

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



## **MAGISTRSKO DELO**

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

Ljubljana, 2020

Univerza  
v Ljubljani

*Fakulteta za  
gradbeništvo in  
geodezijo*



Kandidat/-ka:

**Mentor/-ica:**

**Predsednik komisije:**

**Somentor/-ica:**

**Član komisije:**

## STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

## BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

|                         |                                                                                                                                  |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UDK:</b>             | <b>UDK: 697:727(497.4)(043.3)</b>                                                                                                |
| <b>Avtor:</b>           | <b>Nives Šelekar, dipl. inž. grad. (UN)</b>                                                                                      |
| <b>Mentor:</b>          | <b>doc. dr. Mateja Dovjak</b>                                                                                                    |
| <b>Somentor:</b>        | <b>doc. dr. Matjaž Prek</b>                                                                                                      |
| <b>Naslov:</b>          | <b>Vpliv stopnje prezračevanja na kakovost notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah in pisarnah</b>                           |
| <b>Tip dokumenta:</b>   | <b>Magistrsko delo – B</b>                                                                                                       |
| <b>Obseg in oprema:</b> | <b>84 str., 25 pregl., 12 sl., 16 graf., 7 en.</b>                                                                               |
| <b>Gljučne besede:</b>  | <b>stopnja prezračevanja, kakovost notranjega zraka, ogljikov dioksid, izobraževalne ustanove, pisarne, sindrom bolnih stavb</b> |

### Izveček

Magistrsko delo obravnava vpliv različnih stopenj prezračevanja na koncentracijo ogljikovega dioksida v notranjem zraku, s poudarkom na izobraževalnih ustanovah in pisarnah. Želeli smo ugotoviti, ali so zahtevane količine svežega zraka, predvidene po slovenski zakonodaji, zadostne za zagotavljanje koncentracij ogljikovega dioksida v mejnih vrednostih v učilnici in pisarni. Za ta namen smo izvedli simulacije s programskim orodjem, rezultate smo verificirali z izvedenimi meritvami v testnem prostoru. Izvedli smo tudi sistematičen pregled študij na tematiko kakovosti notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah in pisarnah, vpliv koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem okolju na storilnost ter zdravje in odsotnost uporabnikov. Z dobljenimi rezultati tega magistrskega dela smo prišli do zaključka, da je zagotovitev kakovostnega notranjega zraka nujno potrebna. Minimalna predpisana stopnja prezračevanja po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr., ki znaša  $0,5 \text{ h}^{-1}$ , namreč ne zadošča za zagotovitev kakovosti notranjega zraka v modelnem prostoru učilnice in predavalnice. Za izračun potrebne količine dovedenega zunanjega zraka bi morali za obravnavan modelni prostor upoštevati priporočeno količino zunanjega zraka  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  na osebo. Do podobnih ugotovitev so prišle tudi raziskave v igralnicah vrtca in drugeje. S to priporočeno vrednostjo namreč zagotovimo, da so koncentracije ogljikovega dioksida v mejah, ki zagotavljajo najmanjši možen vpliv na kognitivno učinkovitost, storilnost in zdravje ljudi, ki jih navajajo epidemiološke raziskave. Na ravni zakonskih zahtev predlagamo spremembe mejnih vrednosti koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem zraku na nižje vrednosti od trenutno predpisanih, kar podpirajo tudi ugotovitve ostalih raziskav.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

|                       |                                                                                                                      |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UDC:</b>           | <b>UDC: 697:727(497.4)(043.3)</b>                                                                                    |
| <b>Author:</b>        | <b>Nives Šelekar, B. Sc.</b>                                                                                         |
| <b>Supervisor:</b>    | <b>Assist. Prof. Mateja Dovjak, Ph. D.</b>                                                                           |
| <b>CO-supervisor:</b> | <b>Assist. Prof. Matjaž Prek, Ph. D.</b>                                                                             |
| <b>Title:</b>         | <b>The effect of ventilation rates on indoor air quality in educational institutions and offices</b>                 |
| <b>Document type:</b> | <b>Master Thesis</b>                                                                                                 |
| <b>Notes:</b>         | <b>84 p., 25 tab., 12 fig., 16 graph., 7 eq.</b>                                                                     |
| <b>Key words:</b>     | <b>ventilation rate, indoor air quality, carbon dioxide, educational institution, office, sick building syndrome</b> |

### **Abstract**

The aim of master thesis was to investigate the effect of ventilation rates on concentration of carbon dioxide in the indoor environment, especially in educational institutions and offices. We wanted to determine whether the required quantities of fresh air, as provided by Slovenian law, are sufficient to ensure the concentration of carbon dioxide in the limit values. For this purpose, simulations were performed with a software tool and the results were verified with measurements made in the test room. We also conducted a systematic review of studies on indoor air quality in educational institutions and offices on the impact of carbon dioxide concentrations in the indoor environment on productivity, health and absence. With the results of this master thesis we came to the conclusion that the provision of quality indoor air is absolutely necessary. Minimum prescribed ventilation rate  $0,5 \text{ h}^{-1}$  according to the Rules on the ventilation and air conditioning of buildings (O.J. RS, No. 42/2002, chang.) is not sufficient to ensure the quality of indoor air in the model space of the classroom and lecture room. For the calculation of required amount of outside air supply for the model space under consideration the recommended amount of outside air  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  per person should be used. Similar findings have been made in kindergarten and elsewhere. This recommended value ensures that carbon dioxide concentrations are within the limits that provide the least impact on cognitive performance, productivity and human health, as reported by epidemiological research. At the level of legal requirements, we propose to change the limit values for carbon dioxide concentrations in indoor air to lower values than currently prescribed, which is supported by the findings of other studies.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## **ZAHVALA**

Za strokovno pomoč in nasvete pri pisanju magistrskega dela se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mateji Dovjak ter somentorju doc. dr. Matjažu Preku.

Posebna zahvala gre moji družini, prijateljem in sošolcem za vso podporo in pomoč tekom celotnega študija.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## KAZALO VSEBINE

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....</b>                  | <b>III</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....</b>          | <b>V</b>   |
| <b>ZAHVALA .....</b>                                                         | <b>VII</b> |
| <b>1 UVOD .....</b>                                                          | <b>1</b>   |
| <b>2 TEORETIČNO OZADJE NALOGE.....</b>                                       | <b>4</b>   |
| 2.1 Kakovost notranjega zraka .....                                          | 4          |
| 2.1.1 Snovi, ki slabšajo kakovost notranjega zraka .....                     | 6          |
| 2.1.2 Zaznavanje kakovosti zraka .....                                       | 8          |
| 2.2 Ogljikov dioksid .....                                                   | 10         |
| 2.2.1 Ogljikov dioksid v atmosferi.....                                      | 10         |
| 2.2.2 Ogljikov dioksid v notranjem okolju .....                              | 12         |
| 2.3 Bolezni stavb .....                                                      | 14         |
| 2.3.1 Sindrom bolnih stavb .....                                             | 15         |
| 2.3.2 Bolezni, povezane z bivanjem v stavbi .....                            | 17         |
| 2.4 Prezračevanje .....                                                      | 17         |
| 2.4.1 Količina potrebnega zunanega svežega zraka .....                       | 18         |
| <b>3 PREGLED ZAKONODAJE.....</b>                                             | <b>21</b>  |
| <b>4 METODE .....</b>                                                        | <b>25</b>  |
| 4.1 Pregled literature .....                                                 | 25         |
| 4.2 Simulacije.....                                                          | 25         |
| 4.2.1 Učilnica .....                                                         | 26         |
| 4.2.2 Pisarna .....                                                          | 27         |
| 4.2.3 Predavalnica .....                                                     | 28         |
| 4.3 Verifikacija in validacija rezultatov v testnem prostoru .....           | 29         |
| <b>5 REZULTATI.....</b>                                                      | <b>32</b>  |
| 5.1 Rezultati pregleda literature.....                                       | 32         |
| 5.1.1 Kakovost notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah in pisarnah ..... | 32         |
| 5.1.2 Vpliv ogljikovega dioksida na storilnost .....                         | 40         |
| 5.1.3 Vpliv ogljikovega dioksida na zdravje in odsotnost.....                | 48         |
| 5.2 Rezultati simulacij.....                                                 | 55         |
| 5.2.1 Učilnica .....                                                         | 55         |
| 5.2.2 Pisarna .....                                                          | 57         |

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2.3 Predavalnica .....                                                             | 58        |
| 5.2.4 Primerjava rezultatov simulacij .....                                          | 60        |
| 5.3 Rezultati izvedene verifikacije v testnem prostoru.....                          | 61        |
| 5.3.1 Prvi merilni dan .....                                                         | 62        |
| 5.3.2 Drugi merilni dan .....                                                        | 63        |
| 5.3.3 Tretji merilni dan .....                                                       | 64        |
| 5.3.4 Četrty merilni dan .....                                                       | 65        |
| 5.3.5 Peti merilni dan .....                                                         | 67        |
| 5.3.6 Potrebna stopnja prezračevanja za zagotovitev kakovosti notranjega zraka ..... | 68        |
| <b>6 RAZPRAVA.....</b>                                                               | <b>71</b> |
| <b>7 ZAKLJUČEK .....</b>                                                             | <b>74</b> |
| <b>VIRI.....</b>                                                                     | <b>76</b> |

## KAZALO SLIK

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Potek onesnaženosti zraka v prostoru [15].....                                                             | 5  |
| Slika 2: Jakost drugih virov onesnaževanja [21].....                                                                | 8  |
| Slika 3: Decipol [21] .....                                                                                         | 9  |
| Slika 4: Proces dihanja [28].....                                                                                   | 12 |
| Slika 5: Vrednost koncentracije ogljikovega dioksida v zunanjem in notranjem okolju za posamezne primere [16] ..... | 14 |
| Slika 6: Hierarhična razdelitev pravnih aktov za obravnavano področje .....                                         | 21 |
| Slika 7: Merilna naprava [46].....                                                                                  | 30 |
| Slika 8: Tloris testnega prostora in lokacija merilne naprave [46] .....                                            | 30 |
| Slika 9: Prikaz oken v testnem prostoru [46] .....                                                                  | 31 |
| Slika 10: Rezultati pregleda literature po metodologiji PRISMA – tip 1 .....                                        | 33 |
| Slika 11: Rezultati pregleda literature po metodologiji PRISMA – tip 2.....                                         | 41 |
| Slika 12: Rezultati pregleda literature po metodologiji PRISMA – tip 3.....                                         | 49 |

## KAZALO PREGLEDNIC

|                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Preglednica 1: Škodljive snovi v notranjem okolju [14] .....                                                                                                                      | 6  |
| Preglednica 2: Vpliv ogljikovega dioksida v notranjem okolju na človeka [18] .....                                                                                                | 14 |
| Preglednica 3: Simptomi sindroma bolnih stavb [12] .....                                                                                                                          | 16 |
| Preglednica 4: Količine zunanjega zraka za prezračevanja po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr., Priloga 1, tabela 8 [11] ..... | 22 |
| Preglednica 5: Količine zunanjega zraka za prezračevanje in dopustne koncentracije ogljikovega dioksida po finskem standardu FISIAQ [41] .....                                    | 24 |
| Preglednica 6: Količine zunanjega zraka za prezračevanje po standardu ANSI/ASHRAE Standardu 62.1 [42] .....                                                                       | 24 |
| Preglednica 7: Volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer učilnice... 26                                                                 |    |
| Preglednica 8: Količine dovedenega zunanjega zraka [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer učilnice, izračunane iz predpisanih in priporočenih vrednosti.....                         | 27 |
| Preglednica 9: Volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer pisarne... 27                                                                  |    |
| Preglednica 10: Količine dovedenega zunanjega zraka [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer pisarne, izračunane iz predpisanih in priporočenih vrednosti.....                         | 28 |
| Preglednica 11: Volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer predavalnice .....                                                            | 28 |
| Preglednica 12: Količine dovedenega zunanjega zraka [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer predavalnice, izračunane iz predpisanih in priporočenih vrednosti .....                   | 29 |
| Preglednica 13: Rezultati pregleda literature – tip 1 .....                                                                                                                       | 32 |
| Preglednica 14: Povzetek študij neprimerne kakovosti notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah in priporočila za izboljšave .....                                               | 37 |
| Preglednica 15: Rezultati pregleda literature – tip 2 .....                                                                                                                       | 40 |
| Preglednica 16: Povzetek študij vpliva ogljikovega dioksida na storilnost.....                                                                                                    | 45 |
| Preglednica 17: Rezultati pregleda literature – tip 3 .....                                                                                                                       | 48 |
| Preglednica 18: Povzetek študij vpliva ogljikovega dioksida na zdravje in odsotnost .....                                                                                         | 52 |
| Preglednica 19: Zasedenost prostora na prvi merilni dan.....                                                                                                                      | 62 |
| Preglednica 20: Zasedenost prostora na drugi merilni dan.....                                                                                                                     | 63 |
| Preglednica 21: Zasedenost prostora na tretji merilni dan.....                                                                                                                    | 64 |
| Preglednica 22: Zasedenost prostora na četrti merilni dan .....                                                                                                                   | 65 |
| Preglednica 23: Zasedenost prostora na peti merilni dan .....                                                                                                                     | 67 |
| Preglednica 24: Dovedena zunanja količina zraka skozi odprtine obravnavanega prostora . 68                                                                                        |    |
| Preglednica 25: Povprečna dovedena zunanja količina zraka in ostali parametri za obravnavan prostor .....                                                                         | 69 |

## KAZALO GRAFIKONOV

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Grafikon 1: Odstotek nezadovoljnih oseb v odvisnosti od stopnje prezračevanja pri emisiji 1 olf [21] .....           | 9  |
| Grafikon 2: Odstotek nezadovoljnih oseb v odvisnosti od zaznane kakovosti zraka, izražene v decipolih [21] .....     | 10 |
| Grafikon 3: Izpusti toplogrednih plinov po glavnih kategorijah plinov, Slovenija, 1986–2012 [25] .....               | 11 |
| Grafikon 4: Vrednosti koncentracij ogljikovega dioksida v ppm v atmosferi skozi stoletja [26] .....                  | 12 |
| Grafikon 5: Rezultati simulacij za primer učilnice .....                                                             | 56 |
| Grafikon 6: Potek koncentracij ogljikovega dioksida glede na stopnjo prezračevanja za primer učilnice .....          | 56 |
| Grafikon 7: Rezultati simulacij za primer pisarne.....                                                               | 57 |
| Grafikon 8: Potek koncentracij ogljikovega dioksida glede na stopnjo prezračevanja za primer pisarne.....            | 58 |
| Grafikon 9: Rezultati simulacij za primer predavalnice .....                                                         | 59 |
| Grafikon 10: Potek koncentracij ogljikovega dioksida glede na stopnjo prezračevanja za primer predavalnice .....     | 59 |
| Grafikon 11: Primerjava rezultatov simulacij za primer učilnice, pisarne in predavalnice za posamezen scenarij ..... | 60 |
| Grafikon 12: Rezultati meritev prvega merilnega dne .....                                                            | 63 |
| Grafikon 13: Rezultati meritev drugega merilnega dne.....                                                            | 64 |
| Grafikon 14: Rezultati meritev tretjega merilnega dne.....                                                           | 65 |
| Grafikon 15: Rezultati meritev četrtega merilnega dne.....                                                           | 66 |
| Grafikon 16: Rezultati meritev petega merilnega dne.....                                                             | 68 |

»Ta stran je namenoma prazna.«

## 1 UVOD

Človek preživi večino svojega časa v zaprtih prostorih, in sicer kar 80 do 90 odstotkov, bodisi doma, na delovnem mestu ali v različnih javnih ustanovah [1]. Zato je pomembno, da je zrak v notranjih prostorih čim manj onesnažen. Viri onesnaževanja v notranjem okolju so različni. Lahko so to emisije, ki prihajajo iz zunanjega zraka ali pa je stavba kot celota vir onesnaževanja z vsemi gradbenimi materiali in notranjo opremo. Onesnaževalci zraka smo tudi uporabniki sami, in sicer z dihanjem izločamo ogljikov dioksid ter s svojo aktivnostjo proizvajamo vonjave [2]. Za ohranjanje kakovosti notranjega zraka je torej pomembno primerno in učinkovito prezračevanje. Veliko raziskav je opozorilo, da je prezračevanje in posledično kakovost notranjega zraka predvsem v izobraževalnih ustanovah nezadostna [3], [4]. Ugotovili so tudi, da je kakovost notranjega zraka v pisarnah pomemben dejavnik, saj ima vpliv na počutje in zdravje človeka [5], njegovo koncentracijo in storilnost [6], [7], [8]. Posledično so se začeli vplivi kakovosti notranjega zraka na zdravje, počutje in produktivnost v zadnjem desetletju podrobneje raziskovati. Neprimerna kakovost notranjega zraka je škodljiva zlasti za družbeno bolj občutljive skupine, med katere spadajo otroci. Ugotovili so, da ima vpliv na njihove učne sposobnosti, kar lahko ima dolgoročne posledice za otroke kot tudi za družbo [9].

Z gradnjo čimbolj zrakotesnih stavb ter z miselnostjo, da moramo porabiti čim manj energije, se je začela kakovost notranjega zraka slabšati. Na to problematiko so opozorili v svoji raziskavi tudi Dovjak et al. [10], kjer so preučevali vpliv različnih stopenj prezračevanja po slovenski zakonodaji na kakovost notranjega zraka v vrtcih in rabo energije. V tem magistrskem delu pa smo želeli preučiti kakovost notranjega zraka še v drugih okoljih. Za zagotovitev primerne kakovosti notranjega zraka je potrebno v prostore dovajati zadostno količino svežega zraka. V slovenski zakonodaji so v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], podane različne vrednosti glede zahtevane količine svežega zraka, dovedenega v notranji prostor. Podana je tudi mejna vrednost koncentracije ogljikovega dioksida v notranjem prostoru. Koncentracijo ogljikovega dioksida pa lahko uporabimo kot indikator kakovosti notranjega zraka. Namen tega magistrskega dela je bil preučiti, kako različne stopnje prezračevanja vplivajo na koncentracijo ogljikovega dioksida v notranjem okolju, predvsem v izobraževalnih ustanovah in pisarnah. Želeli smo ugotoviti, ali so zahtevane količine svežega zraka predvidene po slovenski zakonodaji zadostne za zagotavljanje koncentracij ogljikovega dioksida v mejnih vrednostih ter posledično, ali je kakovost notranjega zraka v teh prostorih kvalitetna. Za ta namen smo izvedli simulacije s programskim orodjem ter za primerjavo rezultatov naredili še verifikacijo rezultatov z izvedenimi meritvami v testnem prostoru.

Cilji, hipoteze in metode, ki predstavljajo osnovo za nastanek magistrskega dela, so bili sledeči:

1. Cilj: Izvesti sistematičen pregled študij na tematiko kakovosti notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah in pisarnah, vpliv koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem okolju na storilnost ter zdravje in odsotnost uporabnikov.

Hipoteza: Pregledane študije opozarjajo na problematiko povečanih koncentracij CO<sub>2</sub> v obravnavanih okoljih, ki presegajo zahtevane in priporočene mejne vrednosti. Povečane koncentracije ogljikovega dioksida v notranjem okolju imajo negativen vpliv na storilnost in zdravje uporabnikov.

Metoda: Sistematičen pregled literature v bazah ScienceDirect in PubMed po metodi PRISMA.

2. Cilj: S simulacijami ugotoviti, kako različna stopnja prezračevanja, na podlagi podatkov iz Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], vpliva na koncentracijo ogljikovega dioksida v notranjem okolju za primer učilnice, predavalnice in pisarne.

Hipoteza: Koncentracija ogljikovega dioksida se s stopnjo prezračevanja zmanjšuje. Vse podane vrednosti za količino dovedenega zunanjega zraka iz Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], ne bodo vedno zadostile zahtevanim in priporočenim vrednostnim koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem okolju.

Metoda: Izvedba simulacij s programskim orodjem CONTAM 3.2.

3. Cilj: Verificirati dobljene rezultate simulacij s pomočjo meritev koncentracij ogljikovega dioksida v testnem prostoru.

Hipoteza: Izmerjene in simulirane vrednosti bodo primerljive. Z izmerjenimi vrednostmi bomo potrdili rezultate simulacij.

Metoda: Izvedba verifikacije rezultatov simulacij ter rezultatov izvedenih meritev.

V pričujočem magistrskem delu je v drugem poglavju predstavljeno teoretično ozadje naloge, nato je v tretjem poglavju podan pregled zakonodaje. Sledi četrto poglavje, kjer so predstavljene vse tri metode tega dela. V petem poglavju so predstavljeni rezultati glede na posamezno metodo. V šestem poglavju je predstavljena primerjava vseh rezultatov, torej primerjava rezultatov že obstoječih študij ter primerjave med meritvami in simulacijami. Osmo poglavje je namenjeno zaključku.

## 2 TEORETIČNO OZADJE NALOGE

Zaradi naftne krize, ki se je pojavila v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja, se je pojavila miselnost, da moramo na vsak način varčevati z energijo. Graditi so se začele čimbolj zrakotesne stavbe, zmanjšale so se minimalne predpisane količine svežega zraka za prezračevanje prostorov. Z vsemi temi ukrepi pa se je poslabšala kakovost notranjega zraka, kar pa je imelo velik vpliv na zdravje uporabnikov. Na te probleme opozarja tudi vrsta raziskav, izvedenih s strani slovenskih raziskovalcev [10], [12]. Popolna zatesnitev stavbe in izključitev razsvetljave in ogrevanja je najbolj učinkovit način, kako varčevati z energijo. Takšne stavbe pa seveda niso primerne za bivanje, saj niso zagotovljeni zdravi in dobri bivalni ter delovni pogoji. Za doseganje hkratne energijske učinkovitosti in dobrega zdravega notranjega okolja obstaja več različnih ukrepov [13].

V naslednjih podpoglavjih bo predstavljen termin kakovosti notranjega zraka (ang. *Indoor Air Quality (IAQ)*). Predstavljeni bodo ključni parametri, ki vplivajo na neprimerno kakovost notranjega zraka ter posledice, kot sta sindrom bolnih stavb ter bolezni, povezane s stavbo. Podrobneje bo predstavljen tudi ogljikov dioksid kot onesnaževalec notranjega zraka, na katerega smo se osredotočili v pričujočem delu.

### 2.1 Kakovost notranjega zraka

Kakovost notranjega zraka je indikator vrste in količine onesnaževal, ki lahko povzroči neugodje ali celo predstavlja tveganje za zdravje človeka, živali in rastlin. Kakovost zraka se nanaša na koncentracijo ene ali več škodljivih primesi v zraku. Predstavlja nujen pogoj za kakovostno bivanje in delo. Splošno človekovo ugodje v prostoru, je odvisno predvsem od čistega zraka in toplote v prostoru. Pomembna je tudi ustrezna osvetljenost prostora, primerna raven hrupa, notranja ureditev itd. [14]. Na kakovost zraka v prostoru vpliva več dejavnikov, in sicer kakovost dovedenega zraka, ureditev in oblika prostorov v stavbi, način prezračevanja ter koncentracija in jakost notranjih virov onesnaževanja [15]. Prek, M. [16] v svojem delu navaja, da mora kakovost zraka izpolnjevati dve osnovni zahtevi, in sicer zrak ne sme vplivati na zdravje ljudi ter ljudje morajo zaznavati zrak kot svež in prijeten. Najbolj dovzetni za zaznavanje kakovosti zraka so otroci in starejši ter osebe s kroničnimi boleznimi dihal in kardiovaskularnimi boleznimi. Večina ljudi je prepričanih, da je onesnažen samo zunanji zrak. V resnici pa je lahko zrak v notranjih prostorih bolj onesnažen kot zunanji. Na sliki 1 je prikazan potek onesnaženosti zraka v prostoru.



Slika 1: Potek onesnaženosti zraka v prostoru [15]

Na kakovost zraka v prostoru vplivajo spremembe v delovanju sistemov v stavbi, aktivnost oseb v stavbi ter kakovost zunanjega zraka v okolici stavbe, zato le ta ni konstantna. S kombinacijo nadzora virov onesnaževanja ter s prezračevanjem, pa jo lahko nadzorujemo [16].

Dobra kakovost notranjega zraka ima kot posledico veliko prednosti. Zboljšuje zdravje, produktivnost zaposlenih in pomaga narediti ljudi srečnejše. Zmanjša se odsotnost od dela ali pouka, izboljšajo se učni rezultati učencev. Dobra kakovost notranjega zraka pa je povezana tudi z večjo donosnostjo naložb [17].

Kakovost zraka lahko določimo s tremi različnimi pristopi:

- meritev količine posameznih koncentracij primesi v zraku,
- izračun vrednosti koncentracij škodljivih snovi, kot posledico ustreznega prezračevanja,
- subjektivna ocena z anketo, kjer se mora vsaj 80 % vseh anketiranih počutiti ugodno s stališča ugodja zraka, v primeru ko je 20 % ali več nezadovoljnih, pa pride do pojava sindroma bolnih stavb [18].

### 2.1.1 Snovi, ki slabšajo kakovost notranjega zraka

Slaba kakovost notranjega zraka spada med prvih pet okoljskih dejavnikov tveganja [19]. Hiter razvoj novih gradbenih materialov, pohištva, računalnikov, pisarniške opreme, printerjev in ostalih potrošniških izdelkov je povzročil, da v svoj dom vnesemo vedno več kemikalij. Weschler [20] je v svoji raziskavi iz leta 2009 prišel do ugotovitev, da je število izdelanih kemikalij, ki se uporabljajo v gospodinjstvu in v gradbenih materialih, v zadnjih petdesetih letih strmo naraslo. To predstavlja tudi največji vzrok za slabšanje kakovosti notranjega zraka.

V nadaljevanju je v preglednici 1 predstavljenih nekaj najpomembnejših škodljivih snovi, ki slabšajo kakovost notranjega zraka in imajo negativen vpliv na zdravje ljudi. Zapisan je njihov opis, nastanek ter vpliv na zdravje. Ker predstavlja ogljikov dioksid glavni del tega dela, mu je namenjeno posamezno poglavje, kjer je natančneje predstavljen.

Preglednica 1: Škodljive snovi v notranjem okolju [14]

| SNOV                              | OPIS                                                                            | NASTANEK                                                          | VPLIV NA ZDRAVJE                                                                                   |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ogljikov monoksid - CO            | - brezbarven plin                                                               | - pri nepopolnem izgorevanju ogljikovodikov, goriv, lesa, cigaret | - oteževanje dihanja, glavobol, slabost v želodcu<br>- nezavest in smrt pri visokih koncentracijah |
| Dušikovi oksidi – NO <sub>x</sub> | - najbolj problematičen dušikov dioksid                                         | - pri gorenju goriv pri zvišani temperaturi                       | - zmanjšana prehodnost dihalnih poti<br>- infekcije respiratornih organov                          |
| Formaldehid – HCHO                | - uporablja v industriji izolacijskih materialov, tekstilni, papirni industriji | - hlapi iz proizvodov, ki ga vsebujejo                            | - draženje nosne in očne sluznice<br>- povzroča pekoče grlo<br>- genotoksičen<br>- karcinogen      |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

|                         |                                                                           |                                                                                     |                                                                                          |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vonjave                 |                                                                           | - navzočnost in aktivnost ljudi<br>- kuhanje<br>- sanitarne dejavnosti<br>- odpadki | - občutek neugodja                                                                       |
| Lebdeči trdni delci     | - velikokrat notranja koncentracija večja kot zunanja                     | - prah<br>- dim<br>- aerosoli                                                       | - draženje sluznice, nosu, oči, žrela<br>- slabšanje funkcije zgornjih dihal             |
| Cigaretni dim           | - mešanica trdnih delcev, hlapnih organskih spojin in plinov              | - s kajenjem                                                                        | - draženje očesne in nosne sluznice<br>- glavobol<br>- vnetje grla<br>- karcinogena snov |
| Hlapne organske spojine | - alkani, alkoholi, aldehidi, ketoni, estri, aromatski ogljikovodiki itd. | - posledica uporabe lepil, barv, čistil, opreme in delovanja nekaterih strojev      | - kronične in akutne bolezni<br>- nekatere so karcinogene                                |
| Radon                   | - radioaktivni plin - brez vonja in okusa                                 | - z razpadom radija, ki nastane z razpadom urana                                    | - huda pljučna obolenja                                                                  |

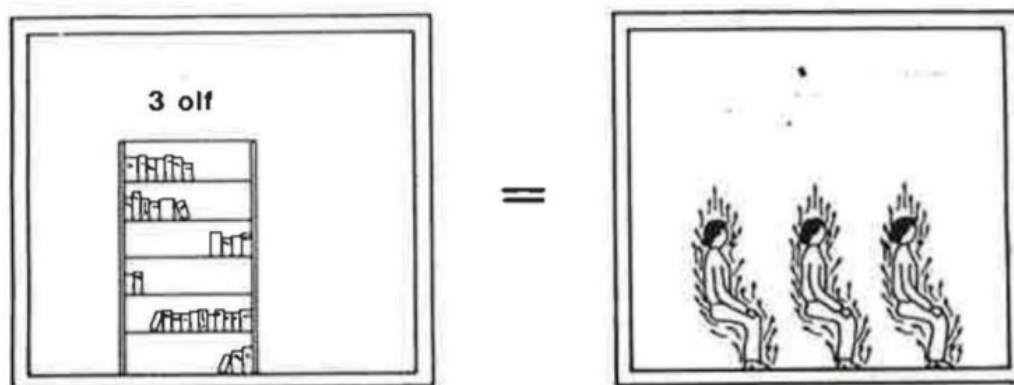
Poleg zgoraj naštetih onesnaževal zraka so pomembni še lebdeči delci azbesta, lebdeča vlakna mineralnih in kamenih voln, plesni, mikroorganizmi (bakterije), ozon itn. [14].

Za omejitev tveganja za zdravje sta za prisotnost zdravju škodljivih snovi v zraku vzpostavljena seznam najvišjih dovoljenih koncentracij in ustrezna časovna izpostavljenost. Vrednosti so določene predvsem za industrijske prostore in se nanašajo na lokacijo vira kemikalije, ki se uporablja v proizvodnem procesu. V pisarniškem okolju in podobnih prostorih so uporabniki izpostavljeni širšemu spektru različnih onesnaževal, vendar je navadno njihova koncentracija dosti nižja. Zaradi prisotnosti različnih onesnaževal je v takem okolju predpisana koncentracija posameznega onesnaževala ustrezno nižja [16]. V poglavju 3 so predstavljene predpisane vrednosti ogljikovega dioksida v notranjem okolju, saj le ta predstavlja glavno temo pričujočega dela.

### 2.1.2 Zaznavanje kakovosti zraka

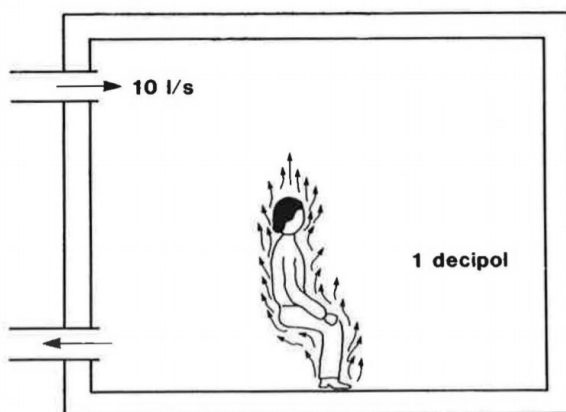
Za zaznavanje kakovosti zraka imamo ljudje dve vrsti čutil. Eno so čutila, ki zaznavajo vonjave in se nahajajo v nosni votlini. Drugo pa so čutila za splošni »kemični« občutek kakovosti zraka. Ta se nahajajo v sluznici nosu in oči. Oboje čutil se odziva na več kot sto tisoč vonjav v zraku. Občutek kakovosti zraka določajo skupni odzivi obeh vrst čutil. Zrak zaznavajo kot svež in prijeten, zatohel, iztrošen ali dražeč [16]. Takšno ocenjevanje zraka je subjektivno, zato sta vpeljani dve količini za ocenjevanje intenzivnosti vira onesnaževanja.

P. O. Fanger [21] je leta 1988 definiral dve količini za ocenjevanje intenzivnosti vira onesnaževanja, in sicer olf in decipol. Beseda olf izhaja iz latinščine in pomeni vonj. Definiran je kot onesnaževanje, ki ga povzroči standardna oseba. Standardna oseba je definirana kot povprečna odrasla oseba s površino  $1,8 \text{ m}^2$  z aktivnostjo 1 met, kar ustreza sedečemu položaju, v željeni kategoriji toplotnega ugodja, s higienskim standardom 0,7 kopanja na dan. Jakost drugih virov onesnaževanja zraka v prostoru lahko izrazimo kot človeški ekvivalent, in sicer s številom ljudi, ki zrak enako onesnažujejo kot dejanski onesnaževalci. V stavbi dosežemo približno od 0,1 do 0,5 olf/ $\text{m}^2$ , oseba, ki kadi pa povzroča kar 25 olfov.



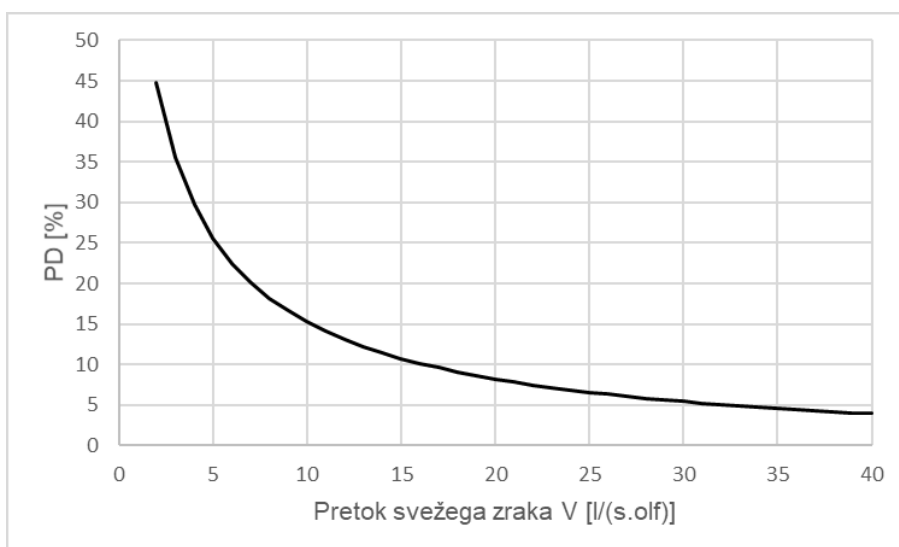
Slika 2: Jakost drugih virov onesnaževanja [21]

Decipol je definiran kot nivo onesnaževanja, ki ga povzroči standardna oseba. 1 decipol je torej 1 olf v prostoru, ki je prezračevan z neonesnaženim zrakom  $10 \text{ l/s}$ . Zunanji zrak ima 0,01 dp, zdrave stavbe 1 dp, v stavbah, ki dosežejo 10 dp, pa se pojavi sindrom bolnih stavb.

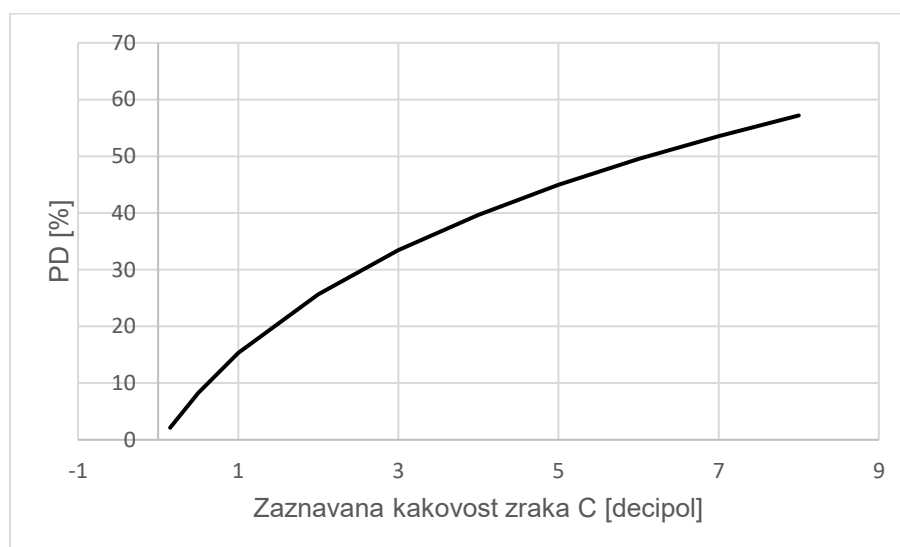


Slika 3: Decipol [21]

Ker smo ljudje zelo različni, obstajajo med nami velike individualne razlike in tudi razlike med našimi zahtevami. Meje sprejemljivosti, ki bi bile ustrezne, je prav zaradi tega težko določiti. Subjektivno ocenjevanje kakovosti zraka ne vključuje vseh onesnažil, saj nekaterih ne zaznamo, tudi če so prisotni v visokih koncentracijah. Prek, M. [16] definira zaznavno kakovost zraka izraženo kot odstotek nezadovoljnih ljudi, to so ljudje, ki ocenjujejo kakovost zraka v prostoru kot nesprejemljivo [16]. Določimo lahko odstotek nezadovoljnih ljudi glede na emisije standardne osebe v odvisnosti od stopnje prezračevanja. Nezadovoljne osebe so tiste, ki jim je zrak v prostoru nesprejemljiv takoj, ko vstopijo vanj [21]. Na grafikonu 1 je prikazana krivulja odstotka nezadovoljnih oseb v odvisnosti od stopnje prezračevanja pri emisiji 1 olf, na grafikonu 2 pa odstotek nezadovoljnih oseb v odvisnosti od zaznane kakovosti zraka, izražene v decipolih.



Grafikon 1: Odstotek nezadovoljnih oseb v odvisnosti od stopnje prezračevanja pri emisiji 1 olf [21]



Grafikon 2: Odstotek nezadovoljnih oseb v odvisnosti od zaznane kakovosti zraka, izražene v decipolih [21]

## 2.2 Ogljikov dioksid

V magistrskem delu smo se osredotočili na enega izmed parametrov kvalitete notranjega zraka, in sicer na ogljikov dioksid.

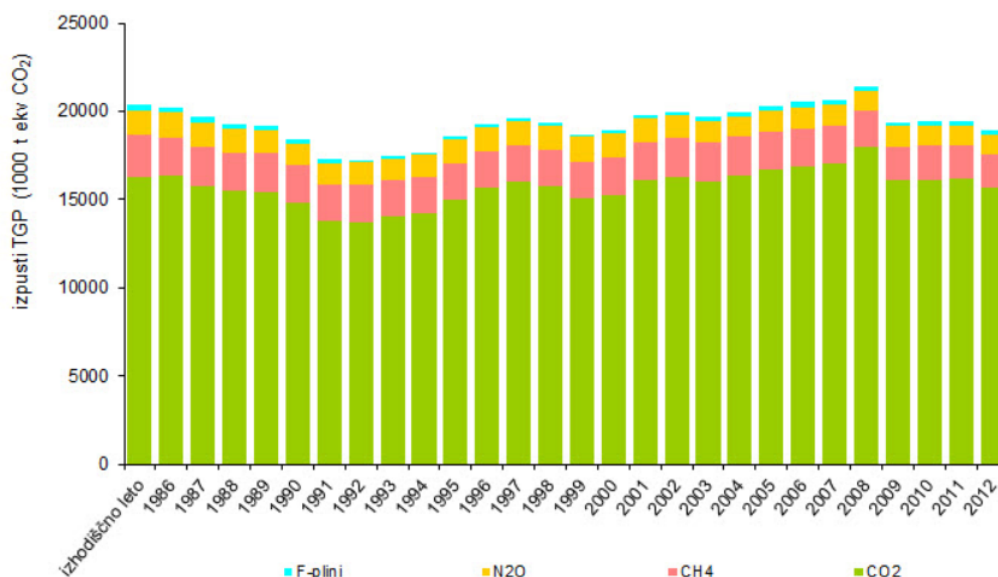
### 2.2.1 Ogljikov dioksid v atmosferi

Ogljikov dioksid, katerega kemijska formula je  $\text{CO}_2$ , je brezbarven plin, plin brez vonja in ni vnetljiv. Nastaja pri zgorevanju snovi, ki vsebujejo ogljik. Je sestavni del osnovnega naravnega življenjskega cikla, saj ga ljudje in živali ga izdihavajo, nato pa ga rastline uporabljajo za pomoč pri rasti. Zaradi njegovih posebnih lastnosti, kot sta na primer njegova nereaktivnost in visoka topnost v vodi, je idealen za uporabo na številnih področjih našega vsakdanjega življenja in ekološke tehnologije. Uporablja se ga:

- v industriji živil in pijač,
- pri čiščenju vode,
- pri obdelavi kovin,
- v industriji celuloze in papirja,
- kot vir energije,
- pri čiščenju in izločanju topil,
- pri kriogenem čiščenju,
- pri gašenju požarov [22].

Ogljikov dioksid se delno pridobiva iz industrijskih odpadnih plinov in delno iz naravnih virov, ki so zlasti vulkanskega izvora. Nastaja tudi pri proizvodnji vodika v rafinerijah, pri proizvodnji sintetičnega plina in etilen oksida [23]. Spada med toplogredne pline, kar pomeni, da v atmosferi deluje kot nekakšno steklo v rastlinjaku, ki ujame sončno toploto in ustavi iztekanje toplote nazaj v vesolje. Povečuje torej učinek tople grede in posledično vpliva na globalno segrevanje. Največ izpustov ogljikovega dioksida povzroča človekova dejavnost, in sicer kar 64 % globalnega segrevanja. V primerjavi s časom ob začetku industrializacije je koncentracija ogljikovega dioksida v ozračju sedaj zelo višja [24].

Na grafikonu 3 so prikazani izpusti toplogrednih plinov po glavnih kategorijah v Sloveniji od leta 1986 do leta 2012. Vidimo lahko, da največje vrednosti dosega ravno ogljikov dioksid.



Grafikon 3: Izpusti toplogrednih plinov po glavnih kategorijah plinov, Slovenija, 1986–2012 [25]

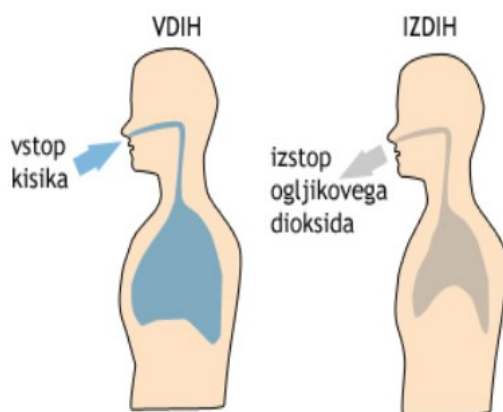
Na grafikonu 4 vidimo potek koncentracij ogljikovega dioksida v atmosferi skozi leta. Opazimo lahko, da so se vrednosti začele dvigovati po letu 1800, leta 1800 so bile za kar 31 % nižje kot danes. Vrednosti pa so začele zelo strmo naraščati po letu 1950. Danes koncentracije ogljikovega dioksida v atmosferi znašajo okoli 410 ppm.



Grafikon 4: Vrednosti koncentracij ogljikovega dioksida v ppm v atmosferi skozi stoletja [26]

### 2.2.2 Ogljikov dioksid v notranjem okolju

Koncentracije ogljikovega dioksida v notranjem okolju nastanejo predvsem z izdihanim zrakom ljudi v stavbi. Dihanje opredelimo kot proces, ki je udeležen pri izmenjavi respiracijskih plinov (kisika –  $O_2$  in ogljikovega dioksida –  $CO_2$ ) med okoljem in organizmom [27]. Drugi viri ogljikovega dioksida v notranjem okolju so cigaretni dim, domače živali, plinski štedilniki ipd.



Slika 4: Proces dihanja [28]

Metabolizem in aktivnost človeka, sta najpomembnejša dejavnika, od katerih je odvisna količina vdihanega zraka. Pri mirovanju vdiha človek približno  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$  zraka, v primeru težkega dela se ta količina poveča. Delež iz zraka sprejetega kisika znaša pri dihanju 5 %. V pljučih se koncentracija kisika v zraku zniža iz 21 % na 16 %. Koncentracija ogljikovega dioksida v izdihanem zraku je približno 4 %, pri čemer je približno stokrat večja kot v vdihanem zraku. Koeficient respiracije predstavlja razmerje med oddajo ogljikovega dioksida in porabo kisika. Določen je kot razmerje med volumskim pretokom izdihanega ogljikovega dioksida in vdihanega kisika. Vrednosti koeficienta respiracije se gibljejo med 0,7 pri porabi maščob za

metabolizem pri mirovanju in nad 1 pri porabi ogljikovih hidratov pri težkem fizičnem delu. Z energetskim ekvivalentom pa tudi lahko izrazimo povezavo med porabo kisika in metabolizmom [16].

Količina izdihanega ogljikovega dioksida je odvisna od starosti, teže in višine osebe, spola, aktivnosti in ali je oseba noseča. Nekje do 15 leta starosti se količina izdihanega ogljikovega dioksida ne razlikuje glede na spol. Nad to starostjo pa se začne razlikovati. Moški so višji, v povprečju težji in zato generirajo več ogljikovega dioksida. Najbolj pomemben parameter pa predstavlja aktivnost osebe, ki je v splošnem proporcionalna z generacijo ogljikovega dioksida [29].

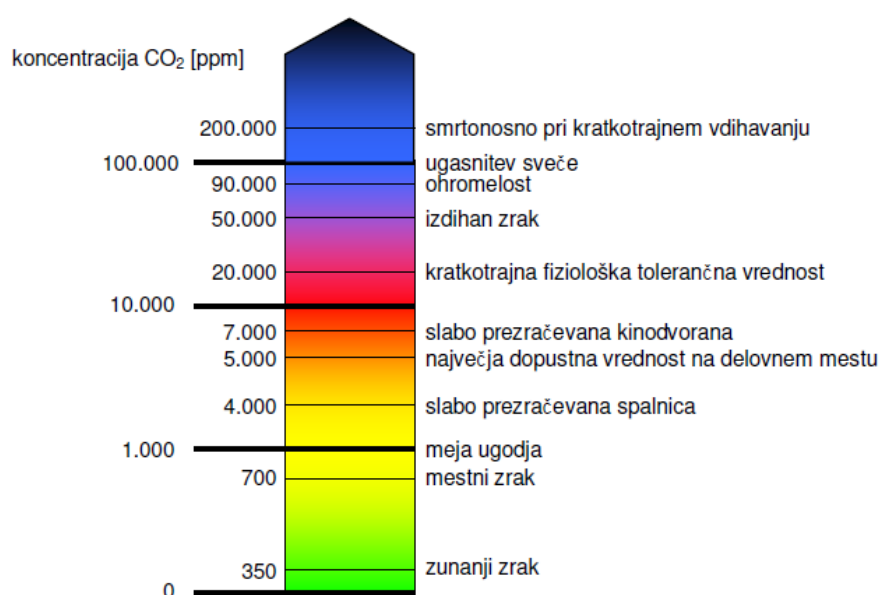
Volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida posamezne osebe je definiran kot generiranje onesnažila  $G$  [l/s]. Odvisen je od aktivnosti oziroma metabolizma  $M$  [W/m<sup>2</sup>] in površine kože človeka  $A_{Du}$  [m<sup>2</sup>] [16].

$$G = 4 \times 10^{-5} \times M \times A_{Du} \quad (1)$$

Površino kože človeka izračunamo na podlagi formule, ki jo je leta 1916 predlagal Du Bois. Odvisna je od teže in višine posamezne osebe [30].

$$A_{Du} = teža [kg]^{0,425} \times višina [cm]^{0,725} \times 0,00718 \quad (2)$$

Max von Pettenkoffer [31] je že leta 1858 raziskal povezavo med koncentracijo ogljikovega dioksida in počutjem ljudi. Predlagal je, da naj koncentracija ogljikovega dioksida v notranjih prostorih, kjer se zadržujejo ljudje, ne presega 1000 ppm. Pri koncentraciji pod 0,1 % (1000 ppm) so se ljudje počutili ugodno, pri koncentraciji nad 0,2 % pa neugodno. Na sliki 5 je prikazano, v katerih primerih nastane posamezna koncentracija ogljikovega dioksida v zunanem in notranjem okolju.



Slika 5: Vrednost koncentracije ogljikovega dioksida v zunanjem in notranjem okolju za posamezne primere [16]

Koncentracije ogljikovega dioksida v normalnih mejah so neškodljive za človekovo zdravje. Visoke koncentracije na 5000 ppm pa imajo resne posledice. V preglednici 2 je prikazano, kakšni so vplivi na človeka pri določenih koncentracijah ogljikovega dioksida v notranjem prostoru.

Preglednica 2: Vpliv ogljikovega dioksida v notranjem okolju na človeka [18]

| KONCENTRACIJA [ppm] | VPLIV NA ČLOVEKA                                                     |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 350–1000            | Tipične vrednosti CO <sub>2</sub> v prostoru z dobrim prezračevanjem |
| 1000–2000           | Lažje vrtoglavice, težja koncentracija, utrujenost, zatohel zrak     |
| 2000–5000           | Glavoboli, utrujenost, zaspanost, stoječ in zatohel zrak             |
| Nad 5000            | Možnost pojava zastrupitve in primanjkljaja kisika                   |
| Nad 40000           | Zelo nevarno stanje, pride do pomanjkanja kisika                     |

## 2.3 Bolezni stavb

V povezavi z boleznimi, ki jih povzroča slaba kakovost notranjega zraka in nezdravo grajeno okolje, sta povezana dva termina. To sta sindrom bolnih stavb (ang. *Sick Building Syndrome* - SBS) in bolezni, povezane z bivanjem v stavbi (ang. *Building Related Illness* - BRI). Predstavljena sta v naslednjih dveh poglavjih.

### 2.3.1 Sindrom bolnih stavb

Sindrom bolnih stavb so prvič omenili v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. S sindromom bolnih stavb opišemo akutne, neugodne ali nespecifične zdravstvene probleme, ki se pojavijo v času zadrževanja v stavbi ali določenem prostoru, vendar za njih ni mogoče postaviti diagnoze za določeno bolezen ali ugotoviti vzroka [12]. Ko uporabnik stavbo, kjer so prisotni dejavniki tveganja za sindrom bolnih stavb, zapusti, ti simptomi izginejo. Povzročajo ga prezračevalni sistemi, neprimerni materiali, neprimerna osvetljenost itd. Dejavniki tveganja so lahko prisotni v samo enem ali več prostorih, lahko pa tudi v celotni stavbi. Simptome sindroma bolnih stavb lahko prepoznamo z ustreznimi kliničnimi preiskavami, ki jih lahko posledično pripišemo dejavnikom tveganja v notranjem okolju stavb. Problematično pa je, da lahko od izpostavljenosti dejavnikom tveganja do klinične potrditve diagnoze preteče dolgo obdobje. Vzroke, ki povzročajo sindrom bolnih stavb, je tudi težko prepoznati, saj je dejavnikov veliko in so si med sabo zelo različni ter so lahko nespecifični. Odziv posameznika na prisotnost onesnaževal v notranjem prostoru je različen. Bilban et al. [32] so definirali, da je najpogostejše odvisen od vrste in količine škodljive snovi, izpostavljenosti kombinaciji različnih dejavnikov tveganja, trajanja izpostavljenosti in predhodnega zdravstvenega stanja. Po dolgotrajni izpostavljenosti dejavnikom tveganja se lahko nespecifični simptomi razvijejo tudi v kronično obolenje. Učinki sindroma bolnih stavb imajo tako velik vpliv na kakovost našega življenja [32].

Sindrom bolnih stavb Bilban et al. [32] klasificirajo v 4 tipe bolezni:

- Tip 1 – simptomi kemijske intoksikacije,
- Tip 2 – simptomi, ki so se razvili zaradi možne izpostavljenosti kemikaliji,
- Tip 3 – simptomi, ki so se razvili, zaradi psiholoških in duševnih dejavnikov,
- Tip 4 – simptomi, ki so se razvili zaradi alergij ali druge bolezni.

Glede na diagnostične kriterije sindrom bolnih stavb delimo na infekcijske bolezni, alergije, toksične reakcije in dražilni sindrom [32].

Simptome, ki jih povezujemo s sindromom bolnih stavb, razdelimo na pet skupin, in sicer simptome povezane z nosno sluznico, očno sluznico, grlom, kožo in na splošne simptome [30]. Natančneje so prikazani v preglednici 3.

Preglednica 3: Simptomi sindroma bolnih stavb [12]

| NOSNA SLUZNICA    | OČESNA SLUZNICA  | GRLO          | KOŽA       | SPLOŠNI SIMPTOMI     |
|-------------------|------------------|---------------|------------|----------------------|
| - zamašen nos     | - draženje       | - kašelj      | - ekcem    | - vročina            |
| - izcedek iz nosu | - suhost         | - hripavost   | - srbečica | - glavobol           |
| - kihanje         | - izcedek iz oči | - boleče grlo |            | - slabost            |
|                   |                  |               |            | - slabši spomin      |
|                   |                  |               |            | - bolečine v trebuhu |
|                   |                  |               |            | - omotica            |
|                   |                  |               |            | - utrujenost         |
|                   |                  |               |            | - letargija          |
|                   |                  |               |            | - dispneja           |
|                   |                  |               |            | - bolečine v sklepih |

Dovjak in Kuček [33], [34] sta v svojem delu identificirali dejavnike tveganja za SBS in jih razdelili na fizikalne, biološke, kemične in psihosocialne ter dejavnike na nivoju posameznika. Med fizikalne dejavnike spadajo relativna vlažnost zraka, temperatura zraka, hrup in vibracije, osvetljenost in svetloba, prezračevanje, elektromagnetno sevanje in ergonomija. Biološki dejavniki tveganja so mikrobiološki onesnaževalci, kot so plesni, bakterije, mikrobi, glive in prah. Med kemične dejavnike tveganja uvrstimo onesnaževala, katerih viri izvirajo iz notranjosti ali so prisotni v zunanjem okolju. To so gradbeni in gospodinjski proizvodi, formaldehid, ftalati, umetna mineralna vlakna, hlapne organske spojine, tobačni dim, drugi notranji onesnaževalci zraka. Na prisotnost sindroma bolnih stavb pa vplivajo tudi psihosocialni dejavniki, kot so stres na delovnem mestu, socialni status, osamljenost, organizacija na delovnem mestu, nezadovoljstvo z delom, komunikacija in nadzor nad delom. Pomembne pa so tudi osebnostne lastnosti posameznika, njegovo zdravstveno stanje in spol [33]. Drugi dejavniki tveganja pa so še lokacija in karakteristike stavbe, lastništvo ter prisotnost insektov, glodalcev [33], [34].

Ker sindrom bolnih stavb vpliva na kakovost našega življenja in na naše zdravje, je potrebno upoštevati ukrepe za preprečevanje in obvladovanje le tega. Ti morajo temeljiti predvsem na preventivnih ukrepih. Pomembno je, da jih upoštevamo že v fazi načrtovanja stavbe do izgradnje in same uporabe stavbe. Najpomembnejši ukrepi za preprečevanje in obvladovanje sindroma bolnih stavb ter nadzor nad dejavniki tveganja so po Bilban et al. [32] naslednji:

- implementacija in izvajanje ustreznih pravnih predpisov,
- ocena tveganja in obvladovanje tveganja,
- ustrezne epidemiološke raziskave (ocena izpostavljenosti, okoljska anamneza),
- analiza življenjskega cikla (LCA),

- gradbeno in arhitekturno projektiranje, ki temelji na principu bioklimatskega načrtovanja, oblikovanje in izgradnja primerne ovojne stavbe in konstrukcijskih sklopov z uporabo zdravju prijaznih gradbenih proizvodov,
- učinkoviti in ustrezno vzdrževani HVAC sistemi.

### **2.3.2 Bolezni, povezane z bivanjem v stavbi**

S pojmom bolezni, povezane z bivanjem v stavbi, poimenujemo diagnosticirane bolezni, katerih simptome je mogoče prepoznati s kliničnimi preiskavami in jih neposredno povezati z onesnaževali v zraku stavbe [12]. Te bolezni so dokaj dobro dokumentirane in imajo postavljene diagnostične kriterije, poznani so vzroki in definirano je zdravljenje. Osebe, ki zbolijo za boleznijo, povezano z bivanjem v stavbi, okrevajo dlje časa po tem, ko zapustijo stavbo, ki je bila vzrok za bolezen.

Bolezni, povezane z bivanjem v stavbi, razdelimo na štiri skupine:

- alergije, astma, rinitis,
- preobčutljivostni pnevmonitis (ekstrinzični alergijski alveolitis),
- vročina,
- okužbe (bakterijske, glivične, virusne) [12].

Primeri bolezni, povezanih z bivanjem v stavbi, so Pontiakova mrzlica, azbestoza, Legionarska bolezen, vnetni procesi na pljučih in preobčutljivost. Vzroki za zgoraj naštetе bolezni so legionela, plesen, bakterije, prah, glive, organske kemikalije itd [35].

## **2.4 Prezračevanje**

Prezračevanje predstavlja najpomembnejši faktor pri zagotavljanju kakovosti notranjega zraka in zmanjšanju koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem zraku. Je izmenjava zatohlega notranjega zraka, ki vsebuje koncentracije škodljivih primesi in vonja, s svežim zunanjim zrakom primernim za dihanje [36]. Zrak, ki ga dovajamo v prostor, mora imeti primerno temperaturo in vlago, pri čemer primerna temperatura zaniha v odvisnosti od okoliških parametrov, vlaga pa naj se giblje med 35 % in 80 % [18].

Poznamo več vrst prezračevanja, in sicer naravno, mehansko in hibridno prezračevanje. Naravno prezračevanje izkorišča naravne fizikalne lastnosti zraka, brez uporabe mehanskih naprav. Takšno prezračevanje poteka s pomočjo večjih odprtín, kot so okna in vrata ter prezračevalni jaški. Mehansko prezračevanje poteka s pomočjo mehanske naprave, ki

zagotavlja ustrezno velik pretok zraka, neodvisno od zunanjih pogojev. Kombinacija naravnega in mehanskega prezračevanja pa je hibridno prezračevanje. Tukaj se za prezračevanje hkrati uporabljata oba načina [36].

Potreben pretok dovedenega zunanjega svežega zraka v prostor zaradi zagotavljanja ustrezne koncentracije onesnažila je odvisen od generiranja onesnažila v prostoru oziroma prezračevalnem sistemu ter koncentracije onesnažila v prostoru in zunanjem zraku. Definiran je z naslednjo enačbo [16]:

$$\dot{V} = \frac{G}{(C_i - C_0)} \quad (3)$$

Kjer je:

$\dot{V}$  – pretok dovedenega zunanjega svežega zraka v prostor [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],

$G$  – generiranje onesnažila v prostoru oziroma prezračevalnem sistemu [ $\text{g/h}$ ],

$C_i$  – koncentracija onesnažila v prostoru [ $\text{g/m}^3$ ],

$C_0$  – koncentracija onesnažila v zunanjem zraku [ $\text{g/m}^3$ ].

#### 2.4.1 Količina potrebnega zunanjega svežega zraka

Pri prezračevanju je pomembno, da je količina zunanjega dovedenega zraka zadostna. Glede na namembnost prostora oziroma vir onesnažila, lahko za določitev potrebne količine zraka za prezračevanje uporabimo naslednje metode. Te temeljijo na:

- številu izmenjav zraka,
- številu ljudi,
- mejni koncentraciji onesnažila,
- zaznani kakovosti zraka,
- osnovi števila ljudi in emisijskih lastnosti stavbe [16].

Število izmenjav zraka ali stopnja prezračevanja je razmerje med volumskim pretokom svežega dovedenega zraka in volumnom zraka v prostoru. Definirana je z enačbo [16]:

$$n = \frac{\dot{V}}{V} \quad (4)$$

Kjer je:

$n$  – število izmenjav zraka [ $\text{h}^{-1}$ ],

$\dot{V}$  – volumski pretok svežega dovedenega zraka [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],

$V$  – volumen zraka v prostoru [ $\text{m}^3$ ].

Število izmenjav zraka pove, kolikokrat se zrak v prostoru zamenja s svežim zrakom v obdobju ene ure. Določeno je izkustveno, odvisno je od obremenjenosti, vrste in zasedenosti prostorov. Ko je prostor nezaseden, je pomembno, da se vzdržuje minimalno število izmenjav, saj le tako zagotovimo ustrezno kakovost zraka. Onesnažila se namreč takrat emitirajo iz gradbenih materialov, pohištva, opreme in naprav.

Potrebno količino svežega zraka za prezračevanje lahko določimo tudi na osnovi števila ljudi. Ta način je primeren za prostore, kjer je zrak najbolj obremenjen zaradi prisotnosti ljudi, kot so večje koncertne, športne in kongresne dvorane ter restavracije. Odvisna je od potrebne količine svežega zraka na človeka in števila ljudi v prostoru [16]:

$$\dot{V} = N \times \dot{V}_o \quad (5)$$

Kjer je:

$\dot{V}$  – pretok dovedenega zunanjega svežega zraka v prostor [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],

$N$  – število ljudi v prostoru,

$\dot{V}_o$  – potrebna količina svežega zraka na človeka [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].

Na podlagi emisije in vrste onesnažila lahko določimo potrebno količino svežega zraka na osnovi največje dovoljene koncentracije tega onesnažila [16]:

$$\dot{V} = \frac{G}{(C_{i,max} - C_0)} \quad (6)$$

Kjer je:

$\dot{V}$  – pretok dovedenega zunanjega svežega zraka v prostor [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],

$G$  – generiranje onesnažila v prostoru oziroma prezračevalnem sistemu [ $\text{g}/\text{h}$ ],

$C_{i,max}$  – dopustna koncentracija onesnažila v prostoru [ $\text{g}/\text{m}^3$ ],

$C_0$  – koncentracija onesnažila v zunanjem zraku [ $\text{g}/\text{m}^3$ ].

Določitev zelene ravni kakovosti zraka v prezračenem prostoru, je pomembna s stališča ugodja. Potrebna količina svežega zraka se torej lahko določi na podlagi zelene ravni kakovosti zraka. Kategorijo kakovosti zraka v prostoru lahko določimo glede na koncentracijo ogljikovega dioksida [16].

Pri določitvi potrebne količine svežega zunanjega zraka lahko upoštevamo tudi emisijske lastnosti stavbe, poleg števila ljudi v stavbi. Potrebna količina svežega zraka je v tem primeru določena z enačbo [16]:

$$\dot{V} = N \times \dot{V}_o + A \times \dot{V}_s \quad (7)$$

Kjer je:

$\dot{V}$  – skupni pretok svežega zraka [l/s],

$N$  – število ljudi v prostoru,

$\dot{V}_o$  – pretok svežega zraka na osebo [l/(s.osebo)],

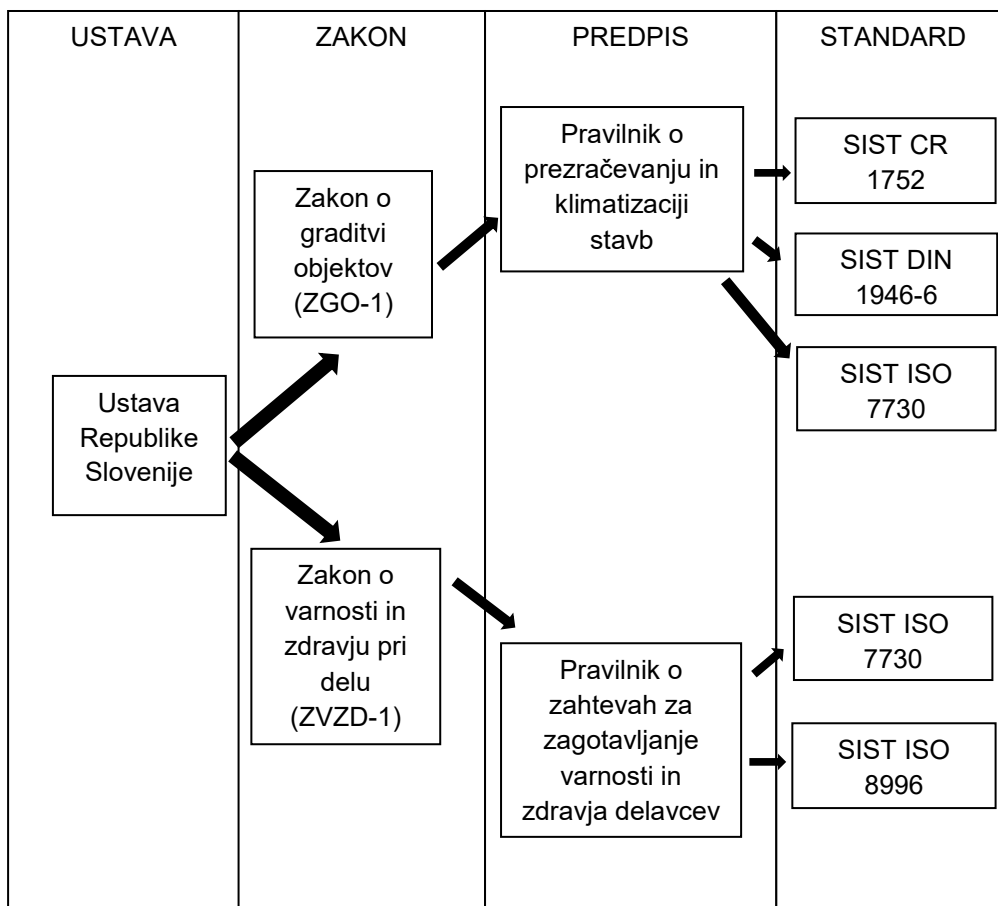
$A$  – neto tlorisna površina prostora [m<sup>2</sup>],

$\dot{V}_s$  – pretok svežega zraka zaradi emisije [l/(s.m<sup>2</sup>)] [kakovost zraka].

Metodološki postopki določitve pretoka svežega zraka so določeni tudi s številnimi standardi. Naše delo se je omejilo na postopek po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11].

### 3 PREGLED ZAKONODAJE

V tem poglavju so predstavljeni mednarodni in nacionalni pravni akti, priporočila in smernice na področju prezračevanja in klimatizacije stavb in posledično tudi dovoljene koncentracije ogljikovega dioksida v notranjih prostorih. Na sliki 6 je prikaz hierarhične razdelitve pravnih aktov, ki se navezujejo na obravnavano področje.



Slika 6: Hierarhična razdelitev pravnih aktov za obravnavano področje

V Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], so določene tehnične zahteve za prezračevanja in klimatizacijo stavb ter tehnične zahteve za mehanske prezračevalne sisteme, če se ti vgradijo v stavbo. V okviru določanja tehničnih zahtev, navedenih v prejšnjem stavku, ta pravilnik obravnava notranje okolje v pogledu kakovosti zraka in toplotnega okolja. Pravilnik se sklicuje na standarde SIST CR 1752 [37], SIST DIN 1946-6 [38] in SIST ISO 7730 [39]. Kakovost zraka v notranjem okolju je opredeljena od 7. do 10. člena. 7. člen opredeli, da mora biti zrak v prostoru svež in prijeten, brez vonjav in ne sme ogrožati zdravja ljudi v prostoru. Pri projektiranju in gradnji stavb je potrebno upoštevati, da je vir onesnaževanja notranjega zraka stavba kot celota, torej gradbeni material, pohištvo, prezračevalni sistem, oprema. Drugi vir onesnaževanja pa je povezan z uporabniki

prostora. V členu 8. je določen najmanjši potrebni vtok zunanjega zraka, in sicer  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  na osebo v prostorih, kjer kajenje ni dovoljeno, brez upoštevanja drugih virov onesnaževanja in pri učinkovitosti onesnaževanja ena. Minimalna volumska izmenjava zraka je v času prisotnosti ljudi v prostorih stavbe, ki so namenjeni za delo in bivanje, določena v višini  $n=0,5 \text{ h}^{-1}$ . V času odsotnosti ljudi v prostorih stavbe pa je potrebno zagotoviti in vzdrževati izmenjavo zraka najmanj  $n=0,2 \text{ h}^{-1}$  za odstranitev emisij stavbe in preprečitve na primer pojava kondenzacije. Količina zunanjega svežega zraka se lahko določi tudi glede na talno površino in mora znašati najmanj  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$  na kvadratni meter talne površine prostora, brez upoštevanja drugih virov onesnaževanja zraka. V prilogi 1 Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], so v tabeli 8 pod točko 4 podane količine zunanjega zraka za prezračevanje. Te vrednosti zagotavljajo dopustno notranje okolje pri običajno znanih pogojih in ne upoštevajo morebitnih dodatnih onesnaževalcev. V preglednici 4 so prikazane vrednosti, ki se nanašajo na pričujočo nalogo.

Preglednica 4: Količine zunanjega zraka za prezračevanja po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr., Priloga 1, tabela 8 [11]

| Prostor      | Ocenjena največja gostota<br>[ljudi/100 m <sup>2</sup> ] | Količina zraka [m <sup>3</sup> /h*oseba] |
|--------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Pisarne      | 7                                                        | 35                                       |
| Učilnice     | 50                                                       | 30                                       |
| Telovadnice  | 30                                                       | 35                                       |
| Predavalnice | 150                                                      | 30                                       |

9. člen določa, da je potrebno s prezračevanjem zagotavljati, da koncentracije notranjih onesnaževalcev zraka v prostorih stavbe ne presegajo dopustnih vrednosti. Za ogljikov dioksid je podana dopustna vrednost  $3000 \text{ mg}/\text{m}^3$  (1667 ppm), kjer koncentracija vključuje ogljikov dioksid v zunanjem zraku ( $700 \mu \text{ g}/\text{m}^3$ ) in emisijo človeka. S temi vrednostmi je zagotovljen prostor brez vonjav, ni pa upoštevano, kakšen vpliv imajo koncentracije ogljikovega dioksida v notranjem okolju na počutje oziroma zdravje ljudi ter posledično njihovo produktivnost, koncentracijo, učno uspešnost itd.

Pomembno je tudi, da je potrebno prezračevanje in predpisane parametre notranjega okolja doseči z najmanjšo možno rabo energije. To opredeljuje 5. člen Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11]. Prezračevalni sistem mora zagotoviti zahtevano izmenjavo zraka oziroma učinkovito prezračevanje ob najmanjši izgubi toplote/hladu prezračevanega prostora stavbe.

Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih, Uradni list RS, št. 89/1999 s spr. [40], določa zahteve za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev, ki jih mora delodajalec upoštevati pri načrtovanju, opremljanju in vzdrževanju delovnih mest. Prezračevanje delovnih mest je opredeljeno od 15. do 24. člena. Zapisano je, da mora delodajalec z ustreznimi ukrepi zagotoviti, da je v delovnih prostorih vedno dovolj svežega zraka glede na delovne postopke in fizične obremenitve delavcev pri delu. Delodajalec mora prezračevalne naprave, s katerimi prezračuje delovne prostore, redno čistiti in vzdrževati tako, da delujejo brezhibno. 17. člen opredeljuje, da lahko delodajalec naravno prezračuje delovne prostore, ki imajo zadosti velika okna ali druge prezračevalne odprtine. Le te morajo biti dovolj oddaljene od zunanjih virov onesnaževanja. V primeru mehanskega prezračevanja mora delodajalec zagotoviti, da je doveden zrak ustrezno čist in brez vonjav. Prezračevalne naprave morajo biti opremljene s filtri prečiščevanja vstopnega zraka, ki morajo biti redno vzdrževane in po potrebi zamenjane. Delavci ne smejo biti izpostavljeni neposrednemu zračnemu toku, ki ga povzroča prezračevalna ali klimatska naprava.

Minimalne vrednosti dovedene količine zunanjega zraka, kadar je prostor prezračevan s prezračevalno ali klimatsko napravo in kjer ni drugih onesnaževalcev, razen prisotnih oseb, so naslednje:

- 20–40 m<sup>3</sup>/h na delavca, ki opravlja delo pretežno sede,
- 40–60 m<sup>3</sup>/h na delavca, ki opravlja delo pretežno stoje,
- več kot 65 m<sup>3</sup>/h na delavca, ki opravlja težko fizično delo.

V primeru dodatnih obremenitev zraka v prostoru z neprijetnimi vonjavami ali cigaretnim dimom morajo biti zagotovljene dodatne količine svežega zraka. Zaradi cigaretnega dima znaša ta vrednost 10 m<sup>3</sup>/h na osebo in zaradi neprijetnih vonjav 20 m<sup>3</sup>/h na osebo.

Na področju kakovosti notranjega zraka imamo na mednarodnih tleh kar nekaj standardov. V nadaljevanju sta predstavljena dva tuja standarda, katerih priporočene vrednosti so za določene vrednosti strožje kot v našem Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11]. Na Finskem to področje opredeljuje FiSIAQ (ang. *Finnish Society of Indoor Air Quality and Climate*) [41]. Vrednosti so podane glede na tri različne kategorije S1, S2 in S3. Kategorija S1 dosega najboljšo kakovost notranjega zraka. Kakovost notranjega zraka pri kategoriji S2 pa je zadovoljiva. V preglednici 5 so prikazane količine zunanjega zraka za prezračevanje po finskem standardu ter dopustne koncentracije ogljikovega dioksida za vsako posamezno kategorijo.

Preglednica 5: Količine zunanjega zraka za prezračevanje in dopustne koncentracije ogljikovega dioksida po finskem standardu FiSIAQ [41]

| Prostor                                     |    | Pisarne | Učilnice | Predavalnice |
|---------------------------------------------|----|---------|----------|--------------|
| Količina zraka<br>[m <sup>3</sup> /h*oseba] | S1 | 57,6    | 39,6     | 39,6         |
|                                             | S2 | 46,8    | 28,8     | 28,8         |
|                                             | S3 | 28,8    | 21,6     | 21,6         |
| Koncentracija<br>CO <sub>2</sub> [ppm]      | S1 | 750     |          |              |
|                                             | S2 | 900     |          |              |
|                                             | S3 | 1200    |          |              |

Po ANSI/ASHRAE Standardu 62.1 [42] je zadovoljiva raven koncentracije ogljikovega dioksida odvisna od zunanje koncentracije ogljikovega dioksida. Navedeno je, da raven koncentracije ne sme presegati vrednosti 700 ppm. Koncentracije v zunanjem zraku se nahajajo med vrednostjo 300 do 500 ppm. To pomeni, da se giblje priporočena vrednost koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem okolju med 1000 in 1200 ppm. V preglednici 6 so prikazane minimalne količine zunanjega zraka za prezračevanje po standardu ANSI/ASHRAE Standardu 62.1 [42].

Preglednica 6: Količine zunanjega zraka za prezračevanje po standardu ANSI/ASHRAE Standardu 62.1 [42]

| Prostor      | Ocenjena največja gostota<br>[ljudi/100 m <sup>2</sup> ] | Količina zraka [m <sup>3</sup> /h*oseba] |
|--------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Pisarne      | 5                                                        | 30,6                                     |
| Učilnice     | 35                                                       | 24,12                                    |
| Telovadnice  | 7                                                        | 82,8                                     |
| Predavalnice | 65                                                       | 15,48                                    |

Področje prezračevanja obravnava še veliko drugih standardov. Mi smo se v pričujoči nalogi osredotočili na zahteve Republike Slovenije, določene s trenutno veljavnim pravilnikom.

## 4 METODE

V pričujočem magistrskem delu so bile izvedene tri različne metode. Za zgled smo uporabili metodološki pristop, predstavljen v raziskavi Dovjak et al. [10]. Glede na specifične obravnavanega okolja tega magistrskega dela smo le tega smiselno prilagodili.

### 4.1 Pregled literature

Pregled literature je bil sistematičen. Uporabili smo deskriptivno raziskovalno metodo s pregledom znanstvene in strokovne literature v mednarodnih podatkovnih bazah, in sicer ScienceDirect in PubMed. Iskalni profil smo sestavili s pomočjo Boolovih operatorjev, operatorjev bližanja in okrajšav. Iskalni profil je bil sestavljen za tri različne tipe študij. Tip 1 so obsegale študije, ki so opozarjale na problematiko nezadostnega prezračevanja v izobraževalnih ustanovah in pisarnah ter podale predloge oziroma priporočila za izboljšanje prezračevanja. Ključne besedne zveze so bile: »school«, »office«, »indoor air quality«, »carbon dioxide«. Tip 2 so obsegale študije, kjer je bil raziskan vpliv notranjih koncentracij ogljikovega dioksida oziroma stopnje prezračevanja na storilnost ljudi ter njihovo kognitivno učinkovitost. Ključne besedne zveze so bile: »carbon dioxide«, »ventilation rate«, »pupils performance«, »cognitive performance«. Tip 3 so obsegale študije, ki so raziskovale povezavo med koncentracijo ogljikovega dioksida v notranjem okolju in njegovim vplivom na bolezenske simptome in posledično odsotnost od dela ali šole. Ključne besedne zveze so bile: »carbon dioxide«, »sick building syndrome«, »school«, »office«. Pri vključitvenih kriterijih smo upoštevali, da je okolje, ki ga posamezna študija obravnava, pisarniško ali pa se študije navezujejo na izobraževalne ustanove. Upoštevali smo tudi, da so članki sodili med izvirne, pregledne, strokovne in znanstvene članke, ki so napisani v angleškem jeziku. Kot vključitvene kriterije smo upoštevali, da so bili članki dostopni v celotnem besedilu ali kot povzetki ter da so tematsko ustrezni. Prav tako smo upoštevali, da so bili predhodno pregledani s strani ocenjevalcev (peer-reviewed). Za prikaz pregleda podatkovnih baz in odločanja o uporabnosti pregledanih virov smo uporabili metodo PRISMA (ang. *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta – Analysis*) [43].

### 4.2 Simulacije

S simulacijami smo želeli priti do rezultata, kako različne količine dovedenega zunanega zraka vplivajo na koncentracije ogljikovega dioksida v notranjem okolju. Za simulacije smo izbrali tri različne prostore, in sicer učilnico, pisarno in predavalnico. Za izvedbo simulacij je bilo

uporabljeno programsko orodje CONTAM 3.2. V nadaljevanju so za posamezen prostor predstavljena izhodišča, ki so bila upoštevana pri simulacijah.

Izhodišče glede vrste prezračevanja je bilo enako za vse tri prostore, predvideno je bilo samo mehansko prezračevanje. Upoštevana sta bila dva vhodna podatka, in sicer volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida posamezne osebe ter količina dovedenega zunanjega zraka. Za izračun volumskega pretoka je bil za vse tri prostore upoštevan enak metabolizem za sedeče aktivnosti, ki znaša  $70 \text{ W/m}^2$  in je naveden v standardu SIST EN ISO 8996:2005 [44]. Za izračun količine dovedenega zunanjega zraka pa so bili upoštevani štirje različni podatki iz Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], in sicer glede na stopnjo prezračevanja, glede na najmanjšo količino zraka za človeka, glede na najmanjši vtok zunanjega zraka na osebo ter glede na priporočene količine zunanjega zraka za prezračevanje za posamezen prostor.

#### 4.2.1 Učilnica

Za izvedbo simulacij smo predvideli učilnico s površino  $60 \text{ m}^2$  ter volumnom  $180 \text{ m}^3$ . Ti podatki so zapisani v Navodilih za graditev osnovnih šol v Republiki Sloveniji [45]. Prav tako je predpisano maksimalno število učencev v oddelku, in sicer 28. Predvidela sem, da je v oddelku 14 deklet ter 14 fantov starosti 11 let ter učiteljica starosti 35 let. V preglednici 7 so prikazani podatki za izračun volumskega pretoka izdihanega ogljikovega dioksida za primer učilnice. Za učilnico znaša skupni volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida  $0,40 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Preglednica 7: Volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer učilnice

|            | Površina telesa [ $\text{m}^2$ ] | Metabolizem [ $\text{W/m}^2$ ] | Volumski pretok izdihanega $\text{CO}_2$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] |
|------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Dekleta    | 1,361                            | 70                             | 0,0137                                                             |
| Fantje     | 1,371                            |                                | 0,0138                                                             |
| Učiteljica | 1,845                            |                                | 0,0186                                                             |

V preglednici 8 so prikazani vhodni podatki glede količine dovedenega zunanjega zraka, ki so bili upoštevani kot vhodni podatki v simulacijah za primer učilnice.

Preglednica 8: Količine dovedenega zunanjega zraka [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer učilnice, izračunane iz predpisanih in priporočenih vrednosti

| Scenarij | Predpisane in priporočene vrednosti                                                 | Izračunana količina dovedenega zunanjega zraka za učilnico [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Stopnja prezračevanja 0,5/h                                                         | 90                                                                                   |
| 2        | Najmanjša količina zraka za človeka 7,2 $\text{m}^3/\text{hm}^2$                    | 432                                                                                  |
| 3        | Najmanjši vtok zunanjega zraka za osebo 15 $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{osebo}$ | 435                                                                                  |
| 4        | Priporočene količine zunanjega zraka 30 $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{osebo}$    | 870                                                                                  |

#### 4.2.2 Pisarna

Za dimenzijo pisarne smo upoštevali podatek iz priloge 1 Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], kjer je ocenjena največja gostota ljudi v pisarni 7 ljudi na  $100 \text{ m}^2$ . Tako mora biti za eno osebo namenjenih  $14,3 \text{ m}^2$ . Predvideli smo, da bo v pisarni 6 ljudi, zato znaša površina pisarne  $85,8 \text{ m}^2$  ter volumen  $205,9 \text{ m}^3$ . Tri osebe v pisarni so ženskega spola in tri osebe so moškega spola, in sicer starosti od 40 do 49 let. V preglednici 9 so prikazani podatki za izračun volumskega pretoka izdihanega ogljikovega dioksida za primer pisarne. Za pisarno znaša skupni volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida  $0,119 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Preglednica 9: Volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer pisarne

|        | Površina telesa [ $\text{m}^2$ ] | Metabolizem [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] | Volumski pretok izdihanega $\text{CO}_2$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] |
|--------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Ženske | 1,842                            | 70                                    | 0,0186                                                             |
| Moški  | 2,081                            |                                       | 0,0210                                                             |

V preglednici 10 so prikazani vhodni podatki glede količine dovedenega zunanjega zraka, ki so bili upoštevani kot vhodni podatki v simulacijah za primer pisarne.

Preglednica 10: Količine dovedenega zunanjega zraka [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer pisarne, izračunane iz predpisanih in priporočenih vrednosti

| Scenarij | Predpisane in priporočene vrednosti                                                 | Izračunana količina dovedenega zunanjega zraka za pisarno [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Stopnja prezračevanja 0,5/h                                                         | 103                                                                                 |
| 2        | Najmanjša količina zraka za človeka 1,1 $\text{m}^3/\text{hm}^3$                    | 94                                                                                  |
| 3        | Najmanjši vtok zunanjega zraka za osebo 15 $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{osebo}$ | 90                                                                                  |
| 4        | Priporočene količine zunanjega zraka 35 $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{osebo}$    | 210                                                                                 |

#### 4.2.3 Predavalnica

Za dimenzijo predavalnice smo prav tako upoštevali podatek iz priloge 1 Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], kjer je ocenjena največja gostota ljudi v predavalnici 150 ljudi na 100  $\text{m}^2$ . Tako mora biti za eno osebo namenjenih 0,66  $\text{m}^2$ . Predvideli smo, da bo v predavalnici 150 ljudi, zato znaša površina predavalnice 100  $\text{m}^2$  ter volumen 600  $\text{m}^3$ . 75 oseb je ženskega spola in 75 moškega spola, starosti od 20 do 29 let. V preglednici 11 so prikazani podatki za izračun volumskega pretoka izdihanega ogljikovega dioksida za primer predavalnice. Za predavalnico znaša skupni volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida 2,88  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Preglednica 11: Volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer predavalnice

|        | Površina telesa [ $\text{m}^2$ ] | Metabolizem [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] | Volumski pretok izdihanega $\text{CO}_2$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] |
|--------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Ženske | 1,79                             | 70                                    | 0,0180                                                             |
| Moški  | 2,016                            |                                       | 0,0203                                                             |

V preglednici 12 so prikazani vhodni podatki glede količine dovedenega zunanjega zraka, ki so bili upoštevani kot vhodni podatki v simulacijah za primer predavalnice.

Preglednica 12: Količine dovedenega zunanjega zraka [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] za primer predavalnice, izračunane iz predpisanih in priporočenih vrednosti

| Scenarij | Predpisane in priporočene vrednosti                                                    | Izračunana količina dovedenega zunanjega zraka za pisarno [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Stopnja prezračevanja 0,5/h                                                            | 300                                                                                 |
| 2        | Najmanjša količina zraka za človeka 7,2<br>$\text{m}^3/\text{hm}^2$                    | 720                                                                                 |
| 3        | Najmanjši vtok zunanjega zraka za osebo 15<br>$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{osebo}$ | 2250                                                                                |
| 4        | Priporočene količine zunanjega zraka 30<br>$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{osebo}$    | 4500                                                                                |

#### 4.3 Verifikacija in validacija rezultatov v testnem prostoru

Z meritvami v testnem prostoru smo želeli verificirati rezultate simulacij. Opazovali smo, kako zasedenost prostora in ukrepi prezračevanja v primeru naravnega prezračevanja vplivajo na koncentracijo ogljikovega dioksida v notranjem okolju.

Meritve so bile izvedene z avtomatskim merilnikom kakovosti zraka, ki ni komercialni izdelek, temveč je bil izdelan za potrebe raziskave, ki je potekala na grški univerzi. V napravi sta vgrajena dva senzorja, ki sta dostopna na trgu: Tongdy  $\text{CO}_2$  transmitter / detector / senzor, model F2000TSM in Tongdy IAQ indicator / controller, model F2000TSM-VOC. Parametri, ki jih avtomatski merilnik meri, so:

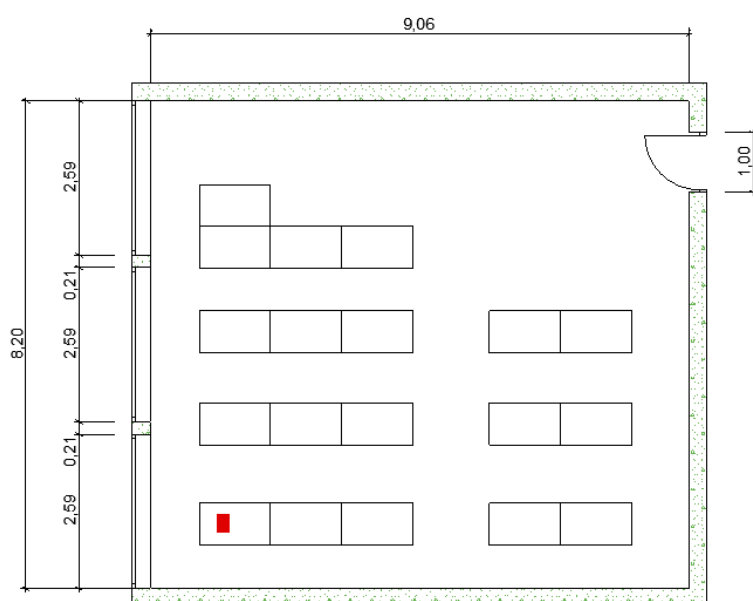
- koncentracija ogljikovega dioksida,
- temperatura,
- relativna vlažnost,
- hlapne organske spojine.

Na disk so bile vsako minuto shranjene minimalna, maksimalna vrednost in povprečje teh parametrov, v koraku petih sekund. Maksimalna vrednost koncentracije ogljikovega dioksida, ki jo merilna naprava izmeri, je 2000 ppm. Merilna naprava je prikazana na sliki 7.



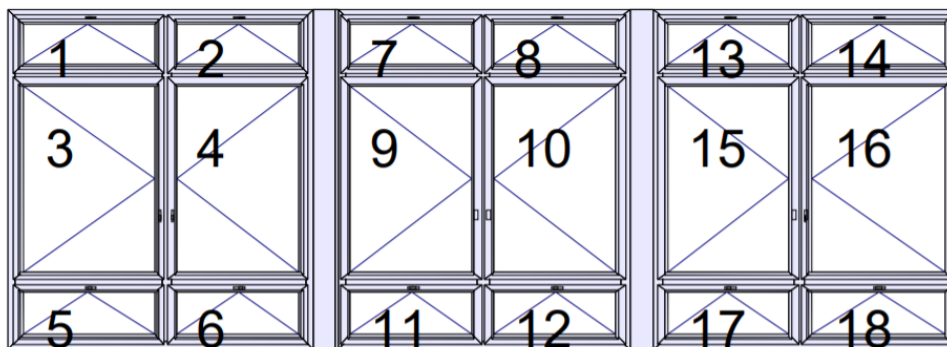
Slika 7: Merilna naprava [46]

Na sliki 8 je prikazan tloris prostora, v katerem so potekale meritve. Prostor je bil prezračevan le z naravnim prezračevanjem. Možno je bilo odpiranje vseh oken, ki potekajo po celotni levi strani prostora. Na desni strani prostora pa so vhodna vrata. Prostor je predviden za 37 oseb. Lokacija merilne naprave je na sliki 8 prikazana z rdečim kvadratom. Postavljena je bila v zadnji levi kot, in sicer na mizo.



Slika 8: Tloris testnega prostora in lokacija merilne naprave [46]

Meritve so potekale pet dni. V času meritev smo zabeležili, kakšni so bili ukrepi prezračevanja, torej koliko časa je bilo odprto katero izmed oken ter koliko oseb je bilo prisotnih v prostoru. Zabeležili smo njihov spol in starost. Na sliki 9 so prikazana vsa okna v prostoru, ki so za lažjo predstavo rezultatov oštevilčena.



Slika 9: Prikaz oken v testnem prostoru [46]

V programu CONTAM 3.2. smo izvedli še simulacije prostora, v katerih so potekale meritve. Do povprečne količine dovedenega zunanje zraka smo prišli z iterativnim postopkom, saj smo imeli podatek o skupnem volumskem pretoku izdihanega ogljikovega dioksida v prostoru ter o koncentraciji ogljikovega dioksida v prostoru. Z izvedbo simulacije je bil glede na površino oken in vrat ter lastnosti prostora določen pretok zraka skozi posamezno okno ter vrata.

## 5 REZULTATI

### 5.1 Rezultati pregleda literature

Rezultati pregleda literature so podani v treh podpoglavjih, glede na tri različne tipe študij. Najprej so prikazani rezultati pregleda, kjer so prikazane ključne besede in število zadetkov ter nato še PRISMA diagram. Sledijo povzetki in ugotovitve posameznih študij, ki so bile vključene v končno analizo ter na koncu še povzetek vseh študij, prikazan s preglednico.

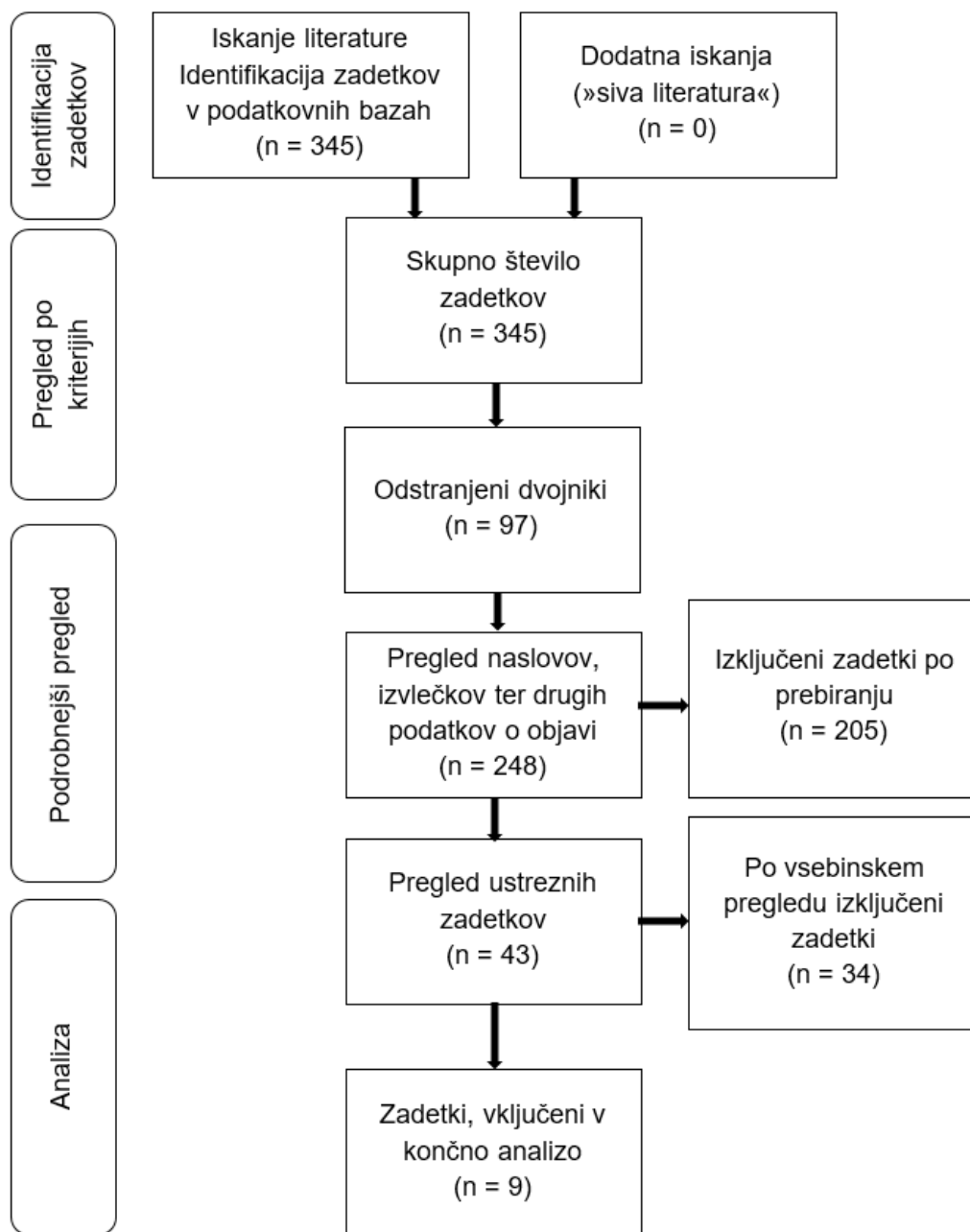
#### 5.1.1 Kakovost notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah in pisarnah

Rezultati pregleda literature s tematiko o kakovosti notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah in pisarnah so prikazani v preglednici 13. Večje število zadetkov glede na izbrane ključne besede je bilo v podatkovni bazi ScienceDirect.

Preglednica 13: Rezultati pregleda literature – tip 1

| PODATKOVNE BAZE | KLJUČNE BESEDE                             | ŠTEVILO ZADETKOV |
|-----------------|--------------------------------------------|------------------|
| ScienceDirect   | school, indoor air quality, carbon dioxide | 146              |
|                 | office, indoor air quality, carbon dioxide | 150              |
| PubMed          | school, indoor air quality, carbon dioxide | 33               |
|                 | office, indoor air quality, carbon dioxide | 16               |

Na sliki 10 je prikazan potek relevantnih člankov glede na tematsko ustreznost s PRISMA diagramom. Vidimo lahko, da je začetna merila za vključitev v raziskavo izpolnjevalo 345 zadetkov. Siva literatura ni bila vključena. Dvojnikov je bilo 97, tako da smo pregledali naslove, izvlečke ter druge podatke o objavi 248 zadetkov. Po prebiranju smo izključili 205 zadetkov. V nadaljnjo analizo je bilo tako vključenih 43 zadetkov. Po vsebinskem pregledu smo izključili 34 zadetkov ter tako v končno analizo vključili 9 zadetkov.



Slika 10: Rezultati pregleda literature po metodologiji PRISMA – tip 1

Kakovost notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah je velikokrat neprimerna. To je pogost pojav, ki ga je preučevalo mnogo raziskovalcev. Nekateri med njimi so podali tudi priporočila za izboljšanje kakovosti notranjega zraka na podlagi njihovih rezultatov študij. Neprimerna kakovost notranjega zraka pa se pojavlja tudi v pisarnah, kar ima velik vpliv na delo zaposlenih.

Bako-Biro et al. [47] so v študiji obravnavali osem osnovnih šol v Angliji, kjer so tri tedne merili koncentracije ogljikovega dioksida v dveh izbranih naravno prezračevanih učilnicah. Za izboljšanje stopnje prezračevanja so v učilnico namestili tudi prenosni mehanski prezračevalni sistem. Z njim so povečali količino dovedenega zunanjskega zraka iz začetnega 1 l/s na osebo

na 8 l/s na osebo. Ko je prezračevalni sistem dovajal svež zrak, je stopnja prezračevanja znašala približno  $4 \text{ h}^{-1}$ . V tem primeru so se koncentracije ogljikovega dioksida v učilnici gibale okoli 1000 ppm. V primeru stopnje prezračevanja  $0,6 \text{ h}^{-1}$  pa so dosegle tudi 5000 ppm. Na podlagi njihovih rezultatov so predlagali naslednja priporočila:

- učilnice je potrebno opremiti s senzorji ogljikovega dioksida,
- potrebno je zagotoviti dodatno prezračevanje, ko koncentracije ogljikovega dioksida presežejo 1000 ppm,
- potrebno je imeti dnevne rutine odpiranja oken,
- že v času načrtovanja zgradbe je potrebno zagotoviti takšen prezračevalni sistem, ki bo koncentracije ogljikovega dioksida omejil na dnevno povprečje 1000 ppm in zagotavljal vsaj minimalno količino dovedenega zraka 8 l/s na osebo.

Prav tako so raziskovalci Dorizas et al. [48] raziskali stopnje prezračevanja in koncentracije notranjih polutantov v devetih prezračevanih šolah v Atenah v pomladnih mesecih. Meritve so potekale v enem razredu v vsaki šoli, kjer so bili učenci stari od 11 do 12 let. Zasedenost učilnic je znašala od 1,84 do 3,67  $\text{m}^2/\text{učenca}$ . Rezultati te študije so pokazali, da je bila stopnja prezračevanja v povprečju večja od priporočene minimalne po ANSI/ASHRAE Standardu 62.1 [42] 8 l/s na osebo in je znašala 11,71 l/s na osebo. Kar pomeni, da so bile učilnice v večini primerov zadostno naravno prezračevane. Vrednosti koncentracij ogljikovega dioksida pa so v povprečju v vseh, razen v dveh primerih, presegale vrednost 1000 ppm. Ugotovili so, da vrednosti presežejo 3000 ppm, ko je učilnica polno zasedena in so vsa okna zaprta, zato je pomembno, da se prezračuje tudi med trajanjem pouka in ne samo med odmori. Prikazali so povezavo med stopnjo prezračevanja in koncentracijo ogljikovega dioksida ter ugotovili, da koncentracije ogljikovega dioksida eksponentno upadajo z naraščanjem stopnje prezračevanja. Tudi v Srbiji so Turanjanin et al. [49] izvedli raziskavo, kjer so v petih naravno prezračevanih šolah raziskali stopnje prezračevanja v času ogrevalne sezone. Stopnje prezračevanja so izračunali na podlagi izmerjenih koncentracij ogljikovega dioksida v posamezni učilnici. Rezultati meritev koncentracij ogljikovega dioksida so pokazali, da so v 50 % časa učencev v učilnici koncentracije bile višje od 1000 ppm. Proti koncu pouka pa so le te dosegle vrednosti tudi do 3600 ppm. Količina dovedenega zunanega zraka na osebo je tako znašala od 0,8 do 4,1 l/s osebo, kar je premalo glede priporočene vrednosti. Izračunane stopnje prezračevanja so se gibale med vrednostmi od  $0,47 \text{ h}^{-1}$  do  $1,45 \text{ h}^{-1}$ . Glavni razlog za visoke koncentracije ogljikovega dioksida v primeru učilnic v Srbiji je zagotovo nezadostno prezračevanje. V času ogrevalne sezone se okna odpirajo manj pogosto kot je to potrebno ali pa se sploh ne odprejo, in sicer zaradi toplotnega udobja, ki se mu namenja več pozornosti kot kvaliteti notranjega zraka. Z izboljšanjem energijske učinkovitosti ovoja stavbe bi lahko

omogočili pogostejše odpiranje oken in tako ne bi ogrožali toplotnega udobja v učilnici. Kot predlog za zmanjšanje koncentracij ogljikovega dioksida navedejo:

- prezračevalni sistem, ki se ga namesti na okno (ang. *Trickle ventilation*)
- obvezno odpiranje oken učiteljev med vsakim odmorom za pet do dvajset minut,
- namestitev senzorja ogljikovega dioksida,
- namestitev mehanskega prezračevanja, ki bi avtomatsko dovajalo svež zrak, kadar bi koncentracije ogljikovega dioksida presegle 1000 ppm.

Eno izmed zgoraj navedenih rešitev so obravnavali tudi Wargocki et al. [50]. Ti so v šolo namestili senzorje koncentracij ogljikovega dioksida, ki je učence z zeleno (do 1000 ppm) / rumeno (1000-1600 ppm) / rdečo (od 1600 ppm) barvo opozarjal na kakovost notranjega zraka. Učilnice so prezračevali le z naravnim prezračevanjem. Učitelji in učenci so tako en teden odpirali okna glede na senzorje, ki so jih opozarjali z lučmi, en teden pa so jih morali odpirati kot po navadi. To so izvedli dvakrat, in sicer enkrat v času ogrevalne sezone in enkrat v času hladilne sezone. V obdobju ogrevalne sezone so v primeru senzorja bolj pogosto odpirali okna in tako ohranjali koncentracije ogljikovega dioksida pod 1000 ppm. Brez senzorja pa so bile koncentracije opazno višje, in sicer med 1400 do 1800 ppm. V času hladilne sezone v učilnici, kjer ni bilo nobene hladilne naprave, ni bilo velikih razlik med odpiranjem oken v prisotnosti senzorja in brez njega. Do razlik je prišlo predvsem zgodaj zjutraj, ko so bile koncentracije ogljikovega dioksida brez senzorja nekoliko povečane. To nakazuje, da so učenci odpirali okna zaradi povečanih temperatur in ne zaradi povečanih koncentracij ogljikovega dioksida. V učilnici, kjer je bila hladilna naprava, pa so v primeru, ko senzorja ni bilo, okna manj odpirali in koncentracije so presegle 1200 ppm. S hlajenjem torej obdržimo primerne notranje temperature, posledično pa poslabšamo kvaliteto notranjega zraka, saj se prostor premalo prezračuje. Simulacije porabe energije so pokazale, da je bila potreba po ogrevanju povprečno večja za 10–20%, znižala pa se je potreba po hlajenju, in sicer za 10–25 %.

Koncentracije ogljikovega dioksida pa so lahko previsoke tudi v učilnicah z mehanskim prezračevanjem. Do takšnih ugotovitev so prišli raziskovalci Krawczyk et al. [51], ki so izvajali meritve v učilnici na Poljskem, ki je del energetske prenovljene šole in ima vgrajen mehanski prezračevalni sistem. Ker so bile učilnice v času meritev le delno zasedene, so izvedli tudi simulacije z računalniškim programom v primeru polne zasedenosti učilnice, na katero je tudi projektirana. Stopnja prezračevanja v učilnici je bila  $1,5 \text{ h}^{-1}$ . Za primer delne zasedenosti učilnice so bile koncentracije ogljikovega dioksida na začetku pouka še pod vrednostjo 1000 ppm. Na koncu pouka pa so vrednosti v vseh učilnicah presegale 1000 ppm. To nakazuje, da bi v primeru polne zasedenosti učilnice vrednosti še bolj presegale priporočene vrednosti. Prav

to pa so pokazali rezultati simulacije. Da bi bile koncentracije ogljikovega dioksida pod vrednostjo 1000 ppm, bi bila minimalna potrebna stopnja prezračevanja  $3,5 \text{ h}^{-1}$ . Do podobnih rezultatov so prišli tudi Bako-Biro et al. [52], kjer so z mehanskim prezračevanjem dosegli, da so bile koncentracije ogljikovega dioksida v učilnici pod 1000 ppm. Stopnja prezračevanja je morala biti v tem primeru  $4,2 \text{ h}^{-1}$  do  $4,4 \text{ h}^{-1}$ , medtem ko so v primeru stopnje prezračevanja  $0,3 \text{ h}^{-1}$  vrednosti presegale tudi 4000 ppm. Johnson et al. [53] so raziskali kvaliteto notranjega zraka v učilnicah 12 osnovnih šol. Učilnice so bile opremljene s HVAC sistemom. Rezultati merjenja koncentracij ogljikovega dioksida so pokazali, da so bile koncentracije ogljikovega dioksida v 28 od 58 primerov višje od 1000 ppm. Simanic et al. [54] so svojo študijo izvedli v sedmih novo grajenih šolah na Švedskem. Vse šole so opremljene z mehanskim prezračevalnim sistemom z možnostjo upravljanja v posamezni učilnici. Ugotovili so, da so bile v 90 % koncentracije ogljikovega dioksida pod 1000 ppm. Temu primerne so bile tudi vrednosti stopnje prezračevanja, ki so znašale tudi okoli 16 l/s na osebo. To stopnjo prezračevanja so dosegle štiri od sedmih šol. Pokazali so, da moderni ventilacijski sistemi, ki so avtomatsko vodeni, dosegajo priporočljive vrednosti. Opozarjajo pa, da je za doseganje teh vrednosti potrebno redno vzdrževanje, redna menjava filtrov ter redno preverjanje stopnje prezračevanja.

Emmerich et al. [55] so v svoji študiji izvedli simulacije pisarniškega okolja v petih mestih v Združenih državah Amerike. Simulirali so pisarne z naravnim, hibridnim in mehanskim prezračevanjem. V primeru mehanskega prezračevanja so upoštevali za količino dovedenega svežega zraka  $17 \text{ m}^3/\text{h}$  na osebo. Predvideli so, da sta v pisarni dve osebi in za vsako je predvidenih  $15 \text{ m}^2$  površine. Rezultati koncentracij ogljikovega dioksida so bili sledeči. Maksimalne vrednosti so se gibale med 1200 ppm in 1300 ppm. V preglednici 14 je sistematično prikazan povzetek pregledanih študij – tip 1.

Preglednica 14: Povzetek študij neprimerne kakovosti notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah in priporočila za izboljšave

| Naslov in leto                                                                                                                                                                          | Avtor                                                                                         | Namen/cilj                                                                                                             | Metoda                                                                                      | Rezultat                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ventilation rates in schools and pupils performance, 2012 [47]                                                                                                                          | Bako-Biro, Zs.,<br>Clements-Croome, D. J.,<br>Kochhar, N.,<br>Awbi, H. B.,<br>Williams, M. J. | Raziskati kvaliteto notranjega zraka na podlagi ogljikovega dioksida kot indikatorja zadostnosti prezračevanja.        | Izvedli so meritve v osmih osnovnih šolah. Namestili so tudi prenosni prezračevalni sistem. | V primeru stopnje prezračevanja $4 \text{ h}^{-1}$ dosežene s prenosnim prezračevalnim sistemom je bila koncentracija ogljikovega dioksida $1000 \text{ pmm}$ . Podali priporočila glede primerne prezračevanja.                                                             |
| An integrated evaluation study of the ventilation rate, the exposure and the indoor air quality in naturally ventilated classrooms in the Mediterranean region during spring, 2014 [48] | Dorizas, P. V.,<br>Assimakopoulos, M. N.,<br>Helmis, C.,<br>Santamouris, M.                   | Raziskati stopnje prezračevanja in koncentracije notranjih polutantov v naravno prezračevanih osnovnih šolah v Atenah. | Izvedli so meritve v devetih osnovnih šolah.                                                | Koncentracije ogljikovega dioksida eksponentno upadajo z naraščanjem stopnje prezračevanja, vrednosti presežejo $3000 \text{ ppm}$ , ko je učilnica polno zasedena in so vsa okna zaprta, zato je pomembno, da se prezračuje tudi med trajanjem pouka in ne samo med odmori. |

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 14

|                                                                                                                                       |                                                                       |                                                                                                                                                |                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Indoor CO <sub>2</sub> measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation, 2014 [49]                                    | Turanjanin, V., Vučićević, B., Jovanović, M., Mirkov, N., Lazović, I. | Raziskati stopnje prezračevanja v naravno prezračevanih osnovnih šolah v Srbiji.                                                               | Izvedli so meritve v petih osnovnih šolah v času ogrevalne sezone.                                       | Količina dovedenega zunanjega zraka na osebo je bila od 0,8 do 4,1 l/s osebo, Izračunane stopnje prezračevanja so se gibale med vrednostmi od 0,47 h <sup>-1</sup> do 1,45 h <sup>-1</sup> . 50 % časa učencev v učilnici so bile koncentracije ogljikovega dioksida višje od 1000 ppm. |
| Use of visual CO <sub>2</sub> feedback as a retrofit solution for improving air quality in naturally ventilated classrooms, 2015 [50] | Wargocki, P., Da Silva, F.                                            | Ugotoviti, ali se kakovost notranjega zraka izboljša ob namestitvi senzorja ogljikovega dioksida s semaforjem v naravno prezračevano učilnico. | Izvedli so meritve v učilnici s senzorjem in brez senzorja v ogrevalni in hladilni sezoni.               | V obdobju ogrevalne sezone so v primeru senzorja ohranjali koncentracije ogljikovega dioksida pod 1000 ppm. Brez senzorja so bile koncentracije 1400 do 1800 ppm. V času hladilne sezone v učilnici, kjer ni bilo nobene hladilne naprave, ni bilo velikih razlik v rezultatih.         |
| Analysis of indoor air parameters in an education building, 2018 [51]                                                                 | Krawczyk, D. A., Wadolowska, B.                                       | Analizirati parametre notranjega zraka v izobraževalni ustanovi.                                                                               | Izvedli so meritve v mehansko prezračevani učilnici ter simulacijo v primeru polne zasedenosti učilnice. | Da bi bile koncentracije ogljikovega dioksida pod vrednostjo 1000 ppm, bi bila minimalna potrebna stopnja prezračevanja 3,5 h <sup>-1</sup> .                                                                                                                                           |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 14

|                                                                                                                                                              |                                                                                |                                                                                                          |                                                                               |                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ventilation Rates in Schools and Learning Performance, 2007 [52]                                                                                             | Bako-Biro, Zs., Kochhar, N., Clements-Croome, D. J., Awbi, H. B., Williams, M. | Raziskati povezavo med prezračevanjem v učilnici in uspešnostjo učencev.                                 | Izvedli so meritve, ki so trajale tri tedne v osmih osnovnih šolah v Angliji. | Z mehanskim prezračevanjem so dosegli koncentracije ogljikovega dioksida v učilnici pod 1000 ppm. Stopnja prezračevanja je morala biti v tem primeru 4,2 h <sup>-1</sup> do 4,4 h <sup>-1</sup> . |
| Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modeling in urban elementary schools, 2019 [53]                      | Johnson, D. L., Lynch, R. A., Floyd, E. L., Wang, J., Bartels, J. N.           | Raziskati kvaliteto notranjega zraka v 12 osnovnih šolah s HVAC sistemom.                                | Izvedli so meritve koncentracij ogljikovega dioksida v učilnicah.             | Koncentracije ogljikovega dioksida so bile v 28 od 58 primerov višje od 1000 ppm.                                                                                                                 |
| Indoor air temperatures, CO <sub>2</sub> concentrations and ventilation rates: Long-term measurements in newly built low-energy schools in Sweden, 2019 [54] | Simanic, B., Nordquist, B., Bagge, H., Johansson, D.                           | Raziskati kvaliteto notranjega zraka v novo zgrajenih mehansko prezračevanih osnovnih šolah na Švedskem. | Izvedli so meritve večih parametrov notranjega zraka v sedmih osnovnih šolah. | V 90 % so bile koncentracije ogljikovega dioksida pod 1000 ppm. Vrednosti stopnje prezračevanja so znašale tudi okoli 16 l/s na osebo.                                                            |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 14

|                                                                                                  |              |                                                                                                           |                                                                                    |                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Simulated performance of natural and hybrid ventilation systems in an office building, 2006 [55] | Emmerich, S. | Raziskati različne načine prezračevanja in njihov vpliv na kvaliteto notranjega zraka in toplotno udobje. | Izvedli so simulacije za pet mest v ZDA z različnim podnebjem v različnih mesecih. | Koncentracije ogljikovega dioksida se razlikujejo glede na vrsto prezračevanja. Najvišje so bile pri naravnem prezračevanju in najnižje pri hibridnem. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

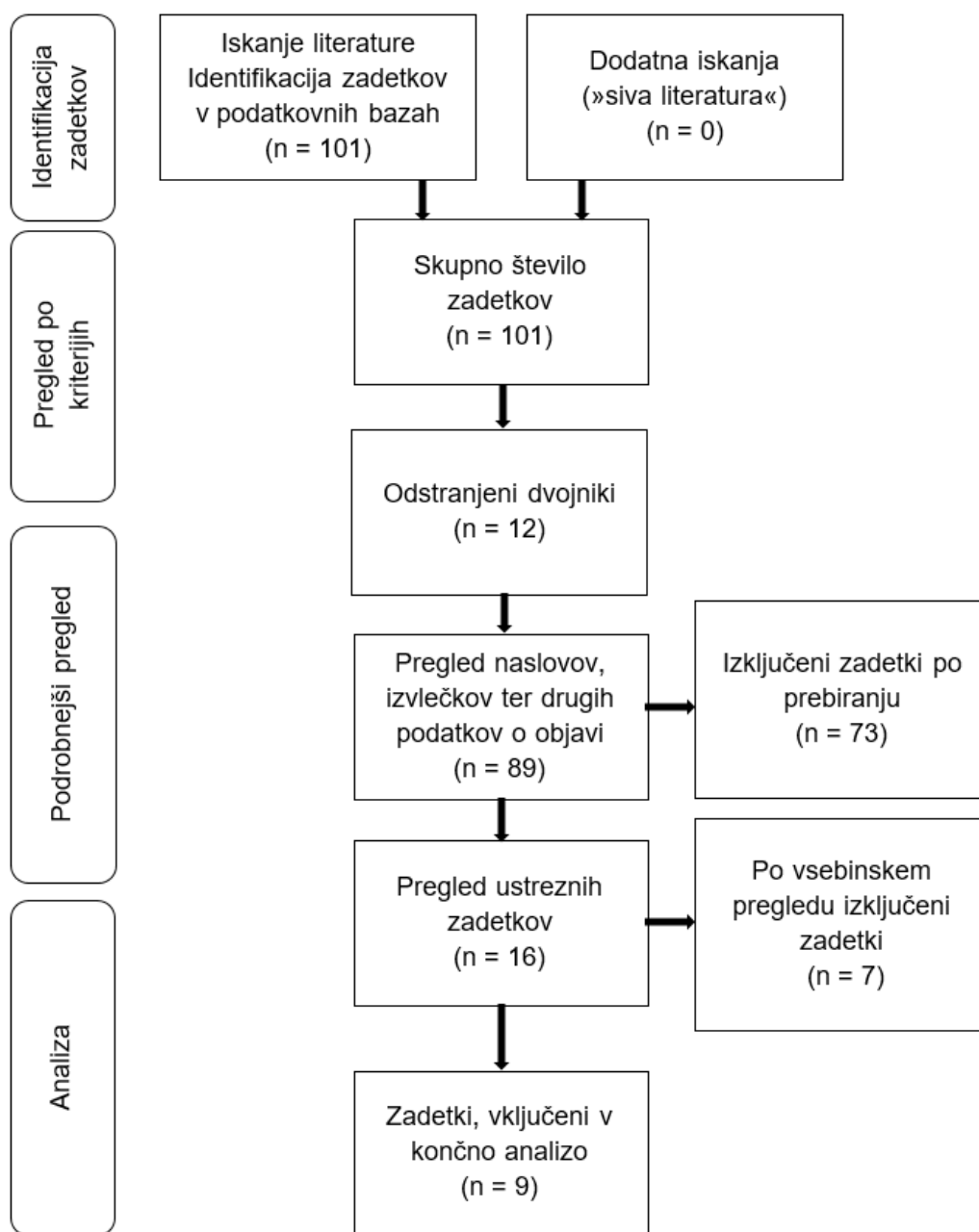
### 5.1.2 Vpliv ogljikovega dioksida na storilnost

Rezultati pregleda literature s tematiko o vplivu ogljikovega dioksida v notranjem okolju na storilnost človeka, odraslih kot tudi otrok, so prikazani v preglednici 15.

Preglednica 15: Rezultati pregleda literature – tip 2

| PODATKOVNE BAZE | KLJUČNE BESEDE                                          | ŠTEVILO ZADETKOV |
|-----------------|---------------------------------------------------------|------------------|
| ScienceDirect   | carbon dioxide, pupils performance                      | 11               |
|                 | carbon dioxide, ventilation rate, cognitive performance | 59               |
| PubMed          | carbon dioxide, pupils performance                      | 12               |
|                 | carbon dioxide, ventilation rate, cognitive performance | 19               |

Na sliki 11 je prikazan potek relevantnih člankov glede na tematsko ustreznost s PRISMA diagramom. Vidimo lahko, da je začetna merila za vključitev v raziskavo izpolnjeval 101 zadenek. Siva literatura ni bila vključena. Dvojnikov je bilo 12, tako da smo pregledali naslove, izvlečke ter druge podatke o objavi 89 zadetkov. Po prebiranju smo izključili 73 zadetkov. V nadaljnjo analizo je bilo tako vključenih še 16 zadetkov. Po vsebinskem pregledu smo izključili 7 zadetkov ter tako v končno analizo vključili 9 zadetkov.



Slika 11: Rezultati pregleda literature po metodologiji PRISMA – tip 2

V pričujočih študijah so raziskovali predvsem kognitivno učinkovitost ljudi in njihovo storilnost pri različnih koncentracijah ogljikovega dioksida. Merilo za človeško učinkovitost je obnašanje, proces, način funkcioniranja ali dosežek. Storičnost pa je mera učinkovitosti. Kognitivne sposobnosti potrebujemo za doseganje spoznanja vseh vrst. Med kognitivne funkcije spadajo kratkotrajen in dolgotrajen spomin, pozornost in koncentracija, logično mišljenje, hitrost obdelave informacij, obdelava vizualnih in zvočnih informacij ter jezik in govor [56].

Veliko študij je preučevalo, kakšen vpliv imajo na našo storilnost in kognitivno učinkovitost različne koncentracije ogljikovega dioksida v notranjih prostorih. Želeli so pokazati, da ima ogljikov dioksid velik vpliv na kvaliteto notranjega zraka ter da ga lahko definiramo ne samo kot indikatorja neprimerne kvalitete notranjega zraka, temveč tudi kot notranjega polutanta. Satish et al. [57] so v svoji raziskavi ocenili direktne vplive treh različnih koncentracij ogljikovega dioksida, ki so še vedno v okviru koncentracij, ki niso zelo povečane in se pojavijo v vsakdanjem notranjem okolju. 22 odraslih ljudi so razdelili v šest skupin ter jih v enem dnevu izpostavili trem različnim koncentracijam ogljikovega dioksida, in sicer 600, 1000 in 2500 ppm v komori podobni pisarni. 600 ppm so dosegli z zunanjim zrakom ter izdihanim zrakom udeležencev, višje koncentracije pa so bile dosežene z vpihovanjem čistega ogljikovega dioksida. Pri vsaki koncentraciji ogljikovega dioksida so udeleženci preko računalnika opravili test, ki je temeljil na uspešnosti odločanja. Stopnja prezračevanja in temperatura sta bili ves čas konstantni. Rezultati so pokazali vidne razlike pri 1000 ppm v primerjavi s 600 ppm, njihova uspešnost je bila slabša za 11 do 23 %. Še večje razlike pa so se pojavile pri 2500 ppm, kar 44 do 94 % slabše kot pri 600 ppm ter 35 do 93 % slabše kot pri 1000 ppm. Podobno študijo so izvedli tudi Koskela et al. [58], kjer je bil cilj raziskati, kako stopnja prezračevanja in kakovost zraka vplivata na delovno uspešnost. Študija je bila izvedena v laboratoriju, ki je bil oblikovan kot odprte pisarne. Ustvarili so dva različna pogoja, in sicer z visoko stopnjo prezračevanja 28 l/s na osebo in koncentracijo ogljikovega dioksida 600 ppm ter z nižjo stopnjo prezračevanja 2 l/s na osebo in koncentracijo ogljikovega dioksida 2200 ppm. Temperatura v pisarni je bila ves čas konstantna in je znašala 23,5 °C. Prav tako so bile emisije iz gradbenih materialov in pohištva zelo majhne. V študiji je sodelovalo 36 oseb, trajal pa je 3,5 ure, posamezno v obeh različnih pogojih. Opravljali so 6 testov, ki so bili različnih tipov. Rezultati te študije niso pokazali nobenih razlik v uspešnosti reševanja testov. Uspešnost se je zmanjšala le za 2,9 %. Pri nižji stopnji prezračevanja je bilo opaziti manj energije in motivacije pri sodelujočih, ampak razlike so bile zelo majhne. Glede na to, da so rezultati te študije nasprotujoči večini, raziskovalci to pripisujejo temu, da so bile osebe premalo časa izpostavljene takšnemu notranjemu okolju. Do ugotovitev, da slaba kakovost notranjega zraka vpliva na kognitivne sposobnosti človeka, so prišli raziskovalci Allen et al. [59]. 22 odraslih ljudi so izpostavili trem različnim koncentracijam ogljikovega dioksida, in sicer 550, 945 in 1400 ppm. Ugotovili so, da se z vsakim povečanjem koncentracij poslabšajo rezultati testov kognitivne učinkovitosti. Rezultati so bili za 15 % slabši v primeru 945 ppm ter za 50 % slabši v primeru 1400 ppm v primerjavi s 550 ppm. S temi ugotovitvami so pokazali, da je zaskrbljujoče, da imajo že koncentracije, ki naj bi bile v mejah dovoljenih vrednosti, takšen vpliv na naše razmišljanje. Problem predstavlja predvsem to, da so koncentracije ogljikovega dioksida v šolah velikokrat večje od 1000 ali celo 2500 ppm, zato so otroci v takšnih šolah v slabšem položaju pri učenju, razmišljanju in pisanju testov.

Učilnica je drugo najpomembnejše notranje okolje otrok, saj v šoli preživijo kar 30 % časa, od tega 70 % v učilnici. Ravno zato je pomembno, da je v učilnici vzpostavljeno primerno notranje okolje. Otroci so še bolj občutljivi na notranje onesnaževalce, ker več dihaajo, prav tako pa se slabše branijo pred toksičnimi kemikalijami. Vpliv prezračevanja na učne oziroma kognitivne rezultate učencev ali storilnost je preučevalo kar nekaj študij. Bako Baro et al. [60] so v študiji preučili vpliv prezračevanja na učne rezultate učencev v osmih osnovnih šolah v Angliji. V vsaki šoli so tri tedne merili koncentracije ogljikovega dioksida v dveh izbranih učilnicah. V učilnice so namestili s tem namenom izdelan premični mehanski ventilacijski sistem, s katerim so dvignili količino dotoka zunanjega zraka iz 1 l/s na osebo na 8 l/s na osebo. Učitelji in učenci so bili pred študijo večino časa izpostavljeni visokim koncentracijam ogljikovega dioksida, tudi do 5000 ppm, kar zelo presega priporočene mejne vrednosti. Rezultati študije so pokazali, da stopnja prezračevanja vpliva na pozornost in budnost učencev. Pri višjih stopnjah prezračevanja so učenci dosegali bolj natančne odgovore pri testu odločanja in nanj so hitreje odgovorili. Bili so torej bolj osredotočeni kot pri nižjih stopnjah prezračevanja. Prav tako so bili bolj pozorni in so se lažje koncentrirali na navodila učitelja. Do večjih razlik v rezultatih pri nižji in višji stopnji prezračevanja je prišlo predvsem pri bolj kompleksnih spretnostih, kot je verbalna sposobnost prepoznave besed ter prostorski spomin. Do podobnih ugotovitev, da so rezultati različni pri različni vrsti testov, sta prišla raziskovalca Wargocki in Wayon [61]. V študiji sta preučevala, kako vpliva temperatura zraka in količina dovedenega zunanjega zraka na rezultate učencev v reševanju različnih vrst testov (odštevanje, množenje, logično razmišljanje, branje itd.), ki so bili vpeljeni v njihov vsakdanji pouk. Uspešnost učencev je bila merjena na podlagi njihove hitrosti in glede na število napak. Prav tako so učenci s pomočjo vizualne analogne skale zapisali intenzivnost simptomov sindroma bolnih stavb. Eksperiment je bil izveden v učilnicah z mehanskim prezračevalnim sistemom, kjer se je spreminjala stopnja prezračevanja in zamenjali so se stari filtri mehanskega prezračevalnega sistema z novimi. Razred je bil oskrbovan s 100 % zunanjim zrakom, ki je bil filtriran in segret do 20 °C. Rezultati so bili različni za posamezne vrste opravljenih testov. Povečanje stopnje prezračevanja je izboljšalo hitrost v reševanju testov odštevanja, množenja, logičnega razmišljanja, branja in razumevanja. Sprememb v številu narejenih napak v teh primerih ni bilo. Zamenjava novega filtra s starim pa je povzročila zmanjšanje hitrosti pri reševanju testov množenja, primerjave števil, branja in razumevanja, hitrost se je povečala pri testih odštevanja in logičnega razmišljanja. Sprememb v številu narejenih napak tudi v tem primeru ni bilo. Glavne ugotovitve te študije so bile, da se s povečevanjem stopnje prezračevanja iz 3 l/s na 8.5 l/s poveča hitrost reševanja testov numerične narave ter branja in razumevanja. Vpliva na število napak ni bilo. S povečano stopnjo prezračevanja se je izboljšala tudi koncentracija ogljikovega dioksida v zraku, in sicer iz 1300 ppm na 900 ppm. Zamenjava filtra ni imela nobenega vpliva na uspešnost. Haverinen et al. [62] so prav tako preučevali učilnice z mehanskim

prezračevanjem. V študiji so želeli raziskati, kakšna je povezanost med dejanskimi rezultati šolskih testov učencev in stopnjo prezračevanja ter temperaturo. V študijo je bilo vključenih 70 osnovnih šol iz jugozahodnega dela ZDA. Vključeni so bili podatki, zajeti v obdobju enega leta. Na podlagi rezultatov so ugotovili, da lahko vzdrževanje primerne prezračevanja in toplotnega okolja izboljša rezultate testov učencev. Študija pomaga razumeti, kakšne so potencialne prednosti učinkovitega vzdrževanja primerne notranjega okolja v šolah. Stopnje prezračevanja so namreč v večini šol neprimerne in pod predpisanimi minimalnimi standardi. Do teh ugotovitev so prišli tudi v svoji študiji Shaugnessy et al. [63]. Poleg ugotovitve, da je notranje okolje v šolah v raziskanih učilnicah neprimerno, so preučili tudi vpliv, kako posledično povečane koncentracije ogljikovega dioksida vplivajo na učno uspešnost učencev. Študija je bila izvedena z učenci petih razredov v 44 osnovnih šolah v ZDA. Učenci so reševali različne vrste testov. Uspešnost učencev se je slabšala z zmanjševanjem stopnje prezračevanja. Takšne rezultate so dobili za vse vrste testov, le da so bile razlike med njimi različne. Najmanjši vpliv nižje stopnje prezračevanja je bil pri testih iz branja. Coley et al. [64] pa so v svojo študijo vključili učilnice, ki so bile samo naravno prezračevane. Preučili so vplive stopnje prezračevanja na kognitivne sposobnosti učencev osnovne šole. Eksperiment je bil izveden na učencih, starih od 10 do 11 let. Ker je bila učilnica samo naravno prezračevana, so spremembe v koncentracijah ogljikovega dioksida dosegli le z odpiranje oziroma zapiranjem oken. Koncentracije so znašale od 501-983 ppm in 2096-4140 ppm. Učenci so reševali standardizirane teste kognitivnih sposobnosti preko računalnika. Rezultati so pokazali, da so učenci manj pozorni pri večjih koncentracijah ogljikovega dioksida. Vplive so opisali s faktorjem moči pozornosti (ang. *Power of Attention*), ki predstavlja razmerje koncentracije ogljikovega dioksida v določenem momentu s hitrejšim odgovorom. Višje koncentracije ogljikovega dioksida so povzročile, da se je faktor moči pozornosti zmanjšal za 5 %. To pomeni, da so v razredu, kjer je raven ogljikovega dioksida visoka, učenci manj pozorni in se manj osredotočajo na to, kar predava učitelj. To lahko sčasoma vodi do škodljivih učinkov na učenje in dosežke v izobraževanju.

Neprimerna kakovost notranjega zraka pa ni samo težava v pisarnah, osnovnih in srednjih šolah, temveč tudi na fakultetah. Mnogokrat so predavalnice nabito polne, za prezračevanje pa ni primerno poskrbljeno. Velike koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru so posledica slabega prezračevanja in gibanja zraka v prostoru. To povzroči, da je v prostoru večje število iritantov, ki imajo negativen vpliv na človeka. Ta problem so Ahmed et al. [65] raziskali v svoji študiji. Preučili so vplive temperature in koncentracij ogljikovega dioksida v predavalnici na kognitivno učinkovitost. V študijo je bilo vključenih 499 odraslih študentk različnih etničnih skupin v Saudski Arabiji. Izpostavljene so bile devetim različnim kombinacijam vplivov temperature (20 °C, 23 °C in 25 °C) in koncentracijam ogljikovega dioksida (600 ppm, 1000

ppm in 1800 ppm). Reševale so osem različnih testov kognitivne učinkovitosti. Rezultati testov, ki se tičejo spomina, so se občutno izboljšali, ko so se koncentracije ogljikovega dioksida zmanjšale iz 1800 ppm na 1000 ppm/600 ppm pri hkratnem zmanjšanju temperature iz 25°C na 23°C in povečanju temperature iz 20°C na 23°C. Zmanjšanje temperature iz 25°C in 23°C na 20°C ob hkratnem zmanjševanju koncentracij ogljikovega dioksida iz 1800 ppm na 1000 ppm/600 ppm je izboljšalo učinkovitost v testih, povezanih s pozornostjo. Ugotovili so, da občutek hladu in vročine negativno vpliva na mentalno učinkovitost spomina in pozornosti, medtem ko se izboljša pri blagem občutku hlada. Rezultati so pokazali, da je prilagoditev toplotnemu okolje različna za različne etnične skupine. V preglednici 16 je sistematično prikazan povzetek pregledanih študij.

Preglednica 16: Povzetek študij vpliva ogljikovega dioksida na storilnost

| Naslov in leto                                                                                                                                           | Avtor                                                                                     | Namen/cilj                                                                                                             | Metoda                                                                                                                                                | Rezultat                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Is CO <sub>2</sub> an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO <sub>2</sub> Concentrations on Human Decision-Making Performance, 2012 [57] | Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, Fisk, W. J. | Oceniti direktne vplive treh različnih vsakdanjih koncentracij ogljikovega dioksida v prostoru na uspešnost odločanja. | Eksperiment izveden v komori, podobni pisarni. Udeleženci so pri različnih koncentracijah opravili test preko računalnika.                            | Uspešnost je bila za 11 do 23 % slabša v primeru 1000 ppm ter za 44 do 94 % v primeru 2500 ppm, glede na 600 ppm.                                         |
| Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers, 2016 [59]         | Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., Spengler, J. D.   | Raziskati povezavo med uspešnostjo v kognitivnem delovanju in koncentracijami ogljikovega dioksida ter prezračevanjem. | Eksperiment izveden v kontroliranem pisarniškem okolju. Pri različnih koncentracijah ogljikovega dioksida so reševali teste kognitivne učinkovitosti. | Z vsakim večanjem koncentracij ogljikovega dioksida se poslabšajo rezultati testov. Rezultati so bili slabši za 50 % v primeru 1400 ppm glede na 550 ppm. |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 16

|                                                                                                                           |                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students' Test Scores, 2015 [62]                                 | Haverinen-Shaughnessy, U., Shaughnessy, R. J.                                     | Ocenili so vplive stopnje prezračevanja in temperature na šolske dosežke učencev.                                            | Raziskali so 70 osnovnih šol iz ZDA. Prezračevanje je bilo samo mehansko. Uspešnost učencev so merili glede na dejanske šolske teste.                                                 | Ugotovili so, da vzdrževanje primernega prezračevanja in toplotnega okolja lahko izboljša rezultate testov učencev.                                                                                                             |
| Ventilation rates in schools and pupils' performance, 2011 [60]                                                           | Bako-Biro, Zs., Clements-Croome, D. J., Kochhar, N., Awbi, H. B., Williams, M. J. | Raziskali so vplive stopnje prezračevanja na uspešnost učencev.                                                              | V 8 osnovnih šolah so 3 tedne nadzirali koncentracije ogljikovega dioksida v dveh učilnicah. Učenci so reševali kognitivne teste.                                                     | Stopnja prezračevanja vpliva na pozornost, koncentracijo in budnost učencev. Do največjih razlik je prišlo predvsem pri bolj kompleksnih spretnostih, kot je verbalna sposobnost, prepoznave besed ter pri prostorskem spominu. |
| The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on performance of school work by children, 2006 [61] | Wargocki, P., Wyon, D. P.                                                         | Želeli so pokazati, da kakovost notranjega zraka v učilnici vpliva tudi na šolsko delo otrok in ne le na odrasle v pisarnah. | Študija potekala v dveh učilnicah z mehanskim prezračevanjem, s spreminjajočo stopnjo prezračevanja in zamenjanimi filtri. Učenci so reševali njim prilagojene različne vrste testov. | Rezultati so bili različni za posamezne vrste testov. Povečanje stopnje prezračevanja je izboljšalo hitrost v reševanju testov. Sprememba v številu napak ni bilo. Zamenjava filtra ni imela nobenega vpliva.                   |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 16

|                                                                                                                                                           |                                                                              |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| The Effect of Indoor Temperature and CO <sub>2</sub> Levels on Cognitive Performance of Adult Females in a University Building in Saudi Arabia, 2017 [65] | Ahmed, R. J., Mumovic, D., Ucci, M.                                          | Preučiti vplive temperature in koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem okolju na kognitivno učinkovitost študentk. | Študijo so izvedli v dveh učilnicah, kjer je sodelovalo 499 odraslih študentk. Izpostavljene so bile devetim različnim kombinacijam vplivom. Reševale so osem različnih kognitivnih testov. | Pri manjših koncentracijah ogljikovega dioksida in temperaturi okoli 23°C so se rezultati testov izboljšali. Ugotovili so, da je pozornost večja pri blagem občutku hlada. Prav tako ima vpliv na prilagoditev toplotnemu okolju etnična skupina. |
| Carbon Dioxide concentrations in classrooms and association with student performance: A preliminary study, 2005 [63]                                      | Shaughnessy, R., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A., Moschandreas, D. | Preučiti vpliv koncentracij ogljikovega dioksida na uspešnost učencev.                                                   | Študija je bila izvedena z učenci petih razredov osnovne šole v 44 šolah v ZDA. Učenci so reševali različne vrste testov.                                                                   | Rezultati so pokazali pomembno povezavo med stopnjo prezračevanja in uspešnostjo učencev pri matematičnih testih. Uspešnost se je manjšala z zmanjševanjem stopnje prezračevanja.                                                                 |
| The effect of low ventilation rates on the cognitive function of primary school class, 2007 [64]                                                          | Coley, D. A., Greeves, R., Saxby, B. K.                                      | Preučiti vpliv stopnje prezračevanja na kognitivne funkcije učencev osnovne šole.                                        | Izvedena z naravnim prezračevanjem na 18 učencih. Učenci so reševali standardizirane teste preko računalnika.                                                                               | Večje koncentracije ogljikovega dioksida so povzročile, da se je faktor moči pozornosti zmanjšal za 5 %.                                                                                                                                          |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 16

|                                                                                                                         |                                                                           |                                                                                                   |                                                                                                                                                                                          |                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Effect of low ventilation rate on office work performance and perception of air quality – a laboratory study, 2014 [58] | Koskela, H.,<br>Maula, H.,<br>Haapakangas, A. Moberg, V.,<br>Hongisto, V. | Poiskati vplive stopnje prezračevanja in kakovosti zraka na delovno uspešnost delavcev v pisarni. | Študija izvedena v laboratoriju v obliki odprte pisarne. Ustvarili so dva različna pogoja stopnje prezračevanja pri konstantni temperaturi. Sodelujoči so opravljali 6 različnih testov. | Rezultati niso pokazali nobenih večjih razlik v uspešnosti reševanja testov. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|

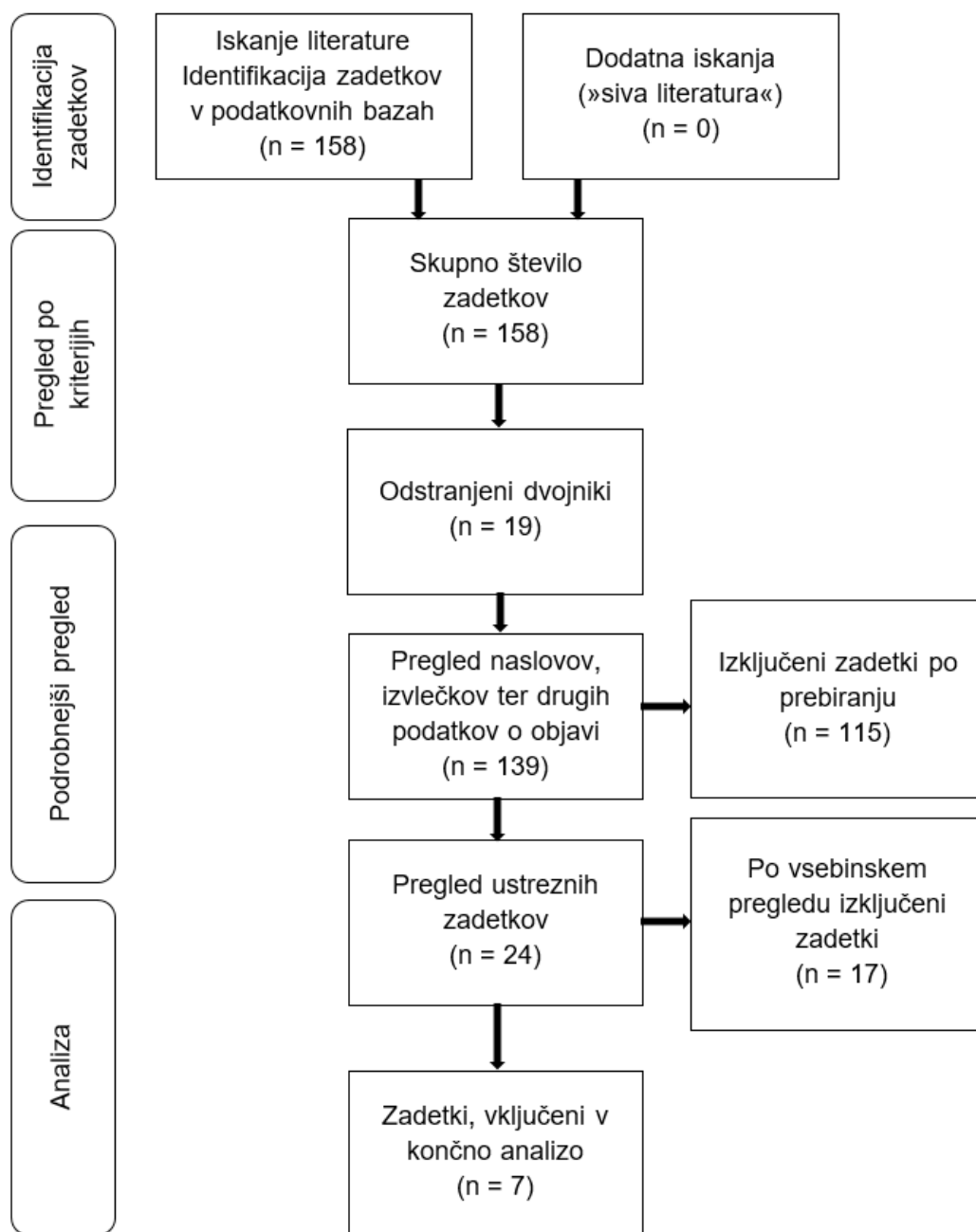
### 5.1.3 Vpliv ogljikovega dioksida na zdravje in odsotnost

Rezultati pregleda literature s tematiko o vplivu ogljikovega dioksida v notranjem okolju na zdravje in odsotnost so prikazani v preglednici 17. Večje število zadetkov glede na izbrane ključne besede je bilo v podatkovni bazi ScienceDirect.

Preglednica 17: Rezultati pregleda literature – tip 3

| PODATKOVNE BAZE | KLJUČNE BESEDE                                 | ŠTEVILO ZADETKOV |
|-----------------|------------------------------------------------|------------------|
| ScienceDirect   | carbon dioxide, sick building syndrome, school | 41               |
|                 | carbon dioxide, sick building syndrome, office | 82               |
| PubMed          | carbon dioxide, sick building syndrome, school | 18               |
|                 | carbon dioxide, sick building syndrome, office | 17               |

Na sliki 12 je prikazan potek relevantnih člankov glede na tematsko ustreznost s PRISMA diagramom. Vidimo lahko, da je začetna merila za vključitev v raziskavo izpolnjevalo 158 zadetkov. Siva literatura ni bila vključena. Dvojnikov je bilo 19, tako da smo pregledali naslove, izvlečke ter druge podatke o objavi 139 zadetkov. Po prebiranju smo izključili 115 zadetkov. V nadaljnjo analizo je bilo tako vključenih še 24 zadetkov. Po vsebinskem pregledu smo izključili 17 zadetkov ter tako v končno analizo vključili 7 zadetkov.



Slika 12: Rezultati pregleda literature po metodologiji PRISMA – tip 3

Neprimerna kakovost zraka v notranjih prostorih ima vpliv na zdravje ljudi, ki se v tem prostoru nahajajo. Posledično ima vpliv tudi na odsotnost učencev od pouka ali zaposlenih iz službe, kar pa povzroči tudi dodatne stroške.

Vpliv stopnje prezračevanja na simptome sindroma bolnih stavb so preučili že leta 1995 Jaakkola et al. [66]. V študijo je bilo vključenih 399 delavcev iz 14 pisarn. Pisarne so bile prezračevane z mehanskim prezračevalnim sistemom. Izbrane so bile naključno. Zaposleni so vsak teden izpolnili standardizirane vprašalnike glede simptomov sindroma bolnih stavb.

Izpostavljeni so bili štirim različnim stopnjam prezračevanja, in sicer do 5 l/s, 5-15 l/s, 15-25 l/s in več kot 25 l/s. Rezultati so pokazali, da obstaja povezava med stopnjo prezračevanja in simptomi, povezani z delom. Pri stopnji prezračevanja pod 5 l/s so se občutno povečali simptomi, povezani z očno in nosno sluznico ter kožo. Prav tako se simptomi povečajo pri stopnji prezračevanja nad 15 l/s. Pomembno je tudi, da materiali v prostoru ne emitirajo polutantov, zato se priporoča, da se fotokopirni stroj in podobne naprave nahajajo v drugih prostorih. Prav tako je potrebno prostor dovolj pogosto očistiti, da se znebimo odvečnega prahu. Povezavo med koncentracijo ogljikovega dioksida v notranjem okolju ter simptomov sindroma bolnih stavb, predvsem sluznice in spodnjih dihalnih poti, so v svoji študiji raziskali Apte et al. [67]. V študijo je bilo vključenih 100 stavb, v katerih so se nahajale pisarne. Stavbe so bile vsaj deloma mehansko prezračevane, le ena je bila klimatizirana. Podatke so zbirali med letoma 1994 in 1998. Upoštevali so vplive starosti, spola, kajenja, relativne vlažnosti, termalnega okolja in prisotnost preprog v delovnem okolju. Udeleženci so izpolnjevali standardiziran vprašalnik. V vsaki stavbi so merili notranjo temperaturo zraka, ogljikov dioksid, ogljikov monoksid, hlapljive organske spojine in relativno vlažnost. Rezultati študije so pokazali, da se z večanjem stopnje prezračevanja simptomi sindroma bolnih stavb bistveno zmanjšajo. Zmanjšajo se tudi v primeru, ko stavbe dosegajo zahteve ANSI/ASHRAE Standarda 62.1 [42]. Magnituda zmanjšanja simptomov je odvisna od magnitude povečanja stopnje prezračevanja, izboljšanja učinkovitosti prezračevanja ter zmanjšanja virov povzročiteljev sindroma bolnih stavb. Pri zelo veliki stopnji prezračevanja, ki zmanjša koncentracije ogljikovega dioksida v notranjem zraku na približno enake koncentracije kot v zunanjem zraku, bi lahko pričakovali, da se razširjenost simptomov zmanjša za kar 80 %. Ugotovili so tudi, da so simptomi pogostejši pri ženskah. Zato je potrebno pri planiranju strategij zmanjšanja simptomov sindroma bolnih stavb upoštevati lastnosti oseb, ki se nahajajo v teh prostorih. Neposredne povezave med izpostavljenostjo koncentracijam ogljikovega dioksida in simptomom sindroma bolnih stavb ni, je pa ogljikov dioksid približno povezan z ostalimi notranjimi onesnaževalci zraka (je njihov pokazatelj), ki povzročijo simptome sindroma bolnih stavb. Lu et al. [68] so v svoji študiji preučili, ali so pritožbe glede simptomov sindroma bolnih stavb med zaposlenimi v pisarnah povezane s kakovostjo notranjega zraka. V študijo je bilo vključeni 417 zaposlenih iz 87 pisarn v Tajpeju. V pisarnah so merili koncentracijo ogljikovega dioksida, temperaturo, vlažnost in hlapne organske spojine t.i. VOC. Zaposleni so izpolnjevali vprašalnik glede simptomov za pretekli mesec. Rezultati so pokazali, da so nespecifični sindromi, kot je utrujenost, slabša koncentracija, slabost, povezani z razliko vrednosti koncentracije ogljikovega dioksida v zunanjem zraku in notranjem zraku. Ti simptomi se torej pojavijo pri večji razliki med koncentracije ogljikovega dioksida v zunanjem in notranjem zraku. Za simptome, kot so zamašen nos, suho grlo, suha koža, razdražljivost, pa so rezultati pokazali, da so bolj povezani s koncentracijo hlapnih organskih spojin v zraku. Slaba kakovost

notranjega zraka v šolah ima vpliv tudi na zdravje učencev. Simoni et al. [69] so ocenili vplive kakovosti notranjega zraka na boleznih dihal učencev iz Norveške, Švedske, Danske, Francije in Italije. Do rezultatov so prišli z vprašalniki, ki so jih izpolnili učitelji, učenci in njihovi starši. V učilnicah pa so merili koncentracije ogljikovega dioksida in drugih onesnaževalcev, kot so na primer  $P_{10}$  delci. Rezultati merjenja koncentracij ogljikovega dioksida so pokazali, da so le te v vseh učilnicah, razen v učilnicah na Švedskem, presegale vrednosti 1000 ppm. Največje vrednosti so bile izmerjene v Italiji. Prav tako so bile stopnje prezračevanja po večini nižje od priporočene vrednosti po ANSI/ASHRAE Standardu 62.1 [42] 8 l/s na osebo. Učenci, ki so bili izpostavljeni koncentracijam višjim od 1000 ppm, so bili bolj podvrženi suhemu kašlju in rinitisu.

Kar nekaj študij je preučilo, kako kakovost notranjega zraka vpliva na odsotnost učencev od pouka. Odsotnost v šoli je pomemben faktor, saj vpliva na uspešnost učencev v šolah. Shendell et al. [70] so preučili povezavo med razliko v koncentracijah ogljikovega dioksida v notranjih prostorih glede na zunanje koncentracije ter odsotnostjo učencev v šolah. V študijo je bilo vključenih 434 razredov iz 22 šol. Vse učilnice, razen dveh, so bile opremljene z mehanskim prezračevanjem. V učilnicah so merili koncentracije ogljikovega dioksida in zunanje koncentracije ter nato dobili razliko med tema dvema vrednostma. Od šol so pridobili podatke o odsotnosti učencev od pouka. Rezultati so pokazali, da se s povečanjem notranjih koncentracij ogljikovega dioksida za 1000 ppm, glede na koncentracije zunaj, poveča odsotnost za deset do dvajset odstotkov na letni ravni. Detajlnejšo študijo so izvedli raziskovalci Mendell et al. [71]. Raziskali so povezavo med stopnjo prezračevanja in povečano odsotnostjo učencev od pouka. V študijo je bilo vključenih 162 razredov iz 28 šol, podatke so zbirali dve leti. 61 učilnic je bilo naravno prezračevanih, 30 mehansko brez klime in 71 klimatiziranih. Rezultati, ki so jih dobili, so bili konsistentni ne glede na šolo, klimatsko cono in vrsto prezračevalnega sistema. Rezultati so pokazali, da se odsotnost od pouka zaradi bolezni zmanjša pri višjih stopnjah prezračevanja. Pri stopnjah prezračevanja do 15 l/s na osebo in več lahko posledično še bolj zmanjša odsotnost učencev od pouka zaradi bolezni. Do ugotovitev, da so koncentracije ogljikovega dioksida v učilnicah povezane s prisotnostjo učencev pri pouku, so prišli tudi Gaihare et al. [72]. V študijo je bilo vključenih 60 šol iz Škotske. Učilnice so bile naravno prezračevane. Koncentracije ogljikovega dioksida so bile merjene 3 do 5 krat na dan v obdobju dveh mesecev. Preučili so povezavo s koncentracijami ogljikovega dioksida v posameznem razredu in povprečno prisotnostjo učencev v enem šolskem letu. Povprečna koncentracija skozi šolski dan je znašala 1086 ppm. Ugotovili so, da je odsotnost učenca za 0,4 dni na leto povezana s povečanjem koncentracij za 100 ppm. Na Škotskem je približno 360000 učencev osnovnih šol, kar pomeni 144000 odsotnosti učencev na leto. To predstavlja težavo učencev pri pouku zaradi njihove odsotnosti ter tudi staršem iz ekonomskega vidika. V preglednici 18 je sistematično prikazan povzetek pregledanih študij.

Preglednica 18: Povzetek študij vpliva ogljikovega dioksida na zdravje in odsotnost

| Naslov in leto                                                                                                                                                                                                                  | Avtor                          | Namen/cilj                                                                                                                                    | Metoda                                                                                                                                                                    | Rezultat                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ventilation rate in office buildings and sick building syndrome, 1995 [66]                                                                                                                                                      | Jaakkola, J. J., Miettinen, P. | Raziskati povezavo med stopnjo prezračevanja in pogostostjo simptomov sindroma bolnih stavb.                                                  | Raziskava je bila izvedena na 399 delavcih iz 14 pisarn z mehanskim prezračevanjem. Izpolnjevali so vprašalnik glede simptomov ter percepcije kvalitete notranjega zraka. | Stopnje prezračevanja pod optimalnimi povečujejo tveganje za nastanek simptomov sindroma bolnih stavb. |
| Indoor carbon dioxide concentrations, VOCs, environmental sensitivity association with mucous membrane and lower respiratory sick building syndrome symptoms in the base study: Analysis of the 100 building dataset, 2002 [67] | Apte, M. G., Erdmann, C. A.    | Oceniti povezavo med koncentracijo CO <sub>2</sub> notranjega zraka ter simptomov sindroma bolnih stavb – sluznice in spodnjih dihalnih poti. | Zbiranje podatkov 100 stavb s pisarnami v obdobju štirih let. Udeleženci so izpolnjevali BASE vprašalnik.                                                                 | Z večanjem stopnje prezračevanja se simptomi bistveno zmanjšajo. Simptomi so pogostejši pri ženskah.   |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 18

|                                                                                                                                        |                                                                                                     |                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Associations Between Classroom CO <sub>2</sub> Concentrations and Student Attendance in Washington and Idaho, 2004 [70]                | Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., Faulkner, D.                       | Preučiti vpliv koncentracij ogljikovega dioksida na odsotnost učencev od pouka.                       | Merjenje notranjih in zunanjih koncentracij ogljikovega dioksida v 434 razredih. Beleženje odsotnosti učencev skozi celotno šolsko leto.                                                                            | S povečanjem koncentracij ogljikovega dioksida v učilnicah se je povečala odsotnost učencev od pouka na letni ravni.                                                                                                                       |
| Association of Classroom Ventilation with Reduced Illness Absence: A Prospective Study in California Elementary Schools, 2013 [71]     | Mendell, M. J., Eliseeva, E. A., Davies, M. M., Spears, M., Lobscheid, A., Fisk, W. J., Apte, M. G. | Raziskati povezavo med stopnjo prezračevanja in povečano odsotnostjo učencev od pouka zaradi bolezni. | V študijo je bilo vključenih 162 razredov iz 28 šol. Podatke so zbirali dve leti. Merili so koncentracije ogljikovega dioksida ter beležili odsotnost učencev od pouka. Podatke so obdelali s statističnim modelom. | Rezultati so pokazali, da se odsotnost od pouka zaradi bolezni zmanjša pri višjih stopnjah prezračevanja. Pri stopnjah prezračevanja do 15 l/s na osebo in več lahko posledično še bolj zmanjša odsotnost učencev od pouka zaradi bolezni. |
| Building-Related Symptoms among Office Employees Associated with Indoor Carbon Dioxide and Total Volatile Organic Compounds, 2015 [68] | Lu, C. Y., Lin, J. M., Chen, Y. Y., Chen, Y. C.                                                     | Raziskati, ali so simptomi sindroma bolnih stavb povezani s kakovostjo notranjega zraka.              | Merjenje koncentracij ogljikovega dioksida, temperature, vlažnosti in hlapnih organskih spojin v 87 pisarnah. 417 zaposlenih je izpolnjevalo vprašalnik o simptomih.                                                | Utrujenost, slabša koncentracija, slabost so povezani z višjimi koncentracijami ogljikovega dioksida v notranjem zraku. Zamašen nos, suho grlo, suha koža, razdražljivost so bolj povezani s koncentracijami hlapnih organskih spojin.     |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 18

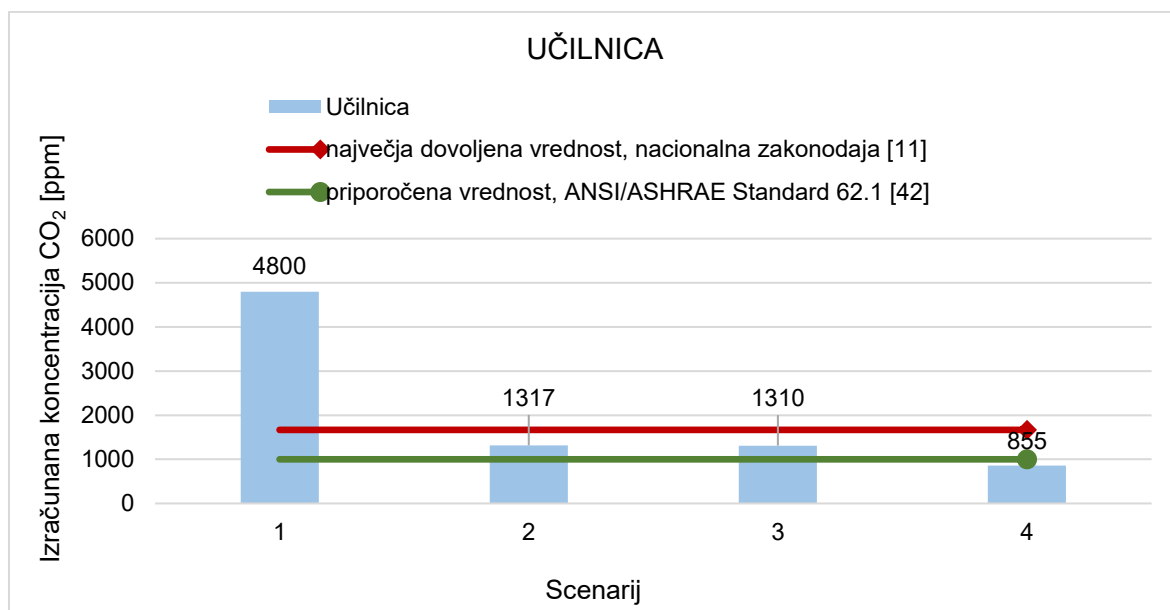
|                                                                                                  |                                                                                                                              |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Classroom Carbon Dioxide Concentration, School Attendance, and Educational Attainment, 2012 [72] | Gaihre, S., Semple, S., Miller, J., Fielding, S., Turner, S.                                                                 | Raziskati hipotezo, da so koncentracije ogljikovega dioksida v učilnicah povezane s prisotnostjo učencev pri pouku. | Merili so koncentracije ogljikovega dioksida 3 do 5 krat na dan v obdobju dveh mesecev v 60 učilnicah. Učilnice so bile naravno prezračevane. Primerjali so jih s povprečno prisotnostjo učencev v enem šolskem letu. | Odsotnost učenca za 0,4 dni na leto je povezana s povečanjem koncentracij ogljikovega dioksida za 100 ppm.                                                                                                                    |
| School air quality related to dry cough, rhinitis, and nasal patency in children, 2010 [69]      | Simoni, M., Annesi-Maesano, I., Sigsgaard, T., Norback, D., Wieslander, G., Nystad, W., Canciani, M., Sestini, P., Viegi, G. | Oceniti vpliv kakovosti notranjega zraka na boleznih dihal učencev iz nekaterih držav v Evropi.                     | Merili so koncentracije onesnaževalcev notranjega zraka, kot sta ogljikov dioksid in PM <sub>10</sub> delci. Prav tako so učitelji, učenci in njihovi starši izpolnili standardizirane vprašalnike.                   | Ugotovili so, da je kakovost notranjega zraka v raziskanih učilnicah po večini slaba, saj koncentracije ogljikovega dioksida presegajo vrednost 1000 ppm, učenci v teh učilnicah so bolj podvrženi suhemu kašlju in rinitisu. |

## 5.2 Rezultati simulacij

V naslednjih podpoglavjih so prikazani rezultati izvedenih simulacij za posamezen prostor. Predvideno je, da zunanja koncentracija ogljikovega dioksida znaša 400 ppm. Kot mejna vrednost je prikazana največja dovoljena koncentracija ogljikovega dioksida, predpisana v Prilogi 1 Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11]. Ta znaša 3000 mg/m<sup>3</sup>, kar je 1667 ppm. Druga mejna vrednost, ki je prikazana, pa je priporočena vrednost po ANSI/ASHRAE Standardu 62.1 [42]. Ta znaša 1800 mg/m<sup>3</sup>, kar je 1000 ppm. V EU standardih so navedene tudi druge mejne vrednosti, ki pa niso bile predmet naše analize.

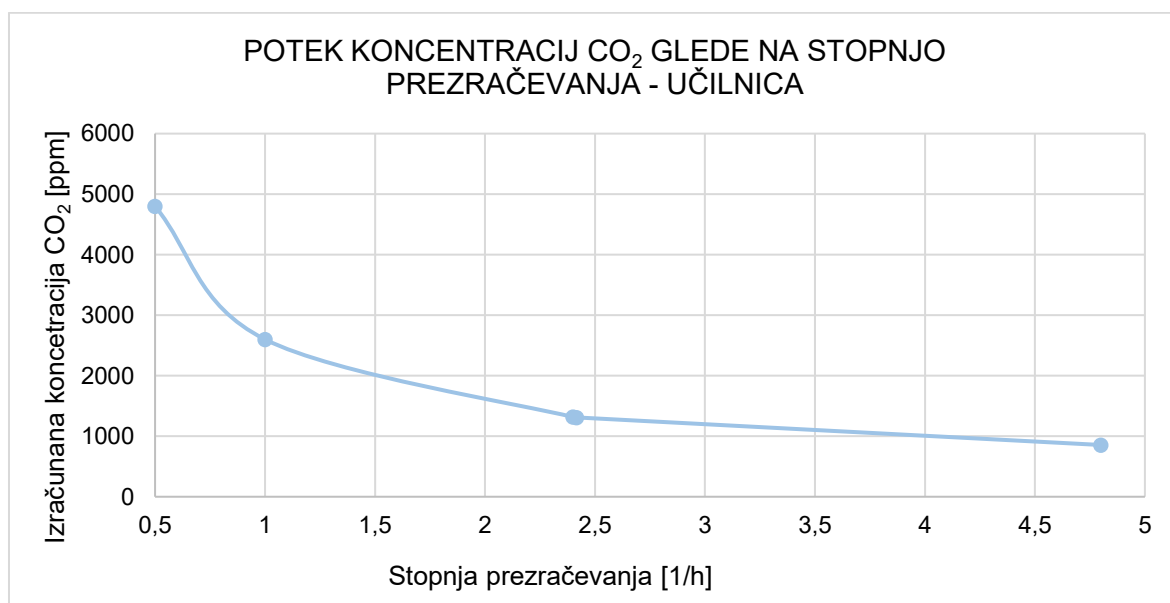
### 5.2.1 Učilnica

Na grafikonu 5 so prikazani rezultati za primer učilnice za vse štiri scenarije. Z večjo količino dovedenega zunanjega zraka se koncentracija ogljikovega dioksida v prostoru manjša. Iz predpisane stopnje prezračevanja 0,5/h znaša izračunana količina dovedenega zunanjega zraka za predviden prostor samo 90 m<sup>3</sup>/h. Na grafu 5 vidimo, da znaša koncentracija ogljikovega dioksida v tem primeru kar 4800 ppm. Ta vrednost občutno presega obe mejni vrednosti ter ima negativen vpliv na človekovo počutje in njegovo produktivnost v takšnem prostoru, kot je dokazano z raziskavami. V primeru scenarija 2 in 3 znaša izračunana količina dovedenega zunanjega zraka 432 m<sup>3</sup>/h in 435 m<sup>3</sup>/h, vrednosti sta enakovredni stopnji prezračevanja 2,4/h. Koncentracije ogljikovega dioksida so zato manjše kot v primeru prvega scenarija in znašajo 1317 ppm in 1310 ppm. Glede na nacionalno zakonodajo sta ti vrednosti pod največjo dovoljeno vrednostjo, še vedno pa presegata priporočeno vrednost ANSI/ASHRAE Standarda 62.1 [42], in sicer za 317 ter 310 ppm. Glede na rezultate prvega scenarija se je koncentracija ogljikovega dioksida v drugem in tretjem scenariju zmanjšala za 3,7-krat, ob 4,8-kratnem povečanju stopnje prezračevanja. V primeru scenarija 4 je izračunana količina dovedenega zunanjega zraka glede na priporočene količine zunanjega zraka na osebo in znaša ta 870 m<sup>3</sup>/h, kar je enakovredno stopnji prezračevanja 4,8/h. To je približno devetkrat večja stopnja prezračevanja kot predpisana v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11]. Rezultati v tem scenariju so bili najboljši, saj znaša koncentracija ogljikovega dioksida 855 ppm. Glede na rezultate prvega scenarija se je koncentracija ogljikovega dioksida v drugem in tretjem scenariju zmanjšala za 5,6-krat, ob 9-kratnem povečanju stopnje prezračevanja. Takšen prostor bi bil najbolj primeren za učence, saj glede na obravnavane članke v poglavju 4 takšne koncentracije ne povzročajo zdravstvenih težav otrok ter ne vplivajo na njihove učne sposobnosti in koncentracijo.



Grafikon 5: Rezultati simulacij za primer učilnice

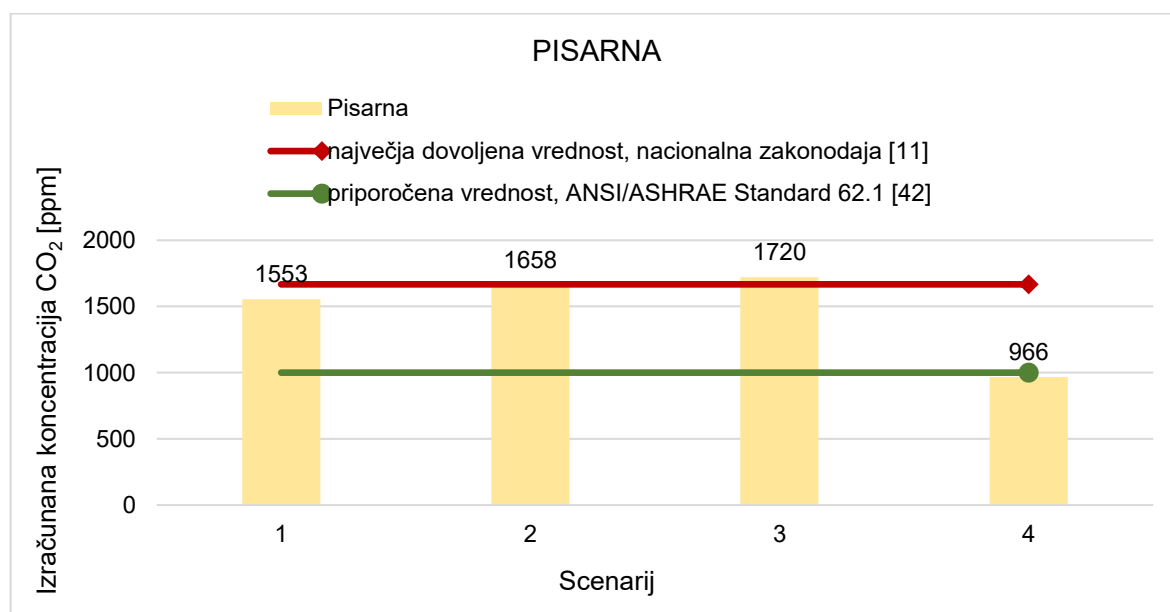
Na grafikonu 6 je prikazan potek koncentracij ogljikovega dioksida v odvisnosti od stopnje prezračevanja iz rezultatov, dobljenih z izvedenimi simulacijami za primer učilnice. Za boljši prikaz grafa je bila dodana izračunana koncentracija ogljikovega dioksida pri stopnji prezračevanja 1/h. Na grafu je razvidno, kako se koncentracija ogljikovega dioksida manjša z večanjem stopnje prezračevanja. Z večanjem stopnje prezračevanja koncentracija ogljikovega dioksida eksponentno pada. V primeru stopnje prezračevanja  $0,5 \text{ h}^{-1}$  znaša koncentracija ogljikovega dioksida 4799,6 ppm. V primeru povečanja stopnje prezračevanja za 9,6 krat na  $4,8 \text{ h}^{-1}$  se koncentracija ogljikovega dioksida zmanjša za 5,6 krat.



Grafikon 6: Potek koncentracij ogljikovega dioksida glede na stopnjo prezračevanja za primer učilnice

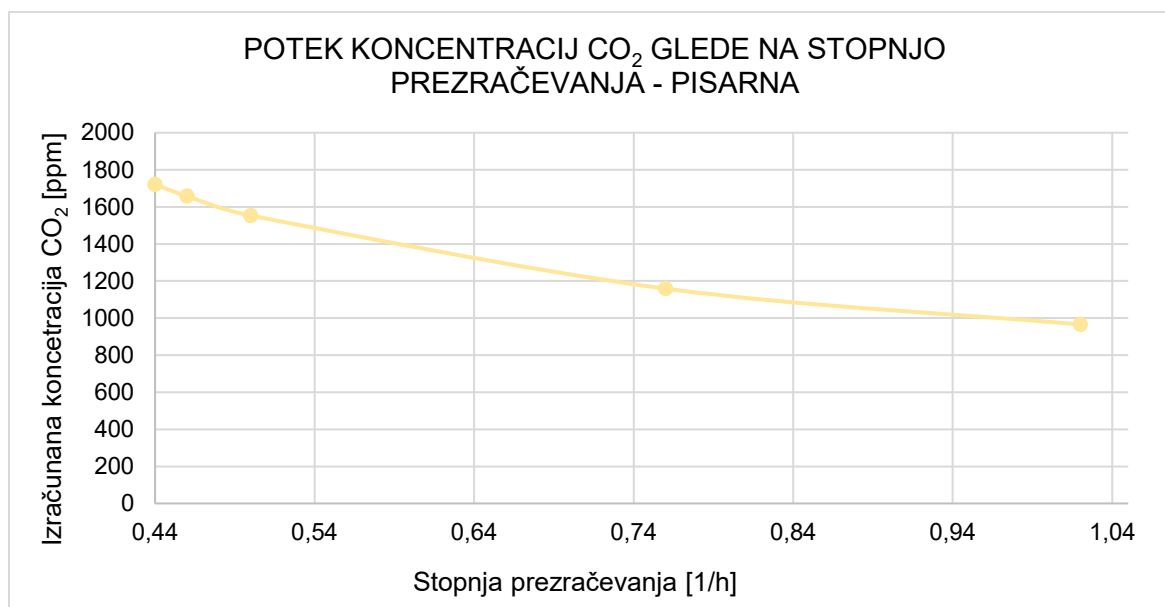
### 5.2.2 Pisarna

Na grafikonu 7 so prikazani rezultati za primer pisarne za vse štiri scenarije. Izračunana količina dovedenega zunanjega zraka znaša v primeru stopnje prezračevanja 0,5/h 103 m<sup>3</sup>/h. Koncentracija ogljikovega dioksida v prvem scenariju je posledično 1553 ppm. Ta vrednost ne presega največje dovoljene vrednosti po nacionalni zakonodaji, presega pa priporočeno vrednost ANSI/ASHRAE Standarda 62.1 [42]. V primeru scenarija 2 in 3 je koncentracija ogljikovega dioksida nekoliko večja in doseže 1658 ppm in 1720 ppm, saj je količina dovedenega zunanjega zraka manjša. Ta znaša 94 m<sup>3</sup>/h in 90 m<sup>3</sup>/h, kar je enakovredno stopnji prezračevanja 0,46/h in 0,44/h. V primeru scenarija 4, ko je količina dovedenega zraka največja in znaša 210 m<sup>3</sup>/h, kar je enakovredno stopnji prezračevanja 1,02/h, je vrednost koncentracije ogljikovega dioksida 966 ppm. Glede na rezultate prvega scenarija se je koncentracija ogljikovega dioksida v četrtem scenariju zmanjšala za 1,6-krat, ob 2-kratnem povečanju stopnje prezračevanja.



Grafikon 7: Rezultati simulacij za primer pisarne

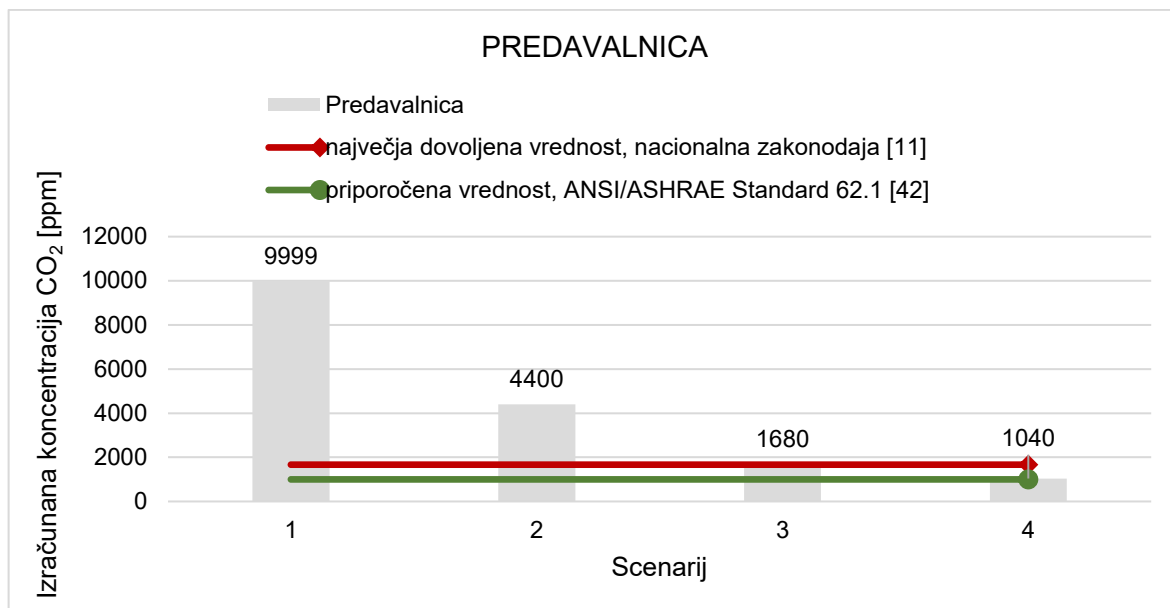
Na grafikonu 8 je prikazan potek koncentracij ogljikovega dioksida glede na stopnjo prezračevanja za primer pisarne. Za boljši prikaz grafa je bila dodana izračunana koncentracija ogljikovega dioksida pri stopnji prezračevanja 0,76/h. Vidimo lahko, da znaša v primeru stopnje prezračevanja 0,44 h<sup>-1</sup>, koncentracija ogljikovega dioksida 1720 ppm. Ob povečanju stopnje prezračevanja za 2,3 krat na 1,02 h<sup>-1</sup> se koncentracija ogljikovega dioksida zmanjša za 1,8 krat.



Grafikon 8: Potek koncentracij ogljikovega dioksida glede na stopnjo prezračevanja za primer pisarne

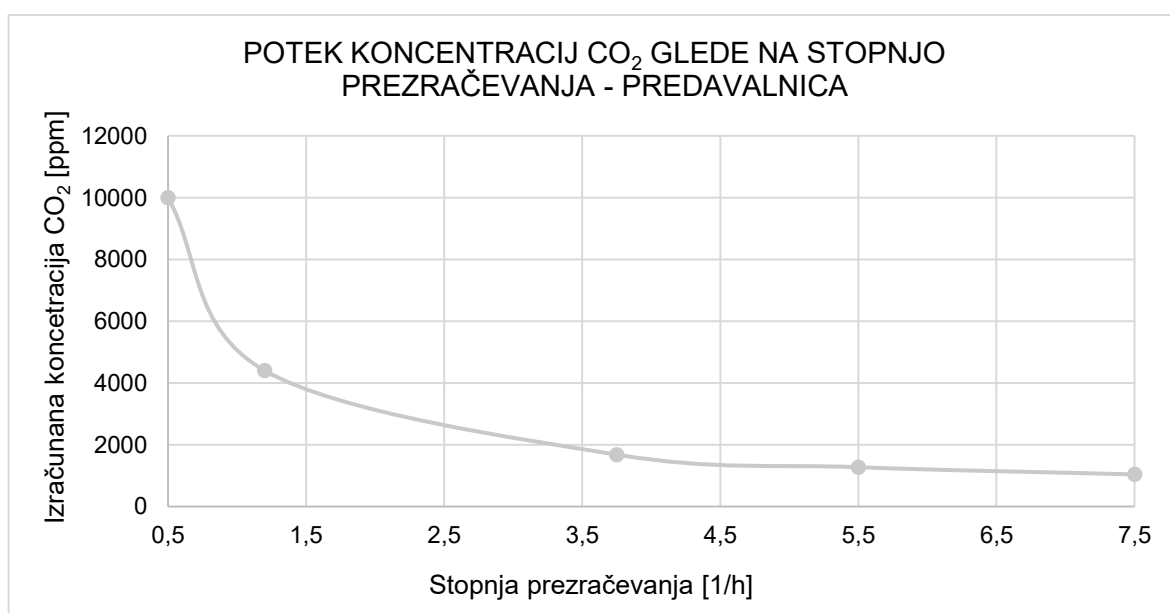
### 5.2.3 Predavalnica

Na grafikonu 9 so prikazani rezultati za primer pisarne za vse štiri scenarije. Izračunana količina dovedenega zunanjega zraka 300 m<sup>3</sup>/h v primeru stopnje prezračevanja 0,5/h je bistveno premajhna za doseganje optimalnih koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem prostoru. Le ta znaša 9999 ppm. V primeru scenarija 2, kjer je količina dovedenega zunanjega zraka 720 m<sup>3</sup>/h, kar je enakovredno stopnji prezračevanja 1,2/h, je rezultat nekoliko boljši in znaša 4400 ppm, kar pomeni, da se je koncentracija ogljikovega dioksida zmanjšala za 2,3-krat. Ta vrednost pa še vedno ni dovolj nizka in presega največjo dovoljeno vrednost po nacionalni zakonodaji za kar 2733 ppm. Količina dovedenega zunanjega zraka v primeru scenarija 3 je 2250 m<sup>3</sup>/h, kar je enakovredno stopnji prezračevanja 3,75/h. Rezultat koncentracije ogljikovega dioksida znaša 1680 ppm, kar se zelo približa največji dovoljeni vrednosti po nacionalni zakonodaji. Najmanjšo koncentracijo ogljikovega dioksida dosežemo s simulacijo 4. Količina dovedenega zunanjega zraka je v tem primeru 4500 m<sup>3</sup>/h, kar je enakovredno stopnji prezračevanja 7,5/h. Vrednost koncentracije ogljikovega dioksida pa znaša 1040 ppm. Ta vrednost je sicer manjša od največje dovoljene vrednosti po nacionalni zakonodaji, je pa na meji glede na priporočeno vrednost ANSI/ASHRAE Standarda 62.1 [42], in sicer le za 40 ppm.



Grafikon 9: Rezultati simulacij za primer predavalnice

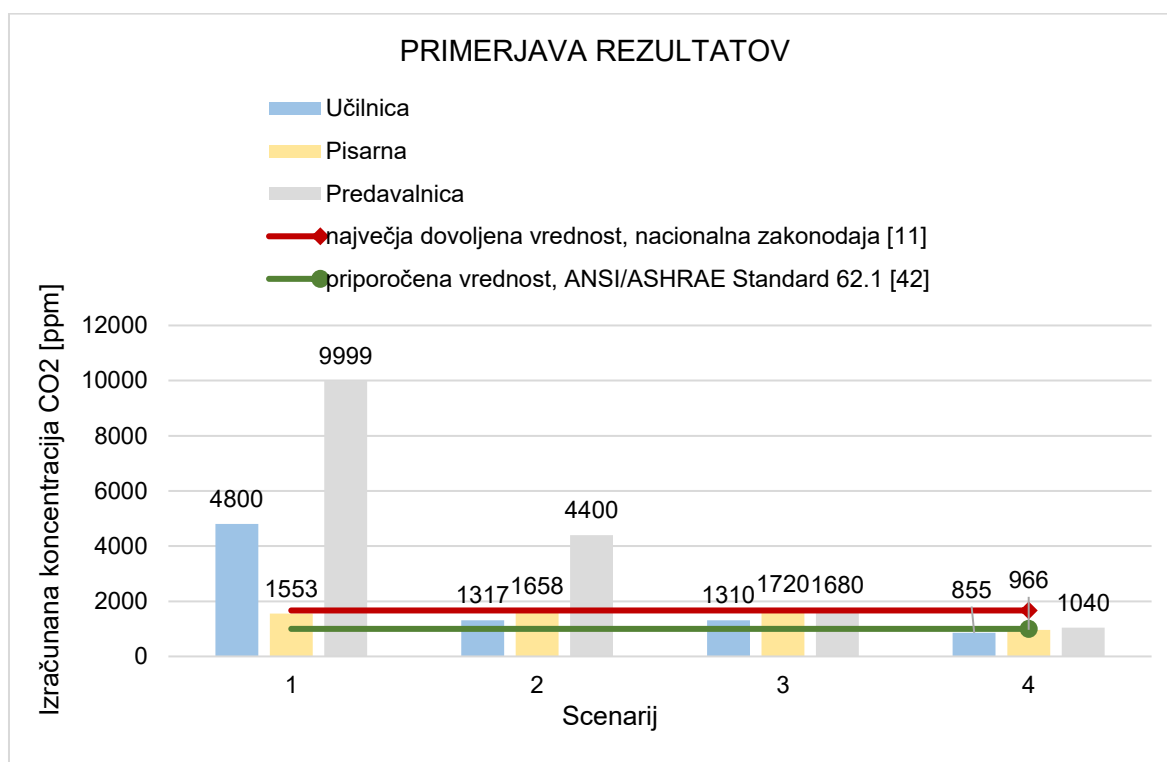
Na grafikonu 10 je prikazan potek koncentracij ogljikovega dioksida glede na stopnjo prezračevanja za primer predavalnice. Za boljši prikaz grafa je bila dodana izračunana koncentracija ogljikovega dioksida pri stopnji prezračevanja 5,5/h. Vidimo lahko, da v primeru predavalnice stopnja prezračevanja 0,5 h<sup>-1</sup> nikakor ne zadostuje, saj je koncentracija ogljikovega dioksida presežena za kar 6-krat glede na dovoljeno vrednost po nacionalni zakonodaji. V primeru povečanja stopnje prezračevanja za 15-krat na 7,5 h<sup>-1</sup>, se koncentracija ogljikovega dioksida zmanjša za 7,1-krat in doseže 1040 ppm.



Grafikon 10: Potek koncentracij ogljikovega dioksida glede na stopnjo prezračevanja za primer predavalnice

#### 5.2.4 Primerjava rezultatov simulacij

Na grafikonu 11 so prikazani vsi rezultati simulacij glede na posamezen scenarij. Iz grafa je razvidno, da so največje koncentracije ogljikovega dioksida v vseh scenarijih bile dosežene v primeru predavalnice. V vseh treh prostorih je bila koncentracija ogljikovega dioksida najmanjša v primeru 4 scenarija. To nam pove, da nam najboljše rezultate poda količina dovedenega zunanjega zraka, izračunana na podlagi priporočene količine zunanjega zraka na osebo.



Grafikon 11: Primerjava rezultatov simulacij za primer učilnice, pisarne in predavalnice za posamezen scenarij

V prvem scenariju so koncentracije ogljikovega dioksida zelo prekoračile mejo največje dovoljene vrednosti po nacionalni zakonodaji, in sicer za primer učilnice za 65 %, za primer predavalnice pa kar za 83 %. V primeru pisarne temu ni bilo tako. Rezultat je takšen zato, ker je volumen pisarne dosti večji glede na število oseb, ki so v njej kot pa v učilnici in predavalnici. Zato izračun količine dovedenega zunanjega zraka za učilnice in predavalnice ni primeren iz stopnje prezračevanja, saj so koncentracije ogljikovega dioksida previsoke in posledično vplivajo na učne sposobnosti in zdravje učencev ter študentov, kot je bilo ugotovljeno v mnogih raziskavah. V drugem scenariju so se koncentracije ogljikovega dioksida v primeru učilnice in predavalnice zmanjšale, v primeru pisarne pa povečale za 6,4 % glede na prvi scenarij. To lahko pripišemo temu, da je najmanjša količina zraka za človeka na površino prostora zapisana

v Prilogi 1 Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], dosti manjša v primeru pisarne. V primeru predavalnice v drugem scenariju so bile koncentracije ogljikovega dioksida še vedno visoke, saj zaradi premajhne površine glede na število oseb v predavalnici izračunana količina zunanjega zraka ni bila zadostna. Koncentracija ogljikovega dioksida se je prav tako povečala v tretjem scenariju za primer pisarne, in sicer za 9,8 % glede na prvi scenarij, medtem ko se je za primer učilnice in predavalnice zmanjšala. Izračunana količina dovedenega zunanjega zraka je za primer pisarne manjša kot v prvem in drugem scenariju, saj je v pisarni manjše število ljudi glede na volumen in površino pisarne. Ravno obratno pa velja za primer učilnice in pisarne. V primeru četrtega scenarija je bila koncentracija ogljikovega dioksida za vse tri prostore pod največjo dovoljeno vrednostjo po nacionalni zakonodaji. Za primer učilnice je bila koncentracija ogljikovega dioksida v primeru četrtega scenarija za 49 % pod dovoljeno vrednostjo, predpisano v nacionalni zakonodaji, za primer pisarne za 42 % ter v primeru predavalnice za 38 %. V primeru predavalnice, ki je polno zasedena, bi bilo potrebno upoštevati najmanj priporočene količine zunanjega zraka  $30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{osebo}$ , da bi bila koncentracija ogljikovega dioksida sprejemljiva za kakovosten zrak v predavalnici. Enako velja tudi za ostala dva prostora, saj so v primeru četrtega scenarija koncentracije ogljikovega dioksida najmanjše. Iz rezultatov lahko vidimo, da izračunana količina dovedenega zunanjega zraka na podlagi stopnje prezračevanja  $0,5/\text{h}$ , zapisane v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], ni vedno zadostna za koncentracije ogljikovega dioksida pod največjo dovoljeno vrednostjo, prav tako zapisano v tem pravilniku. Vidimo lahko, da je potrebno za vsak prostor različno definirati količino dovedenega zunanjega zraka, da bodo koncentracije ogljikovega dioksida v predpisanih in priporočenih mejah.

### 5.3 Rezultati izvedene verifikacije v testnem prostoru

V naslednjih podpoglavjih so prikazani rezultati verifikacije, ki je bila izvedena z meritvami koncentracij ogljikovega dioksida v testnem prostoru. Rezultati so prikazani za vsak merilni dan posebej. Prikazano je število oseb, prisotnih v prostoru. Navedeni so tudi izvedeni ukrepi prezračevanja.

Kot mejna vrednost je prikazana največja dovoljena koncentracija ogljikovega dioksida, predpisana v Prilogi 1 Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11]. Ta znaša  $3000 \text{ mg}/\text{m}^3$ , kar je 1667 ppm. Druga mejna vrednost, ki je prikazana, pa je priporočena vrednost po ANSI/ASHRAE Standardu 62.1 [42]. Ta znaša  $1800 \text{ mg}/\text{m}^3$ , kar je 1000 ppm. Vrednosti so predstavljene na grafikonih za preglednejšo primerjavo rezultatov z rezultati simulacij.

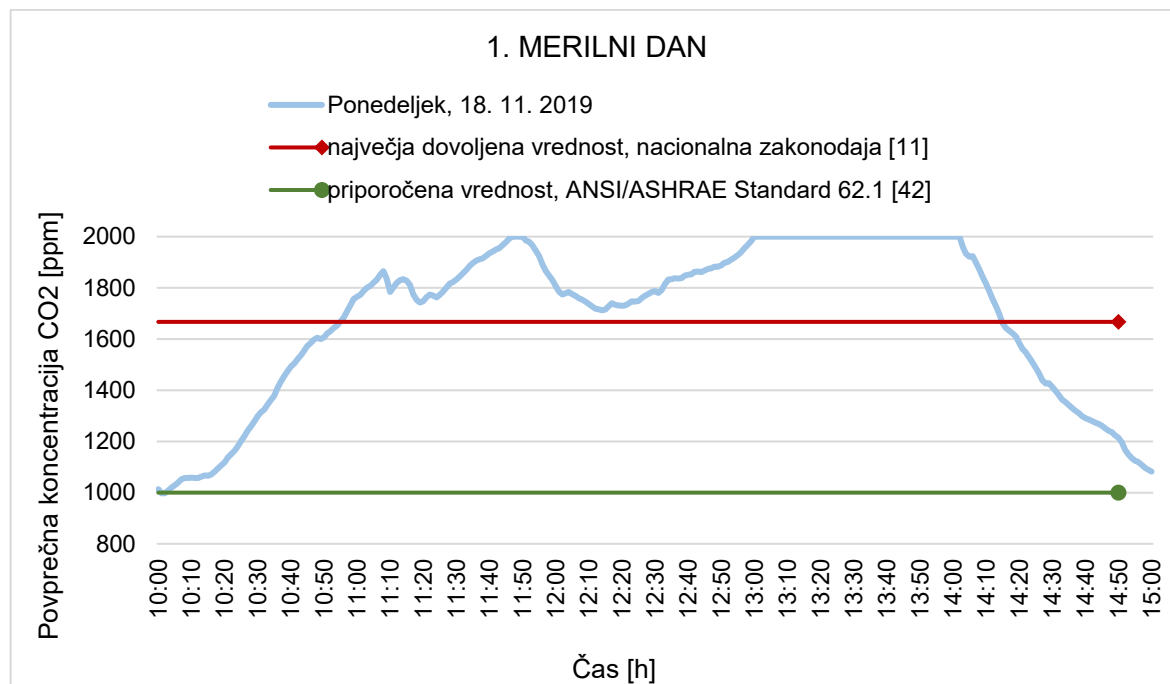
### 5.3.1 Prvi merilni dan

Prvi merilni dan je potekal v ponedeljek, 18. 11. 2019 od 10.00 do 14.00. V preglednici 19 je prikazana zasedenost prostora tekom prvega merilnega dne.

Preglednica 19: Zasedenost prostora na prvi merilni dan

| Čas [h]     | Število oseb v prostoru |       |        |
|-------------|-------------------------|-------|--------|
|             | Ženske                  | Moški | Skupaj |
| 10.00–10.15 | Prostor prazen          |       |        |
| 10.15–11.45 | 11                      | 8     | 19     |
| 11.45–12.00 | Prostor prazen          |       |        |
| 12.00–12.20 | 1                       | 9     | 10     |
| 12.20–13.45 | 1                       | 11    | 12     |
| 13.45–15.00 | Prostor prazen          |       |        |

Na grafikonu 12 so prikazani rezultati povprečne koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru na prvi merilni dan. Pred izvajanjem meritev je prostor že bil zaseden. V prostoru je bilo pet oseb. Koncentracija ogljikovega dioksida je znašala okoli 1000 ppm. Takšen je tudi rezultat med 10.00 in 10.15, ko je bil prostor prazen. Od 10.15 do 11.45 je bil prostor zaseden. V prostoru je bilo 19 oseb. Vidimo lahko, da začne od 10.15 koncentracija ogljikovega dioksida strmo naraščati in doseže vrednost 1865 ppm. Narašča nekje do 11.05, ko je bilo za petnajst minut odprto okno 6. Kot posledica odprtega okna 6 pa se koncentracija ogljikovega dioksida zmanjša le nekje za 100 ppm in še vedno presega največjo dovoljeno vrednost po nacionalni zakonodaji. Od 11.20 do 11.45 začnejo vrednosti spet strmo naraščati in dosežejo vrednosti nad 2000 ppm. Ob 11.45 se je prostor izpraznil, vrata so bila odprta. Vidimo, da so takrat vrednosti začele strmo padati in so dosegle 1713 ppm. Ko je prostor spet postal zaseden in vrata zaprta, vrednosti zopet strmo narastejo in v petnajstih minutah od začetka naraščanja dosežejo vrednosti preko 2000 ppm. Prostor se je izpraznil ob 13.45, vrata so bila odprta, zato so vrednosti začele strmo padati.



Grafikon 12: Rezultati meritev prvega merilnega dne

### 5.3.2 Drugi merilni dan

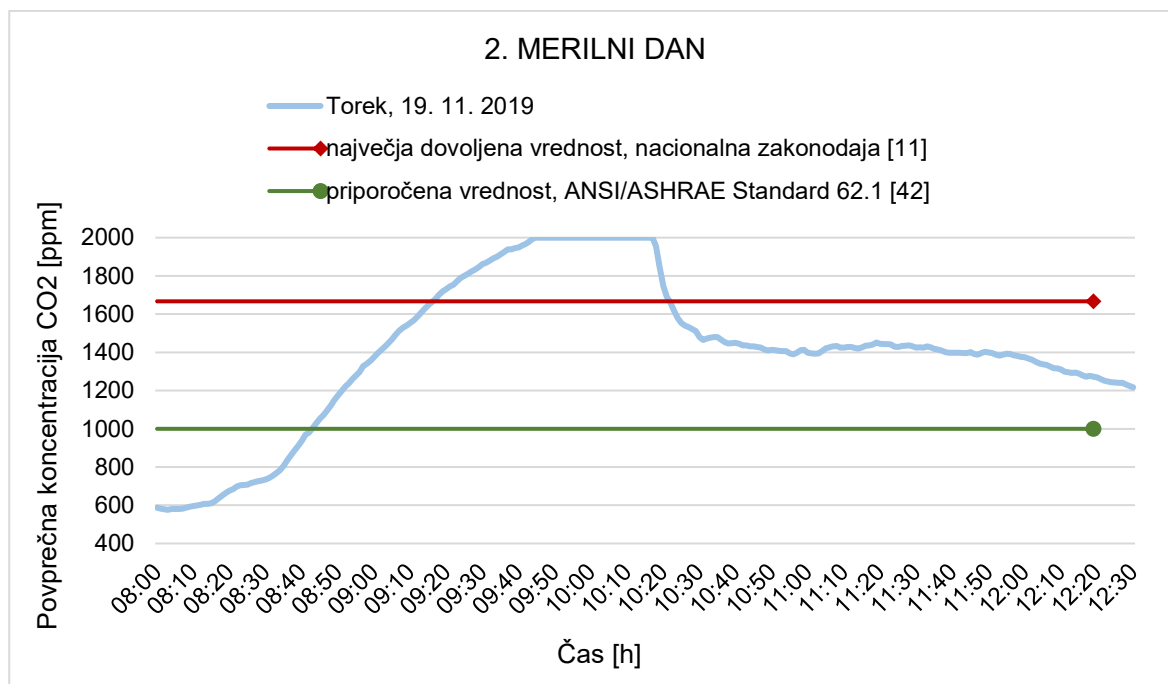
Drugi merilni dan je potekal v torek, 19. 11. 2019 od 8.00 do 12.30. V preglednici 20 je prikazana zasedenost prostora tekom drugega merilnega dne.

Preglednica 20: Zasedenost prostora na drugi merilni dan

| Čas [h]     | Število oseb v prostoru |       |        |
|-------------|-------------------------|-------|--------|
|             | Ženske                  | Moški | Skupaj |
| 08.00–08.15 | Prostor prazen          |       |        |
| 08.15–08.30 | 2                       | 5     | 7      |
| 08.30–10.00 | 8                       | 11    | 19     |
| 10.00–10.15 | Prostor prazen          |       |        |
| 10.15–11.50 | 3                       | 1     | 4      |
| 11.50–12.30 | Prostor prazen          |       |        |

Na grafikonu 12 so prikazani rezultati povprečne koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru na drugi merilni dan. Prostor je bil pred izvajanjem meritev prazen. Vrednosti koncentracije ogljikovega dioksida so bile pod 600 ppm. Z zasedenostjo prostora začnejo vrednosti strmo naraščati. Ob 9.45 presežejo 2000 ppm. Nad vrednostjo 2000 ppm ostanejo koncentracije ogljikovega dioksida vse do 10.18. Vzrok zato je, da se je prostor ob 10.00 izpraznil ter vrata so bila odprta. Med 10.15 in 11.50 so bile v prostoru štiri osebe. Ob 10.15 je bilo odprto okno 11, in sicer za pet minut. Prav tako so bila v tem času odprta vrata. Vrednosti so padle na 1747 ppm. Dokler so bila vrata odprta, so vrednosti še malenkost padale, ko so se vrata zaprla, pa so bile ves čas okoli 1400 ppm. Prostor se je izpraznil ob 11.50, vrata so bila zaprta.

Koncentracije ogljikovega dioksida so začele zelo počasi padati in so do 12.30 dosegle 1217 ppm.



Grafikon 13: Rezultati meritev drugega merilnega dne

### 5.3.3 Tretji merilni dan

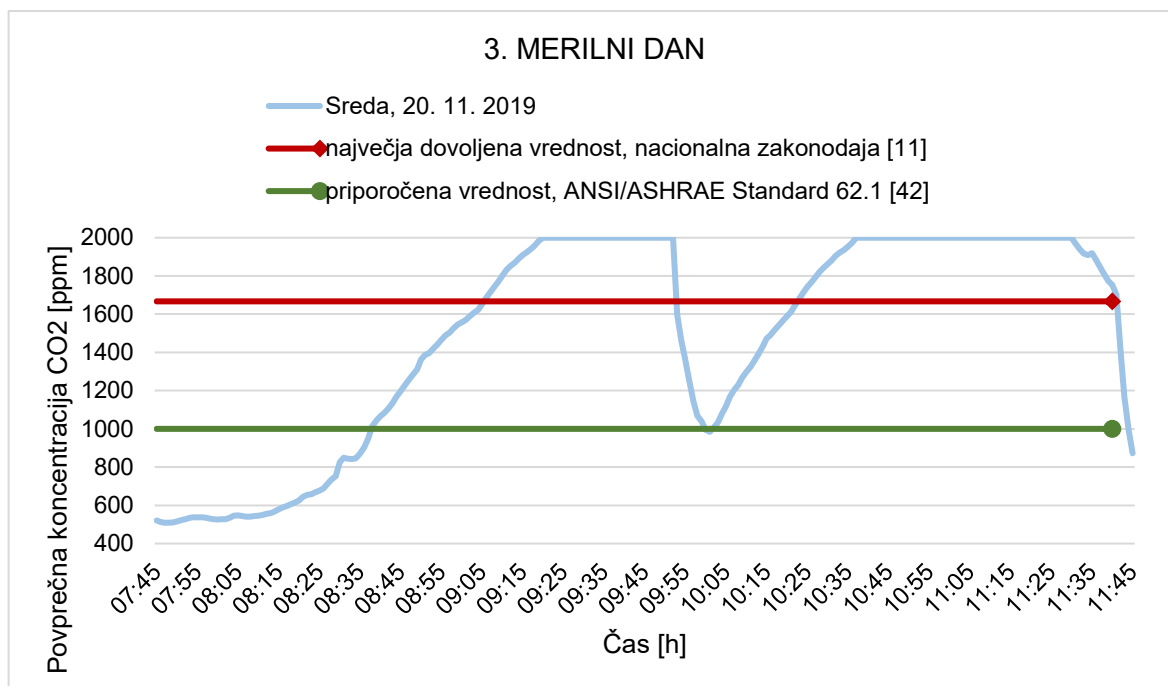
Tretji merilni dan je potekal v sredo, 20. 11. 2019 od 7.45. do 11.45. V preglednici 21 je prikazana zasedenost prostora tekom tretjega merilnega dne.

Preglednica 21: Zasedenost prostora na tretji merilni dan

| Čas [h]     | Število oseb v prostoru |       |        |
|-------------|-------------------------|-------|--------|
|             | Ženske                  | Moški | Skupaj |
| 07.45–08.10 | Prostor prazen          |       |        |
| 08.10–08.25 | 4                       | 8     | 12     |
| 08.25–11.05 | 6                       | 18    | 24     |
| 11.05–11.40 | Prostor prazen          |       |        |

Na grafikonu 14 so prikazani rezultati povprečne koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru na tretji merilni dan. Prostor je bil pred izvajanjem meritev prazen, koncentracije ogljikovega dioksida so znašale okrog 530 ppm. Od 8.10 do 8.25 je bilo v prostoru 12 oseb. Vrednosti začnejo ob 8.10 naraščati. Od 8.25 naprej je v prostoru še več oseb, in sicer 24. Vrednosti zato strmo narastejo in ob 9.20 presežejo 2000 ppm. Ob 9.50 se odpre okno 17 in okno 18, prav tako so odprta vrata. Odprta so do 10.00. Vidimo lahko, da v tem času vrednosti koncentracije ogljikovega dioksida strmo padejo in ob 10.00 dosežejo 985 ppm. Po 10.00 so bila okna in vrata zaprta. To je jasno razvidno na grafu, saj začnejo vrednosti ponovno strmo

naraščati. Ob 10.37 zopet presežejo 2000 ppm. Prostor se je izpraznil ob 11.00, odprta so bila vrata. Vrednosti so počasi padale, ob 11.30 so bile še vedno nad 2000 ppm. Ob 11.40 je bilo odprto okno 9. Zaradi odprtega okna 9 in vrat so vrednosti koncentracij ogljikovega dioksida v petih minutah strmo padle in dosegle vrednosti 872 ppm.



Grafikon 14: Rezultati meritev tretjega merilnega dne

### 5.3.4 Četrty merilni dan

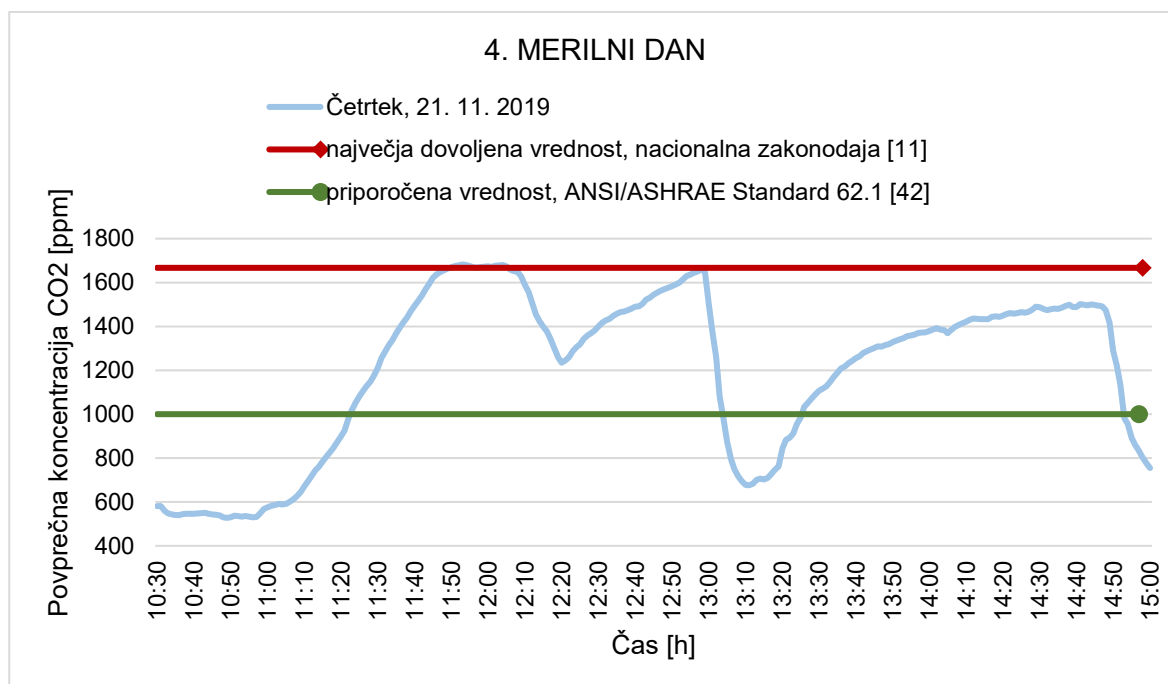
Četrty merilni dan je potekal v četrtek, 21. 11. 2019 od 10.30 do 15.00. V preglednici 22 je prikazana zasedenost prostora tekom četrtega merilnega dne.

Preglednica 22: Zasedenost prostora na četrty merilni dan

| Čas [h]     | Število oseb v prostoru |       |        |
|-------------|-------------------------|-------|--------|
|             | Ženske                  | Moški | Skupaj |
| 10.30–10.55 | Prazen prostor          |       |        |
| 10.55–11.20 | 3                       | 11    | 14     |
| 11.20–12.55 | 4                       | 21    | 25     |
| 12.55–13.15 | 3                       | 12    | 15     |
| 13.15–14.45 | 4                       | 18    | 22     |
| 14.45–15.00 | Prazen prostor          |       |        |

Na grafikonu 15 so prikazani rezultati povprečne koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru na četrty merilni dan. Prostor je bil pred izvajanjem meritev prazen, koncentracija ogljikovega dioksida je znašala 580 ppm. Od 10.40 do 10.55 je bilo odprto okno 6. Vrednosti so se znižale

na 530 ppm. Od 10.55 do 11.20 je bilo v prostoru 14 oseb. Vrednosti so od takrat začele strmo naraščati in do 11.20 dosegle 900 ppm. Od 11.20 dalje je bilo v prostoru 25 oseb. Vrednosti zato strmo naraščajo do 11.45, ko se je odprlo okno 18. Zaradi odprtega okna 18 so vrednosti nehale naraščati in so se gibale okrog 1650 ppm. Ob 12.05 so bila poleg okna 18 odprta še vrata. Vrata so se zaprla ob 12.20. Vidimo lahko, da so v tem času vrednosti koncentracij ogljikovega dioksida padle in dosegle vrednost 1234 ppm. Od 12.20 do 12.55 so vrednosti začele spet naraščati, kljub temu da je bilo okno 18 še vedno odprto. Od 12.55 do 13.15 je bilo v prostoru 15 oseb. 13.00 se je odprlo okno 9 in vrata. Okno 9 se je zaprlo ob 13.05, vrata pa ob 13.15. V teh času vrednosti strmo padejo in 13.15 dosežejo 700 ppm. Po tem je prostor zaseden z 22 osebami. Kljub temu da je bilo še vedno odprto okno 18, so vrednosti naraščale, vendar naraščanje ni bilo tako strmo. Ob 14.45 se prostor izprazni, odprta so vrata in okno 18. Vrednosti strmo padejo in do 15.00 dosežejo 755 ppm.



Grafikon 15: Rezultati meritev četrtega merilnega dne

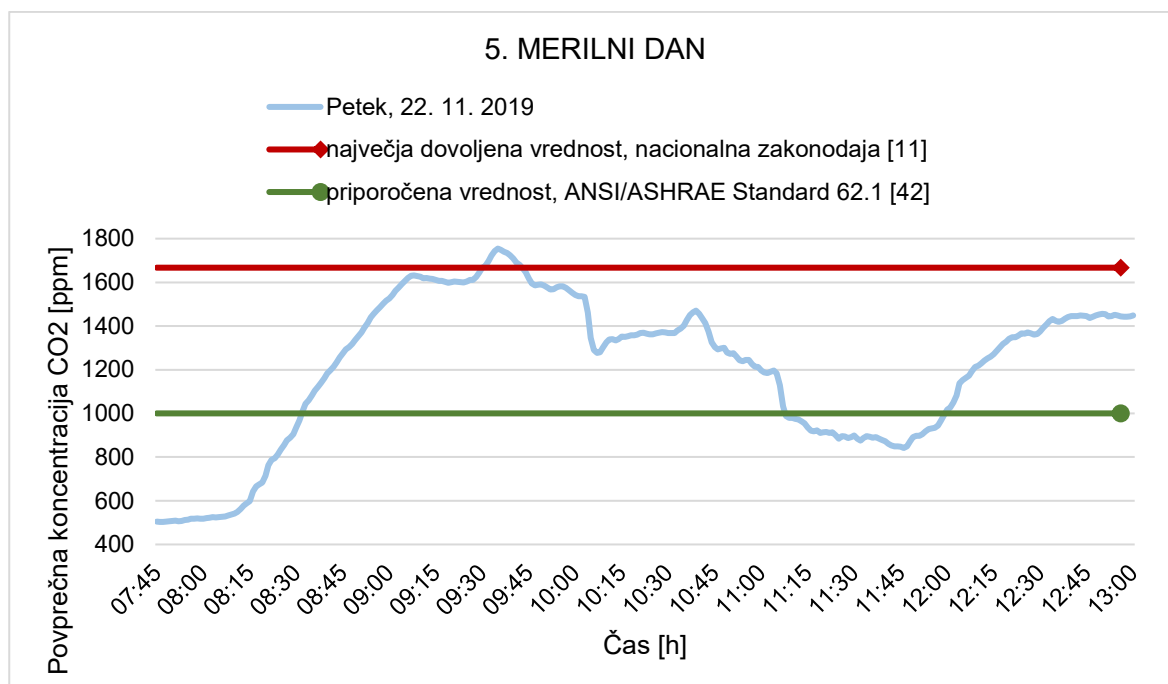
### 5.3.5 Peti merilni dan

Peti merilni dan je potekal v petek, 22. 11. 2019 od 7.45 do 13.00. V preglednici 23 je prikazana zasedenost prostora tekom petega merilnega dne.

Preglednica 23: Zasedenost prostora na peti merilni dan

| Čas [h]     | Število oseb v prostoru |       |        |
|-------------|-------------------------|-------|--------|
|             | Ženske                  | Moški | Skupaj |
| 7.45–8.05   | Prostor prazen          |       |        |
| 8.05–8.15   | 3                       | 5     | 8      |
| 8.15–9.00   | 5                       | 15    | 20     |
| 9.00–9.20   | 4                       | 12    | 16     |
| 9.20–10.00  | 5                       | 15    | 20     |
| 10.00–10.25 | 3                       | 7     | 10     |
| 10.25–12.15 | 4                       | 9     | 13     |
| 12.15–13.00 | 2                       | 9     | 11     |

Na grafikonu 16 so prikazani rezultati povprečne koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru na četrti merilni dan. Prostor je bil pred izvajanjem meritev prazen, vrednosti koncentracije ogljikovega dioksida so znašale okoli 510 ppm. Od 8.05 do 8.15 je bilo v prostoru 8 oseb, vrata so bila odprta. Vrednosti so malo narastle, in sicer na 589 ppm. Od 8.15 dalje, ko je bilo v prostoru 20 oseb in so bila vrata zaprta, pa so vrednosti strmo narastle in dosegle vrednost 1631 ppm. Od 9.00 do 9.20 so bila vrata odprta in v prostoru je bilo 16 oseb. V tem času so vrednosti zelo rahlo upadle in do 9.20 niso naraščale. Od 9.20 naprej je bilo v prostoru spet 20 oseb. Koncentracija ogljikovega dioksida v prostoru je strmo narastla in presegla največjo dovoljeno vrednost, predpisano po nacionalni zakonodaji. Znašala je namreč 1750 ppm. Vrednosti so začele upadati s tem, ko je bilo odprto okno 18. Od 10.00 do 10.25 je bilo v prostoru 10 oseb in vrata so bila odprta. Vrednosti so strmo padle. Zviševati so se začele ob 10.25, ko so se vrata zaprla ter je bilo v prostoru 13 oseb. Med 10.35 in 11.50 je bilo spet odprto okno 18, vrednosti so začele rahlo padati in so dosegle vrednost 898 ppm. Ko se je okno 18 zaprlo, pa so koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru začele hitro naraščati. Z zmanjšanjem števila oseb v prostoru na 11 oseb so vrednosti še vedno naraščale, vendar malo manj strmo.



Grafikon 16: Rezultati meritev petega merilnega dne

### 5.3.6 Potrebna stopnja prezračevanja za zagotovitev kakovosti notranjega zraka

V tem poglavju so predstavljeni rezultati simulacij testnega prostora. V preglednici 24 so prikazani rezultati za dovedene zunanje količine zraka skozi okna in vrata ter izračunane stopnje prezračevanja za testni prostor glede na te količine. Ker so se koncentracije ogljikovega dioksida v primeru odprtih vhodnih vrat občutno zmanjšale, so vrata v tem primeru definirana enako kot okno. Vidimo lahko, da z okni skupine 1 ne zadostimo minimalni predpisani stopnji prezračevanja po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], ki znaša  $0,5 \text{ h}^{-1}$ .

Preglednica 24: Dovedena zunanja količina zraka skozi odprtine obravnavanega prostora

|                                                              | Dovedena zunanja<br>količina zraka [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] | Stopnja<br>prezračevanja [ $\text{h}^{-1}$ ] |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Okna skupine 1 (1, 2, 5, 6, 7,<br>8, 11, 12, 13, 14, 17, 18) | 110                                                          | 0,38                                         |
| Okna skupine 2 (3, 4, 9, 10,<br>15, 16)                      | 335                                                          | 1,16                                         |
| Vrata                                                        | 244                                                          | 0,85                                         |

V preglednici 25 so prikazane s programom CONTAM 3.2 izračunane povprečne dovedene zunanje količine zraka ter izračunane stopnje prezračevanja za testni prostor. Prikazana je tudi

povprečna dovedena zunanja količina zraka na osebo. Za vsak dan je bilo vzeto povprečje terminov, ko so bile v prostoru iste osebe. Termini, ko prostor ni bil zaseden, niso vključeni v povprečno vrednost. Merilna naprava je omogočala merjenje koncentracij ogljikovega dioksida le do 2000 ppm, v našem primeru pa smo te vrednosti presegli. Povprečna koncentracija ogljikovega dioksida je bila tako na 1. in 2. merilni dan realno malo večja, posledično je bila stopnja prezračevanja manjša. Vidimo lahko, kako stopnja prezračevanja vpliva na koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru. Zelo pomemben faktor je tudi zasedenost prostora.

Preglednica 25: Povprečna dovedena zunanja količina zraka in ostali parametri za obravnavan prostor

| Merilni dan | Čas [h]     | Maksimalno število oseb v prostoru / Zasedenost prostora | Povprečna koncentracija ogljikovega dioksida [ppm] | Povprečna dovedena zunanja količina zraka [m <sup>3</sup> /h] | Povprečna dovedena zunanja količina zraka na osebo [m <sup>3</sup> /h*osebo] | Povprečna stopnja prezračevanja [h <sup>-1</sup> ] |
|-------------|-------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1.          | 10.15–11.45 | 19 / 51 %                                                | 1626                                               | 295                                                           | 15,5                                                                         | 1,02                                               |
|             | 12.00–13.45 | 12 / 32 %                                                | 1893                                               | 161                                                           | 13,4                                                                         | 0,56                                               |
| 2.          | 8.15–10.00  | 19 / 51 %                                                | 1427                                               | 368                                                           | 19,4                                                                         | 1,28                                               |
|             | 10.15–11.50 | 4 / 11 %                                                 | 1470                                               | 72                                                            | 18,0                                                                         | 0,25                                               |
| 3.          | 8.10–11.05  | 24 / 65 %                                                | 1548                                               | 417                                                           | 17,4                                                                         | 1,44                                               |
| 4.          | 10.55–12.55 | 25 / 68 %                                                | 1294                                               | 574                                                           | 23,0                                                                         | 1,99                                               |
|             | 12.55–14.45 | 22 / 59 %                                                | 1262                                               | 510                                                           | 23,2                                                                         | 1,77                                               |
| 5.          | 8.05–10.00  | 20 / 54 %                                                | 1324                                               | 430                                                           | 21,5                                                                         | 1,49                                               |
|             | 10.00–13.00 | 13 / 35 %                                                | 1214                                               | 314                                                           | 24,5                                                                         | 1,09                                               |

Glede na rezultate preglednice 25 smo ugotovili, da minimalna predpisana stopnja prezračevanja po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], ki znaša  $0,5 \text{ h}^{-1}$ , ne zadošča za zagotovitev kakovosti notranjega zraka. Koncentracije ogljikovega dioksida so namreč v tem primeru višje od največje dovoljene vrednosti 1667 ppm, predpisane v istem pravilniku [11].

## 6 RAZPRAVA

V tem poglavju je predstavljena primerjava rezultatov treh metod, izvedenih v tem delu. Z metodo pregleda člankov smo dobili vpogled v že izvedene študije na področju kakovosti notranjega zraka ter na vplive koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem okolju na človeka. Veliko raziskovalcev je ugotovilo, kako stopnja prezračevanja vpliva na koncentracije ogljikovega dioksida v notranjem okolju. Za doseganje koncentracij okoli 1000 ppm za primer učilnice je potrebna stopnja prezračevanja približno  $4 \text{ h}^{-1}$ . V primeru stopnje prezračevanja  $0,6 \text{ h}^{-1}$  pa lahko koncentracije dosežejo tudi 5000 ppm. S temi rezultati se ujemajo rezultati simulacij, kar je razvidno na grafikonu 6, saj so koncentracije ogljikovega dioksida pod 1000 ppm v primeru, ko je stopnja prezračevanja večja od  $4 \text{ h}^{-1}$ . Prav tako se ujemajo rezultati glede povezave med stopnjo prezračevanja in koncentracijo ogljikovega dioksida. Prišli smo do ugotovitve, da koncentracije ogljikovega dioksida eksponentno upadajo z naraščanjem stopnje prezračevanja. Do teh ugotovitev so prišli prav tako Dorizas et al. [48]. Z izvajanjem meritev v naravno prezračevanih učilnicah so prišli do ugotovitev, da so koncentracije ogljikovega dioksida 50 % časa višje od 1000 ppm ter so dosegle vrednosti do 3600 ppm. Izračunana stopnja prezračevanja se je gibala med  $0,47 \text{ h}^{-1}$  in  $1,45 \text{ h}^{-1}$ . Tudi v primeru naših meritev izbranega prostora so se koncentracije večino časa gibale nad 1000 ppm. V primeru, ko so bila okna večino časa zaprta, pa so narasle čez 2000 ppm. Rezultati simulacij se prav tako ujemajo z ugotovitvami, da mora biti za ohranjanje koncentracij ogljikovega dioksida pod 1000 ppm minimalna stopnja prezračevanja  $3,5 \text{ h}^{-1}$ . Z zgoraj naštetimi rezultati lahko potrdimo, da predpisana stopnja prezračevanja  $0,5 \text{ h}^{-1}$  po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], v primeru prostorov kot so učilnice, predavalnice, kjer je gostota ljudi velika, ne zadostuje za zagotavljanje kakovosti notranjega zraka. Iz rezultatov simulacij smo ugotovili, da so koncentracije ogljikovega dioksida najmanjše v primeru, ko je količina dovedenega zunanjega zraka izračunana iz priporočene količine zunanjega zraka na osebo, ki jo določa Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11]. V tem primeru so koncentracije ogljikovega dioksida manjše kot največja dovoljena vrednost 1667 ppm po nacionalni zakonodaji. Te rezultate smo potrdili z dobljenimi rezultati v testnem prostoru, ki so prikazani v preglednici 25.

Glede na ugotovitve raziskovalcev o vplivu koncentracij ogljikovega dioksida na človeka pa bi le te morale biti manjše tudi od 1667 ppm. Ugotovitev, da so rezultati testov kognitivne učinkovitosti za 50 % slabši v primeru 1400 ppm glede na 550 ppm, je zaskrbljujoča, saj imajo koncentracije, ki so v mejah dovoljenih vrednosti, vpliv na naše razmišljanje. Takšen vpliv pa nimajo koncentracije ogljikovega dioksida le na odrasle, še večji vpliv imajo na otroke. Vplivajo na njihovo budnost in pozornost, težje se koncentrirajo na navodila učitelja. Če se navežemo

na rezultate meritev, lahko vidimo, da so bile koncentracije ogljikovega dioksida tekom zasedenosti testnega prostora ves čas prevelike v smislu vpliva na človeka. Osebe v prostoru tega zavestno niso zaznale in posledično niso izvedle ukrepov za prezračevanje. Pomembno je, da ohranjamo kakovostno notranje okolje, ki ne zadostuje samo predpisanim vrednostim, ampak je od njih nižja. S povečanjem stopnje prezračevanja smo ljudje boljši in hitrejši predvsem v reševanju testov odštevanja, množenja, logičnega razmišljanja, branja in razumevanja. Zato je pomembno, da vsem omogočimo kakovostno notranje okolje.

Koncentracije ogljikovega dioksida v notranjem okolju pa nimajo vpliva samo na naše razmišljanje, temveč tudi na zdravje ljudi, ki se v tem prostoru nahajajo, predvsem glede na simptome sindroma bolnih stavb. Raziskave so pokazale, da imajo na zdravje že vpliv koncentracije ogljikovega dioksida, ki so večje od 1000 ppm. Če pa so notranje koncentracije za 1000 ppm večje kot zunanje, se odsotnost učencev od pouka poveča za deset do dvajset odstotkov na letni ravni. Ugotovili so tudi, da so k simptomom sindroma bolnih stavb bolj nagnjene osebe ženskega spola. Pomembno je torej, da izpolnjujemo zahteve za prezračevanje in v primeru naravnega prezračevanja redno zračimo. Magnituda zmanjšanja simptomov je namreč odvisna od magnitude povečanja stopnje prezračevanja, izboljšanja učinkovitosti prezračevanja ter zmanjšanja virov povzročiteljev sindroma bolnih stavb.

Z rezultati simulacij smo torej ugotovili, da predpisana stopnja prezračevanja  $0,5 \text{ h}^{-1}$  po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], ne zadostuje za ohranjanje koncentracij ogljikovega dioksida pod predpisano največjo dovoljeno vrednostjo. Te rezultate smo verificirali z izvedenimi meritvami v testnem prostoru, saj smo prišli do enake ugotovitve, ki je prikazana v preglednici 25. Prav tako pa so do podobnih ugotovitev v svoji raziskavi prišli Dovjak et al. [10]. Za zagotovitev kvalitetnega notranjega okolja bi morali pri načrtovanju mehanskega prezračevanja upoštevati priporočene količine zunanjega zraka na osebo. Še vedno pa predstavlja problem naravno prezračevanje, kjer je edini ukrep prezračevanja odpiranje oken. Z izvedbo meritev v testnem prostoru smo ugotovili, da so osebe prostor kljub dobljenim rezultatom prezračevale, vendar prezračevanje ni bilo zadostno. Ko je bila učilnica 68 % zasedena in je bilo odprto le okno 18, se koncentracije ogljikovega dioksida niso zmanjševale, saj stopnja prezračevanja ni bila dovolj velika. Koncentracije so začele padati šele po tem, ko so se odprla vrata. Prav tako smo ugotovili, da ne zadostuje samo prezračevanje v času, ko prostor ni zaseden, saj nato v času zasedenosti prostora koncentracije ogljikovega dioksida strmo narastejo. Prezračevanje bi bilo torej potrebno tudi v času zasedenosti prostora. Le to pa mora biti zadostno. Ker osebe v prostorih, ki so naravno prezračevani, po navadi nezadostno prezračujejo prostor, bi bilo potrebno izvesti določene ukrepe, ki bi jih na to opozarjale. Ljudje zaznamo namreč zrak kot slab, ko so

koncentracije ogljikovega dioksida že zelo visoke in šele takrat odpremo okno. Zato je pomembno, da se ljudi opozori, da je potrebno prostor prezračiti ter za koliko časa. Priporočila za izvajanje ukrepov v primeru naravnega prezračevanja so podali raziskovalci na podlagi rezultatov njihovih raziskav. Glede na njihove predloge, rezultate simulacij in verifikacijo le teh v testnem prostoru so v nadaljevanju predstavljeni ukrepi, ki bi pomagali k izboljšanju kakovosti notranjega okolja v izbranem prostoru. Eden izmed ukrepov, ki je zelo pomemben, je ta, da bi bilo potrebno imeti dnevne rutine odpiranja oken. Za primer učilnice bi bilo na primer obvezno odpiranje oken med odmori. Ker so rezultati meritev v testnem prostoru pokazali, da odpiranje med nezasedenostjo prostora ni vedno zadostno, bi bilo smiselno prostore opremiti s senzorjem ogljikovega dioksida, ki bi osebe v prostoru opozoril na previsoke koncentracije in na potrebo zračenja prostora. Učinkovitost takšnega ukrepa so potrdili raziskovalci Wargocki et al. [50], saj so bile v primeru, ko je bil prostor brez nameščenega senzorja, koncentracije ogljikovega dioksida opazno višje, in sicer med 1400 ppm in 180 ppm. Kot mejno vrednost na senzorju pa so definirali 1000 ppm. Ta mejna vrednost bi morala biti upoštevana tudi v našem okolju, saj smo ugotovili, da z največjo dovoljeno vrednostjo po nacionalni zakonodaji ne zadostimo negativnim vplivom, ki jih imajo povečane koncentracije ogljikovega dioksida na kognitivno učinkovitost ter zdravje človeka. Ker pa odpiranje oken, predvsem v hladnih mesecih, povzroči nelagodje v prostoru zaradi hladu in prepiha, bi bilo dobro, da se v prostorih zagotovi dodatno prezračevanje. Takšen primer so lokalni prezračevalni sistemi. Z njimi bi lahko zagotovili, da bi bilo notranje okolje ves čas kakovostno, saj bi ohranjali koncentracije ogljikovega dioksida v mejah željenih vrednosti.

## 7 ZAKLJUČEK

Kakovost notranjega zraka je zelo pomemben parameter, ki mora biti zagotovljen v notranjem okolju. S sistematičnim pregledom študij na tematiko kakovosti notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah in pisarnah smo ugotovili, da je kakovost notranjega zraka velikokrat neprimerna in da koncentracije ogljikovega dioksida v notranjem okolju presegajo zahtevane in priporočene mejne vrednosti. Potrdili smo hipotezo, da imajo povečane koncentracije ogljikovega dioksida vpliv na storilnost ljudi, bodisi učencev v šolah ali zaposlenih v pisarnah, kar je dokazalo mnogo študij. Pomembna je tudi ugotovitev, da imajo vpliv na storilnost koncentracije ogljikovega dioksida, ki se zagotovo pojavljajo vsakodnevno in so v dovoljenih mejah slovenske zakonodaje, kar znaša 1667 ppm. Zato bi morale biti dovoljene koncentracije ogljikovega dioksida še manjše od te vrednosti. Zdravje oseb v prostoru je prav tako odvisno od kakovosti notranjega zraka. Rezultati študij so namreč dokazali, da obstaja povezava med stopnjo prezračevanja oziroma koncentracijo ogljikovega dioksida v prostoru in simptomi sindroma bolnih stavb. Ker ima kakovost notranjega zraka vpliv na zdravje, so ljudje posledično odsotni od pouka ali dela. S povečanjem koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem okolju za 1000 ppm, glede na koncentracije zunaj, se poveča odsotnost za deset do dvajset odstotkov na letni ravni. To predstavlja težavo učencem pri pouku zaradi njihove odsotnosti ter tudi staršem iz ekonomskega vidika. Prav tako ima negativne posledice za podjetja, če so njihovi zaposleni odsotni.

Z izvedenimi simulacijami za primer učilnice, pisarne in predavalnice smo ugotovili, kako različna stopnja prezračevanja, na podlagi podatkov iz Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], vpliva na koncentracijo ogljikovega dioksida v teh notranjih okoljih. Prišli smo do ugotovitve, da z večanjem stopnje prezračevanja koncentracija ogljikovega dioksida eksponentno pada. Z dobljenimi rezultati smo potrdili hipotezo, da vse podane vrednosti za količino dovedenega zunanjega zraka iz Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], ne zadoščajo vedno zahtevanim in priporočenim vrednostnim koncentracij ogljikovega dioksida v notranjem okolju. Stopnja prezračevanja  $0,5 \text{ h}^{-1}$ , ki je predpisana v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], ne zadostuje v primerih, kjer se v prostoru z manjšim volumnom nahaja več oseb. Takšen primer so učilnice in predavalnice. Za doseganje kakovostnega notranjega zraka z nizkimi koncentracijami ogljikovega dioksida, kjer je vpliv na storilnosti in zdravje oseb v prostoru najmanjši, se bi za izračun dovedene količine zunanjega zraka morala uporabljati priporočena količina zunanjega zraka, ki znaša  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  na osebo.

Z rezultati, dobljenimi v testnem prostoru, smo verificirali rezultate simulacij. Potrdili smo, da minimalna predpisana stopnja prezračevanja po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], ki znaša  $0,5 \text{ h}^{-1}$ , ne zadošča za zagotovitev kakovosti notranjega zraka. Koncentracije ogljikovega dioksida so namreč v tem primeru višje od največje dovoljene vrednosti 1667 ppm, predpisane v istem pravilniku [11]. Testni prostor ni bil nikoli maksimalno zaseden, a le v primeru 11 % zasedenosti bi zadostovala stopnja prezračevanja manjša od  $0,5 \text{ h}^{-1}$ , da bi bila koncentracija ogljikovega dioksida manjša od 1667 ppm. Prav tako lahko rezultate simulacij potrdimo z izračunano povprečno dovedeno zunanjo količino zraka na osebo za testni prostor, ki se ujema glede na dobljene rezultate koncentracije ogljikovega dioksida v primeru simulacij.

Z dobljenimi rezultati tega magistrskega dela smo prišli do zaključka, da je zagotovitev kakovostnega notranjega zraka nujno potrebna. Za izračun potrebne količine dovedenega zunanjega zraka bi morali upoštevati priporočeno količino zunanjega zraka  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  na osebo. S to priporočeno vrednostjo namreč zagotovimo, da so koncentracije ogljikovega dioksida v mejah, ki zagotavljajo najmanjši vpliv na kognitivno učinkovitost, storilnost in zdravje ljudi. Prav zaradi tega, ker trenutna največja dovoljena vrednost koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru, predpisana po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr. [11], 1667 ppm tega ne zagotovi, bi morala biti ta mejna vrednost manjša. Glede na pregled študij priporočamo mejno vrednost, ki ne presega 1000 ppm. Nekateri standardi pa priporočajo še celo nižjo vrednost. Ker je zagotavljanje ohranjanja koncentracij ogljikovega dioksida v mejnih vrednostih oteženo v primeru naravnega prezračevanja, podajamo kot predlog nameščanje senzorjev ogljikovega dioksida v prostore, ki bi opozarjali, da je mejna vrednost prekoračena in da so potrebni ukrepi prezračevanja. Z namestitvijo lokalnega prezračevalnega sistema bi zagotovili, da bi bilo notranje okolje ves čas kakovostno, saj bi ohranjali koncentracije ogljikovega dioksida v mejah željenih vrednosti. Najpomembneje pa je, da postanejo ljudje bolj osveščeni o tem, kako pomembna je kakovost notranjega zraka.

## VIRI

- [1] ASHRAE Guideline 10-2016. Interactions Affecting the Achievement of Acceptable Indoor Environments.
- [2] Cincinelli, A., Martellini, T. 2017. Indoor Air Quality and Health. *International journal of environmental research and public health*. 14, 11: 1286.  
[doi.org/10.3390/ijerph14111286](https://doi.org/10.3390/ijerph14111286)
- [3] Daisey, JM., Angell, WJ., Apte, MG. 2003. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor Air*. 13, 1: 53-64.  
[doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00153.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00153.x)
- [4] Smedje, G., Norbäck, D. 2000. New Ventilation Systems at Select Schools in Sweden – Effects on Asthma and Exposure. *Environmental Health*. 55, 1: 18-25.  
[doi.org/10.1080/00039890009603380](https://doi.org/10.1080/00039890009603380)
- [5] Lahtinen, M., Sundman-Digert, C., Reijula, K. 2004. Psychosocial work environment and indoor air problems: a questionnaire as a means of problem diagnosis. *Occupational and Environmental Medicine*. 61, 2: 143-9.  
[doi.org/10.1136/oem.2002.005835](https://doi.org/10.1136/oem.2002.005835)
- [6] Wargocki, P., Wyon, D. P., Baik, Y., Clausen, G., Ole Fanger, P. 2004. Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity in an Office with Two Different Pollution Loads. *Indoor Air*. 9, 3: 165-79.  
[doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.t01-1-00003.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.t01-1-00003.x)
- [7] Lukcsó, D., Lamont Guidotti, T., Franklin, D. E., Burt, A. 2016. Indoor environmental and air quality characteristics, building-related health symptoms, and worker productivity in a federal government building complex. *Environmental and Occupational Health*. 71, 2: 85-101.  
[doi.org/10.1080/19338244.2014.965246](https://doi.org/10.1080/19338244.2014.965246)
- [8] Wyon, D. P. 2004. The effects of indoor air quality on performance and productivity. *Indoor Air*. 14, 7: 92-101.  
[doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00278.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00278.x)

- [9] Wargocki, P., Wyon, D. P. 2007. The Effects of Outdoor Air Supply Rate and Supply Air Filter Condition in Classrooms on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257). HVAC & R Research. 13, 2: 165-191.
- [10] Dovjak, M., Slobodnik, J., Krainer, A. 2019. Deteriorated indoor environmental quality as a collateral damage of present day extensive renovations. Strojniški vestnik. 65, 1: 31-40  
[doi:10.5545/sv-jme.2018.5384](https://doi.org/10.5545/sv-jme.2018.5384)
- [11] Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb. Uradni list RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ.
- [12] Dovjak, M., Kuček, A. 2019. Creating Healthy and Sustainable Buildings. Ljubljana, The Springer: 61-63.  
[doi.org/10.1007/978-3-030-19412-3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19412-3)
- [13] Valenčič, M. 2012. Kakovost zraka v stavbah. Energetika, gospodarstvo in ekologija. 4: 132-134.
- [14] Gričar, P., Novak, P. 1994. Kakovost zraka v poslopih – Vzroki za nastale težave in njihovo odpravljanje. Strojniški vestnik. 40, 3-4: 127-143.
- [15] Butala, V. 1997. Kakovost zraka v prostoru – vzrok za zamenjavo toplovodnega s toplozračnim sistemom ogrevanja. Strojniški vestnik. 43, 1-2: 42-56.
- [16] Prek, M. 2013. Kakovost zraka. Laboratorij za ogrevalno, sanitarno in solarno tehniko ter klimatizacijo.  
<http://lab.fs.uni-lj.si/los1/wp-content/uploads/notranje-okolje/kakovost-zraka-objava.pdf>  
(Pridobljeno, 22.5.2019)
- [17] Alrazni, W. 2016. Improving Indoor Air Quality (IAQ) in Kuwaiti Housing Developments at Design, Construction, and Occupancy Stages. Doktorska disertacija. Salford, University of Salford, College of Science and Technology (samozaložba W. Alrazni).
- [18] Lenassi, P. 2017. Kakovost zraka v prostoru. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo (samozaložba P. Lenassi).

[19] United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2016. An introduction to Indoor Air Quality.

<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>

(Pridobljeno, 22.5.2019)

[20] Wechler, C. J. 2009. Changes in indoor pollutants since the 1950s. Atmospheric Environment. 43, 1: 153-169.

[doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.044](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.044)

[21] Fanger, P. O. 1988. Olf and decipol: New units for perceived air quality. Building Services Engineering Research and Technology. 9, 4: 155-157.

[22] Ogljikov dioksid. 2007. Istrabenz plini.

[http://www.istrabenzplini.si/sl/products.cp2?cid=0F295B2F-C8F7-F902-0F39-](http://www.istrabenzplini.si/sl/products.cp2?cid=0F295B2F-C8F7-F902-0F39-60922B1FF03E&linkid=progases)

[60922B1FF03E&linkid=progases](http://www.istrabenzplini.si/sl/products.cp2?cid=0F295B2F-C8F7-F902-0F39-60922B1FF03E&linkid=progases) (Pridobljeno, 22.5.2019)

[23] Splošni podatki o ogljikovem dioksidu. 2019. Messer.

<https://www.messer.si/ogljikov-dioksid> (Pridobljeno, 22.5.2019)

[24] Priročnik o varčnosti porabe goriva, emisijah CO<sub>2</sub> in emisijah onesnaževal zunanjega zraka novih osebnih avtomobilov. 2014. Ministrstvo za okolje in prostor.

[http://mop.arhiv-](http://mop.arhiv-spletisc.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/podnebne_spremembe/prirocnik_co2_onesnazevala.pdf)

[spletisc.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/podnebne\\_spremembe/prirocnik\\_co2\\_onesnazevala.pdf](http://mop.arhiv-spletisc.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/podnebne_spremembe/prirocnik_co2_onesnazevala.pdf) (Pridobljeno, 22.5.2019)

[25] Izpusti toplogrednih plinov po glavnih kategorijah plinov v Sloveniji, 1986-2012. 2014. Agencija Republike Slovenije za okolje.

<http://kazalci.arso.gov.si/sl/content/izpusti-toplogrednih-plinov-5> (Pridobljeno, 22.5.2019)

[26] Global CO<sub>2</sub> levels.

<https://www.co2levels.org/> (Pridobljeno, 22.5.2019)

[27] Kandare, F. 1992. Fiziologija dihanja. Obzornik zdravstvene nege. 26, 3/4: 131-135.

[28] Godec, G., Grubelnik, L., Glažar, S. 2016. Celično dihanje in dihanje se razlikujeta.

<http://eucbeniki.sio.si/nar6/1542/index2.html> (Pridobljeno, 22.5.2019)

[29] De Gids, W. F. 2010. CO<sub>2</sub> as indicator for the indoor air quality. Air Infiltration and Ventilation Centre.

[https://www.aivc.org/sites/default/files/members\\_area/medias/pdf/VIP/VIP%2033\\_CO2%20General.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/VIP/VIP%2033_CO2%20General.pdf) (Pridobljeno, 22.5.2019)

[30] Orimadegun, A. E., Omisanjo, A. O. 2014. Evaluation of Five Formulae for Estimating Body Surface Area of Nigerian Children. Annals of Medical & Health Sciences Research. 4, 6: 889-898.

[doi:10.4103/2141-9248.144907](https://doi.org/10.4103/2141-9248.144907)

[31] Von Pettenkofer, M. 1858. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. München, Der J. G. Gotta'schen Buchhandlung.

[https://archive.org/details/bub\\_gb\\_3aFLAAAcAAJ/page/n95](https://archive.org/details/bub_gb_3aFLAAAcAAJ/page/n95) (Pridobljeno, 22.5.2019)

[32] Bilban, M., Rejc, T., Dovjak, M., Kušec, A. 2017. Sindrom bolnih stavb in bolezni, povezane z bivanjem v grajenem okolju: opredelitev učinkov na zdravje in dejavnikov tveganja. Delo in varnost. 5, 29-44

[33] Kušec, A., Dovjak, M. 2014. Prevention and control of Sick Building Syndrome (SBS). Part 1: Identification of risk factors. International Journal of Sanitary Engineering Research. 8, 1: 16-40.

[34] Dovjak, M., Kušec, A. 2014. Prevention and control of sick building syndrome (SBS). Part 2, Design of a preventive and control strategy to lower the occurrence of SBS. International Journal of Sanitary Engineering Research. 1, 8: 41-55.

[35] Brooks, B. O., Davis, W. F. 1992. Understanding Indoor Air Quality. London, CRC Press: 11 str.

[https://books.google.si/books?printsec=frontcover&vid=LCCN91020451&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.si/books?printsec=frontcover&vid=LCCN91020451&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (Pridobljeno, 22.5.2019)

[36] Atkinson, J., Chartier, Y., Pessoa-Silva, C. L., Jensen, P., Li, Y., Seto, W. H. 2009. Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings. Geneva, World Health Organization: 7-12 str.

[https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143284/pdf/Bookshelf\\_NBK143284.pdf](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143284/pdf/Bookshelf_NBK143284.pdf) (Pridobljeno, 18.6.2019)

- [37] SIST CR 1752:1999. Prezračevanje zgradb – Merila za projektiranje notranjega okolja.
- [38] SIST DIN 1946-6:1998. Prezračevanje – 6.del: Prezračevanje stanovanj.
- [39] SIST ISO 7730:2006. Ergonomija toplotnega okolja – Analitično ugotavljanje in interpretacija toplotnega ugodja z izračunom PMV in PPD vrednosti ter merili za lokalno toplotno ugodje.
- [40] Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih. Uradni list RS, št. 89/99, 39/05 in 43/11 – ZVZD-1.
- [41] Finish Society of Indoor Air Quality and Climate. 2019. Classification of Indoor Environment 2018. Espoo, FISIAQ.
- [42] ANSI/ASHRAE Standard 62.1:2013. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
- [43] Welch, V., Petticrew, M., Petkovic, J., Moher, D., Waters, E., White, H., Tugwell, P. 2016. Extending the PRISMA statement to equity-focused systematic reviews (PRISMA-E 2012): explanation and elaboration. Journal of Clinical Epidemiology. 70, 68-89.  
[doi.org/10.1016/j.jclinepi.2015.09.001](https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2015.09.001)
- [44] SIST EN ISO 8996:2005. Ergonomija toplotnega okolja – Ugotavljanje presnovne toplote.
- [45] Plestenjak, M., Urbanc, J. 2007. Navodila za graditev osnovnih šol v Republiki Sloveniji. Ljubljana, Ministrstvo za šolstvo in šport Republike Slovenije.  
[https://www.zaps.si/img/admin/file/WWW%20ZAPS/ARH%203\\_2/3\\_2\\_1\\_%20Navodila%20za%20graditev%20osnovnih%20sol%20v%20Republiki%20Sloveniji%201-del.pdf](https://www.zaps.si/img/admin/file/WWW%20ZAPS/ARH%203_2/3_2_1_%20Navodila%20za%20graditev%20osnovnih%20sol%20v%20Republiki%20Sloveniji%201-del.pdf)  
(Pridobljeno, 18.6.2019)
- [46] Šelekar, N. 2019. Fotografije in izrisi izdelani za potrebe magistrskega dela.
- [47] Bako-Biro, Zs., Clements-Croome, D. J., Kochhar, N., Awbi, H. B., Williams, M. J. 2012. Ventilation rates in schools and pupils' performance. Building and Environment. 48, 215-223.  
[doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018)

[48] Dorizas, P. V., Assimakopoulos, M. N., Helmis, C., Santamouris, M. 2015. An intergrated evaluation study of the ventilation rate, the exsposure and the indoor air quality in naturally ventilated classrooms in the Mediterranean region during spring. *Science of the Total Environment*. 502, 557-570.

[doi:10.1016/j.scitotenv.2014.09.060](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.060).

[49] Turanjanin, V., Vučićević, B., Jovanović, M., Mirkov, N., Lazović, I. 2014. Indoor CO<sub>2</sub> measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation. *Energy*. 77, 290-296.

[doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.028](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.028)

[50] Wargocki, P., Da Silva, F. 2015. Use of visual CO<sub>2</sub> feedback as a retrofit solution for improving air quality in naturally ventilated classrooms. *Indoor Air*. 25, 1: 105-14.

[doi:10.1111/ina.12119](https://doi.org/10.1111/ina.12119)

[51] Krawczyk, D. A., Wadolowska, B. 2018. Analysis of indoor air parameters in an education building. *Energy Procedia*. 147, 96-103.

[doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.038](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.038)

[52] Bako-Biro, Zs., Kochhar, N., Clements-Croome, D. J., Awbi, H. B., Williams, M. 2007. Ventilation Rates in Schools and Learning Performance. V: *Proceedings of CLIMA 2007 – WellBeing Indoors, The 9th REHVA World Congress, Helsinki, Junij 10-14, 2007*.

[53] Johnson, D. L., Lynch, R. A., Floyd, E. L., Wang, J., Bartels, J. N. 2018. Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modeling in urban elementary schools. *Building and Environment*. 136, 185-197.

[doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.040](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.040)

[54] Simanic, B., Nordquist, B., Bagge, H., Johansson, D. 2019. Indoor air temperatures, CO<sub>2</sub> concentrations and ventilation rates: Long-term measurements in newly built low-energy schools in Sweden. *Journal of Building Engineering*. 25.

[doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100827](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100827)

[55] Emmerich, S. 2006. Simulated performance of natural and hybrid ventilation systems in an office building. *HVAC & R Research*. 12, 4: 975-1004.

[doi:10.1080/10789669.2006.10391447](https://doi.org/10.1080/10789669.2006.10391447)

[56] Što su kognitivne funkcije. 2015.

<https://alzheimerova-bolest.blogspot.si/2015/12/sto-su-kognitivne-funkcije.html> (Pridobljeno, 18.6.2019)

[57] Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, Fisk, W. J. 2012. Is CO<sub>2</sub> an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO<sub>2</sub> Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*. 120, 12: 1671-1677.

[doi:10.1289/ehp.1104789](https://doi.org/10.1289/ehp.1104789)

[58] Koskela, H., Maula, H., Haapakangas, A. Moberg, V., Hongisto, V. 2014. Effect of low ventilation rate on office work performance and perception of fair Quality – A laboratory study. V: *Indoor Air 2014, 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Hong Kong, Julij 7-12, 2014.

[59] Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., Spengler, J. D. 2016. Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers. *Environmental Health Perspectives*. 124, 6: 805-12.

[doi:10.1289/ehp.1510037](https://doi.org/10.1289/ehp.1510037)

[60] Bako-Biro, Zs., Clements-Croome, D. J., Kochhar, N., Awbi, H. B., Williams, M. J. 2011. Ventilation rates in schools and pupils' performance. *Building and Environment*. 48, 215-223.

[doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018)

[61] Wargocki, P., Wyon, D. P. 2006. The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on performance of school work by children. *HVAC & R Research*. 13, 2: 165-191.

[62] Haverinen-Shaughnessy, U., Shaughnessy, R. J. 2015. Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students' Test Scores. *PLoS One*. 10, 8.

[doi:10.1371/journal.pone.0136165](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136165)

[63] Shaughnessy, R., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A., Moschandreas, D. 2005. Carbon Dioxide concentrations in classrooms and association with student performance: A preliminary study. *Indoor Air*. 1, 465-468.

[64] Coley, D. A., Greeves, R., Saxby, B. K. 2007. The Effect of Low Ventilation Rates on the Cognitive Function of a Primary School Class. *International Journal of Ventilation*. 6, 2: 107-112.

[doi.org/10.1080/14733315.2007.11683770](https://doi.org/10.1080/14733315.2007.11683770)

[65] Ahmed, R. J., Mumovic, D., Ucci, M. 2017. The Effect of Indoor Temperature and CO<sub>2</sub> Levels on Cognitive Performance of Adult Females in a University Building in Saudi Arabia. *Energy Procedia*. 122, 451-456.

[doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.378](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.378)

[66] Jaakkola, J. J., Miettinen, P. 1995. Ventilation rate in office buildings and sick building syndrome. *Occupational and Environmental Medicine*. 52, 11: 709-714.

[doi:10.1136/oem.52.11.709](https://doi.org/10.1136/oem.52.11.709)

[67] Apte, M. G., Erdmann, C. A. 2002. Indoor carbon dioxide concentrations, VOCs, environmental sensitivity association with mucous membrane and lower respiratory sick building syndrome symptoms in the base study: Analysis of the 100 building dataset. *Indoor Environment Group*.

[doi:10.2172/806126](https://doi.org/10.2172/806126)

[68] Lu, C. Y., Lin, J. M., Chen, Y. Y., Chen, Y. C. 2015. Building-Related Symptoms among Office Employees Associated with Indoor Carbon Dioxide and Total Volatile Organic Compounds. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 12, 6: 5833-45.

[doi: 10.3390/ijerph120605833](https://doi.org/10.3390/ijerph120605833)

[69] Simoni, M., Annesi-Maesano, I., Sigsgaard, T., Norback, D., Wieslander, G., Nystad, W., Canciani, M., Sestini, P., Viegi, G. 2010. School air quality related to dry cough, rhinitis, and nasal patency in children. *European Respiratory Society*. 35, 4: 742-9.

[doi:10.1183/09031936.00016309](https://doi.org/10.1183/09031936.00016309)

[70] Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., Faulkner, D. 2004. Associations Between Classroom CO<sub>2</sub> Concentrations and Student Attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*. 14, 5: 333-41.

[doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x)

[71] Mendell, M. J., Eliseeva, E. A., Davies, M. M., Spears, M., Lobscheid, A., Fisk, W. J., Apte. 2013. Association of Classroom Ventilation with Reduced Illness Absence: A Prospective Study in California Elementary Schools. *Indoor Air*. 23, 6: 515-28.

doi: 10.1111/ina.12042

[72] Gaihe, S., Semple, S., Miller, J., Fielding, S., Turner, S. 2014. Classroom Carbon Dioxide Concentration, School Attendance, and Educational Attainment. *Journal of School Health*. 84, 9: 569-74.

doi: 10.1111/josh.12183