

UDK: 614.71:551.524:681.325(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2301043T

NAUČNI RAD

Oblast: Zaštita životne sredine

Primljen: 14.02.2023.

Prerađen: 20.03.2023.

Prihvaćen: 21.03.2023.

**MERENJE KVALITETA VAZDUHA I TERMALNOG KOMFORA U
KANCELARIJAMA PRIMENOM LOW-COST
SENZORA I MONITORA**

**AIR QUALITY AND THERMAL COMFORT MEASUREMENTS IN
THE OFFICES USING THE LOW-COST SENSORS AND MONITORS**

Viša Tasić^{1a}, Vladan Kamenović^{1b}, Bojan Radović^{1c},
Nikola Mišić^{2a}, Ivan Zlatković^{1d}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, E-mail: visa.tasic@irmbor.co.rs

²Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu u Nišu

Orcid:

^{1a} <https://orcid.org/0000-0001-6710-6529>, ^{1b} <https://orcid.org/0000-0001-9476-5378>,

^{1c} <https://orcid.org/0000-0003-4884-1418>, ^{1d} <https://orcid.org/0009-0004-3471-7787>

^{2a} <https://orcid.org/0000-0003-2314-4851>

Izvod

Subjektivni doživljaj sredine u kojoj ljudi borave definiše komfor te sredine. Elementi komfora sredine su: kvalitet vazduha (vazdušni komfor), toplotni komfor, vizuelni komfor i zvučni komfor. Kvalitet vazduha u prostoriji u kojoj borave ljudi može značajno da utiče na njihovu koncentraciju, tj. sposobnost za rad i učenje. Merenje koncentracije CO₂ u prostoriji koristi se kao indikator ventilacije, odnosno kao indikator kvaliteta vazduha u posmatranoj prostoriji. Toplotni komfor definiše stanje zadovoljstva termalnim okruženjem. Toplotni komfor je ostvaren kada su svojstva sredine takva da obezbeđuju odavanje toplote tela u granicama ugodnosti. U ovom radu prikazan je deo rezultata merenja kvaliteta vazduha i termalnog komfora u odabranoj kancelariji u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor u periodu od 2020. do 2022. godine. Na osnovu analize rezultata merenja utvrđeno je da je kvalitet vazduha u posmatranoj kancelariji bio zadovoljavajući u proseku više od 90% radnog vremena, a termalni komfor u proseku oko 60% radnog vremena.

Ključne reči: merenje, ugljen-dioksid, kvalitet vazduha, termalni komfor, low-cost senzori

Abstract

The subjective experience of the environment where people live defines the comfort of that environment. The elements of environmental comfort are the air quality, thermal comfort, visual comfort, and sound comfort. The air quality in the room where people stay can significantly affect their concentration, i.e., the ability to work and study. The concentration of CO₂ in the room is used as an indicator of ventilation, that is, as an indicator of the air quality in the observed room. The thermal comfort defines a state of satisfaction with the thermal environment. The thermal comfort is achieved when the environment properties are such that they ensure the release of

body heat within the comfortable limits. This paper presents a part of the air quality and thermal comfort measurement results in the selected office in the Mining and Metallurgy Institute Bor from 2020 to 2022. Based on the analysis of measurement results, it was determined that the air quality in the selected office was satisfactory on an average of more than 90% of the working time, and the thermal comfort on an average of about 60% of the working time.

Keywords: *measurement, carbon dioxide, air quality, thermal comfort, low-cost sensors*

1. UVOD

Subjektivni doživljaj sredine u kojoj ljudi borave definiše komfor te sredine. Komfor sredine čine: vazdušni komfor (kvalitet vazduha), toplotni komfor, vizuelni komfor i zvučni komfor.

1.1. Vazdušni komfor

Za oblasti u kojima nema većih industrijskih postrojenja i gde je nizak nivo saobraćaja koncentracija CO₂ u spoljašnjem vazduhu obično iznosi od 350 do 400 ppm [1]. U industrijskim oblastima i pored prometnih saobraćajnica ove vrednosti mogu biti i znatno više. Dominantan izvor CO₂ u prostorijama u kojima borave ljudi je njihovo disanje [2]. Porast koncentracije CO₂ u prostoriji u odnosu na nivo CO₂ u spoljašnjem vazduhu dobar je pokazatelj ventilacije posmatrane prostorije. Iz tog razloga se koncentracija CO₂ u prostoriji koristi kao indikator kvaliteta unutrašnjeg vazduha.

Koncentracija CO₂ u unutrašnjem prostoru može da varira od nekoliko stotina do preko 1000 ppm, posebno ako se radi o prostorijama sa velikim brojem ljudi koje u njima borave u dužem vremenskom periodu u uslovima ograničene ventilacije [2, 3]. Prema ASHRAE standardu [4] minimalna vrednost potrebnog nivoa provetrenosti prostorije je 8 l/s po osobi, a preporučena vrednost iznosi 10 l/s. Intenzitet emitovanja CO₂ kod prosečne osobe značajno zavisi od intenziteta njene fizičke aktivnosti. Smatra se da osoba koja sedi u zatvorenom prostoru generiše oko 0.3 dm³ CO₂ u jednoj sekundi [5]. Pri projektovanju i proceni energetske karakteristika zgrada, kvaliteta unutrašnjeg vazduha, osvetljenja i akustike objekata koristi se standard SRPS EN 16798-1:2019 [6]. Prema ovom standardu kvalitet unutrašnjeg vazduha se kategoriše na osnovu razlika između unutrašnje i spoljašnje (I/O) koncentracije CO₂. Definisane su kategorije kvaliteta vazduha, prikazane u tabeli 1, pri čemu je I i II kategorija preporučena za školske zgrade i objekte za stanovanje.

Tabela 1. Kategorije vazduha prema preporučenim I/O razlikama koncentracija CO₂[5]

Kategorija	Odgovarajuća razlika koncentracije CO ₂ (ppm) u odnosu na koncentraciju u spoljašnjem vazduhu
I	550
II	800
III	1350
IV	>1350

Merenjem koncentracija CO₂ u prostoriji moguće je odrediti stepen ventilacije tog prostora. U ovom radu prikazani su rezultati merenja koncentracija CO₂ u unutrašnjem vazduhu u IRM Bor u periodu od 2020. do 2022. godine. Merenje koncentracija CO₂ vršeno je prenosnim monitorima PAQMAN 2020 [7] i IC-meter [8] koji za tu namenu koriste low-cost senzorski modul SenseAir S8, NDIR tipa [9].

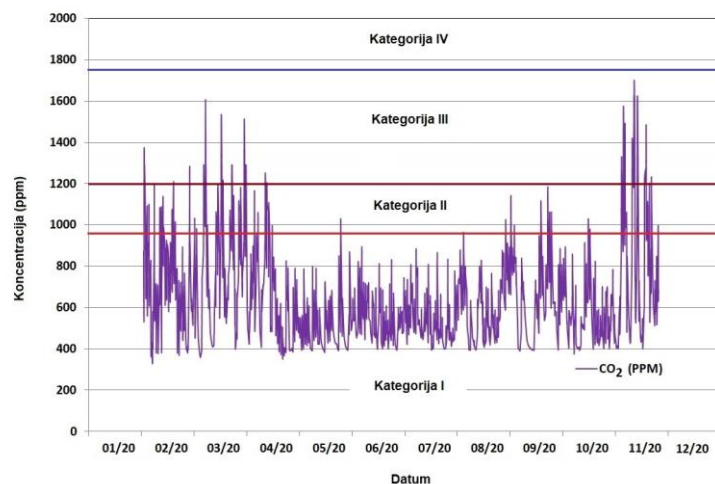
1.2. Termalni komfor

U standardu ISO 7730:2005 [5] definisani su uslovi toplotnog komfora u toku grejne i negrejne sezone. Smatra se da je u toku grejne sezone, za prostorije u kojima borave ljudi, najpovoljnija temperatura iz opega od 20°C do 24°C, uz relativnu vlažnost vazduha iz opsega od 30% do 70%.

U ovom radu prikazani su rezultati merenja temperature i relativne vlažnosti vazduha u odabranoj kancelariji u IRM Bor u periodu od 2020. do 2022. godine. Merenje je vršeno prenosnim monitorima PAQMAN 2020 i IC-meter koji za merenje temperature i relativne vlažnosti vazduha koriste low-cost senzore DHT 22 [10] i SHT21 [11], respektivno.

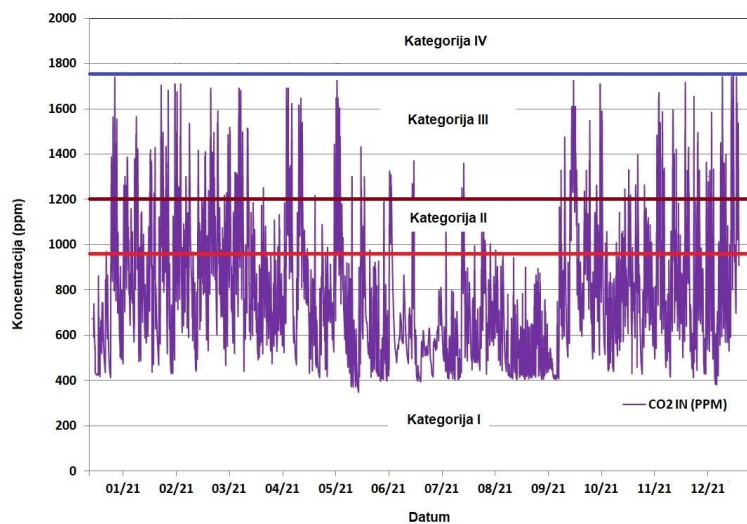
2. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

Za merenje komfora sredine u IRM Bor odabrana je kancelarija površine 20 m², zapremine 60 m³, sa površinom prozora (PVC) od 4 m². Prozori kancelarije okrenuti su ka jugu. U periodu merenja u kancelariji je uglavnom boravila jedna osoba, i to u periodu od 7 do 15 časova. Vrata kancelarije su u periodu merenja bila zatvorena. U kancelariji ne postoji klima uređaj, tako da se provetranje vrši otvaranjem prozora. Tokom grejnog perioda godine kancelarija se zagreva pomoću radijatora iz sistema centralnog grejanja. U toku negrejne sezone uobičajeno je da se prozori drže poluotvoreni u toku radnog vremena, dok se u grejnoj sezoni prozori otvaraju povremeno, po potrebi. Na slici 1 prikazan je vremenski dijagram srednjih satnih koncentracija CO₂ izmerenih u odabranoj kancelariji u 2020. godini.

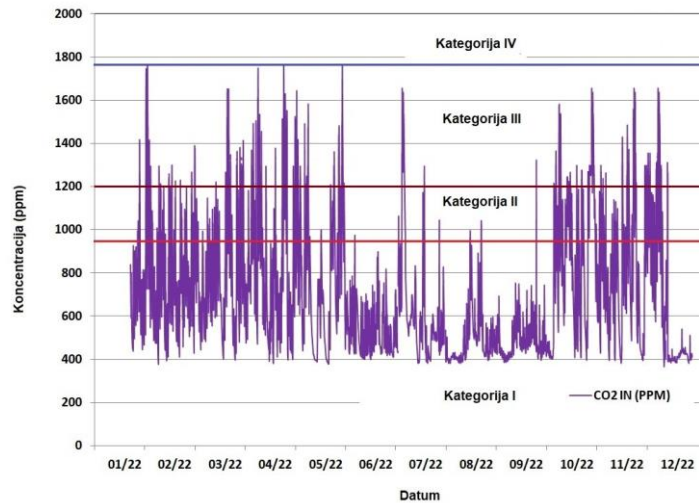


Sl. 1. Prikaz rezultata merenja koncentracije CO₂ u 2020. godini

Na slikama 2 i 3 prikazane su srednje satne koncentracije CO₂ izmerene u kancelariji u toku 2021. i 2022. godine.

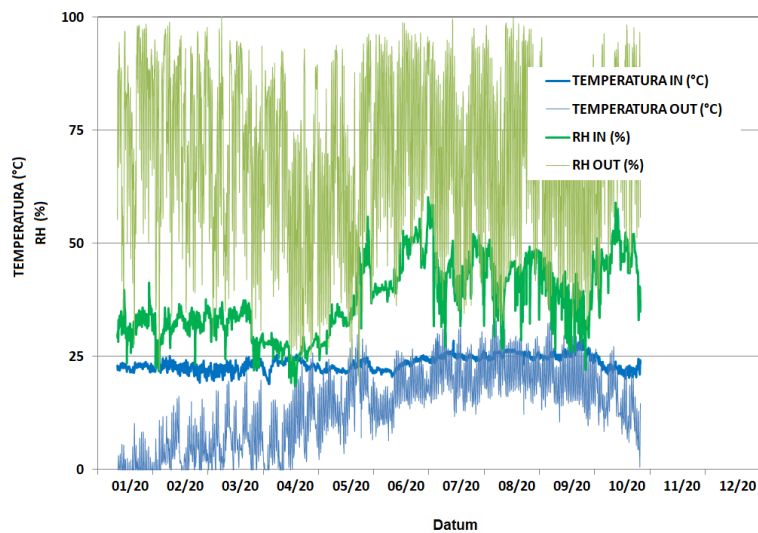


Sl. 2. Prikaz rezultata merenja koncentracije CO₂ u 2021. godini

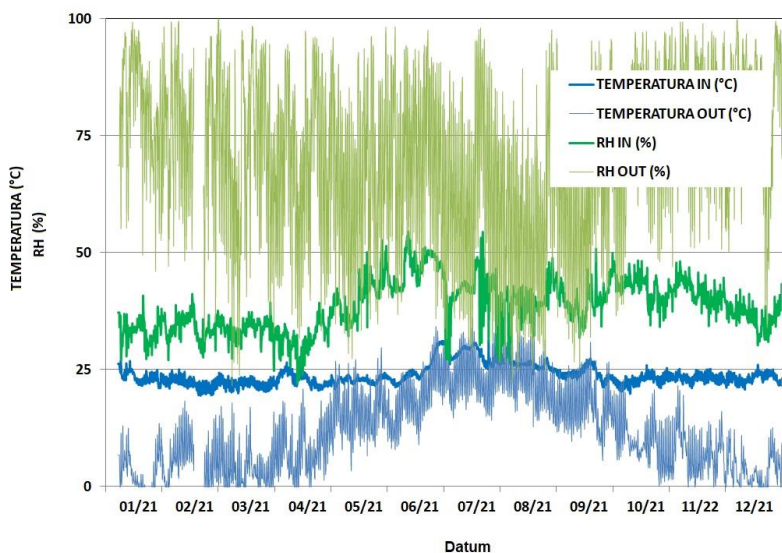


Sl. 3. Prikaz rezultata merenja koncentracije CO₂ u 2022. godini

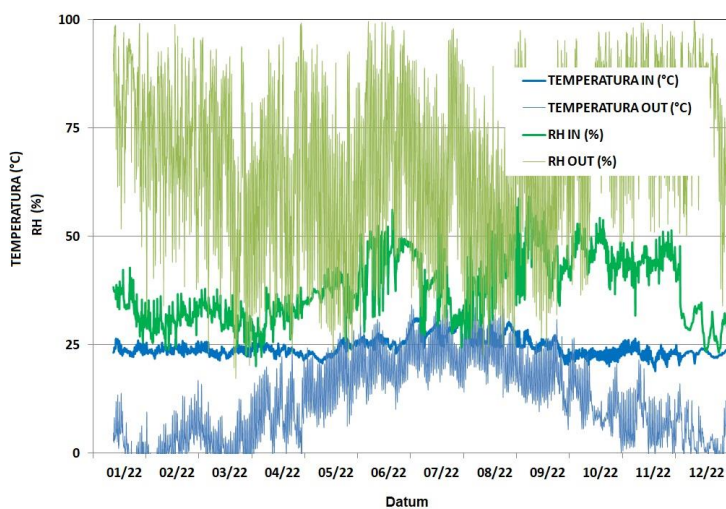
Na slikama 4, 5 i 6 prikazane su srednje satne vrednosti temperature i relativne vlažnosti vazduha izmerene u kancelariji i spoljašnjem vazduhu u periodu od 2020. do 2022. godine.



Sl. 4. Prikaz rezultata merenja temperature i relativne vlažnosti vazduha u 2020. godini



Sl. 5. Prikaz rezultata merenja temperature i relativne vlažnosti vazduha u 2021. godini



Sl. 6. Prikaz rezultata merenja temperature i relativne vlažnosti vazduha u 2022. godini

U tabeli 2 prikazane su srednje godišnje vrednosti izmerenih parametara kvaliteta vazduha i termalnog komfora u toku radnog vremena, kao i srednje vrednosti za periode grejne i negrejne sezone.

Tabela 2. Srednje vrednosti temperature, relativne vlažnosti vazduha i koncentracije CO₂ u kancelariji i spoljašnjem vazduhu u posmatranom vremenskom periodu 2020-2022. (RV - period radnog vremena, GS - grejna sezona, NGS - negrejna sezona)

Period	T in (°C)	T out (°C)	RH in (%)	RH out (%)	CO ₂ in (PPM)	CO ₂ in - 400 (PPM)
2020 RV	23.9	16.3	37.4	60.0	675.8	275.8
2021 RV	24.0	13.5	38.3	63.8	882.4	482.4
2022 RV	24.8	11.6	38.2	56.9	774.2	374.2
2020 RV GS	23.2	7.9	30.8	60.8	724.8	324.8
2021 RV GS	23.3	6.8	35.8	70.9	960.3	560.3
2022 RV GS	23.9	6.6	33.8	59.3	864.2	464.2
2020 RV NGS	24.6	21.2	41.5	60.8	652.2	252.2
2021 RV NGS	25.0	21.6	41.4	55.2	786.7	386.7
2022 RV NGS	26.3	20.1	42.0	52.9	605.7	205.7

Da bi se utvrdilo realno stanje kvaliteta vazduha i termalnog komfora u kancelariji izvršena je analiza srednje satnih vrednosti merenih parametara. Pri analizi je usvojeno da je koncentracija CO₂ u ambijentalnom vazduhu konstantna i da iznosi 400 ppm. Rezultati ove analize prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. Kvalitet vazduha i termalni komfor određen analizom srednje satnih vrednosti temperature, relativne vlažnosti vazduha i koncentracije CO₂ u kancelariji u vremenskom periodu 2020.-2022. (RV - period radnog vremena, NGS - negrejna sezona, GS - grejna sezona)

Vremenski period	Kategorija kvaliteta vazduha				Zadovoljavajući termalni komfor
	I	II	III	IV	
	%	%	%	%	%
2020 RV	88.1	8.5	3.4	-	56.2
2021 RV	62.7	21.0	16.3	-	66.1
2022 RV	71.7	17.7	10.6	-	52.3
2020 RV NGS	57.5	3.2	1.7	-	35.2
2021 RV NGS	34.1	5.2	5.7	-	48.6
2022 RV NGS	37.7	2.7	2.5	-	34.4
2020 RV GS	30.6	5.3	1.7	-	77.2
2021 RV GS	28.6	15.8	10.6	-	80.6
2022 RV GS	34.0	15.0	8.1	-	71.1

Na osnovu analize srednje satnih vrednosti koncentracije CO₂ u 2020. godini utvrđeno je da je kvalitet vazduha bio I kategorije u 88.1% radnog vremena, od toga 57.5 % u negrejnjoj i 30.6 % u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2020. godini bio II kategorije u 8.5% radnog vremena, 3.2 % u negrejnjoj i 5.3 % u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2020. godini bio je III kategorije u 3.4 % radnog vremena, od toga 1.7 % u negrejnjoj i 1.7 % u grejnoj sezoni.

Termalni komfor u kancelariji u 2020. godini je bio odgovarajući ($24^{\circ}\text{C} > T_{\text{in}} > 20^{\circ}\text{C}$, $70\% > \text{RH}_{\text{in}} > 30\%$) tokom 56.2% radnog vremena. Od toga u negrejnjoj sezoni termalni komfor bio je odgovarajući u 35.2 % radnog vremena, odnosno u 77.2 % radnog vremena u grejnoj sezoni.

Na osnovu analize srednje satnih vrednosti koncentracije CO₂ u 2021. godini utvrđeno je da je kvalitet vazduha bio I kategorije u 62.7% radnog vremena, od toga 34.1% u negrejnjoj i 28.6% u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2021. godini bio je II kategorije u 21 % radnog vremena, od toga 5.2% u negrejnjoj i 15.8% u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2021. godini bio je III kategorije u 16.3 % radnog vremena, od toga 5.7 % u negrejnjoj i 10.6 % u grejnoj sezoni.

Termalni komfor u 2021. godini je bio odgovarajući tokom 66.1% radnog vremena. U negrejnjoj sezoni termalni komfor bio je odgovarajući u 48.6 % radnog vremena, dok je u grejnoj sezoni bio odgovarajući u 80.6 % radnog vremena.

Na osnovu analize srednje satnih vrednosti koncentracije CO₂ u 2022. godini kvalitet vazduha bio je I kategorije u 71.7% radnog vremena, od toga 37.7% u negrejnjoj i 34% u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2022. godini bio II kategorije u 17.7% radnog vremena, 2.7% u negrejnjoj i 15.0% u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2022. godini bio III kategorije u 10.6% radnog vremena, od toga 2.5% u negrejnjoj i 8.1% u grejnoj sezoni.

Termalni komfor u 2022. godini je bio odgovarajući tokom 52.3% radnog vremena. U negrejnjoj sezoni termalni komfor bio je odgovarajući u 34.4% radnog vremena, odnosno u 71.1% radnog vremena u grejnoj sezoni.

Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 3 može se utvrditi da je kvalitet vazduha u posmatranoj kancelariji bio najbolji u 2020. godini. Razlog tome je pandemija COVID-19 i mere koje su tokom pandemije preduzimate, pre svega u pogledu kraćeg boravka na radnom mestu, pojačanog provetravanja prostorija, i svodenja kontakata među zaposlenima na minimum.

Kvalitet vazduha u kancelariji u 2021. i 2022. godini bio je veoma sličan, pri čemu je u 2021. godini procenat kvaliteta vazduha u III kategoriji bio najviši, 16.3% što je skoro 6% više u odnosu na procenat kvaliteta vazduha u III kategoriji u 2022. godini. Takođe, uočava se sezonski trend promene kvaliteta vazduha, naime kvalitet vazduha u kancelariji je lošiji u toku grejne sezone u odnosu na negrejnju, što se pripisuje slabijem provetravanju prostorije.

Termalni komfor u kancelariji u posmatranom periodu je bio zadovoljavajući u proseku od 52% do 66% radnog vremena. U posmatranom periodu termalni komfor je u grejnoj sezoni bio zadovoljavajući u proseku od 71% do 81% radnog vremena, što je skoro duplo viši procenat vremena sa zadovoljavajućim termalnim komforom u odnosu na negrejnu sezonu (termalni komfor zadovoljavajući od 34% do 49% radnog vremena). I u grejnoj i u negrejnoj sezoni neodgovarajući termalni komfor prouzrokuje temperatura koja prelazi preporučenih 24°C.

3. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je deo rezultata merenja kvaliteta vazduha i termalnog komfora u odabranoj kancelariji u IRM Bor u periodu od 2020. do 2022. godine. Na osnovu analize rezultata merenja utvrđeno je da je kvalitet vazduha u kancelariji bio zadovoljavajući u više od 90% radnog vremena (I i II kategorija), dok je termalni komfor bio zadovoljavajući u 60% radnog vremena.

U posmatranom periodu kvalitet vazduha u odabranoj kancelariji bio je najbolji u 2020. godini, kada su zbog pandemije COVID-19 preduzimate posebne mere u pogledu prisustva na radu i provetravanja radnih prostorija. Kvalitet vazduha u 2021. i 2022. godini bio je sličan, sa sezonskim trendom pogoršanja u periodu grejne sezone. Iz tog razloga u narednom periodu više pažnje treba posvetiti provetravanju radnog prostora u grejnoj sezoni.

Termalni komfor u kancelariji u posmatranom periodu je bio zadovoljavajući u proseku oko 60% radnog vremena, sa gotovo duplo višim procentom vremena sa zadovoljavajućim termalnim komforom u grejnoj sezoni. Razlog neodgovarajućeg termalnog komfora je viša temperatura od 24°C i u grejnoj i u negrejnoj sezoni. Posmatrana kancelarija ima prozore na južnoj strani pa je jedno od mogućih rešenja za poboljšanje termalnog komfora u negrejnoj sezoni klimatizovanje posmatrane prostorije.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2023. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-47/2023-01/200052.

LITERATURA

- [1] M.G. Apte, W.J. Fisk, J.M. Daisey, Associations between Indoor CO₂ Concentrations and Sick Building Syndrome Symptoms in U.S. Office Buildings: An Analysis of the 1994-1996 BASE Study Data, *Indoor Air*, 10 (2000), 4, 246-257.
- [2] B.S. Vučićević, V.M. Turanjanin, M.P. Jovanović, N.S. Mirkov, I.M. Lazović, Uticaj nivoa provetrenosti na kvalitet vazduha, *Termotehnika*, Vol. XL, 1-2 (2014) 11-17.
- [3] B.S. Vučićević, Analiza i ocena održivog razvoja energetskog sistema u zgradarstvu, doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, Srbija, 2014. <https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/3894> (pristupljeno 05.03.2023.)
- [4] ASHRAE, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, in: ASHRAE Standard 62-1999, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1999. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2> (pristupljeno 05.03.2023.)
- [5] ISO:7730, Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, 2005. https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iso:proj:39155 (pristupljeno 05.03.2023.)
- [6] https://www.sysecol2.ethz.ch/OptiControl/LiteratureOC/CEN_06_prEN_15251_FinalDraft.pdf (pristupljeno 05.03.2023.)
- [7] V.Tasić, R. Kovačević, T. Apostolovski-Trujić, I. Lazović, N. Mirkov, D. Topalović, A. Božilov, N. Mišić, Uređaj za merenje kvaliteta vazduha - PAQMAN 2020, Naučno veće IRM Bor br. XXVIII/4. od 04.11.2020., tehničko rešenje M82, Arihiva Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, 2020.
- [8] <https://www.ic-meter.com/what-is-ic-meter/> (pristupljeno 05.03.2023.)
- [9] V. Tasić, A. Božilov, I. Lazović, N. Mirkov, N., Measurement of CO₂ Concentrations in Indoor Air Using Low-Cost Sensors and Monitors, *Bakar*, Vol. 45, 2 (2020) 11-18.
- [10] <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> (pristupljeno 05.03.2023.)
- [11] https://www.ic-meter.com/dk/wp-content/uploads/2013/06/Sensirion_Humidity_SHT21_Datasheet_V3.pdf (pristupljeno 05.03.2023.)