



Gibanje MLADI RAZISKOVALCI KOROŠKE

Področje: Ekologija z varstvom okolja

OGLJIKOV DIOKSID V UČILNICAH IN KORISTNOST PREZRAČEVANJA Z VRAČANJEM TOPLOTE

Avtor: Anja Mravlak

Mentorja: mag. Peter Sekolonik, Alojz Roter, inž.

2021, Ravne na Koroškem

ŠC Ravne na Koroškem – Gimnazija, Na Gradu 4

KAZALO VSEBINE

1.	UVOD	8
2.	ZRAK V PROSTORIH	9
2.1	VPLIVI KAKOVOSTI ZRAKA NA ZDRAVJE.....	9
2.2	ONESNAŽILA V ZRAKU	10
3.	POTREBNE KOLIČINE ZRAKA ZA PREZRAČEVANJE.....	11
4.	OGLJIKOV DIOKSID V UČILNICAH	13
4.1	KOLIKO CO ₂ ODDA OSEBA NA URO	15
4.2	NARAŠČANJE VSEBNOSTI CO ₂ BREZ ZRAČENJA – RAČUNSKI MODEL.....	15
4.3	SPREMINJANJE VSEBNOSTI CO ₂ Z ZRAČENJEM – RAČUNSKI MODEL.....	17
4.3.1	ZRAČENJE Z ODPIRANJEM OKEN MED ODMOROM	17
4.3.2	ZRAČENJE S PREZRAČEVALNO NAPRAVO.....	19
5.	MERJENJE VSEBNOSTI CO ₂	23
5.1	OPIS MERILNIKOV IN MERJENJA.....	23
5.2	PRIMERI MERITEV.....	26
5.2.1	Brez prezračevanja	27
5.2.2	S prezračevanjem	29
6.	ENERGIJSKE IZGUBE PRI PREZRAČEVANJU	34
6.1	ENTALPIJA IN SPECIFIČNA ENTALPIJA.....	34
6.1.1	Entalpija vlažnega zraka	35
6.2	PREZRAČEVALNA NAPRAVA Z VRAČANJEM TOPLOTE.....	36
6.2.1	IZKORISTEK PREZRAČEVALNE NAPRAVE	37
6.2.2	PREZRAČEVALNA NAPRAVA NA GIMNAZIJI RAVNE	39
6.3	MERJENJE IZKORISTKA TOPLOTNEGA IZMENJEVALNIKA ETA 2400	40
6.3.1	Merilni sistem za merjenje temperature in vlažnosti	40
6.3.2	Primeri meritev.....	42
7.	OCENA ENERGIJSKIH IZGUB PRI PREZRAČEVANJU	46

8. ZAKLJUČEK	50
9. VIRI IN LITERATURA	52
10. PRILOGE - PROGRAMI.....	53

KAZALO SLIK

Slika 1: Naraščanje vsebnosti CO ₂ v prostoru brez zračenja	16
Slika 2: Potrebna prostornina zamenjanega zraka v odmoru za 20 dijakov	19
Slika 3: Prezračevanje s prezračevalno napravo	19
Slika 4: Potreben pretok zraka za doseganje stalne vsebnosti CO ₂ na osebo.....	21
Slika 5: Časovno spreminjanje vsebnosti CO ₂ za podatke v tabeli 2 za primer s prezračevanjem	22
Slika 6: Delovanje NDIR merilnika	23
Slika 7: NDIR CO ₂ sensor MH-Z14A (vir: https://www.winsen-sensor.com/).....	23
Slika 8: Merilni sistem	24
Slika 9: Merjenje ogljikovega dioksida in temperature.....	24
Slika 10: Mikrokrmilnik.....	25
Slika 11: Primer shranjenih podatkov na spletni strani ThingSpeak.com	25
Slika 12: Primer meritve vsebnosti ogljikovega dioksida v učilnici 37	26
Slika 13: Primerjava merskih rezultatov z modelom za primer brez prezračevanja.....	27
Slika 14: Primerjava vsebnosti CO ₂ na različnih višinah za primer brez prezračevanja	28
Slika 15: Primer meritve vsebnosti ogljikovega dioksida (povprečna vrednost) 11. marca v učilnici 37.....	29
Slika 16: Primer meritve za 11. marec v učilnici 37	30
Slika 17: Primerjava merskih rezultatov z modelom za pouk angleščine 9. marca	31
Slika 18: Primerjava merskih rezultatov z modelom za prazno učilnico	32
Slika 19: Primerjava merskih rezultatov z modelom za pouk zgodovine 11. marca.....	33
Slika 20: Prezračevalna naprava na gimnaziji Ravne na Koroškem.....	37
Slika 21: Shema prezračevanja z vračanjem toplote.....	37
Slika 22: Toplotni izmenjevalnik ETA 2400 F 16 (Vir: ruck.eu)	39
Slika 23: Merilnik SHT 31-D (Vir: reichelt.de)	40
Slika 24: Merilni sistem za merjenje vlažnosti in temperature	41

Slika 25: Senzorja za pritekajoči in odtekajoči zrak	41
Slika 26: Temperature zraka na vstopu in izstopu iz toplotnega izmenjevalnika	42
Slika 27: Relativna vlažnost zraka na vstopu in izstopu iz toplotnega izmenjevalnika	43
Slika 28: Izkoristek prezračevalne naprave za 8. marec	43
Slika 29: Temperature zraka na vstopu in izstopu iz toplotnega izmenjevalnika	44
Slika 30: Relativna vlažnost zraka na vstopu in izstopu iz toplotnega izmenjevalnika	45
Slika 31: Izkoristek prezračevalne naprave za 11. marec	45
Slika 32: Izmenjava zraka	46

KAZALO TABEL

Tabela 1: Potrebna izmenjava zraka ($\text{m}^3/\text{šolsko uro}$) za 20 dijakov	18
Tabela 2: Podatki za primer izračuna časovnega spreminjanja vsebnosti CO_2	22
Tabela 3: Podatki za meritev vsebnosti ogljikovega dioksida v učilnici 37 brez zračenja	27
Tabela 4: Podatki za meritev 9. marca pri angleščini	31
Tabela 5: Podatki za meritev 9. marca za prazno učilnico	32
Tabela 6: Podatki za meritev 11. marca pri zgodovini	33
Tabela 7: Osnovni podatki toplotnih izmenjevalnikov ETA 2400 F 16	39
Tabela 8: Podatki za računanje izgub zaradi prezračevanja	46

ZAHVALA

Zahvaljujem se profesorju Petru Sekoloniku za vso pomoč, nasvete in spodbudo pri izdelavi naloge, prav tako se zahvaljujem laborantu za fiziko Alojzu Roterju, za pomoč pri izdelavi merilnih sistemov.

POVZETEK

Ustrezno prezračevanje zaprtih prostorov je pomembno za zdravje in dobro počutje ljudi, še posebej v zimskih mesecih pa je povezano tudi s porabo energije, saj so lahko toplotne izgube zaradi neustreznega prezračevanja velike.

V prvem delu naloge nas je zanimalo, koliko ogljikovega dioksida izdihajo dijaki pri šolskem delu in kakšna so priporočila za prezračevanje učilnic. Izdelali smo merilni sistem za merjenje ogljikovega dioksida in temperature, s katerim smo v učilnici več dni spremljali vrednosti obeh količin pri različnih načinih prezračevanja. Primerjali smo učinkovitost izmenjave zraka v prostoru z odpiranjem oken in s prezračevalno napravo ter ugotovili, da je slednja učinkovitejša, saj lahko le s stalnim pretokom zraka v razredu zagotovimo primerno kvaliteto zraka.

V drugem delu naloge smo se osredotočili na učinkovitost prezračevalne naprave z vračanjem toplote, saj je njena koristnost močno povezana s porabo oz. domnevnim prihrankom energije. Izdelali smo še drugi merilni sistem za merjenje temperature in relativne vlažnosti, nato pa smo iz teh podatkov izračunali najprej temperaturni, nato pa še energijski izkoristek. Oba izkoristka smo primerjali s tistim, ki ga je navedel proizvajalec naprave in ugotovili, da se temperaturni približa navedeni vrednosti, energijski izkoristek pa je nižji. Izračunali smo še potrebno moč za segrevanje učilnic tako za prezračevanje z odpiranjem oken kot tudi z napravo in ugotovili, da lahko z uporabo prezračevalne naprave v zimskih mesecih pri ogrevanju prihranimo več kot 10 % energije, s čimer prispevamo k varovanju okolja.

KLJUČNE BESEDE: prezračevanje učilnic, prezračevanje z vračanjem toplote, vsebnost ogljikovega dioksida v učilnicah, izkoristek toplotnega izmenjevalnika, energijske izgube zaradi prezračevanja, prihranek energije

ABSTRACT

Sufficient indoor ventilation is important for human health and well-being but is also associated with energy losses. In this paper, we first researched and measured how much carbon dioxide students emit and what are the recommendations for classroom ventilation. We saw that we cannot provide adequate air quality only by opening windows during breaks, but we have to utilize the ventilation system.

Then we focused on the efficiency of the ventilation device and compared our measurements with the factory data because the device's usefulness is tied to how much energy it can actually save. We also calculated the power required to heat classrooms when opening windows as well as when using the ventilation device and saw that using a ventilation device in winter can help us save more than 10% of energy used for heating.

KEY WORDS: heat recovery ventilation, classroom ventilation, carbon dioxide in classrooms, energy losses and savings

1. UVOD

Prezračevanje je za zdravje izrednega pomena, povezano pa je tudi s porabo energije, sploh v zimskem času. V nalogi so opisani namen in načini prezračevanja, s poudarkom na vsebnosti ogljikovega dioksida v zraku. Prvi del naloge se osredotoča na meritve ogljikovega dioksida v učilnicah, drugi del pa na delovanje in učinkovitost prezračevalnih naprav z vračanjem toplote (rekuperacijo). Namen naloge je z rezultati pokazati, da je v kurilni sezoni za zagotavljanje ustrezne kvalitete zraka v zaprtih prostorih potrebna uporaba prezračevalnih naprav, tako z zdravstvenega kot z energetskega vidika.

Postavili smo naslednje hipoteze:

1. Dijak pri šolskem delu izdiha v povprečju okrog 14,5 litra ogljikovega dioksida na uro.
2. Z odpiranjem oken med odmori lahko v učilnici zagotovimo želeno in za zdravje ugodno kvaliteto zraka.
3. Domnevamo, da za ustrezno zračenje s prezračevalno napravo zadošča manjši pretok, kot je navedeno v priporočilih za prezračevanje ($30 \text{ m}^3/\text{h}$ na osebo).
4. Pri energijskih izgubah zaradi prezračevanja je pomembna vsebnost vodne pare v notranjem in zunanjem zraku.
5. Energijski izkoristek toplotnih izmenjevalnikov pri prezračevalnih napravah je nižji od tovarniških podatkov.
6. Izkoristek toplotnega izmenjevalnika je bistveno odvisen od pretoka zraka.
7. Energijske izgube zaradi prezračevanja predstavljajo pomemben del energije, ki jo porabimo za ogrevanje šole. Z uporabo prezračevalne naprave z vračanjem toplote lahko te izgube zmanjšamo.

2. ZRAK V PROSTORIH

2.1 VPLIVI KAKOVOSTI ZRAKA NA ZDRAVJE

Ljudje večino svojega časa preživimo v zaprtih prostorih, ne zavedamo pa se pomena svežega zraka. Zagotavljanje kakovosti zraka ni pomembno samo z vidika ugodja v prostoru, temveč je tudi dejavnik, ki lahko vpliva na zdravje ljudi. Zato moramo s prezračevanjem zagotavljati ustrezno kakovost zraka, kar pa je povezano z rabo energije (npr. segrevanje zraka v kurilni sezoni, toplotne izgube). Ravno varčevanje z energijo in sodobna gradnja zrakotesnih stavb lahko povzročita nezadostno prezračevanje in slabo kakovost zraka, ki vodi do slabega počutja in večjih tveganj za druga obolenja. Pri vplivu zraka slabe kakovosti na ljudi se pogovarjamo o dveh glavnih pojavih.

1. Sindrom bolnih stavb – SBS (Sick Building Syndrome)

To je pojav, ko zaradi slabih bivanjskih pogojev vsaj 20 % ljudi, ki živijo ali delajo v neki stavbi, poroča o slabem počutju in bolezenskih znakih, povezanih z zadrževanjem v stavbi. Gre za pojav neugodja in nespecifičnih zdravstvenih problemov, kot so splošno slabo počutje, glavobol, suho grlo, dražeča sluznica, pa tudi problemi z zbranostjo, kar vodi v zmanjšano produktivnost. Po odhodu iz stavbe simptomi po določenem času izginejo, daljša izpostavljenost takim pogojem pa lahko vodi v razvoj bolezenskih stanj, npr. infekcije dihalnih poti, bakterijska obolenja ...

2. Bolezni, povezane z bivanjem v stavbi – BRI (Building-Related Illness)

V tem primeru je simptome bolezni mogoče s prepoznati in potrditi s kliničnimi preiskavami, ter jih neposredno povezati z izpostavljenostjo onesnažilom v zraku stavbe, kar lahko vodi do resnih respiratornih ali drugih obolenj.

(povzeto po: Medved, 2010, poglavje 1.8.,

https://www.inoveks.si/images/inOVEinURE/strokovniprisespevki/09_Kakovost_zraka_v_prostoru.pdf)

2.2 ONESNAŽILA V ZRAKU

Zrak je onesnažen, ko so v njem prisotne snovi (ena ali več), kot so aerosoli (prah, dim, megla) in plini v takih koncentracijah, da so lahko škodljivi za življenje in zdravje ljudi in živali, da lahko negativno vplivajo tudi na rastlinstvo in človekov občutek udobja. Zrak lahko onesnažujejo antropogeni (človeški) in tudi naravni viri.

Onesnažila lahko v stavbo pridejo iz okolice ali pa nastajajo v prostorih. Viri v zaprtih prostorih so povezani predvsem z delovanjem metabolizmov, torej dihanjem, človeškim in živalskim metabolizmom ter razkrojem organskih snovi, oddajajo jih lahko tudi gradbene snovi in naprave, v okolici pa je pomemben vir onesnažil izgorevanje fosilnih goriv (industrija, promet). Najpogostejša onesnažila so ogljikov dioksid, ogljikov monoksid, spojine z dušikom (npr. amonijak), ozon, trdni delci v zraku ter več sto hlapnih organskih spojin (HOS ali ang. Volatile Organic Compounds VOC). Letos se še posebej poudarja tudi nevarnost prenašanja kapljičnih virusov po zraku.

V nadaljevanju bomo v nalogi obravnavali le ogljikov dioksid CO₂, saj se njegova koncentracija v zasedenem zaprtem prostoru neizogibno veča, velike koncentracije pa imajo na počutje ljudi zelo slab učinek (npr. pojav glavobolov, težave z zbranostjo).

(povzeto po: Medved, 2010, poglavje 1.8.,

https://www.zvd.si/media/medialibrary/2016/01/DV-04-2014_Onesnazevala_zraka.pdf)

3. POTREBNE KOLIČINE ZRAKA ZA PREZRAČEVANJE

Kakovost zraka v prostoru mora v glavnem izpolnjevati dve zahtevi – ne sme imeti negativnega učinka na zdravje ljudi in zaznavati ga moramo kot prijetnega. Za določitev ustrezne količine zunanjega zraka za prezračevanje poznamo v glavnem štiri metode.

1. Za bivalne stavbe je v uporabi metoda števila izmenjav zraka (n), ki opredeljuje, kolikokrat v eni uri se zrak v stavbi zamenja z zunanjim:

$$n = \frac{\phi_v}{V} \left[\frac{m^3}{h \cdot m^3} = h^{-1} \right] \rightarrow \phi_v = n * V [m^3/h]$$

Kjer je:

n – potrebno število izmenjav zraka v eni uri,

V – prostornina prostora.

ϕ_v – prostorninski pretok zraka (m^3/h).

Potrebno število izmenjav zraka (n) je odvisno od zasedenosti prostora oz. stavbe. Primer: V sobah za dnevno bivanje in spalnicah naj bo ob nezasedenosti pretok vsaj $n = 0,2/h$, ob zasedenosti pa $0,5/h$.

2. V večjih prostorih z večjo gostoto ljudi (poslovne in javne stavbe; pisarne, učilnice...) določimo potrebno količino svežega zraka glede na osebo na osebo (ϕ_{v1}) in število oseb (N) v polno zasedenem prostoru.

V učilnicah je priporočen pretok zraka $\phi_{v1} = 30 m^3/h$ na osebo, v učilnici s 30 osebami (N) bi se v eni uri torej morale zamenjati kar $900 m^3$ zraka.

$$\phi_v = N * \phi_{v1} [m^3/h]$$

3. Če poznamo vrsto in količino onesnažila, lahko potrebno količino zraka določimo glede na mejno koncentracijo snovi.

$$\Phi_v = \frac{G}{C_{max} - C_e} [m^3/h]$$

Kjer je:

Φ_v – pretok zraka,

G – količina onesnažila, ki je nastala v prostoru v časovni enoti,

C_{max} – mejna vrednost onesnažila

C_e – vsebnost onesnažila v zraku,

C_{max} in C_e sta izraženi v masnih enotah, t. j. v g ali mg na m³ zraka.

Mejna koncentracija ogljikovega dioksida v prostorih, kot so pisarne in učilnice, je 1500 ppm, priporočena vrednost pa je 1000 ppm.

4. Zadnja metoda se ravna po zaznavi kakovosti zraka s čutili, t. j. z vonjem; enota vonjav je olf. Podrobnosti te metode niso opisane, ker je pri nalogi ne bomo uporabljali.

(povzeto po: Medved, 2010, poglavje 1.8.)

4. OGLJIKOV DIOKSID V UČILNICAH

Vsebnost ogljikovega dioksida v zraku lahko podamo na dva načina:

- a) S prostorninskim deležem C , ki pove, kolikšen del celotne prostornine V zavzema ogljikov dioksid V_{CO_2} . Prostorninski delež lahko podamo v odstotkih (%) ali milijoninkah (ppm)

$$C = \frac{V_{CO_2}}{V} * 10^6 \text{ (ppm)}.$$

- b) Z delno gostoto ogljikovega dioksida v zraku k , ki je razmerje med maso ogljikovega dioksida v prostoru in celotno prostornino V

$$k = \frac{m_{CO_2}}{V} \text{ (g/m}^3\text{)}.$$

Za preračunavanje med obema načinoma podajanja vsebnosti uporabimo plinsko enačbo.

a) Računanje delne gostote iz prostorninskega deleža

Izračunamo delno prostornino ogljikovega dioksida V_{CO_2} v prostoru s prostornino V :

$$V_{CO_2} = V \cdot C(\text{ppm})10^{-6}.$$

Celotna masa ogljikovega dioksida v prostoru je

$$m_{CO_2} = \frac{pM_{CO_2}V_{CO_2}}{RT} = \frac{pM_{CO_2}V \cdot C(\text{ppm})10^{-6}}{RT} \text{ (g)}.$$

Zgornjo enačbo delimo s prostornino (V) in dobimo

$$k = \frac{m_{CO_2}}{V} = \frac{pM_{CO_2}C(\text{ppm})10^{-6}}{RT} \text{ (g/m}^3\text{)}.$$

V enačbi je:

p – celotni tlak v prostoru (N/m^2),

M_{CO_2} - molska masa ogljikovega dioksida (44 g/mol),

C – prostorninski delež ogljikovega dioksida (ppm),

R – splošna plinska konstanta (8,31 J/Kmol) in

T – temperatura (K).

Primer 1: V zraku v učilnici je prostorninski delež ogljikovega dioksida 1000 ppm. Kolikšna je masa ogljikovega dioksida v 1 m³, če je temperatura zraka 22 °C in tlak 970 mbar?

$$k = \frac{97000 \frac{N}{m^2} 44 \frac{g}{mol} 1000 \cdot 10^{-6}}{8,31 \frac{J}{Kmol} (22 + 273) K} = 1,74 \frac{g}{m^3}$$

b) Računanje prostorninskega deleža iz delne gostote ogljikovega dioksida

$$C = \frac{V_{CO_2}}{V} 10^6 \text{ (ppm)}.$$

Prostornino ogljikovega dioksida izračunamo iz delne gostote in dobimo

$$C = \frac{V_{CO_2}}{V} 10^6 \text{ (ppm)} = \frac{kRT}{pM_{CO_2}} 10^6 \text{ (ppm)}.$$

Kjer je:

k – delna gostota ogljikovega dioksida (g/m³) in

p – celotni tlak v prostoru (N/m²).

Za lažje preračunavanje med obema načinoma podajanja vsebnosti ogljikovega dioksida smo napisali program v Excelu, ki je v prilogi 1.

Glavni vir ogljikovega dioksida v zaprtih prostorih je dihanje.

Za kakovostni zrak za dihanje je pomembna nizka stopnja vsebnosti ogljikovega dioksida, katerega povprečna prostorninska koncentracija na prostem je približno 0,04 % (kar je 400 delcev na milijon ali 400 ppm). V enem kubičnem metru zunanjega zraka je tako 0,04 l ali 0,693 g ogljikovega dioksida.

Predpisana mejna koncentracija (MDK) ogljikovega dioksida v prostoru je 1500 ppm ali 2,6 g/m³. Ogljikovega dioksida z vonjem ne zaznavamo, a že ob izpostavljenosti koncentraciji nad 1000 ppm ljudje poročajo, da je zrak slabše kvalitete, tak zrak pa v kratkem času vpliva na našo zbranost, možen je pojav glavobolov.

(Vir: https://www.zvd.si/media/medialibrary/2019/05/Zavod_za_varstvo_pri_delu_RDV_1_2_018_Vec_svezega_zraka_v_poslovne_prostore.pdf)

4.1 KOLIKO CO₂ ODDA OSEBA NA URO

Koncentracija ogljikovega dioksida v zunanjem zraku je povprečno 0,04 % ali 400 ppm, njegova koncentracija v izdihanem zraku pa je okrog 4 % (40.000 ppm).

Pred opravljanjem meritev smo ocenili, koliko ogljikovega dioksida izdihne mirujoč človek v eni uri. Izmerili smo, da v povprečju vdihne in izdihne 14 – 16 krat v minuti, povprečen izdih pa ocenili na prostornino 0,4 l. V eni minuti torej oseba izdihne povprečno $15 \cdot 0,4 \text{ l} = 6 \text{ l}$, v eni uri pa 360 l zraka s koncentracijo CO₂ = 4%, kar nanese 14,4 l oziroma 25 g CO₂ na uro.

Masa je izračunana iz plinske enačbe pri pogojih $p = 0,965 \text{ bar}$ in $T = 22^\circ\text{C}$. V eni šolski uri (45 min ali 0,75 h) je to enako 10,8 l ali 18,7 g CO₂.

4.2 NARAŠČANJE VSEBNOSTI CO₂ BREZ ZRAČENJA – RAČUNSKI MODEL

V tem primeru se ves ogljikov dioksid, ki ga izdihajo dijaki in učitelj, nabira v prostoru. Celotna količina izdihanega dioksida v času t (min) je:

$$V_{CO_2} = N \frac{V_{1CO_2/h}/1000}{60} t(\text{min}).$$

Kjer je:

V_{CO_2} – prostornina izdihanega ogljikovega dioksida (m³) v prostoru v času t (min),

N – število oseb v učilnici in

$V_{1CO_2/h}$ – prostornina izdihanega dioksida za eno osebo v eni uri (l/h).

Prostorninski delež ogljikovega dioksida narašča enakomerno s časom:

$$C(\text{ppm}) = C_{zač}(\text{ppm}) + \frac{V_{CO_2}}{V} 10^6,$$

$$C(\text{ppm}) = C_{zač}(\text{ppm}) + \frac{N(V_{1CO_2/h}/1000)(t(\text{min})/60)}{V} 10^6. \quad (1)$$

V enačbi je:

C – vsebnost CO_2 po času t (min),

$C_{\text{zač}}$ – začetna vsebnost CO_2 v prostoru (ppm),

N – število oseb v prostoru,

$V_{1\text{CO}_2/\text{h}}$ – prostornina izdihanega CO_2 za eno osebo v eni uri (l/h) in

V – prostornina prostora (m^3).

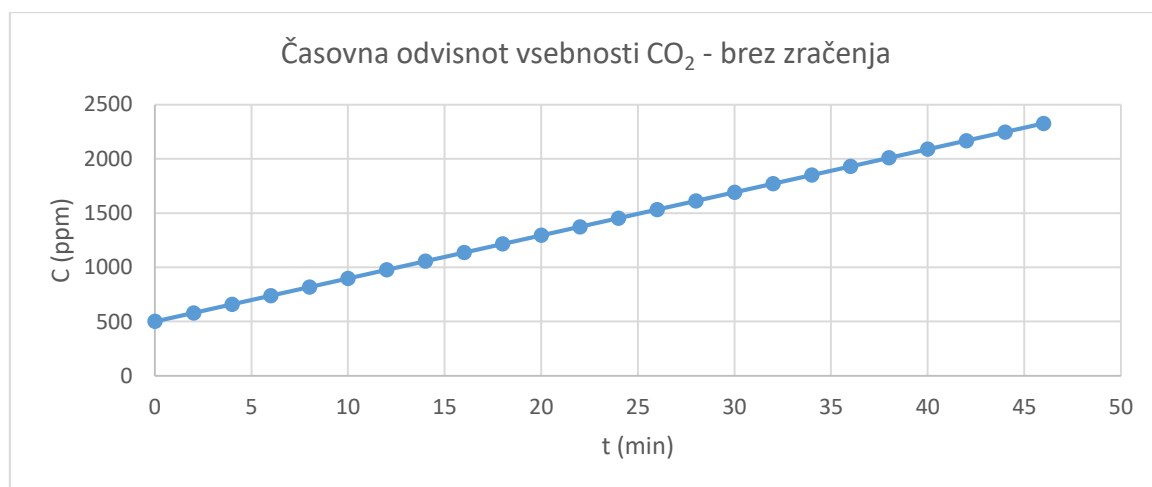
Program za računanje časovne odvisnosti prostorninskega deleža ogljikovega dioksida v prostoru brez zračenja je v prilogi 2.

Primer 2: Kolikšen bo prostorninski delež ogljikovega dioksida v učilnici s prostornino 168 m^3 po 45 min (šolska ura), če je bila začetna vsebnost 500 ppm? V učilnici 24 dijakov in učitelj, vsak izdiha 16 litrov ogljikovega dioksida na uro.

$$C = 500 \text{ ppm} + \frac{25 \cdot \frac{0,016 \text{ m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{45}{60 \text{ h}}}{168} = (500 + 1800) \text{ ppm} = 2300 \text{ ppm}$$

V zadnjem delu šolske ure je vsebnost ogljikovega dioksida precej presegla priporočeno vrednost.

Časovno spreminjanje vsebnosti ogljikovega dioksida za ta primer je prikazano na sliki 1.



Slika 1: Naraščanje vsebnosti CO_2 v prostoru brez zračenja

4.3 SPREMINJANJE VSEBNOSTI CO₂ Z ZRAČENJEM – RAČUNSKI MODEL

Za zagotovitev kakovosti zraka je torej nujno prezračevanje. Prostor se vedno prezračuje vsaj pasivno, torej brez našega poseganja, npr. skozi reže. Pretok takega prezračevanja je ocenjen na okrog 25 m³/h. Pri mehanskem zračenju pa imamo 2 načina za zagotovitev izmenjave zraka. Ena vrsta zračenja je z odpiranjem oken, druga s prezračevalno napravo. Prezračevanje z odpiranjem oken v kurilni sezoni ni ugodno, saj vključuje velike toplotne izgube, prav tako ni dovolj učinkovito. Oken prav tako ne moremo imeti odprtih celo uro, saj to ni ugodno za dijake in izgubimo še več toplote.

4.3.1 ZRAČENJE Z ODPIRANJEM OKEN MED ODMOROM

Z odpiranjem oken se v prostoru izmenja nekaj zraka, a ta zrak ima pozimi veliko nižjo temperaturo od notranjega, prav tako pa lahko v prostor vstopajo še druga onesnaževala. Poleg toplotnih izgub je tudi sama izmenjava zraka manj učinkovita, po izračunih pa na ta način sploh ne moremo zagotoviti primerne kvalitete zraka proti koncu šolske ure.

Pri računanju vzamemo, da ima zrak učilnici pred zračenjem mejno vsebnost ogljikovega dioksida. V odmoru se del tega zraka nadomesti s svežim zrakom. Med šolsko uro se povečuje vsebnost CO₂ v tem zraku, ker ima zrak, ki je ostal v učilnici, že mejno vsebnost ogljikovega dioksida. Vsebnost CO₂ narašča po enačbi (1).

Z enačbo (2) izračunamo potrebno količino zraka V, ki jo treba zamenjati v odmoru, da vsebnost ogljikovega dioksida na koncu šolske ure ne bo presegla mejne vrednosti.

$$C(ppm) = C_{zrač}(ppm) + \frac{N(V_{1CO_2/h}/1000)(t(min)/60)}{V} 10^6. \quad (2)$$

Kjer je:

$C_{zrač}$ – vsebnost ogljikovega dioksida v zunanjem zraku (400 ppm),

$V_{1CO_2/h}$ – prostornina izdihanega CO₂ za eno osebo v eni uri (l/h),

C – vsebnost CO₂ po času t (min),

N – število oseb v prostoru,

C – mejna vrednost vsebnosti ogljikovega dioksida (ppm) in

V – prostornina zraka, ki se je v odmoru zamenjal (m³).

Program za računanje potrebnega zračenja v odmoru je v prilogi 3.

Primer izračuna za učilnico s prostornino 165 m³ v kateri je 20 oseb je prikazan v tabeli 1 in na sliki 2. Račun je narejen za različne mejne vsebnosti in tri vrednosti izdihanega ogljikovega dioksida na uro. V poglavji 4.1 smo ocenili, da dijak na uro izdiha povprečno 14,5 l/h, v tabeli pa so navedene drugačne vrednosti, saj so naše meritve v kasnejših poglavjih pokazale, da je dejanska količina izdihanega plina bližje tem vrednostim.

Vidimo, da bi se pri manjših mejnih vrednostih morala v učilnici (V = 165 m³) med odmorom izmenjati večja prostornina zraka od prostornine učilnice same, kar ni mogoče. Prva vrednost, ki jo je na ta način mogoče doseči, je torej 2000 ppm. Ta vrednost močno presega priporočeno.

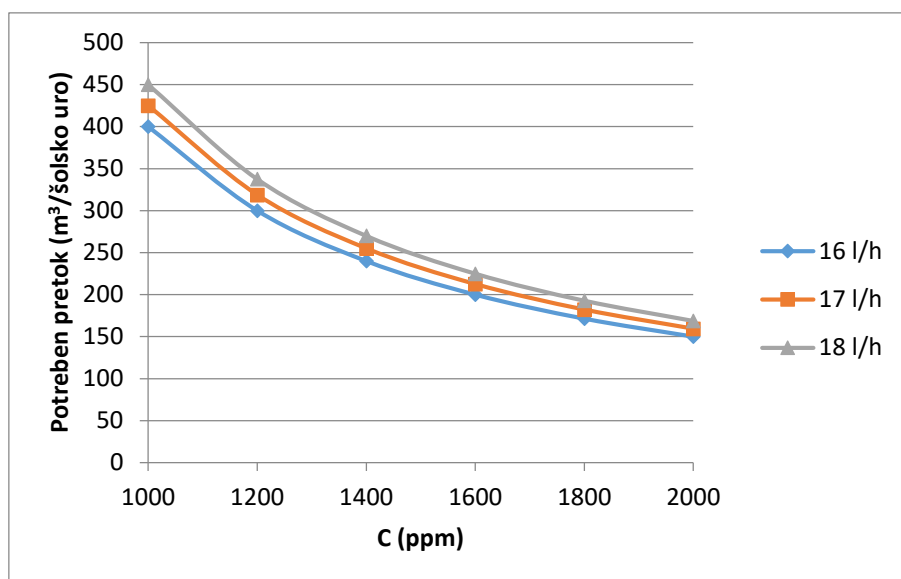
Tabela 1: Potrebna izmenjava zraka (m³/šolsko uro) za 20 dijakov

CO ₂ /h/osebo	(l/h)	(l/h)	(l/h)
	16	17	18

**mejna
vsebnost CO₂**

C (ppm)	(m³/šolsko uro)		
1000	400	425	450
1200	300	319	338
1400	240	255	270
1500	218	232	245
1600	200	213	225
1800	171	182	193
2000	150	159	169

Kjer je izračunana prostornina večja od prostornine učilnice, je zagotovitev primerne kvalitete zraka na ta način nemogoča. Le z odpiranjem oken med odmorom torej ni mogoče prezračiti učilnice tako, da se tekom ure vrednost ogljikovega dioksida ne bi preveč povečala.



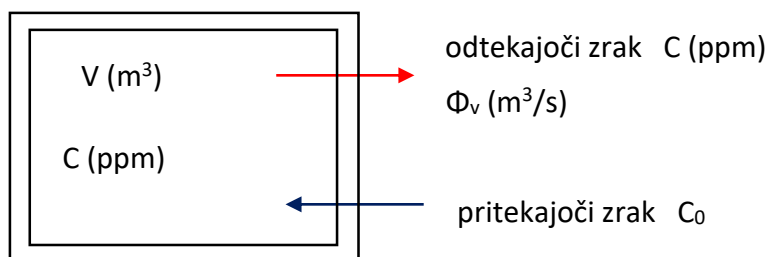
Slika 2: Potrebna prostornina zamenjanega zraka v odmoru za 20 dijakov

V primerih, ko zračenje v odmoru ne zadošča, moramo prostor prezračiti tudi med šolsko uro.

4.3.2 ZRAČENJE S PREZRAČEVALNO NAPRAVO

Pri tem prezračevanju onesnažen zrak neprestano odteka iz prostora, nadomešča ga zunanji svež zrak. Tak način zračenja dosežemo s priprtimi okni, z navadno prezračevalno napravo ali s prezračevalno napravo z vračanjem toplote. Prva dva načina v zimskem času nista priporočljiva zaradi velikih energijskih izgub.

Na sliki 3 je prikazano prezračevanje s prezračevalno napravo. V učilnico s prostornino piteka zunanji zrak z vsebnostjo ogljikovega dioksida $C_0 = 400$ ppm, odteka pa zrak z vsebnostjo C , ki je enaka trenutni vrednosti v prostoru. Prostorninski pretok prezračevanja je Φ_v (m^3/s).



Slika 3: Prezračevanje s prezračevalno napravo

Ogljikov dioksid oddajajo osebe, ki so učilnici, priteka pa tudi z zunanjim zrakom. Odtokajoči zrak odnaša CO₂ iz prostora. V času dt je sprememba prostornine CO₂ v učilnici enaka:

$$dV_{CO_2} = NV_{1CO_2/s}dt + C_0dV - CdV. \quad (3)$$

Kjer je:

N – število dijakov v prostoru,

$V_{1CO_2/s}$ – prostornina dioksida (m³), ki ga izdiha en dijak v 1 s ($V_{1CO_2/s} = V_{1CO_2/h}/3600$),

dV – prostornina zraka, ki se zamenja v času dt (m³) in

dt – časovni interval (s).

Enačbo (3) delimo s prostornino učilnice V in časovnim intervalom dt:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{NV_{1CO_2/s}}{V} + \frac{C_0\phi_v}{V} - \frac{C\phi_v}{V}. \quad (4)$$

Kjer je:

dC = dV_{CO₂}/V – sprememba prostorninskega deleža CO₂ v učilnici in

$\phi_v = dV/dt$ – prostorninski pretok prezračevanja (m³/s).

Po daljšem času se vsebnost dioksida v učilnici ne bo več spreminjala (dC/dt = 0), tako je končna vrednost vsebnosti C_{kon}:

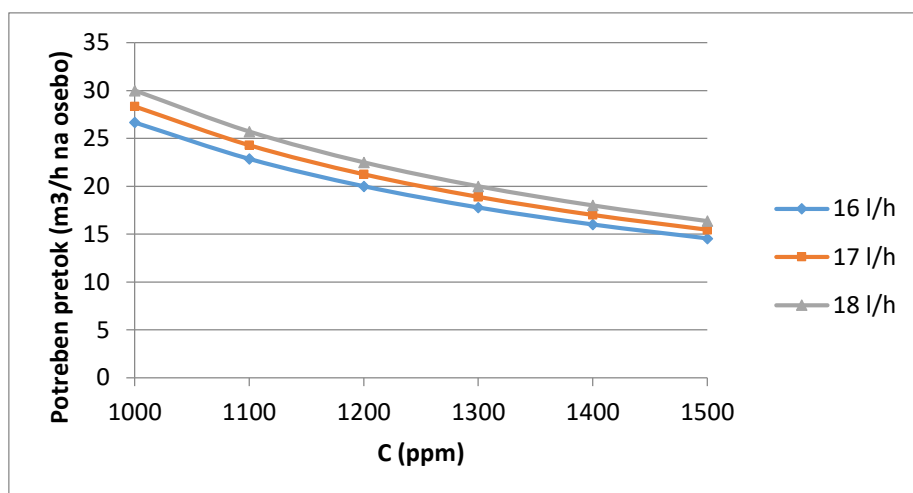
$$C_{kon} = C_0 + \frac{NV_{1CO_2/s}}{\phi_v}. \quad (5)$$

Enačbo (5) lahko uporabimo za računanje potrebnega pretoka zraka za doseganje stalne vsebnosti ogljikovega dioksida C:

$$\phi_v = \frac{NV_{1CO_2/h}}{3600(C - C_0)}. \quad (6)$$

V enačbi (6) je $V_{1CO_2/h}$ prostornina dioksida, ki ga izdiha en dijak v eni uri.

Primer izračuna potrebnega pretoka zraka na osebo je prikazan na sliki 4.



Slika 4: Potreben pretok zraka za doseganje stalne vsebnosti CO₂ na osebo

S pretokom zraka 30 m³/h na osebo dosežemo vsebnost ogljikovega dioksida okrog 1000 ppm. Tak pretok je naveden v priporočilih. Če izberemo za mejno vrednost 1500 ppm, zadostuje pretok 15 m³/h na osebo.

Časovno spreminjanje vsebnosti ogljikovega dioksida v učilnici dobimo z rešitvijo diferencialne enačbe (4). Vsebnost ogljikovega dioksida se eksponentno približuje končni vrednosti

$$C = C_{kon} + (C_{zač} - C_{kon})e^{-\frac{\Phi_V}{V}t}. \quad (7)$$

Kjer je:

C_{kon} – končna vrednost vsebnosti ogljikovega dioksida (enačba 5) (ppm),

$C_{zač}$ – začetna vsebnost dioksida (ppm),

Φ_V – prostorninski pretok zračenja (m³/s),

V – prostornina učilnice (m³) in

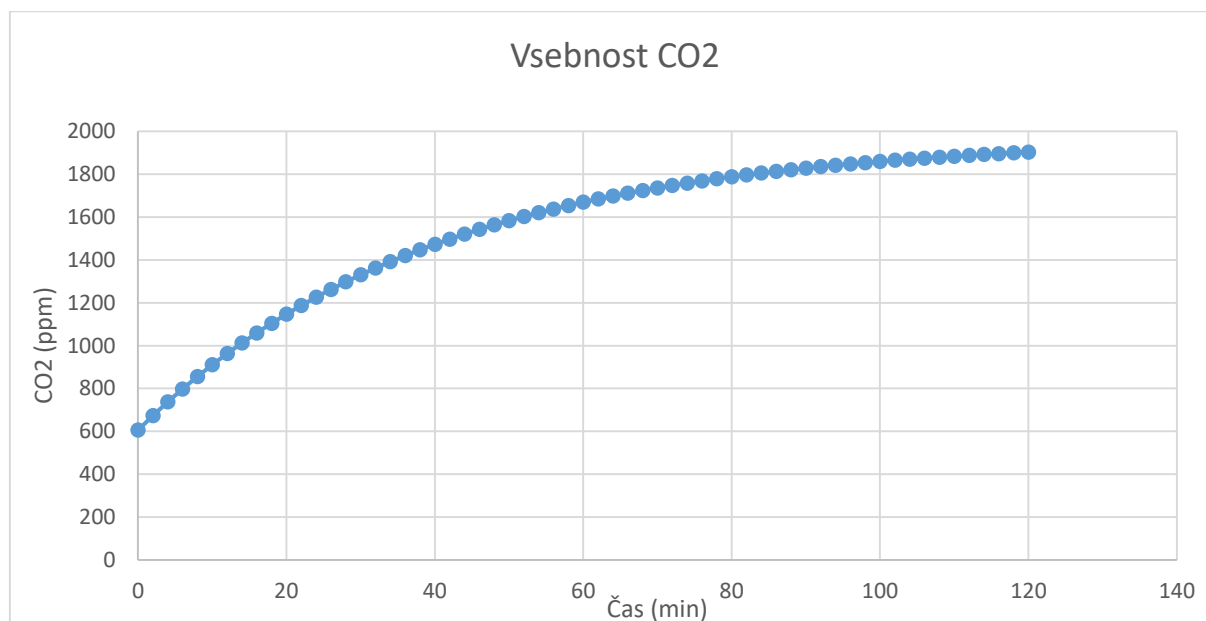
t – čas v sekundah.

Pri prezračevalnih napravah je prostorninski pretok navadno podan v m³ na uro ($\Phi_{V/h}$), pretok v sekundi je: $\Phi_V(\text{m}^3/\text{s}) = \Phi_{V/h}(\text{m}^3/\text{h})/3600$.

Primer časovnega spreminja vsebnosti ogljikovega dioksida za podatke v tabeli 2 je prikazan na sliki 5. Učilnica ima prostornino 168 m^3 , pretok prezračevanja je $255 \text{ m}^3/\text{h}$, količina izdihanega ogljikovega dioksida je 16 l/h na osebo in v učilnici je 25 oseb.

Tabela 2: Podatki za primer izračuna časovnega spreminjanja vsebnosti CO_2

T (°C)	C _{zač} (ppm)	prostornina (m ³)	tlak (mbar)	$\Phi_{V/h}$ (m ³ /h)	Φ_V (m ³ /s)	k _z (g/m ³)
22	606	168	965	255	0,0708	1,050
N- število	V _{1CO2/h} (l/h)	m _{1CO2/h} (g/h)	m _{CO2/s} vsi (g/s)	C ₀ (ppm)	začetna masa m _z (g)	končna masa m _k (g)
25	16	27,7	0,162	400	176	500
C _{kon} (ppm)						1718

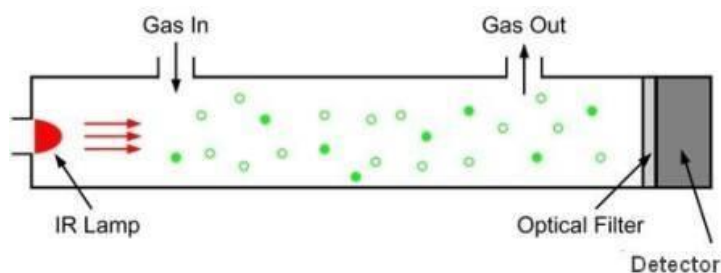


Slika 5: Časovno spreminjanje vsebnosti CO_2 za podatke v tabeli 2 za primer s prezračevanjem

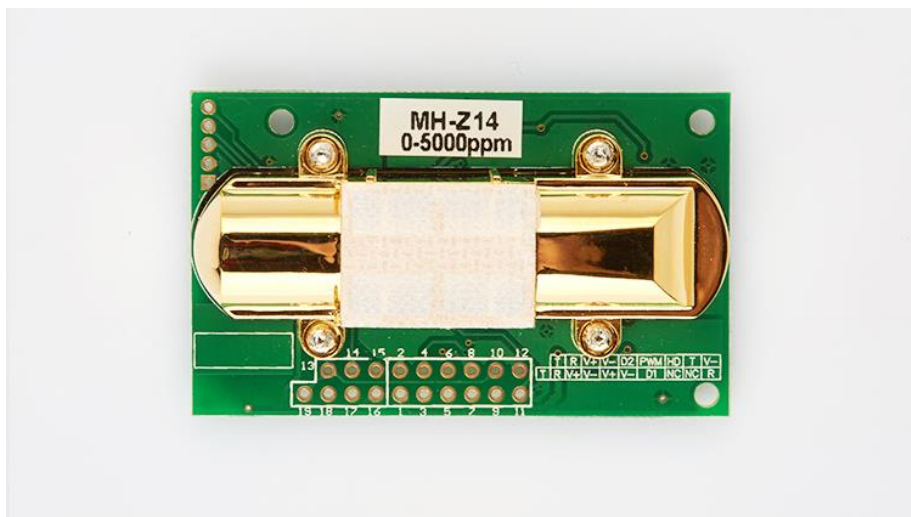
5. MERJENJE VSEBNOSTI CO₂

5.1 OPIS MERILNIKOV IN MERJENJA

Merilniki ogljikovega dioksida delujejo na podlagi infrardeče svetlobe. NDIR merilniki, t. j. »non-dispersive« oz. ne-razpršilni merilniki so najpogosteje uporabljeni senzorji. Infrardeč (IR) vir svetlobe sveti v cev, ki vsebuje zrak za analizo. Molekule ogljikovega dioksida v cevi vpijajo infrardečo svetlobo z valovno dolžino 4,26 μm , detektor na drugi strani cevi pa meri prepuščeno svetlobo s to valovno dolžino. Merilnik na osnovi količine sprejete svetlobe, ki jo izmeri detektor, izračuna vsebnost ogljikovega dioksida v plinu v cevi. Uporabljeni merilnik je NDIR CO₂ sensor MH-Z14A.



Slika 6: Delovanje NDIR merilnika



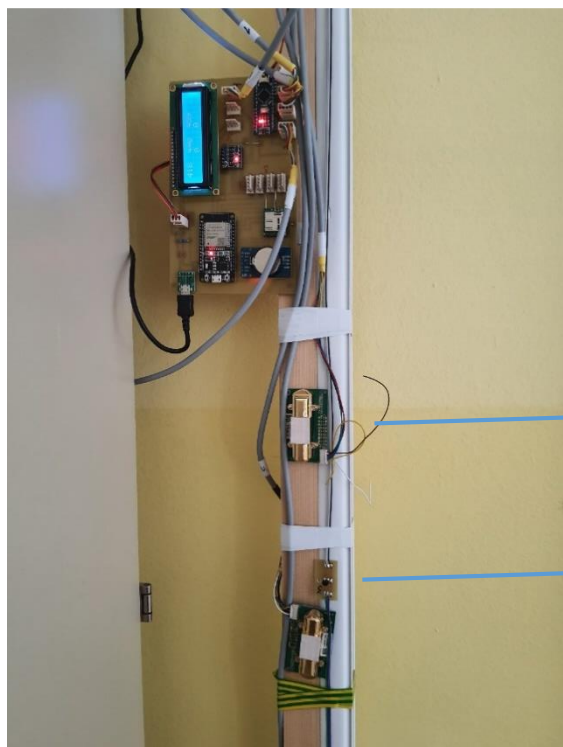
Slika 7: NDIR CO₂ sensor MH-Z14A (vir: <https://www.winsen-sensor.com/>)

Merili smo koncentracijo CO₂ in temperaturo. Na spodaj prikazanem merilnem sistemu so po trije merilniki vsake količine, ki smo jih s serijsko povezavo povezali z mikrokontrolerjem ESP32, ki je izmerjene podatke pošiljal na spletno stran ThingSpeak.com (slika 11).

Merilni sistem je izdelal laborant za fiziko Alojz Roter.



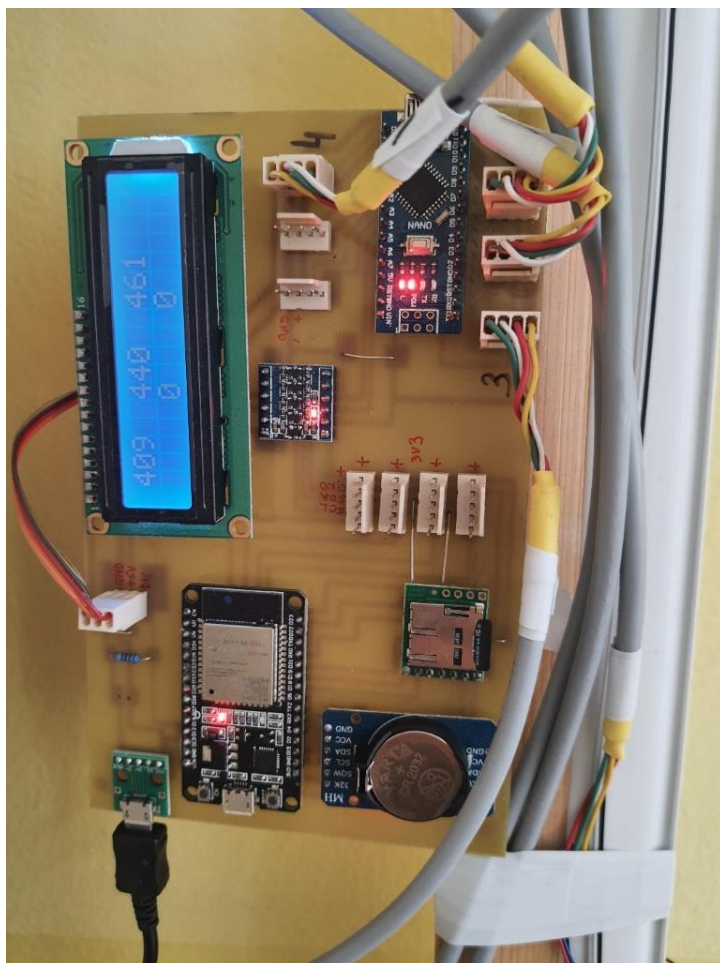
Slika 8: Merilni sistem



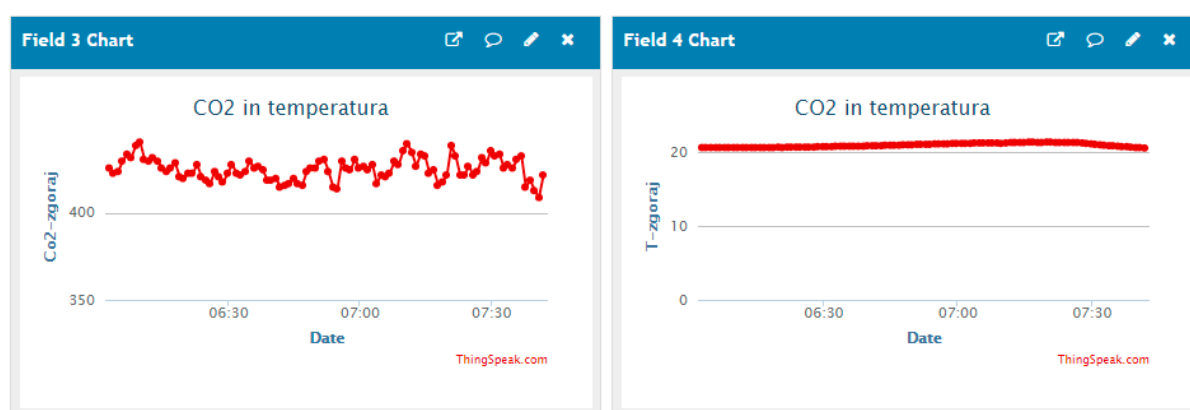
Merilnik ogljikovega dioksida

Merilnik temperature

Slika 9: Merjenje ogljikovega dioksida in temperature



Slika 10: Mikrokrmilnik

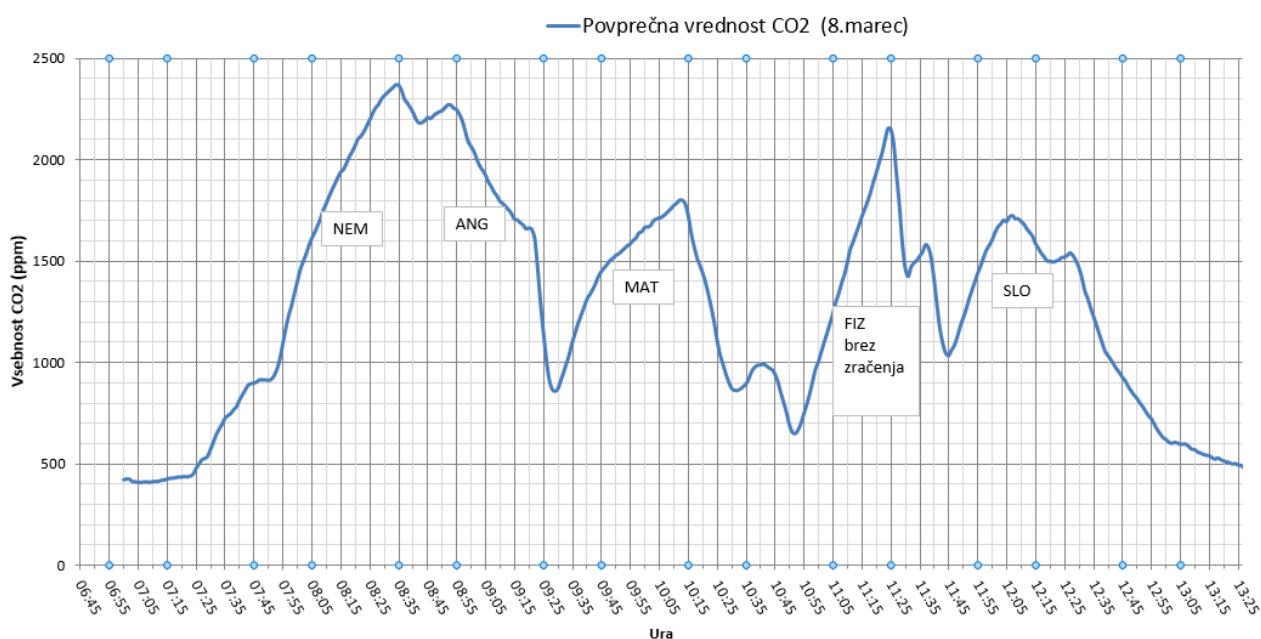


Slika 11: Primer shranjenih podatkov na spletni strani ThingSpeak.com

5.2 PRIMERI MERITEV

V učilnici smo večkrat merili naraščanje vsebnosti ogljikovega dioksida med poukom. Rezultate meritev smo primerjali z modelnimi izračuni, ki so opisani v tretjem poglavju. Poskušali smo ugotoviti količino izdihanega ogljikovega dioksida med poukom in oceniti pretok zraka za našo prezračevalno napravo.

Primer meritve za 8. marec je prikazan na sliki 12. Prezračevalna naprava ni bila vključena, učilnico smo prezračevali samo z odpiranjem oken. Ta dan je vsebnost ogljikovega dioksida večkrat močno preseгла priporočeno vrednost.



Slika 12: Primer meritve vsebnosti ogljikovega dioksida v učilnici 37

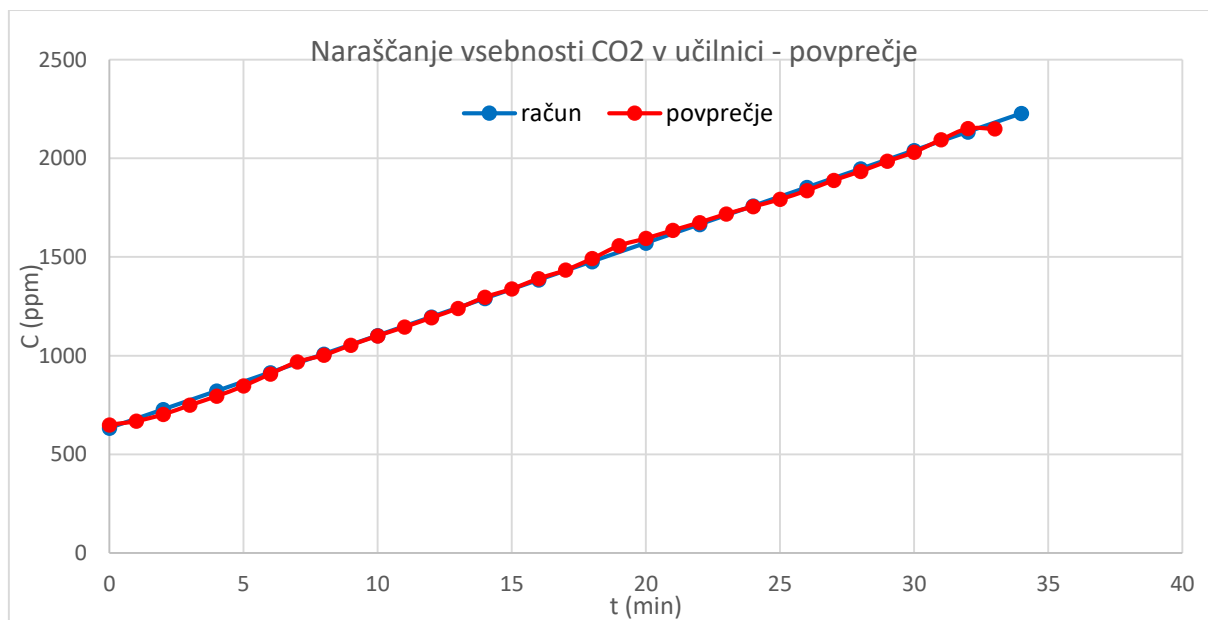
5.2.1 Brez prezračevanja

Eno izmed meritev smo opravili 8. marca pri pouku fizike v učilni 37. V odmoru smo učilnico dobro prezračili, nato pa zaprli vsa okna, da je bila izmenjava zraka čim manjša. Začetna vsebnost ogljikovega dioksida je bila 633 ppm. Ostali podatki za meritev so napisani v tabeli 3.

Tabela 3: Podatki za meritev vsebnosti ogljikovega dioksida v učilnici 37 brez zračenja

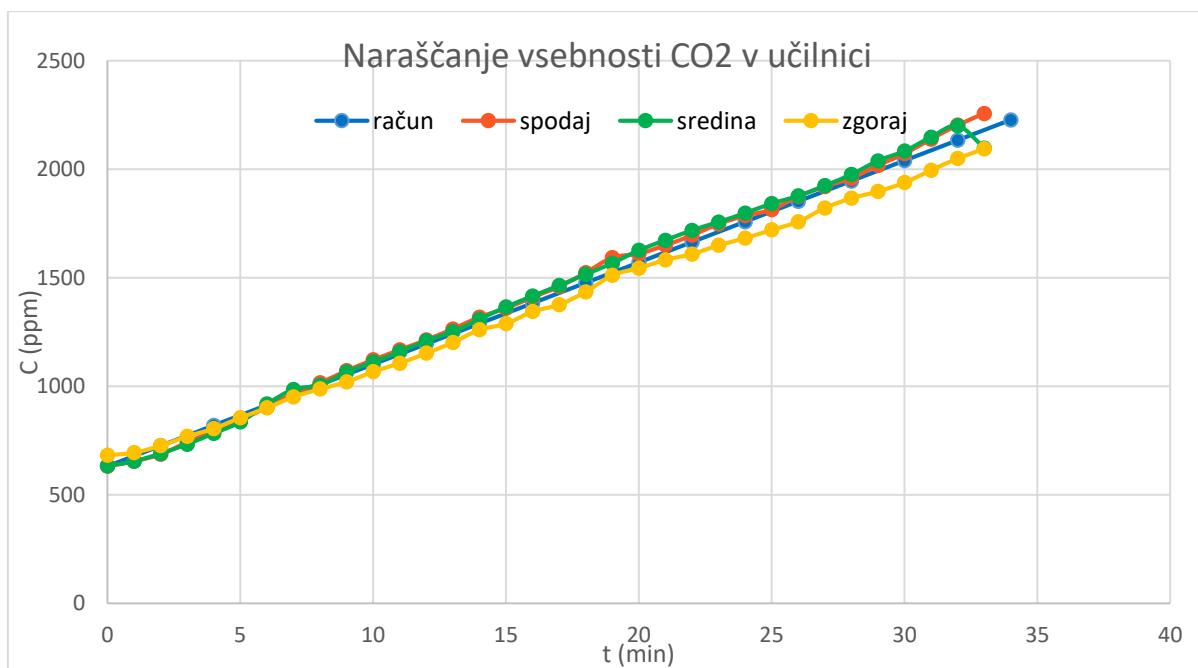
tlak (mbar)	T (°C)	V (m ³)	N (število)
965	23	168	29
C _{zač} (ppm)		V _{1CO2/h} (l/h)	
633		16,3	

Ugotovili smo, da je vsebnost ogljikovega dioksida naraščala enakomerno s časom, kar kaže, da je bilo pasivno zračenje zanemarljivo. Ujemanje merskih rezultatov z modelom (enačba 1) je bilo najboljše, ko smo za količino izdihanega dioksida vzeli 16,3 l/h na osebo (slika 13).



Slika 13: Primerjava merskih rezultatov z modelom za primer brez prezračevanja

Podrobnejša analiza izmerjenih rezultatov kaže, da vsebnost ogljikovega dioksida narašča v spodnjem in srednjem delu učilnice približno enako, v zgornjem delu pa nekoliko počasneje (slika 14).

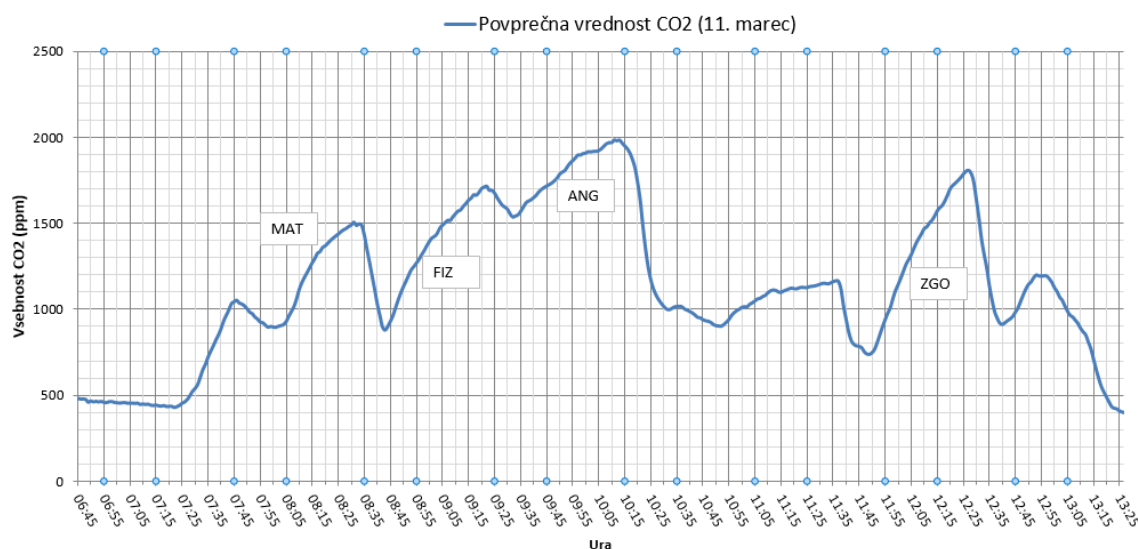


Slika 14: Primerjava vsebnosti CO₂ na različnih višinah za primer brez prezračevanja

5.2.2 S prezračevanjem

Tokrat je bila prezračevalna naprava vklopljena, okna pa med šolsko uro zaprta. Motorja ventilatorjev smo nastavili na 50 %, da smo zmanjšali hrup in prepih. Rezultati meritev so pokazali, da je pretok zraka premajhen in je bilo potrebno v odmoru še vedno odpreti okna.

Opravili smo več meritev s prezračevanjem v dneh od 8. do 11. marca, v nadaljevanju bomo prikazali nekaj rezultatov. Meritev vsebnosti ogljikovega dioksida za 11. marec je prikazana na slikah 15 in 16. Na grafu se lepo vidi, da se je med šolskimi urami vsebnost eksponentno približevala končni vrednosti. V odmorih je bila učilnica prezračena z odpiranjem oken.

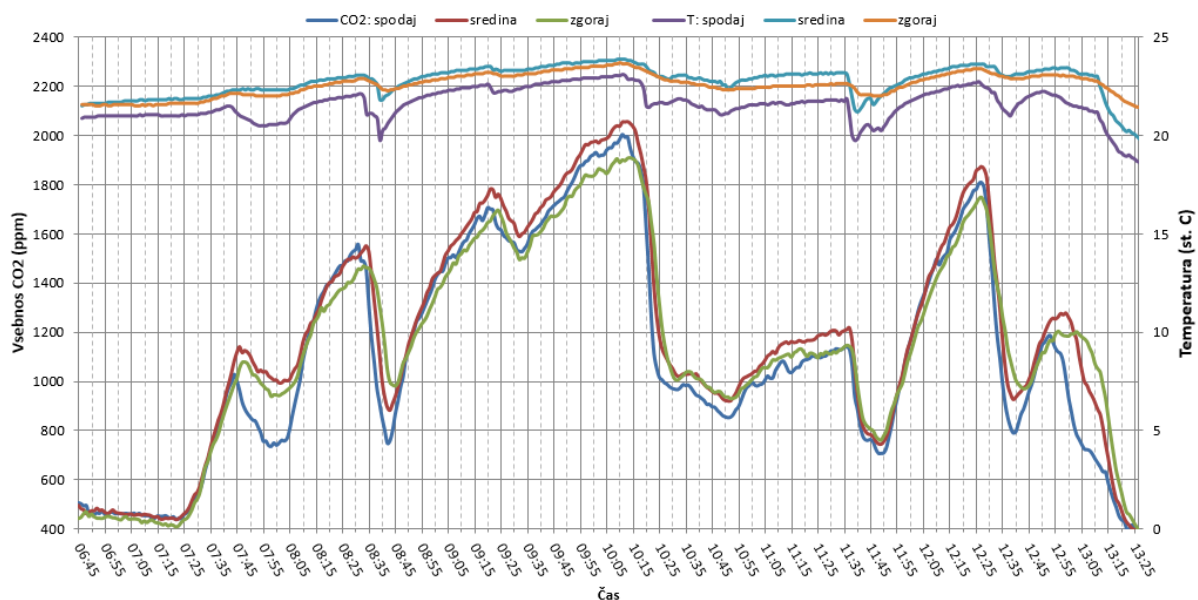


Slika 15: Primer meritve vsebnosti ogljikovega dioksida (povprečna vrednost) 11. marca v učilnici 37

Pri vsaki meritvi smo rezultate meritev primerjali s teoretičnim modelom (enačba 7). V modelu smo nastavili pretok zraka in količino izdihanega ogljikovega dioksida tako, da se izračunane vrednosti ujemajo z merskimi rezultati. Pretok zraka in količina izdihanega ogljikovega dioksida se pri različnih pogojih ne razlikujejo bistveno, kar potrjuje zanesljivost našega modela.

Pretok zraka smo poskušali tudi izmeriti, vendar je meritev zahtevna, ker zrak izteka iz cevi prezračevalnega sistema na različnih mestih. Pretok smo tako s pomočjo ujemanja meritev in modela ocenili na $255 \text{ m}^3/\text{h}$, kar ne zadošča za ustrezno prezračevanje. Če ne bi želeli preseči mejne koncentracije ogljikovega dioksida 1500 ppm , bi morali pretok nastaviti na $400 \text{ m}^3/\text{h}$,

kar je še vedno več kot pol manj od priporočenega pretoka 30 m³/h na osebo, kar bi pri 29 osebah nanese 870 m³/h.



Slika 16: Primer meritve za 11. marec v učilnici 37

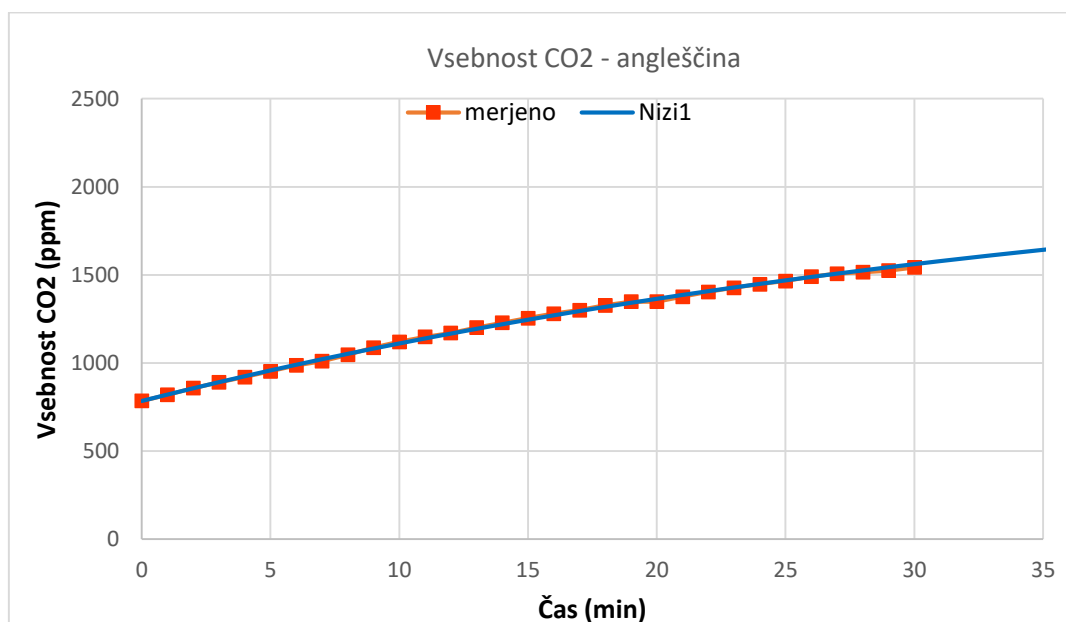
Na sliki 16 vidimo, da so bile vrednosti ogljikovega dioksida na spodnjem merilniku nižje, kar je posledica hitrejšje izmenjave zraka pri tleh. Prav tako je zanimivo, da najvišjo vrednost zabeležil merilnik v sredini, najvišja koncentracija ogljikovega dioksida je torej na višini glav sedečih dijakov, kjer se ga največ tudi izloči.

1. primer: 9. marec – angleščina

V učilnici 37 je bilo 27 dijakov in učiteljica. Dobro ujemanje modela z merskimi rezultati smo dobili pri pretoku zraka $255 \text{ m}^3/\text{h}$ in $16,8 \text{ l/h}$ izdihanega dioksida na osebo. Drugi podatki so zbrani v tabeli 4, primerjava med merskimi rezultati in modelom pa na sliki 17.

Tabela 4: Podatki za meritev 9. marca pri angleščini

T (°C)	Czač (ppm)	prostornina (m ³)	tlak (mbar)	$\Phi_{V/h}$ (m ³ /h)	Φ_V (m ³ /s)	k_z (g/m ³)
22	785	168	965	255	0,0708	1,360
N- število	$V_{1\text{CO}_2/h}$ (l/h)	$m_{1\text{CO}_2/h}$ (g/h)	$m_{\text{CO}_2/s}$ vsi (g/s)	C_0 (ppm)	začetna masa CO_2 (g)	končna masa CO_2 (g)
28	16,8	29,1	0,226	400	228	653
C_{kon} (ppm)						2245



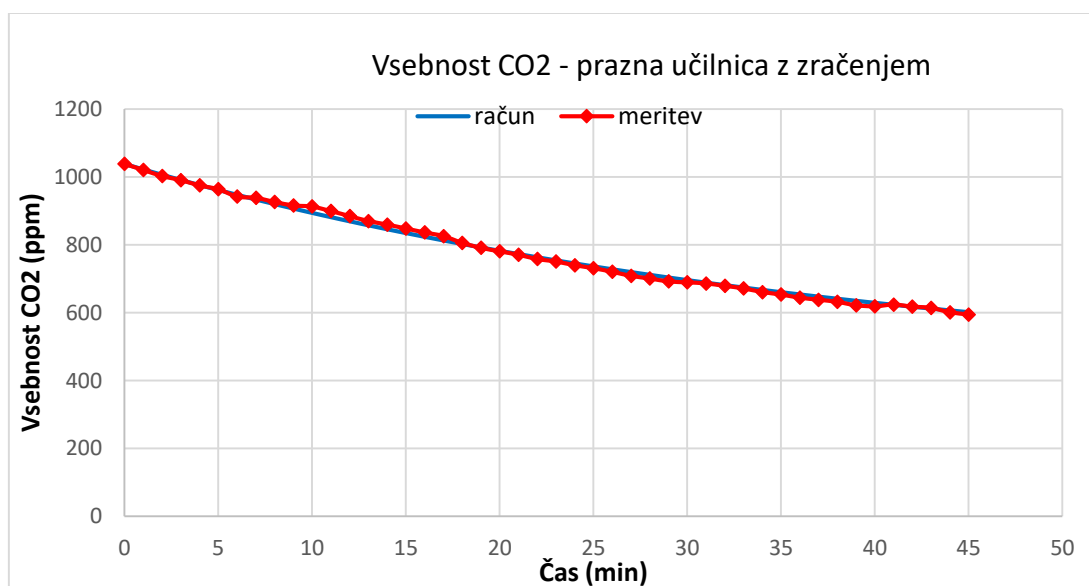
Slika 17: Primerjava merskih rezultatov z modelom za pouk angleščine 9. marca

2. primer: 9. marec – prazna učilnica

V tem primeru je bila učilnica prazna. Vsebnost ogljikovega dioksida se je eksponentno zmanjševala. Za pretok zraka smo dobili vrednost $258 \text{ m}^3/\text{h}$. Podatki o učilnici in drugih pogojih merjenja so napisani v tabeli 5, rezultati meritev in izračuni pa na sliki 18.

Tabela 5: Podatki za meritev 9. marca za prazno učilnico

$T (^{\circ}\text{C})$	Czač (ppm)	prostornina (m ³)	tlak (mbar)	$\Phi_{V/h}$ (m ³ /h)	Φ_V (m ³ /s)	k_z (g/m ³)
22	1038	168	965	258	0,0717	1,798
N- število	$V_{1\text{CO}_2/h}$ (l/h)	$m_{1\text{CO}_2/h}$ (g/h)	$m_{\text{CO}_2/s}$ vsi (g/s)	C_0 (ppm)	začetna masa CO_2 (g)	končna masa CO_2 (g)
0	0	0,0	0,000	400	302	116
C_{kon} (ppm)						400



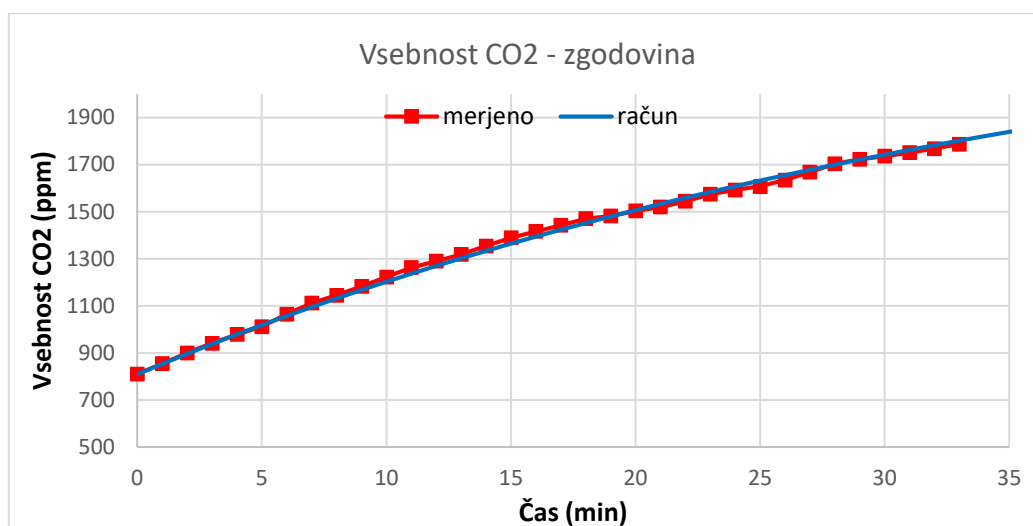
Slika 18: Primerjava merskih rezultatov z modelom za prazno učilnico

3. primer: 11. marec – zgodovina

Za ta primer je bila količina izdihanega ogljikovega dioksida večja, dobili smo vrednost 19,8 l/h na osebo, kar je več kot pri ostalih meritvah. Predvidevamo, da so bili dijaki bolj aktivni. Po pogovoru z učiteljem smo ugotovili, da so dijaki to uro pisali test. Podatki za ta primer so v tabeli 6, rezultati pa na sliki 19.

Tabela 6: Podatki za meritev 11. marca pri zgodovini

T (°C)	Czač (ppm)	prostornina (m ³)	tlak (mbar)	$\Phi_{V/h}$ (m ³ /h)	Φ_V (m ³ /s)	k_z (g/m ³)
22	810	168	965	258	0,0717	1,403
N- število	V _{1CO2/h} (l/h)	m _{1CO2/h} (g/h)	m _{CO2/s} vsi (g/s)	C ₀ (ppm)	začetna masa mz (g)	končna masa mk (g)
28	19,8	34,3	0,267	400	236	742
Ckon (ppm)						2549



Slika 19: Primerjava merskih rezultatov z modelom za pouk zgodovine 11. marca

6. ENERGIJSKE IZGUBE PRI PREZRAČEVANJU

Prezračevalne naprave so z vidika varčevanja z energijo zelo koristne, predvsem v kurilni sezoni. Takrat lahko prezračevanje z okni predstavlja kar 40 % energijskih izgub, z uporabo prezračevalne naprave z vračanjem toplote (rekuperacijo) pa lahko te izgube znatno zmanjšamo. Porabljeni zrak, ki zapušča objekt odda svojo energijo zraku, ki vstopa v objekt. Temu pravimo rekuperacija. Gre za 60 do 99% izkoristek pri prenosu toplote, kar je odvisno od kakovosti naprave in metode meritve. Sodobne prezračevalne naprave naj bi imele zmožnost vračanja toplote celo nad 90 %, torej bi se izgube zaradi prezračevanja v teoriji lahko zmanjšale na le 4 %. Prezračevanje z vračanjem toplote (rekuperacijo) pomeni velik prihranek energije pri ogrevanju.

Prezračevanje z odpiranjem oken poleti ne predstavlja neposrednih energetske izgub, ima pa druge slabosti: vnos drugih onesnažil (tujki, pelod), smrad itd., ki jih lahko prezračevalna naprava odpravi s filtriranjem.

Pozimi pa odpiranje oken predstavlja velike toplotne izgube, saj je lahko razlika med temperaturo zunaj in v prostoru več kot 30°C.

(povzeto po: http://www.fa.uni-lj.si/filelib/8_konzorcijph/agregat__energetik_91_2.pdf)

6.1 ENTALPIJA IN SPECIFIČNA ENTALPIJA

Pri procesih, ki potekajo pri stalnem tlaku, pogosto uporabljamo entalpijo. Enaka je vsoti notranje energije in zmnožka tlaka in prostornine:

$$H = W_n + pV \text{ (J)}.$$

Specifično entalpijo h dobimo, če entalpijo telesa preračunamo na 1 kg

$$h = \frac{H}{m} \left(\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right).$$

Pri segrevanju in ohlajanju pri stalnem tlaku je dovedena ali odvedena toplota Q enak spremembi entalpije: $Q = \Delta H$. Tudi izparevanje navadno poteka pri stalnem tlaku, zato je izparilna toplota enaka razliki entalpij pare in vode.

6.1.1 Entalpija vlažnega zraka

Vlažen zrak je zmes suhega zraka in vodne pare, zato je njegova entalpija vsota entalpij obeh sestavin

$$H = H_z + H_v,$$

$$H = m_z h_z + m_v h_v,$$

kjer sta h_z in h_v specifični entalpiji suhega zraka oziroma vodne pare.

Pri vlažnem zraku pogosto preračunamo njegovo entalpijo na kg suhega zraka

$$h = \frac{H}{m_z} = h_z + x h_v, \quad (8)$$

kjer je x razmerje med maso vodne pare in maso suhega zraka $x = \frac{m_v}{m_z}$.

Za izračun mase vodne pare in suhega zraka uporabimo plinsko enačbo

$$m_v = \frac{p_v V M_v}{RT}, \quad m_z = \frac{p_z V M_z}{RT},$$

kjer je:

p_v, p_z – delni tlak vodne pare in zraka,

M_v, M_z – molska masa vodne pare in zraka (18 g/mol in 29 g/mol) in

V – velikost prostora (m^3).

Razmerje x je zato $x = \frac{M_v}{M_z} \frac{p_v}{p - p_v}$, kjer je p tlak vlažnega zraka $p = p_z + p_v$. (9)

Pri naših meritvah smo merili relativno vlažnost zraka r , delni tlak vodne pare p_v pa izračunali

$$p_v = r p_n, \quad (10)$$

kjer je p_n nasičeni parni tlak vodne pare pri temperaturi zraka.

Za računanje nasičenega parnega tlaka p_n smo uporabili Tetens-ovo enačbo (Vir: https://en.wikipedia.org/wiki/Tetens_equation)

$$p_n = 6,1078 e^{\frac{12,27T}{T+273,3}} \text{ (mbar)}, \quad (11)$$

kjer je T temperatura v $^{\circ}\text{C}$.

Pri segrevanju ali ohlajanju vlažnega zraka je pomembna samo sprememba entalpije. Pri suhem zraku bomo izbrali, da je njegova entalpija enaka nič pri temperaturi 0°C , pri vodni pari pa za ničelno vrednost entalpije vzamemo vodo pri 0°C .

Entalpijo vlažnega zraka h (enačba 8) lahko zapišemo s specifičnima toplotama in specifično izparilno toploto vode pri 0°C

$$h = \frac{H}{m_z} = h_z + xh_v = c_{pz}T + x(q_i + c_{pv}T), \quad (12)$$

kjer je:

c_{pz} – specifična toplota pri stalnem tlaku za zrak ($1,006 \text{ kJ/kgK}$),

c_{pv} – specifična toplota pri stalnem tlaku za vodno paro ($1,85 \text{ kJ/kgK}$),

q_i – specifična izparilna toplota vode pri 0°C (2501 kJ/kg) in

T – temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

(Povzeto po:

https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/132918/mod_resource/content/3/Thermodynamics_of_humid_air.pdf)

6.2 PREZRAČEVALNA NAPRAVA Z VRAČANJEM TOPLOTE

Prezračevalna naprava z vračanjem toplote je zgrajena iz dveh cevi, ene za dovod svežega in druge za odvod notranjega zraka. Cevi sta ločeni, saj se zrak ne sme mešati, naprava pa vključuje toplotni izmenjevalnik, kot je prikazano v nadaljevanju na sliki 21. Zrak po ceveh poganjata dva ventilatorja, katerih moč lahko spreminjamo (od 30 % do 100 %).

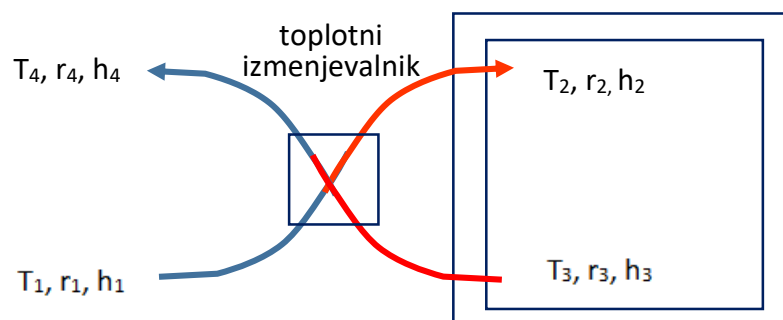


Slika 20: Prezračevalna naprava na gimnaziji Ravne na Koroškem

6.2.1 IZKORISTEK PREZRAČEVALNE NAPRAVE

Učinkovitost vračanja toplote nam pove, kolikšen delež energije, ki bi se s prezračevanjem sicer zgubila v okolico, nam uspe zadržati v zgradbi. Obstajajo različni načini določanja učinkovitosti vračanja toplote.

Na sliki 21 je prikazana shema prezračevanja z vračanjem toplote. Zunanji zrak s temperaturo T_1 vstopa v toplotni izmenjevalnik, kjer sprejme toploto od zraka, ki teče iz prostora. Vstopajoči zrak se segreje do temperature T_2 , izstopajoči zrak iz prostora pa se v toplotnem izmenjevalniku ohladi od temperature T_3 na temperaturo T_4 .



Slika 21: Shema prezračevanja z vračanjem toplote

6.2.1.1 Temperaturni izkoristek

Proizvajalci prezračevalnih naprav z vračanjem toplote navadno podajo temperaturni izkoristek, ker je največji

$$\eta_T = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1}, \quad (13)$$

kjer je:

T_1 – temperatura zunanjega zraka,

T_2 – temperatura svežega zraka, ki vstopa v prostor in

T_3 – temperatura notranjega zraka.

Temperaturni izkoristek bi bil enak 100 %, če bi se vstopajoči zrak v toplotnem izmenjevalniku segrel do temperature zraka v prostoru.

Pri tem izkoristku je upoštevan samo suh zrak, ne pa vodna para. V zimskem času vsebuje zrak v prostoru navadno več vodne pare kot zunanji zrak, zaradi tega z onesnaženim zrakom odteče iz prostora več vodne pare kot pa je priteče s svežim. Vodna para se v prostoru nadomešča z izhlapevanjem vode, za to potrebna energija pa se z odpadnim zrakom izgublja v okolico, kar pa pri temperaturnem izkoristku ni upoštevano.

6.2.1.2 Energijski izkoristek

Pri energijskem (entalpijskem) izkoristku vzamemo namesto temperatur entalpije. Na ta način upoštevamo tudi vodno paro.

$$\eta_H = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1}, \quad (14)$$

kjer je:

h_1 – entalpija zunanjega zraka (kJ/kg),

h_2 – entalpija svežega zraka, ki vstopa v prostor in

h_3 – entalpija zraka v prostoru.

Ta izkoristek pove, kolikšen del toplote, ki jo iz prostora odnese onesnažen zrak, se vrne v prostor s svežim. Proizvajalci ga redko navajajo, ker je nižji od temperaturnega izkoristka in odvisen vlažnosti zunanjega ter notranjega zraka.

Pri nekaterih toplotnih izmenjevalnikih prezračevalnih naprav si odtekajoči in pritekajoči zrak izmenjata poleg toplote še vodno paro, zato je energijski (entalpijski) izkoristek teh višji.

6.2.2 PREZRAČEVALNA NAPRAVA NA GIMNAZIJI RAVNE

Na Gimnaziji Ravne na Koroškem so pred nekaj leti vgradili več centralnih prezračevalnih naprav z vračanjem toplote. Na vsako prezračevalno napravo so priključene 4 učilnice.

V prezračevalne naprave so vgrajeni toplotni izmenjevalniki ETA 2400 F 16 proizvajalca Ruck Ventilatoren GmbH. Osnovni podatki izmenjevalnika so zbrani v tabeli 7.

Tabela 7: Osnovni podatki toplotnih izmenjevalnikov ETA 2400 F 16

največji pretok zraka	2830 m ³ /h
priporočen največji pretok	2400 m ³ /h
skupna moč ventilatorje	1650 W
izkoristek	do 85 %
izmenjava vodne pare	ne

Po podatkih proizvajalca je izkoristek izmenjevalnika do 85 %, podrobnosti pa niso navedene. Ker so na en izmenjevalnik vezane 4 učilnice, ja največji priporočen pretok zraka skozi eno učilnico do 600 m³/h. Pri tolikšnem pretoku sta ventilatorja že zelo glasna, zato je sprejemljiv pretok do okrog 400 m³/h.



Slika 22: Toplotni izmenjevalnik ETA 2400 F 16 (Vir: ruck.eu)

6.3 MERJENJE IZKORISTKA TOPLOTNEGA IZMENJEVALNIKA ETA 2400

Z merjenji smo želeli preveriti učinkovitost toplotnih izmenjevalnikov, ki jih imamo na šoli, v različnih pogojih. Za ta namen smo izdelali preprost merilni sistem, na katerega smo priključili merilnike temperature in vlažnosti.

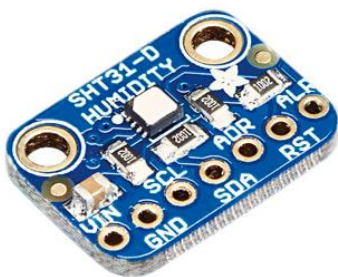
Merili smo temperaturo in vlažnost zraka na obeh vhodih in izhodih izmenjevalnika. Z uporabo enačb 9 do 12 najprej izračunamo entalpijo zraka na vseh štirih mestih in nato z enačbama 13 in 14 temperaturni η_T ter entalpijski η_H izkoristek

$$\eta_T = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1},$$

$$\eta_H = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1}.$$

6.3.1 Merilni sistem za merjenje temperature in vlažnosti

V vsako priključno cev izmenjevalnika smo vstavili merilnik temperature in relativne vlažnosti. Uporabili smo merilnike SHT 31-D proizvajalca Sensirion. Natančnost merilnika je 0,3 % za merjenje temperature in 2 % za merjenje relativne vlažnosti.



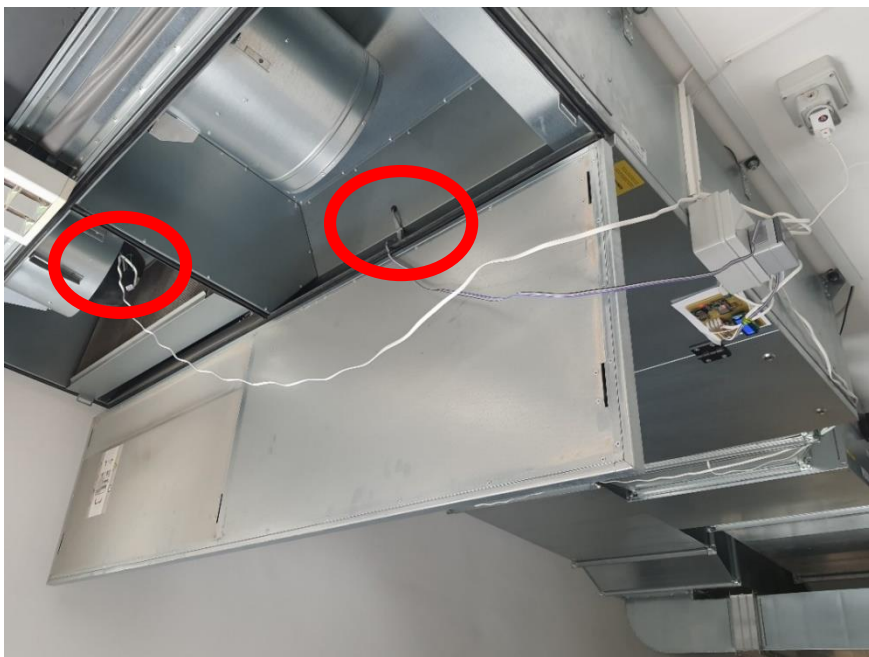
Slika 23: Merilnik SHT 31-D (Vir: reichelt.de)

Merilnike smo s serijsko povezavo I²C povezali z mikrokontrolerjem ESP32, ki je izmerjene podatke pošiljal na spletno stran ThingSpeak.com.

Tiskano vezje celotnega merilnega sistema je izdelal laborant za fiziko Alojz Roter.



Slika 24: Merilni sistem za merjenje vlažnosti in temperature



Slika 25: Senzorja za pritekajoči in odtekajoči zrak

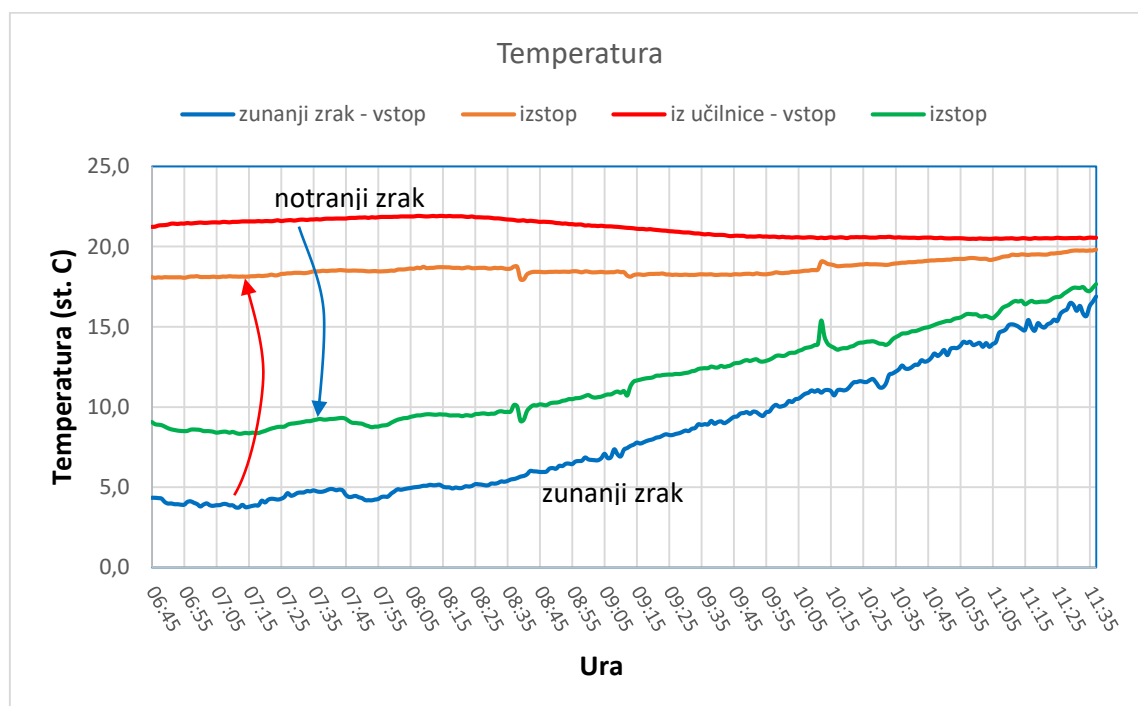
6.3.2 Primeri meritev

Opravili smo več meritev pri različnih pogojih. Zaradi zaprtja šol smo zamudili zimski čas, vendar je bilo v marcu, ko smo opravljali meritve, vsaj zjutraj še precej hladno. V nadaljevanju bomo prikazali meritve za 5. in 9. marec.

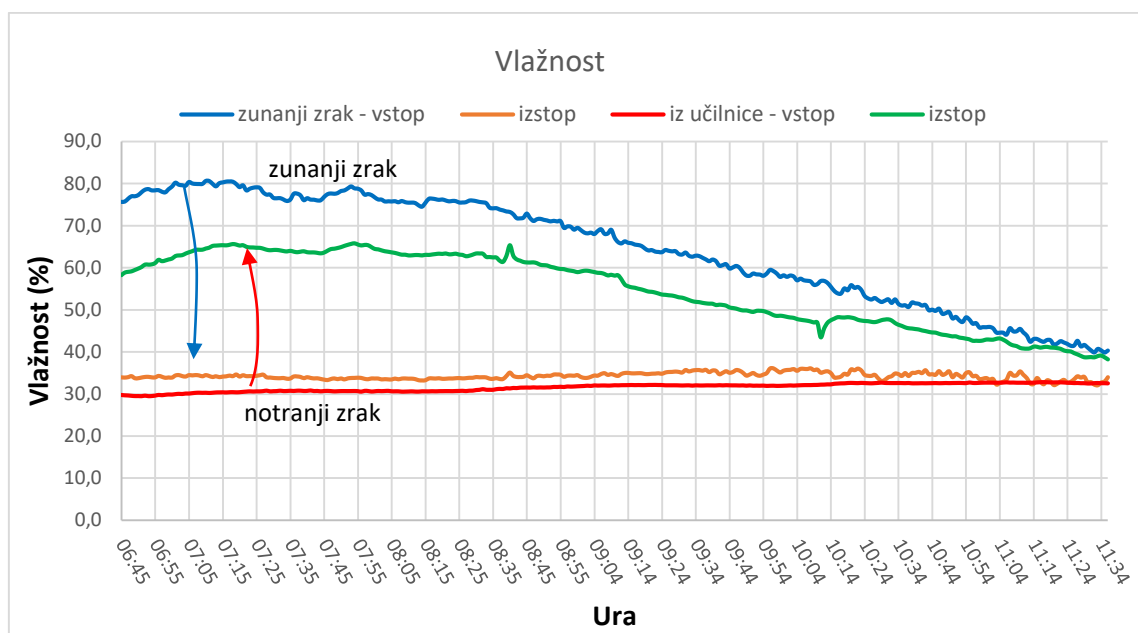
Na slikah 26 in 27 je prikazano časovno spreminjanje temperature in vlažnosti za oba vhoda in izhoda toplotnega izmenjevalnika za 5. marec. Med meritvijo smo spreminjali moč motorjev ventilatorjev od 40 % do 80 %.

Zunanja temperatura je bila zjutraj nizka, a je zaradi sončnega vremena hitro naraščala. Prezračevanje je vplivalo na temperaturo v učilnici, ki se je med merjenjem znižala.

Relativna vlažnost zunanjega zraka je bila ta dan precej velika, zrak v učilnici pa zelo suh, ker v njej ni bilo dijakov.

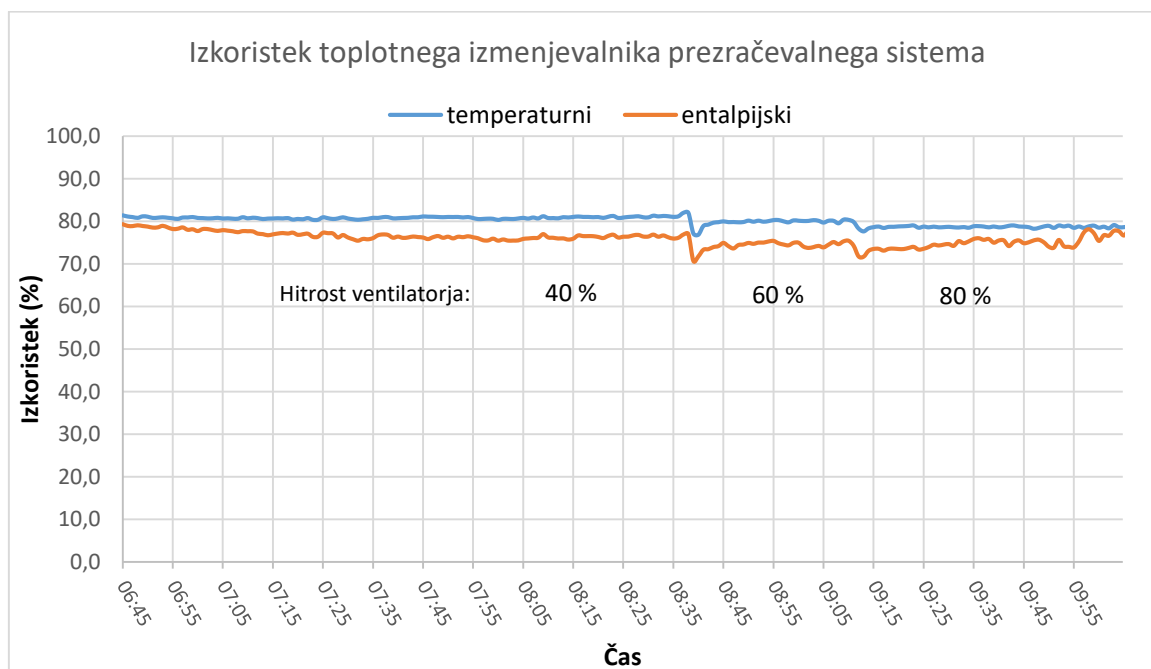


Slika 26: Temperatura zraka na vstopu in izstopu iz toplotnega izmenjevalnika



Slika 27: Relativna vlažnost zraka na vstopu in izstopu iz toplotnega izmenjevalnika

Z izmerjenimi temperaturami in vlažnostmi smo izračunali oba izkoristka toplotnega izmenjevalnika, ki sta prikazana na sliki 28.

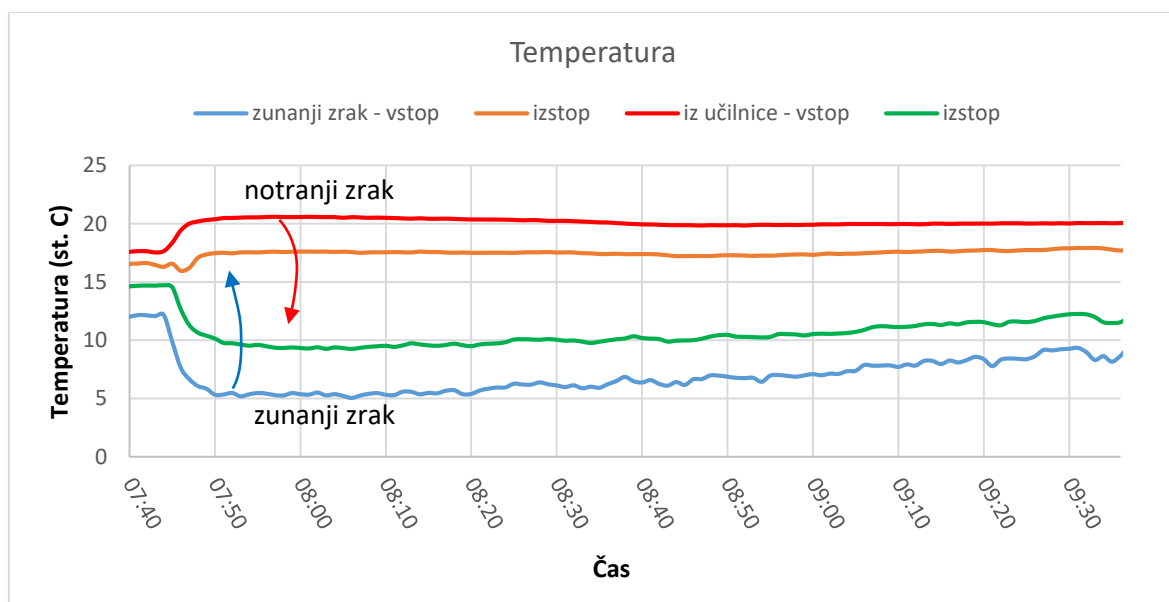


Slika 28: Izkoristek prezračevalne naprave za 8. marec

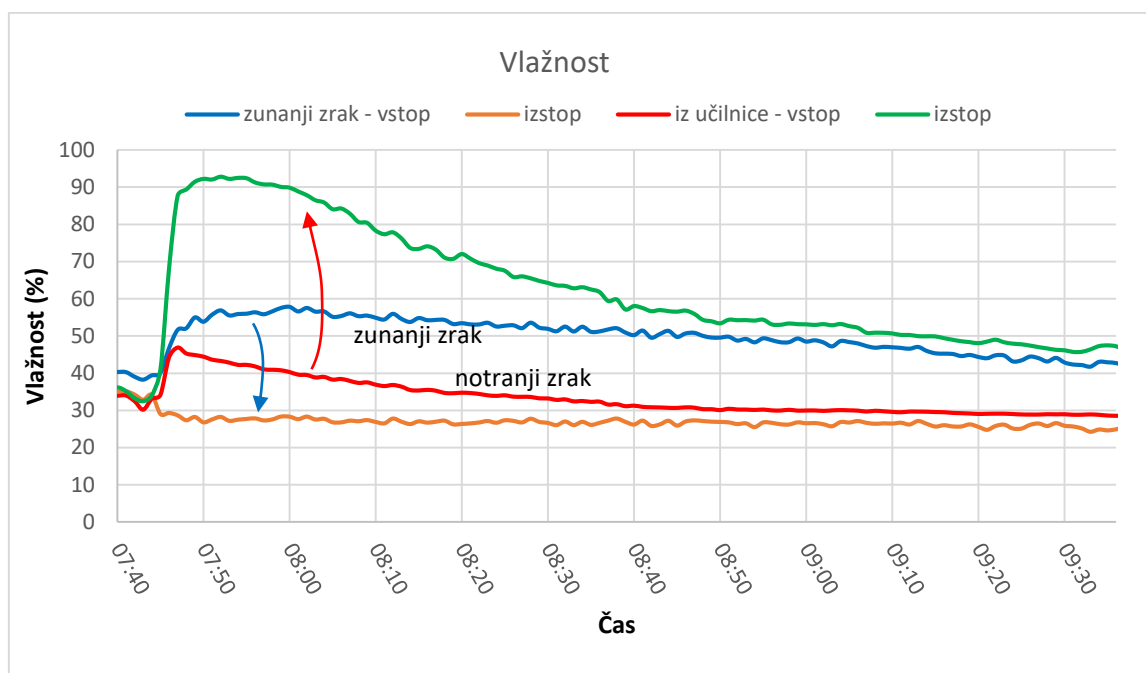
Ugotovili smo, da:

- je temperaturni izkoristek okrog 80 %, kar je blizu podatka proizvajalca (do 85 %),
- je energijski izkoristek za okrog 5 % nižji od temperaturnega,
- se oba izkoristka zmanjšata, če povečamo pretok zraka.

Na slikah 29 in 30 so prikazane meritve za 11. marec. Relativna vlažnost zunanjega zraka je bila kljub nizki temperaturi samo nekaj nad 50 %, kar pomeni, da je vseboval zelo malo vodne pare. Vlažnost zraka v učilnici smo povečali z vrenjem vode, ker dijakov ni bilo. Zaradi dotoka suhega zraka od zunaj in nezadostnega vira vodne pare se je po vklopu prezračevanja vlažnost zraka v učilnici hitro zmanjševala.

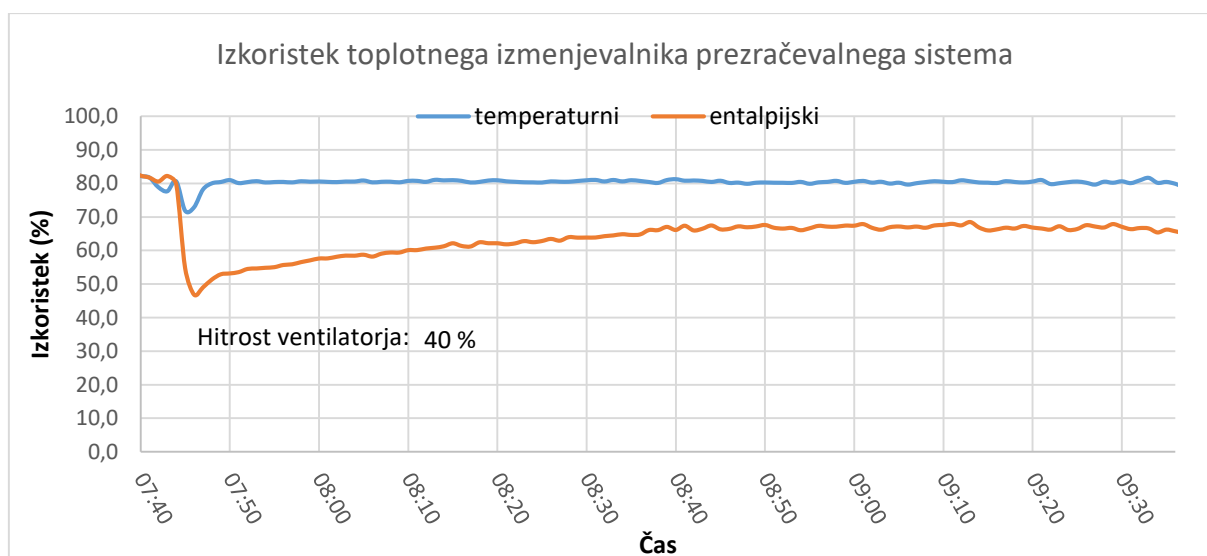


Slika 29: Temperatura zraka na vstopu in izstopu iz toplotnega izmenjevalnika



Slika 30: Relativna vlažnost zraka na vstopu in izstopu iz toplotnega izmenjevalnika

Izračunana izkoristka toplotnega izmenjevalnika za ta 11. marec sta prikazana na sliki 31.



Slika 31: Izkoristek prezračevalne naprave za 11. marec

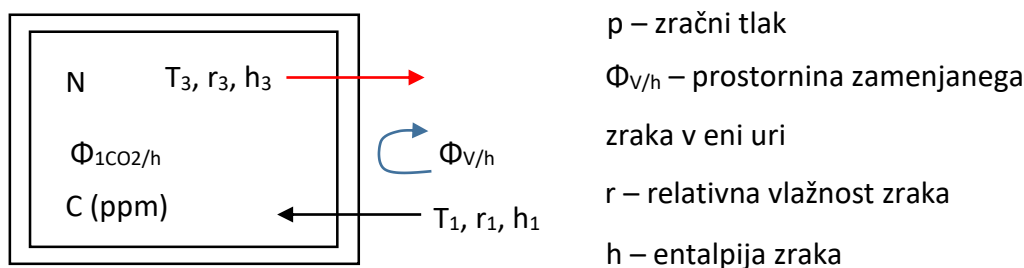
Temperaturni izkoristek je bil okrog 80 %, kar je primerljivo s prej opisano meritvijo. Bistveno nižji je v tem primeru energijski izkoristek, še posebej na začetku merjenja, ko je bila vlažnost zraka v učilnici višja.

Na slikah 30 in 31 vidimo, da se je z zmanjševanjem relativne vlažnosti notranjega zraka večal izkoristek naprave.

7. OCENA ENERGIJSKIH IZGUB PRI PREZRAČEVANJU

Za ohranjanje čistega zraka je potrebno prostore neprestano zračiti, še posebej to velja za prostore v katerih je veliko ljudi, npr. učilnice. V 2. poglavju smo ocenili potrebno količino zraka, ki se mora zamenjati v učilnici vsako uro, da vsebnost ogljikovega dioksida ne bo presegla mejne vrednosti. S prezračevanjem so povezane energijske izgube. V zimskem času teče topel zrak iz prostora, hladen zrak, ki ga nadomešča, pa je potrebno segreti.

V nadaljevanju bomo ocenili energijske izgube pri prezračevanju učilnice (slika 32).



Slika 32: Izmenjava zraka

Primer: Vzemimo, da je v učilnici $N = 25$ dijakov in vsak izdiha $\Phi_{1CO2/h} = 16$ litrov ogljikovega dioksida na uro. Mejna vrednost ogljikovega dioksida naj bo $C = 1500$ ppm, kar je največja dovoljena vsebnost. Za zunanjo temperaturo bomo vzeli povprečno dnevno temperaturo zraka v zimskem času, za relativno vlažnost pa v učilnici 40 % in zunaj 50 %. Podatki so zbrani v tabeli 8.

Tabela 8: Podatki za računanje izgub zaradi prezračevanja

učilnica					zunaj		
N	$\Phi_{1CO2/h}$ (l/h)	C(ppm)	$T_3(^{\circ}C)$	$r_3(\%)$	$T_1(^{\circ}C)$	$r_1(\%)$	p(mbar)
25	16	1500	22	40	2	50	965

Z grafa na sliki 4 odčitamo potreben pretok zraka za enega dijaka na uro za podano mejno vrednost vsebnosti C, dobimo $15 \frac{m^3}{h}$. Potreben pretok zraka v eni uri za učilnico je

$$\Phi_{V/h} = N \cdot 15 \frac{m^3}{h} = 375 \frac{m^3}{h}.$$

S plinsko enačbo izračunamo maso suhega zraka, ki se zamenja v eni uri. Za temperaturo vzamemo srednjo vrednost.

$$m_{z/h} = \frac{p\phi_{V/h}M_z}{RT} = \frac{96500 \frac{N}{m^2} 375 \frac{m^3}{h} 29 \frac{g}{mol}}{8,31 \frac{J}{Kmol} (12 + 273)K} = 443 \frac{kg}{h}$$

S Tetens-ovo enačbo (11) izračunamo nasičeni parni tlak vodne pare ter z enačbo (10) še delni tlak vodne pare

$$p_{n1} = 6,1078 e^{\frac{12,27T_1}{T_1+273,3}} = 7,1 \text{ mbar}, \quad p_{n3} = 26,4 \text{ mbar},$$

$$p_{v1} = r_1 p_{n1} = 3,5 \text{ mbar}, \quad p_{v3} = r_3 p_{n3} = 10,6 \text{ mbar}.$$

Za računanje entalpije vlažnega zraka uporabimo enačbi 9 in 12

$$x_1 = \frac{M_v}{M_z} \frac{p_{v1}}{p - p_{v1}} = 2,3 \text{ ‰}, \quad x_3 = 6,9 \text{ ‰},$$

$$h_1 = c_{pz}T_1 + x_1(q_i + c_{pv}T_1) = 7,7 \frac{kJ}{kg}, \quad h_3 = 39,6 \frac{kJ}{kg}.$$

Potrebna toplota za segrevanje hladnega zraka je enaka razliki entalpij zraka v učilnici in zunanjega zraka

$$Q = m_z(h_3 - h_1).$$

Enačbo delimo s časom in dobimo moč, ki je potrebna za dogrevanje zraka

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{m_z}{t}(h_3 - h_1) = m_{z/h}(h_3 - h_1).$$

V našem primeru dobimo

$$P = 443 \frac{kg}{h} \left(39,6 \frac{kJ}{kg} - 7,7 \frac{kJ}{kg} \right) = 443 \frac{kg}{3600s} 31,9 \frac{kJ}{kg} = 3,9 \text{ kW}.$$

Zaradi izgub pri prezračevanju se moč ogrevanja učilnice poveča za 3,9 kW.

Ocenimo še potrebno moč dogrevanja zraka, če uporabljamo prezračevalno napravo z vračanjem toplote. V tem primeru priteka v učilnico že segret zrak s temperaturo T_2 in entalpijo h_2 in ne hladen zrak s temperaturo T_1 ter entalpijo h_1 (slika 15).

Potrebna moč dogrevanja je zato

$$P_1 = m_{z/h}(h_3 - h_2),$$

$$P_1 = \left(1 - \frac{(h_2 - h_1)}{(h_3 - h_1)}\right) m_{z/h}(h_3 - h_1) = (1 - \eta_H)P,$$

kjer je η_H energijski (entalpijski) izkoristek toplotnega izmenjevalnika.

Pri 60 % energijskem izkoristku bi bila potrebna moč za dogrevanje zraka

$$P_1 = (1 - 0,6)3,9 \text{ kW} = 1,56 \text{ kW}.$$

Upoštevati moramo še moč ventilatorjev. Za pretok $375 \text{ m}^3/\text{h}$ skozi eno učilnico morata motorja ventilatorjev delovati s približno 75 % močjo, to je 1,2 kW. Pri izgubah ne upoštevamo motorja vhodnih ventilatorjev, ker segrevata zrak, ki priteka v učilnico. Na en toplotni izmenjevalnik so vezane štiri učilnice, zato so dodatne izgube zaradi motorjev ventilatorjev

$$P_m = \frac{1,2 \text{ kW}}{2 \cdot 4} = 0,15 \text{ kW}.$$

Skupne izgube pri prezračevanju z vračanjem toplote so v tem primeru

$$P_1 = 1,56 \text{ kW} + 0,15 \text{ kW} = 1,7 \text{ kW},$$

kar je približno polovica moči, ki je potrebna za dogrevanje pri prezračevanju z odpiranjem oken.

Izračunajmo izgubljeno energijo zaradi prezračevanja brez vračanja toplote v 6 mesecih za eno učilnico

$$Q = 6 \text{ mes.} \cdot 20 \frac{\text{dni}}{\text{mes.}} \cdot 6 \frac{\text{h}}{\text{dan}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot 1,7 \text{ kW} \cdot 10,1 \text{ GJ} = 2,8 \text{ MWh}.$$

Na šoli ima vgrajeno prezračevanje 20 učilnic, tako da bi bile skupne izgube pri ustreznem prezračevanju z odpiranjem oken okrog 56 MWh, kar predstavlja približno četrtno celotne porabe energije za ogrevanje na naši šoli v kurilni sezoni (oktober – marec). Z uporabo prezračevanja z vračanjem toplote bi lahko prihranili vsaj polovico te energije, torej 28 MWh, kar je več kot 10 % celotne porabe.

8. ZAKLJUČEK

V nalogi smo ugotovili, da je zračenje učilnic pomembno, saj brez ustreznega zračenja vsebnost ogljikovega dioksida naraste močno čez priporočeno vrednost (1500 ppm).

Na začetku smo ocenili, da človek v mirovanju izdiha povprečno 14,5 l ogljikovega dioksida na uro, z meritvami pa smo ugotovili, da dijak med poukom odda več kot 16 l, med povečano aktivnostjo (pisanje testa) pa tudi več kot 19 l ogljikovega dioksida na uro, kar je ovrglo našo prvo hipotezo.

Prav tako smo spoznali, da le z odpiranjem oken med odmori ne moremo ustrezno prezračiti razredov, kar je bila naša druga hipoteza. Za ohranitev koncentracije ogljikovega dioksida pod mejno vrednostjo 1500 ppm bi bilo treba razred dodatno zračiti med uro.

Z uporabo prezračevalne naprave je zagotovitev ustrezne kvalitete zraka mogoča. Ugotovili smo, da pri pretoku $15 \text{ m}^3/\text{h}$ na osebo vsebnost ogljikovega dioksida ne preseže največje dovoljene vrednosti, kar potrjuje našo hipotezo, da za ustrezno zračenje zadošča manjši pretok od priporočenega ($30 \text{ m}^3/\text{h}$ na osebo).

Meritve so prav tako potrdile naše domneve, da so energijske izgube pri prezračevalni napravi z vračanjem toplote odvisne od vsebnosti vodne pare v notranjem in zunanjem zraku. Ugotovili smo, da je energijski izkoristek toplotnega izmenjevalnika naše prezračevalne naprave slab (okrog 60 %), če je v učilnici normalna vlažnost, zunanji zrak pa je suh.

Izkazalo se je tudi, da je energijski izkoristek prezračevalnih naprav res nižji od tovarniških podatkov, saj je v le-teh naveden temperaturni izkoristek, ki ne upošteva izgub toplote zaradi razlik v vlažnosti.

Spoznali smo, da se izkoristek toplotnega izmenjevalnika manjša z večanjem pretoka zraka, a razlike niso velike. Hipotezo, da je izkoristek bistveno odvisen od pretoka zraka smo torej ovrgli.

Potrdili pa smo zadnjo hipotezo, ki je najpomembnejša ugotovitev te naloge: energijske izgube zaradi prezračevanja predstavljajo pomemben del energije, ki jo porabimo za ogrevanje šole.

Z uporabo prezračevalne naprave z vračanjem toplote lahko te izgube zmanjšamo za več kot 10 %.

To pomeni, da bi s pravilnim prezračevanjem, ki je koristno za zdravje ljudi, tudi privarčevali energijo in s tem skrbeli za okolje.

9. VIRI IN LITERATURA

BASAJ, Iztok Jože. 2012. *Prezračevanje z vračanjem toplote (rekuperacija) v šolah pomeni velik prihranek energije pri ogrevanju* [online]. [citirano 2. feb. 2021; 20:13]. Dostopno na spletnem naslovu: http://www.fa.uni-lj.si/filelib/8_konzorcijph/agregat_energetik_91_2.pdf

BILBAN, Marjan. 2016. *Onesnaževala zraka* [online]. [citirano 8. feb. 2021; 17:31]. Dostopno na spletnem naslovu: https://www.zvd.si/media/medialibrary/2016/01/DV-042014_Onesnazevala_zraka.pdf

INOVEKS d. o. o., Inštitut za obnovljive vire energije in učinkovito rabo eksergije. 2014. *Kakovost zraka v prostoru* [online]. [citirano 12. feb. 2021; 18:03]. Dostopno na spletnem naslovu: https://www.inoveks.si/images/inOVEinURE/strokovniprispevki/09_Kakovost_zraka_v_prostoru.pdf

MEDVED, Sašo. 2010. *Gradbena fizika*. Ljubljana: Fakulteta za arhitekturo, 2010. ISBN 978-961-6823-03-6.

LAMPINEN, Markku J. 2001. *Thermodynamics of humid air* [online]. [citirano 8. feb. 2021; 17:46]. Dostopno na spletnem naslovu: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/132918/mod_resource/content/3/Thermodynamics_of_humid_air.pdf

SEVER, Robert. 2018. *Več svežega zraka v poslovne prostore* [online]. [citirano 13. jan. 2021; 17:12]. Dostopno na spletnem naslovu: https://www.zvd.si/media/medialibrary/2019/05/Zavod_za_varstvo_pri_delu_RDV_1_2018_Vec_svezega_zraka_v_poslovne_prostore.pdf

TETENS, O. 2011. *Tetens equation* [online]. [citirano 10. feb. 2021; 19:20]. Dostopno na spletnem naslovu: https://en.wikipedia.org/wiki/Tetens_equation

10. PRILOGE - PROGRAMI

Priloga 1: Preračunavanje prostorninskega deleža ogljikovega dioksida iz delne gostote in obratno.

tlak (mbar)	T (OC)	ppm	g/m ³
965	22	1000	2,17
Izračuna:	ppm	g/m³	
	1253	1,732	

Priloga 2: Računanje časovne odvisnosti prostorninskega deleža ogljikovega dioksida v prostoru brez zračenja

tlak (mbar)	T (OC)	V (m ³)	N (število)
965	22	165	25
C_z (ppm)	m_{1/h} (g/h)		
400	26		
Izračuni:	kz (g/m³)		
	0,693		

Priloga 3: Potrebno zračenje v odmoru, da ne presežemo mejne vrednosti ogljikovega dioksida

T (°C)	število - N	prostornina (m ³)	tlak (mbar)
22	20	165	965
Zunanji zrak		Mejna vrednost	
C0 (ppm)	k0 (g/m3)	C (ppm)	k (g/m3)
400	0,693	1000	1,73
		1200	2,08
		1400	2,42
		1500	2,60
		1600	2,77
		1800	3,12
		2000	3,46
	(l/h)	(l/h)	(l/h)
	16	17	18
mejna			
C (ppm)	Potrebna zamenjava zraka (m³/šolsko uro)		
1000	400	425	450
1200	300	319	338
1400	240	255	270
1500	218	232	245
1600	200	213	225
1800	171	182	193
2000	150	159	169