

NAPOVED RABE TOPLOTNE ENERGIJE, POTREBNE ZA DOGREVANJE ZRAKA V MEHANSKEM PREZRAČEVALNEM SISTEMU

Gašper Brunskole, Ljupka Vrteva, Uroš Stritih

Izvleček:

V tem članku predstavljamo izdelavo računalniškega programa za napovedovanje potrebne toplote za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu. Prikazan je postopek izdelave računalniškega programa, ki temelji na urnem spreminjanju temperature zunanega zraka in urniku obratovanja prezračevalne naprave. Pri izdelavi programa smo upoštevali zahteve relativnih tehničnih predpisov in standardov notranjega okolja. Na izbranem mehanskem prezračevalnem sistemu smo opravili meritve in izmerili parametre, ki vplivajo na potrebno toploto za dogrevanje vtočnega zraka. Na podlagi meritev in izračunanih rezultatov potrebne dodatne toplote smo naredili validacijo prototipa računalniškega programa ter numerično in grafično prikazali razloge za morebitna odstopanja. Ugotovili smo, kateri parametri vplivajo na potrebno toploto za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu ter kako zagotavljamo toplotno ugodje v prostoru s čim manjšo rabo energije.

Ključne besede:

mehansko prezračevanje, meritve v realnem okolju, dogrevanje vtočnega zraka, računalniški program, validacija računalniškega programa, napovedovanje dodatne potrebne toplote

1 Uvod

V današnjem svetu imamo z naraščajočimi zahtevami in težnjami po višjem življenjskem standardu možnost bivanja v bivalnih prostorih, ki vključujejo sodobne in sofisticirane tehnologije. Ti napredki pomembno vplivajo na splošno kakovost našega bivanja v teh prostorih. Naše nenehno prizadevanje je izboljšati že obstoječe tehnologije, ki zagotavljajo izboljšano in obogateno izkušnjo uporabnikov. Uporaba in pravilno upravljanje s sodobnimi tehnologijami bistveno vplivata na zdravje in počutje uporabnikov prostorov, predvsem pa na rabo energije v stavbah.

Kakovost zraka v notranjem okolju je eden od temeljnih pogojev za zdravje in ugodje uporabnikov prostorov. V bivalne prostore mora vtekati svež zrak brez vonjav, koncentracij in škodljivih primesi [1].

Kakovost zraka v notranjem okolju zagotavljamo s prezračevanjem prostorov, torej z zamenjavo notranjega onesnaženega zraka s svežim zunanjim zrakom. Nedvomno se na tej točki pojavi tudi vprašanje o potrebni toploti in strošku za ponovno ogrevanje zunanega zraka, ki ga s pomočjo prezračevalnih sistemov dovajamo v prostor, zato da bi zagotovili ustrezno kakovost zraka in toplotno udobje v prostoru.

V članku se osredotočamo na napovedovanje dodatne potrebne toplote za dogrevanje vtočnega zraka že v fazi investicijskega projekta. S tem določamo referenčno rabo toplote za potrebe prezračevanja stavbe. Na podlagi relativnih tehničnih predpisov in standardov smo izdelali prototip računalniškega programa, ki omogoča napoved potrebne toplote za dogrevanje vtočnega zraka, ki bo temeljila na urnem spreminjanju temperatur zunanega zraka in urniku obratovanja prezračevalne naprave. V realnem okolju na izbrani stavbi smo izmerili parametre, ki vplivajo na potrebno toploto za dogrevanje vtočnega zraka. Na podlagi meritev in izračunanih rezultatov potrebne dodatne toplote smo naredili validacijo prototipa računalniškega programa ter numerično in grafično prikazali vključujoče parametre in rezultate ter obrazložili vzroke za morebitna odstopanja.

Gašper Brunskole, dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Ljupka Vrteva, mag. inž., Petrol, d. d., Ljubljana; izr. prof. dr. Uroš Stritih, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

2 Mehansko prezračevanje stavbe

Temperatura zraka v prezračevalni coni in temperatura zraka, ki vteka (ga vpihujemo) v prostor, običajno nista enaki, zato je v skladu z energijskimi zahtevami in v odvisnosti od namembnosti prostora definirana notranja temperatura zraka v bivalni coni. V prostor vteka svež zrak z določeno temperaturo, ki ga zagotavlja prezračevalni sistem. Vedno stremimo k energijski učinkovitosti, da je energija, potrebna za ogrevanje ali hlajenje vtočnega zraka, čim manjša oziroma enaka nič. To pomeni, da je temperatura vtočnega zraka enaka temperaturi zraka v prezračevalni coni ali malo nižja od nje (razlika v temperaturi med vtočnim zrakom in zrakom v prezračevalni coni majhna, običajno v razponu nekaj stopinj Celzija).

Mehansko prezračevanje temelji na principu nadtlachnega toka zraka v prostor, ki povzroča gibanje zraka v prezračevalni coni. Na takšen način se zagotovi ustrezna zamenjava zraka v prezračevalni coni v odvisnosti od namembnosti prostora. Če je temperatura zunanjega zraka višja od načrtovane temperature vtočnega zraka v prezračevalni coni, se vtočni zrak preko hladilnega elementa sistema termodinamično obdeluje in ohladi na želeno temperaturo. Če je temperatura zunanjega zraka nižja od načrtovane temperature vtočnega zraka v prezračevalni coni, se vtočni zrak, ki prehaja skozi sistem, termodinamično obdeluje in segreje na želeno temperaturo s pomočjo grelne enote oziroma lamelnega prenosnika toplote. Odtočni zrak odteče iz bivalne prezračevalne cone in se zavrže v atmosfero. Del odtočnega zraka, ki zapušča sistem, je mogoče vrniti v sistem.

Na *sliki 1* je poenostavljen prikaz sistema mehanskega prezračevanja, ki vključuje kanalske dovode in odvode.

2.1 Mehansko prezračevanje z izkoriščanjem zavržene toplote

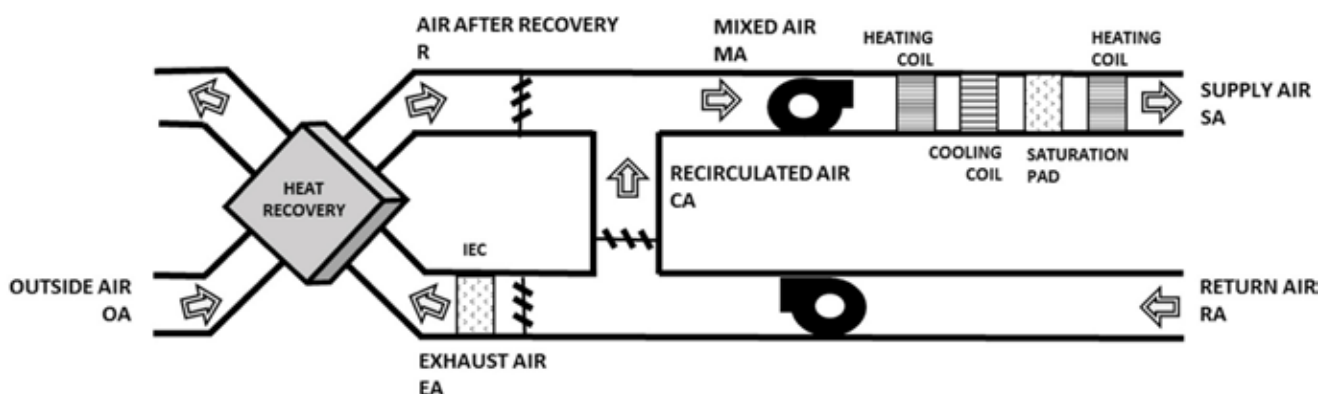
Izkoriščanje toplote zavrženega zraka za mehansko prezračevanje je nujna in zelo učinkovita tehnologija,

ki je bistvenega pomena pri današnjih prizadevanjih za varčevanje z energijo. Za doseganje želene temperature in toplotnega ugodja v stavbi je pogosto potrebno prostore ogrevati ali hladiti. Svež zunanji zrak, ki ga dovajamo v prostore stavbe, moramo pogosto najprej segreti ali ohladiti na želeno temperaturo in s tem zagotoviti toplotno ugodje v prostoru. Pri termodinamični obdelavi zunanjega zraka, ki ga dovajamo v prostor stavbe, je treba v sistem dovesti energijo. Zavrženi zrak oziroma odtočni zrak, ki zapušča prostor, ima temperaturni nivo, ki se lahko izkoristi za dogrevanje vtočnega zraka, če je temperatura zunanjega svežega zraka nižja od želene temperature vtočnega zraka v prostoru. Za ta namen se uporabljajo prenosniki toplote, ki lahko prenesejo le toploto ali hkrati tudi vlago. Z uporabo mehanskih prezračevalnih sistemov, ki omogočajo izkoriščanje zavržene toplote, se zagotavlja svež zrak in ugodje v prostoru ter zmanjšajo obratovalni stroški za prezračevanje stavbe. S pomočjo mehanskega prezračevanja in z izkoriščanjem zavržene toplote iz zračnih tokov, ki zapuščajo prostor, se zagotavlja minimalna izguba toplote in nižja raba energije za prezračevanje stavbe. Posledično se zmanjšajo tudi emisije v okolje.

Mehansko prezračevanje zagotavlja avtomatizirano in kontrolirano zamenjavo zračnih tokov v prostorih stavbe. Tako se doseže stalna zamenjava zraka neodvisno od zunanjih vremenskih pogojev [3]. Najbolj uporabljana prenosnika toplote za izkoriščanje zavržene toplote v klimatski tehniki sta rekuperator in regenerator toplote.

3 Izdelava računalniškega programa za napovedovanje potrebne toplote za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu

V idejni zasnovi projekta smo opazili pomanjkljivosti pri izračunu prihrankov energije in dejanski rabi dodatne toplote za dogrevanje vtočnega zraka. Izkoristimo eksergijo zavržene toplote. V ta namen



Slika 1 : Poenostavljen shematski prikaz mehanskega prezračevanja [2]

smo izdelali (prototip) računalniškega programa v Excelu za izračun potrebne dodatne toplote za dogrevanje vtočnega zraka. Program se osredotoča na urne spremembe temperature zraka, odvisno od lokacije stavbe in predvidenega urnika obratovanja prezračevalnih naprav. Pri izdelavi programa smo upoštevali tehnične predpise in standarde.

3.1 Splošni podatki o stavbi

Splošni podatki o stavbi so pomembni za klasifikacijo stavbe in povezovanje s pravilnikom o prezračevanju in klimatizaciji stavb [5], ki opredeljuje kakovost zraka in toplotno ugodje v prostoru.

K osnovnim podatkom o stavbi štejemo:

- ▶ naslov stavbe (ime obravnavane stavbe),
- ▶ lokacijo obravnavane stavbe (geografske koordinate stavbe, pomembne za določanje zunanjih klimatskih pogojev),
- ▶ vrsta oziroma namen obravnavane stavbe, v katero je vgrajen mehanski prezračevalni sistem – je podatek, ki je povezan s predpisanim pretokom svežega zraka v prostoru.

3.2 Vhodni podatki

Z vhodnimi podatki smo definirali obravnavani prostor in zahtevano toplotno okolje v obravnavanem prostoru. Na podlagi definiranih robnih pogojev je potekal izračun potrebne toplote za dogrevanje zraka po izkoriščanju zavržene toplote v mehanskem prezračevalnem sistemu. Za bolj natančen izračun smo morali definirati tudi čas obratovanja mehanskega prezračevalnega sistema.

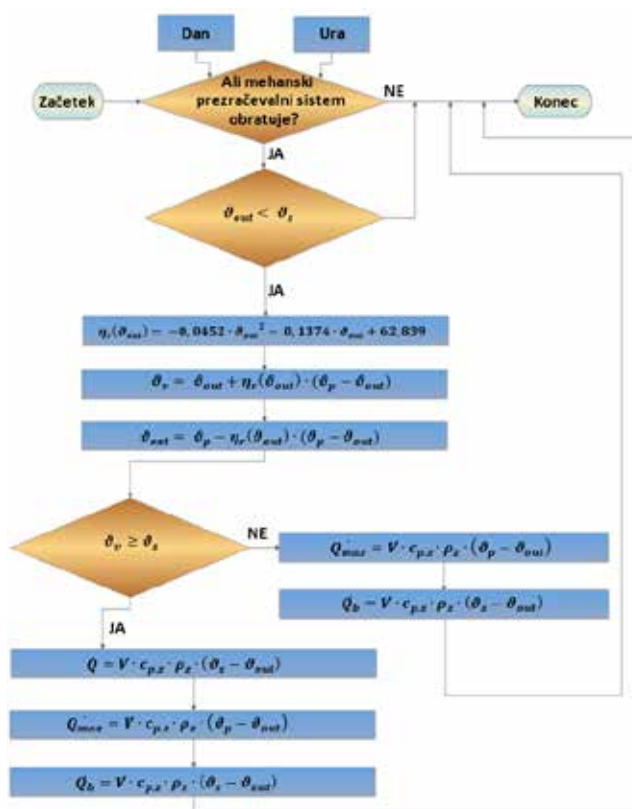
K vhodnim podatkom štejemo:

- ▶ temperaturo notranjega zraka,
- ▶ temperaturo vtočnega zraka,
- ▶ podatke o prostoru in potrebnem toku zraka v prostor,
- ▶ obratovalne ure mehanskega prezračevalnega sistema,
- ▶ temperaturo zunanjega zraka.

3.3 Potek izdelave računalniškega programa

Računalniški program mora biti izdelan tako, da avtomatsko bere postavljene robne pogoje za obravnavano stavbo.

Najprej smo definirali obdobje, za katero so bile upoštevane zunanje temperature zraka. Če smo upoštevali povprečje temperatur zunanjega zraka za več let, smo definirali referenčno leto, za katero so bili definirani datumi in ure za vsak dan posebej. Po definiranju obdobja, na podlagi katerega smo izvedli izračun, smo določili prvi dan v tem obdobju in nato povezali vsak datum z dnevom, ki sledi.



Slika 2 : Predstavitev algoritma z diagramom poteka

Za boljšo predstavitev ozadja računalniškega programa in principa delovanja ter branja robnih pogojev smo algoritem programa prikazali z diagramom poteka, ki je prikazan na sliki 2.

V prvem koraku program določi datum in uro ter preveri, ali mehanski prezračevalni sistem v tistem trenutku obratuje glede na nastavljene delovne robne pogoje. Če sistem ne obratuje, se proces zaključi. V nasprotnem primeru se nadaljuje v naslednji korak, kjer preveri, ali je temperatura zunanjega zraka nižja od nastavljene temperature vtočnega zraka. Če ta pogoj ni izpolnjen, se proces konča. Če je pogoj izpolnjen, se proces nadaljuje s tremi naslednjimi koraki: izračun temperaturne učinkovitosti regeneratorskega na podlagi spremembe temperatur zunanjega zraka, izračun temperature vtočnega zraka po izkoriščanju zavržene toplote in izračun temperature zavrženega zraka. Nato se preveri nov pogoj: ali je temperatura zraka po izkoriščanju zavržene toplote višja ali enaka nastavljeni temperaturi vtočnega zraka. Če pogoj ni izpolnjen, se izračunata le maksimalna senzibilna toplota in potrebna toplota za dogrevanje zraka brez izkoriščanja zavržene toplote, nato se proces konča. Če je pogoj izpolnjen, se izračunajo potrebna toplota za dogrevanje zraka po izkoriščanju zavržene toplote, maksimalna senzibilna toplota in potrebna toplota za dogrevanje zraka brez izkoriščanja zavržene toplote, nato se proces zaključi.

Koraki pri izdelavi programa:

- Določitev tipa urnika v odvisnosti od dneva v tednu

Pri izdelavi računalniškega programa je bil prvi korak povezovanje dneva v tednu z že določenimi robnimi pogoji glede urnikov. Računalniški program je identificiral tip urnika za vsak dan in izpisal število urnika obratovanja mehanskega prezračevalnega sistema za določeno časovno obdobje.

- Določitev časa delovanja mehanskega prezračevalnega sistema

Računalniški program za mehansko prezračevanje je po določitvi urnika obratovanja sistema dnevno moral prebrati ure obratovanja za vsak mesec. Program upošteva definirane urne robne pogoje za vsak tip urnika, izpisuje, ali je sistem obratoval, ter preneha z računanjem, če sistem ni obratoval, pri čemer je bil rezultat enak nič.

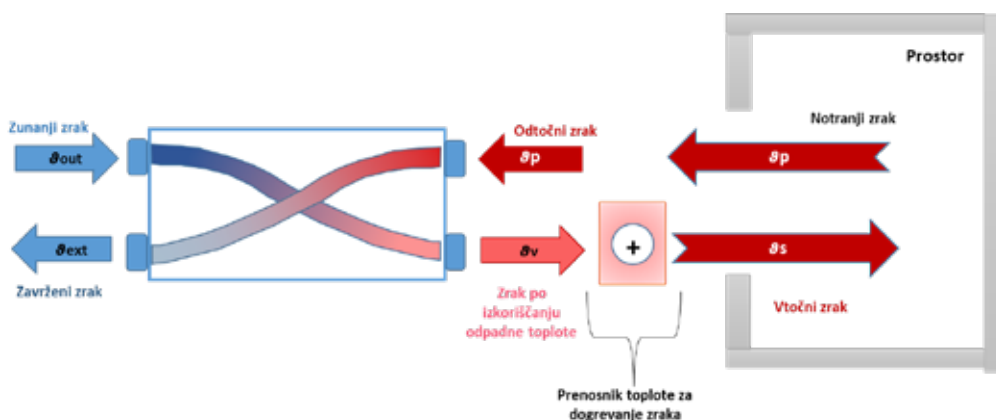
- Definiranje parametrov

Na *sliki 3* je prikazan mehanski prezračevalni sistem s prenosnikom toplote zrak-zrak za izkoriščanje zavržene toplote ter z vstopnimi in izstopnimi zračnimi tokovi. Prikazane so oznake zračnih tokov na vstopu in izstopu iz prenosnika toplote zrak-

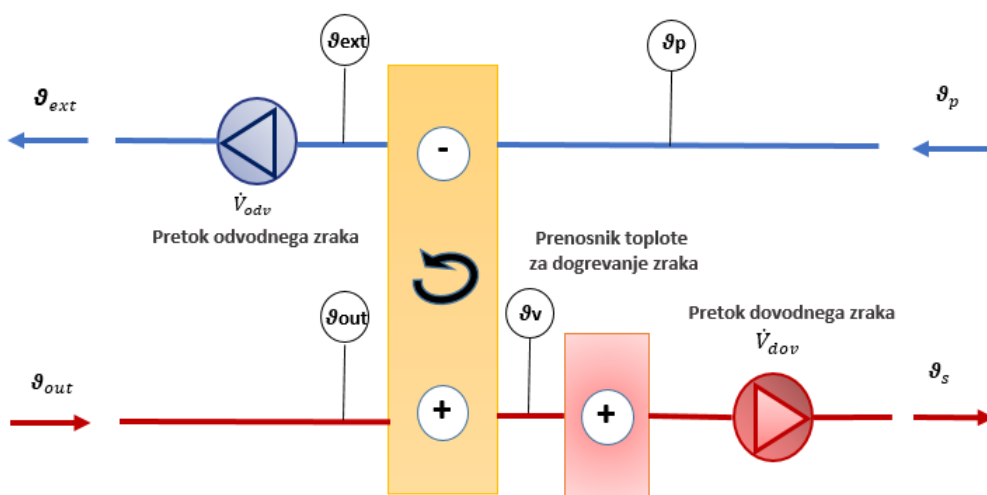
-zrak ter oznaka lamelnega prenosnika toplote, ki dogreva svež zunanji zrak pred vstopom v prostor. Vsi parametri, prikazani na *sliki 3*, so bili uporabljeni za izračun potrebne toplote za dogrevanje zraka po izkoriščanju zavržene toplote. Definirali smo potek izračuna temperaturne učinkovitosti prenosnika toplote zrak-zrak. Posledično smo definirali tudi postopek izračuna temperature vtočnega zraka in zavrženega zraka.

Na *sliki 4* je prikazan shematski prikaz mehanskega prezračevalnega sistema s prenosnikom toplote za izkoriščanje zavržene toplote. Z rdečo barvo so označene temperatura zunanjega zraka, temperatura zraka po izkoriščanju zavržene toplote in temperatura vtočnega zraka. Z modro barvo sta označeni dve temperaturi, in sicer temperatura notranjega zraka in temperatura zavrženega zraka. Na dovodni in na odvodni strani prezračevalnega sistema je vgrajen ventilator za zagotavljanje potrebnega pretoka zraka. Na dovodni strani prezračevalnega sistema je vgrajen tudi lamelni prenosnik toplote za dogrevanje vtočnega zraka po izkoriščanju zavržene toplote, če je to potrebno.

- Gostota zraka in specifična toplota zraka
- Gostota zraka in specifična toplota zraka sta se



Slika 3 : Prikaz mehanskega prezračevalnega sistema s prenosnikom toplote za izkoriščanje zavržene toplote



Slika 4 : Shematski prikaz mehanskega prezračevalnega sistema z izkoriščanjem zavržene toplote

spreminjali s temperaturo zraka, kar je vplivalo na prenos toplote med zavrženim in svežim zrakom v prezračevalnem sistemu. Te lastnosti smo določili s pomočjo interpolacije na podlagi znanih vrednosti gostote in specifične toplote zraka za različne temperature.

- ▶ Izračun temperaturne učinkovitosti prenosnika toplote zrak-zrak

Temperaturna učinkovitost prenosnika toplote zrak-zrak smo lahko določili na podlagi matematičnega modela. Temperaturna učinkovitost prenosnika toplote se je spreminjal s spreminjanjem temperature zunanjega zraka. Izračun smo ponovili za vsako uro, za katero je bil postavljen robni pogoj, da mehanski prezračevalni sistem obratuje.

- ▶ Izračun maksimalne senzibilne toplote v času obratovanja mehanskega prezračevalnega sistema

Prvi pogoj za izračun maksimalne senzibilne toplote je obratovanje prezračevalnega sistema in temperatura zunanjega zraka, ki morata biti nižja kot nastavljena temperatura vtočnega zraka v prostoru stavbe. Če sta oba pogoja izpolnjena, računalniški program izračuna maksimalno senzibilno toploto v času obratovanja prezračevalnega sistema, v nasprotnem primeru se rezultat ne izpiše.

- ▶ Izračun temperature zavrženega zraka

Pogoj pri računanju temperature zavrženega zraka je bil podani robni pogoj za obratovanje mehanskega prezračevalnega sistema. Če je prezračevalni sistem obratoval in če je bila temperatura zunanjega zraka nižja od načrtovane temperature vtočnega zraka v prostoru, se je proces nadaljeval in sledil je izpis rezultata o izračunani temperaturi zavrženega zraka. V nasprotnem primeru se rezultat temperature zavrženega zraka ni izpisal.

- ▶ Izračun temperature zraka po izkoriščanju zavržene toplote

Prvi pogoj pri izračunu temperature vtočnega zraka po rekuperaciji ali regeneraciji toplote je bil, da prezračevalni sistem obratuje. Nato je sledilo preverjanje temperature zunanjega zraka ob določeni uri, ki je morala biti nižja od načrtovane temperature vtočnega zraka v prostoru stavbe. Če so bili vsi pogoji zagotovljeni, se je proces nadaljeval in sledil je izpis rezultata o izračunani temperaturi vtočnega zraka po izkoriščanju zavržene toplote.

- ▶ Izračun toplote za ogrevanje zunanjega zraka na želeni temperaturi vtočnega zraka v času obratovanja mehanskega prezračevalnega sistema

Če je mehanski prezračevalni sistem obratoval brez rekuperativne ali regenerativne enote, se je lahko izračunala skupna potrebna toplota za ogrevanje zunanjega zraka na želeni temperaturi vtočnega zraka. To pomeni, da smo kot pogoj vzeli obratovanje prezračevalnega sistema in robni pogoj, da je bila temperatura zunanjega zraka nižja od načrtovane tem-

perature vtočnega zraka. V tem primeru se zavržena toplota ne izkorišča, ampak se zunanji zrak dogreva s pomočjo lamelnega prenosnika toplote za dogrevanje zraka. Če sta bila oba pogoja izpolnjena, je računalniški program določil urno vrednost toplote za ogrevanje zunanjega zraka na želeni temperaturi vtočnega zraka v prostoru stavbe.

- ▶ Izračun potrebne toplote za dogrevanje zraka po izkoriščanju zavržene toplote

Pri računanju potrebne toplote za dogrevanje zraka po izkoriščanju zavržene toplote so veljali isti pogoji kot v prejšnjih primerih. Prvi pogoj je bil, da je prezračevalni sistem obratoval, drugi pogoj, da je bila temperatura zunanjega zraka nižja kot načrtovana vtočna temperatura v prostoru stavbe, in tretji pogoj, da je bila temperatura zraka po izkoriščanju zavržene toplote višja od načrtovane temperature vtočnega zraka ali enaka tej temperaturi. Nato smo izračunali potrebno toploto za dogrevanje zraka po izkoriščanju zavržene toplote. Če so bili vsi pogoji izpolnjeni, je računalniški program izračunal toploto za dogrevanje zraka v določenem času obratovanja mehanskega prezračevalnega sistema.

3.4 Validacija računalniškega programa

Izdelani računalniški program za napovedovanje potrebne toplote za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu se uporablja za vse vrste rekuperatorjev in regenerativnih toplote, in sicer neodvisno od tega, kje se nahaja obravnavana stavba. Z upoštevanjem urnega spreminjanja temperature zunanjega zraka in s pravilnim nastavljanjem obratovalnih ur prezračevalnega sistema v odvisnosti od namembnosti prostora se približamo realni rabi energije stavbe. Za kalibracijo računalniškega programa je smiselno narediti več meritev na različnih mehanskih prezračevalnih sistemih z različnimi tipi prenosnikov toplote zrak-zrak. Po opravljenih meritvah bi bilo treba postaviti matematični model aproksimacije meritev za vsak mehanski prezračevalni sistem, ki bo izražen s trendno črto in enačbo. Po postavitvi matematičnega modela aproksimacije meritev za vsak mehanski prezračevalni sistem je ključnega pomena izvedba postopka validacije, ki potrdi skladnost rezultatov programa z dejanskimi meritvami ter zagotavlja njegovo zanesljivost in natančnost pri napovedovanju potrebne toplote za dogrevanje zraka v različnih obratovalnih pogojih. Po uspešni validaciji računalniški program omogoča natančno optimizacijo delovanja prezračevalnega sistema glede na specifične zahteve stavbe, kar prispeva k energetski učinkovitosti in udobju uporabnikov.

3.4.1 Podatki o izbrani stavbi

Najprej smo definirali parametre, povezane z izbrano stavbo, ki se prezračuje z mehanskim prezračevalnim sistemom z vgrajenim prenosnikom toplote zrak-zrak.

Vhodni podatki			
Parameter		Vrednost	Enota
Temperatura notranjega zraka	q_p	21,3	[°C]
Temperatura vtočnega zraka	q_s	19	[°C]

Slika 5 : Vpisani robni pogoji o načrtovani temperaturi notranjega zraka in vpihanega zraka

Podatki o prostoru								
Parameter	Vrednost	Enota	Parameter	Vrednost	Enota	Parameter	Vrednost	Enota
Namen prostora	Telovadnice		Namen prostora			Namen prostora		
Število oseb	357,15	[/]	Površina prostora		[m²]	Število prostorov		[/]
Potreben pretok za prezračevanje	12500	[m³/h]		0	[m³/h]		0	[m³/h]

Slika 6 : Vpisani robni pogoji o izbranem prostoru in izračunan pretok zraka, potreben za prezračevanje športne dvorane

► Vhodni podatki o izbrani stavbi

V računalniškem programu smo določili vhodne podatke glede na izbrani mehanski prezračevalni sistem ter upoštevali predpisane standarde o notranjem okolju.

Glede na to, da je obravnavani objekt športna dvorana, smo upoštevali drugo kategorijo prostora in minimalno dovoljeno temperaturo notranjega zraka 16 °C ter maksimalno temperaturo zraka 25 °C. Upoštevali smo, da se v prostor vpihuje zrak s temperaturo 19 °C. Ko je bila temperatura zunanjega zraka enaka kot nastavljena temperatura vtočnega zraka, je potekala le zamenjava zraka. Za določitev priporočene temperature notranjega zraka smo na podlagi zunanje temperature zraka odčitali priporočeno temperaturo notranjega zraka, ki je znašala 21,3 °C.

Na *sliki 5* so prikazani vpisani robni pogoji o načrtovani temperaturi notranjega zraka in načrtovani temperaturi vtočnega zraka v prostor.

► Podatki o izbranem prostoru, potrebnem pretoku zraka in urniku obratovanja mehanskega prezračevalnega sistema

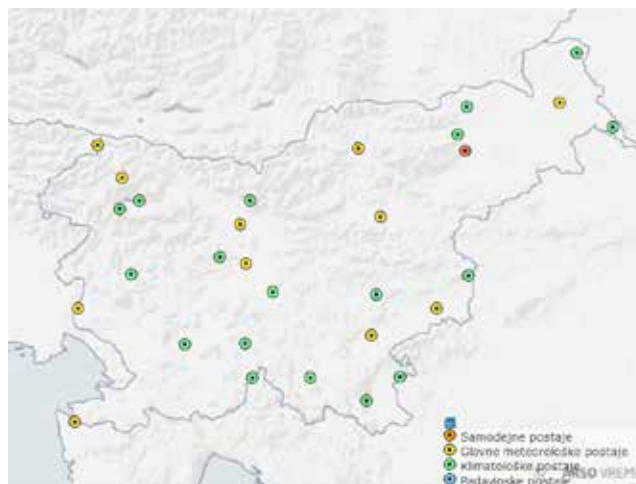
Za primer smo vzeli mehanski prezračevalni sistem, ki že obratuje in se nadzoruje ter uporablja za prezračevanje športne dvorane v Osnovni šoli Majšperk. Pretok zraka na dovodni in odvodni strani je 12.500 m³/h, kar zadostuje potrebam po kakovosti zraka, če je v prostoru maksimalno 357 uporabnikov in če ne upoštevamo drugih onesnaževal, kot je predpisano v pravilniku za prezračevanje in klimatizacijo stavb. Urnik prezračevalne naprave je nastavljen tako, da prezračevalna naprava obratuje med tednom, in sicer od 5. ure do 20. ure. Med vikendom, ob praznikih in počitnicah prezračevalna naprava ne obratuje. Glede na to, da hočemo pri-

merjati izračunano načrtovano potrebno toploto za dogrevanje zraka s pomočjo računalniškega programa in dejansko potrebno toploto za dogrevanje zraka v realnem okolju, smo upoštevali vse praznike in počitnice v tem času. S tipom urnika ena smo definirali, da prezračevalni sistem obratuje od 5. ure do 20. ure, s tipom urnika dva smo definirali, da prezračevalni sistem ne obratuje. Tip urnika ena smo nastavili za pet dni v tednu, in sicer od ponedeljka do petka, tip urnika dva pa za vse sobote in nedelje, praznike in počitnice.

Na *sliki 6* so prikazani vpisani robni pogoji o izbranem prostoru in izračunan pretok zraka, potreben za prezračevanje športne dvorane.

► Temperatura zunanjega zraka na območju obravnavane stavbe

Temperatura zunanjega zraka se urno spreminja,



Slika 7 : Izbrana meteorološka postaja, označena z rdečo piko [4]

zato je bilo pri načrtovanju mehanskega prezračevanja stavbe primerno uporabiti urno metodo računanja, kajti tako smo dobili bolj natančne rezultate za vsako uro v letu v odvisnosti od variacije temperature zunanjega zraka. Urne podatke o temperaturi zunanjega zraka smo odčitali na spletni strani Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO), in sicer za najbližjo izbrano meteorološko postajo Edvarda Rusjana Maribor na nadmorski višini 264 m.

Na *sliki 7* je z rdečo piko označena izbrana meteorološka postaja, iz katere smo pridobili urne mesečne podatke o temperaturi zunanjega zraka za leto 2023.

Po nastavljanju vseh robnih pogojev računalniški program naredi napoved potrebne toplote za dogrevanje zraka za obravnavani mehanski prezračevalni sistem.

4 Rezultati

Prikazali smo postopek izdelave računalniškega programa za napoved toplote za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu. Obravnavali smo sistem prezračevanja z vgrajenim regeneratorem, ki se uporablja za izkoriščanje zavržene toplote. Napovedovanje potrebne toplote za dogrevanje vtočnega zraka smo izvedli za obdobje enega leta, za katero so bili zajeti podatki meritev v realnem okolju.

Izdelani računalniški program smo testirali tako, da smo naredili primerjavo med rezultati, pridobljenimi s pomočjo računalniškega programa, in dejanskimi vrednostmi v realnem okolju. Zaradi

morebitnih odstopanj med napovedano potrebno toploto za dogrevanje zraka s pomočjo prototipa računalniškega programa in dejansko potrebno toploto za dogrevanje vtočnega zraka v realnem okolju smo primerjali več parametrov, ki so direktno vplivali na končni rezultat in razliko v toploti. Pri napovedi potrebne toplote za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu in v realnem okolju smo uporabili urno metodo računanja. V tem poglavju bomo prikazali rezultate pri uporabi računalniškega programa za prvi delovni dan v letu 2023.

4.1 Rezultati izračunane temperaturne učinkovitosti regeneratorja

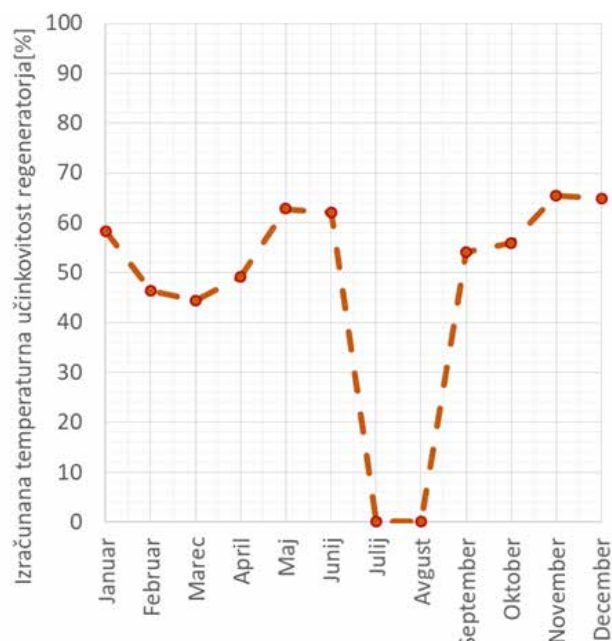
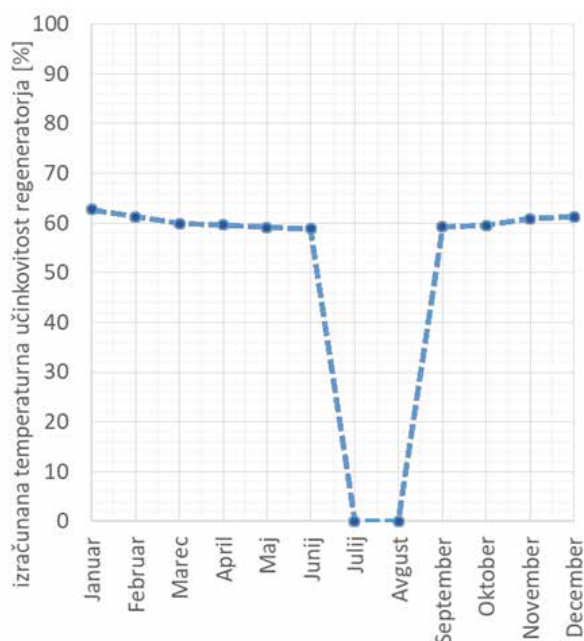
V računalniškem programu smo temperaturo zraka po izkoriščanju zavržene toplote računali na podlagi temperaturne učinkovitosti regeneratorja, temperature zunanjega zraka in temperature notranjega zraka. V realnem okolju nismo imeli podatkov o temperaturni učinkovitosti regeneratorja, zato smo to temperaturo računali na podlagi prenesene toplote z lamelnega prenosnika toplote.

Podatki izračuna povprečnih mesečnih temperaturnih učinkovitosti regeneratorja v računalniškem programu in v realnem okolju so prikazani v *preglednici 1*.

Za boljšo analizo in razumevanje spreminjanja izračunane temperaturne učinkovitosti regeneratorja v obravnavanem letu 2023 smo izračunali povprečne mesečne temperaturne učinkovitosti regeneratorja s pomočjo računalniškega programa in v realnem okolju ter jih prikazali v dveh diagramih, ki sestavljata *sliko 8*.

Preglednica 1 : Izračunane povprečne mesečne temperaturne učinkovitosti regeneratorja v letu 2023

Mesec	Temperaturna učinkovitost regeneratorja (Računalniški program) $\eta_r (g_{out})$ [%]	Temperaturna učinkovitost regeneratorja (Realno okolje) η_r [%]
Januar	61	58
Februar	62	46
Marec	58	44
April	57	49
Maj	55	63
Junij	54	63
Julij	0	0
Avgust	0	0
September	56	54
Oktober	57	56
November	62	65
December	62	65



Slika 8 : (a) Izračunani mesečni povprečni temperaturni učinkovitosti regenerotorja s pomočjo računalniškega programa. (b) Izračunani mesečni povprečni temperaturni učinkovitosti regenerotorja v realnem okolju.

S slike 8 razberemo, da potek povprečne mesečne temperaturne učinkovitosti regenerotorja skozi leto ni enaka v primeru računanja s pomočjo računalniškega programa in v realnem okolju. Do odstopanja pride, ker se je v realnem okolju temperatura zunanjega zraka spreminjala, hkrati pa se je spreminjala tudi temperatura notranjega zraka. Obe temperaturi sta močno vplivali na temperaturno učinkovitost regenerotorja. V primeru računanja z računalniškim programom se spreminja le temperatura zunanjega zraka, saj smo predpostavili, da se temperatura notranjega zraka vzdržuje konstantno na enaki načrtovani temperaturi.

S povišanjem temperature notranjega zraka pri isti zunanji temperaturi zraka se temperaturno učinkovitost regenerotorja zmanjša; če se temperatura notranjega zraka zniža, se učinkovitost regenerotorja poveča. Največje odstopanje med rezultati je februarja, marca in aprila, saj je bila v tem obdobju v realnem okolju povprečna razlika v temperaturi notranjega in zunanjega zraka višja kot v primeru računanja z računalniškim programom. V obeh diagramih v juliju in avgustu je temperaturna učinkovitost regenerotorja enak nič, ker v tem obdobju ni bilo potrebe po izkoriščanju zavržene toplote oziroma mehanski prezračevalni sistem ni obratoval.

Povprečna letna temperaturna učinkovitost regenerotorja, izračunana s pomočjo računalniškega programa, je 60 [%], v realnem okolju je pa ta temperaturna učinkovitost 56 [%].

4.2 Rezultati izračunanih temperatur zraka po izkoriščanju zavržene toplote

V računalniškem programu smo uporabili temperaturno učinkovitost regenerotorja, temperaturo zunanjega in notranjega zraka za izračun temperature zraka po izkoriščanju zavržene toplote.

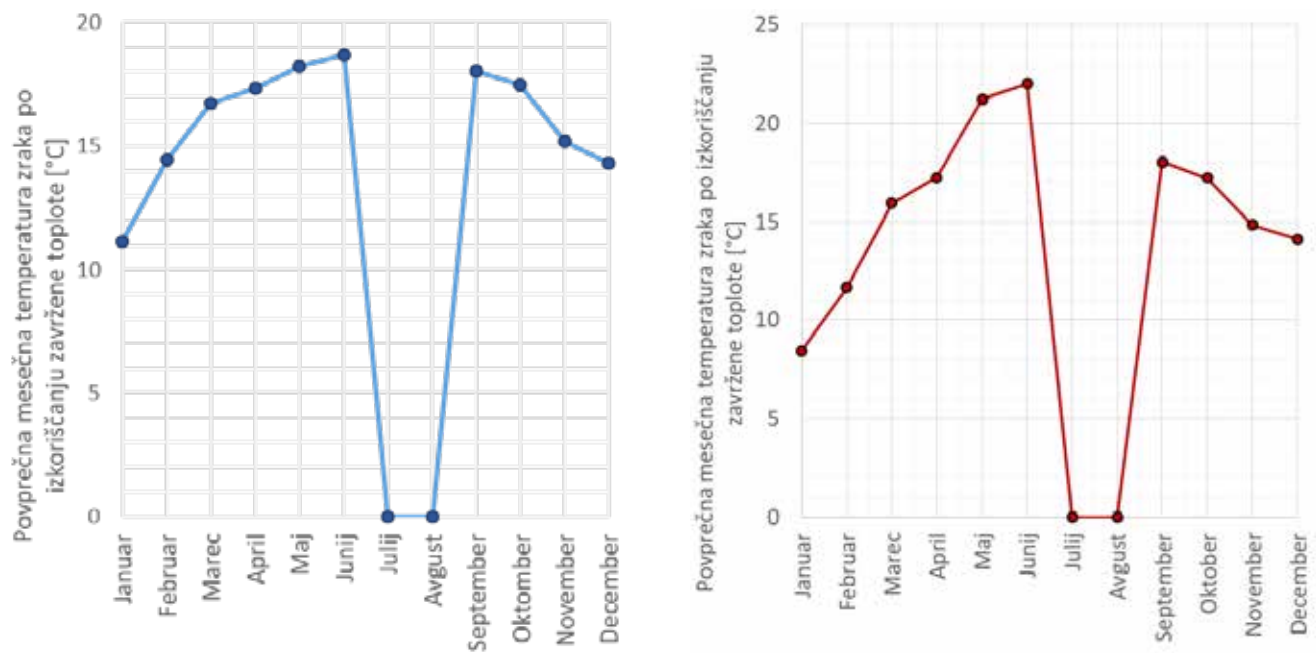
Podatki izračunanih povprečnih mesečnih temperatur zraka po izkoriščanju zavržene toplote v računalniškem programu in v realnem okolju so prikazani v preglednici 2.

Za boljšo analizo in razumevanje spreminjanja izračunanih temperatur zraka po izkoriščanju zavržene toplote v obravnavanem letu 2023 smo izračunali povprečne mesečne temperature zraka po izkoriščanju zavržene toplote z računalniškim programom in v realnem okolju ter jih prikazali v dveh diagramih, ki sestavljata sliko 9.

S slike 9 razberemo, da je največje odstopanje med povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka v zimskem času, in sicer v januarju in februarju, ter v poletnem času v maju in juniju. Odstopanj izračunanih temperatur zraka ne pripisujemo le konstantni temperaturi notranjega zraka, temveč tudi temperaturne učinkovitosti regenerotorja. V zimskem času pride do odstopanja med izračunanimi temperaturami zraka, ker je pri računanju z računalniškim programom upoštevana konstantna temperatura notranjega zraka, ki je bila 21,3 °C, v realnem okolju pa je bila temperatura notranjega zraka dokaj nizka, in sicer približno 18 °C. Glede na to, da je bila povpreč-

Preglednica 2 : Izračunane povprečne mesečne temperature zraka po izkoriščanju zavržene toplote

Datum in čas	Temperatura zraka po izkoriščanju zavržene toplote (Računalniški program) $\vartheta_{v,rp}$ [°C]	Temperatura zraka po izkoriščanju zavržene toplote (Realno okolje) $\vartheta_{v,ro}$ [°C]
Januar	11,1	8,0
Februar	14,4	12,0
Marec	16,7	16,0
April	17,3	17,0
Maj	18,2	21,0
Junij	18,7	22,0
Julij	0	0
Avgust	0	0
September	18,0	18,0
Oktober	17,4	17,0
November	15,0	15,0
December	14,0	14,0



Slika 9 : (a) Izračunane mesečne povprečne temperature zraka po izkoriščanju zavržene toplote z računalniškim programom (b) Izračunane mesečne povprečne temperature zraka po izkoriščanju zavržene toplote v realnem okolju.

na mesečna temperaturna učinkovitost regeneratorsa višja v primeru računanja s pomočjo programa, je bila tudi temperatura zraka po izkoriščanju zavržene toplote višja. Pri računanju v realnem primeru je bila povprečna mesečna temperaturna učinkovitost nižja; posledično je bila nižja tudi temperatura zraka po izkoriščanju zavržene toplote.

V poletnem času pride do odstopanja med izračunanimi temperaturami zraka, ker je v računalniškem programu definirana maksimalna temperatura vtočnega zraka v prostoru, ki ima vrednost

19 °C. To pomeni, da mehanski prezračevalni sistem ni obratoval, če je bila temperatura zunanjega zraka višja od načrtovane temperature vtočnega zraka. V realnem okolju temperatura vtočnega zraka ni bila definirana, zato je mehanski prezračevalni sistem obratoval tudi pri višjih zunanjih temperaturah zraka.

Na obeh diagramih na *sliki 9* v juliju in avgustu je temperatura zraka po izkoriščanju zavržene toplote enaka nič, ker v tem obdobju mehanski prezračevalni sistem ni obratoval.

4.3 Rezultati izračunanih temperatur zavrženega zraka

V računalniškem programu smo temperaturo zavrženega zraka računali na podlagi temperaturne učinkovitosti regenerotorja, temperature zunanjega zraka in temperature notranjega zraka.

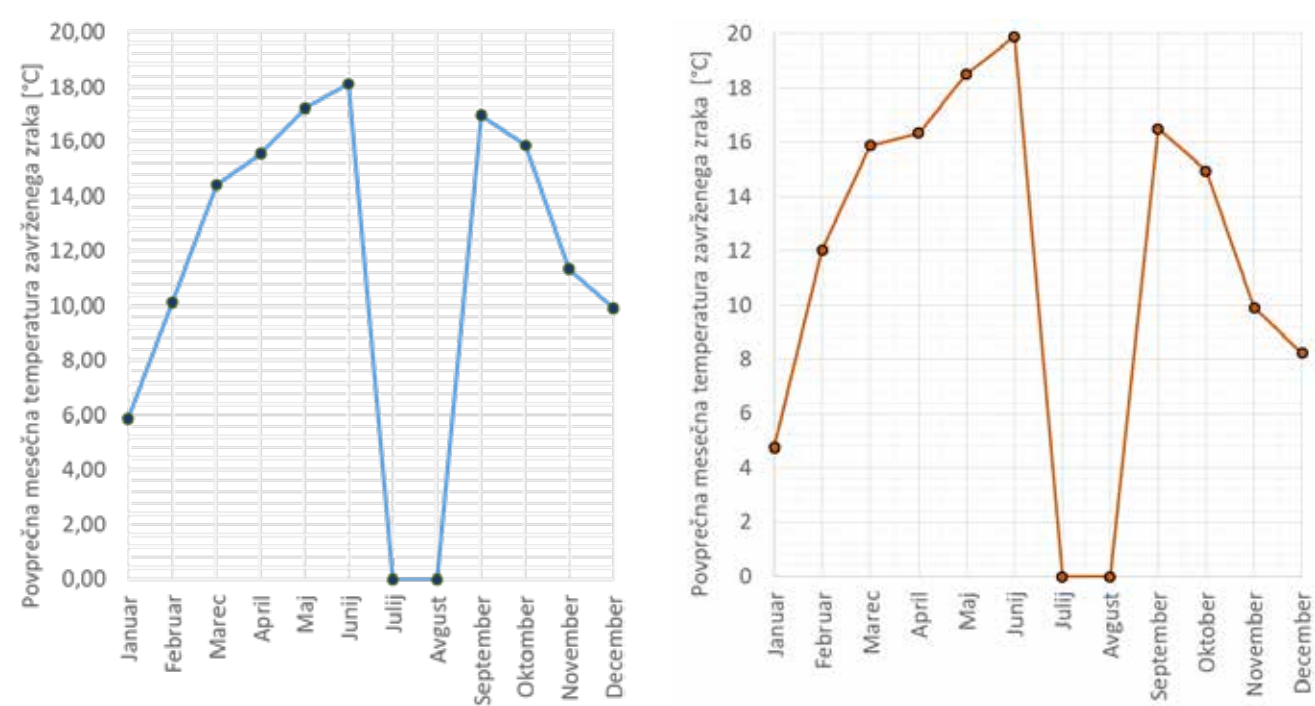
Podatki o izračunanih povprečnih mesečnih temperaturah zavrženega zraka v računalniškem programu in v realnem okolju so prikazani v preglednici 3.

Za boljšo analizo in razumevanje spreminjanja izračunanih temperatur zavrženega zraka za obravnavano leto 2023 smo izračunali povprečne mesečne temperature zavrženega zraka z računalniškim programom in v realnem okolju ter jih prikazali v dveh diagramih, ki sestavljata sliko 10.

S slike 10 razberemo, da je največje odstopanje med povprečnimi mesečnimi temperaturami zavrženega zraka v zimskem času, in sicer februarja, ter v poletnem času v juniju. Odstopanja izračunanih tem-

Preglednica 3 : Izračunane povprečne mesečne temperature zavrženega zraka v letu 2023

Datum in čas	Temperatura zavrženega zraka (Računalniški program) $\vartheta_{ext,rp}$ [°C]	Temperatura zavrženega zraka (Realno okolje) $\vartheta_{ext,ro}$ [°C]
Januar	5,9	5,7
Februar	10,1	12,0
Marec	14,4	15,9
April	15,5	16,3
Maj	17,2	18,5
Junij	18,1	19,9
Julij	0	0
Avgust	0	0
September	17	17,0
Oktober	15,9	15,0
November	11,3	10
December	9,1	8,2



Slika 10 : (a) Izračunane mesečne povprečne temperature zavrženega zraka z računalniškim programom (b) Izračunane mesečne povprečne temperature zavrženega zraka v realnem okolju.

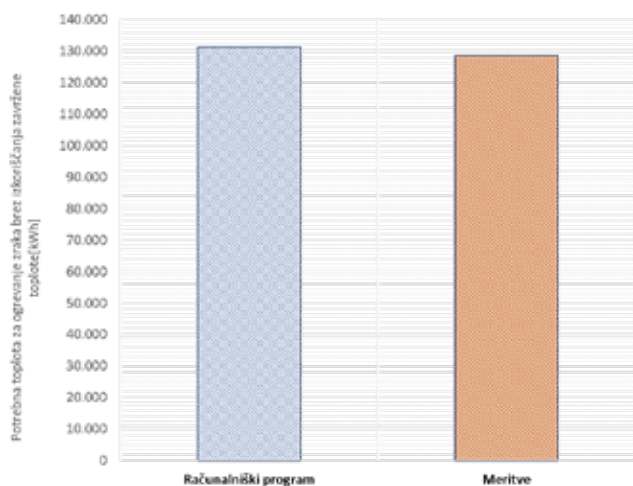
peratur zraka ne pripisujemo le konstantni temperaturi notranjega zraka, temveč tudi temperaturni učinkovitosti regeneratorja. Pri manjši temperaturni razliki med temperaturo notranjega zraka in zunanega zraka je temperatura zavrženega zraka višja.

V zimskem času je prišlo do odstopanja med temperaturami zavrženega zraka, ker je bila v realnem okolju temperaturna učinkovitost regeneratorja nižja od temperaturne učinkovitosti regeneratorja, izračunanega s pomočjo računalniškega programa. V poletnem času je prišlo do odstopanja med temperaturami zavrženega zraka, ker je v računalniškem programu definirana maksimalna temperatura vtočnega zraka. Posledično se je temperaturna učinkovitost regeneratorja znižala. V realnem okolju temperatura vtočnega zraka ni bila definirana in je mehanski prezračevalni sistem obratoval tudi pri višjih zunanjih temperaturah zraka. Posledično se je povečala tudi temperaturna učinkovitost regeneratorja.

4.4 Rezultati izračunane potrebne toplote za ogrevanje zraka brez izkoriščanja zavržene toplote

Pri obravnavanju mehanskega prezračevalnega sistema je smiselno določiti, kakšna je potrebna toplota za ogrevanje zraka, če bi mehanski prezračevalni sistem obratoval brez izkoriščanja zavržene toplote. Ta toplota je odvisna od fizikalnih lastnosti zraka in pretoka zraka v določenem času. Prav tako nanjo vpliva tudi razlika med temperaturo vročega in zunanjega zraka.

Skupni izračunani potrebni toploti za ogrevanje zraka brez izkoriščanja zavržene toplote v primeru uporabe računalniškega programa in v realnem okolju sta prikazani v diagramu na *sliki 11*. Iz diagrama je razvidno, da je potrebna toplota za ogrevanje zraka, izračunana s pomočjo računalniškega programa, višja od izračunane toplote v realnem



Slika 11 : Izračunani potrebni letni toploti za ogrevanje zraka brez izkoriščanja zavržene toplote.

okolju. To razliko pripisujemo definirani konstantni temperaturi vtočnega zraka v računalniškem programu. V realnem okolju je temperatura vtočnega zraka nihala in bila nižja od načrtovane temperature vtočnega zraka v računalniškem programu.

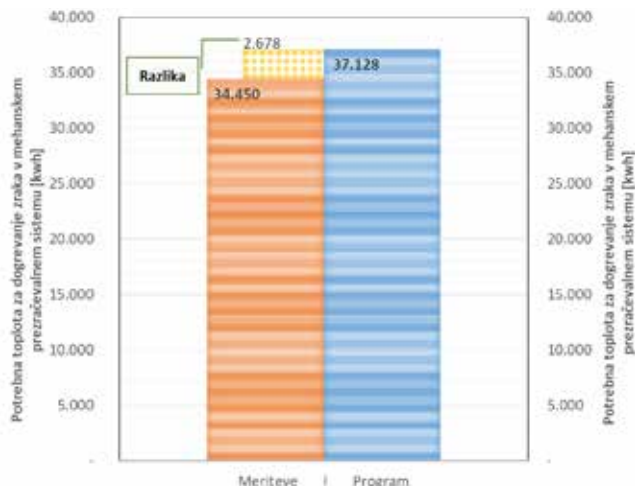
4.5 Rezultati napovedane in izračunane potrebne toplote za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu

S pomočjo računalniškega programa smo naredili napoved potrebne toplote za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu, v realnem okolju pa smo to toploto izračunali na podlagi znane karakteristike lamelnega prenosnika toplote.

Skupni izračunani potrebni toploti za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu v primeru uporabe računalniškega programa in v realnem okolju sta prikazani v diagramu na *sliki 12*.

Iz diagrama na *sliki 12* je razvidno, da je potrebna toplota za ogrevanje zraka, izračunana s pomočjo računalniškega programa, višja od izračunane toplote v realnem okolju. To razliko pripisujemo definirani konstantni temperaturi vtočnega in notranjega zraka v računalniškem programu. S pomočjo definirane temperature vtočnega in notranjega zraka ter vzdrževanja teh temperatur zagotavljamo boljše toplotno ugodje in manjšo število nezadovoljnih v prostoru. V realnem okolju sta temperaturi vtočnega in notranjega zraka nihali. Posledično v določenem obdobju ni bilo zagotovljeno toplotno ugodje v prostoru, kar je vodilo do večjega števila nezadovoljnih v prostoru.

V *preglednici 4* sta prikazani napovedana in izračunana potrebna toplota za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu ter odstotek odstopanja med meritvami in prototipom računalniškega programa.



Slika 12 : Izračunana in napovedana letna potrebna toplota za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu

Preglednica 4 : Odstopanje med meritvami in računalniškim programom

	Vrednost	Enota
Načrtovana potrebna toplota za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu-program	36.235	[kWh]
Izračunana potrebna toplota za dogrevanje zraka v mehanskem prezračevalnem sistemu-meritve	33.053	[kWh]
Odstopanje med računalniškim programom in meritvami	9	[%]

5 Zaključek

- Po že opravljenih meritvah smo naredili validacijo prototipa računalniškega programa in določili odstotek odstopanja med potrebno toploto za dogrevanje vtočnega zraka v realnem okolju in napovedano potrebno toploto za dogrevanje vtočnega zraka s pomočjo prototipa računalniškega programa. Dobili smo rezultat, da je odstotek odstopanja med rezultatom, pridobljenim z računalniškim programom, in rezultatom v realnem okolju enak 9 %, kar pomeni, da je bila z računalniškim programom izračunana potrebna toplota za dogrevanje vtočnega zraka višja kot izračunana potrebna toplota v realnem okolju.
- Pokazali smo, kako temperature zunanjega in notranjega zraka ter temperatura zraka po izkoriščanju zavržene toplote vplivajo na izračun potrebne toplote za dogrevanje vtočnega zraka, in opisali njihovo pomembnost pri dimenzioniranju mehanskega prezračevalnega sistema.
- Dobljeni rezultati pomenijo, da bi lahko na podlagi že znane lokacije stavbe in temperature zunanjega zraka, želenih parametrov notranjega okolja ter načrtovane ure obratovanja mehanskega prezračevalnega sistema napovedali, kakšna bo njegova raba energije v realnem okolju. Odstopanje med izračunano letno toploto za dogrevanje vtočnega zraka z računalniškim programom in izračunano letno potrebno toploto za dogrevanje vtočnega zraka v realnem okolju se pojavi zaradi načrtovane konstantne

temperature vtočnega in notranjega zraka pri računanju z računalniškim programom.

- Ugotovili smo, da s pravilnim krmiljenjem mehanskega prezračevalnega sistema ter vzdrževanjem konstantne načrtovane temperature notranjega in vtočnega zraka lahko zagotovimo toplotno ugodje v prostoru. Hkrati je potrebna toplota za dogrevanje vtočnega zraka enaka, kot če ti temperaturi nihata, in v določenih obdobjih se toplotno ugodje ne zagotovi.

Viri

- [1] M. Prek: Kakovost zraka: Predloga za laboratorijsko vajo. Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2013.
- [2] S. Tefelmeier, G. Pernigotto, A. Gasparella: Annual performance of sensible and total heat recovery in ventilation systems: Humidity control constraints for European climates. Faculty of Science and Technology, Free University of Bozen-Bolzano, Bolzano, 2017.
- [3] J. F. Krielder, Ph. D., P. E.: Handbook of heating, ventilation and air conditioning, New York, 2001.
- [4] Agencija Republike Slovenije za okolje, Klimatski podatki. Dostopno na: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/app/webmet/>, ogled: 15. 12. 2023.
- [5] Uradni list RS: Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Ljubljana, 2002.

Prediction of the use of heat energy required for reheating the air in the mechanical ventilation system

Abstract:

In this article, we present the creation of a computer program for predicting the required heat for air reheating in a mechanical ventilation system. The process of creating a computer program is shown, which is based on the hourly change of the outside air temperature and the operating schedule of the ventilation device. When developing the program, we took into account the requirements of relative technical regulations and standards of the internal environment. We performed measurements on the selected mechanical ventilation system and measured the parameters that affect the heat required to reheat the incoming air. Based on the measurements and calculated results of the necessary additional heat, we validated the prototype of the computer program and numerically and graphically showed the reasons for any deviations. We found out which parameters affect the heat required to reheat the air in the mechanical ventilation system and how to ensure thermal comfort in the room with as little energy consumption as possible.

Keywords:

mechanical ventilation, measurements in real environment, preheating of supply air, computer program, validation of computer program, prediction of additional required heat