1} dS}{\int^S dS} \quad (13)$$

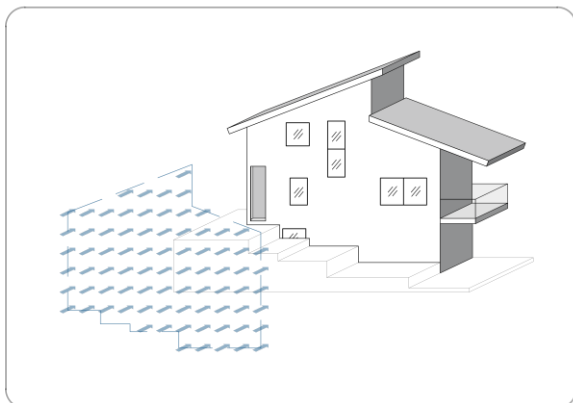
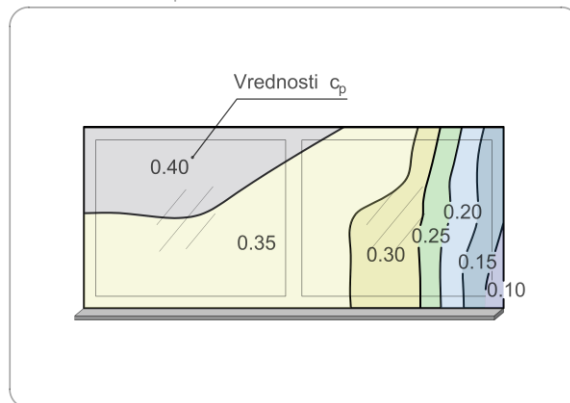
$$c_p(\chi) = \frac{1}{2} \cdot \{ (\bar{c}_{p,0^\circ} + \bar{c}_{p,180^\circ}) \cdot (\cos^2 \chi)^{0.25} + (\bar{c}_{p,0^\circ} - \bar{c}_{p,180^\circ}) \cdot (\cos \chi)^{0.75} + (\bar{c}_{p,90^\circ} + \bar{c}_{p,270^\circ}) \cdot (\sin^2 \chi)^2 + (\bar{c}_{p,90^\circ} - \bar{c}_{p,270^\circ}) \cdot (\sin \chi) \} \quad (14)$$

**Preglednica 5:** Parametri CFD simulacije modela stavbe

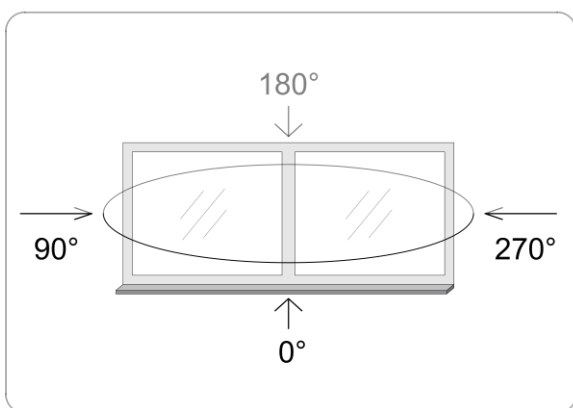
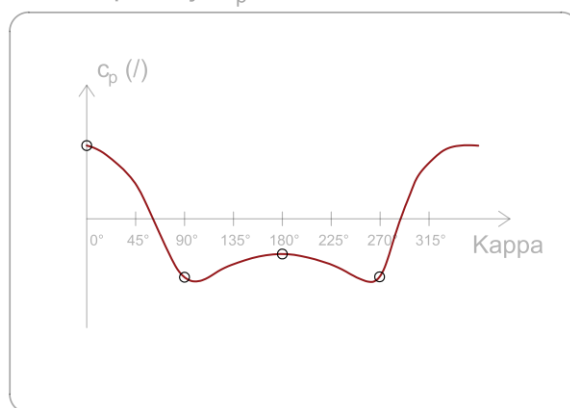
**Table 5:** Parameters for CFD building model simulation

| Parametri računskega okolja |                                 | Parametri računske mreže |              |
|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|
| Hitrost vetra               | 5 m/s                           | Privzeta velikost mreže  | 1,0 m        |
| Temperatura / gostota zraka | 20 °C / 1,204 kg/m <sup>3</sup> | Minimalna velikost mreže | 0,1 m        |
| Računski model turbulence   | K-e                             | Vrsta mreže              | Neenakomerna |

## I. CFD analiza

II. Izračun  $c_p$  oken

## III. CFD analiza

IV. Interpolacija  $c_p$ 

**Slika 10:** Postopek izračuna povprečnih vrednosti koeficientov pritiska vetra na stavbne transparentne površine

**Figure 10:** Procedure for calculating average wind pressure values of building transparent surfaces

### 2.2.5.3 Gradient temperature zraka v stavbi

Še en pomemben korak v procesu umerjanja modela stavbe predstavlja izračun vertikalnega gradienta temperature suhega zraka v stavbi. V izračunih sem upošteval dejanski gradient temperature, izračunan na podlagi meritev senzorjev v umerjevalnem obdobju, ki sem ga nato v modelu stavbe upošteval v odvisnosti od temperature zunanjega suhega zraka. Poenostavljeni model gradienta temperature  $g(T_{out})$  je definiran v enačbi (15), kjer so  $T_{out}(t)$  temperatura zunanjega suhega zraka po času, ter  $\Delta T_i$  povprečni izmerjeni vertikalni gradient temperature suhega zraka v notranjosti stavbe pri temperaturi zunanjega zraka  $T_i$ . Vrednosti konstant  $T_1$  in  $T_2$  sem določil tako, da sem dosegel najboljše ujemanje med simuliranim in izmerjenim gradientom temperature.

$$g(T_{out}) = \begin{cases} T_{out}(t) \leq T_1 ; & \Delta T_1 \\ T_1 < T_{out}(t) < T_2 ; & \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{T_2 - T_1} \cdot (T_{out}(t) - T_1) + \Delta T_1 \\ T_{out}(t) \geq T_2 ; & \Delta T_2 \end{cases} \quad (15)$$

#### **2.2.5.4 Zrakotesnost stavbnega ovoja**

V skladu s priporočili ASHRAE 14-2014 je potrebno zrakotesnost stavbnega ovoja umeriti potem, ko se določijo vsi ostali bistveni parametri [15]. Zrakotesnost stavbnega ovoja sem v modelu določil s spreminjanjem velikosti navideznih odprtih na stenah, strehi, ter obodih oken in vrat. Programsko orodje EnergyPlus površine odprtih upošteva v kombinaciji s podatki o hitrosti in smeri vetra, da določi pretok zunanjega zraka skozi stavbni ovoj.

#### **2.2.5.5 Opis celotnega procesa umerjanja modela stavbe**

Opisi in zaporedje vseh analiziranih različic dopolnitev modela stavbe v procesu umerjanja, so prikazani na sliki 11. Poleg doslej že opisanih, sem v študiji umeril tudi naslednje stavbne in ostale parametre:

- 1) Toplotna kapaciteta notranjosti stavbe: pohištvo v stavbah vpliva na njihov toplotni odziv, saj v primeru povišanih temperatur notranjega suhega zraka absorbira določen delež toplote, ki jo nato odda, ko se temperature spustijo. Ker je bila notranjost izhodiščnega modela stavbe, z izjemo notranjih nosilnih in predelnih sten, popolnoma prazna, sem v tem koraku zajel toplotni vpliv pohištva z umerjanjem toplotne kapacitete notranjosti stavbe (v osnovi ekvivalentna zraku v notranjosti modela).
- 2) Fizikalne lastnosti konstrukcijskih elementov: v izhodiščnem modelu stavbe sem za fizikalne lastnosti konstrukcijskih materialov, kot so gostota, toplotna prevodnost, solarna absorptivnost, ipd., upošteval tipične vrednosti. V procesu umerjanja modela sem nato te lastnosti natančneje določil, pri čemer sem se osredotočil predvsem na spremembe lastnosti, ki so posledica staranja materialov in povišane količine vlage.
- 3) Meritev temperature suhega zraka na višini dejanskih senzorjev: v tem koraku sem višine senzorjev temperature v modelu uskladjal z dejanskimi.





**Slika 11:** Shematski prikaz celotnega postopka umerjanja modela stavbe

**Figure 11:** Illustration of the building model calibration process

## 2.3 Študija vpliva podnebnih sprememb na toplotno udobje

### 2.3.1 Obseg študije

Merilci temperature suhega zraka za umerjanje modela stavbe, so bili v brunarici nameščeni v obdobju od sredine aprila do konca avgusta 2020. V zgornjem nadstropju so merilci zabeležili najvišjo temperaturo 30.4 °C, kar 56 % merilnega obdobja pa je temperatura na tem mestu presegala 26 °C. Tako visoke temperature so se v stavbi pojavljale kljub temu, da so se notranji prostori pogosto senčili in zračili v nočnem času. Očitno je, da v obravnavani brunarici poletno pregrevanje tako predstavlja velik problem, ki bi se lahko v prihodnosti ob potencialnem poslabšanju podnebnih sprememb še povečal. Cilj študije je tako, kot prvo analizirati potencialen vpliv podnebnih sprememb na toplotno udobje v obravnavani brunarici, ter kot drugo določiti najbolj učinkovite ukrepe za preprečevanje poletnega pregrevanja v prihodnosti. Slednje sem razdelil v naslednji dve skupini:

- prilagoditve na nivoju ovoja in notranjosti stavbe. Vse prilagoditve so pasivne narave in po vgradnji ne potrebujejo dodatne energije za delovanje, ter
- organizacijski ukrepi, ki vključujejo vse ukrepe, ki jih uporabniki brunarice aktivno izvajajo, kot odziv na toplotne razmere v bivalnem okolju.

Vse analizirane prilagoditve stavbe sem analiziral v kombinaciji z vsemi analiziranimi organizacijskimi ukrepi, s čimer sem lahko določil katere kombinacije pozitivno ali pa negativno vlivajo na toplotno udobje. Rezultati te raziskave bi lahko koristili predvsem lastnikom obstoječih brunaric, kot tudi tistim, ki le-te še nameravajo graditi, saj je področje vpliva podnebnih sprememb na toplotni odziv brunaric, v času pisanja te naloge, še popolnoma neraziskano.

### 2.3.2 Projekcije podnebnih sprememb

Dejanskih antropogenih podnebnih sprememb v prihodnosti ni mogoče točno napovedati, saj le-te v veliki meri temeljijo na poteku izpustov toplogrednih plinov po času [41, 42]. V projekcijah podnebnih sprememb se zaradi tega uporabljajo različni možni scenariji globalnega družbenogospodarskega razvoja, ki služijo kot podlaga za ocene izpustov toplogrednih plinov [43]. Ti scenariji se upoštevajo v računskih podnebnih modelih, ki združujejo vrsto fizikalnih, kemičnih in bioloških procesov v Zemljinem sestavu, za napovedi verjetnih posledic podnebnih sprememb v prihodnosti [43].

V študiji sem za simulacije podnebnih sprememb v okolici brunarice uporabil programsko orodje Climate Change World Weather File Generator (CCWorldWeatherGen) [44], ki je osnovano na modelu splošne cirkulacije HadCM3, v kombinaciji s podnebnim scenarijem SRES A2. Izhodni podatki HadCM3 so izraženi kot relativne spremembe v primerjavi z meteorološkimi podatki iz obdobja 1961–1990 [45]. Programsko orodje izkorišča tehniko »preoblikovanja« (angl. »morphing«), ki sta jo razvila Belcher in Hacker [46], da omenjene relativne spremembe podnebja prevede na obstoječo vremensko datoteko izbrane lokacije. Problem pri uporabi CCWorldWeatherGen je v tem, da črpa meteorološke podatke iz baze International weather for energy calculation (IWEC) za obdobje 1982–1999, ki se razlikuje od obdobja HadCM3. Po navedbah Jentsch-a to pomeni, da tako ustvarjene vremenske datoteke dejansko precenjujejo vpliv podnebnih sprememb [47]. Podnebni scenarij A2, ki ga upošteva programsko orodje, je definiran kot [42]: *»[scenarij, ki] opisuje zelo raznolik svet. Osnovni temi sta samostojnost oz. samozadostnost [prebivalstva] in ohranjanje lokalnih identitet. Regionalne strukture plodnosti konvergirajo zelo počasi, rezultat česar je nenehna rast [svetovne] populacije. Ekonomski razvoj je primarno regionalno usmerjen, tehnološke spremembe in gospodarska rast na posameznega prebivalca pa so počasnejše in bolj razdrobljene, ko jih primerjamo z ostalimi scenariji.«* Na kratko to predstavlja prihodnost s strmo naraščajočo populacijo, postopoma naraščajočo ekonomijo, ter počasnim razvojem novih tehnologij. Ves ta razvoj pa spremlja postopno slabšanje naravnega okolja [42]. Podnebne projekcije sem izvedel na osnovi meteoroloških podatkov glavne meteorološke postaje Ljubljana za tri različna časovna obdobja: 2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100; katerih povprečne

vrednosti so združene v enoletnih vremenskih datotekah z oznakami: »2020«, »2050« in »2080«. Za urejanje vremenskih datotek sem uporabil programsko orodje Elements (verzija 1.0.6) [48].

### 2.3.3 Prilagoditev stavbe na podnebne spremembe

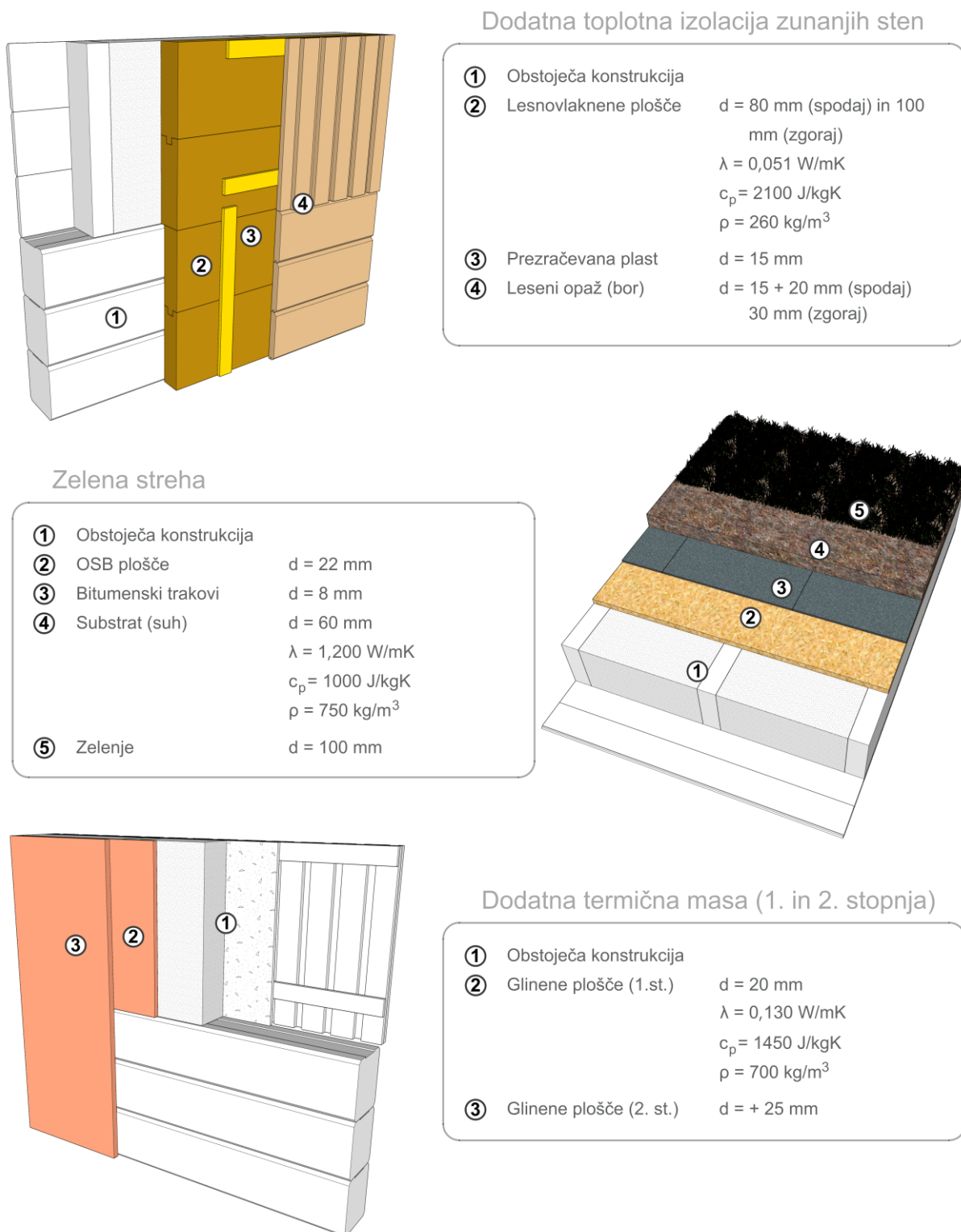
#### 2.2.3.1 Prilagoditve na nivoju stavbe

Kot izhodišče za medsebojno primerjavo izvedenih pasivnih prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, sem definiral primerjalni model stavbe, ki je po fizičnih lastnostih povsem enak umerjenemu. Ta model sem nadgradil na naslednjih šest načinov:

- 1) Vgradnja dodatnih senčil: Vsa okna v zgornjih dveh nadstropjih brunarice imajo vgrajene zunanje žaluzije, z izjemo petih oken v slemenu (skupne površine  $3,84 \text{ m}^2$ ), ki so zaradi južne orientacije izrazito izpostavljena sončnemu sevanju, kar zagotovo nekoliko pripomore k poletnemu pregrevanju. V modelu sem iz tega razloga na ta okna dodal zunanje žaluzije, ki so po lastnostih enake ostalim.
- 2) Dodatna toplotna izolacija zunanjih sten: Ker so bruna v pritličju stavbe toplotno neizolirana, sem v tej varianti preveril kakšen vpliv bi imela dodatna toplotna izolacija na toplotni odziv modela stavbe. Za toplotno izolacijo sem izbral lesnovlaknene plošče, ki imajo poleg nizke toplotne prevodnosti tudi relativno visoko gostoto, s čimer bi se povečala tudi toplotna masa stavbnega ovoja. Debelina plošč bi znašala 80 mm v pritličju oz. 100 mm v zgornjem nadstropju stavbe. Za zaščito lesnovlaknenih plošč, ter tudi kot dodatni ukrep omejevanja pojava pregrevanja, sem v modelu definiral še leseno prezračevano fasado, z debelino zračnega sloja 15 mm.
- 3) Zelena streha: Z vidika prilagoditve strešne konstrukcije stavbe, sem preveril kakšen vpliv bi imela zelena streha na preprečevanje pojava pregrevanja. Po navedbah D'Orazio *et al.* [49] imajo zelene strehe znaten hladilni učinek, ki je posledica združenih učinkov evapotranspiracije, dodatne toplotne mase zaradi substrata in senčenja, ki ga nudi zelenje. Gre za dokaj invaziven poseg v stavbni ovoj, pri katerem bi se strešni sestav popolnoma odstranil do vključno sloja sekundarne kritine. Nova hidroizolacija bi se izvedla v obliki bitumenskih trakov, na katerih bi bila postavljena zelena streha, s substratom debeline 60 mm in vegetacijsko plastjo debeline 100 mm. Odziv zelene strehe sem v modelu simuliral po poenostavljeni računski metodi, pri čemer sem upošteval izhodiščne računske parametre programskega orodja DesignBuilder, ki so podani v preglednici 5. Model zelene strehe vključuje [31]: dolgovalovni in kratkovalnovni prenos toplote znotraj rastlinske odeje, učinek rastlinske odeje na konvekcijski prenos toplote, evapotranspiracijo iz zemljine in zelenja, ter kondukcijski prenos toplote v sloju zemljine (vključno s shranjevanjem toplote).
- 4) Sprememba solarne absorptivnosti strešnikov: Trenutno vgrajeni strešniki so temno sivi in kot taki absorbirajo dobršen del sončnega sevanja. V tej varianti sem preveril kakšen vpliv na toplotni odziv brunarice bi imeli svetlejši strešniki. Obstoječe strešnike, s solarno absorptivnostjo 0,90, sem v modelu zamenjal s svetlejšimi, katerih solarna absorptivnost znaša 0,50. Ostale lastnosti strešnikov so pri tem ostale nespremenjene.
- 5) Dodatna toplotna masa (1.stopnja): V primeru zelene strehe in dodatne toplotne izolacije, sem toplotno maso dodal na zunanjo stran stavbnega ovoja, kar zaradi visoke toplotne izolativnosti le-tega ni idealno. Zaradi tega sem v tej varianti preveril primer prilagoditve stavbe, pri kateri bi se toplotna masa dodala na notranjo stran stavbnega ovoja. Prilagoditev bi se izvedla tako, da bi se notranje lesene obloge strehe, ter predelnih in zunanjih sten v zgornjem nadstropju stavbe, zamenjale z glinenimi ploščami enake debeline (20 mm).
- 6) Dodatna toplotna masa (2.stopnja): Pri tej varianti gre preprosto za nadgradnjo prejšnjega modela, na način, kjer bi se na strehi, ter na zunanjih stenah v pritličju in zgornjem nadstropju stavbe, dodal še en sloj glinenih plošč. Skupna debelina glinenih plošč bi tako znašala 45 mm v

zgornjem nadstropju oz. 25 mm v pritličju stavbe. Debelina glinenih plošč na predelnih stenah bi pri tem ostala nespremenjena.

Detalji prilagoditev stavbe, pri katerih so se na stavbnem ovoju odvzemali in dodajali konstrukcijski elementi, so prikazani na sliki 12.



**Slika 12:** Detalji prilagoditev stavbe z bistvenimi lastnostmi novovgrajenih materialov

**Figure 12:** Details of building adaptations with fundamental properties of newly installed materials

### Preglednica 6: Parametri za simulacijo odziva ekstenzivne zelene strehe v modelu stavbe

**Table 6:** Parameters for simulating extensive green roof response in the building model

| Parametri zelene strehe   |           |                                                |            |
|---------------------------|-----------|------------------------------------------------|------------|
| Metoda izračuna           | Preprosta | Minimalna stomatalna prepustnost za vodno paro | 100.00 s/m |
| Višina vegetacije         | 0.10 m    | Maksimalna vlažnost zemljine                   | 43 %       |
| Indeks listne površine    | 2.70      | Minimalna vlažnost zemljine                    | 5 %        |
| Solarna odbojnost listov  | 0.22      | Začetna vlažnost zemljine                      | 15 %       |
| Solarna emisivnost listov | 0.95      |                                                |            |

### 2.2.3.2 Organizacijski ukrepi

Kot sem predhodno omenil, je primerjalni model stavbe po fizičnih lastnostih povsem enak umerjenemu. Razlikuje se le z vidika režima delovanja stavbe, kjer se senčenje in naravno prezračevanje skozi celotno leto ne izvajata. V zvezi s časovnim razporedom delovanja električnih naprav in prisotnosti uporabnikov, je le-ta enak kot v času umerjevalnih meritev; na osnovi podatkov iz trimesečnega umerjevalnega obdobja sem namreč definiral povprečne dnevne urnike posameznih naprav in uporabnikov, ki se v simulacijah ponavljajo skozi celotno leto. V študiji sem analiziral naslednje tri variante organizacijskih ukrepov:

- 1) Senčenje z uporabo zunanjih žaluzij: V tej varianti se uporabniki odzovejo na toplotno nelagodje tako, da spustijo zunanje žaluzije. Uporabniki žaluzije spustijo samo na mestih, kjer zunanje ovire (nadstrešek, balkon, ostale stavbe) ne zagotavljajo zadostnega senčenja. Sam pogoj za »aktivacijo« zunanjih žaluzij je ta, da je ob 6:00 povprečna temperatura suhega zraka (6-urno povprečje) v zgornjem nadstropju višja od 24 °C. Žaluzije ostanejo spuščene do 18:00.
- 2) Nočno zračenje: Ta varianta je podobna prejšnji, le da se uporabniki na toplotno nelagodje odzovejo z nočnim zračenjem stavbe. Pogoj za aktivacijo nočnega zračenja je ta, da je ob 22:00 povprečna temperatura suhega zraka (6-urno povprečje) v določenem nadstropju višja od 24 °C in od temperature zunanjega zraka. Okna se odpirajo samo v etažah, kjer je ta temperaturni pogoj izpolnjen, in ostanejo odprta do 7:00.
- 3) Kombinacija senčenja in nočnega zračenja: Gre z kombinacijo prejšnjih dveh variant.

Primer programske kode za upravljanje naravnega prezračevanja v EnergyPlus simulacijah, je prikazan na slikah 13 in 14. Koda v osnovi deluje po enakem principu, kot tista za uvoz .csv urnikov, ki je prikazana na sliki 7. Enako kot v tistem primeru sem sprva definiral »slepe urnike« in jih povezal s pripadajočimi okni in zunanjimi žaluzijami, vrednosti le-teh pa so se v simulacijah zamenjale z zelenimi. Ta koda pa se od prve razlikuje po tem, da njeni izhodni podatki niso vnaprej določeni, temveč so pogojeni s temperaturo suhega zraka znotraj in zunaj modela. V primeru nočnega zračenja model deluje tako, da v kolikor je ob 22:00 povprečna temperatura notranjega zraka (6-urno povprečje) višja od 24 °C in je notranji zrak toplejši od zunanjega, se okna v obravnavanem nadstropju odprejo in ostanejo odprta do 7:00. Za ta izračun sem v kodi definiral senzorje temperature suhega zraka v stavbni okolici, ter v vsakem nadstropju (povprečje volumna nadstropja). Postopek izračuna slednjega je opisan v Poglavju 2.3.4. Pretekle vrednosti senzorjev v stavbi beleži pomnilni element *TrendVariable*. V obravnavanem modelu, ki opravi 12 izračunov v simulacijski uri, mora pomnilni element pred začetkom računskega koraka zabeležiti 72 preteklih vrednosti senzorja za izračun 6-urnega povprečja. V kolikor so vsi pogoji za nočno zračenje izpolnjeni, program s pomočjo aktuatorja zbriše in nastavi nove vrednosti urnikov zračenja. V primeru senčenja koda deluje po enakem principu, le da ne upošteva razmer v okolici stavbe.

```

<ForAllWindows>                                     ! Senzor odpiranja oken v stavbi
EnergyManagementSystem:Sensor,
  Win_Vent_<LoopWindowIDFName>,                      ! Ime senzorja določenega okna
  <LoopWindowIDFName>,                               ! IDF ime določenega okna
  AFN Surface Venting Window or Door Opening         ! Tip EMS spremenljivke
  Factor;

Output:Variable,                                     ! Izvoz izmerjenih vrednosti senzorja
  <LoopWindowIDFName>,                               ! IDF ime določenega okna
  AFN Surface Venting Window or Door Opening         ! Tip EMS spremenljivke
  Factor,
  Timestep;                                           ! Frekvenca javljanja vrednosti urnika
<LoopNextWindow>                                     (Timestep, Hourly, Daily, RunPeriod, ipd.)

<ForAllShadedWindows>                               ! Senzor senčenja oken v stavbi (posamezni
EnergyManagementSystem:Sensor,                      elementi senzorja so enaki, kot v primeru
  Win_Shade_<LoopWindowIDFName>,                     senzorja odpiranja oken)
  <LoopWindowIDFName>,
  Surface Shading Device Is On Time Fraction;

Output:Variable,
  <LoopWindowIDFName>,
  Surface Shading Device Is On Time Fraction,
  Timestep;
<LoopNextWindow>

EnergyManagementSystem:Sensor,                      ! Senzor temperature zunanjega suh. zraka
  AirTemp_Outside,                                   ! Ime senzorja
  Environment,                                       ! Okolje delovanja senzorja
  Site Outdoor Air Drybulb Temperature;             ! Tip EMS spremenljivke

EnergyManagementSystem:Sensor,                      ! Senzor temperature notranjega suh. zraka
  AirTemp_ZoneExa,                                   ! Ime senzorja
  ZoneExa,                                           ! Ime cone znotraj katere se senzor nahaja
  Zone Mean Air Temperature;                       ! Tip EMS spremenljivke

EnergyManagementSystem:TrendVariable,               ! Beleženje vrednosti senzorja temp. not. zraka
  TrVar_Temp,                                       ! Ime programa beleženja vrednosti senzorja
  AirTemp_ZoneExa,                                 ! Ime senzorja temp. notranjega suhega zraka
  72;                                              ! Število shranjenih vrednosti

EnergyManagementSystem:Sensor,                      ! Senzor urnika odpiranja oken v stavbi
  Sen_Sched_Vent,                                   ! Ime senzorja
  Sched_Vent,                                       ! Ime urnika odpiranja oken
  Schedule Value;                                  ! Tip EMS spremenljivke

EnergyManagementSystem:Sensor,                      ! Senzor urnika senčenja oken v stavbi (posamezni
  Sen_Sched_Shade,                                  elementi senzorja so enaki, kot v primeru
  Sched_Shade,                                       senzorja urnika odpiranja oken)
  Schedule Value;

```

**Slika 13:** Prvi del EMS programske kode za upravljanje naravnega prezračevanja in senčenja modela stavbe, na podlagi povprečnih temperatur notranjega in zunanjega suhega zraka v določenem časovnem intervalu (na sliki levo), z razlago posameznih elementov kode (na sliki desno). Deli kode, ki se po potrebi lahko spreminjajo so označeni z rdečo

**Figure 13:** The first part of the EMS program code for managing natural ventilation and shading in a building model, based on average indoor and outdoor dry-bulb temperature for a specific time interval (pictured left), with an explanation of individual code elements (pictured right). The parts of the code that can be modified if necessary are marked in red

```

EnergyManagementSystem:ProgramCallingManager,      ! Upravljalec programov delovanja oken
  Win_Management,                                  ! Ime upravljalca programov
  BeginTimestepBeforePredictor,                    ! Nadzor trenutka delovanja programov
  Sched_Vent,                                       ! Imena programov
  Sched_Shade;

EnergyManagementSystem:Actuator,                   ! Aktuator za spreminjanje urnika odpiranja oken
  Act_Vent,                                         ! Ime aktuatorja
  Sched_Vent,                                       ! Ime urnika odpiranja oken
  Schedule:Compact,                                ! Tip urnika odpiranja oken
  Schedule Value;                                  ! Tip EMS spremenljivke

EnergyManagementSystem:Actuator,                   ! Aktuator za spreminjanje urnika senčenja oken
  Act_Shade,                                       (posamezni elementi aktuatorja so enaki, kot v
  Sched_Shade,                                     primeru aktuatorja za spreminjanje urnika
  Schedule:Compact,                                odpiranja oken)
  Schedule Value;

EnergyManagementSystem:Program,                    ! Program za spreminjanje urnika odpiranja oken
  Sched_Vent,                                       ! Ime urnika odpiranja oken
  Set T_day = @TrendAverage TrVar_Temp 6,          ! Definirane spremenljivke v programu
  Set Tin = AirTemp_ZoneExa,
  Set Tout = AirTemp_Outside,
  Set dT = Tin - Tout,
  Set f = 0,
  If (Hour > 6) && (Hour < 22),                      ! Okna so zaprta v času od 7ih do 22ih
    Set Act_Vent = 0,
  Endif,
  If (Hour == 22) && (T_day > 24) && (dT > 0),        ! V kolikor je ob 22ih povprečna temperatura not.
    Set Act_Vent = 1,                               zraka v obdobju preteklih 6 ur višja od 24 °C in
    Set f = 1,                                       je zrak v coni toplejši od zunanjega zraka, se
  Endif,                                           okna v coni odprejo
  If f == 1,                                       ! Okna ostanejo odprta do 7ih
    Set Act_Vent = 1,
  Endif;

EnergyManagementSystem:Program,                    ! Program za spreminjanje urnika senčenja oken
  Sched_Shade,                                       ! Ime urnika senčenja oken
  Set T_night = @TrendAverage TrVar_Temp 6,        ! Definirane spremenljivke v programu
  Set f = 0,
  If (Hour < 6) || (Hour > 18),                      ! Senčila so lahko spuščena samo v času od 6ih
    Set Act_Shade = 0,                               do 18 ih
  Endif,
  If (Hour == 6) && (T_night > 24),                  ! V kolikor je ob 6ih povprečna temperatura not.
    Set Act_Shade = 1,                               zraka v obdobju preteklih 6 ur višja od 24 °C se
    Set f = 1,                                       senčila spustijo
  Endif,
  If f == 1,                                       ! Senčila ostanejo spuščena do 18ih
    Set Act_Shade = 1,
  Endif;

```

**Slika 14:** Drugi del EMS programske kode za upravljanje naravnega prezračevanja in senčenja modela stavbe, na podlagi povprečnih temperatur notranjega in zunanjega suhega zraka v določenem časovnem intervalu (na sliki levo), z razlago posameznih elementov kode (na sliki desno). Deli kode, ki se po potrebi lahko spreminjajo so označeni z rdečo

**Figure 14:** The second part of the EMS program code for managing natural ventilation and shading in a building model, based on average indoor and outdoor dry-bulb temperature for a specific time interval (pictured left), with an explanation of individual code elements (pictured right). The parts of the code that can be modified if necessary are marked in red

### 2.3.4 Vrednotenje prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov

Ker je model stavbe v poletnem času v prostem teku in ker so vsi analizirani ukrepi pasivni, sem v študiji kot indikator uspešnosti prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov pri omejevanju pojava pregrevanja upošteval toplotno udobje uporabnikov stavbe. Za stavbe, ki so izključno naravno prezračevane predstavljajo modeli adaptivnega toplotnega udobja najboljši približek realnega stanja [4], in sicer sem v študiji upošteval model po standardu prEN 16798-1:2019 [50]. V standardu je optimalna operativna temperatura  $T_c$  podana v odvisnosti od tekočega povprečja temperature zunanjega suhega zraka  $T_{rm}$ . Definiciji  $T_{rm}$  in  $T_c$  sta podani v enačbah (16) in (17), kjer sta  $\alpha$  brezdimenzijska konstanta med 0 in 1 (priporoča se 0,8 [51]) in  $T_{out(d-n)}$  povprečna temperatura suhega zraka za  $n$ -ti dan pred obravnavanim dnem [52]. Model adaptivnega toplotnega udobja se lahko upošteva le v primeru, ko se vrednost  $T_{rm}$  nahaja znotraj območja od 10 do 30 °C, saj je v nasprotnem primeru toplotno udobje možno zagotoviti le še z uporabo aktivnih sistemov ogrevanja ali hlajenja.

$$T_{rm} = (1 - \alpha) \cdot [T_{out(d-1)} + \alpha \cdot T_{out(d-2)} + \alpha^2 \cdot T_{out(d-3)} + \alpha^3 \cdot T_{out(d-4)} + \alpha^4 \cdot T_{out(d-5)} + \alpha^5 \cdot T_{out(d-6)} + \alpha^6 \cdot T_{out(d-7)}] \quad (16)$$

$$T_c = \begin{cases} T_{rm} < 10^\circ C & \text{Model ne pride v poštev} \\ 10^\circ C \leq T_{rm} \leq 30^\circ C & T_c = 0.33 \cdot T_{rm} + 18.8 \\ T_{rm} > 30^\circ C & \text{Model ne pride v poštev} \end{cases} \quad (17)$$

Na podlagi izračunane optimalne operativne temperature, omogoča model izračun toplotnega udobja v treh nivojih sprejemljivosti oz. kategorijah udobja. Le-te so definirane v enačbi (18), kjer je  $T_{op}$  izmerjena operativna temperatura v stavbi [52]. Upošteva se, da je toplotno udobje doseženo takrat, ko se vrednost  $T_{op}$  nahaja znotraj podanega temperaturnega razpona. V študiji sem za primerjavo prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov upošteval le najstrožjo kategorijo udobja, tj. kategorijo I.

$$T_{op} = \begin{cases} T_c \pm 2^\circ C & \text{Kategorija I (90 \% sprejemljivost)} \\ T_c \pm 3^\circ C & \text{Kategorija II (80 \% sprejemljivost)} \\ T_c \pm 4^\circ C & \text{Kategorija III (65 \% sprejemljivost)} \end{cases} \quad (18)$$

Programsko orodje EnergyPlus ne omogoča neposredne meritve operativne temperature, zaradi česar sem le-to v študiji izračunal na podlagi temperature suhega zraka in srednje sevalne temperature. Ker so pričakovane hitrosti gibanja zraka v stavbi nizke, sem v izračunu upošteval, da je operativna temperatura enaka povprečni vrednosti obeh izmerjenih temperatur. Primer programske kode za izračun povprečne temperature suhega zraka, v skupini toplotnih con, je prikazan na sliki 15. Izračun srednje sevalne temperature deluje po povsem enakem principu. Na podlagi velikosti posameznih toplotnih con, sem v izračunih upošteval uteženo povprečje temperature zraka in srednje sevalne temperature. Za izvoz izračunanih vrednosti sta v kodi definirani dve posebni spremenljivki: *GlobalVariable* in *OutputVariable*. Prva v osnovi deluje po enakem principu kot navadna spremenljivka, s to razliko, da sečasne vrednosti le-te lahko hkrati uporabijo v več programih znotraj EMS kode. Druga spremenljivka beleži tečasne vrednosti znotraj vsakega računskega koraka in jih shranjuje za končni izvoz.



```

EnergyManagementSystem:Sensor,
  AirTemp_ZoneExa,
  ZoneExa,
  Zone Mean Air Temperature;

EnergyManagementSystem:Sensor,
  Vol_ZoneExa,
  ZoneExa,
  Zone Air Volume;

EnergyManagementSystem:ProgramCallingManager,
  PrCal_AverageTemp,
  EndOfZoneTimestepBeforeZoneReporting,
  AverageTemp;

EnergyManagementSystem:GlobalVariable,
  AverageTemp_ZoneExa;

EnergyManagementSystem:OutputVariable,
  AverageTemp_Output,
  AverageTemp_ZoneExa,
  Averaged,
  ZoneTimestep,
  ,
  C;

EnergyManagementSystem:Program,
  AverageTemp,
  Set N = AirTemp_ZoneExa * Vol_ZoneExa + ...,
  Set D = Vol_ZoneExa + ...,
  If D > 0,
    Set AverageTemp_ZoneExa = N / D,
  Endif;

Output:Variable,
  *,
  AverageTemp_Output,
  Timestep;

```

! Senzor temperature notranjega suhega zraka  
! Ime senzorja  
! Ime cone znotraj katere se senzor nahaja  
! Tip EMS spremenljivke

! Senzor volumna con v stavbi  
! Ime senzorja  
! Ime cone znotraj katere se senzor nahaja  
! Tip EMS spremenljivke

! Upravljalca programa povp. temp. zraka v etaži  
! Ime upravljalca programa  
! Nadzor trenutka delovanja programa  
! Imena programa

! Spremenljivka povprečne temp. zraka v etaži  
! Ime globalne spremenljivke

! Spremenljivka za izvoz izračunanih vrednosti  
! Ime spremenljivke  
! Ime globalne spremenljivke  
! Tip vrednosti v spremenljivki  
! Interval posodabljanja spremenljivke

! Enota spremenljivke

! Program povprečne temp. suhega zraka v etaži  
! Ime programa  
! Definirane spremenljivke v programu

! Povprečna temperatura zraka v etaži je izračunana na podlagi velikosti posameznih con znotraj etaže

! Izvoz povprečnih vrednosti temperature suhega zraka v etaži  
! Ime spremenljivke  
! Frekvenca javljanja vrednosti urnika (Timestep, Hourly, Daily, RunPeriod, ipd.)

**Slika 15:** EMS programska koda za izračun povprečnih temperatur suhega zraka znotraj posameznih toplotnih con računskega model stavbe (na sliki levo), z razlago posameznih elementov kode (na sliki desno). Deli kode, ki se po potrebi lahko spreminjajo so označeni z rdečo

**Figure 15:** EMS program code for calculating average dry-bulb temperatures inside individual building model thermal zones (pictured left), with an explanation of individual code elements (pictured right). The parts of the code that can be modified if necessary are marked in red

### 3 REZULTATI

Ta poglavje je vsebinsko razdeljeno na dva dela, in sicer so v prvem delu, v poglavju 3.1, predstavljeni rezultati umerjanja modela stavbe, ki jim v drugem delu, v poglavju 3.2, sledijo še rezultati analiz vpliva podnebnih sprememb na pojav pregrevanja v obravnavani stavbi.

#### 3.1 Umerjanje računskega modela

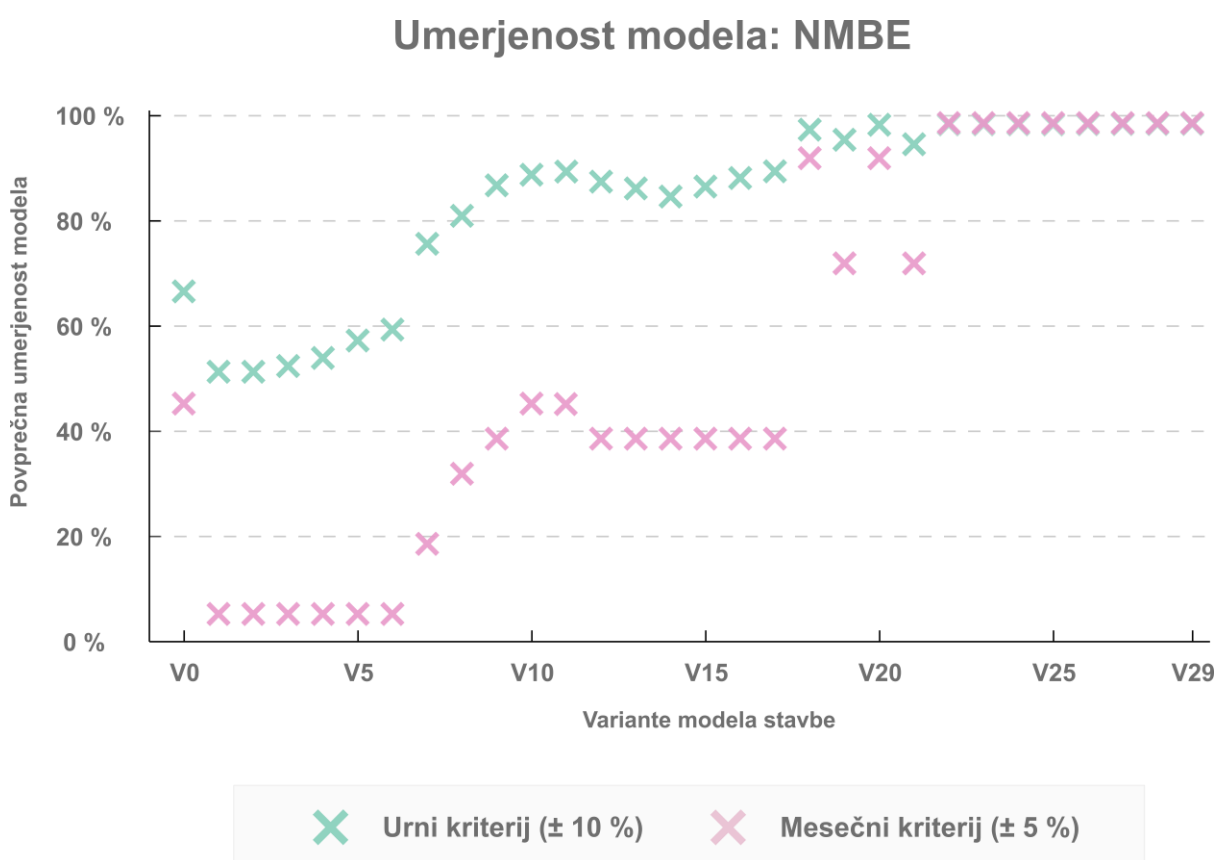
V študiji sem analiziral skupno 29 dopolnitev izhodiščnega računskega modela stavbe, da sem dosegel sprejemljiv nivo negotovosti modela, z vidika temperature suhega zraka, po kriterijih in priporočilih smernice ASHRAE 14-2014 [15]. Z vidika površinske temperature sten pa ti kriteriji niso bili docela izpolnjeni, in sicer je bilo odstopanje simuliranih vrednosti preveliko predvsem na steni v zgornjem nadstropju, kjer je umerjenost modela znašala 99,29 % za kazalnik NMBE na ravni urnih intervalov. V primeru stene v pritličju je le-ta znašala 99,96 %. Po podrobnejši analizi podatkov sem odkril, da vsa večja odstopanja izmerjenih vrednosti površinske temperature sovpadajo s časi prezračevanja stavbe. Rezultati kažejo na to, da je do odstopanja prišlo zaradi pozicije obeh senzorjev, ki sta bila nameščena v bližini oken, ter zaradi omejitev programske opreme EnergyPlus, ki ne omogoča simulacije hitrih temperaturnih sprememb zaradi vdora zunanjega zraka med zračenjem. Glede na to, da to odstopanje predstavlja zanemarljiv delež umerjevalnega obdobja, sem v nadaljevanju upošteval, da je 29-ta različica modela stavbe dovolj natančno umerjena za namen študije. S to različico sem za kazalnik NMBE na ravni urnih intervalov dosegel 99.85 % povprečno umerjenost modela, tj. povprečna vrednost umerjenosti vseh petih merjenih temperaturnih spremenljivk v stavbi, ter 100 % umerjenost za vse ostale kriterije in priporočila po smernici ASHRAE 14-2014. Dejanski toplotni odziv stavbe sem predvidel z natančnostjo  $\pm 1$  °C v 71,6 % oz.  $\pm 2$  °C v 98.4 % umerjevalnega obdobja. Za končno različico modela stavbe so v preglednici 7 podane povprečne vrednosti statističnih kazalnikov umerjenosti in S-M odstopanj.

**Preglednica 7:** Povprečne vrednosti statističnih kazalnikov umerjenosti (NMBE, CV(RMSE) in  $R^2$ ) in S-M odstopanj (mediana, kvartilni in variacijski razmik), za vse merjene temperature spremenljivke v končni različici modela stavbe

**Table 7:** Average values of statistical calibration indicators (NMBE, CV (RMSE) and  $R^2$ ) and S-M deviations (median, quartile and variation deviation), for all measured temperature variables in the final building model variant

| Statistični kazalniki |                                                      | Intervali izračunov  | Merjene temperaturne spremenljivke v stavbi |           |                    |                             |                    |
|-----------------------|------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------|-----------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
|                       |                                                      |                      | Temperatura suhega zraka                    |           |                    | Površinska temperatura sten |                    |
|                       |                                                      |                      | Klet                                        | Pritličje | Zgornje nadstropje | Pritličje                   | Zgornje nadstropje |
| Umerjenost modela     | NMBE                                                 | Urni intervali       | 1,84 %                                      | 0,52 %    | - 2,12 %           | 1,51 %                      | - 1,68 %           |
|                       |                                                      | Mesečni intervali    | 1,82 %                                      | 0,56 %    | - 2,09 %           | 1,51 %                      | - 1,67 %           |
|                       | CV(RMSE)                                             | Urni intervali       | 3,57 %                                      | 3,16 %    | 3,21 %             | 3,55 %                      | 3,17 %             |
|                       |                                                      | Mesečni intervali    | 3,76 %                                      | 3,50 %    | 3,49 %             | 3,84 %                      | 3,63 %             |
|                       | R <sup>2</sup>                                       | Celotni čas meritev  | 0,83                                        | 0,93      | 0,94               | 0,90                        | 0,91               |
| S-M odstopanje        | Mediana (Q <sub>2</sub> )                            | 10-minutni intervali | 0,56 °C                                     | 0,23 °C   | - 0,47 °C          | 0,45 °C                     | - 0,33 °C          |
|                       | Kvartilni razmik (Q <sub>1</sub> -Q <sub>3</sub> )   |                      | 1,18 °C                                     | 1,08 °C   | 0,91 °C            | 1,07 °C                     | 1,00 °C            |
|                       | Variacijski razmik (Q <sub>0</sub> -Q <sub>4</sub> ) |                      | 6,76 °C                                     | 4,57 °C   | 4,26 °C            | 4,90 °C                     | 8,47 °C            |

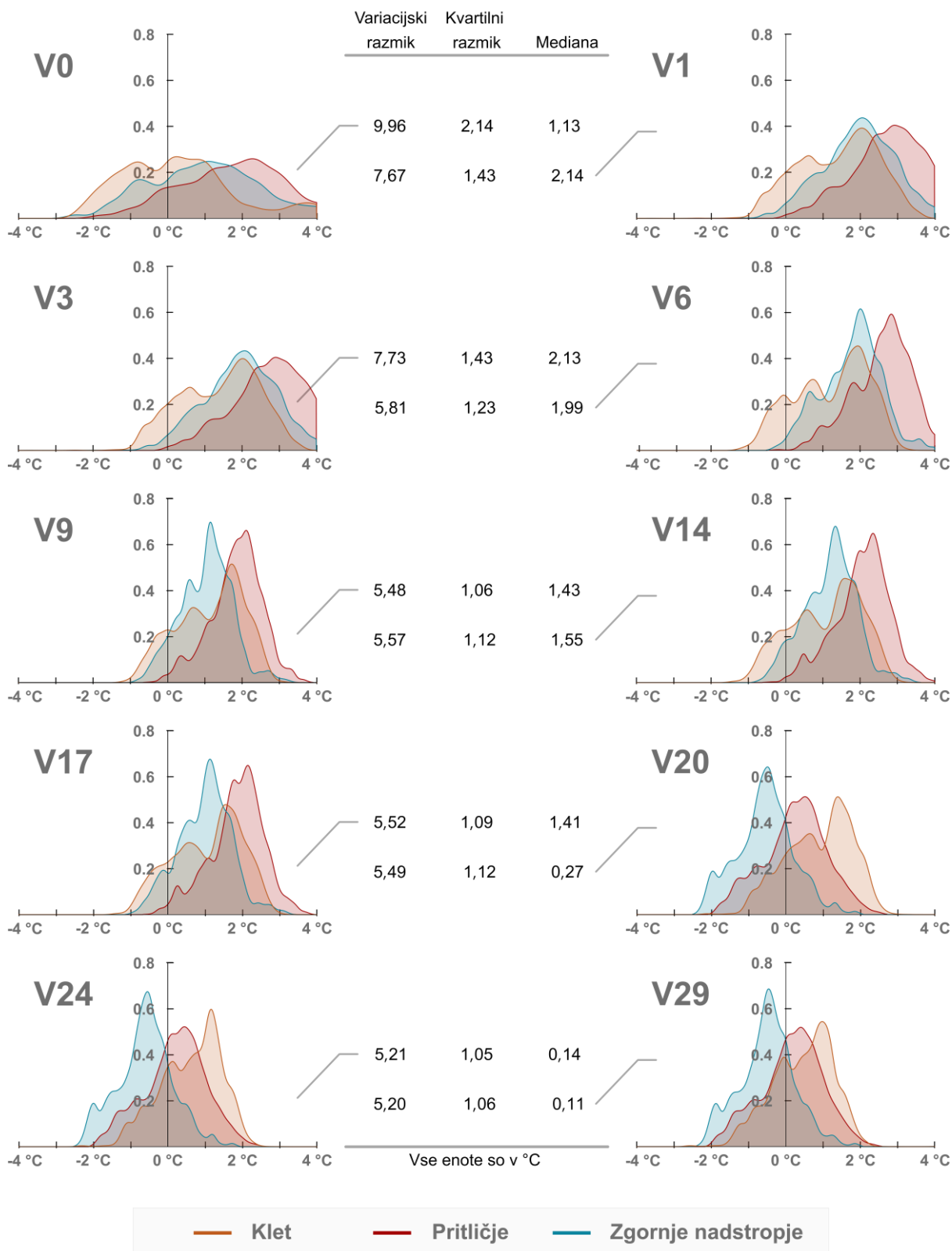
Na grafikonu 1 so prikazani rezultati povprečne umerjenosti izhodiščne različice modela stavbe (V0) in vseh dopoljenih različic (V1-V29), za kazalnik NMBE (po kriterijih smernice ASHRAE 14-2014) na ravni urnih in mesečnih intervalov. Za kazalnika CV(RMSE) in  $R^2$  so ti rezultati prikazani v prilogah. V rezultatih izstopa nenaden upad umerjenosti modela po uvozu urnikov prezračevanja, senčenja in antropogenih toplotnih virov (V1), kjer se je povprečna umerjenost modela na ravni urnih in mesečnih intervalov zmanjšala za 15,3 % oz. za 40,0 %. To je v nasprotju z rezultati S-M odstopanj, ki so za temperaturo suhega zraka prikazani na grafikonu 2 in za površinsko temperaturo sten na grafikonu 3, kjer sta se znatno zmanjšala povprečni variacijski in kvartilni razmik, in sicer za 3,0 K oz. za 0,7 K. Nasprotni pojav je opazen pri umerjanju zrakotesnosti stavbnega ovoja (V20), kjer se je povprečna umerjenost na ravni urnih in mesečnih intervalov, napram prejšnji različici modela, povečala za 8,9 % oz. za 53,3 %, medtem ko so variacijski in kvartilni razmiki ostali praktično nespremenjeni. Primerjava izmerjenega in simuliranega (za V0 in V29) toplotnega odziva stavbe, je za vseh pet merjenih temperaturnih spremenljivk prikazana v prilogah.



**Grafikon 1:** Rezultati umerjenosti modela stavbe za statistični kazalnik NMBE na ravni urnih in mesečnih intervalov po kriterijih ASHRAE 14-2014

**Chart 1:** Results of building model calibration for NMBE statistical indicator at the level of hourly and monthly intervals under ASHRAE 14-2014 criteria

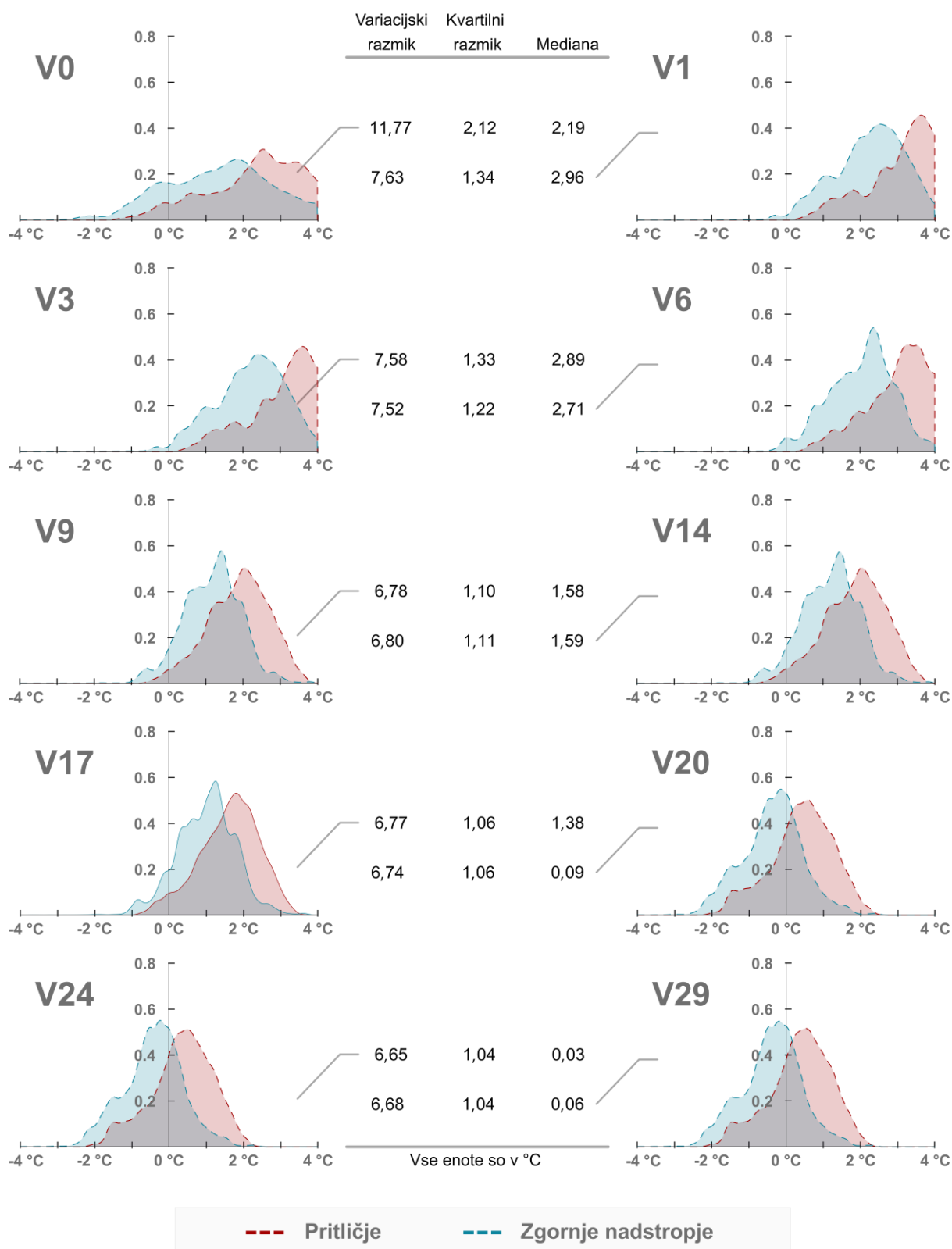
## S-M odstopanje: Temperatura suhega zraka



**Grafikon 2:** Rezultati umerjanja temperature suhega zraka v kleti, pritličju in zgornjem nadstropju stavbe, so prikazani v obliki histogramov S-M odstopanja, s pripadajočimi povprečnimi vrednostmi variacijskih in kvartilnih razmikov, ter median

**Chart 2:** Results of dry-bulb air temperature calibration in the buildings basement, ground floor, and upper floor, are shown as S-M deviation histograms, with their respective average variation deviation, quartile deviation and median values

## S-M odstopanje: Površinska temperatura sten



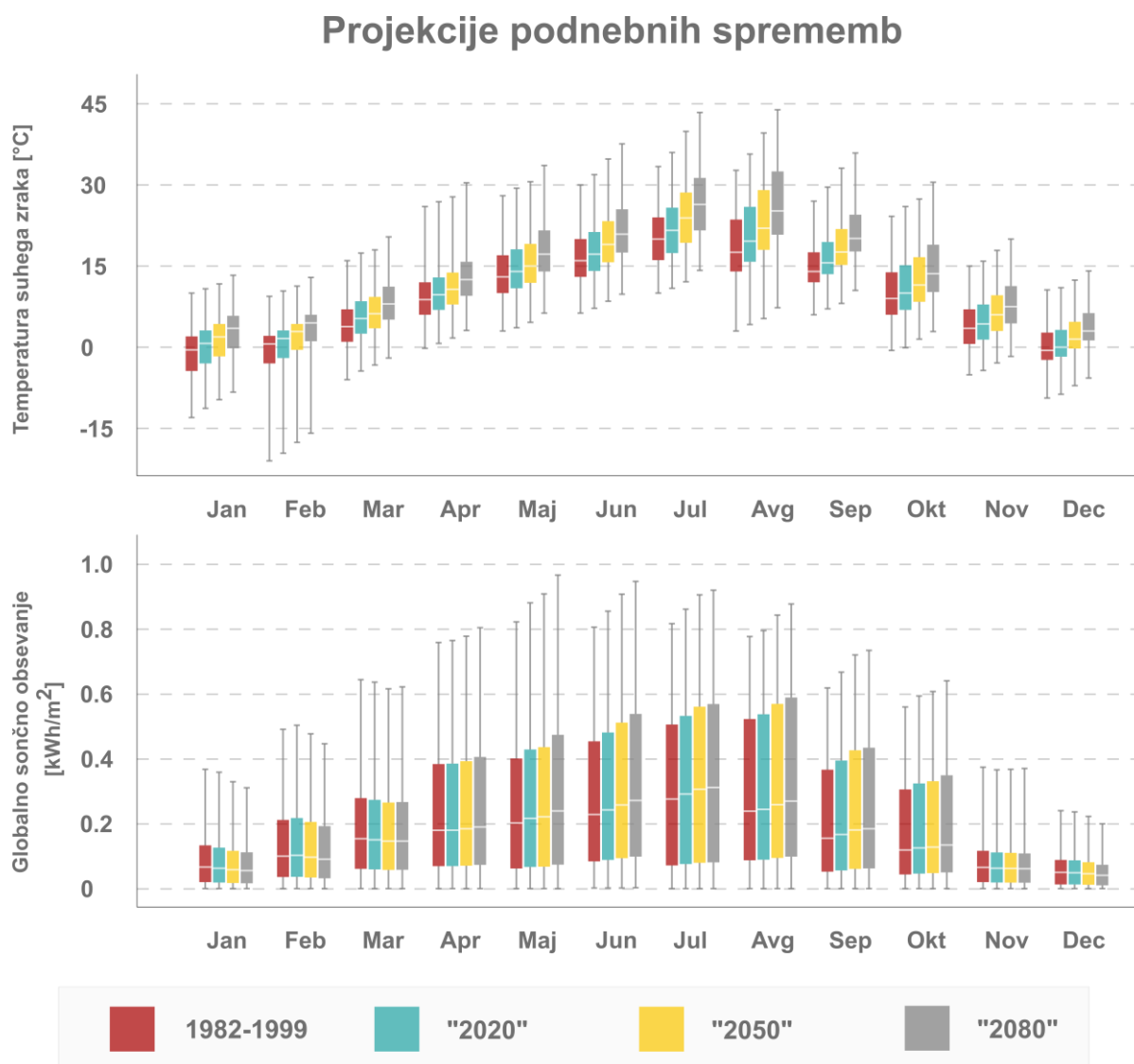
**Grafikon 3:** Rezultati umerjanja površinske temperature zunanjih sten v pritličju in zgornjem nadstropju stavbe, so prikazani v obliki histogramov S-M odstopanja, s pripadajočimi povprečnimi vrednostmi variacijskih in kvartilnih razmikov, ter median

**Chart 3:** Results of exterior wall surface temperature calibration in the buildings ground, and upper floor, are shown as S-M deviation histograms, with their respective average variation deviation, quartile deviation and median values

## 3.2 Analiza vpliva podnebnih sprememb na pojav pregrevanja v stavbi

### 3.2.1 Projekcije podnebnih sprememb

V študiji sem, na osnovi izmerjenih meteoroloških podatkov za Ljubljano iz obdobja 1982–1999, generiral enoletne vremenske datoteke za tri različna časovna obdobja v prihodnosti: 2011–2040 (poimenovano »2020«), 2041–2070 (poimenovano »2050«) in 2071–2100 (poimenovano »2080«). Predviden vpliv podnebnih sprememb na meteorološke parametre je razviden na grafikonu 4 za temperaturo suhega zraka in jakost globalnega sončnega obsevanja, ter v preglednici 8, kjer so podani kazalniki izjemne vročine: število toplih in vročih dni, ter tropskih noči v letu.



**Grafikon 4:** Primerjava izmerjenih in predvidenih meteoroloških parametrov (temperatura suhega zraka in jakost globalnega sončnega obsevanja) za Ljubljano, izraženih v obliki kvantilnih diagramov na ravni mesečnih intervalov

**Chart 4:** Comparison of measured and predicted meteorological parameters (dry-bulb temperature and global solar irradiance) for Ljubljana, expressed as monthly intervalled quantile diagrams

Gledano relativno na izhodiščno podnebno stanje iz obdobja 1982–1999, so po scenariju SRES A2 na območju Ljubljane predvidene naslednje spremembe:

- temperatura suhega zraka: naraščanje temperature je predvideno v vseh treh obravnavanih prihodnjih obdobjih, in sicer se v prvem obdobju obeta povprečni dvig temperature suhega

zraka od 0,9 do 1,40 °C, v drugem od 1,9 do 3,5 °C, ter v zadnjem obdobju od 3,8 do 5,9 °C, pri čemer je v vseh treh obdobjih dvig temperature najbolj izrazit v poletnem času.

- globalno sončno obsevanje: podobno kot v primeru temperature zraka je, z izjemo zimskega časa, predvideno postopno naraščanje jakosti globalnega sončnega obsevanja v vseh treh obravnavanih prihodnjih obdobjih, in sicer se v prvem obdobju obeta sprememba le-tega od –1,5 do 12,2 kWh/m<sup>2</sup>, v drugem od –7,2 do 29,9 kWh/m<sup>2</sup>, ter v zadnjem obdobju od –10,0 do 42,0 kWh/m<sup>2</sup>. V vseh treh prihodnjih obdobjih je povečanje jakosti globalnega sončnega obsevanja najbolj opazno v poletnem času.
- kazalniki izjemne vročine: Število toplih in vročih dni, ko temperatura suhega zraka podnevi preseže 25 oz. 30 °C, bo v prihodnosti predvidoma bistveno več. V primerjavi z izhodiščnim obdobjem, naj bi se v prvem obdobju število toplih in vročih dni povečalo za 16, v drugem za 38 oz. 35, ter v zadnjem prihodnjem obdobju za 65 oz. 67. To pomeni, da naj bi se do konca stoletja število toplih dni enkrat povečalo, medtem ko naj bi se število vročih dni povečalo za približno štirikrat. Tudi kazalnik števila tropskih noči, ko se temperatura suhega zraka ponoči ne spusti pod 20 °C, kaže podobno, in sicer naj bi se število tropskih noči v povprečju povečalo za 2 v prvem obdobju, za 8 v drugem, ter za 25 v zadnjem prihodnjem obdobju.

**Preglednica 8:** Kazalniki izjemne vročine za izhodiščno in obravnavana prihodnja obdobja v Ljubljani

**Table 8:** Extreme heat indicators for the baseline and studied future periods in Ljubljana

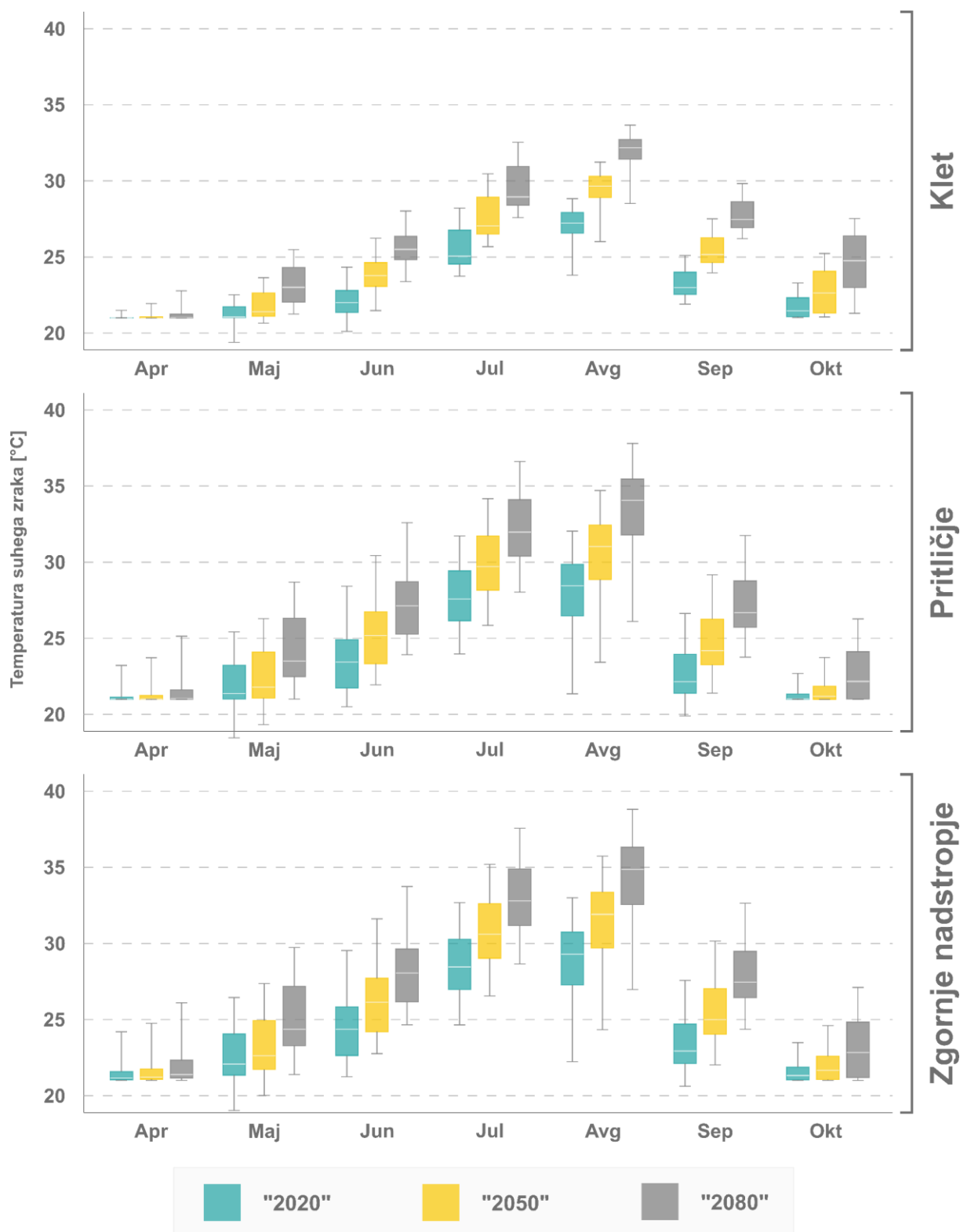
| Časovno obdobje    | Kazalniki izjemne vročine |             |              |
|--------------------|---------------------------|-------------|--------------|
|                    | Topli dnevi               | Vroči dnevi | Tropske noči |
| 1982–1999          | 65                        | 17          | 0            |
| 2011–2040 (»2020«) | 81                        | 33          | 2            |
| 2041–2070 (»2050«) | 103                       | 52          | 8            |
| 2071–2100 (»2080«) | 130                       | 84          | 25           |

### 3.2.2 Rezultati primerjalnega modela stavbe

Na grafikonu 5 so prikazani rezultati toplotnega odziva primerjalnega modela stavbe v vseh treh obravnavanih prihodnjih obdobjih. Rezultati so prikazani v obliki kvantilnih diagramov povprečne temperature suhega zraka, v vseh etažah, na ravni mesečnih intervalov. Skladno s predvidenimi meteorološkimi spremembami v prihodnjih obdobjih, prikazanimi na grafikonu 4, je v modelu stavbe opazno postopno naraščanje temperature suhega zraka v vseh etažah. V rezultatih najbolj izstopata julij in avgust, kot meseca z najvišjimi povprečnimi temperaturami zraka. V teh dveh mesecih je, od treh etaž, najbolj kritično zgornje nadstropje, kjer je v prvem obdobju povprečna temperatura suhega zraka znašala 28,9 °C, v drugem 31,3 °C, ter v zadnjem obdobju 33,8 °C. Alarmanten je tudi podatek, da je, v mesecu avgustu, temperatura suhega zraka v zgornjem nadstropju v prvem obdobju dosegla največ 33,0 °C, v drugem 35,7 °C, ter v zadnjem obdobju kar 38,8 °C.

V rezultatih je v mesecih maju in septembru, predvsem v prvem prihodnjem obdobju, v vseh treh stavbnih etažah opazen padec minimalne temperature zraka pod mejo 21 °C, kar je nižje od dveh bližnjih bolj hladnih mesecev. Pojav je posledica ostrega prehoda modela stavbe iz ogrevalnega režima v obdobje prostega teka. V tem obdobju se stavba ne ogreva, tudi v primerih, ko pride do podhlajevanja modela.

## Toplotni odziv primerjalnega modela



**Grafikon 5:** Rezultati toplotnega odziva izhodiščnega modela stavbe, izraženo v obliki kvantilnih diagramov temperature suhega zraka na ravni mesečnih intervalov, za obravnavana prihodnja obdobja

**Chart 5:** Base building model thermal response results, expressed as monthly intervalled dry-bulb temperature quantile diagrams, for the studied future periods



### 3.2.3 Rezultati prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati simulacij toplotnega odziva vseh 28 različic modela stavbe, prilagojenih na predvidene podnebne razmere v prihodnosti. V rezultatih so zaradi preglednosti posamezne prilagoditve stavbe in organizacijski ukrepi označeni z grafičnimi oznakami, ki so prikazane v preglednici 9.

**Preglednica 9:** Grafične oznake analiziranih organizacijskih ukrepov in prilagoditev stavbe predstavljenih v rezultatih

**Table 9:** Graphic labels of analyzed occupant organizational actions and building adaptations presented in the results

| Prilagoditve na nivoju stavbe               |                                                                                     | Organizacijski ukrepi                    |                                                                                     |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Brez prilagoditev stavbe                    |    | Brez organizacijskih ukrepov             |  |
| Vgradnja dodatnih senčil                    |    | Senčenje z uporabo zunanjih žaluzij      |  |
| Dodatna toplotna izolacija zunanjih sten    |    | Nočno zračenje                           |  |
| Vgradnja zelene strehe                      |    | Kombinacija senčenja in nočnega zračenja |  |
| Sprememba solarne absorptivnosti strešnikov |   |                                          |                                                                                     |
| Dodatna toplotna masa (1.stopnja)           |  |                                          |                                                                                     |
| Dodatna toplotna masa (2.stopnja)           |  |                                          |                                                                                     |

#### 3.2.3.1 Toplotno (ne)udobje uporabnikov

Primerjava rezultatov vseh kombinacij prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, z vidika predvidenega trajanja toplotnega neudobja uporabnikov (na letni ravni) po standardu prEN 16798-1 (kategorija I), je za zgornje nadstropje prikazana na grafikonu 6, za pritličje na grafikonu 7, ter za klet na grafikonu 8. Rezultati se delijo po posameznih prihodnjih obdobjih in po vrsti toplotnega neudobja: prevroče ali premrzlo. Z vidika omejevanja pojava pregrevanja modela stavbe je, v primeru neizvajanja organizacijskih ukrepov, od analiziranih prilagoditev stavbe najbolj učinkovita sprememba solarne absorptivnosti strešnikov. Napram primerjalnemu modelu stavbe, ta prilagoditev na letni ravni pripomore k zmanjšanju trajanja toplotnega neudobja zaradi pregrevanja od 0,4 do 1,5 % v prvem obdobju, od 0,6 do 1,1 % v drugem, ter od 0,3 do 1,5 % v zadnjem prihodnjem obdobju. V primeru, kjer se stavba ne bi adaptirala je, od analiziranih organizacijskih ukrepov, najbolj učinkovito izvajanje nočnega zračenja v kombinaciji s senčenjem. Napram primerjalnemu modelu stavbe, ta ukrep na letni ravni pripomore k zmanjšanju trajanja toplotnega neudobja zaradi pregrevanja od 8,2 do 18,3 % v prvem obdobju, od 16,0 do 23,2 % v drugem, ter od 28,0 do 30,4 % v zadnjem prihodnjem obdobju.

Poudariti je potrebno, da se je pri nekaterih prilagoditvah stavbe, v primerjavi z neadaptiranimi različicami modelov stavbe, pojav pregrevanja modela stavbe v določenih primerih dejansko povečal. Ta negativni pojav je prisoten v eni, dveh ali vseh treh etažah, pri naslednjih tipih prilagoditve stavbe: različici z dodatno toplotno izoliranimi zunanjimi stenami, različici z zeleno streho, ter obema različicama z dodatno toplotno maso v stavbnem ovoju in notranjosti. Pojav je prisoten v kombinaciji z vsemi organizacijskimi ukrepi, vendar pa je najbolj opazen v primerih neizvajanja le-teh, ter izvajanja senčenja z uporabo zunanjih senčil.

**2020**

| Prevroče | 2020 | 2050 | 2080 |
|----------|------|------|------|
| 19,0     | 13,2 | 0,2  | 0,1  |
| 18,5     | 13,1 | 0,7  | 0,4  |
| 17,1     | 11,4 | 0,4  | 0,1  |
| 18,8     | 12,9 | 0,3  | 0,2  |
| 22,1     | 16,2 | 0,3  | 0,2  |
| 18,1     | 11,3 | 0,4  | 0,1  |
| 18,6     | 13,0 | 0,5  | 0,3  |

**2050**

| Prevroče | 2050 | 2080 |     |
|----------|------|------|-----|
| 26,0     | 20,1 | 1,9  | 1,4 |
| 25,0     | 19,9 | 2,5  | 2,0 |
| 24,0     | 18,3 | 1,9  | 1,4 |
| 25,4     | 20,3 | 2,2  | 1,7 |
| 29,4     | 22,9 | 2,2  | 1,5 |
| 24,7     | 18,1 | 2,2  | 1,5 |
| 25,1     | 19,9 | 2,4  | 1,9 |

**2080**

| Prevroče | 2080 |     |     |
|----------|------|-----|-----|
| 36,6     | 28,7 | 5,5 | 4,7 |
| 35,3     | 27,9 | 5,9 | 5,2 |
| 33,9     | 26,8 | 5,6 | 4,8 |
| 35,8     | 28,3 | 6,0 | 5,0 |
| 40,1     | 33,1 | 5,7 | 5,0 |
| 34,8     | 25,6 | 5,8 | 4,7 |
| 35,4     | 27,9 | 5,8 | 5,0 |

**Premrzlo**

| 2020 | 2050 | 2080 |      |
|------|------|------|------|
| 1,8  | 2,1  | 9,5  | 9,4  |
| 2,6  | 2,9  | 11,6 | 11,3 |
| 3,2  | 3,6  | 11,9 | 11,6 |
| 2,5  | 2,8  | 10,6 | 10,5 |
| 0,8  | 1,1  | 8,6  | 8,7  |
| 2,7  | 3,1  | 11,8 | 12,0 |
| 2,5  | 2,8  | 11,4 | 11,2 |

**2050**

| 2050 | 2080 |     |     |
|------|------|-----|-----|
| 0,8  | 0,9  | 8,1 | 8,4 |
| 0,9  | 1,0  | 9,1 | 9,1 |
| 1,1  | 1,2  | 8,1 | 8,5 |
| 0,9  | 1,1  | 9,2 | 9,1 |
| 0,1  | 0,3  | 7,6 | 8,2 |
| 0,9  | 1,1  | 8,9 | 9,5 |
| 0,9  | 1,0  | 9,0 | 9,4 |

**2080**

| 2080 |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|
| 0,0  | 0,0 | 5,0 | 5,3 |
| 0,0  | 0,0 | 5,5 | 5,8 |
| 0,0  | 0,0 | 5,9 | 6,0 |
| 0,0  | 0,0 | 5,3 | 5,5 |
| 0,0  | 0,0 | 6,1 | 6,0 |
| 0,0  | 0,0 | 5,8 | 5,9 |
| 0,0  | 0,0 | 5,4 | 5,7 |

**Delež leta, ko je stanovalcem prevroče/premrzlo**

0% 20% 40%

**Chart 6:** Comparison of occupant thermal discomfort results, for all possible combinations of studied building adaptations and occupant organizational actions, expressed in the form of a percentage of time in the year when it would be either too hot or too cold for the occupants. The results are shown for the buildings upper floor. Descriptions for the graphic labels are given in table 9

Figure 1 displays heat maps showing the percentage of time spent in overheated (Prevroče) and overcooled (Premrzlo) rooms by 2020, 2050, and 2080, categorized by building type (represented by icons on the left).

The building types are:

- Single-family house (top row)
- Two-story house (second row)
- Three-story house (third row)
- Four-story house (fourth row)
- Five-story house (fifth row)
- Six-story house (sixth row)
- Seven-story house (seventh row)
- Eight-story house (eighth row)

The heat maps are organized into three columns representing the years 2020, 2050, and 2080. The rows represent the building types. The color scale indicates the percentage of time spent in overheated (red) and overcooled (purple) rooms, ranging from 0% (lightest) to 40% (darkest).

**Overheated (Prevroče) Data:**

| Year | Single-family house | Two-story house | Three-story house | Four-story house | Five-story house | Six-story house | Seven-story house | Eight-story house |
|------|---------------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 2020 | 15,0                | 8,6             | 0,0               | 0,0              | 14,4             | 8,4             | 0,0               | 0,0               |
| 2050 | 21,7                | 15,4            | 0,3               | 0,2              | 21,1             | 15,1            | 0,5               | 0,2               |
| 2080 | 31,4                | 22,9            | 3,2               | 2,2              | 30,1             | 22,5            | 3,4               | 2,2               |

**Overcooled (Premrzlo) Data:**

| Year | Single-family house | Two-story house | Three-story house | Four-story house | Five-story house | Six-story house | Seven-story house | Eight-story house |
|------|---------------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 2020 | 4,4                 | 5,0             | 16,2              | 16,3             | 5,1              | 5,7             | 16,8              | 16,5              |
| 2050 | 1,3                 | 1,6             | 12,1              | 12,6             | 1,5              | 1,8             | 12,9              | 13,1              |
| 2080 | 0,0                 | 0,0             | 7,4               | 7,6              | 0,0              | 0,1             | 7,5               | 7,8               |

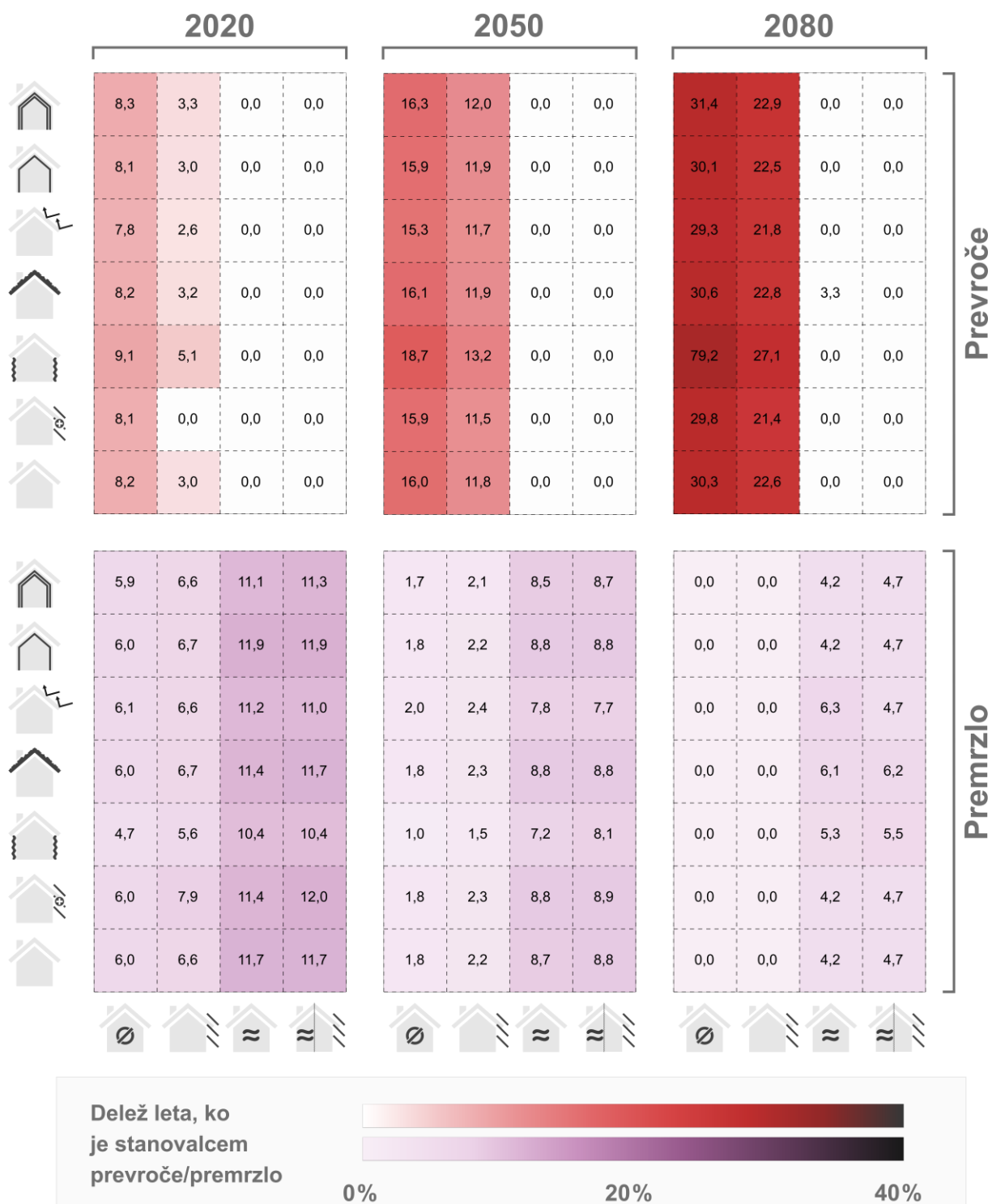
**Legend:**

Delež leta, ko je stanovalcem prevroče/premrzlo

0% 20% 40%

**Chart 7:** Comparison of occupant thermal discomfort results, for all possible combinations of studied building adaptations and occupant organizational actions, expressed in the form of a percentage of time in the year when it would be either too hot or too cold for the occupants. The results are shown for the buildings ground floor. Descriptions for the graphic labels are given in table 9

## Toplotno neudobje: klet



**Grafikon 8:** Primerjava rezultatov toplotnega neudobja uporabnikov, za vse možne kombinacije obravnavanih prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, izraženih v obliki deleža časa v letu, ko bi bilo uporabnikom ali prevroče ali premrzlo. Rezultati so prikazani za klet stavbe. Opisi grafičnih oznak so podani v preglednici 9

**Chart 8:** Comparison of occupant thermal discomfort results, for all possible combinations of studied building adaptations and occupant organizational actions, expressed in the form of a percentage of time in the year when it would be either too hot or too cold for the occupants. The results are shown for the buildings basement. Descriptions for the graphic labels are given in table 9

Največje povečanje trajanja toplotnega neudobja uporabnikov zaradi pregrevanja modela, je opazno pri različici modela z dodatno toplotno izoliranimi zunanji stenami, kjer se je le-to, v primeru brez izvajanja organizacijskih ukrepov, na letni ravni v prvem obdobju povečalo za največ 3,9 %, v drugem za največ 4,7 %, ter v zadnjem obdobju za največ 7,4 %. Podoben pojav je opazen pri isti različici prilagoditve stavbe, v kombinaciji z izvajanjem ukrepa senčenja, kjer se je trajanje toplotnega neudobja v prvem obdobju povečalo za 3,4 %, v drugem za največ 3,1 %, ter v zadnjem, obdobju za največ 5,2 %. Za vse ostale različice modelov, kjer je ta negativni pojav prisoten, so te vrednosti podane v preglednici 10.

**Preglednica 10:** Pričakovano povečanje trajanja toplotnega neudobja uporabnikov zaradi previsokih notranjih temperatur, za vse kombinacije prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, kjer je ta negativni pojav prisoten. Vrednosti predstavljajo največjo razliko v toplotnem neudobju na letni ravni (merjeno v vseh etažah), napram neadaptiranim različicam modelov stavbe

**Table 10:** An expected increase in the duration of occupant thermal discomfort due to elevated internal temperatures, for all combinations of building adaptations and occupant organizational actions, where this negative phenomenon has occurred. The values represent the largest difference in thermal discomfort on an annual basis (measured on all floors), compared to unadapted building model variants

| Časovna obdobja    | Prilagoditve stavbe                      | Organizacijski ukrepi        |                                     |                |
|--------------------|------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------|
|                    |                                          | Brez organizacijskih ukrepov | Senčenje z uporabo zunanjih žaluzij | Nočno zračenje |
| 2011–2040 (»2020«) | Dodatna toplotna izolacija zunanjih sten | 3,9 %                        | 3,4 %                               |                |
|                    | Vgradnja zelene strehe                   | 0,2 %                        | 0,2 %                               |                |
|                    | Dodatna toplotna masa (1.stopnja)        |                              | 0,1 %                               | 0,2 %          |
|                    | Dodatna toplotna masa (2.stopnja)        | 0,5 %                        | 0,3 %                               |                |
| 2041–2070 (»2050«) | Dodatna toplotna izolacija zunanjih sten | 4,7 %                        | 3,1 %                               |                |
|                    | Vgradnja zelene strehe                   | 0,3 %                        | 0,4 %                               |                |
|                    | Dodatna toplotna masa (1.stopnja)        |                              |                                     | 0,1 %          |
|                    | Dodatna toplotna masa (2.stopnja)        | 0,9 %                        | 0,3 %                               |                |
| 2071–2100 (»2080«) | Dodatna toplotna izolacija zunanjih sten | 7,4 %                        | 5,2 %                               |                |
|                    | Vgradnja zelene strehe                   | 0,4 %                        | 0,4 %                               | 0,2 %          |
|                    | Dodatna toplotna masa (1.stopnja)        |                              | 0,1 %                               | 0,1 %          |
|                    | Dodatna toplotna masa (2.stopnja)        | 1,2 %                        | 0,8 %                               | 0,2 %          |

Za razliko od prilagoditev stavbe pa izvajanje organizacijskih ukrepov v čisto vseh primerih zmanjša toplotno neudobje uporabnikov zaradi pregrevanja modela stavbe. Pri tem pa je potrebno izpostaviti slabost obravnavanih organizacijskih ukrepov, ki je najbolj očitna v prvem prihodnjem obdobju, in sicer da povečujejo toplotno neudobje uporabnikov zaradi podhlajevanja modela. Ti negativni učinki ukrepov so najbolj izraziti v primeru izvajanja nočnega zračenja v kombinaciji s senčenjem, kjer se je trajanje toplotnega neudobja zaradi podhlajevanja neadaptiranega modela stavbe, v primerjavi s

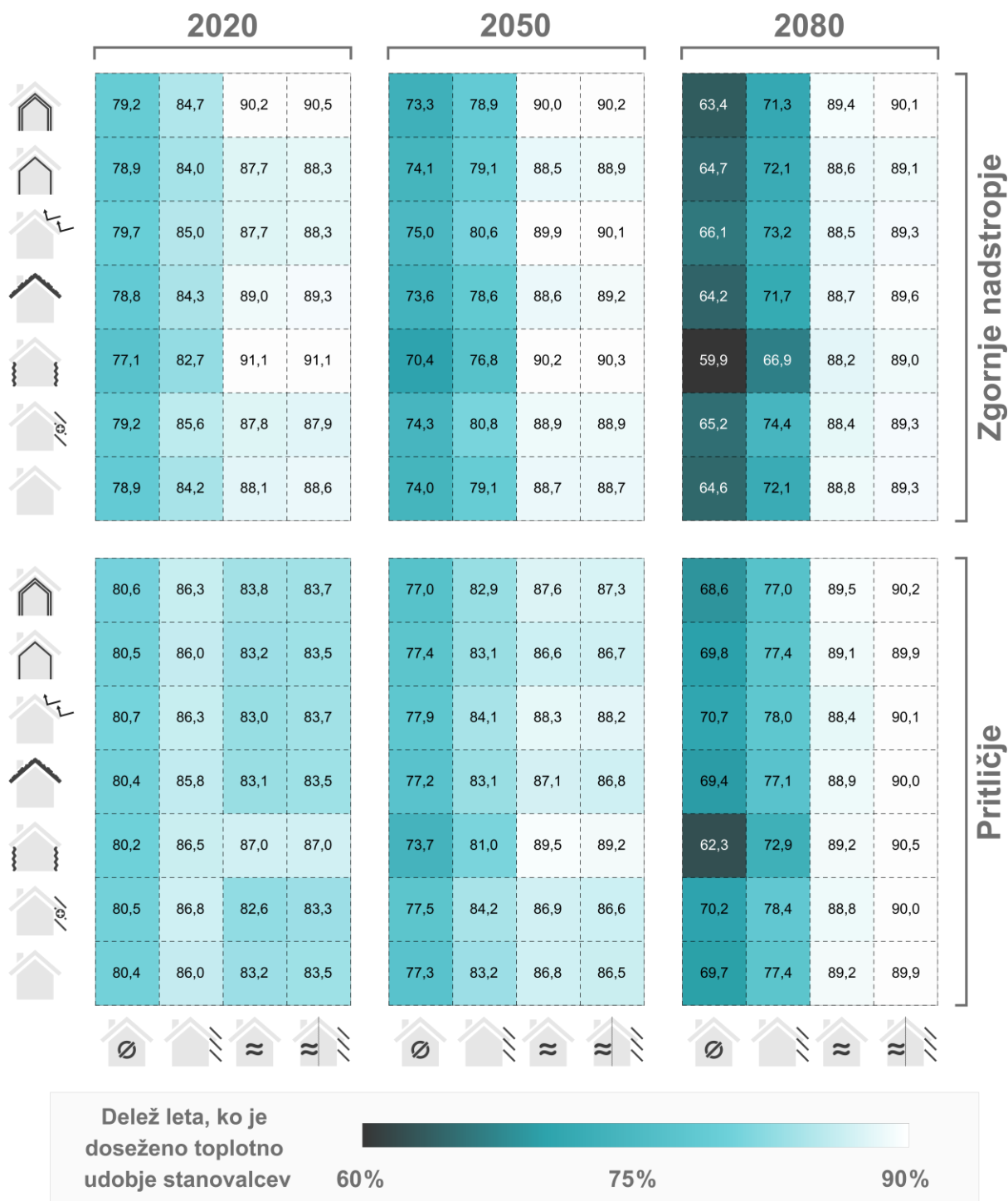
primerjalnim modelom, na letni ravni podaljšalo za največ 11,4 % v prvem obdobju, za največ 11,8 % v drugem, ter za največ 7,8 % v zadnjem prihodnjem obdobju. Od vseh analiziranih prilagoditev stavbe, predstavlja različica modela z dodatno toplotno izolacijo zunanjih sten, z vidika omejevanja pojava podhlajevanja, še najboljše rešitev. V primeru izvajanja ukrepa nočnega zračenja s senčenjem, v primerjavi z neadaptirano različico modela, ta prilagoditev stavbe na letni ravni skrajša trajanje toplotnega neudobja zaradi podhlajevanja za največ 3,5 % v prvem obdobju, za največ 2,6 % v drugem, ter za največ 0,8 % v zadnjem prihodnjem obdobju.

### 3.2.3.2 Toplotno udobje uporabnikov

V nadaljevanju je prikazana primerjava rezultatov vseh kombinacij prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, še z vidika trajanja toplotnega udobja uporabnikov (na letni ravni) po standardu prEN 16798-1 (kategorija I), in sicer so rezultati za zgornje nadstropje in pritličje prikazani na grafikonu 9, ter za klet na grafikonu 10. Ti rezultati predstavljajo le manjšo dopolnitev tistih iz Poglavlja 3.2.3.1, saj prikazujejo delež preostanka leta, ko uporabnikom ni prevroče ali premrzlo. Čeprav je študija v glavnem usmerjena v omejevanje in preprečevanje pojava pregrevanja stavbe, pa so ti rezultati vseeno pomembni, saj sem lahko na njihovi podlagi posamezne prilagoditve stavbe in organizacijske ukrepe celoviteje ovrednotil. Kot prvo sem analiziral kako naj bi se toplotno udobje uporabnikov predvidoma spreminjalo v prihodnosti, brez izvajanja prilagoditev stavbe in/ali organizacijskih ukrepov. Največje relativne spremembe so opazne v zgornjem nadstropju, kjer se je trajanje toplotnega udobja uporabnikov zmanjšalo iz 78,9 % v prvem obdobju, na 74,0 % v drugem, ter nato na 64,6 % v zadnjem prihodnjem obdobju. Dokaj podobne spremembe so opazne tudi v kleti, kjer se je trajanje toplotnega udobja uporabnikov zmanjšalo iz 85,9 % v prvem obdobju, na 82,2 % v drugem, ter nato na 71,0 % v zadnjem prihodnjem obdobju. V pritličju stavbe so spremembe manj opazne, čeprav se je, v obdobju od prvega do zadnjega prihodnjega obdobja, trajanje toplotnega udobja uporabnikov na letni ravni zmanjšalo za 10,7 %. Delež časa, ko je v stavbi doseženo toplotno udobje, se je do konca stoletja v povprečju skrajšal za 13,3 % (napram obdobju 2010–2040), kar predstavlja približno 49 dni na leto. Kot drugo sem analiziral kako so različne kombinacije prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov vplivale na toplotno udobje uporabnikov. V primeru neizvajanja organizacijskih ukrepov predstavlja nižja solarna absorptivnost strešnikov najboljšo adaptacijo. Napram primerjalnemu modelu stavbe, je ta prilagoditev stavbe na letni ravni pripomogla k izboljšanju trajanja toplotnega udobja od 0,2 do 0,8 % v prvem obdobju, od 0,5 do 1,0 % v drugem, ter od 0,3 do 1,5 % v zadnjem prihodnjem obdobju. V primeru, kjer se stavba ne bi adaptirala, pa so v različnih prihodnjih obdobjih bolj primerni različni organizacijski ukrepi. V prvem prihodnjem obdobju so si vsi obravnavani organizacijski ukrepi medsebojno praktično ekvivalentni, in sicer je izvajanje ukrepa senčenja na letni ravni pripomoglo k izboljšanju toplotnega udobja od 4,4 do 5,3 % (povprečje 5,1 %), izvajanje nočnega zračenja od 2,4 do 9,2 % (povprečje 4,8 %), ter izvajanje obeh ukrepov skupaj od 2,4 do 9,7 % (povprečje 5,1 %). V drugem in predvsem tretjem prihodnjem obdobju pa ti rezultati kažejo bistveno bolj v korist izvajanja ukrepa nočnega zračenja oz. obeh ukrepov skupaj. V drugem prihodnjem obdobju je tako izvajanje senčenja na letni ravni pripomoglo k izboljšanju trajanja toplotnega udobja od 3,8 do 5,9 % (povprečje 4,9 %), medtem ko za izvajanje nočnega zračenja (brez ali s senčenjem) te vrednosti znašajo od 9,1 do 14,7 % (povprečje 11,1 %). Razlike so še nekoliko večje v zadnjem prihodnjem obdobju, kjer te vrednosti znašajo od 2,7 do 7,7 % (povprečje 6,0 %) za izvajanje senčenja, od 19,5 do 24,8 % (povprečje 22,8 %) za izvajanje nočnega zračenja, ter od 20,2 do 24,7 % (povprečje 23,1 %) za izvajanje obeh ukrepov skupaj. Z vidika največjega izboljšanja trajanja toplotnega udobja, se je v prvem prihodnjem obdobju najbolje izkazala prilagoditev stavbe z dodatno toplotno izoliranimi zunanjimi stenami, v kombinaciji z izvajanjem ukrepa nočnega zračenja s senčenjem, s 7,5 % prispevkom. V drugem prihodnjem obdobju predstavlja najboljšo rešitev prilagoditev stavbe z dodatno toplotno izoliranimi zunanjimi stenami, v kombinaciji z izvajanjem ukrepa nočnega zračenja, s 13,0 % prispevkom. V zadnjem prihodnjem obdobju pa predstavlja najboljšo rešitev prilagoditev stavbe z dodatno toplotno

maso (2. stopnja), v kombinaciji z izvajanjem ukrepa nočnega zračenja s senčenjem, s 23,4 % prispevkom.

## Toplotno udobje



**Grafikon 9:** Rezultati prikazujejo deleže leta, ko bi uporabniki stavbe predvidoma občutili toplotno udobje, za vse možne kombinacije obravnavanih prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov. Rezultati so prikazani za zgornje nadstropje in pritličje stavbe. Opisi grafičnih oznak so podani v preglednici 9

**Chart 9:** The results show the percentage of time in the year when the users of the building are expected to perceive thermal comfort, for all possible combinations of the considered building adaptations and occupant organizational actions.. The results are shown for the buildings upper and ground floor. Descriptions for the graphic labels are given in table 9



**Grafikon 10:** Rezultati prikazujejo deleže leta, ko bi uporabniki stavbe predvidoma občutili toplotno udobje, za vse možne kombinacije obravnavanih prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov. Rezultati so prikazani za klet stavbe. Opisi grafičnih oznak so podani v preglednici 9

**Chart 10:** The results show the percentage of time in the year when the users of the building are expected to perceive thermal comfort, for all possible combinations of the considered building adaptations and occupant organizational actions.. The results are shown for the buildings basement. Descriptions for the graphic labels are given in table 9

### 3.2.3.3 Toplotni odziv modelov stavbe

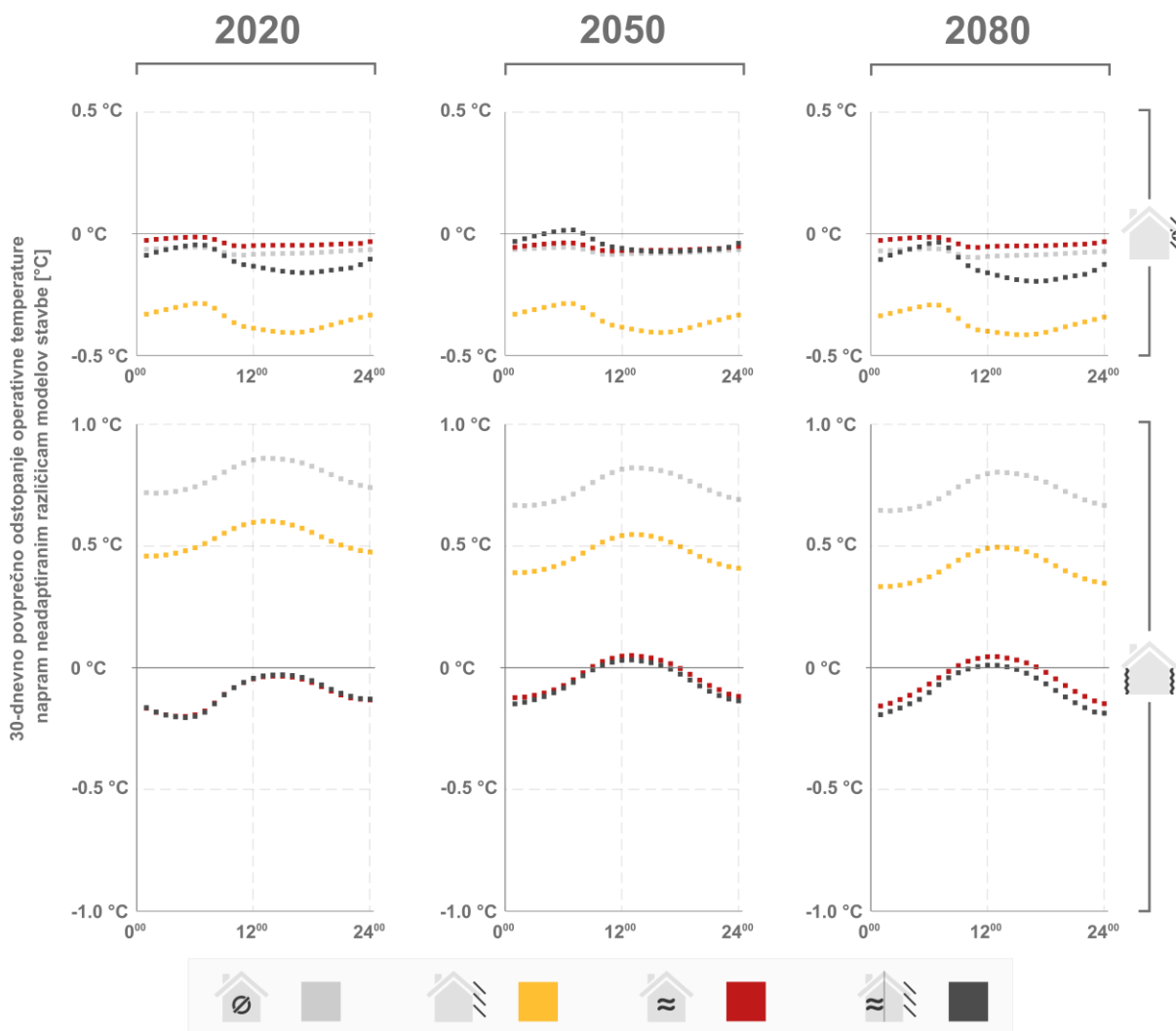
Vpliv obravnavanih kombinacij prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov na toplotni odziv modela stavbe je prikazan na grafikonih 11 in 12. Rezultati so predstavljeni v obliki 30-dnevnega povprečnega odstopanja operative temperature adaptiranih modelov, merjene v zgornjem nadstropju, napram neadaptiranim različicam modelov. Pri izračunu 30-dnevnega povprečja sem upošteval dni, v katerih je bil pojav pregrevanja najbolj izrazit. Iz rezultatov je razvidno, da lahko nekatere prilagoditve stavbe, z vidika preprečevanja pojava pregrevanja, v posameznih delih dneva pozitivno ali negativno učinkujejo na toplotni odziv modela. Ta pojav je najbolj izrazit v primeru različice modela z dodatno toplotno maso (2 stopnja), v kombinaciji z izvajanjem ukrepa nočnega zračenja, pri kateri znaša razlika v toplotnem odzivu v povprečju od  $-0,21$  do  $0,28$  °C v prvem obdobju, od  $-0,25$  do  $0,26$  °C v drugem, ter od  $-0,26$  do  $0,27$  °C v zadnjem prihodnjem obdobju. Podoben pojav je opazen tudi pri različici modela z zeleno streho, prav tako v kombinaciji z nočnim zračenjem, kjer ta razlika v povprečju znaša od  $-0,19$  do  $0,24$  °C v prvem obdobju, od  $-0,20$  do  $0,21$  °C v drugem, ter od  $-0,17$  do  $0,23$  °C v zadnjem prihodnjem obdobju.

Iz rezultatov je razvidno tudi kako organizacijski ukrepi delujejo bolje v kombinaciji z določenimi stavbnimi prilagoditvami, kot pa z drugimi. Ta kontrast je sicer najbolj opazen v primeru izvajanja ukrepa senčenja. V kombinaciji s prilagoditvama dodatnih zunanjih senčil in nižje solarne



absorptivnosti strehe, je ta ukrep v prvih dveh obdobjih operativno temperaturo v povprečju znižal za 0,35 oz. 0,34 °C, v zadnjem obdobju pa za 0,36 oz. 0,33 °C. Nasprotno pa je, v kombinaciji z adaptacijo dodatno toplotno izoliranih zunanjih sten, ta ukrep v prvem obdobju operativno temperaturo v povprečju zvišal za 0,53 °C, v drugem za 0,47 °C, ter v zadnjem prihodnjem obdobju za 0,41 °C. V primeru adaptacije dodatno toplotno izoliranih zunanjih sten je sicer najslabša opcija neizvajanje ukrepov, saj le-to v prvem obdobju privede k povprečnemu povišanju operativne temperature za 0,79 °C, v drugem za 0,74 °C, ter v zadnjem prihodnjem obdobju za 0,72 °C.

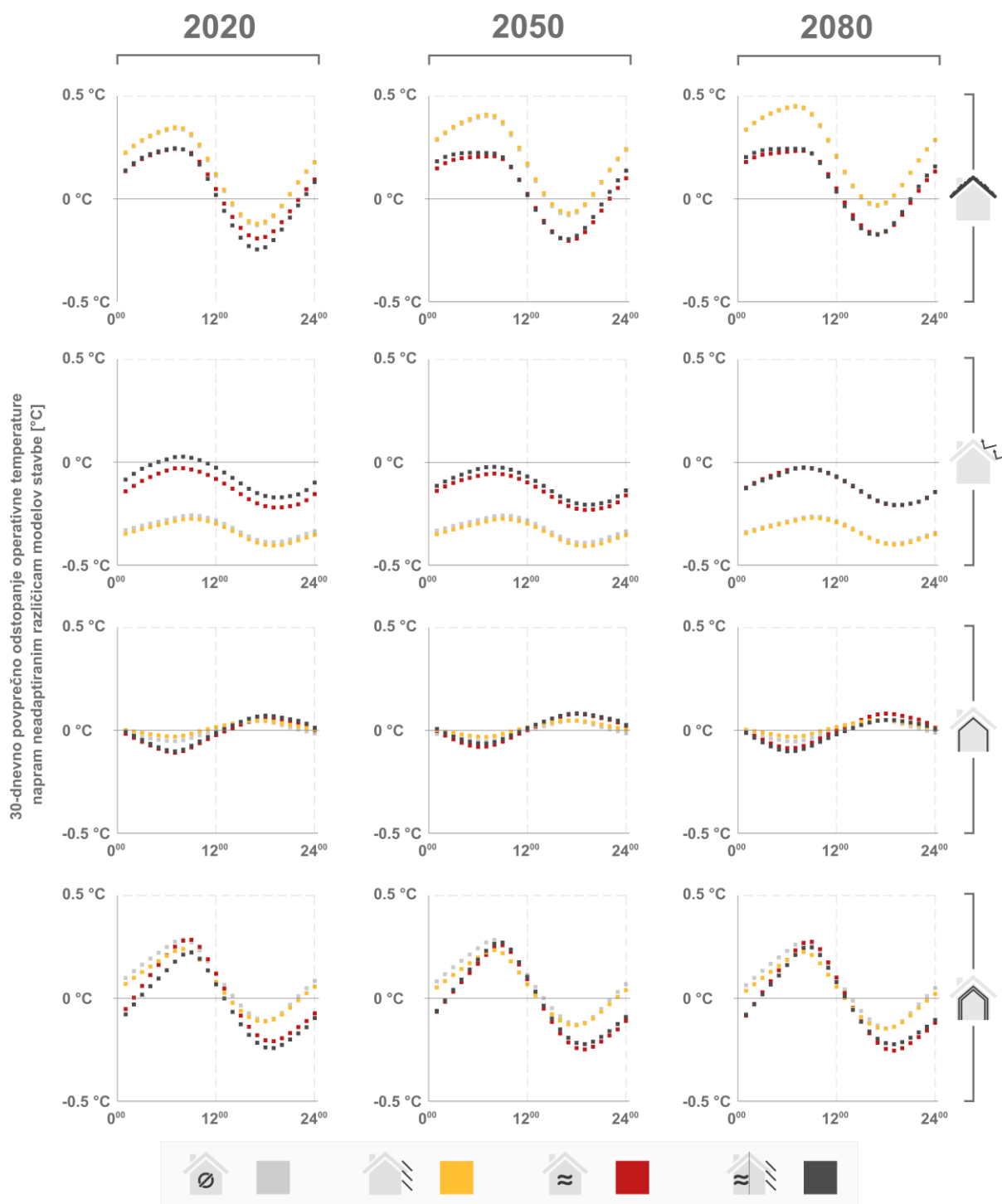
## Razlike toplotnega odziva: zgornje nadstropje



**Grafikon 11:** Grafikoni prikazujejo 30-dnevno povprečno odstopanje operativne temperature adaptiranih stavbnih modelov, merjene v zgornjem nadstropju, napram neadaptiranim različicam modelov (del 1/2). Opisi grafičnih oznak so podani v preglednici 9

**Chart 11:** Graphs show the 30-day average operative temperature deviation for the adapted building models (measured on the upper floor), compared to the unadapted model variants (part 1/2). Descriptions for the graphic labels are given in table 9

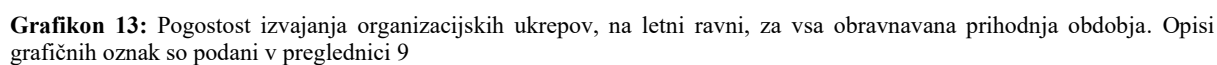
## Razlike toplotnega odziva: zgornje nadstropje



**Grafikon 12:** Grafikoni prikazujejo 30-dnevno povprečno odstopanje operative temperature adaptiranih stavbnih modelov, merjene v zgornjem nadstropju, napram neadaptiranim različicam modelov (del 2/2). Opisi grafičnih oznak so podani v preglednici 9

**Chart 12:** Graphs show the 30-day average operative temperature deviation for the adapted building models (measured on the upper floor), compared to the unadapted model variants (part 2/2). Descriptions for the graphic labels are given in table 9

Na grafikonu 13 so prikazani rezultati skupnega števila dni, v katerih bi bilo po zastavljenih temperaturnih kriterijih, v stavbi potrebno izvajati organizacijske ukrepe. Rezultati so za ukrep nočnega zračenja razdeljeni po posameznih etažah. Iz medsebojne primerjave posameznih prihodnjih obdobj je razvidno, da bo v prihodnosti potrebno organizacijske ukrepe izvajati bistveno bolj pogosto za omejitev pojava pregrevanja stavbe. V primerjavi s stanjem iz prvega prihodnjega obdobja, je na letni ravni pričakovati 83-odstoten povprečen porast izvajanja organizacijskih ukrepov v drugem obdobju, ter 202-odstoten povprečen porast v zadnjem obdobju.



**Chart 13:** Frequency of occupant organizational actions, on an annual basis, for all studied future periods. Descriptions for the graphic labels are given in table 9

## 4 DISKUSIJA

### 4.1 Umerjanje računskega modela

Rezultati študije dokazujejo, da predstavljena metodologija omogoča natančno umeritev toplotnega odziva naravno prezračevanih stavb, s pomočjo programskega orodja DesignBuilder (EnergyPlus). Metodologija se močno zanaša na doprinos uporabnikov stavbe pri beleženju urnikov senčenja, prezračevanja, delovanja električnih naprav in lastne prisotnosti. Pri vsaki od zabeleženih dejavnosti je prisotna določena napaka, ki je odvisna od marljivosti uporabnikov samih pri beleženju dogodkov. Kljub grobem pristopu beleženja dejavnosti, pa predstavlja uvoz urnikov senčenja in odpiranja oken, prisotnosti uporabnikov, ter delovanja naprav in ostalih toplotnih virov, daleč najbolj pomemben korak v celotnem procesu umerjanja modela stavbe. Pri tem pa je potrebno opozoriti, da je beleženje in vnos omenjenih urnikov v model, izjemno delovno intenziven in dolgotrajen proces, saj sem moral na mesečni ravni upoštevati tudi do približno 3000 posameznih dejavnosti.

Same umerjevalne meritve je sicer mogoče še nekoliko izpopolniti, in sicer sem po koncu študije identificiral naslednje spremenljivke, ki bi, v kolikor bi se le-te merile, lahko dodatno zmanjšale negotovost umerjenega modela:

- 1) Količina CO<sub>2</sub> v zraku znotraj in zunaj stavbe, za oceno infiltracije po času. Metodologijo za ta izračun, ki bi bila primerna za takšen tip stanovanjskih stavb z majhnim številom uporabnikov, so raziskali in potrdili Park *et al.* [53]. Izračunane približne vrednosti infiltracije, bi se, ob upoštevanju podatkov o razliki temperature suhega zraka znotraj in zunaj stavbe, ter smeri in hitrosti vetra, nato lahko uporabile za umeritev zrakotesnosti stavbnega ovoja.
- 2) Meritve hitrosti in smeri vetra, tudi za umeritev zrakotesnosti stavbnega ovoja. Od vseh meteoroloških spremenljivk, podatke katerih sem pridobil iz okoliških vremenskih postaj, je veter najbolj časovno in lokacijsko spremenljiv. V kolikor bi se hitrost in smer vetra merila na sami lokaciji, na primer na strehi stavbe, bi to lahko pripomoglo k zmanjšanju negotovosti modela.
- 3) Podrobnejše meritve površinske temperature stavbnega ovoja (z notranje strani), za umeritev solarne absorptivnosti le-tega. S postavitvijo merilcev površinske temperature na različno orientirane površine, na primer na južno in severno zunanjo steno, bi lahko enostavneje, ter z manjšo stopnjo negotovosti umerili solarno absorptivnost posameznih delov stavbnega ovoja. Vsi merilci, ki merijo določen segment stavbnega ovoja, morajo biti pri tem nameščeni na isti višini, s čimer se zmanjša napaka zaradi vertikalnega gradienta temperature suhega zraka. Dodatno morajo biti merilci nameščeni karseda stran od oken, s čimer se zmanjša napaka zaradi vdora zunanjega zraka med zračenjem stavbe.

Pri tem pa je potrebno opozoriti, da vsaka stavba predstavlja unikaten problem, zaradi česar je le-te pred začetkom umerjevalnih meritev potrebno natančno analizirati, da se določijo najbolj kritične spremenljivke, ki bi lahko vplivale na končni rezultat umerjanja modela. V ta namen so koristne tudi preliminarne meritve.

Toplotni odziv računskega modela stavbe sem v študiji umeril ob upoštevanju kriterijev in priporočil po smernici ASHRAE 14-2014. V smernici so navedene mejne vrednosti statističnih kazalnikov NMBE, CV(RMSE) in R<sup>2</sup>, kot indikatorjev uspešnosti umerjanja, vendar so le-te definirane samo z vidika rabe energije v stavbah. V času izvajanja študije nisem odkril nobenih standardov ali smernic, v katerih bi bile te mejne vrednosti podane za umerjanje modelov na podlagi temperature suhega zraka in/ali površinske temperature stavbnega ovoja. Kljub vsemu so se ti izbrani kriteriji izkazali za primerne, saj sem z umerjenim računskim modelom predvidel dejanski toplotni odziv stavbe z zadovoljivo natančnostjo  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  v 71,6 % oz.  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  v 98,4 % časa. V procesu umerjanja modela sicer nisem upošteval zgolj vrednosti statističnih indikatorjev, temveč tudi rezultate grafične analize S-M odstopanj. Slednji so se izkazali kot izredno koristno orodje za določitev najbolj primernih stavbnih parametrov potrebnih umeritve.

## 4.2 Prilagoditev modela na podnebne spremembe

Rezultati študije kažejo na to, da obravnavane prilagoditve na nivoju stavbe ne prispevajo veliko k omejevanju poletnega pregrevanja stavbe. V kombinaciji z določenimi organizacijskimi ukrepi, pa je njihov učinek lahko celo negativen. Z medsebojno primerjavo prilagoditev stavbe, na ravni povprečnega vročega poletnega dne, sem razkril njihov vpliv na toplotni odziv stavbnega modela. Nekatere različice prilagoditev stavbe učinkujejo skozi celoten dan ali pozitivno ali negativno, medtem ko je učinek pri ostalih mešan. V primeru slednjih se pozitivni učinki prilagoditev, ki so večinoma prisotni v drugi polovici dneva, zaradi negativnih učinkov na letni ravni deloma ali pa v celoti izničijo. Na tem delu bi se dalo argumentirati, da je delovanje prilagoditev stavbe bolj pomembno od cca. 16:00 do 6:00, ko je obravnavana stavba v povprečju najbolj zasedena. Kljub temu v izračunih toplotnega udobja uporabnikov, tega dejavnika nisem upošteval, saj obravnavana stavba skoraj nikoli ni povsem prazna. Na podlagi rezultatov študije sem naredil naslednje zaključke o obravnavanih prilagoditvah stavbe, z vidika omejevanja pojava pregrevanja:

- 1) **Vgradnja dodatnih senčil:** po pričakovanjih ta prilagoditev stavbe deluje najbolje v kombinaciji z izvajanjem ukrepa senčenja. Prilagoditev dobro deluje tudi v kombinaciji z izvajanjem ukrepa nočnega zračenja in senčenja, vendar pa je njen doprinos pri tem znatno manjši, kar kaže na to, da pri tem ukrepu prevladuje učinek nočnega zračenja. Prilagoditev zmanjša pojav pregrevanja na ravni celotnega dne, pri čemer je njen doprinos najbolj opazen v popoldnevu.
- 2) **Dodatna toplotna izolacija zunanjih sten:** učinek te prilagoditve je v veliki meri odvisen od vrste organizacijskega ukrepa, v kombinaciji s katerim se izvaja. V primeru neizvajanja ukrepov in izvajanja ukrepa senčenja je učinek prilagoditve negativen, saj močno poveča pojav pregrevanja stavbe. Nasproten pojav je opazen v primeru izvajanja ukrepa nočnega zračenja, kjer prilagoditev stavbe v prvi in zadnji tretjini dneva dejansko izboljša stanje. Ti rezultati pričajo o tem, da ta prilagoditev stavbe samostojno (brez organizacijskih ukrepov) ne deluje ustrezno. Prilagoditev deluje tako, da zmanjša toplotni tok skozi zunanje stene - to je koristno kadar je zunaj stavbe bolj vroče kot znotraj - hkrati pa je škodljivo, ko je situacija obrnjena. Zaradi izboljšane toplotne izolativnosti zunanjih sten in posledično manjših toplotnih izgub, se je stavba v nočnem času, ko so bile zunanje razmere primerne za pasivno hlajenje, zato ohlajevala bistveno počasneje. To je razlog zakaj prilagoditev deluje pozitivno samo v kombinaciji z izvajanjem nočnega zračenja, saj le-to predstavlja znatno hitrejši način odvajanja segretega zraka iz stavbe. V primeru izvajanja ukrepa nočnega zračenja je sicer ta prilagoditev najboljša možna izbira, saj močno zmanjša pojav neželenega podhlajevanja stavbe.
- 3) **Zelena streha:** zaradi združenega učinka evapotranspiracije, dodatne toplotne mase zaradi substrata in senčenja, ki ga nudi zelenje, bi morala biti ta prilagoditev zelo učinkovita z vidika omejevanja pojava pregrevanja. Nepričakovano pa je bil učinek prilagoditve povečini nevtralen, v določenih primerih pa celo negativen. Na podlagi rezultatov raziskave, ki so jo izvedli D'Orazio *et al.* [49], bi lahko sklepal, da je vzrok za neučinkovitost prilagoditve nizka toplotna prevodnost strehe, vendar pa bi bilo to v nasprotju z rezultati prilagoditve z nižjo solarno absorptivnostjo strešnikov, ki je dosti bolj učinkovita s tega vidika. Razlog za slabo delovanje prilagoditve je tako najverjetneje v načinu simulacije delovanja zelenih streh v programskem orodju EnergyPlus. Drug razlog bi bil lahko tudi zračni sloj pod strešniki, ki sem ga v primeru te prilagoditve odstranil, vendar pa so za zaključek potrebne dodatne eksperimentalne raziskave.
- 4) **Sprememba solarne absorptivnosti strehe:** ta prilagoditev stavbe predstavlja najboljšo možno izbiro, z vidika omejevanja pojava pregrevanja, v kombinaciji brez izvajanja organizacijskih ukrepov. Prilagoditev deluje zelo dobro tudi v kombinaciji z izvajanjem ukrepa senčenja, medtem ko je njen učinek znatno skromnejši v kombinaciji z izvajanjem ukrepa nočnega

zračenja. Ti rezultati poudarjajo pomembnost uporabe svetlih materialov v stavbnem ovoju, kot pasivni ukrep za preprečevanje pregrevanja.

- 5) **Dodatna toplotna masa (1. stopnja):** učinek te prilagoditve na toplotni odziv modela stavbe je v vseh pogledih zanemarljiv.
- 6) **Dodatna toplotna masa (2. stopnja):** ta prilagoditev stavbe je podobna različici z dodatno toplotno izoliranimi zunanji steni, saj prav tako deluje najbolje v kombinaciji z izvajanjem ukrepa nočnega zračenja. Vendar pa je vpliv te prilagoditve na toplotni odziv modela stavbe popolnoma drugačen, in sicer le-ta prispeva k intenzivnosti pregrevanja v prvi polovici dneva, medtem ko v drugi polovici dneva deluje ravno nasprotno. Ti učinki se na letni ravni praktično izničijo, tako da prilagoditev, z vidika omejevanja pojava pregrevanja, v kombinaciji brez izvajanja ukrepov in izvajanjem ukrepa senčenja rahlo poslabša stanje, medtem ko ga rahlo izboljša v kombinaciji z izvajanjem ukrepa nočnega zračenja.

Teh šest obravnavanih primerov sicer predstavlja le peščico od nešteti možnih prilagoditev stavbe, ki bi jih v študiji lahko preučil. Eno od takšnih prilagoditev, učinkovitost katere so dokazali že Pajek *et al.* [54], predstavljajo fazno spremenljivi materiali. Teh materialov v študiji nisem analiziral, saj sem model stavbe umeril na podlagi metode stanja prostora, medtem ko se v programskem orodju EnergyPlus njihovo delovanje lahko simulira le na podlagi metode končnih razlik. Fazno spremenljivi materiali definitivno predstavljajo zanimivo področje za nadaljnje raziskave.

V primerjavi z obravnavanimi prilagoditvami stavbe, so organizacijski ukrepi bistveno bolj učinkoviti pri omejevanju poletnega pregrevanja stavbe. Poleg tega za njihovo izvajanje ne potrebujemo dodatnih denarnih vložkov, saj izkoriščajo samo že vgrajene stavbne elemente. Edina pomanjkljivost organizacijskih ukrepov je, da ne delujejo pasivno kot prilagoditve stavbe, saj terjajo čas in trud uporabnikov ali pa uporabo avtomatiziranega sistema za nadzor njihovega delovanja. Na podlagi rezultatov študije sem tudi za organizacijske ukrepe naredil naslednje zaključke:

- 1) **Senčenje z uporabo zunanjih senčil:** ta ukrep je najbolj primeren za izvajanje v prvem prihodnjem obdobju, ko je pojav pregrevanja manj pogost in izrazit, hkrati pa je zunaj ponoči še toliko hladno, da obstaja nevarnost podhlajevanja v primeru izvajanja ukrepa nočnega zračenja. V drugem in predvsem tretjem prihodnjem obdobju pa ukrep ne predstavlja več tako primerne rešitve, saj z izvajanjem le-tega ni mogoče doseči enakega nivoja toplotnega udobja kot v prvem prihodnjem obdobju. Očitno je, da je ukrep manj učinkovit v primeru ekstremno vročih poletnih dni, ki so predvideni v prihodnosti. Ta pomanjkljivost je razvidna v rezultatih, kjer je kljub rednejšemu izvajanju ukrepa v zadnjih dveh prihodnjih obdobjih, prispevek le-tega k trajanju toplotnega udobja praktično enak v vseh treh obravnavanih obdobjih. Ukrep deluje najbolje v kombinaciji s prilagoditvijo dodatnih zunanjih senčil.
- 2) **Nočno zračenje:** izvajanje ukrepa predstavlja izjemno učinkovito rešitev, saj v prvih dveh prihodnjih obdobjih praktično izniči pojav pregrevanja modela stavbe, medtem ko ga v zadnjem obdobju zniža na zmerno raven. Kljub temu pa ima izvajanje ukrepa veliko pomanjkljivost, in sicer obstaja nevarnost podhlajevanja stavbe, do te mere da uporabniki občutijo toplotno neudobje. Rezultati kažejo na to, da je ta negativni pojav možno nekoliko omiliti z izboljšanjem toplotne izolativnosti stavbnega ovoja ali pa z avtomatizacijo odpiranja oken (upravljanje na podlagi temperature notranjega suhega zraka).
- 3) **Kombinacija senčenja in nočnega zračenja:** ker je izvajanje ukrepa nočnega zračenja v prvih dveh prihodnjih obdobjih že samo po sebi zelo učinkovito, tudi kombiniranje s senčenjem ne pripomore k izboljšanju toplotnega udobja uporabnikov. Manjše razlike so opazne šele v tretjem prihodnjem obdobju, kjer kombiniranje obeh ukrepov nekoliko skrajša trajanje pojava pregrevanja, vendar ga tudi ne izniči v celoti.

### 4.3 Odgovori na raziskovalna vprašanja

**»Katere so, z vidika toplotnega udobja uporabnikov, najbolj učinkovite kombinacije prilagoditev na nivoju stavbe in organizacijskih ukrepov za preprečevanje pregrevanja obravnavane stavbe v prihodnosti?«**

Učinkovitost kombinacij prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov se najbolje odraža v njihovem prispevku k trajanju toplotnega udobja uporabnikov, napram primerjalnemu modelu stavbe. V preglednici 11 so te vrednosti podane za šest najbolj učinkovitih kombinacij prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov v vsakem od prihodnjih obdobj. V prvem prihodnjem obdobju predstavlja najbolj učinkovito rešitev kombinacija prilagoditve z dodatno toplotno izoliranimi zunanji stenami in izvajanje ukrepa nočnega zračenja (brez ali s senčenjem), v drugem obdobju je to kombinacija prilagoditve z dodatno toplotno izoliranimi zunanji stenami in izvajanje ukrepa nočnega zračenja, medtem ko je v zadnjem obdobju to kombinacija prilagoditve z dodatno toplotna maso (2. stopnja) in izvajanja ukrepa nočnega zračenja s senčenjem. Vendar pa zaradi majhnih razlik med posameznimi kombinacijami, ti rezultati ne prikažejo celotne slike. Na tem mestu so tako bolj pomembne naslednje ugotovitve:

- pri omejevanju pojava pregrevanja naravno prezračevane stavbe, ki nima vgrajenih sistemov aktivnega hlajenja, igrajo organizacijski ukrepi primarno vlogo, medtem ko so zaradi relativno nizkega učinka prilagoditve stavbe sekundarnega pomena,
- ukrep senčenja predstavlja primerno rešitev samo v prvem prihodnjem obdobju, medtem ko je ukrep nočnega zračenja (s senčenjem) priporočljiv v vseh treh obdobjih. Pri izvajanju slednjega obstaja nevarnost pojava podhlajevanja stavbe, ki je prisotna predvsem v prvem prihodnjem obdobju, in
- od obravnavanih prilagoditev stavbe so za omiljevanje pojava pregrevanja najbolj primerne prilagoditev z vgrajenimi dodatnimi senčili, prilagoditev z nižjo solarno absorptivnostjo strešnikov, ter prilagoditev z dodatno toplotna maso (2. stopnja). Za omiljevanje pojava podhlajevanja stavbe med izvajanjem nočnega zračenja pa je najbolj primerna prilagoditev z dodatno toplotno izoliranimi zunanji stenami.

**Preglednica 11:** Prispevki k trajanju toplotnega udobja so prikazani za 6 najbolj učinkovitih kombinacij prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, v vsakem izmed treh prihodnjih obdobj. Vrednosti prispevkov so izračunane napram primerjalnemu modelu stavbe, v skladu z najstrožjim nivojem sprejemljivosti v standardu prEN 16798-1 [50]. Opisi grafičnih oznak so podani v preglednici 9

**Table 11:** Improvements to the duration of thermal comfort are shown for the 6 most efficient building adaptations and occupant organizational actions combinations, in each of the three future periods. Thermal comfort improvement values are calculated based on the building comparative model under the strictest level of acceptability in the prEN 16798-1 standard [50]. Descriptions for the graphic labels are given in table 9

| Prihodnja časovna obdobja                                                                                                                                                 |          |                                                                                                                                                                           |           |                                                                                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2011–2040 (»2020«)                                                                                                                                                        |          | 2041–2070 (»2050«)                                                                                                                                                        |           | 2071–2100 (»2080«)                                                                                                                                                            |           |
|  X  | + 7,50 % |  X  | +12,98 %  |  X  | + 23,43 % |
|  X  | + 7,48 % |  X  | + 12,63 % |  X  | + 23,13 % |
|  X  | + 6,39 % |  X  | + 12,34 % |  X  | + 23,12 % |
|  X  | + 5,90 % |  X  | + 12,32 % |  X  | + 23,10 % |
|  X  | + 5,89 % |  X  | + 11,83 % |  X  | + 23,07 % |
|  X  | + 5,63 % |  X  | + 11,76 % |  X  | + 22,96 % |

### »Ali lahko določene kombinacije prilagoditev na nivoju stavbe in organizacijskih ukrepov negativno vplivajo na toplotno udobje?«

Tri izmed 28 analiziranih kombinacij prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov imajo negativen vpliv na toplotno udobje uporabnikov. Vrednosti skrajšanega trajanja toplotnega udobja na letni ravni, napram primerjalnemu modelu stavbe, so za te tri kombinacije prikazane v preglednici 12. V vseh treh prihodnjih obdobjih predstavlja najslabšo rešitev kombinacija prilagoditve z dodatno toplotno izoliranimi zunanji stenami in neizvajanje organizacijskih ukrepov. Vsem trem negativno delujočim kombinacijam je sicer skupno to, da se organizacijski ukrepi niso izvajali. Zaradi tega je potrebno poudariti, da prilagoditvi z dodatno toplotno maso oz. z dodatno toplotno izoliranimi zunanji stenami, same po sebi še ne prispevata k izboljšanju toplotnega udobja uporabnikov, temveč je potrebno poleg prilagoditve dodatno izvajati tudi ukrep nočnega zračenja (s ali brez senčenja).

**Preglednica 12:** Vrednosti skrajšanega trajanja toplotnega udobja na letni ravni, napram primerjalnemu modelu stavbe, so prikazane za vse kombinacije prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, kjer je ta negativni pojav prisoten. Vrednosti so izračunane v skladu z najstrožjim nivojem sprejemljivosti po standardu prEN 16798-1 [50]. Opisi grafičnih oznak so podani v preglednici 9

**Table 12:** Values of the reduced yearly thermal comfort duration, with respect to the comparative building model, are shown for all combinations of building adaptations and occupant organizational actions, where this negative phenomenon is present. The values are calculated under the strictest level of acceptability in the prEN 16798-1 standard [50]. Descriptions for the graphic labels are given in table 9

| Prihodnja časovna obdobja                                                           |          |                                                                                     |          |                                                                                       |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 2011–2040 (»2020«)                                                                  |          | 2041–2070 (»2050«)                                                                  |          | 2071–2100 (»2080«)                                                                    |          |
|  | – 0,56 % |  | – 3,03 % |  | – 4,75 % |
|  | – 0,08 % |  | – 0,41 % |  | – 0,85 % |
|                                                                                     |          |  | – 0,21 % |  | – 0,30 % |

### »Ali bo v prihodnosti v stavbi možno zagotoviti toplotno udobje v poletnem obdobju, brez uporabe mehanskega hlajenja?«

V preglednici 13 so prikazani rezultati toplotnega udobja uporabnikov za vse tri nivoje sprejemljivosti po standardu prEN 16798-1 [50]. V rezultatih so izpostavljene tiste kombinacije prilagoditev stavbe in organizacijskih ukrepov, kjer je bilo toplotno udobje doseženo v vsaj 95 oz. 99 % leta. Tudi ob upoštevanju najmanj strogega nivoja sprejemljivosti, ni bilo pri nobeni izmed obravnavanih kombinacij mogoče doseči popolnega toplotnega udobja. Kljub temu pa so rezultati vzpodbudni, saj dokazujejo, da je z izvajanjem ukrepa nočnega zračenja (s ali brez senčenja), možno doseči zelo visok nivo toplotnega udobja v vseh treh prihodnjih obdobjih. Na tej točki pa so za bolj podroben odgovor potrebne dodatne študije, v katerih bi se lahko analiziral učinek kombiniranja najbolj učinkovitih obravnavanih prilagoditev stavbe ali pa integriranja fazno spremenljivih materialov v stavbni ovoj.



**Preglednica 13:** Poenostavljeni rezultati toplotnega udobja uporabnikov, za vse tri nivoje sprejemljivosti po standardu prEN 16798-1 [50]. Opisi grafičnih oznak so podani v preglednici 9

**Table 13:** Simplified occupant thermal comfort results, for all three acceptability levels in accordance with the prEN 16798-1 standard [50]. Descriptions for the graphic labels are given in table 9

| Kategorije toplotnega udobja | Prihodnja časovna obdobja |   |     |     |                    |   |     |     |                    |  |     |     |
|------------------------------|---------------------------|---|-----|-----|--------------------|---|-----|-----|--------------------|--|-----|-----|
|                              | 2011–2040 (»2020«)        |   |     |     | 2041–2070 (»2050«) |   |     |     | 2071–2100 (»2080«) |  |     |     |
|                              |                           |   |     |     |                    |   |     |     |                    |  |     |     |
| Kategorija I                 |                           |   |     |     |                    |   |     |     |                    |  | ○   | ○   |
|                              |                           |   |     |     |                    |   |     |     |                    |  | ○   | ○   |
|                              |                           |   |     |     |                    |   |     |     |                    |  |     | ○   |
|                              |                           |   |     |     |                    |   |     |     |                    |  |     |     |
|                              |                           |   |     |     |                    |   |     |     |                    |  |     |     |
|                              |                           |   |     |     |                    |   |     |     |                    |  | ○   | ○   |
|                              |                           |   |     |     |                    |   |     |     |                    |  | ○   | ○   |
| Kategorija II                |                           |   | ○○  | ○○  |                    |   | ○○  | ○○  |                    |  | ○   | ○○  |
|                              |                           |   | ○○  | ○○  |                    |   | ○○  | ○○  |                    |  | ○   | ○   |
|                              |                           |   | ○○  | ○○  |                    |   | ○○  | ○○  |                    |  |     | ○○  |
|                              |                           |   | ○○  | ○○  |                    |   | ○○  | ○○  |                    |  | ○   | ○○  |
|                              |                           |   | ○○  | ○○  |                    |   | ○○○ | ○○○ |                    |  |     | ○   |
|                              |                           |   | ○○  | ○○  |                    |   | ○○  | ○○  |                    |  |     | ○   |
|                              |                           |   | ○○  | ○○  |                    |   | ○○  | ○○  |                    |  | ○   | ○   |
| Kategorija III               |                           | ● | ○○● | ○○● | ○○○                | ● | ○○● | ○○● |                    |  | ○○● | ○○● |
|                              |                           | ● | ○○● | ○○○ | ○○○                | ● | ○○● | ○○● |                    |  | ○○● | ○○● |
|                              |                           | ● | ○○● | ○○● | ○○●                | ● | ○○● | ○○● |                    |  | ○○● | ○○● |
|                              |                           | ● | ○○● | ○○○ | ○○○                | ● | ○○● | ○○● |                    |  | ○○● | ○○● |
|                              |                           | ● | ○●  | ○○● | ○○●                | ○ | ○○● | ○○● |                    |  | ○○● | ○○● |
|                              |                           | ● | ○○● | ○○○ | ○○○                | ● | ○○● | ○○● |                    |  | ○○● | ○○● |
|                              |                           | ● | ○○● | ○○○ | ○○○                | ● | ○○● | ○○● |                    |  | ○○● | ○○● |

○ Toplotno udobje je doseženo v vsaj 95 % leta

● Toplotno udobje je doseženo v vsaj 99 % leta

○○● Število etaž v katerih je bilo doseženo toplotno udobje

## 5 ZAKLJUČEK

Rezultati predstavljene študije pričajo o pomembnosti razumevanja potencialnih vplivov podnebnih sprememb na toplotni odziv obstoječega stavbnega fonda. Z uporabo umerjenega računskega modela sem uspel dokazati, da se bo obravnavana stavba v prihodnosti bistveno bolj pogosto pregrevala, hkrati pa bodo ti pojavi bolj izraziti. Brez implementacije ustreznih ukrepov hlajenja je za pričakovati, da bo stavba v svoji življenjski dobi v poletnem obdobju postala neprimerna za bivanje. Da bi negiral ali vsaj omilil te spremembe, sem v študiji analiziral učinek različnih prilagoditev na nivoju stavbe in organizacijskih ukrepov na toplotno udobje uporabnikov, pri čemer sem prišel do zaključka, da predstavljajo organizacijski ukrepi zelo učinkovito rešitev za hlajenje stavbe, medtem ko so rezultati prilagoditev na nivoju stavbe občutno skromnejši. Kljub temu pa lahko prilagoditve stavbe, v kombinaciji z izvajanjem organizacijskih ukrepov, pripomorejo k izboljšanju toplotnega udobja uporabnikov, tako z vidika omiljevanja pregrevanja, kot tudi z vidika omiljevanja podhlajevanja, do katerega lahko pride v primeru izvajanja nočnega zračenja. Pri tem je potrebno dodati, da bodo uporabniki primorani organizacijske ukrepe v prihodnosti izvajati vedno bolj pogosto, medtem ko prilagoditve stavbe delujejo pasivno in brez prestanka.

Ta študija ima dve omejitvi, ki sta povezani z rezultati nekaterih prilagoditev na nivoju stavbe in ki bi ju morali obravnavati v prihodnjih raziskavah:

- 1) Pri modeliranju prilagoditev stavbe sem spreminjal le tiste parametre, ki so se neposredno navezovali na prilagoditev. Morebitnega izboljšanja zrakotesnosti stavbnega ovoja, ki je povezano z vgradnjo dodatnih materialov v toplotni ovoj, pri tem nisem upošteval. Brez dodatnih analiz tega dejavnika nisem mogel kvantificirati, zaradi česar so lahko opisani učinki določenih prilagoditev stavbe lahko nekoliko podcenjeni.
- 2) Prilagoditev z zeleno streho se je obnesla pod pričakovanji; razlog za to je najverjetneje v načinu simulacije odziva zelenih streh v programskem orodju EnergyPlus. Za bolj jasen odgovor so na tem mestu potrebne dodatne študije, v katerih bi se primerjala dejanski in simulirani odziv zelene strehe v podobnih podnebnih razmerah.

Prihodnje raziskave bi se morale usmeriti še na širši spekter obstoječega stavbnega fonda, kot so stavbe iz različnih časovnih obdobj, iz večih skupin energijske učinkovitosti in stopenj toplotne mase zunanjega ovoja, za katere bi se analizirali predvideni toplotni odzivi v prihodnosti in določili primerni ukrepi hlajenja. Cilj raziskav bi moral biti, da se v čimvečji meri zmanjša potreba po rabi aktivnega hlajenja vseh obstoječih stavb v prihodnosti, ob istočasnem ohranjanju toplotnega udobja stanovalcev. Pri tem je lahko v veliko pomoč opisana študija, katere največjo odliko predstavlja podrobno opisan dopolnjen postopek umerjanja računskega modela enodružinske naravno prezračevane stavbe, na podlagi katerega sem z zadovoljivo stopnjo natančnosti uspel simulirati dejanski toplotni odziv stavbe.

## VIRI

- [1] IPCC. 2021. AR 6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
- [2] WMO. 2021. State of the Global Climate 2020.
- [3] Mima, S., Criqui, P. 2015. The Costs of Climate Change for the European Energy System, an Assessment with the POLES Model. *Environmental Modeling & Assessment*, 20(4), 303–319. <https://doi.org/10.1007/s10666-015-9449-3>
- [4] Oropeza-Perez, I., Østergaard, P. A. 2018. Active and passive cooling methods for dwellings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 531–544. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.059>
- [5] Ascione, F. 2017. Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling. *Solar Energy*, 154, 34–100. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.022>
- [6] Evropska komisija. 2019. Evropski zeleni dogovor
- [7] De Bono, A., Giuliani, G., Kluser, S., Peduzzi, P. 2004. Impacts of summer 2003 heat wave in Europe. *United Nations Environment Programme*.
- [8] Vidrih, B., Medved, S. 2008. The effects of changes in the climate on the energy demands of buildings. *International Journal of Energy Research*, 32(11), 1016–1029. <https://doi.org/10.1002/er.1410>
- [9] Rodrigues, L. T., Gillott, M., Tetlow, D. 2013. Summer overheating potential in a low-energy steel frame house in future climate scenarios. *Sustainable Cities and Society*, 7, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.03.004>
- [10] van Hooff, T., Blocken, B., Timmermans, H., Hensen, J. 2016. Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building. *Energy*, 94, 811–820. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.036>
- [11] Dodoo, A., Gustavsson, L. 2016. Energy use and overheating risk of Swedish multi-storey residential buildings under different climate scenarios. *Energy*, 97, 534–548. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.086>
- [12] Berger, T., Amann, C., Formayer, H., Korjenic, A., Pospichal, B., Neururer, C., & Smutny, R. 2016. Impacts of external insulation and reduced internal heat loads upon energy demand of offices in the context of climate change in Vienna, Austria. *Journal of Building Engineering*, 5, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.11.005>
- [13] Pajek, L., Košir, M. 2021. Exploring Climate-Change Impacts on Energy Efficiency and Overheating Vulnerability of Bioclimatic Residential Buildings under Central European Climate. *Sustainability*, 13(12), 6791. <https://doi.org/10.3390/su13126791>
- [14] 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. *Applied Energy*, 178, 363–375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.036>
- [15] ASHRAE Guideline 14. 2014. Measurement of Energy and Demand Savings. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- [16] Ruiz, G., Bandera, C. 2017. Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors. *Energies*, 10(10), 1587. <https://doi.org/10.3390/en10101587>

- [17] IPMVP. 2002. International Performance Measurement and Verification Protocol. *IPMVP*
- [18] Reddy, A., Maor, I. 2007. Procedures for Reconciling Computer-Calculated Results With Measured Energy Data. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*
- [19] ASHRAE Fundamentals. 2009. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- [20] Reddy, T. A. 2006. Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools. *ASHRAE*.
- [21] Fabrizio, E., Monetti, V. 2015. Methodologies and Advancements in the Calibration of Building Energy Models. *Energies*, 8(4), 2548–2574. <https://doi.org/10.3390/en8042548>
- [22] Clarke, J., Strachan, C., Pernot, C. 1993. An approach to the calibration of building energy simulation models. *Engineering*.
- [23] Raftery, P., Keane, M., Costa, A. 2009. Calibration of a detailed simulation model to energy monitoring system data: a methodology and case study. *Building simulation*.
- [24] DesignBuilder. (Pridobljeno: 15.5.2020) <https://designbuilder.co.uk/download>
- [25] Gucyeter, B. 2018. Calibration of a building energy performance simulation model via monitoring data. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- [26] Arhiv meteoroloških meritev ARSO. (Pridobljeno: 1.12.2020) <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>
- [27] EnergyPlus. (Pridobljeno: 15.5.2020) <https://energyplus.net/>
- [28] Fumo, N., Mago, P., Luck, R. 2010. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. *Energy and Buildings*, 42(12), 2331–2337. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.027>
- [29] Tehnična smernica TSG-1-004:2010: Učinkovita raba energije
- [30] EngineeringToolBox. (Pridobljeno: 10.12.2020) [https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)
- [31] Pomoč DesignBuilder. (Pridobljeno: 20.12.2020) <https://designbuilder.co.uk/helpv6.0/>
- [32] Jones, B. M., Cook, M. J., Fitzgerald, S. D., Iddon, C. R. 2016. A review of ventilation opening area terminology. *Energy and Buildings*, 118, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.053>
- [33] von Grabe, J. 2013. Flow resistance for different types of windows in the case of buoyancy ventilation. *Energy and Buildings*, 65, 516–522. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.035>
- [34] Menchaca Brandan, M. A., Espinosa, D. 2018. Modeling natural ventilation in early and late design stages: developing the right simulation workflow with the right inputs. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- [35] Issi, F., Kaplan, O. 2018. The Determination of Load Profiles and Power Consumptions of Home Appliances. *Energies*, 11(3), 607. <https://doi.org/10.3390/en11030607>
- [36] Suszanowicz, D. 2017. Internal heat gain from different light sources in the building lighting systems. *E3S Web of Conferences*, 19, 01024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171901024>

- [37] ASHRAE Fundamentals. 2009. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- [38] Charisi, S., Waszczuk, M., Thiis, T. K. 2017. Investigation of the pressure coefficient impact on the air infiltration in buildings with respect to microclimate. *Energy Procedia*, 122, 637–642. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.362>
- [39] Cóstola, D., Alucci, M. 2007. Pressure coefficient simulated by CFD for wind-driven ventilation analysis. *Building Simulation*
- [40] Liddament, M. W. 1986. Air Infiltration Calculation Techniques - An Applications Guide. *The Air Infiltration and Ventilation Centre*
- [41] Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja. 2018. *Agencija Republike Slovenije za okolje in prostor.*
- [42] Climate Change 2001: Synthesis Report. 2001. *Press syndicate of the University of Cambridge*
- [43] Hulme, M., Mitchell, J., Ingram, W., Lowe, J., Johns, T., New, M., Viner, D. 1999. Climate change scenarios for global impacts studies. *Global Environmental Change*, 9, S3–S19. [https://doi.org/10.1016/s0959-3780\(99\)00015-1](https://doi.org/10.1016/s0959-3780(99)00015-1)
- [44] WorldWeatherGen: Projekcije podnebnih sprememb. (Pridobljeno: 4.1.2021) <https://energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/>
- [45] Moazami, A., Carlucci, S., Geving, S. 2017. Critical Analysis of Software Tools Aimed at Generating Future Weather Files with a view to their use in Building Performance Simulation. *Energy Procedia*, 132, 640–645. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.701>
- [46] Belcher, S., Hacker, J., Powell, D. 2005. Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(1), 49–61. <https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>
- [47] Jentsch, M. F., Bahaj, A. S., James, P. A. 2008. Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, 40(12), 2148–2168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>
- [48] Elements: Urejanje vremenskih datotek. (Pridobljeno: 5.1.2021) <https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>.
- [49] D’Orazio, M., di Perna, C., di Giuseppe, E. 2012. Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate. *Energy and Buildings*, 55, 439–451. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.009>
- [50] 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
- [51] Kazanci, O. B., Coakley, D., Olesen, B. W. 2019. A Review of Adaptive Thermal Comfort Implementation in International Thermal Comfort Standards. *ASHRAE Annual Conference*
- [52] Carlucci, S., Bai, L., de Dear, R., Yang, L. 2018. Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Building and Environment*, 137, 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>

- [53] Park, S., Choi, P., Song, D., Koo, J. 2021. Estimation of the real-time infiltration rate using a low carbon dioxide concentration. *Journal of Building Engineering*, 42, 102835. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102835>
- [54] Pajek, L., Hudobivnik, B., Kunič, R., Košir, M. 2017. Improving thermal response of lightweight timber building envelopes during cooling season in three European locations. *Journal of Cleaner Production*, 156, 939–952. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.098>

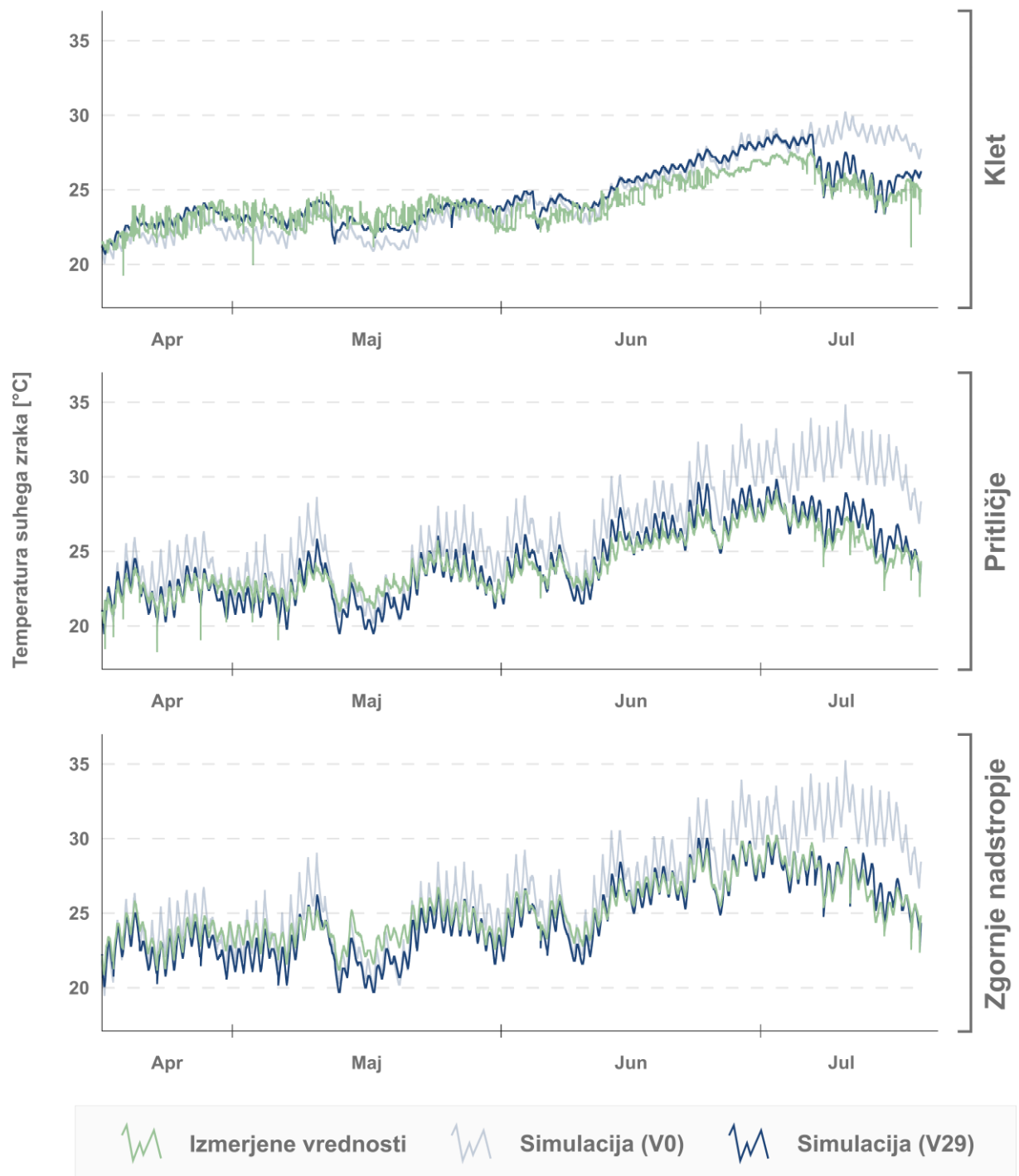


## SEZNAM PRILOG

|                                                                                              |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>PRILOGA A: Preostali rezultati umerjanja računskega modela stavbe.....</b>                | <b>1</b> |
| Razlike med merjenim in simuliranim toplotnim odzivom stavbe (temperatura suhega zraka)..... | 1        |
| Razlike med merjenim in simuliranim toplotnim odzivom stavbe (površinska temperatura).....   | 2        |
| Povprečna umerjenost modela stavbe za kazalnik CV(RMSE).....                                 | 3        |
| Povprečna umerjenost modela stavbe za kazalnik $R^2$ .....                                   | 4        |

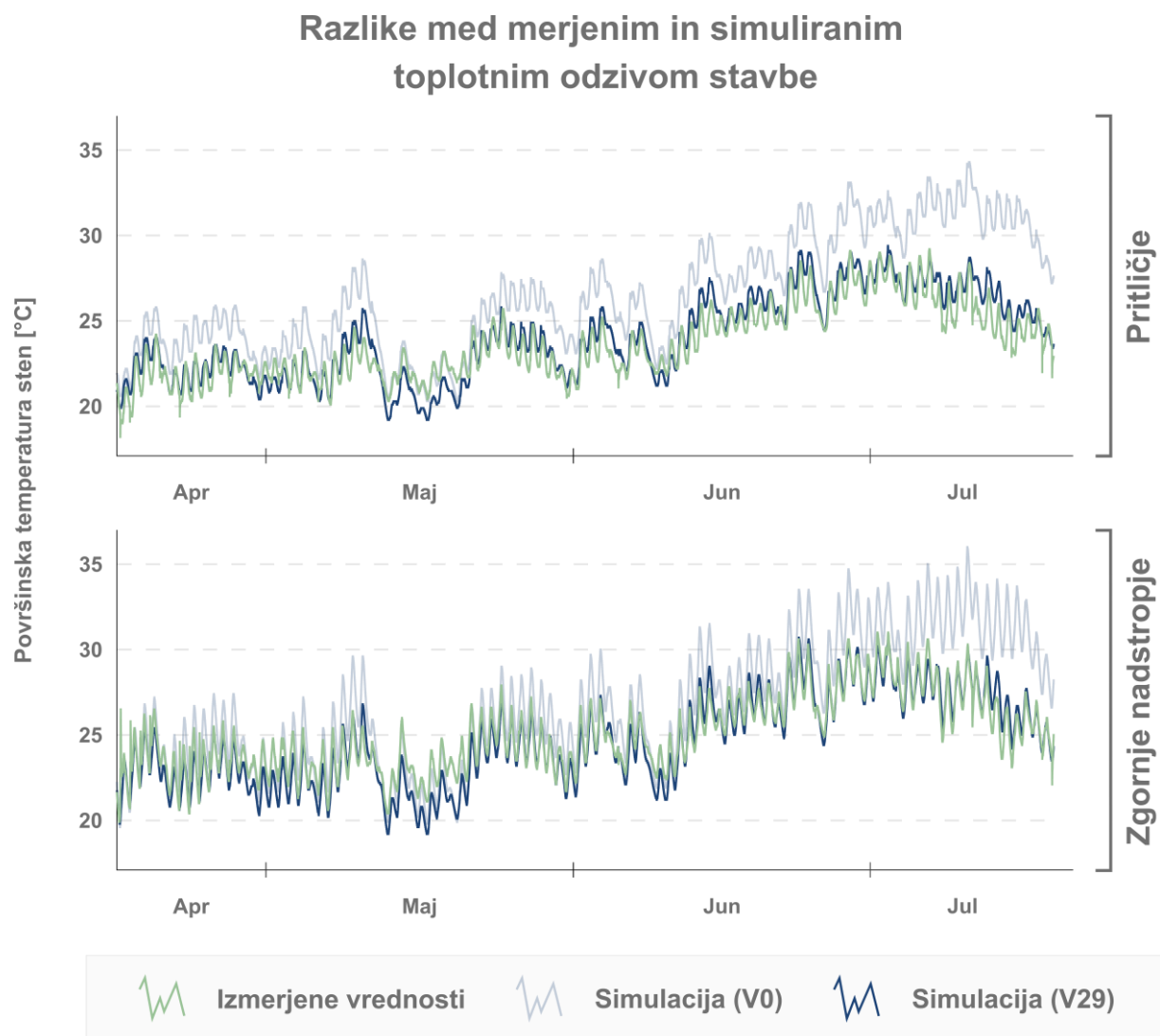


## Razlike med merjenim in simuliranim toplotnim odzivom stavbe



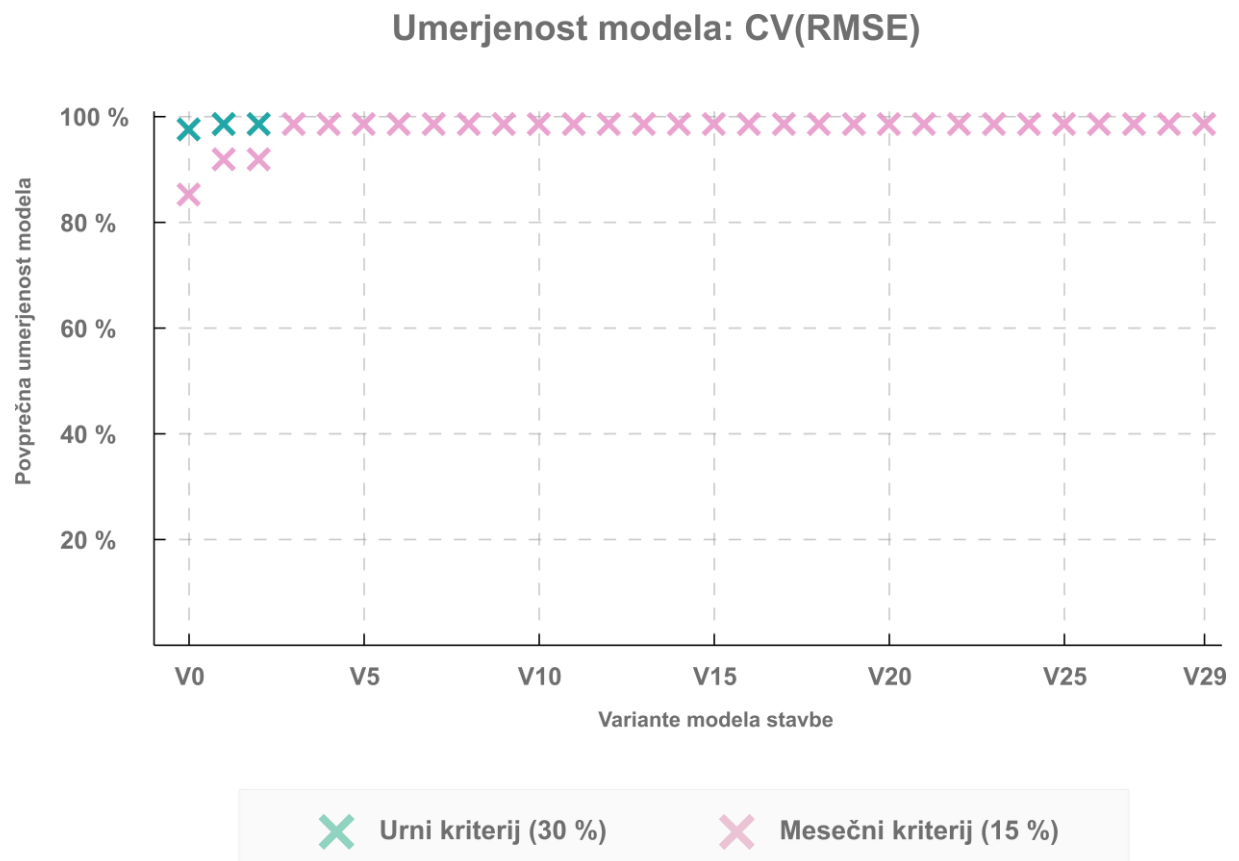
**Grafikon A 1:** Primerjava izmerjenega in simuliranega toplotnega odziva stavbe (temperatura suhega zraka) v vseh treh etažah. Simulirani toplotni odziv stavbe je prikazan za izhodiščni (V0) in končni umerjeni model (V29)

**Chart A 1:** Comparison of the measured and simulated building thermal response (dry-bulb temperature) on all floors. Simulated building thermal response is shown for the baseline (V0) and final calibrated model (V29)



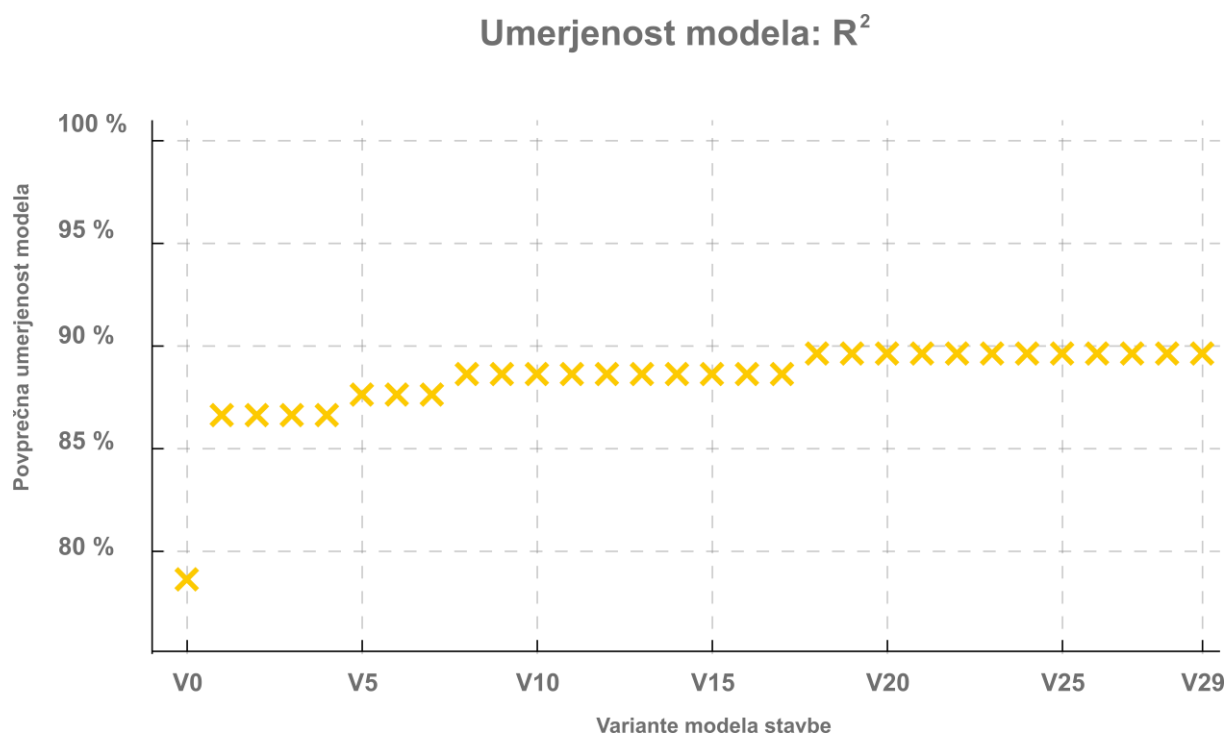
**Grafikon A 2:** Primerjava izmerjenega in simuliranega toplotnega odziva stavbe (površinska temperatura sten) v vseh treh etažah. Simulirani toplotni odziv stavbe je prikazan za izhodiščni (V0) in končni umerjeni model (V29)

**Chart A 2:** Comparison of the measured and simulated building thermal response (wall surface temperature) on all floors. Simulated building thermal response is shown for the baseline (V0) and final calibrated model (V29)



**Grafikon A 3:** Rezultati umerjenosti modela stavbe za statistični kazalnik CV(RMSE) na ravni urnih in mesečnih intervalov po kriterijih ASHRAE 14-2014

**Chart A 3:** Results of building model calibration for CV(RMSE) statistical indicator at the level of hourly and monthly intervals under ASHRAE 14-2014 criteria



**Grafikon A 4:** Rezultati umerjenosti modela stavbe za statistični kazalnik  $R^2$  (za celotno obdobje meritev)

**Chart A 4:** Results of building model calibration for  $R^2$  statistical indicator (for the entire measurement period)