



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Šiluminio komforto ir oro kokybės tyrimai mokyklose
Magistro baigiamasis projektas

Vėjas Ogintas
Projekto autorius

Doc. dr. Lina Šeduikytė
Vadovė

Lekt. dr. Laura Stasiulienė
Konsultantė

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Šiluminio komforto ir oro kokybės tyrimai mokyklose

Magistro baigiamasis projektas

Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai (6211EX006)

Vėjas Ogintas
Projekto autorius

Doc. dr. Lina Šeduikytė
Vadovė

Lekt. dr. Laura Stasiulienė
Konsultantė

Prof. dr. Andrius Jurelionis
Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Vėjas Ogintas

Šiluminio komforto ir oro kokybės tyrimai mokyklose

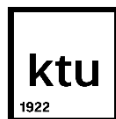
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Vėjo Oginto, baigiamasis projektas tema „Šiluminio komforto ir oro kokybės tyrimai mokyklose“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: DARNŪS IR ENERGETIŠKAI EFEKTYVŪS PASTATAI

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):

Šiluminio komforto ir oro kokybės tyrimai mokyklose

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu Nr.: V25-09-20

(lietuvių k.): Šiluminio komforto ir oro kokybės tyrimai mokyklose

(anglų k.): Research on Thermal Comfort and Indoor Air Quality in School

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

Šio darbo metu bus atliekami natūriniai šiluminio komforto tyrimai mokyklose šiltuoju ir šaltuoju metų laikotarpiais; CFD programa modeliuojamos skirtingos vėdinimo sistemos, kurios užtikrintų geriausias patalpų mikroklimato sąlygas moksleiviams.

Baigiamojo projekto dalys:

	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	x
Analitiniai tyrimai	x
Skaitiniai tyrimai	x
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	x

Vadovas:

(indėlis 85 %)

Doc.dr. Lina Šeduikytė

pareigos, vardas, pavardė

parašas

Konsultantas

(indėlis 15 %)

Lekt.dr. Laura Stasiulienė

pareigos, vardas, pavardė

parašas

Studentas

Vėjas Ogintas

vardas, pavardė

parašas

Ogintas Vėjas. Šiluminio komforto ir oro kokybės tyrimai mokyklose. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Lina Šeduikytė; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų krypčių grupė: inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05)

Reikšminiai žodžiai: šiluminis komfortas, oro kokybė, vėdinimas, mokyklos.

Kaunas, 2021. 54 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe buvo tiriami dviejų mokyklų klasių šiluminio komforto ir oro kokybės parametrai. Mokyklose, pastatytose ne tais pačiais metais ir turinčiose skirtingas vėdinimo sistemas, pagal standartus ir mokslinius tyrimus buvo įvertinta klasių temperatūra, santykinio drėgnis ir CO₂ koncentracija. Papildomai pasirinktoje informatikos klasėje buvo nuodugniau ištirti oro kokybės parametrai: kietosios dalelės ir bendrieji lakūs organiniai junginiai. Atlikti tyrimai mokyklose atskleidė, kad kritinis parametras, indikuojantis prastą vėdinimą, yra aukšta CO₂ koncentracija. Mokykloje su natūraliuoju vėdinimu CO₂ koncentracijos 1000 ppm riba buvo viršijama 51 % tirtu laiku, o antroje su sumaišomuoju mechaniniu vėdinimu – 43 %. Visose mokyklų klasėse šaltuoju ir šiltuoju metų laiku buvo užtikrinta minimali Lietuvos standartuose aprašyta vidutinė temperatūra darbo zonose. Santykinis drėgnis taip pat buvo tinkamas abiejose mokyklose, išskyrus šaltuoju metų laiku, per žemas santykinis drėgnis buvo užfiksuotas mokykloje su mechaniniu vėdinimu visose tirtose klasėse. Skaitiniam modeliavimui buvo pasirinkta klasė su didžiausia užfiksuota 3789 ppm CO₂ koncentracija viso tyrimo metu. Oro kokybės ir šiluminio komforto parametrų gerinimui buvo sukurtas CFD modelis, kuriuo buvo siekiama surasti geriausią oro kokybę ir šiluminį komfortą suteikiantį šildymo ir vėdinimo sistemų derinį. Darbe išnagrinėti devyni skirtingi variantai, kurie parodė, kad geriausiai CO₂ koncentracijos lygį ir kryžminės infekcijos plitimą klasėje sumažina išstumiamojo vėdinimo sistema.

Ogintas Vėjas. Research on Thermal Comfort and Indoor Air Quality in School. Master's Final Degree / supervisor Dr. Lina Šeduikytė; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field group: Engineering Sciences, Civil Engineering (E05)

Keywords: thermal comfort, air quality, ventilation, schools.

Kaunas, 2021. 54 p.

Summary

In this master's thesis, the parameters of thermal comfort and air quality in the classes of two schools were investigated. In the schools built not in the same year and with different ventilation systems, classroom temperature, relative humidity, and CO₂ concentration were assessed according to standards and research. In addition, the selected computer science classroom was further investigated for air quality parameters: particulate matter and total volatile organic compounds. Studies in these schools have revealed that the critical parameter indicating poor ventilation is high CO₂ concentration. In the school with a natural ventilation the CO₂ concentration limit of 1000 ppm exceeded 51% of the time investigated and in the second one with a mixed mechanical ventilation it exceeded 43% of the time. In all classes of the two schools during the cold and warm season, the minimum average temperature described in Lithuanian standards in the work areas was ensured. Relative humidity was also adequate in both schools, except during the cold season when in all classes explored of the school with mechanical ventilation too low relative humidity was recorded. The class with the highest recorded concentration of 3789 ppm CO₂ throughout the study was chosen for the numerical modeling. To improve the parameters of air quality and thermal comfort, a CFD model was developed to find out the best combination of heating and ventilation systems for air quality and thermal comfort. The paper examined nine different variants that showed that the level of CO₂ concentration and the spread of cross-infection in the classroom is best reduced by a displacement ventilation system.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Mikroklimato kokybė mokyklose.....	11
1.1.1. Šiluminis komfortas.....	12
1.1.2. Oro užterštumas	14
1.1.3. Vėdinimas ir užkrečiamos ligos	15
1.1.4. Tyrimai atlikti Lietuvos ir užsienio ugdymo įstaigose	18
1.2. Literatūros apžvalgos apibendrinimas	19
2. Tiriamoji dalis.....	20
2.1. Tyrimo objektas.....	20
2.2. Tyrimo metodai ir matavimo prietaisai	21
2.3. Rezultatai šaltuoju metų laiku	25
2.3.1. Temperatūros ir santykinio drėgumo matavimų rezultatai mokyklose	25
2.3.2. Oro kokybės tyrimo rezultatai KTU gimnazijos klasėje	28
2.4. Rezultatai šiltuoju metų laiku	33
2.4.1. Temperatūros ir santykinio drėgumo matavimų rezultatai mokyklose	33
2.4.2. CO ₂ koncentracijų tyrimai klasėse	36
2.5. Tiriamosios dalies išvados.....	38
3. Skaitinis modeliavimas.....	39
3.1. Skaitinio modeliavimo metodika.....	39
3.2. Skaitinio modelio kraštinės sąlygos	40
3.3. Skaitinio modelio tikslumo įvertinimas.....	41
3.4. CO ₂ koncentracijų ir temperatūrų pasiskirstymas modeliuose	41
3.5. Virusų koncentracijos palyginimas modeliuose	44
3.6. Skaitinio modeliavimo išvados.....	46
Rezultatų publikavimas	47
Rekomendacijos	48
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50
Priedai.....	55
1 priedas. CO ₂ koncentracijos kitimo grafikas KTU gimnazijos 528 klasėje	55
2 priedas. CO ₂ koncentracijos kitimo grafikas Veršvų gimnazijos 206 klasėje	56
3 priedas. Taškų, turinčių vienodas koncentracijų vertes, atvaizdavimas 3D modeliuose.....	57

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Šiluminio komforto kategorijos pagal EN ISO 7730 standartą [21]	13
2 lentelė. LOJ apibūdinimas pagal lakumą ir išskyrimas pagal virimo temperatūras [28]	14
3 lentelė. BLOJ lygiai ir taikomos rekomendacijos [31]	15
4 lentelė. Prietaisų išdėstymas klasėse	22
5 lentelė. Naudoti prietaisai ir jų paklaidos	23
6 lentelė. HOBO jutikliais užfiksuotos reikšmės šaltuoju metų laiku	25
7 lentelė. Praleisto laiko prie tam tikrų temperatūros ribų procentinė išraiška	27
8 lentelė. <i>Awair 2nd Edition</i> užfiksuoti duomenys	29
9 lentelė. Hobo jutikliais užfiksuotos reikšmės šiltuoju metų laiku	34
10 lentelė. CO ₂ koncentracijų tyrimo rezultatai šiltuoju metų laiku	36
11 lentelė. CO ₂ koncentracijų įvertinimas pagal standartus ir laiką, išreikštą procentais	36
12 lentelė. KTU gimnazijos 303 klasės parametrai ir vaizdai	39
13 lentelė. Modeliuojamos šildymo – vėdinimo sistemos	40
14 lentelė. Iškosėtų lašelių savybės	40
15 lentelė. Skaitinio modelio ir natūrinių tyrimų rezultatų palyginimas	41
16 lentelė. Sumodeliuotos šildymo – vėdinimo sistemos ir parametrų pasiskirstymas	42
17 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas modeliuose, esant skirtingoms šildymo ir vėdinimo sistemoms	43
18 lentelė. Gautų modeliavimo rezultatų lentelė	44
19 lentelė. Virusų dalelių koncentracijos tirtuose taškuose	45
20 lentelė. Virusų dalelių koncentracijų tirtuose taškuose atvaizdavimas diagramose	45
21 lentelė. Išmatuotų virusų dalelių koncentracijų kitimas klasėje	46

Paveikslų sąrašas

1 pav. Mokslininkų tiriami ryšiai tarp mikroklimato kokybės ir moksleivių produktyvumo [4]	11
2 pav. Schema, parodanti galimus veiksnius ir jų ryšius susijusius su oro kokybe klasėse [26]	14
3 pav. a) Asmeninio vėdinimo oro tiekimo pavyzdžiai: MP – judinamas skydelis, CMP – kompiuterio skydelis, VDG – vertikalios stalo grotelės, HDG – horizontalios stalo grotelės ir personalinis Environments® Modulis, b) Asmeninis vėdinimas per kėdės apmušalą [33]	16
4 pav. Dvi skirtingos oro pasiskirstymo sistemos: a) sumaišomojo vėdinimo, b) išstumiamojo vėdinimo [35]	16
5 pav. Ore plintančių ligų patalpose schema, kurioje pavaizduoti kompleksiniai srautai [38].....	17
6 pav. Sveiko manekeno gaunama ekspozicija ir atstumas tarp dviejų manekėnų. Matuojamos padėtys: į manekeno veidą, į nugarą, į šoną. Ekspozicija pateikiama santykiu c_{exp}/cR [40].....	17
7 pav. KTU gimnazijos fasadas	20
8 pav. Veršvų gimnazijos fasadas	20
9 pav. KTU gimnazijos klasė	21
10 pav. Veršvų gimnazijos klasė.....	21
11 pav. Informatikos klasė KTU gimnazijoje	21
12 pav. Stovo padėtis KTU gimnazijos klasėje	23
13 pav. Dujų koncentracijos kritimo diagramos pavyzdys [49]	24
14 pav. Vidutinių temperatūrų reikšmės 1,1 m aukštyje.....	26
15 pav. Vidutinių temperatūrų reikšmės 0,1 m aukštyje.....	27
16 pav. Praleistas laikas prie tam tikrų parametru išreikštas procentais	28
17 pav. Vidutinės santykinio drėgumo reikšmės 1,1 m aukštyje.....	28
18 pav. Vidutinės CO ₂ koncentracijos reikšmės 0,7 m aukštyje	30
19 pav. CO ₂ koncentracijos ir temperatūros ryšys	30
20 pav. CO ₂ koncentracijos kitimas informatikos klasėje.....	31
21 pav. BLOJ vidutinės koncentracijos 0,7 m aukštyje	32
22 pav. PM 2.5 koncentracijos reikšmės 0,7 m aukštyje	32
23 pav. <i>Awair 2nd Edition</i> prietaiso įvertinimas taškais.....	33
24 pav. Vidutinių temperatūrų reikšmės 1,1 m aukštyje.....	34
25 pav. Vidutinių temperatūrų reikšmės 0,1 m aukštyje.....	35
26 pav. Vidutinės santykinio drėgumo reikšmės 1,1 m aukštyje.....	35
27 pav. CO ₂ koncentracijos kitimo grafikas KTU gimnazijos 303 klasėje.....	37
28 pav. CO ₂ koncentracijos kitimo grafikas Veršvų gimnazijos 104 klasėje	37
29 pav. Skaitinio modelių rezultatų priklausomybė nuo celių skaičiaus	41
30 pav. Vaizduojamų pjūvių vieta	41
31 pav. Stebėjimo taškų vietos ir žmonių padėtys	44
32 pav. Pristatymo grafinė santrauka	47

Įvadas

Išsivysčiusiose šalyse žmonės apie 90 % savo gyvenimo praleidžia patalpų viduje. Moksleiviai didžiąją laiko dalį praleidžia mokyklose. Jose turėtų būti užtikrinamos tinkamos mikroklimato sąlygos, kad mokiniai galėtų sėkmingai augti ir vystytis. Deja, tačiau ne visose ugdymo įstaigose šios sąlygos yra užtikrinamos, ypač tose, kuriose veikia natūralusis vėdinimas. Mokyklų klasių oro kokybės įvertinimas yra ypač svarbus, nes mokymosi skirtų patalpų oras gali būti užterštas įvairiais teršalais: kietosiomis dalelėmis, iš statybinių medžiagų sklindančiais lakiisiais organiniais junginiais, dėl prasto vėdinimo aukšta anglies dvideginio (CO₂) koncentracija ir kt. Didelė oro tarša gali sukelti trumpalaikį ir ilgalaikį poveikį sveikatai. Dėl užteršto oro labiausiai nukenčia vaikai, nes augdami jie įkvepia ir iškvepia didesnę kiekį oro negu suaugę žmonės. Dėl prasto šiluminio komforto ir oro kokybės taip pat sumažėja produktyvumas, dėl kurio nukenčia mokinių pasiekimai. Šiame magistro baigiamajame projekte buvo ištirtos dvi skirtingos mokyklos: viena su natūraliuoju vėdinimu, pastatyta 1964 metais, o kita su mechaniniu vėdinimu, pastatyta 2018 metais. Vienoje mokyklos su natūraliu vėdinimu klasėje buvo užfiksuota didžiausia momentinė CO₂ koncentracija – 3789 ppm. Pagal šį kritinį parametą buvo išnagrinėti 9 skirtingi CFD variantai, padėję nustatyti, kurios vėdinimo ir šildymo sistemos užtikrina gerą oro kokybę, šiluminį komfortą bei sumažina kryžminės infekcijos plitimą klasėje.

Magistro baigiamojo darbo tikslas: įvertinti dviejų mokyklų šiluminį komfortą ir oro kokybę, pateikti pasiūlymus, kurie užtikrintų tinkamas mokymosi sąlygas moksleiviams.

Magistro baigiamojo darbo uždaviniai:

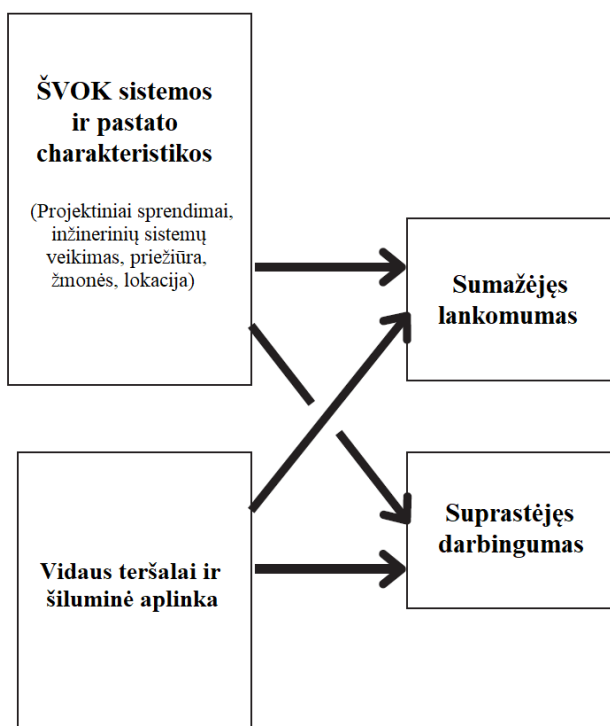
1. remiantis atlikta mokslinių tyrimų analize, pateikti informaciją, kaip šiluminis komfortas ir oro kokybė paveikia moksleivių savijautą pamokų metu;
2. atlikti natūrinius šiluminio komforto tyrimus šaltuoju ir šiltuoju metų laiku;
3. sukurti tiriamų pastatų patalpų skaitinius kompiuterinius modelius, atlikti skirtingų šildymo ir vėdinimo sistemų palyginimą.

1. Literatūros apžvalga

Šiame skyriuje apžvelgiama literatūra, kurioje pateikiama bendra ir specifinė informacija apie šiluminį komfortą, oro kokybę ir darbingumui mokyklose įtaką darančius veiksnius. Apžvelgta informacija pateikta atskiruose poskyriuose: mikroklimato kokybė mokyklose, šiluminis komfortas, oro užterštumas, vėdinimas, su tuo susijusios užkrečiamųjų ligų priežastys ir Lietuvos ir užsienio ugdymo įstaigose atlikti tyrimai.

1.1. Mikroklimato kokybė mokyklose

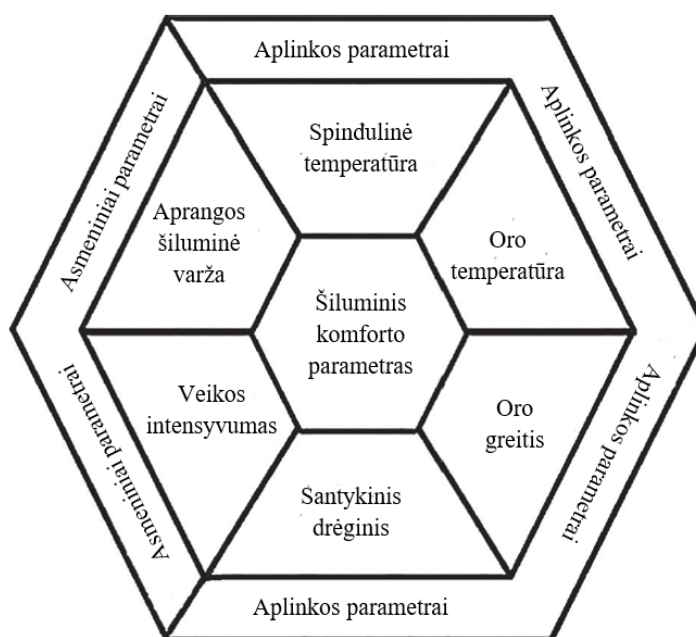
Išsivysčiusiose šalyse žmonės apie 90 % savo gyvenimo praleidžia uždaroje patalpose [1, 2]. Moksleiviai didžiąją laiko dalį būna namuose ir mokyklų klasėse, todėl mokykla turi tenkinti keliamus komforto reikalavimus, kad moksleiviai galėtų sėkmingai ugdytis ir augti [3]. Kadangi mokymosi veikla susideda iš tokių kompleksinių procesų kaip kalbėjimas, klausymas ir įsivaizdavimas, būtina palaikyti tinkamas komforto sąlygas, nedarančias neigiamos įtakos moksleivių savijautai [4, 5]. Mokyklų klasių vidaus mikroklimatą veikia daug įvairių parametrų: temperatūra, santykinis drėgnis, oro greitis, oro srautai, teršalų koncentracijos, apšvietimas ir garsas [6]. Įprastai patalpų mikroklimato kokybę sudaro keturios kategorijos: šiluminis komfortas, vidaus oro kokybė, akustinis ir vizualinis komfortas [7]. Prastas mikroklimatas patalpose gali sukelti ligoto pastato sindromą (LPS), pasireiškiantį negalavimais: galvos svaigimu, pykinimu, šalčio ir (ar) karščio pojūčiu, įvairių gleivinių ir odos dirglumu [8]. Per pastaruosius dešimtmečius mokslininkai vis daugiau dėmesio skiria į tai, kaip šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo (ŠVOK) sistemos, pastato charakteristikos, vidaus oro teršalai ir šiluminės komforto sąlygos veikia mokinių produktyvumą, akademinius pasiekimus bei sveikatą [4]. Mokslininkų dažniausiai analizuojamos temos pateikiamos 1 pav.



1 pav. Mokslininkų tiriama ryšiai tarp mikroklimato kokybės ir moksleivių produktyvumo [4]

1.1.1. Šiluminis komfortas

ASHRAE 55 standartas šiluminį komfortą apibūdina kaip proto būseną, kurią patenkina stabili šiluminė aplinka [9]. Šio pojūčio užtikrinimas yra vienas iš svarbiausių kriterijų, norint palaikyti aukštą žmonių darbingumą ir jų gerą savijautą [10]. Šiluminis komfortas susideda iš asmeninių (metabolizmo ir aprangos) ir aplinkos (vidutinės spinduliavimo temperatūros, oro temperatūros ir oro greičio) parametru [11, 12]. Šiluminio komforto parametrai, siejami su žmogaus šilumos perdavimu į aplinką, yra pavaizduoti 2 pav.



2 pav. Šiluminio komforto parametrai [12]

Asmeniniai parametrai apibūdina parametrus, darančius įtaką žmogaus kūno šilumos balansui.

Žmogaus termoreguliacinė sistema ir veiklos intensyvumas. Žmogaus termoreguliacinė sistema yra kontroliuojama tarpinėje smegenų dalyje – pagumburyje [13]. Dėl šios sistemos veikimo ypatumų žmogaus kūną galima vadinti šiluminiu varikliu, kuris bando prisitaikyti prie aplinkos, palaikydamas šilumos balansą. Kai optimali šiluminė aplinka nėra užtikrinama, žmogus pradeda jausti fiziologinę įtampą, imama prakaituoti arba šąla galūnės, o tai paveikia mąstymą. Skirtinga žmonių veikla išskiria skirtingus energijos kiekius: sėdint atsipalaidavus išskiriama 80–100 W, o einant – 50–450 W. Sėdinčio žmogaus išskiriamas metabolinės šiluminės energijos kiekis gaunamas žmogaus paviršiaus plotą dauginant iš 1 met, kuris yra lygus 58 W/m² [14]. Kadangi šiluminis komfortas priklauso nuo asmeninių ir aplinkos veiksnių, yra svarbu užtikrinti sąlygas, netrikdančias žmogaus termoreguliacinės sistemos, palaikančios apie 37 °C vidaus organų temperatūrą, veiklai [15].

Aprangos šiluminė varža sumažina šilumos išsiskyrimą nuo kūno per drabužius. Ši varža priklauso nuo daugelio veiksnių: aprangos tipo, medžiagos, storio ir sluoksnių kiekio. Apranga gali veikti kaip priemonė, padedanti užtikrinti šiluminio komforto pojūtį, keičiant ją pagal aplinkos sąlygas. Aprangos šiluminei varžai apibrėžti yra naudojamas matavimo vienetas 1 clo, kuris yra lygus 0,155 m²·°C·W⁻¹ [16].

Aplinkos parametrai, veikiantys šiluminį komfortą patalpos viduje: spindulinė temperatūra, oro temperatūra, oro greitis ir santykinis drėgnis.

Oro temperatūra yra vidutinė oro temperatūra, supanti žmogaus kūną tam tikroje erdvėje ir laike. Skirtingas oro temperatūrų pasiskirstymas vertikalia ir horizontalia kryptimis gali sukelti diskomfortą lokaliuose vietose. Pagal ASHRAE 55 standartus [9], rekomenduojama vidaus patalpų temperatūra šaltuoju metų laiku yra nuo 20 iki 24 °C, o Lietuvoje, pagal higienos normas HN 21:2011 „Mokykla, vykdanči bendrojo ugdymo programas. Bendrieji sveikatos saugos reikalavimai“ [17], nurodytos oro temperatūros vertės mokymo klasėse, mokymo kabinetuose ir aktų salėse yra 18–20 °C. Šiltuoju metų laikotarpiu ASHRAE 55 standartas nurodo rekomenduojamą temperatūrų intervalą, kuris yra nuo 22 iki 26 °C, o Lietuvos higienos normoms HN 21:2011 nenurodant temperatūros intervalo, galima taikyti HN 42:2009 „Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas“ [18] normas, kurios pateikia rekomenduojamą intervalą nuo 22–28 °C.

Santykinis oro drėgnis yra apibūdinamas kaip vandens garų ore dalinio slėgio ir sočiųjų vandens garų slėgio santykis pasirinktoje temperatūroje. Šis perimetras yra vienas svarbiausių tiriant šiluminį komfortą, įvertinant tiesioginius ir netiesioginius poveikius žmonių sveikatai bei savijautai [19]. Pagal ASHRAE 55 [9] standartus, vidaus patalpoms rekomenduojama palaikyti santykinį drėgnį nuo 30 iki 60 %, o Lietuvos higienos normos HN 21:2011 [17] rekomenduojamas santykinio drėgno intervalo yra tarp 35 ir 60 %.

Šiluminio komforto vertinimas pasitelkiant PVM ir PPD modelius

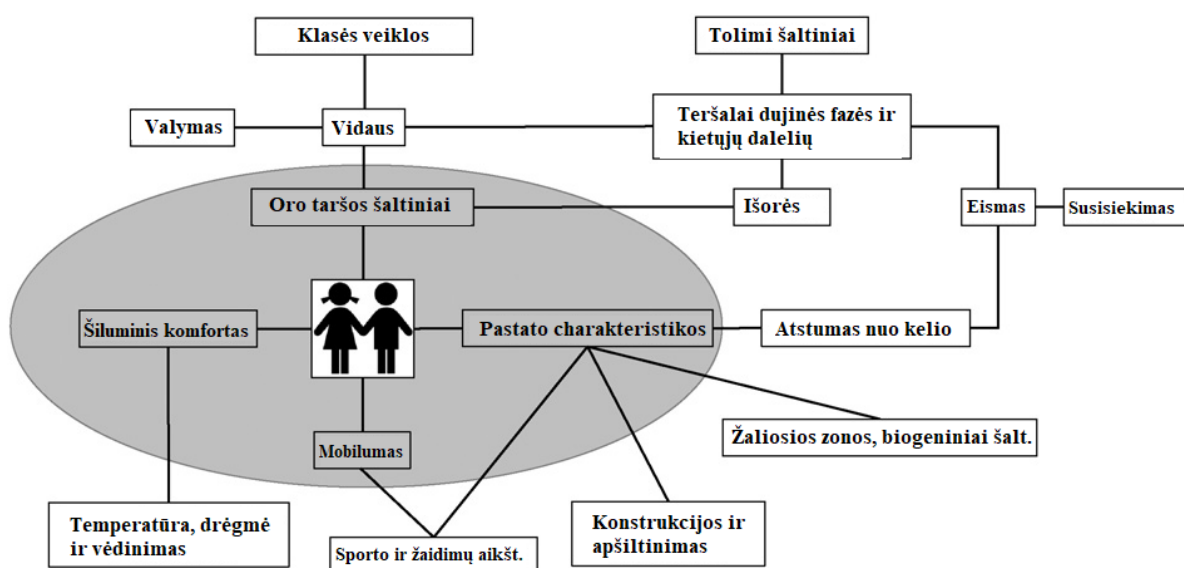
P. O. Fangeris pristatė PVM ir PPD modelius, kurie apklausų būdu įvertina šiluminį komfortą patalpose. Tikėtinas vidutinis vertinimo (angl. *predicted mean vote* (PMV)) modelis parodo tikėtiną žmonių grupės psichofizinį aplinkos vertinimą pagal 7 taškų skalę: –3 – šalta, –2 – vėsu, –1 – gana vėsu, 0 – neutralu, +1 – gana šilta, +2 – šilta, +3 – karšta [20]. Pagal EN ISO 7730 [21] standartą nurodoma, kad tikėtinas nepatenkintųjų procentas (angl. *predicted percentage of dissatisfied*, (PPD)) nurodo informaciją apie šiluminį diskomfortą arba nustato nepatenkintųjų procentinę išraišką, kuriems yra per karšta arba per šalta patalpoje [22]. Pagal duotas procentines išraiškas, patalpos skirstomas į kategorijas, nurodytas 1 lentelėje.

1 lentelė. Šiluminio komforto kategorijos pagal EN ISO 7730 standartą [21]

Kategorija	Kūno šiluminė būseną		Lokalus diskomfortas			
	PPD %	PMV	DR %	vertikalus oro temperatūrų skirtumas	šiltos arba šaltos grindys	spindulinė asimetrija
A	<6	-0,2<PMV<+0.2	<10	<3	<10	<5
B	<10	-0,5<PMV<+0.5	<20	<5	<10	<5
C	<15	-0,7<PMV<+0.7	<30	<10	<15	<10

1.1.2. Oro užterštumas

Užterštas yra viena iš priežasčių, kodėl ūmūs ir chroniniai sveikatos sutrikimai yra tokie dažni visose amžių grupėse [23]. Vaikai yra vieni labiausiai pažeidžiamų žmonių grupių dėl to, nes jie labai sparčiai auga. Formuojantis vidaus organams, pagal jų kūno svorio santykį, jie įkvepia ir iškvepia didesnę kiekį oro negu suaugę žmonės [4, 24]. Atlikti pasauliniai tyrimai atskleidė, kad daugiau kaip 3,3 milijonai ankstyvų mirčių per metus yra susijusios su PM 2.5 kietosiomis dalelėmis, kurių aerodinaminis skersmuo yra mažesnis negu 2,5 μm [25]. Problemos su oro užterštumu taip pat svarbios mokykloms. Dauguma kompleksiskai susijusių faktorių, iš kurių pagrindiniai yra šiluminis komfortas, oro taršos šaltiniai, pastato charakteristikos ir mobilumas, veikia klasėse esančius mokinius. Oro taršos šaltiniai klasėse turi vieną iš ilgiausių grandinių, kuri priklauso nuo viduje statybinių medžiagų, valymo būdų ir net nuo išorėje esančių teršalų šaltinių [26]. Schema pavaizduota 2 pav.



2 pav. Schema, parodanti galimus veiksnius ir jų ryšius susijusius su oro kokybe klasėse [26]

Lakūs organiniai junginiai (LOJ). Dauguma oro kokybės tyrimų mokyklose yra susiję su LOJ, turinčiais labai platų chemikalų diapazoną. Šios medžiagos, atsirandančios iš patalpos ar išorės šaltinių, gali sukelti chronines ar netgi lėtines ligas [27]. LOJ yra skirstomi pagal lakumo lygį, esant tam tikroms virimo temperatūroms [28]. Pasiskirstymas pagal lakumą ir virimo temperatūras pavaizduotas 2 lentelėje.

2 lentelė. LOJ apibūdinimas pagal lakumą ir išskyrimas pagal virimo temperatūras [28]

Apibūdinimas	Sutrumpinimas	Virimo temperatūra, °C	Galimi LOJ arba juos turinčios medžiagos
Labai lakūs (dujiniai) organiniai junginiai	LLOJ	<0 iki 50–100	Propanas, butanas, metilo chloridas, benzenas
Lakūs organiniai junginiai	LOJ	50–100 iki 240–260	Formaldehidai, ksilenas, toluenas, d–limonenas, acetonas
Pusiau lakūs organiniai junginiai	PLOJ	240–260 iki 380–400	Pesticidai, plastifikatoriai, antipirenai
Bendra lakiųjų organinių junginių koncentracija	BLOJ	Visų viršuje išvardintų junginių koncentracijų suma	

Vieni dažniausiai randamų junginių mokyklose yra ksilenas, toluenas, benzenas, ethilobenzenas ir d–limonenas [27, 29]. Didelė dalis visų lakiųjų organinių junginių išsiskiria iš statybinių medžiagų, naudojamų vidaus apdailai (paviršių dažymui, grindų ir lubų įrengimui) ir baldams. Bendrieji lakūs organiniai junginiai (BLOJ) nusako sudėtinę LOJ momentinę koncentraciją ore [30].

Nacionalinė aplinkos agentūra „Umweltbundesam“ (UBA) Vokietijoje padarė 48 mokslinių tyrimų analizę, kurioje pateikė apibendrintas žinias apie BLOJ. Atlikta mokslinė analizė BLOJ apibūdina pagal penkis lygius, kuriuose nurodomas higienos įvertinimas, rekomendacijos, ekspozicijos limitas ir atitinkamas BLOJ koncentracijų intervalas, kuriam yra pateikiamos veiksmų rekomendacijos [31]. Nurodymai pateikti 3 lentelėje

3 lentelė. BLOJ lygiai ir taikomos rekomendacijos [31]

Lygis	Higieninis įvertinimas	Veiksmai	Ekspozicijos limitas	BLOJ, ppb
1 Puikus	Nėra apribojimų	Nereikia atlikti jokių veiksmų	Be limitų	0–65
2 Geras	Nėra reikšmingų apribojimų	Rekomenduojama patalpą vėdinti arba išvėdinti	Be limitų	65–220
3 Vidutiniškas	Keletas apribojimų	Reikalaujama patalpą vėdinti. Identifikuoti LOJ šaltinius	<12 mėnesių	220–600
4 Blogas	Dideli apribojimai	Būtinas intensyvesnis vėdinimas ir LOJ šaltinių atradimas	<1 mėnuo	660–2200
5 Kenksmingas	Situacija nepriimtina	Būti patalpoje tik tada, jeigu nebėra kito pasirinkimo	Skaičiuojamas valandomis	2200–5500

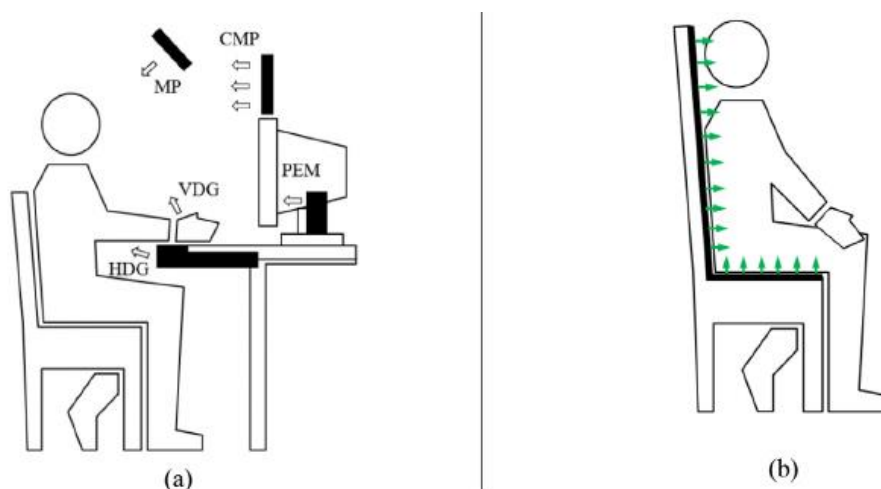
1.1.3. Vėdinimas ir užkrečiamos ligos

Oro judėjimas vėdinamose patalpose priklauso nuo įdiegtos vėdinimo sistemos. Mechaninis vėdinimas patalpose dažniausiai charakterizuojamas kaip sumaišomasis arba išstumiamasis.

Natūralaus vėdinimo sistema veikia nenaudodama mechaninių prietaisų, tiekiančių ar šalinančių orą per skirstytuvus. Dėl šios priežasties susiduriama su perkaitimu ir dideliais CO₂ koncentracijų šuoliais patalpose dėl prasto oro judėjimo. Tai yra mažiausiai prie žmonių poreikių prisitaikanti vėdinimo sistema [32].

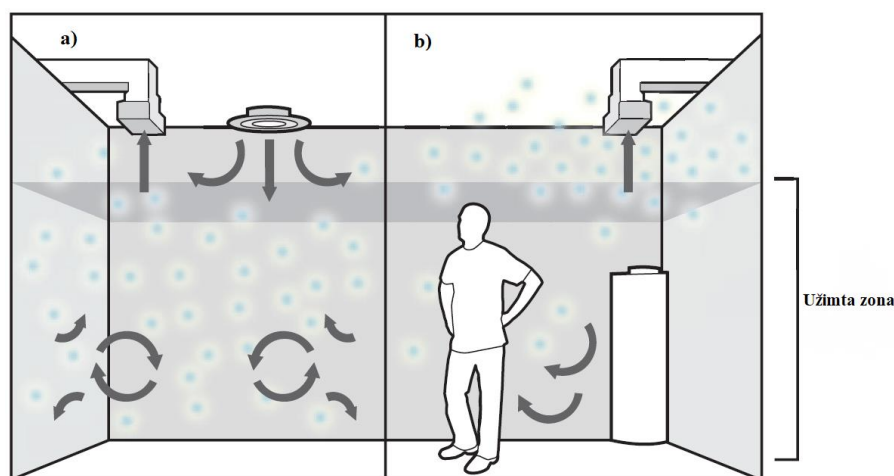
Sumaišomojo vėdinimo sistemos viena iš atsiradimo priežasčių – noras pagerinti šiluminį komfortą. Tiekiant šaltą arba karštą orą tiesiogiai į darbo zonas, būtų jaučiamas diskomfortas, bet dėl aukštai išdėstytų tiekimo ir šalinimo įrenginių lubose nėra jaučiamas oro srovių judėjimas. Šiuo veikimo principu sumaišomojo vėdinimo sistema tiekia orą dideliu greičiu ir taip sumaišo orą patalpoje. Ši sistema turi ir savų minusų. Nors sistema šiluminiu požiūriu gana gerai užtikrina komfortą, bet dėl energetinio naudingumo ir oro kokybės ne visada galima teigti, kad ji yra geresnė už kitas [33]. Kai sistema labai gerai sumaišo orą, teršalų šaltiniai ar oru lašeliniu būdu plintančios ligos gali lengviau plisti patalpoje [34].

Asmeninio vėdinimo sistema pasižymi yra viena iš labiausiai prisitaikančių prie asmeninių žmonių poreikių. Ji gali būti įdiegiama darbo vietose su kompiuteriu, kuriose galima skirtingais būdais pateikti orą į norimas zonas [33]. Pateikimo būdai pavaizduoti 3 pav.



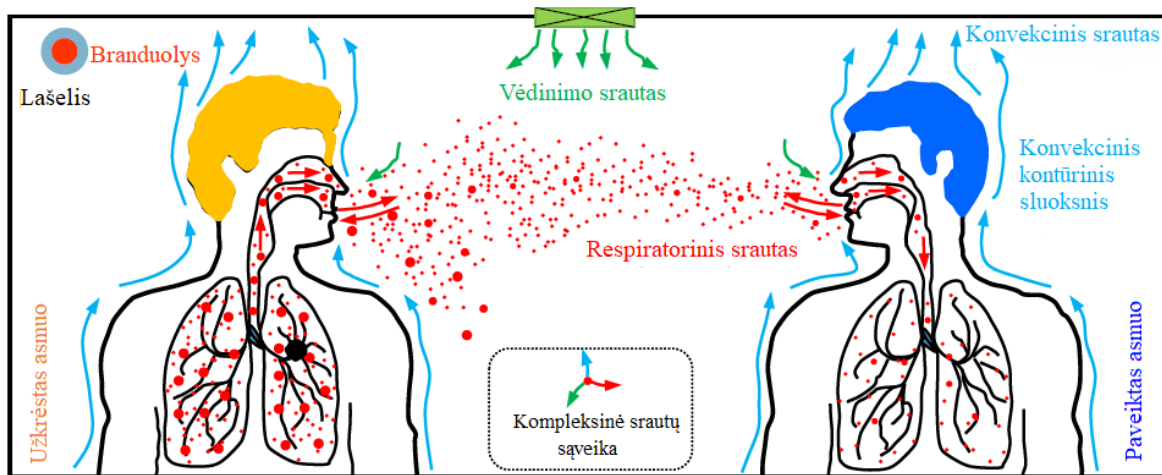
3 pav. a) Asmeninio vėdinimo oro tiekimo pavyzdžiai: MP – judinamas skydelis, CMP – kompiuterio skydelis, VDG – vertikalios stalo grotelės, HDG – horizontalios stalo grotelės ir personalinis Environments © Modulis, b) Asmeninis vėdinimas per kėdės apmušalą [33]

Ištumiamojo (terminio) vėdinimo sistema. Šis vėdinimo principas veikia derindamas natūralius fizikos dėsnius. Vėsesnis oras yra tiekiamas palei grindis ir pasiekęs šiltesnį objektą kyla aukštyn, taip pašalindamas teršalus bei šviežiu oru aprūpindamas patalpoje esančius žmones. Skirstytuvai, kurie turi mažą oro tiekimo greitį, yra įrengiami apatinėje patalpos dalyje, ištraukimo grotelės – viršutinėje dalyje. Tiekiamas oras užpildo apatinę patalpos dalį ir išstumia užterštą šiltą orą link ištraukimo angų. Lyginant su sumaišomojo vėdinimo sistema, teisingai suprojektuotas išstumiamasis vėdinimas gali sutaupyti iki 20 % energijos. Terminis vėdinimas geriausiai veikia ten, kur teršalai yra šiltesni, kur tiekiamas oras yra vėsesnis negu aplinkos arba aukštose patalpose [33]. Dėl šios sistemos savybių sistema darbo zonoje tiekia mažiau užterštą orą, negu sumaišomojo vėdinimo schema [35]. Vizualiai matomas teršalų pasiskirstymas pateikiamas 4 pav.



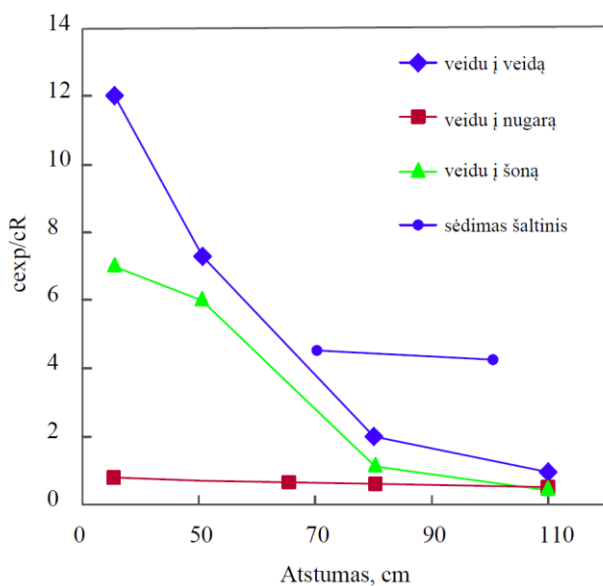
4 pav. Dvi skirtingos oro pasiskirstymo sistemos: a) sumaišomojo vėdinimo, b) išstumiamojo vėdinimo [35]

Užkrečiamos ligos. Žmogaus įprasta respiratorinė veikla – kvėpavimas, kalbėjimas, kosėjimas – gali skleisti dešimtis tūkstančių lašelių, kurie keliauja oru. Didelis kiekis šių dalelių staigiai išgaruoja iki pradinio dydžio ir patampa branduoliais [36]. Dauguma virusų turi 5–10 μm skersmenį [37]. Šių virusų sklidimui vidaus patalpose didžiulę įtaką daro žmonių respiratoriniai ir konvekciniai srautai bei nuo vėdinimo priklausantis oro pasiskirstymas patalpoje [38]. Procesus reprezentuojanti schema pateikta 5 pav.



5 pav. Ore plintančių ligų patalpose schema, kurioje pavaizduoti kompleksiniai srautai [38]

Infekcinių ligų plitimo mažinimui galima panaudoti vėdinimo sistemas, kurios kontroliuoja oro srautų judėjimą patalpose [39]. Viena iš palankiausių teršalų valdymo vėdinimo sistemų yra išstumiamojo vėdinimo sistema [38, 40]. P. V. Nielseno ir kt. (2012) [40] atliktame tyrime buvo tiriama kryžminės infekcijos rizika tarp dviejų stovinčių žmonių patalpoje, kurioje veikia išstumiamasis vėdinimas. Tyrimo rezultatai atskleidė, kad patalpoje su vertikaliu temperatūrų gradientu rizika užsikrėsti padidėja, atstumui mažėjant nuo 0,8 m. Ištyrus įvairias manekėnų padėtis (veidu į veidą, veidu į nugarą, veidu į šoną ir sėdinčio žmogaus šaltinį), gauti rezultatai parodė, kad didžiausia rizika užsikrėsti atsiranda tada, kai esame vienas priešais kitą (atsisukę veidu į veidą). Grafikas pavaizduotas 6 pav.



6 pav. Sveiko manekėno gaunama ekspozicija ir atstumas tarp dviejų manekėnų. Matuojamos padėtys: į manekėno veidą, į nugarą, į šoną. Ekspozicija pateikiama santykiu c_{exp}/c_R [40]

Europos šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo asociacijų federacija (angl. *Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations*, REHVA) [41] 2020 metų lapkritį pateikė atnaujintas ŠVOK sistemų valdymo rekomendacijas, tam kad sumažėtų rizika užsikrėsti SARS-CoV-2 virusu darbo vietose, įskaitant ir mokyklas.

Keletas praktinių instrukcijų nurodo, kad sumažinti viruso plitimą galima pasitelkiant šiuos veiksmus:

- panaudoti CO₂ koncentracijos matuoklį klasėse su natūraliu vėdinimu, kuris šviesoforo spalvomis (geltona / oranžine iki 800 ppm ir raudona spalva iki 1000 ppm) informuoja apie vėdinimo efektyvumą klasėje. Matuoklis turėtų būti padėtas apie 1,5 m aukštyje (darbo zonoje), gerai matomoje vietoje ir toliau nuo šviežio oro šaltinių;
- mokyklose, kuriuose mechaninis vėdinimas veikia pagal darbo laiką, rekomenduojama vėdinimo sistemas aktyvuoti bent 2 val. prieš pamokų pradžią;
- kiek įmanoma padidinti oro apykaitą klasėse varstant langus;
- reguliariai vėdinti klases pertraukų metu, net ir mokyklose su mechaninio vėdinimo sistema;
- tualetus vėdinti nuolat (uždarius langus, kurie sukuria neigiamą slėgį).

1.1.4. Tyrimai atlikti Lietuvos ir užsienio ugdymo įstaigose

A. Jurelionis ir L. Šeduikytė (2008) [42] tradicinėse Lietuvos mokyklose, turinčiose natūraliojo vėdinimo sistemas, atliko apklausas ir matavo parametrus, kurie įvertino patalpų mikroklimatą. Tyrimas atskleidė, kad 64 % tirtų klasių temperatūra neatitiko keliamų šiluminio komforto reikalavimų, aprašytų standartuose. Taip pat dėl prasto natūralaus vėdinimo sistemos efektyvumo buvo užfiksuotos didelės anglies dvideginio (CO₂) koncentracijų reikšmės, siekiančios net iki 5000 ppm. Atlikus CFD modeliavimą, geriausia vėdinimo sistema, užtikrinanti teršalų pašalinimą, buvo išstumiamoji vėdinimo sistema.

J. Bielskaus ir kt. (2017) [43] atliktame tyrime buvo ištirti modernizuoti ir nemodernizuoti Vilniaus miesto darželiai. Gauti rezultatai atskleidė, kad vertinant oro kokybę darželyje pagal EN 15251 2007 standarto I kategoriją ir esamą foninę koncentraciją, priimta 750 ppm CO₂ koncentracijos riba darbo dienomis buvo viršijama visuose darželiuose.

E. Krugly ir kt. (2014) [44] Lietuvoje ištyrė 150 policiklinių aromatinių angliavandenilių (PAA) mėginių, paimtų iš penkių mokyklų Kauno mieste. Tyrimo rezultatai atskleidė, kad teršalai iš automobilių ir kuro deginimas šaltuoju metų laiku buvo pagrindiniai PAA šaltiniai.

N. Prokopciuk ir kt. (2020) [45] tyrime, atliktame Vilniaus mokyklose, atskleidė, kad daugumoje mokyklų vietiniai statybos darbai ir netinkamas patalpų valymas buvo pagrindinės priežastys, lėmusios didelę aerozolinę taršą mokyklose. Tyrimo autoriai rekomenduoja atlikti tyrimus kitose Lietuvos miestuose, taip pat atsakingoms agentūroms suteikti rekomendacijas mokyklų vadovybėms, kurios sumažintų leistinos aerozolinės taršos koncentraciją iki 24 val. ribos, kuri yra 50 µg/m³.

P. Wargockis ir kt. (2012) [46] ištyrė CO₂ koncentracijos monitoringo galimybes natūralaus vėdinimo klasėse, pasitelkiant šviesoforo spalvų šviesas ir CO₂ sensorius. Spalvomis vizualiai buvo išskiriami skirtingi koncentracijų lygiai: žalia spalva reprezentavo CO₂ koncentracijų lygius, žemesnius už 1000 ppm. Geltona spalva indikavo diapazoną, kuris prasidedantį nuo 1000 iki 1600 ppm, o raudona spalva buvo informuojama apie koncentracijas aukštesnes nei 1600 ppm. Didėjant geltonos spalvos lempučių skaičiui, mokiniai ir mokytojai buvo instrukuoti atidaryti langus. Užsidegus raudonai šviesai, buvo atidaromi visi langai kartu su durimis tam, kad CO₂ koncentracijos lygis greičiau nukristų. Tyrimas atskleidė, kad langų atidarinėjimas pagal CO₂ koncentraciją mokyklose su natūraliu vėdinimu yra geras sprendimas, norint kontroliuoti oro kokybę klasėse, kai tam leidžia išorės klimato sąlygos.

M. J. Mendellis ir kt. (2013) [47] atliko tyrimą Kalifornijos mokyklose, remdamiesi statistine duomenų analize, kurioje buvo pateikiamas ryšys tarp vėdinimo intensyvumo ir prasto lankomumo dėl ligų. Gauti rezultatai atskleidė, kad oro kiekį padidinus 3,6 m³/h vienam žmogui, prastas lankomumas sumažėjo 1,6 %.

S. Petersenas ir kt. (2016) [48] Danijoje atliko mokslinį tyrimą apie tai, kaip darbingumas susijęs su tiekiamo oro kiekiu patalpoje. Pastebėta, kad padidinus oro kiekį kiekvienam studentui nuo 6,12 iki 23,76 m³/h, padidėjo darbingumas, o testų atsakymai pagerėjo nuo 3,2 iki 7,4 %.

1.2. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

1. Prasta mikroklimato kokybė mokyklose gali sukelti mokiniams LPS, darbingumo sumažėjimą bei prastesnį lankomumą.
2. Dėl prastos oro kokybės patalpose labiausiai nukenčia vaikai, nes jie vystymosi fazėje įkvepia didesnius oro kiekius nei suaugę žmonės.
3. Lyginant su maišomojo vėdinimo sistema, teisingai suprojektuotas išstumiamasis vėdinimas gali sutaupyti iki 20 % energijos ir sumažinti kryžminės infekcijos plitimą patalpoje;
4. Atlikti tyrimai Lietuvos ir užsienio ugdymo įstaigose atskleidė, kad daugiausia problemų su oro kokybe atsiranda klasėse su natūraliuoju vėdinimu, dėl kurio didėja CO₂ koncentracijos lygiai.
5. Mokyklose, kuriose tiekiamas oro kiekis yra mažesnis už rekomenduojamą standartuose, padidinus tiekiamo oro kiekį yra pasiekiami aukštesni moksleivių akademiniai rezultatai ir pagerėja darbingumas ir lankomumas.
6. Mokyklose rekomenduojama naudoti CO₂ monitoringą, kuris šviesoforo spalvomis informuoja apie oro kokybę ir apie kryžminės infekcijos plitimą patalpoje dėl neefektyvaus vėdinimo.

2. Tiriamoji dalis

2.1. Tyrimo objektas

Magistro baigiamojo darbo projektui buvo pasirinktos dvi skirtingos mokyklos – Kauno technologijos universiteto gimnazija ir Kauno Veršvų gimnazijos pradinė klasių skyrius. Mokyklos pastatytos ne tais pačiais metais, skiriasi jų statyboje panaudotos medžiagos, vėdinimo sistemos, aukštų skaičius. Mokyklas lanko skirtingo amžiaus moksleiviai.

Kauno technologijos universiteto gimnazijos pastatas sovietmečiu pastatytas kaip bendrabutis, bet vėliau pradėtas naudoti kaip mokykla. Šiuo metu čia mokosi 15–18 metų gimnazistai. Veršvų gimnazijos mokykla yra pirmoji nepriklausomybės laikotarpiu pastatyta mokykla Kaune, kurioje mokosi 7–10 metų mokiniai. Mokykla išsiskiria mokymosi procese taikomomis technologijomis ir šiuolaikine aplinka. Mokyklų fasadai vaizduojami 7 ir 8 paveikslėliuose.



7 pav. KTU gimnazijos fasadas



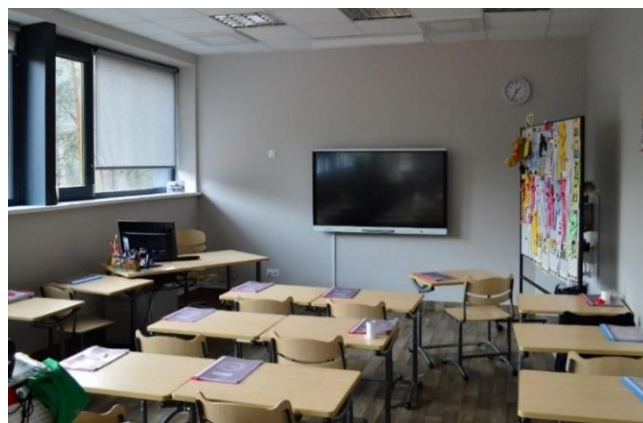
8 pav. Veršvų gimnazijos fasadas

Pirmasis objektas – penkių aukštų Kauno technologijos universiteto gimnazija, pastatyta 1964 metais. Pastatas susideda iš plytų mūro sienų, tarpaukštinių perdangų, kurių viršutinėje pusėje paklotas linoleumas. Renovacijos metu seni mediniai langai buvo pakeisti į plastikinius, jie įrengti ant medinių palangių. Pastate vyrauja natūralus vėdinimas, dėl kurio oras į pastatą patenka per mikrovėdinimo ertmes, pastato tarpus ir langus. Oras šalinamas per klasėse įrengtas oro ištraukimo groteles. Pirmajame objekte buvo atlikti tyrimai dviejose standartinėse trečio aukšto klasėse (303, 331) ir dviejose skirtingą paskirtį turinčiose penkto aukšto klasėse – chemijos (501) ir informatikos (528). Vienos iš tirtų klasių vidus pavaizduotas 9 pav.

Antrasis objektas – Kauno Veršvų gimnazijos pradinė klasių skyrius, pastatytas 2018 metais. Nagrinėjamų klasių pirmo (104, 107) ir antro (206) aukšto klasių atitvaros susideda iš laikančių ir nelaikančių sienų, sudarytų iš pilnavidurių silikatinių plytų mūro. Perdangoms panaudotos gelžbetoninės kiaurymėtos plokštės. Vidaus apdailai panaudotos akustinės PVC dangos grindys ir pakabinamos lubos. Klasės vidus vaizduojamas 10 pav. Klasių patalpos vėdinamos mechaninio vėdinimo sistema su rotaciniu šilumokaičiu, kuri vandeniniu šildytuvu ir aušintuvu padeda palaikyti norimą temperatūrą šaltuoju bei šiltuoju laikotarpiu. Tiekiamas oras išvalomas EU–5 filtrais. Patalpos šildomos kolektorine dvivamzde šildymo sistema su plieniniais radiatoriais.



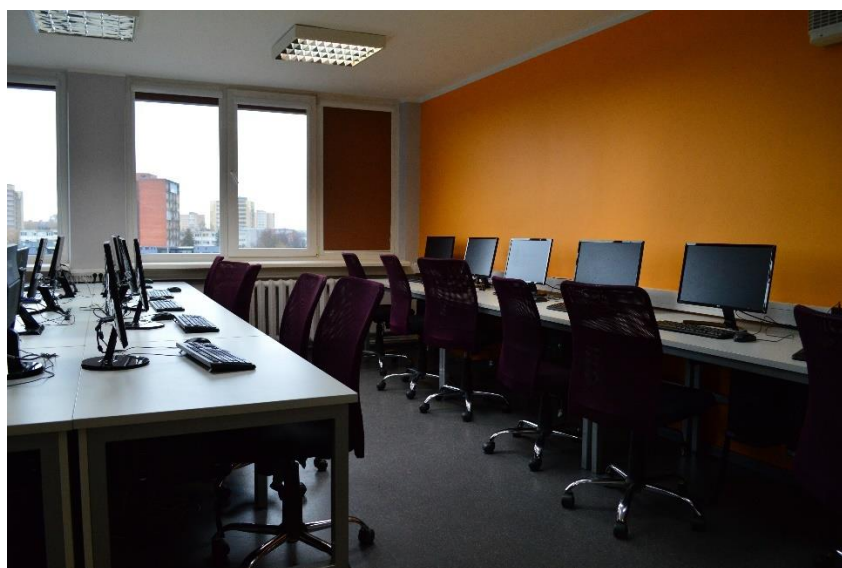
9 pav. KTU gimnazijos klasė



10 pav. Veršvų gimnazijos klasė

2.2. Tyrimo metodai ir matavimo prietaisai

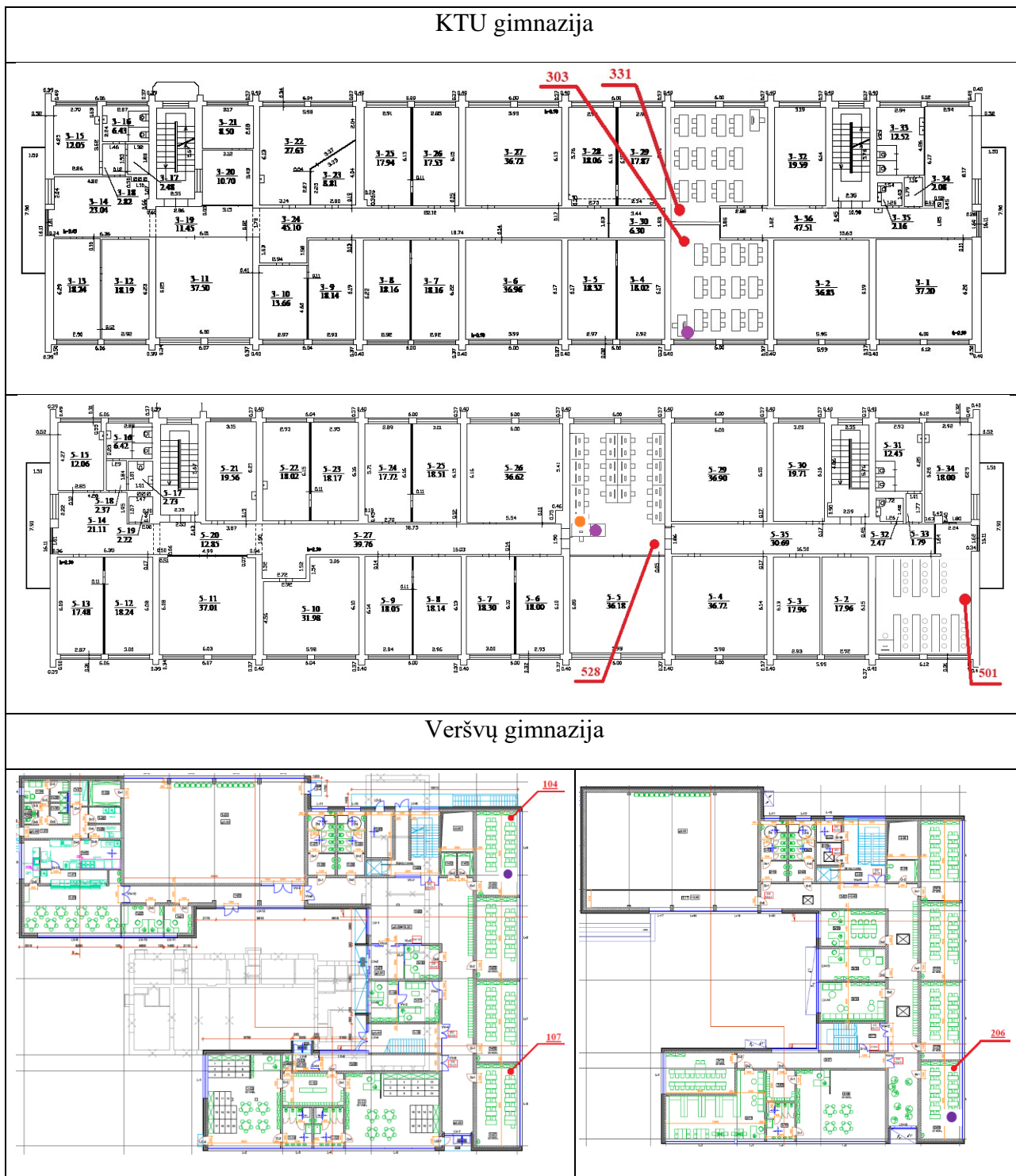
Tyrimo metu buvo tiriamos keturios KTU gimnazijos ir trys Veršvų gimnazijų klasės. Mokymuisi skirtose patalpose buvo matuojami šiluminio komforto parametrai: temperatūra, santykinis oro drėgnis. Papildomai pirmajame objekte išsamiau buvo tiriama pasirinkta 528 informatikos klasė, kurioje be temperatūros dar buvo fiksuojami ir oro kokybės parametrai – kietosios dalelės ($PM_{2.5}$), bendrieji lakūs organiniai junginiai (BLOJ), anglies dvideginio (CO_2) koncentracija ir santykinis drėgnis (SD). Ši klasė pasirinkta dėl patalpoje veikiančių 25 kompiuterių ir didelio užimtumo pamokų metu. Informatikos klasės nuotrauka pateikta 11 pav.



11 pav. Informatikos klasė KTU gimnazijoje

Matavimai atlikti šaltuoju metų laiku (tarp 2020 m. vasario 24 d. ir kovo 11 d.) ir šiltuoju metų laiku (tarp 2020 m. rugsėjo 9 d. ir rugsėjo 25 d.). Kiekvienoje klasėje buvo išdėstyti stovai, atitraukti nuo šilumos šaltinių ir atitvarų pagal ISO 7730 standarto reikalavimus. Prie kiekvieno stovo buvo pritvirtinti HOBO H8 serijos jutikliai, matuojantys temperatūrą ir santykinį drėgnį charakteringuose aukščiuose nuo grindų: 0,1 m aukštyje ties kulkšnimis ir 1,1 m aukštyje darbo zonoje. Prietaisų išdėstymas mokyklų klasėse pavaizduotas 4 lentelėje.

4 lentelė. Prietaisų išdėstymas klasėse



* ● stovų su HOBO jutikliais padėtis; ● *Awair 2 nd Edition* prietaiso padėtis; ● COMET jutiklių padėtis

HOBO jutikliai buvo užprogramuoti kaupti duomenis fiksuotu 10 min. intervalu. Apdorojant abiejų mokyklų duomenis „Excel“ kompiuterine programa, buvo paliekami tik tie periodai, kai vyko pamokos. Pirmoje mokykloje analizuotas laikas tarp 8.30 val. ir 15.05 val. (7 pamokos), o antroje mokykloje tarp 8.00 val. ir 13.40 val. (6 pamokos) dėl mažesnio pradinių klasių moksleivių užimtumo. Stovo padėtis klasėje yra pateikta 12 pav.





12 pav. Stovo padėtis KTU gimnazijos klasėje

Taip pat FloVENT (*Mentor Graphics*, Jungtinės Amerikos Valstijos) programos skaitinių modelių kūrimui kiekvienoje mokykloje buvo išmatuojamos sienų paviršių temperatūros *Testo 905-T2* termometru, kuris matuoja temperatūrą $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\%$ tikslumu.

Papildomų oro kokybės parametrų matavimai buvo atlikti tarp 2020 metų kovo 5 d. ir kovo 11 d., tiriant pamokų laiką nuo 8.30 val. iki 15.05 val. Šiems matavimams buvo naudojamas išmanusis *Awair 2nd Edition* įrenginys, kuris fiksavo duomenis kas 5 minutes. Prietaisas buvo padėtas 0,7 m aukštyje – kvėpavimo zonoje ant stalo paviršiaus. Tyrimo metu naudotų prietaisų nuotraukos ir paklaidos pateiktos 5 lentelėje.

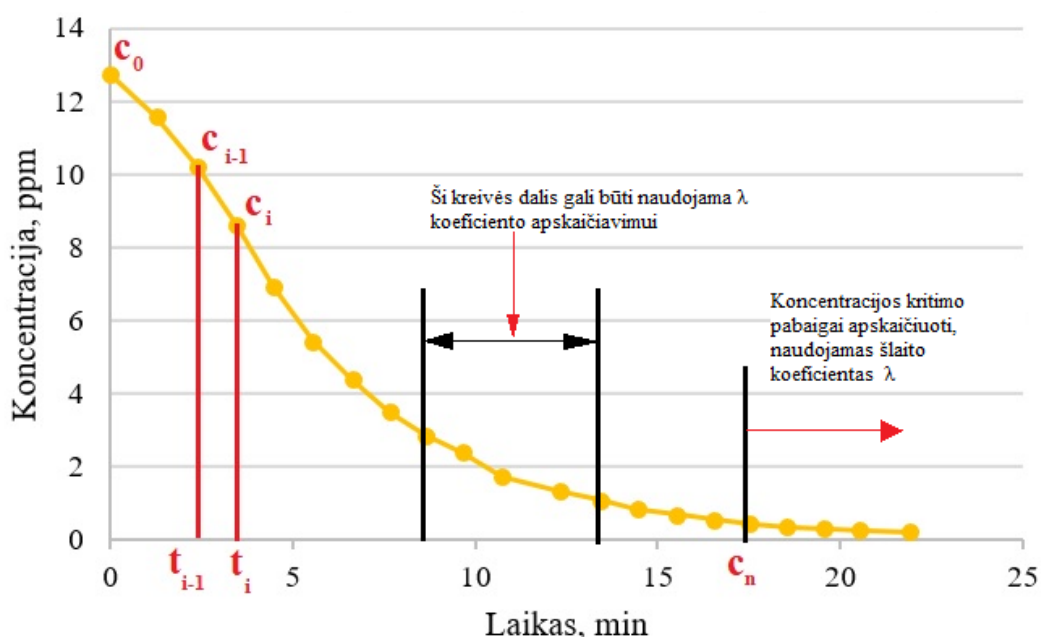
5 lentelė. Naudoti prietaisai ir jų paklaidos

Prietaisų pavadinimai	HOBO H08 serijos jutikliai	<i>Awair 2nd Edition</i>
Nuotraukos		
Matuojami parametrai ir paklaidos	T $\pm 0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ SD $\pm 5\%$ nuo 5 iki 50 $^{\circ}\text{C}$ temperatūrų intervale	PM 2.5 nuo 0 iki 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 15\text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ LOJ nuo 0 iki 60,000 ppm / $\pm 10\%$ CO ₂ nuo 400 iki 5,000 ppm $\pm 75\text{ ppm}$ arba 10% T nuo -40 iki 125 $^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ SD nuo 0 iki 100% / $\pm 2\%$

Šiltuoju metu laikotarpiu buvo panaudoti nauji CO₂ prietaisai COMET U3430, kurie pateikia rezultatus tikslumu $\pm (50\text{ ppm} + 3\%$ nuo rodomos reikšmės) prie 25 $^{\circ}\text{C}$ ir 1013 hPa.

Dėl šalyje įvestų apribojimų dėl infekcinės ligos COVID–19, klasių vėdinimo efektyvumo parametrus buvo nuspręsta apskaičiuoti iš jau turimų CO₂ koncentracijos kitimo laike duomenų, pasitelkiant dujų koncentracijos kritimo metodą.

Patalpose vėdinimo efektyvumo parametrai gali būti apskaičiuojami naudojant dujų koncentracijos kritimo metodą. Naudojant CO₂ kaip sekimo dujas iš matavimo duomenų išsklotinės yra pasirenkamas tas laikotarpis, kurio pradžioje dujų koncentracija yra pasiekusi aukštą vertę, o krisdama pabaigoje – foninės koncentracijos lygį. Tiriant periodą, kurio metu patalpoje nebuvo žmonių, iš užfiksuotų reikšmių yra atimama foninė koncentracija ir pagal gautus duomenis „Excel“ programa atliekami skaičiavimai pagal nurodytas formules *Ventilation effectiveness, REHVA 2004* [49]. Literatūroje pateikiamas skaičiavimo pavyzdys yra pavaizduotas 13 pav.



13 pav. Dujų koncentracijos kritimo diagramos pavyzdys [49]

Vidutiniu oro amžiumi vadiname trumpiausią laiką, per kurį oras patalpoje gali pasikeisti. Vidutinis oro amžius patalpoje yra apskaičiuojamas pagal esantį plotą po koncentracijos kritimo kreivę pagal formulę (2.2.1.)

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{c_i + c_{i-1}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1}) \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{2} \right] + \frac{c_n}{\lambda} \cdot \left[\frac{1}{\lambda} + t_n \right]}{\sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{c_i + c_{i-1}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1}) \right] + \frac{c_n}{\lambda}} \quad (2.2.1)$$

čia: $\bar{\tau}$ – vidutinis oro amžius

c_i – koncentracija i – tuoju laiko momentu

t_i – laiko momentas

c_n – koncentracija, nuo kurios yra atmetami nereikalingi duomenys

λ – šlaito koeficientas

Nominali laiko konstanta reiškia realų laiką, per kurį oras patalpoje pasikeičia. Ši konstanta apskaičiuojama pagal (2.2.2) formulę.

$$\tau_n = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{c_i + c_{i-1}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1}) \right] + \frac{c_n}{\lambda}}{c_0} \quad (2.2.2)$$

čia: τ_n – nominali laiko konstanta
 c_i – koncentracija i – tuoju laiko momentu
 t_i – laiko momentas
 c_n – koncentracija, nuo kurios yra atmetami nereikalingi duomenys
 λ – šlaito koeficientas
 c_0 – pradinė koncentracija

Vėdinimo efektyvumas yra tiekiamo oro paskirstymo indikatorius, nurodantis, kaip kokybiškai veikia vėdinimo sistema. Jis apskaičiuojamas pagal (2.2.3) formulę.

$$\varepsilon^a = \frac{\tau_n}{2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle} \cdot 100 [\%] \quad (2.2.3)$$

čia: τ_n – nominali laiko konstanta
 $\langle \bar{\tau} \rangle$ – vidutinis oro amžius

2.3. Rezultatai šaltuoju metų laiku

2.3.1. Temperatūros ir santykinio drėgnio matavimų rezultatai mokyklose

HOBO jutikliais abiejose mokyklose atliktų matavimų rezultatai, pateikti 6 lentelėje. Pirmojoje mokykloje 0,1 m aukštyje buvo užfiksuota mažiausia temperatūra (501) klasėje 14,1 °C, o didžiausia temperatūra 1,1 m aukštyje buvo užfiksuota (301) klasėje 22,9 °C. Analizuojant gautas reikšmes klasėse pastebėta, kad vidutinių temperatūrų diapazonas yra tarp 18,3 ir 20,3 °C. Apskaičiuotos vidutinės temperatūrų reikšmės 0,1 m ir 1,1 yra pavaizduotos 14–15 pav.

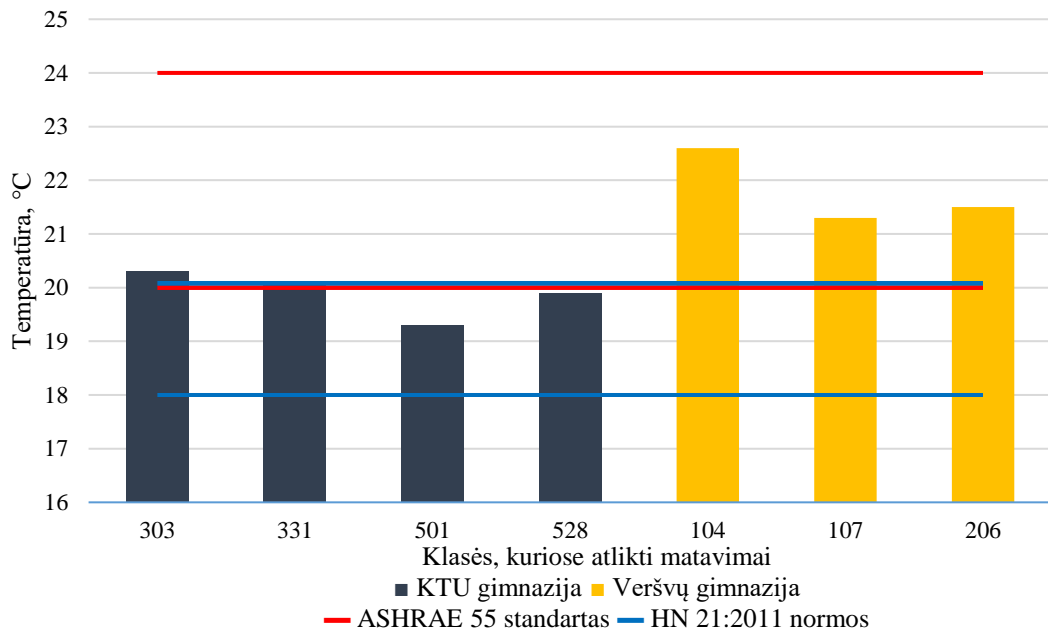
6 lentelė. HOBO jutikliais užfiksuotos reikšmės šaltuoju metų laiku

Klasių nr.	Matavimų aukštis	T _{min} , °C	T _{maks} , °C	T _{vid} , °C	SD _{min} , %	SD _{maks} , %	SD _{vid} , %
1	2	3	4	5	6	7	8
KTU gimnazija							
303	0,1 m	15,2	22,5	19,8	23	52	35
	1,1 m	15,2	22,9	20,3	23	84	36
331	0,1 m	17,1	21,3	19,7	25	53	38
	1,1 m	17,5	22,1	20,1	25	49	37
501	0,1 m	14,1	20,2	18,3	26	65	47
	1,1 m	15,6	21,3	19,3	23	39	31
528	0,1 m	16,0	22,5	19,9	27	65	37
	1,1 m	16,0	22,5	19,9	28	68	40

6 lentelės tęsinys

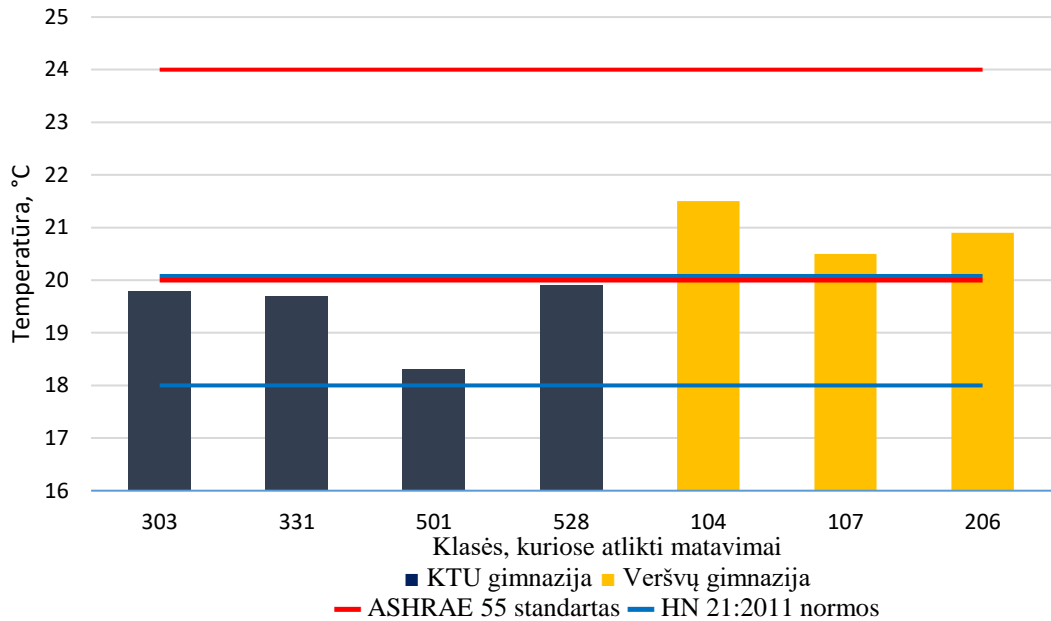
Veršvų gimnazija							
104	0,1 m	17,9	23,6	21,5	24	40	30
	1,1 m	19,4	25,6	22,6	23	36	27
107	0,1 m	16,4	22,1	20,5	23	23	23
	1,1 m	18,3	24,4	21,3	23	36	28
206	0,1 m	19,4	22,1	20,9	24	47	31
	1,1 m	19,4	24,0	21,5	24	49	31

Antrajame objekte buvo tiriamos 4 identiškios klasės, iš kurių vienoje dėl HOBO jutiklio gedimo nebuvo užfiksuoti rezultatai 1,1 m aukštyje ir todėl 6 lentelėje yra analizuojami tik trijų klasių (104, 107 ir 206) duomenys. Šioje mokykloje klasių temperatūra svyruoja nuo mažiausios (16,4 °C), užfiksuotos 0,1 m aukštyje (104 klasėje), ir iki aukščiausios (25,6 °C) temperatūros, užfiksuotos 1,1 m aukštyje (107 klasėje). Duomenų analizės metu apskaičiuotos vidutinių temperatūrų reikšmės, kurios yra 20,5–22,6 °C. Vidutinės temperatūrų reikšmės 1,1 m ir 0,1 m yra pateikiamos 14 ir 15 pav.



14 pav. Vidutinių temperatūrų reikšmės 1,1 m aukštyje

Pagal 14 pav. pavaizduotas vidutinės mokyklų temperatūrų reikšmės 1,1 m aukštyje matyti, kad į ASHRAE 55 standarto nurodytą temperatūrų intervalą patenka beveik visos abiejų mokyklų klasės, išskyrus pirmojo objekto (501) ir (528) klases. Daugiau nepatenkančių į intervalą, žemesnių vidutinių temperatūrų, buvo užfiksuota 0,1 m aukštyje. Rezultatai pateikti 15 pav.



15 pav. Vidutinių temperatūrų reikšmės 0,1 m aukštyje

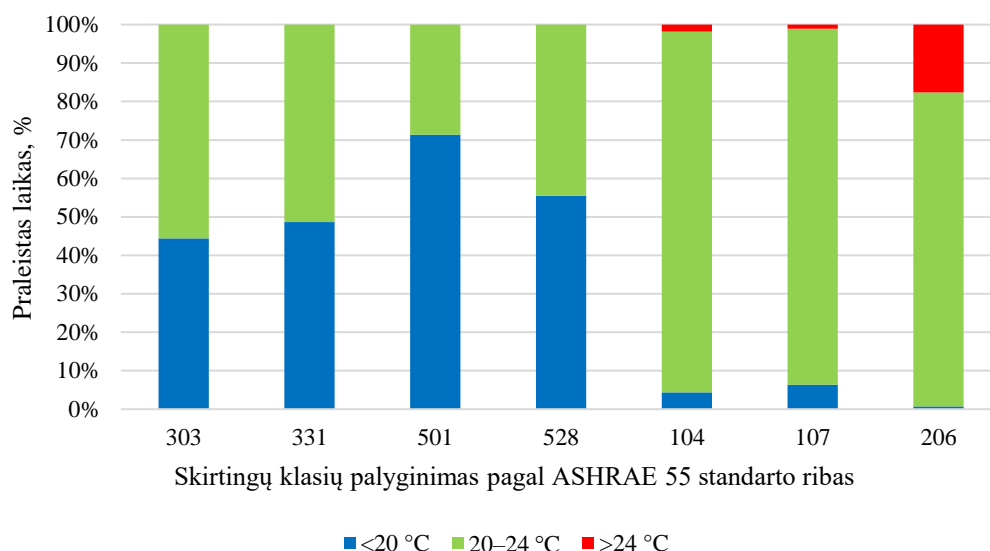
Analizuojant 6 lentelės ir 15 pav. duomenis buvo pastebėta, kad 0,1 m aukštyje (ties kulkšnimis) visose pirmosios mokyklos tirtose klasėse buvo užfiksuotos žemesnės reikšmės už rekomenduojamą 20 °C ribą. Apskaičiuotus pirmosios mokyklos temperatūrų skirtumus tarp 0,1 m ir 1,1 m buvo gautos temperatūros gradiento reikšmės, svyruojančios nuo 0 iki 2,67 °C. Nors šis intervalas tenkina Lietuvos HN 21:2011 standarte nurodomą maksimalią 3 °C gradiento reikšmę tarp 0,1 m ir 1,1 m aukštyje užfiksuotų rezultatų, šios sąlygos žmogaus termoreguliacinei sistemai yra nepalankios dėl žemesnės temperatūros negu 20 °C ties kojų kulkšnimis. Antrojoje mokykloje aukštesnė temperatūra už HN 21:2011 rekomenduojamą 3 °C reikšmę buvo užfiksuota tik tris kartus visose klasėse, matuojant reikšmes kas 10 min. Šiuos gradientų rezultatus abiejuose mokyklose galėjo lemti skirtingos vėdinimo sistemos – pirmojoje natūrali ir antrojoje mechaninė vėdinimo sistema.

Analizuojant rezultatus taip pat buvo sudaryta duomenų suvestinė, kurioje atsispindi procentais išreikštas mokinių praleidžiamas laikas tam tikromis temperatūros sąlygomis. Per 13 darbo dienų buvo ištirta 84,5 val. pirmojoje mokykloje ir 74,1 val. antroje. Rezultatai pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Praleisto laiko prie tam tikrų temperatūros ribų procentinė išraiška

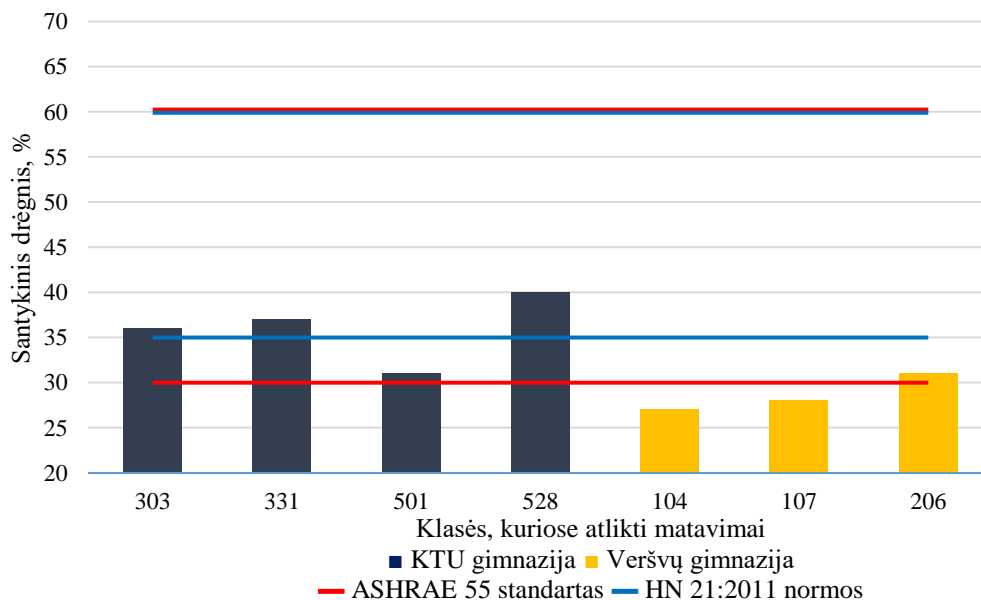
Intervalai	KTU gimnazija				Veršvų gimnazija		
	303	331	501	528	104	107	206
>24 °C	0	0	0	0	1,8	1,1	17,6
20–24 °C	55,6	51,3	28,6	44,5	93,8	92,5	81,7
<20 °C	44,4	48,7	71,4	55,5	4,4	6,4	0,7

Analizuojant duomenis pagal ASHRAE 55 standarto nurodomas komforto ribas nustatyta, kad pirmojoje mokykloje moksleiviai prie tinkamų komforto sąlygų praleidžia vidutiniškai 3 val., o antroje 5 val. per dieną. Grafikas pavaizduotas 16 pav.



16 pav. Praleistas laikas prie tam tikrų parametru išreikštas procentais

Vidutiniai santykinės drėgmės rodikliai primojo objekto klasėse buvo gauti tarp 31 ir 40 %. Visos pirmos mokyklos ištirtos klasės tenkina ASHRAE 55 standarto rekomendacijas, kurios yra tarp 30 ir 60 %. Santykinė drėgmė antroje mokykloje vidutinių reikšmių intervale kinta tarp 27–31 %. Dviejose klasėse (104 ir 107) buvo pasiektos žemiausios santykinio drėgnio reikšmės (po 23 %) ir aukščiausias (49 %) santykinis drėgnis (206 klasėje). Rezultatai pateikti 17 pav.



17 pav. Vidutinės santykinio drėgnio reikšmės 1,1 m aukštyje

2.3.2. Oro kokybės tyrimo rezultatai KTU gimnazijos klasėje

Naudojant *Awair 2nd Edition* prietaisą buvo išmatuoti charakteringi parametrai, padėsiantys įvertinti oro kokybę KTU gimnazijos informatikos klasėje šaltuoju metų laiku. 8 lentelėje pateikti rezultatai leidžia objektyviai įvertinti patalpoje esančių teršalų kiekį skirtingomis dienomis. Taip pat, remiantis

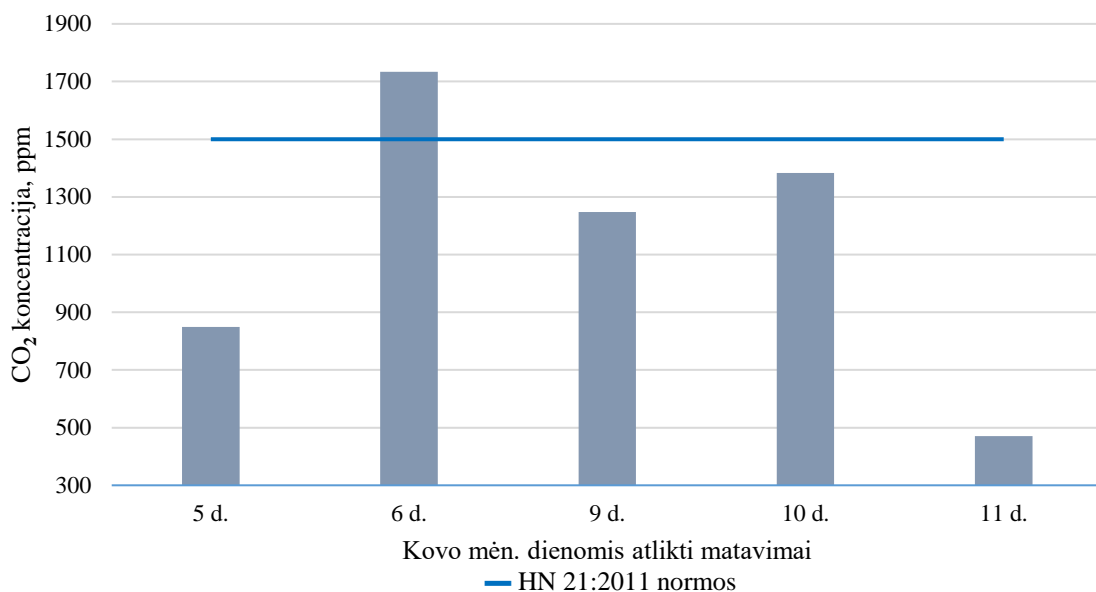
moksliniais straipsniais ir standartais, leidžia nustatyti galimą neigimą poveikį moksleivių sveikatai, kai reikšmės perkopia nurodytas slenkstines ribas.

8 lentelė. *Awair 2nd Edition* užfiksuoti duomenys

Kovo mėn. dienos	Reikšmės	T, °C	SD, %	CO ₂ , ppm	BLOJ, ppb	PM 2.5, μg/m ³	Prietaiso įvertinimas taškais
1	2	3	4	5	6	7	8
5	min.	17,8	33	400	22	4	81
	maks.	21,1	44	1093	5172	7	97
	vid.	20,1	39	849	363	5	90
6	min.	18,7	35	535	138	5	78
	maks.	23,3	46	2714	589	16	91
	vid.	22,1	40	1734	305	9	82
9	min.	19,3	40	429	161	4	82
	maks.	21,9	47	1826	465	15	97
	vid.	20,8	43	1247	301	7	88
10	min.	17,7	37	490	39	6	78
	maks.	22,0	47	2491	649	21	94
	vid.	20,7	43	1383	336	15	85
11	min.	19,9	40	439	165	4	97
	maks.	20,2	41	510	187	9	98
	vid.	20,1	40	470	174	6	98

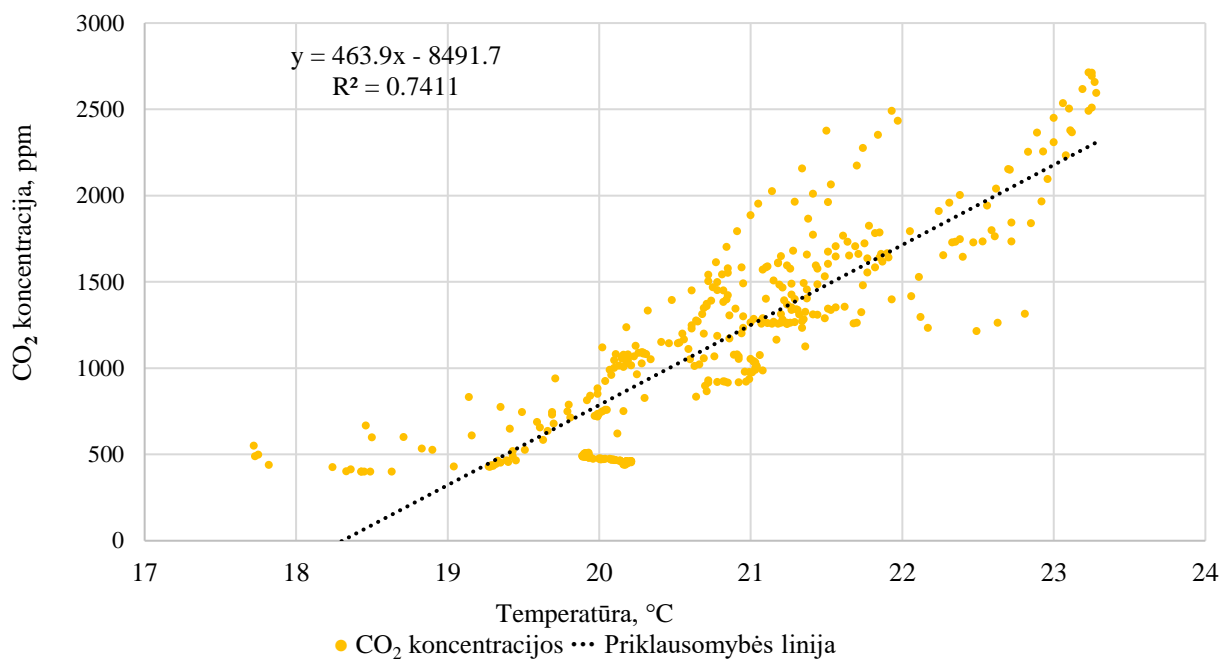
Iš 8 lentelėje pateiktų duomenų matome, kad klasės priekyje, netoli mokytojos darbo vietos, ant stalo 0,7 m aukštyje padėtas *Awair 2nd Edition* prietaisas užfiksavo reikšmes priklausančiam ASHRAE 55 standarto intervalui nuo 20–24 °C. Taip pat, be matuotų T ir SD parametrų HOBO jutikliais, 5 lentelė buvo papildyta anglies dvideginio (CO₂), lakiųjų organinių junginių (LOJ) ir kietųjų dalelių (PM 2.5) koncentracijų užfiksuotomis reikšmėmis. Analizuojant duomenis buvo pastebėta, kad vidutinis CO₂ koncentracijų užfiksuotų reikšmių intervalas prasideda nuo 470 ppm ir baigiasi ties 1734 ppm. Rezultatai pateikti 18 pav. Didžiausia vidutinė reikšmė 2714 ppm buvo užfiksuota kovo 6 d. Tuo metu taip pat buvo pasiekta didžiausia 23,3 °C temperatūra. Nagrinėjant LOJ koncentracijas, užfiksuotos kintančios vidutinės reikšmės tarp 174–363 ppb, maksimali užfiksuota vertė buvo 5172 ppb. Rezultatai pateikti 21 pav. Kietųjų dalelių PM 2.5 vidutinės reikšmės svyruoja nuo 5 iki 15 μg/m³. Rezultatai pateikti 22 pav.

Tiriant anglies dvideginio CO₂ koncentracijas matyti, kad HN 21:2011 standarte nurodyta 1500 ppm riba kertama kovo 6 d. *Awair 2nd Edition* matuokliu užfiksuoti duomenys rodo, kad 25 % tirtu pamokų ir pertraukų laiko yra viršijama didžiausia leistina 1500 ppm CO₂ koncentracijos norma. Taip pat, vertės, prasidedančios nuo 1000 ppm, sudarė 59 % tirtu laiko.



18 pav. Vidutinės CO₂ koncentracijos reikšmės 0,7 m aukštyje

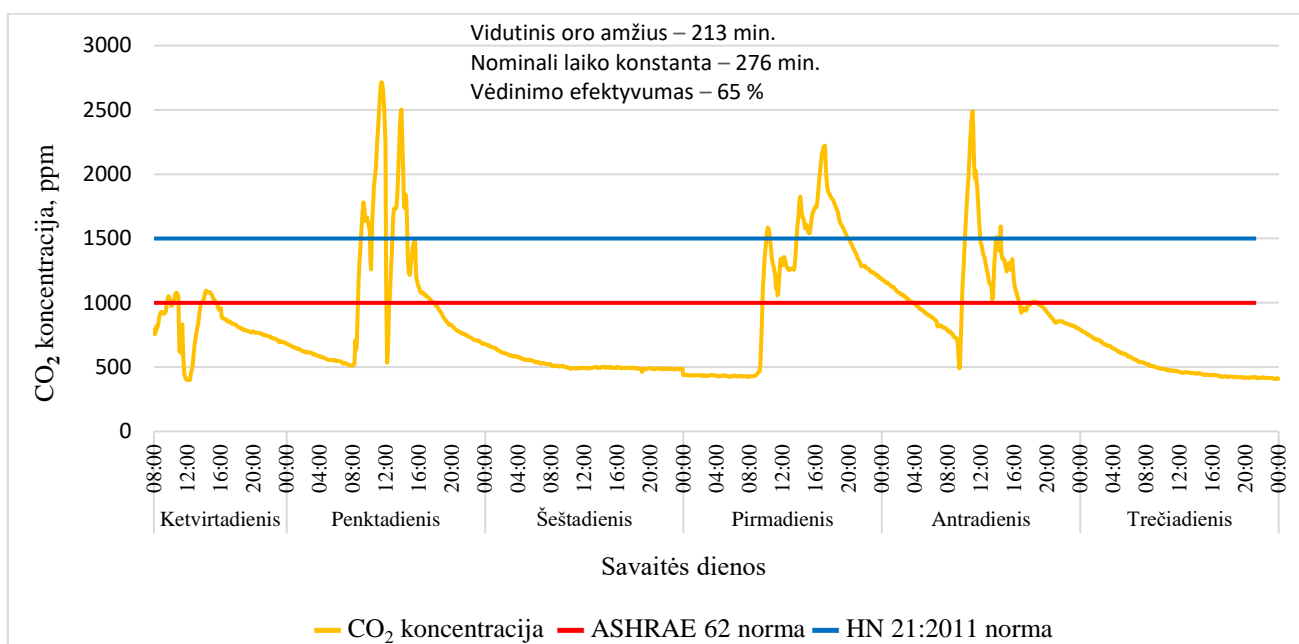
Nagrinėjant priklausomybę tarp skirtingų parametru, buvo atrastas stipriausias ryšys tarp CO₂ ir temperatūros parametru, kuris lygus $R^2=0,74$. Ši 19 pav. pateikta priklausomybė indikuoja, kad didėjant moksleivių skaičiui klasėje, dėl prasto natūralaus vėdinimo yra galimi dar didesni CO₂ koncentracijos šuoliai.



19 pav. CO₂ koncentracijos ir temperatūros ryšys

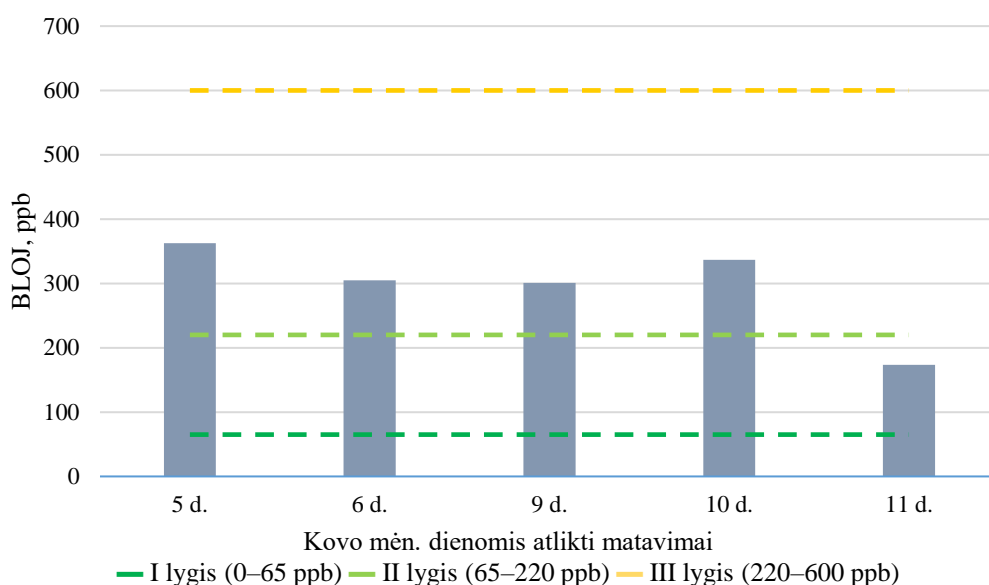
Remiantis tyrimo metu sukaupta CO₂ koncentracijos duomenų išsklotine nubraižytas grafikas, kuriame matyti, kaip koncentracija kinta savaitės dienomis. Pagal CO₂ koncentracijos kitimą nuo penktadienio 16 val. 30 min. iki šeštadienio 04 val. 55 min., kai informatikos klasėje nėra mokinių,

yra apskaičiuojami vėdinimo parametrai: vidutinis oro amžius ($\bar{\tau}$), nominali laiko konstanta (τ_n) ir oro kaitos efektyvumas (ϵ^a). Taikant dujų „sekimo“ metodą, iš analizuojamo laikotarpio duomenų yra atimama foninė 557 ppm CO₂ koncentracija ir atliekami aritmetiniai skaičiavimai pagal aprašytas formules tyrimo metodikoje.



20 pav. CO₂ koncentracijos kitimas informatikos klasėje

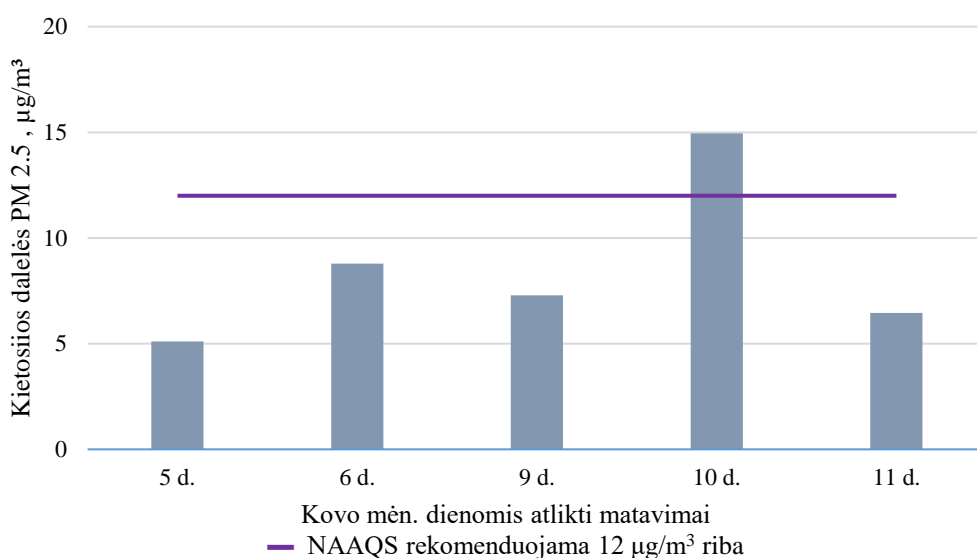
Atlikus BLOJ koncentracijų analizę iš 8 lentelėje pateiktų duomenų, grafikui buvo panaudojamos mokslininkų taikomos toksikologinės ribinės vertės, kurios buvo pagrįstos daugybės atliktų tyrimų, nusakančių ryšį tarp padidėjusio BLOJ lygio ir neigiamo poveikio sveikatai. Grafikas pateiktas 21 pav. Vokietijos nacionalinė aplinkos agentūra BLOJ išskiria į 5 lygius, kurie pagal BLOJ koncentraciją įvertina aplinkos higienos situaciją, pateikia prevencinių veiksnių rekomendacijas ir leidžiamą maksimalų ekspozicijos laiką prie skirtingų koncentracijų lygių. I (0–65 ppb) lygiui nėra taikomi jokie reikalavimai, jis laikomas siekiamu rodikliu, nusakančiu puikią oro kokybę vidaus patalpose. II (65–220 ppb) lygis vertinamas kaip geras, bet jam rekomenduojamas neženklus vėdinimo intensyvumo padidinimas. III (220–600 ppb) lygis yra vertinamas vidutiniškai, bet rekomenduojama atrasti LOJ šaltinius ir pintensyvinti vėdinimą patalpoje. Maksimalus rekomenduojamas ekspozicijos limitas prie šių sąlygų yra iki 12 mėn. IV (600–2200 ppb) lygis taiko griežtesnes rekomendacijas, kurios nusako, kad intensyvesnis vėdinimas yra būtinas ir reikia atrasti šaltinius, sukeliančius sveikatos sutrikimus. Maksimalus laiko limitas yra iki 1 mėn. V (2200–5000 ppb) lygis apibūdina situaciją kaip netoleruotiną ir tokioje patalpoje rekomenduojama būti tik trumpais periodais (valandomis) [31].



21 pav. BLOJ vidutinės koncentracijos 0,7 m aukštyje

Remiantis 8 lentelėje gautomis parametru reikšmėmis ir plataus spektro moksliniais tyrimais, galima teigti, kad BLOJ vidutinės reikšmės kovo mėn. patenka į 220–600 ppb intervalo ribas visomis dienomis, išskyrus 11 d. Informatikos klasėje rekomenduojamas efektyvesnis vėdinimas ir lakiųjų organinių šaltinių pašalinimas iš patalpos, o maksimali rekomenduojama ekspozicija – 12 mėn. Užfiksuotos maksimalios momentinės vertės (1377, 2333 ir 5172 ppb) galėjo kilti dėl žmonių naudojamų kosmetinių arba valymo priemonių.

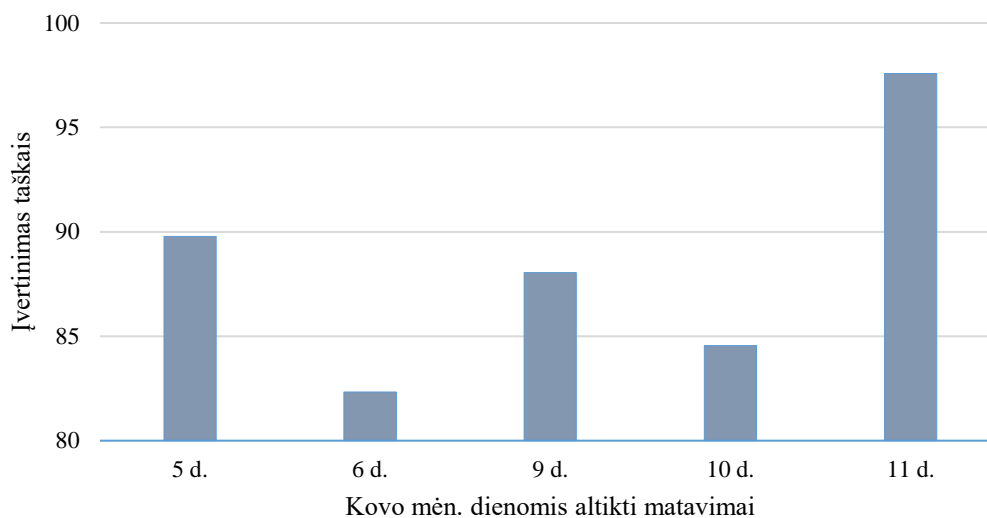
Pagal nepriklausomos agentūros EPA (Environmental Protection Agency) (liet. Aplinkos apsaugos agentūros) NAAQS (angl. *National Ambient Air Quality Standards*) standarto keliamus reikalavimus taip pat buvo analizuojamos gautos vidutinės ir maksimalios kietųjų dalelių PM 2.5 reikšmės. EPA agentūros NAAQS standarte yra išskirtos dvi priminių ir antrinių standartų kategorijos. Pagal pirminę standartų kategoriją yra išskiriama jautresnė žmonių grupė: astma sergantys žmonės, garbingo amžiaus žmonės, naujagimiai ir vaikai. Pagal šią standarto kategoriją rekomenduojama metinė vidutinė ribinė vertė yra 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [50]. Grafikas su duomenimis pateiktas 22 pav.



22 pav. PM 2.5 koncentracijos reikšmės 0,7 m aukštyje

Duomenų analizės metu buvo pastebėta, kad vidutinės reikšmės įsiterpia tarp 5–15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tiriant sukauptų duomenų išsklotinę taip pat buvo įžvelgta, kad didžiausios 16 ir 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ reikšmės buvo pasiektos kovo 6 d. ir kovo 10 d., kai buvo užfiksuotas didžiausias santykinis drėgnis ir CO₂ koncentracijos. Iš pateiktų mokslinių duomenų galima teigti, kad didelė PM 2.5 kietųjų dalelių koncentracija tiesiogiai paveikia sveikatą. Žmogui pasireiškia širdies ir kraujagyslių ligos – aritmija ir širdies smūgiai. Taip pat yra paveikiama respiratorinė sistema, sukeliama astmos priepuoliai ir bronchitas. Kietosios dalelės gali patekti į kraujo sistemą per plaučius.

Naudojant *Awair 2nd Edition* prietaisą automatiškai išsaugomi oro kokybės įvertinimo duomenys. Prietaisas oro kokybę vertina pagal kintamus 5 faktorius: temperatūrą, santykinę drėgmę, CO₂ koncentraciją, BLOJ lygį ir kietąsias daleles. Įvertinimas yra nusakomas intervalais: 0–59 nusako blogą oro kokybę, 60–79 neblogą ir 80–100 gerą. Rezultatai pateikti 23 pav.



23 pav. *Awair 2nd Edition* prietaiso įvertinimas taškais

Pagal gautus tyrimo rezultatus matyti, kad geriausiai vertinama kovo 11. d, kai galimai nevyko pamokos arba buvo mažas lankomumas dėl artėjančio karantino paskelbimo. Kitomis dienomis oro kokybė prietaiso duomenimis buvo įvertinama taip pat gerai. Žemiausi 78 balų įvertinimai buvo pastebėti kovo 6 d. ir 10 d., kai buvo pasiektos aprašytos aukštesnės CO₂ ir PM 2.5 koncentracijos.

2.4. Rezultatai šiltuoju metų laiku

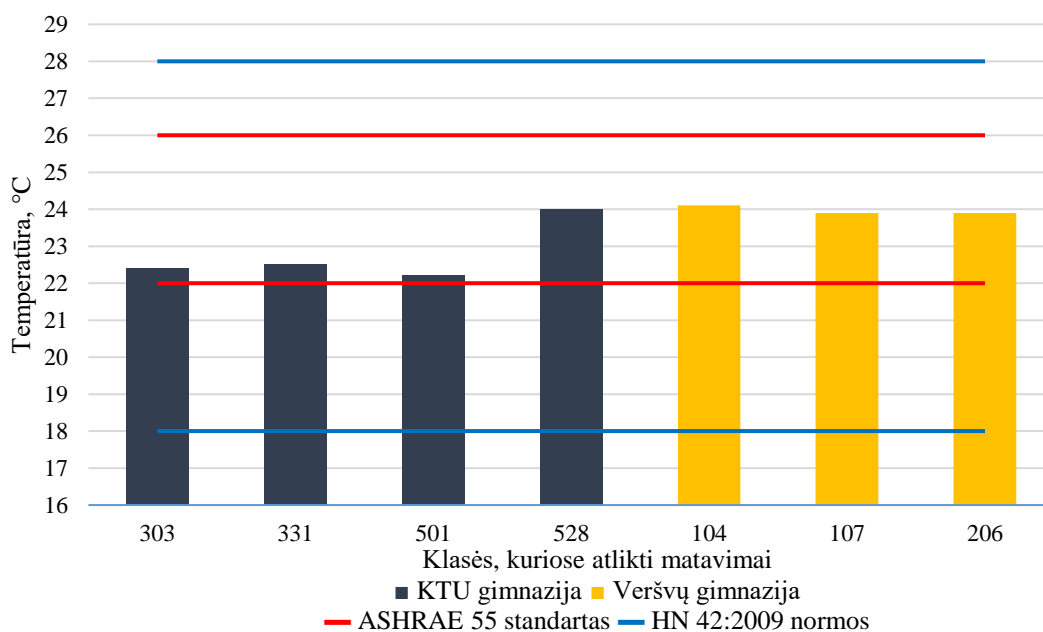
2.4.1. Temperatūros ir santykinio drėgnio matavimų rezultatai mokyklose

HOBO jutikliais šiltuoju metų laiku (tarp 2020 metų rugsėjo 9 d. ir rugsėjo 25 d.) mokyklose atliktų matavimų rezultatai pateikti 9 lentelėje. KTU gimnazijoje mažiausia užfiksuota temperatūra (18,3 °C) buvo 331 klasėje, 0,1 m aukštyje, o didžiausia (26,3 °C) temperatūra užfiksuota 1,1 m aukštyje, 528 informatikos klasėje. Veršvų gimnazijoje iš visų klasių išsiskyrė 104-oji, kurioje 1,1 m aukštyje buvo užfiksuota mažiausia (16,8 °C) ir didžiausia (28,3 °C) temperatūra. Rezultatai pateikti 9 lentelėje.

9 lentelė. Hobo jutikliais užfiksuotos reikšmės šiltuoju metų laiku

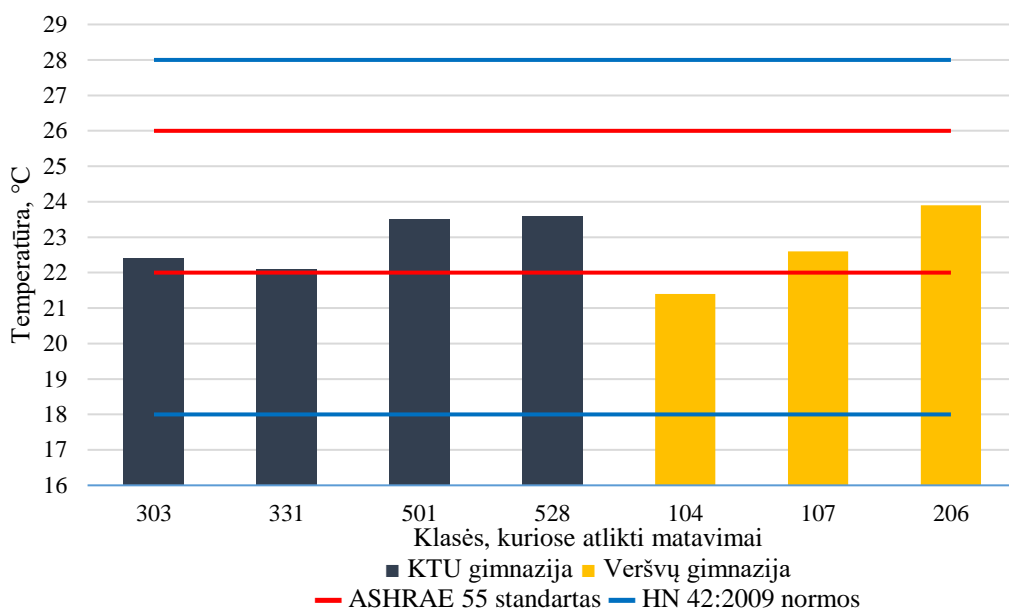
Klasių nr.	Matavimų aukštis	T _{min} , °C	T _{maks} , °C	T _{vid} , °C	SD _{min} , %	SD _{maks} , %	SD _{vid} , %
1	2	3	4	5	6	7	8
KTU gimnazija							
303	0,1 m	20,2	24,8	22,4	23	26	24
	1,1 m	19,8	25,2	22,4	34	68	49
331	0,1 m	18,3	23,6	22,1	29	62	48
	1,1 m	18,7	24,4	22,5	29	63	48
501	0,1 m	19,0	25,3	23,5	24	69	50
	1,1 m	19,0	25,6	22,2	29	65	46
528	0,1 m	20,2	26,0	23,6	23	36	28
	1,1 m	20,2	26,3	24,0	29	65	47
Veršvų gimnazija							
104	0,1 m	17,1	24,0	21,4	35	64	53
	1,1 m	16,8	28,3	24,1	27	64	47
107	0,1 m	19,8	24,8	22,6	32	67	51
	1,1 m	19,8	27,5	23,9	31	65	49
206	0,1 m	20,6	25,6	23,9	30	67	47
	1,1 m	20,6	27,5	23,9	30	62	45

Iš gautų vidutinių reikšmių 1,1 m aukštyje, KTU gimnazijos klasėse patenka į 22,2–24,0 °C intervalą, o Veršvų gimnazijos klasės į 23,9–24,1 °C intervalą. Pagal vidutines reikšmes 1,1 m aukštyje pateikimas 24 pav. grafikas, kuriame matyti, kad visos klasės tenkina ASHRAE 55 standarto (22–26 °C) ir HN 42:2009 (18–28 °C) normų ribas.



24 pav. Vidutinių temperatūrų reikšmės 1,1 m aukštyje

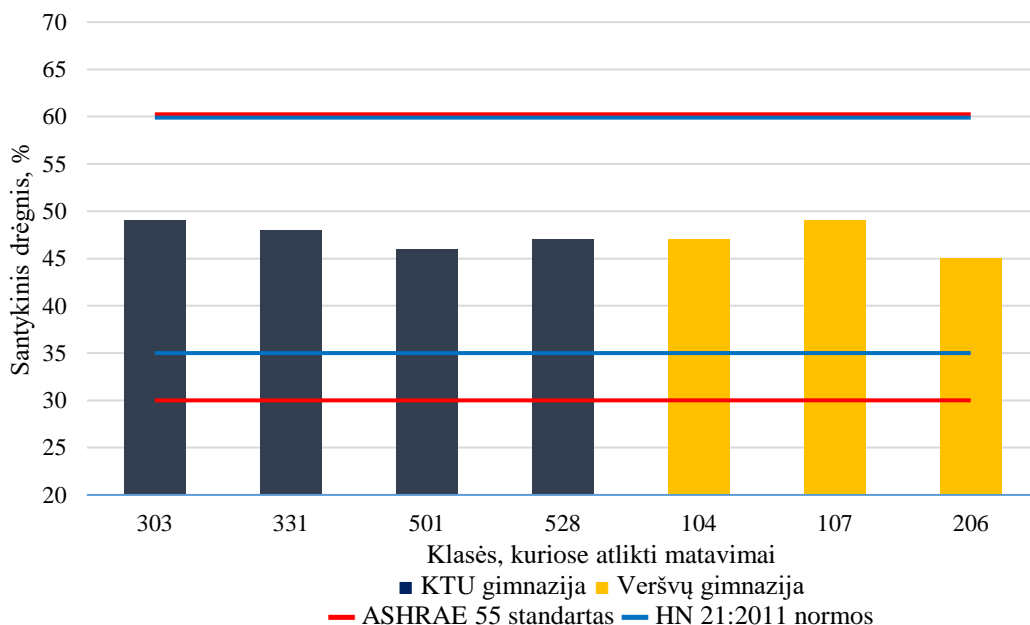
Atsižvelgiant į vidutines temperatūrų reikšmes 0,1 m aukštyje, KTU gimnazijos klasėse patenka į 22,1–23,6 °C intervalą, o Veršvų gimnazijos klasės patenka į 21,4–23,9 °C intervalo ribas. Pagal anksčiau nurodytus reglamentus, visos klasės atitinka reikalavimus, išskyrus 104-ąją, kurioje vidutinė 21,4 °C reikšmė netenkinio ASHRAE standarto 22 °C žemiausios ribos. Grafikas pateikiamas 25 pav.



25 pav. Vidutinių temperatūrų reikšmės 0,1 m aukštyje

O. Seppänenas ir kt. (2006) [51] atrado ryšį tarp temperatūros ir biuro darbuotojų darbingumo. Jų tyrimas atskleidė, kad darbingumas nukrenta esant žemesnei nei 21–22 °C arba aukštesnei negu 23–24 °C temperatūrai. Optimali temperatūra darbui yra apie 22 °C.

Pagal 9 lentelėje pateiktas 1,1 m aukštyje santykinio drėgumo reikšmes nubraižytame grafike (26 pav.) matyti, kad abiejų mokyklų klasės tenkina ASHRAE 55 standarto (30–60 %) ir HN 21:2011 (35–60 %) normų ribas. Grafikas pateikiamas 26 pav.



26 pav. Vidutinės santykinio drėgumo reikšmės 1,1 m aukštyje

2.4.2. CO₂ koncentracijų tyrimai klasėse

Po atliktų oro kokybės bendrų parametrų tyrimų su *Awair 2nd Edition* prietaisu šaltuoju metų laiku, informatikos klasėje, kurioje buvo užfiksuota didžiausia CO₂ koncentracijos 2714 ppm reikšmė, viršijanti standartų ribas, buvo nuspręsta CO₂ koncentracijų tyrimą atlikti su COMET U3430 jutikliais keturiose klasėse šiltuoju metų laiku. Kiekvienoje mokykloje ištyrus po dvi pasirinktas klases buvo gauti rezultatai, kuriuose matyti, kad KTU gimnazijoje su natūraliuoju vėdinimu buvo užfiksuota didžiausia (3783 ppm) CO₂ koncentracija 303 klasėje. Veršvų gimnazijoje su sumaišomojo mechaninio vėdinimo sistema buvo užfiksuota didžiausia CO₂ koncentracijos reikšmė (2447 ppm) 104 klasėje. Taikant dujų koncentracijos kritimo metodą, formulėmis aprašytą metodinėje dalyje, gauti KTU gimnazijos klasių natūralaus vėdinimo rodikliai. Rezultatai pateikti 10 lentelėje.

10 lentelė. CO₂ koncentracijų tyrimo rezultatai šiltuoju metų laiku

Klasių nr.	Matavimų aukštis	CO ₂ min, ppm	CO ₂ max, ppm	CO ₂ vid, ppm	Oro amžius, min	Nominali laiko konstanta, min	Vėdinimo efektyvumas, %
1	2	3	4	5	6	7	8
KTU gimnazija							
303	1,1 m	373	3783	1047	123	152	62
528	0,7 m	385	2225	1037	213	276	65
Veršvų gimnazija							
104	0,7 m	366	2447	1162	-		
206	0,7 m	326	1894	988			

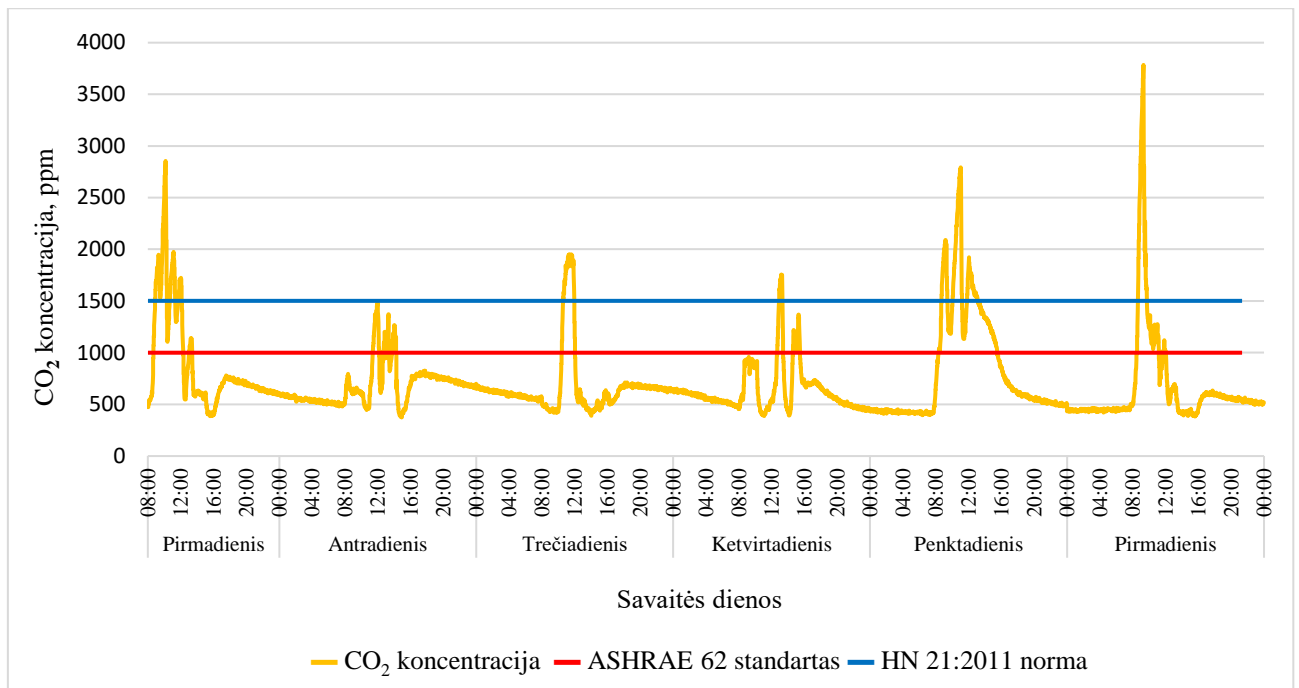
* 528 klasės vėdinimo efektyvumo rodikliai šaltuoju laikotarpiu

Nagrinėjant rezultatus pagal HN 21:2011 normose (1500 ppm) ir ASHRAE 62 standarte (1000 ppm) nustatytas maksimalias ribas pagal laiką, apskaičiuotus rezultatus buvo gautos procentinės reikšmės, kurios nurodo, kiek laiko moksleiviai praleidžia prie tam tikrų parametrų. Rezultatai pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė. CO₂ koncentracijų įvertinimas pagal standartus ir laiką, išreikštą procentais

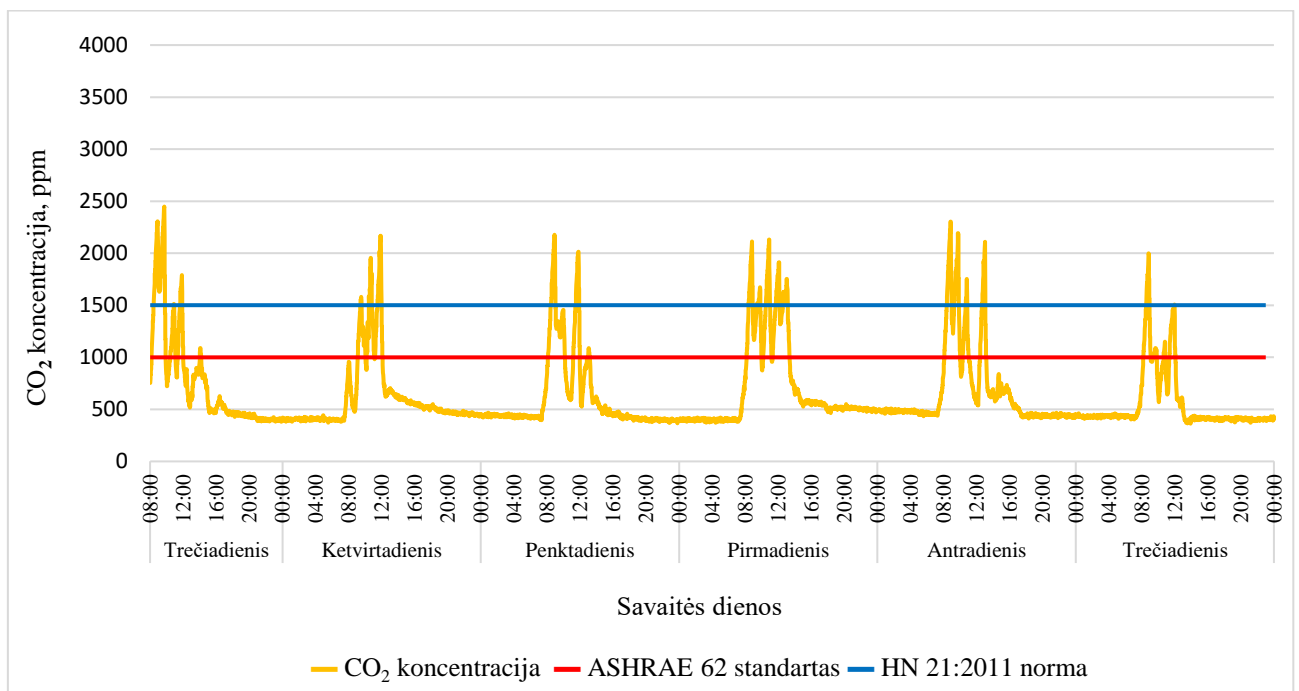
Intervalai	KTU gimnazija		Veršvų gimnazija	
	303	528	104	206
> 1000 ppm	45,5	48,3	48,3	37,7
> 1500 ppm	21,7	16,1	20,8	5,5

Išanalizavus KTU gimnazijos klases rezultatus buvo gauta, kad ASHRAE 62 standarto nurodoma 1000 ppm CO₂ koncentracijos riba buvo viršijama 45,5 % tirtu laiko 303 klasėje ir 48,3 % 528 klasėje. Atsižvelgiant į HN 21:2011 standartą, kuriame nurodoma didesnė 1500 ppm koncentracijos riba, buvo nustatyta, kad reikalavimų netenkino 21,7 % tirtu laiko 303 klasė ir 528 klasė, kurioje nurodyta koncentracija buvo viršijama 16,1 % tirtu laiko. Grafikas, iliustruojantis koncentracijos kitimą KTU gimnazijos 303 klasėje, kurioje buvo užfiksuota didžiausia 3783 ppm reikšmė, pateikiamas 27 pav., o 528 informatikos klasės grafikas pateikiamas 1 priede.



27 pav. CO₂ koncentracijos kitimo grafikas KTU gimnazijos 303 klasėje

Taip pat, Veršvų gimnazijoje išsiskyrė 104 klasė, kurioje 1000 ppm riba buvo viršyta 48,3 % tiriama laiko, o 1500 ppm riba – 20,8 %. Ištirtos 104 klasės CO₂ koncentracijos grafikas pateiktas 28 pav., o 206 klasės grafikas pateiktas 2 priede.



28 pav. CO₂ koncentracijos kitimo grafikas Veršvų gimnazijos 104 klasėje

Rezultatai rodo, kad abiejose mokyklose vėdinimo sistemos nepakankamai užtikrina šviežio oro tiekimą ir prastai šalina teršalus iš darbo zonos tirtuose taškuose. Dauguma mokslinių tyrimų 1000 ppm CO₂ koncentracijos ribą nurodo kaip slenkstinę, nuo kurios prasideda menki negalavimai, susiję su mieguistumu, galvos svaigimu ir prastesniu lankomumu. CO₂ koncentracijos padidėjimas nuo 600 iki 1000 ppm arba nuo 900 iki 1200 ppm dėl neefektyvaus vėdinimo paveikia mokinių

kognityvines funkcijas, padedančias susidoroti su užduotimis. Dėl išvardintų sąlygų mokinių skaičiavimo greitis gali sumažėti nuo 10–20 % [52].

2.5. Tiriamosios dalies išvados

1. Šaltuoju metų laiku visų apskaičiuotų mokyklų klasių vidutinės temperatūrų reikšmės darbo zonoje tenkina minimalius HN 21:2011 reikalavimus.
2. Išanalizavus praleidžiamą laiką pagal ASHRAE 55 standarto nurodomą 20–24°C komforto temperatūrų diapazoną šaltuoju metų laiku, buvo gauta, kad pirmoje mokykloje mokiniai prie šių sąlygų praleido vidutiniškai 45 %, o antroje 90 % ištirto pamokų laiko.
3. Šiltuoju metų laiku mokyklose yra tenkinami tiek ASHRAE 55 standarto, tiek HN 42:2009 normų keliami temperatūros ir santykinio drėgumo reikalavimai.
4. Pagal apskaičiuotas vidutines santykinio drėgumo reikšmes šaltuoju metų periodu, pirmosios mokyklos 25 %, o antrosios 100 % ištirtų klasių neatitiko HN 21:2011 rekomendacijų.
5. Atlikus oro kokybės matavimus pirmos mokyklos informatikos klasėje, apskaičiuotos LOJ vidutinės reikšmės 83 % tirtų dienų patenka į 220–600 ppb intervalą. Vokietijos agentūra „Umweltbundesam“ (UBA) rekomenduoja tokioje patalpoje padidinti vėdinimo intensyvumą ir identifikuoti LOJ šaltinius.
6. Pirmoje mokykloje su natūraliuoju vėdinimu pagal ASHRAE 62 standarto nurodytą CO₂ koncentracijos 1000 ppm ribą buvo viršijama 51 % tirtu laiku, o antroje su mechaniniu vėdinimu – 43 %. Anglies dvideginio (CO₂) koncentracijai klasėse padidėjus nuo 900 iki 1200 ppm suprastėja mokinių kognityvinės funkcijos (gebėjimas greitai skaičiuoti).

3. Skaitinis modeliavimas

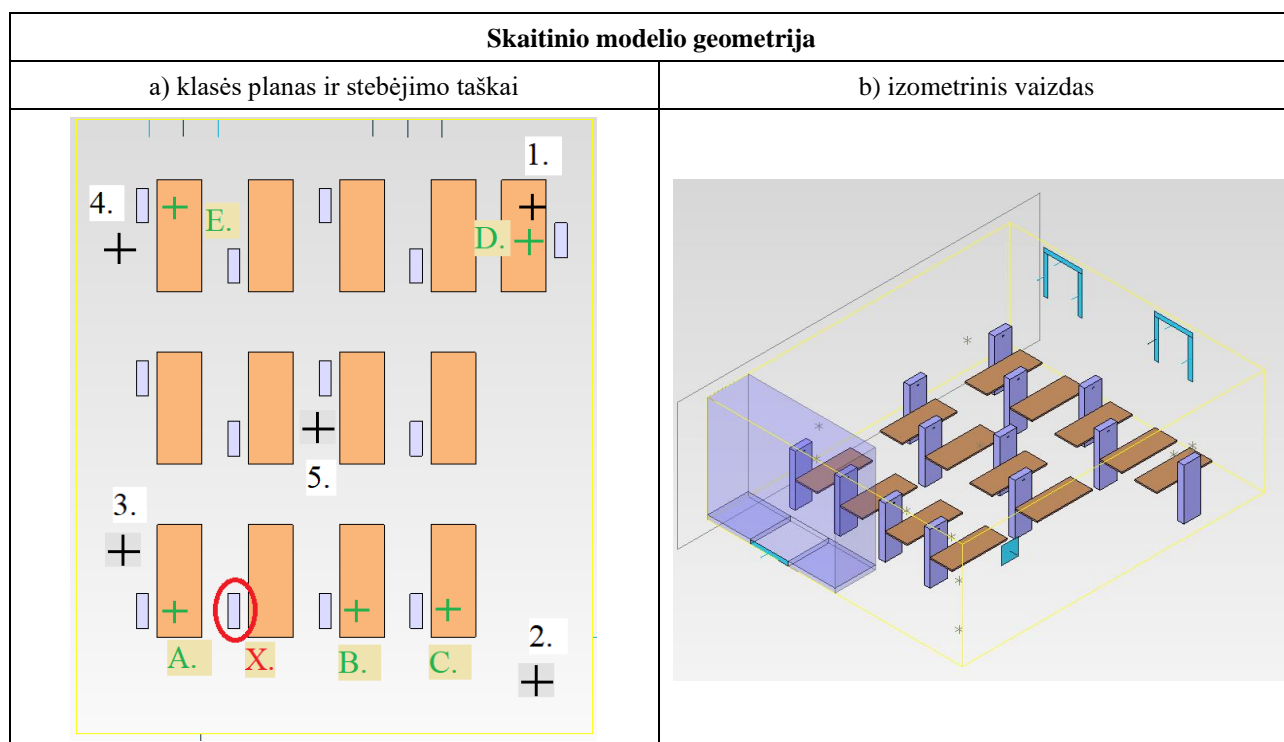
Skysčių dinamikos metodas (CFD) yra išvystyta ir efektyvi technologija, leidžianti mokslininkams modeliuoti pastatų ŠVOK inžinerines sistemas. Pritaikius šį metodą galima ištirti patalpų tūryje vykstančius procesus (šilumos perdavimo, oro judėjimo ir teršalų sklaidimo), nuo kurių priklauso šiluminis komfortas ir oro kokybė [53]. Šio baigiamojo projekto modelių kūrimui buvo pasirinkta FloVENT programa. Ši programa, galinti tirti patalpos tūryje vykstančius procesus, naudoja matematinės (Navje–Stokso) lygtis, kurios kiekvienoje tinklelio celėje apskaičiuoja greitį, temperatūrą ir slėgį. Tarp galimų pasirinkti skaičiavimo modelių, vienas iš universaliai pritaikomų skaičiavimams yra LVEL K–Epsilon modelis [53, 54].

3.1. Skaitinio modeliavimo metodika

Atlikus natūrinių tyrimų analizę paaiškėjo, kad abiejose mokyklose vienas iš kritinių parametru yra aukštas CO₂ lygis klasėse, indikuojantis prastą vėdinimo efektyvumą. Skirtingų vėdinimo ir šildymo sistemų modeliavimui buvo pasirinkta KTU gimnazijos 303 klasė su natūraliuoju vėdinimu, kurioje buvo užfiksuota aukščiausia CO₂ koncentracija iš visų tirtų mokyklų klasių, lygi 3783 ppm. Iš sukauptų duomenų, naudojant „Excel“ programą, buvo apskaičiuotas vienos pasirinktos pamokos vidutinis 1437 ppm CO₂ koncentracijos lygis darbo zonoje (1 taške). Taip pat buvo apskaičiuota vidutinė 22,7 °C temperatūra 1,1 m aukštyje (2 taške). Pagal šiuos du stebėjimo taškus buvo įvertintas skaitinio modelio tikslumas.

Vėdinimo ir šildymo sistemų palyginimui kiekviename modelyje buvo ištirtos temperatūros 1–5 stebėjimo taškuose (0,1 ir 1,1 m aukštyje) ir taip pat šiuose taškuose buvo 1,1 m aukštyje ištirta CO₂ koncentracija. Tarp modelių taip pat buvo palyginimas viruso pasklidimas nuo užkrėsto žmogaus, esančio X taške. Virusų koncentracija buvo ištirta A–E taškuose 1,1 m aukštyje – darbo zonoje. Matavimo taškai pavaizduoti 12 lentelėje.

12 lentelė. KTU gimnazijos 303 klasės parametrai ir vaizdai



Pirmasis CFD modelis buvo sukurtas tam, kad būtų galima atkurti realias sąlygas tiriamoje klasėje šiltuoju metų laiku pagal jau išmatuotus CO₂ koncentracijos lygius, sienų paviršiaus ir stebėjimo taškuose užfiksuotas temperatūras. Pagal sukurtą modelį yra sukuriama likę moduliai su skirtingomis šildymo vėdinimo sistemomis. Gauti rezultatai yra palyginami pagal CO₂ ir viruso koncentracijas ir taip pat pagal šiluminio komforto rodiklius (PMV ir PPD). Modeliuojami variantai pagal sezonus aprašyti 13 lentelėje.

13 lentelė. Modeliuojamos šildymo – vėdinimo sistemos

Sezonas	Varianto Nr.	Aprašymas
Šiltasis	I variantas	Pradinis modelis, kuriame yra atkurtos realios klasės sąlygos šiltuoju metų laiku su natūraliuoju vėdinimu. Pagal šį modelį yra sumodeliuoti likę variantai su skirtingomis šildymo ir vėdinimo sistemomis. CO ₂ koncentracijos ir temperatūros pasiskirstymas pjūvyje.
	II variantas	II variantas. Šiuo variantu yra patikrinama, kaip pasiskirstys CO ₂ koncentracija ir temperatūra pjūvyje, kai klasėje veikia mechaninis sumaišomasis vėdinimas.
	III variantas	Šiuo variantu yra patikrinama, kaip pasiskirstys CO ₂ koncentracija ir temperatūra pjūvyje, kai klasėje veikia mechaninis išstumiamasis vėdinimas
Šaltasis	IV variantas	Šiame variante yra analizuojama, kaip pradiniame modelyje su natūraliuoju vėdinimu kinta temperatūros pasiskirstymas klasėje, pakeičiant šildymo būdą dvejais atvejais: a) su radiatoriniu šildymu, b) su grindiniu šildymu.
	V variantas	Šiame variante yra analizuojama, kaip modelyje su mechaniniu sumaišomuoju vėdinimu kinta temperatūros pasiskirstymas klasėje, pakeičiant šildymo būdą dvejais atvejais: a) su radiatoriniu šildymu, b) su grindiniu šildymu
	VI variantas	Šiame variante yra analizuojama, kaip modelyje su mechaniniu išstumiamuoju vėdinimu kinta temperatūros pasiskirstymas klasėje, pakeičiant šildymo būdą dvejais atvejais: a) su radiatoriniu šildymu, b) su grindiniu šildymu

3.2. Skaitinio modelio kraštinės sąlygos

Skaitiniame modelyje pagal projekte pateiktus matmenis (6,0 x 7,12 x 2,7) ir pagal realų klasės suolų išdėstymą atkurta 303 klasė. Joje yra 13 žmonių, kurie išspinduliuoja 80 W šilumos, iškvepia 35 °C temperatūros orą turintį 40000 ppm CO₂ koncentraciją. Vidinės sienos su grindimis bei lubomis yra 20 ±0,5 °C temperatūros, o išorinė siena lygi 18 °C. Be natūralaus vėdinimo taip pat yra sumodeliuojamos mechaninio vėdinimo sistemos – sumaišomojo ir išstumiamojo (terminio). Abiejomis vėdinimo sistemomis yra tiekiamas šviežias 18 °C oras, kurio tiekama po 36 m³/h kiekvienam žmogui (iš viso patalpai 468 m³/h). Oro paskirstymui naudojama po 2 tiekimo ir šalinimo skirstytuvus. Vėdinimo ir šildymo sistemų palyginimui šaltuoju metų laiku yra sumodeliuojamas radiatorinis ir grindinis šildymas. Dviem radiatoriams parinkta 35 °C temperatūra, o grindiniam šildymui 24 °C. Vidinės sienos su grindimis bei lubomis yra 18 ±0,5 °C temperatūros, o išorinė siena lygi 16 °C.

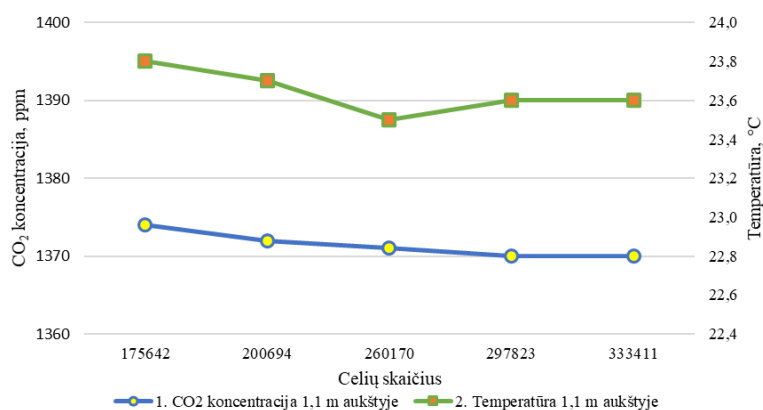
Viruso pasklidimui klasėje nuo infekuoto žmogaus X taške buvo pasirinkta 2000 ppm viruso koncentracija tam, kad būtų galima palyginti koncentracijos kitimą nuo A iki E stebimų taškų pagal sukurtus modelius. Iškosėtų viruso lašelių parametrai pagal kitų mokslininkų tyrimus yra pateikti 14 lentelėje [55].

14 lentelė. Iškosėtų lašelių savybės

Iškvėpimo greitis kosėjant	Iškvėpiamo oro temperatūra	Viruso dalelių skersmuo
7 m/s	35 °C	5 μm

3.3. Skaitinio modelio tikslumo įvertinimas

Sukūrus pradinį CFD modelį, buvo patikrinamas skaitinio modelio tikslumas keičiant tinklelio tankumą. Tikrinant tikslumą nuo 175642 iki 333411 celių, nustatyta, kad tiksliausia CO₂ koncentracija ir temperatūra 1 ir 2 taškuose buvo gaunama nuo 297823 celių, ir dėl tikslumo modeliuose buvo atliekamos simuliacijos nuo 300000 celių. Tiksliesniems rezultatams gauti taip pat buvo naudojamas dvigubo tikslumo sprendėjas (DPS). Parametrų priklausomybė nuo celių skaičiaus pateikta 29 pav.



29 pav. Skaitinio modelių rezultatų priklausomybė nuo celių skaičiaus

Gauti modeliavimo rezultatai buvo palyginti su natūrinių tyrimų gautais rezultatais, pateiktais 15 lentelėje.

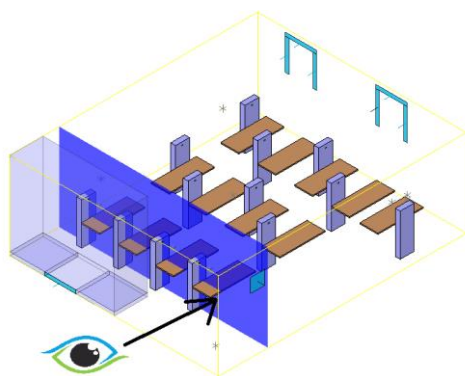
15 lentelė. Skaitinio modelio ir natūrinių tyrimų rezultatų palyginimas

Stebėjimo taškai 1,1 m aukštyje	Reikšmė natūrinių tyrimų metu	Reikšmė skaitiniame modelyje	Skirtumas, %
1. CO ₂	1437 ppm	1370 ppm	4,89
2. T	22,7 °C	23,3 °C	2,99

Iš apskaičiuotų natūrinių ir skaitinio modelio reikšmių skirtumų, apskaičiuota santykinė paklaida, lygi 3,94 %. Ši gauta santykinė paklaida neviršija 10 % ir tai rodo, kad modelis yra gana tikslus [56].

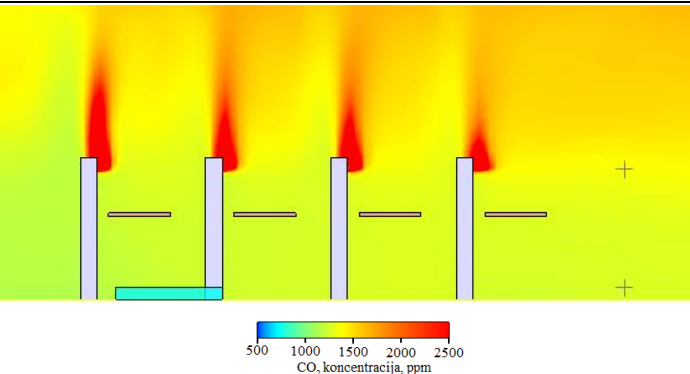
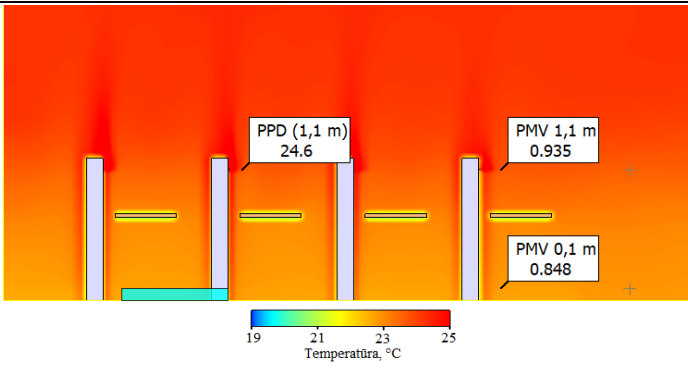
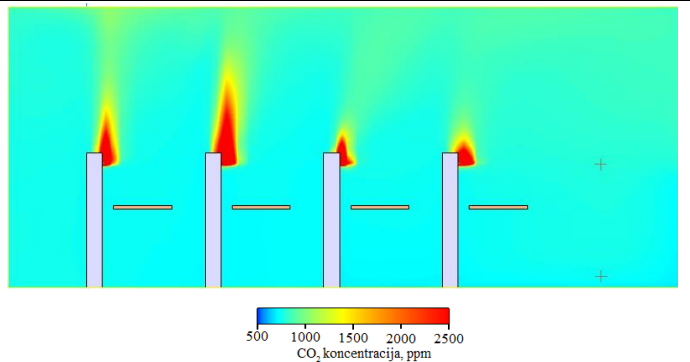
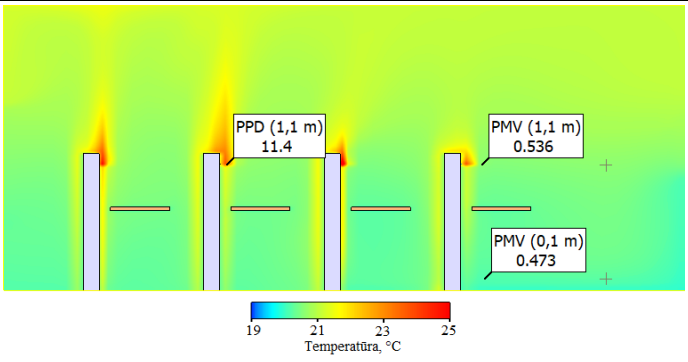
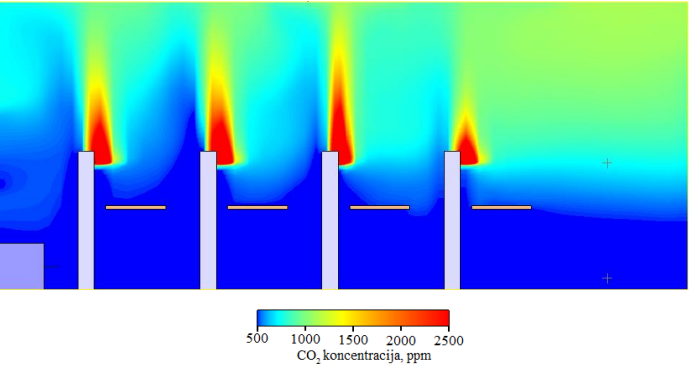
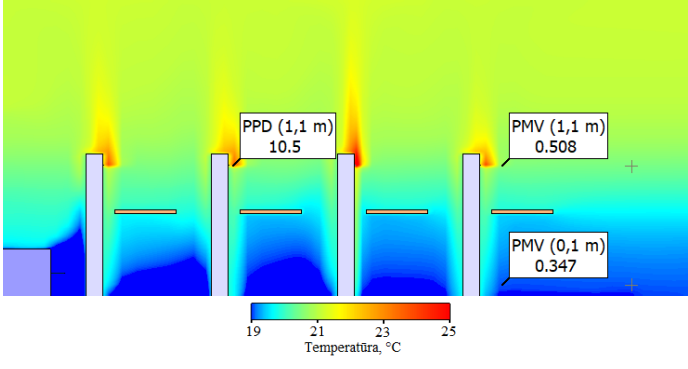
3.4. CO₂ koncentracijų ir temperatūrų pasiskirstymas modeliuose

Sukurtų skirtingų modelių pjūvių vieta yra nurodyta 30 pav. Šiltuoju metų laiku gauti rezultatai pateikti 16 lentelėje, o šaltuoju laiku – 17 lentelėje.



30 pav. Vaizduojamų pjūvių vieta

16 lentelė. Sumodeliuotos šildymo – vėdinimo sistemos ir parametų pasiskirstymas

Var. nr.	CO ₂ koncentracijos pasiskirstymas	Temperatūros pasiskirstymas
<p>I) Natūralus vėdinimas</p> <p>Tiekiamas oro kiekis: 180 m³/h</p> <p>Tiekiamo oro temp.: 18 °C</p>	 <p>CO₂ koncentracija, ppm</p>	 <p>Temperatūra, °C</p>
<p>II) Mechaninis sumaišomasis vėdinimas</p> <p>Tiekiamas oro kiekis: 468 m³/h</p> <p>Tiekiamo oro temp.: 18 °C</p>	 <p>CO₂ koncentracija, ppm</p>	 <p>Temperatūra, °C</p>
<p>III) Mechaninis išstumiamasis vėdinimas</p> <p>Tiekiamas oro kiekis: 468 m³/h</p> <p>Tiekiamo oro temp.: 18 °C</p>	 <p>CO₂ koncentracija, ppm</p>	 <p>Temperatūra, °C</p>

17 lentelē. Temperatūras pasiskirstymas modeliuose, esant skirtingoms šildymo ir vėdinimo sistemoms

Var. nr.	Šildymo sistemos tipas	
	a) temperatūros pasiskirstymas esant radiatoriniam šildymui (2 radiatorių temperatūra – 35 °C)	b) temperatūros pasiskirstymas esant grindiniam šildymui (grindų temperatūra – 24 °C)
<p>IV) Natūralus vėdinimas</p> <p>Tiekiamas oro kiekis: 180 m³/h</p> <p>Tiekiamo oro temp.: 12 °C</p>	<p>PPD (1,1 m) 24</p> <p>PMV (1,1 m) 0.942</p> <p>PMV (0,1 m) 0.917</p>	<p>PPD (1,1 m) 27.8</p> <p>PMV (1,1 m) 1.04</p> <p>PMV (0,1 m) 1.19</p>
<p>V) Mechaninis sumaišomasis vėdinimas</p> <p>Tiekiamas oro kiekis: 468 m³/h</p> <p>Tiekiamo oro temp.: 18 °C</p>	<p>PPD (1,1 m) 26.6</p> <p>PMV (1,1 m) 0.997</p> <p>PMV (0,1 m) 0.947</p>	<p>PPD (1,1 m) 30.3</p> <p>PMV (1,1 m) 1.09</p> <p>PMV (0,1 m) 1.17</p>
<p>VI) Mechaninis išstumiamasis vėdinimas</p> <p>Tiekiamas oro kiekis: 468 m³/h</p> <p>Tiekiamo oro temp.: 18 °C</p>	<p>PPD (1,1 m) 26.8</p> <p>PMV (1,1 m) 1.02</p> <p>PMV (0,1 m) 0.852</p> <p>PMV (0,1 m) 0.951</p>	<p>PPD (1,1 m) 30.3</p> <p>PMV (1,1 m) 1.08</p> <p>PMV (0,1 m) 0.927</p> <p>PMV (0,1 m) 1.22</p>

Vertinant šiluminį komfortą šaltuoju ir šiltuoju metų laiku pagal PMV ir PPD modelius, buvo pasirinktos skirtingos aprangos šiluminės varžos: šiltuoju metų laiku clo vertė yra lygi 0,5, o šaltuoju metų laiku 0,9. CFD modeliavimo metodu apskaičiuoti CO₂, temperatūros ir šiluminio komforto parametrai pateikti 18 lentelėje.

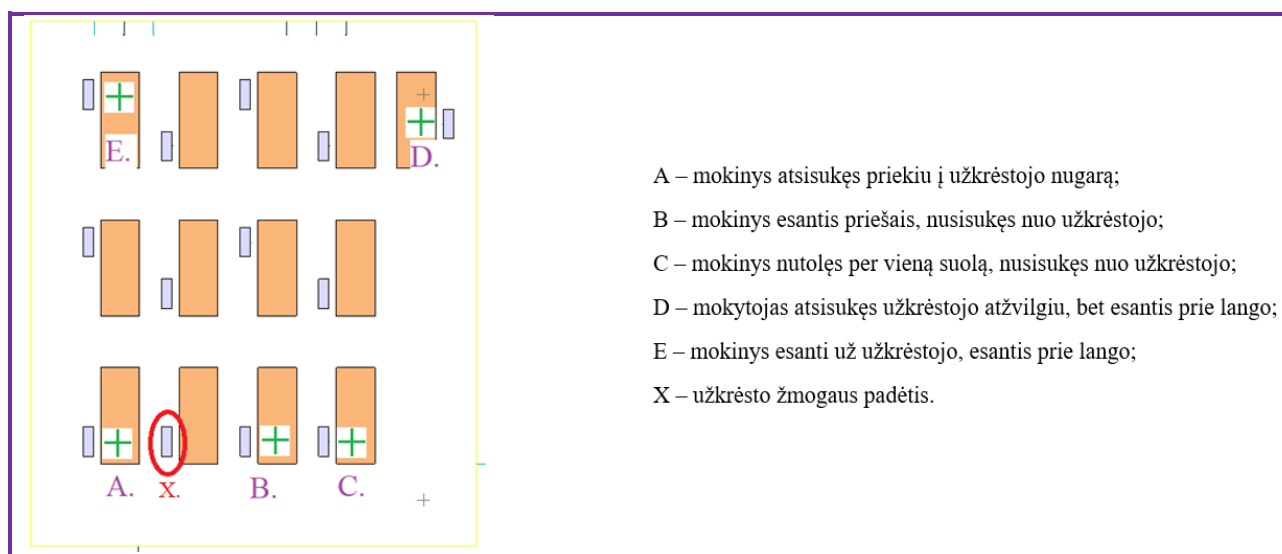
18 lentelė. Gautų modeliavimo rezultatų lentelė

Varianto Nr.	CO ₂ , ppm	Temperatūra, °C		PMV	PPD
	1,1 m	0,1 m	1,1 m	1,1 m	
	Šiltasis sezonas				
I) Natūralus vėdinimas	1318	22,6	23,6	0,94	24,6
II) Sumaišomasis vėdinimas	846	20,2	20,4	0,54	11,4
III) Išstumiamasis vėdinimas	584	18,7	20,4	0,50	10,5
Šaltasis sezonas. Radiatorinis šildymas					
IV, a) Natūralus vėdinimas	1406	18,2	18,8	0,94	24,0
V, a) Sumaišomasis vėdinimas	772	19,1	19,5	1,00	26,6
VI, a) Išstumiamasis vėdinimas	717	18,6	19,7	1,02	26,8
Šaltasis sezonas. Grindinis šildymas					
IV, b) Natūralus vėdinimas	1455	15,6	19,8	1,04	27,8
V, b) Sumaišomasis vėdinimas	811	20,0	20,0	1,09	30,3
VI, b) Išstumiamasis vėdinimas	859	19,4	20,4	1,08	30,3

Gauti rezultatai rodo, kad geriausiai vidutinę CO₂ koncentraciją modeliuose nuo pradinių sąlygų sumažina išstumiamasis vėdinimas: šiltuoju metų laiku CO₂ koncentracija sumažėjo 55,7 %, šaltuoju metų laiku, esant radiatoriniui šildymui – 49,0 %. Šis sistemų derinys taip pat užtikrina geriausią šiluminį komfortą.

3.5. Virusų koncentracijos palyginimas modeliuose

Pagal jau sukurtus skaitinius modelius buvo taip pat palyginamos viruso dalelių koncentracijų lygiai stebėjimo taškuose, kurie yra 1,1 m aukštyje – darbo zonoje nutolę nuo žmonių 0,3 m atstumu. Stebėjimo taškai ir jų padėties su paaiškinimais yra pateikti 31 pav.



31 pav. Stebėjimo taškų vietos ir žmonių padėties

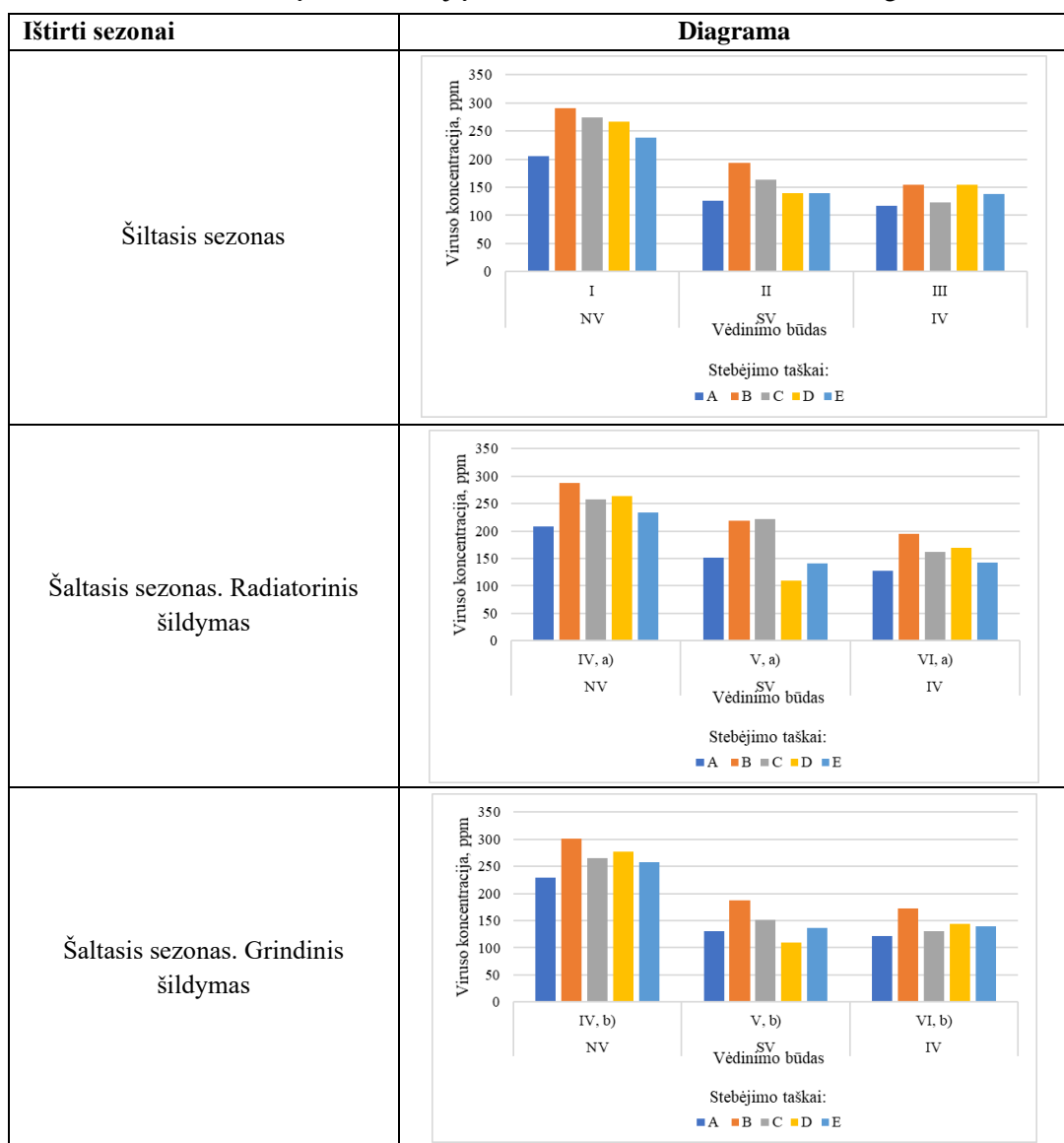
Gauti rezultatai iš modelių nurodytuose stebėjimo taškuose yra pateikti 19 lentelėje.

19 lentelė. Viruso dalelių koncentracijos tirtuose taškuose

Varianto Nr.	Stebėjimo taškai 1,1 m aukštyje				
	A.	B.	C.	D.	E.
	Viruso koncentracija, ppm				
	Šiltasis sezonas				
I) Natūralus vėdinimas	206	290	274	267	239
II) Sumaišomasis vėdinimas	126	194	164	139	140
III) Išstumiamasis vėdinimas	117	155	123	155	138
Šaltasis sezonas. Radiatorinis šildymas					
IV, a) Natūralus vėdinimas	209	288	258	264	234
V, a) Sumaišomasis vėdinimas	151	219	222	110	141
VI, a) Išstumiamasis vėdinimas	128	195	162	170	142
Šaltasis sezonas. Grindinis šildymas					
IV, b) Natūralus vėdinimas	230	301	265	277	258
V, b) Sumaišomasis vėdinimas	130	187	152	109	137
VI, b) Išstumiamasis vėdinimas	121	173	130	144	139

Gauti rezultatai iš 19 lentelės yra pavaizduoti grafiškai 20 lentelėje pagal sezonus.

20 lentelė. Viruso dalelių koncentracijų tirtuose taškuose atvaizdavimas diagramose



*NV – natūralusis vėdinimas; SV – sumaišomasis vėdinimas; IV – išstumiamasis vėdinimas

Pagal gautus rezultatus buvo apskaičiuotos vidutinės viruso dalelių koncentracijos skaitiniuose modeliuose iš A–E stebėjimo taškuose gautų rezultatų. Apskaičiuotų vidutinių koncentracijų lygiai modeliuose su natūraliuoju vėdinimu yra palyginti su skirtingomis mechaninio vėdinimo ir šildymo sistemomis. Rezultatai pateikti 21 lentelėje.

21 lentelė. Išmatuotų viruso dalelių koncentracijų kitimas klasėje

Vėdinimo būdas	Šiltasis sezonas		Šaltasis sezonas, radiatorinis šildymas		Šaltasis sezonas, grindinis šildymas	
	Vid. konc., ppm	Pokytis, %	Vid. konc., ppm	Pokytis, %	Vid. konc., ppm	Pokytis, %
Natūralus vėdinimas	255,2	–	250,6	–	266,2	–
Sumaišomasis vėdinimas	152,6	–40,2	168,6	–32,7	143,0	–46,3
Išstumiamasis vėdinimas	137,6	–46,1	159,4	–36,4	141,4	–46,9

Geriausi rezultatai buvo pasiekti su išstumiamuoju (terminiu) vėdinimu.

Viruso dalelių pasklidimo vizualiam įvertinimui yra pateikti izometriniai vaizdai, kuriuose matomas skirtumas tarp vėdinimo sistemų. Sukurtuose vaizduose matoma kaip taškuose su nusistovėjusia 180 ppm koncentracija kinta viruso paplitimas modeliuose. Vaizdai yra pateikti 3 priede.

3.6. Skaitinio modeliavimo išvados

1. Gauti rezultatai rodo, kad geriausiai vidutinę CO₂ koncentraciją modeliuose nuo pradinių sąlygų sumažina išstumiamasis vėdinimas: šiltuoju metų laiku CO₂ koncentracija sumažėjo 55,7 %, šaltuoju metų laiku, esant radiatoriniam šildymui – 49,0 %. Šis sistemų derinys taip pat užtikrina geriausią šiluminį komfortą ir sumažina oro lašeliniu būdu plintančių ligų plitimą klasėje.

2. Analizuojant CO₂ koncentracija rezultatus su grindiniu šildymu, buvo gautas neženklus skirtumas tarp sumaišomojo ir išstumiamojo vėdinimo. Prastesniam išstumiamojo vėdinimo CO₂ koncentracijos pašalinimui įtakos gali daryti palei grindis tiekiamo oro temperatūros padidėjimas dėl grindinio šildymo ir žemas lubų aukštis.

Apibendrinant rezultatus, gautus ištyrus skirtingus vėdinimo būdus klasėje, galima daryti išvadą, kad geriausias vėdinimo būdas yra išstumiamasis vėdinimas. Šis vėdinimo būdas yra tinkamas dėl kryptingo vėsesnio oro judėjimo iš apačios į viršų, taip pašalinant šiltesnius teršalus, pavyzdžiui: žmogaus iškvepiama CO₂ koncentracija arba nuo infekuoto žmogaus pasklidę lašeliai, kurie gali užkrėsti kitus žmones.

Ateities tyrimuose būtų naudinga papildomai atlikti tyrimus su daugiau mokyklų klasių, kuriuose būtų įvertinamos skirtingą geometriją turinčios klasės su didesniu arba mažesniu kiekiu žmonių. Taip pat būtų pravartu panagrinėti infekcinių ligų plitimą klasėse, sukuriant kuo detalesnius modelius, kuriuose būtų įvertinamos suolų padėtys, atstumai ir kiti šia tema susiję parametrai.

Rezultatų publikavimas

Magistro baigiamojo projekto darbo tarpiniai rezultatai buvo pristatyti tarptautinėje konferencijoje „Advanced Construction and Architecture 2020“ rugsėjo 23–25 dienomis. Pranešime „Indoor Air Quality and Thermal Comfort in Schools“ buvo pristatyti pagrindiniai rezultatai, gauti iš šaltojo sezono laikotarpio matavimų ir literatūros analizės. Pristatymo grafinė santrauka pateikta 32 pav.



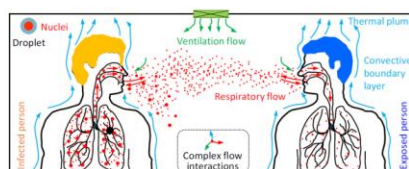
Indoor Air Quality and Thermal Comfort in Schools

Vejas Ogintas, Lina Seduikyte
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology, Lithuania
Corresponding author's email: vejas.ogintas@ktu.edu

ADVANCED CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE 2020
Raw Materials and Circular Economy in the Built Environment
September 23-25, 2020, Kaunas, Lithuania
Kaunas University of Technology

Literature review and investigation process revealed:

- Use of CO₂ feedback as a retrofit solution can improve air quality in naturally ventilated classrooms.
- Properly designed ventilation system can save energy and reduce the spread of infectious diseases indoors.

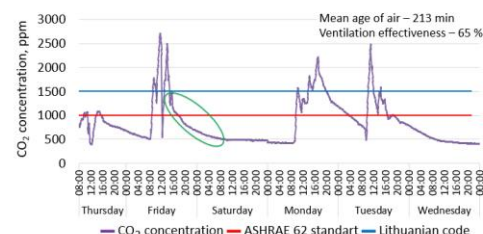
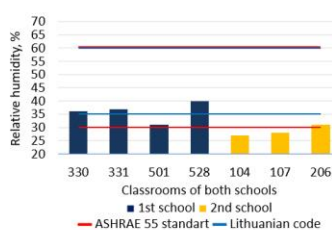
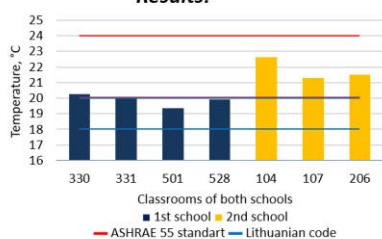


A schematic view of the whole process of airborne transmission indoors and the general governing flows of droplet nuclei dispersion (A. Z.T. and A. Krikor, 2018).

- Measurements were made during the cold season (February 24 and March 11 in 2020).



Results:



Key

- Temperature measurements showed that all classrooms met minimal requirements specified in the HN 21:2011. However, RH in

conclusions:

- one classroom in the 1st school and all classrooms from the 2nd school did not fall within the range of 35 – 60 % (HN 21:2011).
- For further analysis CFD tool will be selected to create models with effective heating and ventilation systems.

32 pav. Pristatymo grafinė santrauka

Rekomendacijos

- Naudoti baldus ir valymo priemones, kurios neišskiria kenksmingų cheminių dujų.
- Naudoti CO₂ koncentracijos matavimo prietaisus, kurie informuoja spalvomis apie CO₂ koncentracijos lygį.
- Reguliariai didinti oro apykaitą, varstant langus pertraukų ir pamokų metu.

Išvados

1. Mažas vėdinimo efektyvumas ir mažas tiekiamo oro kiekis mokyklų klasėse gali lemti prastus akademinius pasiekimus, sukelti LPS, sumažinti darbingumą ir padidinti riziką užsikrėsti lašelinio būdu plintančiomis ligomis.
2. Išanalizavus praleidžiamą laiką pagal ASHRAE 55 standarto nurodomą 20–24°C komforto temperatūrų diapazoną šaltuoju metų laiku, buvo gauta, kad pirmoje mokykloje mokiniai prie šių sąlygų praleido vidutiniškai 45 %, o antroje 90 % ištirto pamokų laiko.
3. Apskaičiavus santykinio drėgnio reikšmes nustatyta, kad šaltuoju metų periodu KTU gimnazijoje pagal HN 21:2011 neatitiko 25 % tirtų klasių, o Veršvų gimnazijoje 100 % tirtų klasių. Šiltuoju metų periodu visos klasės tenkino standartuose aprašytus reikalavimus.
4. Pirmoje mokykloje su natūraliuoju vėdinimu pagal ASHRAE 62 standarto nurodytą CO₂ koncentracijos 1000 ppm ribą, buvo viršijama 51 % tirtu laiku, o antroje su mechaniniu vėdinimu – 43 %. CO₂ koncentracijai klasėse padidėjus nuo 900 iki 1200 ppm, gali suprastėti mokinių kognityvinės funkcijos (gebėjimas greitai skaičiuoti).
5. CFD modeliavimo rezultatai atskleidė, kad geriausiai vidutinę CO₂ koncentraciją modeliuose nuo pradinių sąlygų su natūraliuoju vėdinimu sumažina išstumiamasis vėdinimas: šiltuoju metų laiku CO₂ koncentracija sumažėjo 55,7 %, o šaltuoju metų laiku, esant radiatoriniui šildymui – 49,0 %. Šis sistemų derinys taip pat užtikrina geriausią šiluminį komfortą ir sumažina oro lašelinio būdu plintančių ligų plitimą klasėje.

Literatūros sąrašas

1. SCHWEIZER, C., et al. Indoor Time–microenvironment–activity Patterns in Seven Regions of Europe. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2006, vol. 17, Nr. 2, 170–181 [žiūrėta 2020-03-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500490>
2. KLEPEIS, N. E., et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2001, vol. 11, Nr. 3, 231–252 [žiūrėta 2020-03-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
3. CHATZIDIAKOU, L., MUMOVIC, D., SUMMERFIELD, A. J. What do we Know about Indoor Air Quality in School Classrooms? A Critical Review of the Literature. *Null*, 2012, vol. 4, Nr. 4, 228–259 [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/17508975.2012.725530>
4. MENDELL, M. J., HEATH, G. A. Do Indoor Pollutants and Thermal Conditions in Schools Influence Student Performance? A Critical Review of the Literature. *Indoor Air*. 2005, vol. 15, Nr. 1, 27–52 [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x>
5. BLUYSSSEN, P.M., et al. Self-Reported Health and Comfort of School Children in 54 Classrooms of 21 Dutch School Buildings. *Building and Environment*. 2018, vol. 138, 106–123 [žiūrėta 2020-03-31]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.032>
6. ALMEIDA, R. M. S. F., DE FREITAS, V. P. Indoor Environmental Quality of Classrooms in Southern European Climate. *Energy and Buildings*. 2014, vol. 81, 127–140 [žiūrėta 2020-04-20]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.020>
7. MARINO, C., NUCARA, A., PIETRAFESA, M. Proposal of Comfort Classification Indexes Suitable for both Single Environments and Whole Buildings. *Building and Environment*. 2012, vol. 57, 58–67 [žiūrėta 2020-04-14]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.012>
8. P. S. Burge. Education: Sick Building Syndrome. *Occupational and Environmental Medicine (London, England)*. 2004, vol. 61, Nr. 2, 185–190 [2020-03-10]. Prieiga per: <https://www.jstor.org/stable/27732190>
9. AMERICAN STANDART. *ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-10] Prieiga per: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
10. CHEN, A., CHANG, V. W. Human Health and Thermal Comfort of Office Workers in Singapore. *Building and Environment*. 2012, vol. 58, 172–178 [žiūrėta 2020-05-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.004>
11. COLE, R. J., ROBINSON, J., BROWN, Z., O'SHEA, M. Re-Contextualizing the Notion of Comfort. *Building Research & Information*. 2008, vol. 36, Nr. 4, 323–336 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/09613210802076328>
12. SANSANIWAL, S. K., MATHUR, J., MATHUR, S. Review of Practices for Human Thermal Comfort in Buildings: Present and Future Perspectives. *International Journal of Ambient Energy*. 2020, 1–27 [žiūrėta 2020-11-19]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1725629>

13. TANSEY, E. A., JOHNSON, C. D. Recent Advances in Thermoregulation. *Advances in Physiology Education*. 2015, vol. 39, Nr. 3, 139–148 [žiūrėta 2020-09-19]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1152/advan.00126.2014>
14. BHALSE, D., KAME, R., MALVIYA, P., SHARMA, P., MISHRA, A. A Review Paper of the Laws of Thermodynamics to Apply the Human Bodies. *International Journal of Scientific Research in Multidisciplinary Studies*. 2016, vol. 2, Nr. 8, 1–4 [žiūrėta 2020-09-20]. Prieiga per: https://www.isroset.org/pdf_paper_view.php?paper_id=294
16. HAVENITH, G., HOLMÉR, I., PARSONS, K. Personal Factors in Thermal Comfort Assessment: Clothing Properties and Metabolic Heat Production. *Energy and Buildings*. 2002, vol. 34, Nr. 6, 581–591 [žiūrėta 2020-09-20]. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00008-7)
17. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. *Lietuvos higienos norma HN 21:2011 „Mokykla, vykdanči bendrojo ugdymo programas. Bendrieji sveikatos saugos reikalavimai“*: 2011 m. rugpjūčio 10 d. Nr. V-773 [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-12-10]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.404809>
18. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. *Lietuvos higienos norma HN 42:2009 „Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas“*: 2009 m. gruodžio 29 d. Nr. V-1081 [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-12-10]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.362676>
19. ANTHONY V., ARUNDEL, E., STERLING, M., et al. Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments. *Environmental Health Perspectives*. 1986, vol. 65, 351–361 [žiūrėta 2020-12-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.2307/3430203>
20. FANGER, P. O. Assessment of Man's Thermal Comfort in Practice. *British Journal of Industrial Medicine*. 1973, vol. 30, Nr. 4, 313–324 [žiūrėta 2020-03-10]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1136/oem.30.4.313>
21. ISO 7730:2005 Ergonomics of the Thermal Environment — Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-03-08]. Prieiga per: <https://www.iso.org/standard/39155.html>
22. EMIR, S. The Evaluation of Thermal Comfort on Primary Schools in Hot-Humid Climates: A Case Study for Antalya. *European Journal of Sustainable Development*. 2016, vol. 5, Nr. 1 [žiūrėta 2020-09-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.14207/ejsd.2016.v5n1p53>
23. WEST, J. J., et al. What we Breathe Impacts our Health: Improving Understanding of the Link between Air Pollution and Health. *Environmental Science & Technology*. 2016, vol. 50, Nr. 10, 4895–4904 [žiūrėta 2020-08-30]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b03827>
24. SALVI, S. Health Effects of Ambient Air Pollution in Children. *Paediatric Respiratory Reviews*. 2007, vol. 8, Nr. 4, 275–280 [žiūrėta 2020-09-19]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.prrv.2007.08.008>
25. LELIEVELD, J., et al. The Contribution of Outdoor Air Pollution Sources to Premature Mortality on a Global Scale. *Nature*. 2015, vol. 525, Nr. 7569, 367–371 [žiūrėta 2020-04-08]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/nature15371>

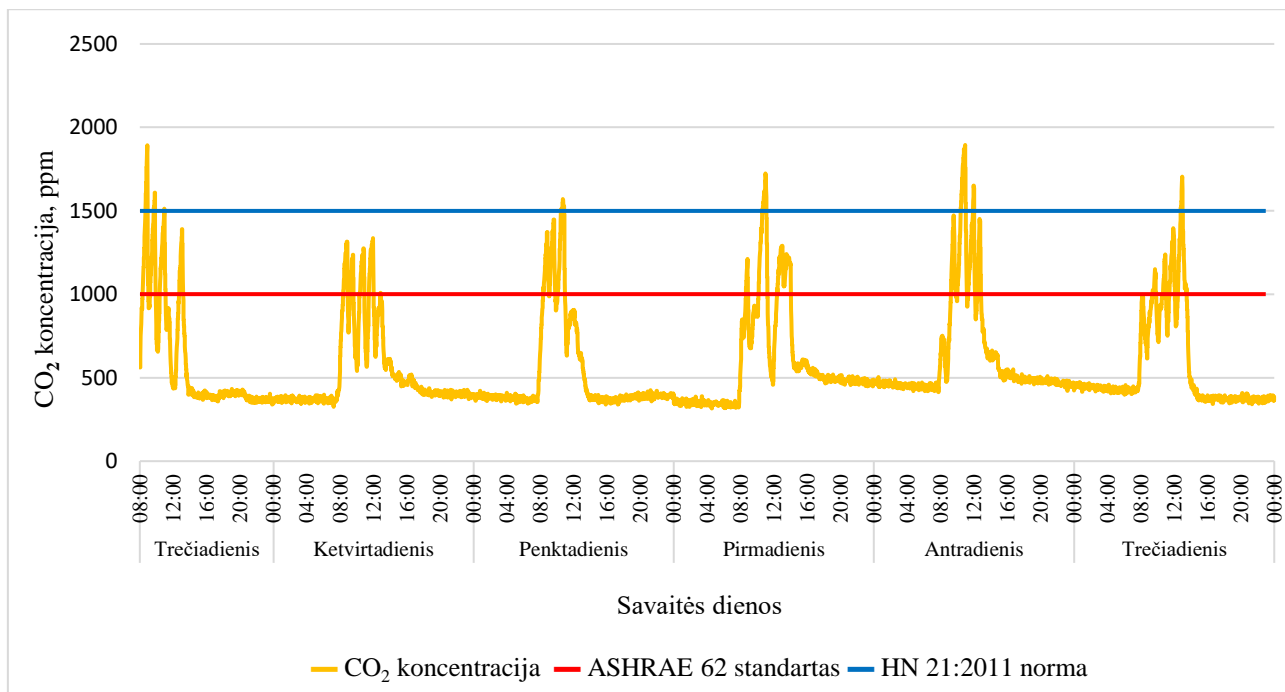
26. SALTHAMMER, T., et al. *Children's Well-being at Schools: Impact of Climatic Conditions and Air Pollution*. *Environment International* 2016, 94, 196–210 [žiūrėta 2020-10-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.009>
27. GEISS, O., et al. *The AIRMEX Study - VOC Measurements in Public Buildings and Schools/Kindergartens in Eleven European Cities: Statistical Analysis of the Data*. *Atmospheric Environment*. 2011, vol. 45, 3676–3684 [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.037>
28. WHO. *Indoor Air Quality: Organic Pollutants*. Report on a WHO Meeting, Berlynas, 23–27, 1987. *EURO Reports and Studies 111*, Kopenhaga. [žiūrėta 2020-03-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/09593338909384805>
29. DE GENNARO, G., et al. Indoor and Outdoor Monitoring of Volatile Organic Compounds in School Buildings: Indicators Based on Health Risk Assessment to Single Out Critical Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2013, vol. 10, Nr. 12, 6273–6291 [žiūrėta 2020-11-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/ijerph10126273>
30. ŠEDUIKYTĖ, L., BILŪDŽIUS, R. *Pollutants Emission from Building Materials and their Influence on Indoor Air Quality and People Performance in Offices*. *Civil Engineering and Management*. 2005, Nr. 2, 137–144 [žiūrėta 2020-03-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/13923730.2005.9636343>
31. GERMAN HEALTH AGENCY. *Evaluation of Indoor Air Contaminants by Means of Reference and Guideline Values*. *National Health Publication*. 2007, Nr. 50, 990–1005 [žiūrėta 2020-11-04]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00103-007-0290-y>
32. LINDEN, P. F. The Fluid Mechanics of Natural Ventilation. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1999, vol. 31, Nr. 1, 201–238. [žiūrėta 2020-10-09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.31.1.201>
33. YANG, B., et al. *A Review of Advanced Air Distribution Methods - Theory, Practice, Limitations and Solutions*. *Energy and Buildings*. 2019, Nr. 202. [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109359>
34. AI, Z., HASHIMOTO, K., MELIKOV, A. K. Airborne Transmission between Room Occupants during Short-term Events: Measurement and Evaluation. *Indoor Air*. 2019, vol. 29, Nr. 4, 563–576 [žiūrėta 2020-06-05]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/ina.12557>
35. *Displacement Ventilation*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <https://www.priceindustries.com/content/uploads/assets/literature/engineering-guides/displacement-ventilation-engineering-guide.pdf>
36. NICAS, M., NAZAROFF, W. W., HUBBARD, A. Toward Understanding the Risk of Secondary Airborne Infection: Emission of Respirable Pathogens. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2005, vol. 2, Nr. 3, 143–154 [žiūrėta 2020-06-06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/15459620590918466>
37. HASLBECK, K., et al. Submicron Droplet Formation in the Human Lung. *Aerosol Science*, 2010, vol. 41, Nr. 5, 429–438 [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.02.010>

38. AI, Z. T., MELIKOV, A. K. Airborne Spread of Expiratory Droplet Nuclei between the Occupants of Indoor Environments: A Review. *Indoor Air*. 2018, vol. 28, Nr. 4, 500–524 [žiūrėta 2020-06-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/ina.12465>
39. LI, Y., et al. Role of Ventilation in Airborne Transmission of Infectious Agents in the Built Environment – a Multidisciplinary Systematic Review. *Indoor Air*. 2007, vol. 17, Nr. 1, 2–18 [žiūrėta 2020-06-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x>
40. NIELSEN, P. V., et al. Airborne Cross-Infection Risk between Two People Standing in Surroundings with a Vertical Temperature Gradient. *HVAC&R Research*. 2012, vol. 18, Nr. 4, 552–561 [žiūrėta 2020-06-20]. Prieiga per: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10789669.2011.598441>
41. How to Operate HVAC and Other Building Service Systems to Prevent the Spread of the Coronavirus (SARS-CoV-2) Disease (COVID-19) in Workplaces. *REHVA COVID-19 Guidance*. 2020, Nr. 4, 0–40. [žiūrėta 2020-12-01]. Prieiga per: https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4_23112020_V2.pdf.
42. JURELIONIS, A., ŠEDUIKYTĖ, L. Indoor Environmental Conditions in Lithuanian Schools. *Environmental Engineering: Selected Papers of the 7th International Conference, may 22–23*. 2008, Vilnius, Lithuania, Vol. 2, 833–839 [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.459.8303&rep=rep1&type=pdf>
43. BIELSKUS, J., ŠIUPŠINSKAS, G., RIMDŽIUS, D. Evaluation of Thermal Comfort of Kindergarten Buildings. *Mokslas: Lietuvos Ateitis*. 2017, vol. 9, Nr. 4 [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/mla.2017.1072>
44. KRUGLY, E., et al. Characterization of Particulate and Vapor Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Indoor and Outdoor Air of Primary Schools. *Atmospheric Environment*. 2014, Nr. 82, 298–306 [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.042>
45. PROKOPCIUK, N., et al. On the Seasonal Aerosol Pollution Levels and its Sources in some Primary Schools in Vilnius, Lithuania. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2020, vol. 27, Nr. 13, 15592–15606 [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08093-9>
46. WARGOCKI, P., et al. Use of CO2 Feedback as a Retrofit Solution for Improving Air Quality in Naturally Ventilated classrooms. *Indoor Air*. 2014, Nr. 25, 105–114 [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/ina.12119>
47. MENDELL, M. J., et al. Association of Classroom Ventilation with Reduced Illness Absence: A Prospective Study in California Elementary Schools. *Indoor Air*. 2013, vol. 23, Nr. 6, 515–528 [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/ina.12042>
48. PETERSEN, S., JENSEN, K. L., PEDERSEN, A. L. S., RASMUSSEN, H. S. The Effect of Increased Classroom Ventilation Rate Indicated by Reduced CO2 Concentration on the Performance of Schoolwork by Children. *Indoor Air*. 2015, vol. 26, Nr. 3, 366–379 [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/ina.12210>
49. MATHISEN, H. M., NIELSEN, P. V., MOSER, A. *Ventilation Effectiveness*. Brussels: REHVA, 2004. ISBN 2960046803.

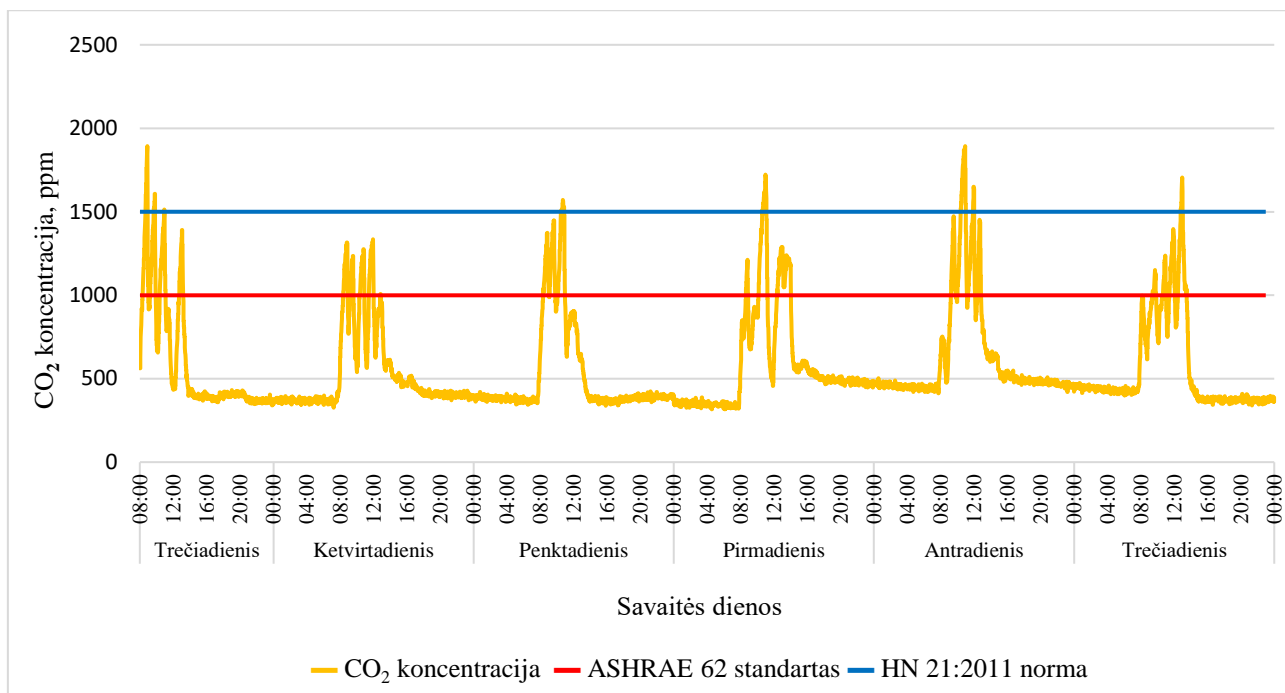
50. *National Ambient Air Quality Standards* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-03-07]. Prieiga per: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>.
51. SEPPANEN, O., FISK, W. J., LEI, Q. H. *Effect of Temperature on Task Performance in Officeenvironment*. 2006. [žiūrėta 2020-12-01]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/ina.12210>
52. DU, B., TANDOC, M. C., MACK, M. L., SIEGEL, J. A. Indoor CO2 Concentrations and Cognitive Function: A Critical Review. *Indoor Air*. 2020, vol. 30, Nr. 6, 1067–1082 [žiūrėta 2020-12-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/ina.12706>
53. NIELSEN, P. V. Fifty Years of CFD for Room Air Distribution. *Building and Environment*. 2015, vol. 91, 78–90 [žiūrėta 2020-12-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.035>
54. *FloVENT User Guide, V10.1*. Mentor Graphics Corporation, 2014.
55. REHVA. Sneeze and Cough Pathogens Migration Inside Aircraft Cabins, *The REHVA European HVAC Journal*. 2020, vol. 57, Nr. 2, 36–44 [žiūrėta 2020-12-09]. Prieiga per: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/detail/02-2020>
56. ZHANG, Z. and CHEN, Q. Experimental Measurements and Numerical Simulations of Particle Transport and Distribution in Ventilated Rooms. *Atmospheric Environment*. 2006, vol. 40, Nr. 18, 3396–3408 [žiūrėta 2020-12-09]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.01.014>

Priedai

1 priedas. CO₂ koncentracijos kitimo grafikas KTU gimnazijos 528 klasėje



2 priedas. CO₂ koncentracijos kitimo grafikas Veršvų gimnazijos 206 klasėje



3 priedas. Taškų, turinčių vienodas koncentracijų vertes, atvaizdavimas 3D modeliuose

