



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

**Žmogaus iškvepiamo aerozolio sklaidos modeliavimas  
skaičiuojamosios skysčių dinamikos būdu**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Lukas Narsutis**  
Projekto autorius

**Prof. Dainius Martuzevičius**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

**Žmogaus iškvepiamo aerozolio sklaidos modeliavimas  
skaičiuojamosios skysčių dinamikos būdu**

Baigiamasis magistro projektas

Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)

---

**Lukas Narsutis**

Projekto autorius

**Prof. Dainius Martuzevičius**

Vadovas

**V. m. d. Edvinas Krugly**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

Lukas Narsutis

## **Žmogaus iškvepiamo aerozolio sklaidos modeliavimas skaičiuojamosios skysčių dinamikos būdu**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Lukas Narsutis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Narsutis Lukas. Žmogaus iškvėpamo aerosolio sklaidos modeliavimas skaičiuojamosios skysčių dinamikos būdu. Magistro baigiamasis projektas / prof. Dainius Martuzevičius; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aplinkos inžinerija (E03), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: aerosolis, lašeliai, kvėpavimas, sklaida, skaičiuojamoji skysčių dinamika.

Kaunas, 2021. 55 p.

## SANTRAUKA

Žmogaus iškvėpamo aerosolio sklaidos įvertinimas kvėpavimo, kosulio, čiaudulio ir kalbėjimo metu yra sudėtingas dėl mažo išskiriamų kietųjų dalelių ir lašelių dydžio. Magistro baigiamojo projekto darbo tikslas buvo nustatyti žmogaus iškvėpamo aerosolio lašelių sklaidos uždaroje oro erdvėje parametrus skaičiuojamosios skysčių dinamikos būdu. Literatūros apžvalgos dalyje atlikta žmogaus iškvėpamo aerosolio, žmogaus kvėpavimo specifikos ir skaičiuojamosios skysčių dinamikos pritaikymo aerosolio sklaidos tyrimui mokslinės literatūros apžvalga, kompleksinis vertinimas ir analizė. Tyrimų metodikos dalyje aprašyta tyrimų metodika, eksperimentų modelis, tyrimų planas ir darbų seka. Tyrimų rezultatų dalyje atliktas žmogaus iškvėpamo aerosolio lašelių sklaidos modeliavimas naudojantis programine „Ansys CFX“ įranga ir pristatomi tyrimų rezultatai.

Tyrimų metu nustatyta, kad žmogaus iškvėpamo aerosolio lašeliai ~ 4 kartais greičiau atsimuša į priešais esančius paviršius 1,5 m atstumu nuo sklaidos šaltinio nei į toliau esančius paviršius. Šiuo atstumu žmogaus iškvėpami aerosolio lašeliai turi didžiausią kinetinę energiją prisitvirtinti prie kitų paviršių. Didžiausią atstumą tiesia trajektorija pasiekia kosulio / čiaudulio metu išskiriami aerosolio lašeliai, o ilgiausiai tiesioje trajektorijoje išbūna kalbėjimo metu išskirti aerosolio lašeliai. Kosulio / čiaudulio metu išskiriami aerosolio lašeliai (diametras 3,5 μm) maksimalų 4,0 m atstumą tiesia trajektorija pasiekia per 15,3 s, kai kalbėjimo metu lašelių (diametras 5,5 μm) srautas įveikia maksimalų 3,9 m atstumą per 29,0 s. Kvėpavimo per nosį metu aerosolio lašeliai (diametras 0,8 μm) maksimalų 2,95 m atstumą tiesia trajektorija pasiekia per 22,0 s, o kvėpavimo per burną metu aerosolio lašeliai (diametras 0,8 μm) maksimalų 2,65 m atstumą pasiekia per 21,8 s. Nustatyta, kad žmogui kalbant iškvėpamas aerosolis yra efektyviai sustabdomas apsauginio veido skydelio, kuris pakeičia aerosolio srauto trajektoriją ir sumažina lašelių greitį. Veido apsauginiai skydeliai gali būti naudojami tik trumpos trukmės kontaktų su kitais žmonėmis metu, kadangi jie neatlieka aerosolio sulaikymo ir filtravimo funkcijų, todėl aerosolio lašeliai pasklinda visomis kryptimis aplink skydelį.

Narsutis Lukas. Dispersion Modeling of Human Exhaled Aerosol Using Computational Fluid Dynamics. Master's Final Degree Project / prof. Dainius Martuzevičius; Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Environmental Engineering (E03), Engineering Sciences.

Keywords: aerosol, droplets, respiration, dispersion, computational fluid dynamics.

Kaunas, 2021. 55 pages.

## SUMMARY

The assessment of human exhaled aerosol dispersion during respiration, coughing, sneezing, and speaking is complicated by the small size of particulate matter and droplets released with aerosol. The aim of master's thesis was to determine the parameters of dispersion of human exhaled aerosol droplets in a confined space by computational fluid dynamics. The literature review part consists of a review, complex evaluation, and analysis of the scientific literature on human exhaled aerosol, the specifics of human respiration and the application of computational fluid dynamics to aerosol dispersion research. The research methodology part describes the research methodology, experimental model, research plan and work sequence. Research results part consists of the dispersion of human exhaled aerosol droplets evaluation experiments results modeled using the software "Ansys CFX".

Studies have shown that human exhaled aerosol droplets bounce ~ 4 times faster to opposite surfaces at a distance of 1.5 m from the source of dispersion than to more distant surfaces. At this distance, human-exhaled aerosol droplets have the highest kinetic energy to adhere to other surfaces. Aerosol droplets released during coughing / sneezing reach the maximum distance in a straight trajectory, and aerosol droplets released during speech remains in the straight trajectory the longest time. Aerosol droplets (size 3.5  $\mu\text{m}$ ) released during coughing / sneezing reach a maximum distance of 4.0 m in a straight trajectory within 15.3 sec, when the droplets (size 5.5  $\mu\text{m}$ ) during speech reach a maximum distance of 3.9 m in 29.0 sec. During nasal respiration, aerosol droplets (size 0.8  $\mu\text{m}$ ) reach a maximum distance of 2.95 m in a straight trajectory within 22.0 sec, while during oral respiration aerosol droplets (size 0.8  $\mu\text{m}$ ) reach a maximum distance of 2.65 m within 21.8 sec. During human speech, the exhaled aerosol has been shown to be effectively stopped by a protective face shield that changes the aerosol flow trajectory and reduces aerosol droplets velocity. Face shields can only be used during short-term contact with other people, as they do not perform the function of aerosol containment and filtration, so aerosol droplets spread in all directions around the shield.

## Turinys

<b>Ivadas</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Literatūros apžvalga</b> .....	<b>11</b>
1.1. Aerosolių klasifikacija .....	11
1.1.1. Žmogaus iškvepiamo aerosolio sudėtis .....	12
1.2. Žmogaus kvėpavimo specifika.....	12
1.2.1. Aerosolio lašelių susiformavimas.....	15
1.2.2. Aerosolio lašelių elgesys atmosferoje .....	16
1.2.3. Aerosolio kietųjų dalelių aprašymas .....	17
1.3. Skaičiuojamosios skysčių dinamikos principai.....	19
1.3.1. Skysčių dinamikos apibrėžimas.....	19
1.3.2. Privalumai ir trūkumai .....	20
1.3.3. Skaičiavimų metodika .....	21
1.3.4. Pritaikymas aerosolio sklaidos modeliavimo uždaviniams spręsti .....	23
1.4. Programinės įrangos „Ansys CFX“ apžvalga .....	24
1.5. Apibendrinimas.....	26
<b>2. Tyrimų metodika</b> .....	<b>27</b>
2.1. Eksperimentų (skaičiavimų) įranga ir analitinės procedūros .....	27
2.2. Skaičiavimų modelis .....	28
2.3. Tyrimų planas ir darbų seka.....	29
2.4. Rezultatų statistinio patikimumo įvertinimas .....	31
<b>3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas</b> .....	<b>32</b>
3.1. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kosulio / čiaudulio metu.....	32
3.1.1. Kosulys / čiaudulys, kai aerosolio lašelių diametras 3,5 μm.....	32
3.1.2. Kosulys / čiaudulys, kai aerosolio lašelių diametras 3,0 μm.....	33
3.1.3. Kosulys / čiaudulys, kai aerosolio lašelių diametras 2,5 μm.....	35
3.2. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kvėpavimo per burną metu .....	37
3.3. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kvėpavimo per nosį metu.....	39
3.4. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kalbėjimo metu .....	41
3.5. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kalbėjimo dėvint apsauginį skydelį metu.....	43
3.6. Rezultatų palyginimas ir apibendrinimas.....	44
3.6.1. Aerosolio lašelių sklaida kosulio / čiaudulio metu.....	44
3.6.2. Aerosolio lašelių sklaida įvairių kvėpavimo takų procesų metu .....	45
3.6.3. Rezultatų apibendrinimas .....	50
<b>Išvados</b> .....	<b>51</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>52</b>

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Vyrų ir moterų kvėpavimo parametrų palyginimas [5].....	14
2 lentelė. Kvėpavimo takų skirtingų veiklų išskiriamų lašelių parametrai [10] [12].....	15
3 lentelė. Kvėpavimo takų išskiriamų lašelių nusėdimo priklausomybė nuo diametro [17].....	16
4 lentelė. Eksperimentinio ir skaičiuojamojo tyrimo palyginimas [28].....	21
5 lentelė. Vandens kinematinio klampos koeficiento priklausomybė nuo jo temperatūros [33].....	23
6 lentelė. Tyrimams parinktų standartinių oro sąlygų parametrai. ....	28
7 lentelė. Sistemos ribų parametrai. ....	29
8 lentelė. Tyrimams parinkti kvėpavimo takų procesai ir jų įvesties parametrai. ....	30

## Paveikslų sąrašas

1 pav. Žmogaus įkvėpiamo aerosolio dydžio ir skvarbos palyginimas [5].	12
2 pav. Skaičiavimams priimtinas kvėpavimo modelis [8].	13
3 pav. Žmogaus kvėpavimo takų skirstymas (ET – viršutinė trachėja, TB – trachėja–bronchai, AL – alveolės) [13].	15
4 pav. Gryno vandens (1, 10 ir 100 $\mu\text{m}$ diametro) lašelių skersmens pokyčiai dėl garavimo [17].	17
5 pav. Žmogaus iškvėpiamo aerosolio lašelių (raudonai) ir kietųjų dalelių (geltonai) sklaidos palyginimas [23].	18
6 pav. Aerosolio kietųjų dalelių sulaikymo lašeliuose mechanizmai [25].	19
7 pav. Skaičiuojamąją skysčių dinamiką sudarančios disciplinos [29].	20
8 pav. Pagrindiniai skysčių dinamikos ir šilumos perdavimo uždavinių sprendimo metodai [29].	20
9 pav. Greičių pasiskirstymas laminarinėje (kairėje) ir turbulentinėje (dešinėje) tėkmėje [33].	22
10 pav. Programinės įrangos „Ansys CFX“ modeliavimo žingsniai [40].	25
11 pav. Tyrimams atlikti suprojektuotos patalpos 3D geometrijos brėžinys.	28
12 pav. Tyrimams suprojektuotos 3D patalpos sistemos ribų įvertinimas.	29
13 pav. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kosulio / čiaudulio metu (lašelių diametras – 3,5 $\mu\text{m}$ ).	32
14 pav. Aerosolio lašelių kosulio / čiaudulio metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.	33
15 pav. Aerosolio lašelių kosulio / čiaudulio metu greičio priklausomybė nuo atstumo.	33
16 pav. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kosulio / čiaudulio metu (lašelių diametras – 3,0 $\mu\text{m}$ ).	34
17 pav. Aerosolio lašelių kosulio / čiaudulio metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.	34
18 pav. Aerosolio lašelių sklaidos kosulio / čiaudulio metu greičio priklausomybė nuo atstumo.	35
19 pav. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kosulio / čiaudulio metu (lašelių diametras – 2,5 $\mu\text{m}$ ).	36
20 pav. Aerosolio lašelių kosulio / čiaudulio metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.	36
21 pav. Aerosolio lašelių sklaidos kosulio / čiaudulio metu greičio priklausomybė nuo atstumo.	37
22 pav. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kvėpavimo per burną metu.	38
23 pav. Aerosolio lašelių kvėpavimo per burną metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.	38
24 pav. Aerosolio lašelių sklaidos kvėpavimo per burną metu greičio priklausomybė nuo atstumo.	39
25 pav. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kvėpavimo per nosį metu.	40
26 pav. Aerosolio lašelių kvėpavimo per nosį metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.	40
27 pav. Aerosolio lašelių sklaidos kvėpavimo per nosį metu greičio priklausomybė nuo atstumo.	41
28 pav. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kalbėjimo metu.	42
29 pav. Aerosolio lašelių kalbėjimo metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.	42
30 pav. Aerosolio lašelių sklaidos kalbėjimo metu greičio priklausomybė nuo atstumo.	43
31 pav. Aerosolio lašelių sklaidos kalbėjimo metu su apsauginiu skydeliu srauto trajektorijos (1).	43
32 pav. Aerosolio lašelių sklaidos kalbėjimo metu su apsauginiu skydeliu srauto trajektorijos (2).	44
33 pav. Kosulio / čiaudulio išskiriamo aerosolio pasiekto atstumo priklausomybės nuo laiko priklausomybės palyginimas.	45
34 pav. Kosulio / čiaudulio išskiriamo aerosolio srauto vektorinė greičio ir trajektorijos išraiška.	46
35 pav. Aerosolio lašelių srauto pasiekto atstumo priklausomybės nuo laiko palyginimas.	47
36 pav. Aerosolio lašelių srauto greičio priklausomybės nuo padėties erdvėje palyginimas.	47
37 pav. Kosulio metu iškvėpto aerosolio lašelių sklaidos pagal jų dydį palyginimas [48].	49



## Terminų sąrašas

Aerolis – zolio atmaina, dispersinė sistema, susidedanti iš dujų aplinkoje ir jose pakibusių kietų dalelių arba skysčio lašelių.

Kvėpavimas – biologinis procesas, kurio metu žmogaus kvėpavimo organai ir kvėpavimo takai dalyvauja deguonies įsisavinimo ir anglies dioksido pašalinimo cikliškuose procesuose.

Kosulys – staigus refleksinis žmogaus oro (aerolio) iškvėpimas per kvėpavimo takus.

Čiaudulys – nevalinga žmogaus kvėpavimo takų – nosiaryklės – reakcija į dirgiklį nosies gleivinėje, kurio metu iškvepiamas oras (aerolis).

Skaičiuojamoji skysčių dinamika (lit. šaltiniuose gali būti vartojamas skaičiuojamosios fluidų dinamikos terminas) – skysčių mechanikos šaka, kuri naudoja skaitmeninę analizę ir duomenų struktūras analizuoti ir spręsti problemas, susijusias su skysčių ar aerolių srautais.

Programa – programinė skaičiuojamosios skysčių dinamikos procesų modeliavimo ir duomenų apdorojimo įranga „Ansys CFX“.

Skaičiuojamoji skysčių dinamika (SSD) – mokslo šaka, tirianti judančius skysčius ir jų tėkmės savybes įvairiose terpėse naudojant kompiuterines modeliavimo programas, galinčias kombinuotai pritaikyti skysčių dinamikos inžinerijos, matematikos ir skaitmeninio mokslo disciplinas.

Kietosios dalelės (KD) – labai mažo diametro (<10 μm) kietos dalelės, kybančios ore ar kitoje terpėje.

## **Įvadas**

Žmogaus iškvepiamo aerolio sklaidos įvertinimas kvėpavimo, kosulio, čiaudulio ir kalbėjimo metu yra sudėtingas dėl mažo išskiriamų kietųjų dalelių ir lašelių dydžio. Kvėpavimo takai vidutiniškai išskiria 1-2  $\mu\text{m}$  skersmens daleles ir lašelius, kurie yra nematomi plika akimi ir itin pavojingi, jei žmogus yra virusinės ar kitos infekcijos, plintančios oru, nešiotojas. Kadangi žmogaus kvėpavimo metu yra išskiriami dideli kiekiai potencialiai pavojingų dalelių ir lašelių, galinčių pernešti įvairaus dydžio patogenus, labai svarbus suvokimas apie jų sklaidą aplinkoje. Anksčiau eksperimentinė ir analitinė skysčių dinamikos buvo pasitelkiamos įvairiems skysčių dinamikos uždaviniams spręsti, tačiau su skaitmeninių technologijų galimybių plėtra, skaičiuojamoji skysčių dinamika tapo perspektyviu metodu, taikomu tokio tipo uždavinių sprendimui. Skaičiuojamoji skysčių dinamika yra mokslo šaka, tirianti judančius skysčius ir jų tėkmės savybes naudojant kompiuterines modeliavimo programas, galinčias kombinuotai pritaikyti skysčių dinamikos inžinerijos, matematikos ir skaitmeninio mokslo disciplinas. Baigiamajame projekte nagrinėjama žmogaus iškvepiamo aerolio lašelių sklaida uždaroje aplinkoje pritaikant skaičiuojamosios skysčių dinamikos principus.

**Darbo tikslas** – nustatyti žmogaus iškvepiamo aerolio lašelių sklaidos uždaroje oro erdvėje parametrus skaičiuojamosios skysčių dinamikos būdu.

### **Darbo uždaviniai:**

1. sudaryti žmogaus iškvepiamo aerolio lašelių sklaidos uždaroje oro erdvėje modelį;
2. nustatyti žmogaus iškvepiamo aerolio lašelių sklaidos greičio ir trajektorijos pokyčius oro erdvėje priklausomai nuo kvėpavimo takų veiklos pobūdžio;
3. apskaičiuoti žmogaus iškvepiamo aerolio lašelių pernešimo atstumą ir išbuvimo trukmę tiesioje trajektorijoje oro erdvėje priklausomai nuo žmogaus kvėpavimo takų veiklos pobūdžio;
4. įvertinti žmogaus veido apsauginio skydelio efektyvumą stabdant iškvepiamo aerolio lašelių sklaidą.

**Tyrimo objektas** – žmogaus iškvepiamo aerolio lašelių sklaida uždaroje oro erdvėje.

**Temos aktualumas** – žmogaus oro-lašeline būdu pernešami patogenai gali sunkiai ar mirtinai sutrikdyti kitų žmonių sveikatą, todėl itin svarbus supratimas, kaip žmogaus kvėpavimo takų išskiriami aerolio lašeliai sklinda aplinkoje ir tuo pačiu potencialiai kelia pavojų aplinkiniams.

**Darbo struktūra:** baigiamąjį projektą sudaro įvadas, literatūros apžvalgos 5 skyriai su apibendrinimu, tyrimo metodikos 4 skyriai, tyrimų rezultatų 6 skyriai su apibendrinimu, išvados ir literatūros sąrašas. Panaudotas 51 literatūros šaltinis.

## 1. Literatūros apžvalga

### 1.1. Aerosolių klasifikacija

Aerosolis yra dispersinė sistema, kurią sudaro dujinėje terpėje pasiskirsčiusios labai smulkios kietos ar skystos medžiagos dalelės [1]. Skirtingų sričių specialistai aerosolius apibūdina atsižvelgdami į formą, dydį ar cheminę sudėtį. Toksikologai aerosolius skirsto į sudarytus iš labai smulkių, smulkių ir stambių dalelių. Meteorologai, priklausomai nuo kietųjų dalelių, pasiskirsčiusių troposferoje ir stratosferoje, dydžio, aerosolius skirsto į  $KD_{2,5}$  (diametras 2,5  $\mu\text{m}$ ) ir  $KD_{10}$  (diametras 10  $\mu\text{m}$ ). Kitose inžinerinėse srityse aerosoliai gali būti vadinami nanodalelėmis. Aerosoliai dažnai išreiškiami ir tokiais sąvokomis, kaip dūmai, pelenai ar suodžiai [2].

Didžiausia dalis (90 %) atmosferos aerosolių yra natūralios kilmės, likusius 10 % sudaro antropogeninės kilmės aerosoliai [3]. Jų susidarymą lemia įvairūs veiksniai. Nors antropogeninių aerosolių kiekis aplinkoje yra mažesnis nei natūralios kilmės, jie gali dominuoti miestų ir pramonės zonų teritorijose. Automobiliniai, pramoninės krosnys ir elektrinės yra dideli sulfatų, nitratų, juodosios anglies ir kitų dalelių taršos šaltiniai. Vidaus patalpose kietąsias daleles į oro dujinę terpę išskiria cigaretės, viryklės, židiniai ir žvakės [2]. Pirminiai atmosferos aerosoliai susiformuoja tiesiogiai išskiriant kietosioms dalelėms į atmosferą (vulkaninės dulkės, dūmai, suodžiai ir kt.). Antriniai atmosferos aerosoliai susiformuoja atmosferoje vykstant įvairiems medžiagų virsmų procesams (sulfatų, nitratų, kitų organinių medžiagų virsmai).

Aerosoliai skirstomi į dūmus ir rūkus pagal dispersinės sistemos sandarą. Dūmai yra dispersinė sistema su kietosiomis dalelėmis, kuri pasižymi mažu dalelių nusėdimo greičiu oro dujinėje fazėje, o dalelių dydis svyruoja nuo 0,001 iki 10  $\mu\text{m}$  [1]. Dūmai susidaro nepilno degimo metu, naudojant tokį kurą, kaip anglis, nafta ar gamtinės dujos. Jų dalelės yra mažesnės nei 10  $\mu\text{m}$  [4].

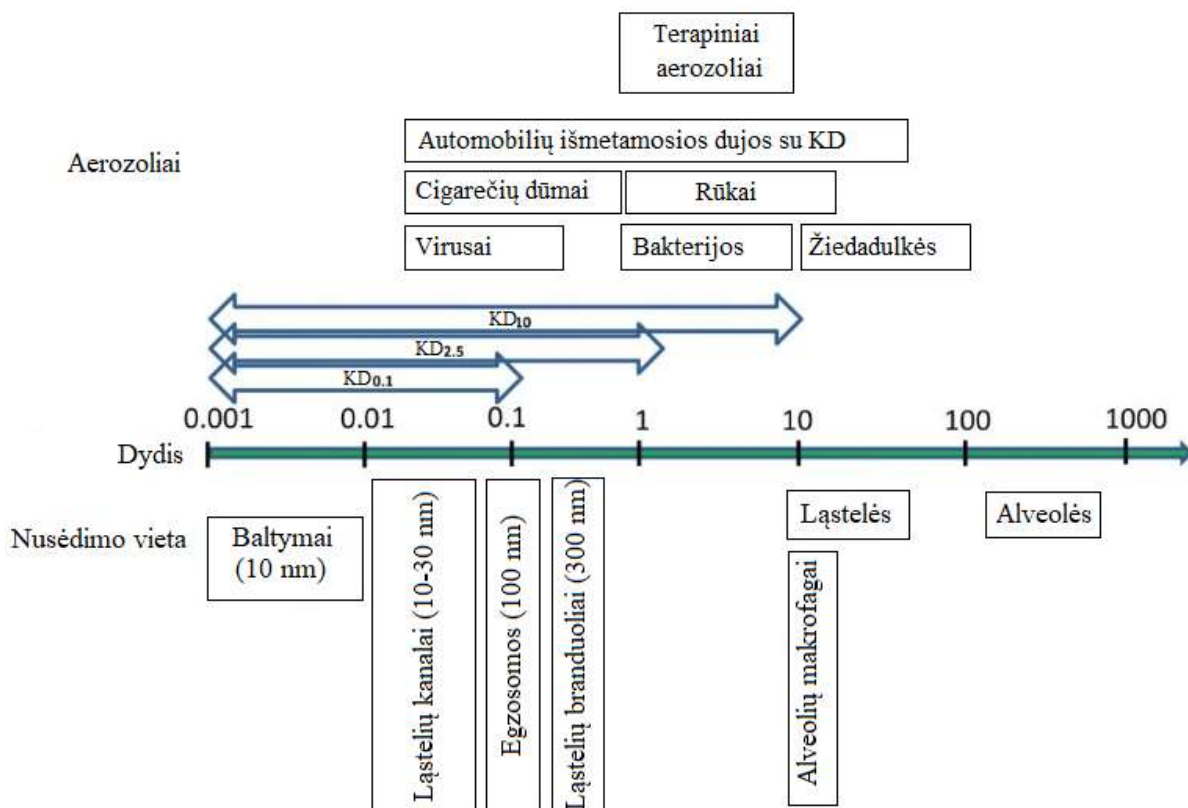
Rūkai yra oro dujinėje terpėje disperguoti skysčio lašeliai, kuriuose gali būti suspenduotų kietųjų dalelių ar cheminių medžiagų [1]. Rūkuose yra mažesni nei 10  $\mu\text{m}$  skersmens skysčio (vandens) lašeliai. Rūko forma, kuri tapo itin reikšminga pastaraisiais dešimtmečiais, yra smogas. Smogas susidaro, kai ore esanti natūrali drėgmė sąveikauja su žmogaus sukurtais ir išmestais į orą cheminiais junginiais, tokiais kaip dūmai ir kiti degimo produktai, sudarydami chemiškai aktyvias medžiagas [4].

Moksliniuose šaltiniuose taip pat išskiriami dulkių ir purškalo aerosoliai. Dulkėse yra pakibusių kietųjų dalelių, kurios yra didesnės nei dūmuose. Jų diametras svyruoja apie 1–100  $\mu\text{m}$  (galimos ir didesnės). Dulkės susidaro patenkant į atmosferą tokioms medžiagoms, kaip dirvožemis, smėlis, trąšos, akmens anglių dulkės, cemento dulkės, žiedadulkės ir lakieji pelenai. Dėl didesnių dalelių dulkės yra nestabilios ir greičiau pasklinda aplinkoje nei dūmai [4].

Purškalo sudaro santykinai dideli (10  $\mu\text{m}$  ir daugiau) skysčio lašeliai, pakibę dujose. Purškalo gali susidaryti natūraliai, pavyzdžiui, pagal vandenyno pajūrį. Taip pat purškalo gali būti išskiriami dėl žmonių veiklos, pavyzdžiui, naudojant aerosolių balionėlius, skirtus dažams, dezodorantams ir kitoms namų apyvokos reikmėms [4].

### 1.1.1. Žmogaus iškvepiamo aerozolio sudėtis

Žmogaus plaučiuose aptinkami aerozoliai su kietosiomis dalelėmis, kurios siekia 0,001–1000  $\mu\text{m}$  [5]. Tokie dujų ir kietųjų dalelių mišiniai, kaip cigarečių dūmai, automobilių išmetamosios dujos yra ypač pavojingos žmogui, nes patenka labai giliai į organizmo audinius, gali pasiekti ląstelių kanalus, egzomas ir ląstelių branduolius. Paminėtina, kad virusai taip pat pasiekia ląstelių kanalus ir egzomas, kai tuo metu bakterijos taip giliai neprasibrauna į žmogaus organizmą (žr. 1 pav.).

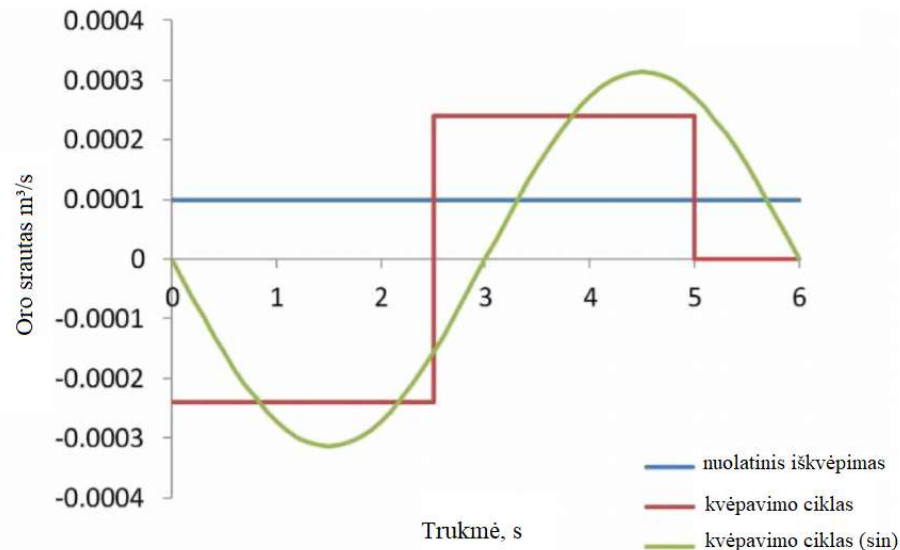


1 pav. Žmogaus įkvepiamo aerozolio dydžio ir skvarbos palyginimas [5].

### 1.2. Žmogaus kvėpavimo specifika

Natūrali plaučių ventilacija yra oro judėjimas į kvėpavimo takus ir iš jų. Įprasto kvėpavimo metu įkvėptas arba iškvėptas oro kiekis vidutiniškai siekia 450–600 mL sveikiems vyrams, moterims šiek tiek mažiau (žr. 1 lentelę). Iškvėpimo metu oras iš plaučių daugiausia iš ankstesnio įkvėpimo išmetamas kartu su alveoliniu oru, kuris yra daugelio įkvėpimų mišinys, todėl dalelės įkvėptos į plaučių sritį ankstesniu metu gali būti iškvėptos per keletą kartų. Vadinasi įkvėptų dalelių nusėdimo į kvėpavimo takus laikas yra itin trumpas (kelios sekundės), o išbuvimo plaučiuose laikas gali būti ilgesnis (apie minutę). Kvėpavimo takai iškvepiant vidutiniškai išskiria 1  $\mu\text{m}$  skersmens kietąsias daleles ir lašelius [6] [7].

Kiti tyrimai rodo, kad sėdimąjį ar lengvą darbą atliekantys žmonės standartiškai iškvėpia 6 L/min oro su 12–20 įkvėpimų dažniu [8] [9]. Vienas kvėpavimo ciklas trunka vidutiniškai 6 s, jį sudaro 2,5 sek įkvėpimui, 2,5 s iškvėpimui ir 1 s pauzei (žr. 2 pav.). Kai modeliuojamas nuolatinis iškvėpimas, šie duomenys yra tinkami skaičiavimų atlikimui. Oro srautas įkvėpimo ir iškvėpimo metu yra pastovus ir lygus 14,4 L/min [8]. Tai atitinka maždaug 12,9 m<sup>3</sup> oro per dieną [9].



2 pav. Skaičiavimams tinkamas kvėpavimo modelis [8].

Sinusinė funkcija, naudojama modelyje (žr. 2 pav.) apibūdinti oro srautą kvėpuojant gali būti išreiškiamą lygtimi (žr. 1.2.1 lygtį):

$$Q_b = a \sin(\beta t). \quad (1.2.1 \text{ lygtis})$$

1.2.1 lygtyje  $Q_b$  yra momentinis žmogaus iškvėptas tūris oro srautas, o  $a$  ir  $\beta$  yra modelio parametrai, kuriuos galima apskaičiuoti naudojant 1.2.2, 1.2.3, 1.2.4 lygtis:

$$a_x = (\beta x \cdot TV)/2; \quad (1.2.2 \text{ lygtis})$$

$$\beta_x = (\pi \cdot RF_x)/30; \quad (1.2.3 \text{ lygtis})$$

$$TV = MV \frac{RF_{in} + RF_{out}}{2RF_{in} \cdot RF_{out}}. \quad (1.2.4 \text{ lygtis})$$

1.2.2, 1.2.3, 1.2.4 lygtyse  $RF_x$  yra įkvėpimo ( $x = in$ ) arba iškvėpimo ( $x = out$ ) dažnis per minutę.  $MV$  nurodo iškvėpimo oro tūrį per minutę,  $TV$  reiškia tūrio pasikeitimą vienu įkvėpimu ir iškvėpimu. Modelio parametrai apskaičiuoti darant prielaidą, kad vienu metu žmogus įkvėpia ir iškvėpia apie 6 L/min oro, todėl srautas burnos zonoje išreiškiamas 1.2.5 lygtimi. Žmogaus iškvėptas aerolis gali būti modeliuojamas (žr. 2 pav.) kaip  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  ir  $N_2$  dujų mišinys [8].

$$Q_b = 0,3141 \cdot \sin(1,047 \cdot t) \quad (1.2.5 \text{ lygtis})$$

Natūraliai plaučių ventilacijai įtakos turi daugybė išorinių veiksnių, tokių kaip aukštis, aplinkos temperatūra, rūkymas ir endogeniniai veiksniai (kūno dydis ir kt.). Du pagrindiniai kiekvieno konkretaus asmens modifikatoriai yra fizinis aktyvumas ir amžius. Oro srautai laidžiuose kvėpavimo

takuose yra pagrindinis dalelių nusėdimo veiksnys. Plaučiuose vyrauja du pagrindiniai srautų tipai – laminarinis ir turbulentinis. Laminariniame sraute dalelės juda sklandžia srove, kai didžiausias greitis yra jos centre. Turbulentinio srauto metu dalelės juda neorganizuotais sūkuriais. Iš dalies tiek laminarinis ir tiek turbulentinis srautai vadinami pereinamuoju [7]. Tyrimai rodo, kad 80–90 % dalelių, iškvėpiamų žmogaus plaučių, yra mažesnės nei 1 μm, o dalelių koncentracija iškvėptame oro sraute (prie pat veido zonos) svyruoja apie  $6 \cdot 10^{-3}$  dal/nm [10]. Kadangi dauguma žmonių šiais laikais praleidžia vidutiniškai 85 % savo laiko uždaroje patalpose, žmogaus kvėpavimui taip pat didelę įtaką turi vidaus patalpų ventiliacijos kokybė [11].

**1 lentelė.** Vyrų ir moterų kvėpavimo parametrų palyginimas [5].

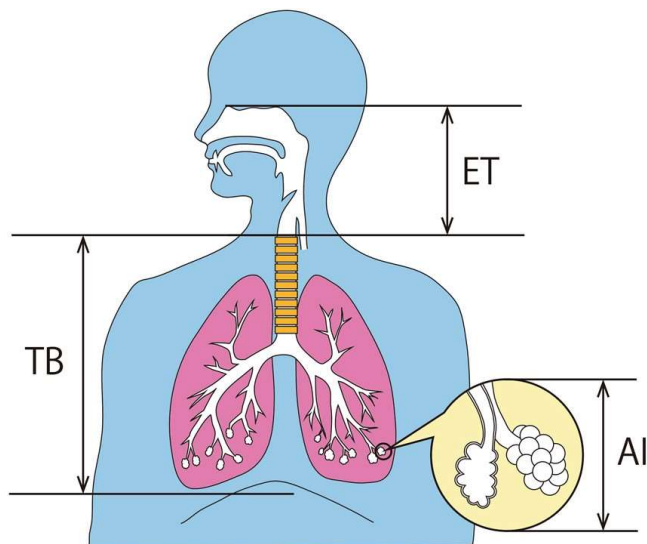
	Įkvėpimo tūrinis greitis, m <sup>3</sup> /h	Dažnis, ciklų kartai/min	Tūris, L
<b>Moterys</b>			
Ilsimasi (sėdima kvėpuojant per nosį)	0,39	14	0,46
Lengvi pratimai (kvėpavimas per nosį)	1,25	21	0,99
Sunkūs pratimai (kvėpavimas per burną)	2,7	33	1,36
<b>Vyrai</b>			
Ilsimasi (sėdima kvėpuojant per nosį)	0,54	12	0,75
Lengvi pratimai (kvėpavimas per nosį)	1,5	20	1,25
Sunkūs pratimai (kvėpavimas per burną)	3	26	1,92

Natūralūs žmogaus plaučių oro iškvėpimo srautai, tokie kaip kosulys, čiaudulys ir nuolatinis kvėpavimas, gali būti laikomi „reaktyviniais“ oro srautais, kadangi jie yra išskiriami iš vieno šaltinio, atliekant vieną iškvėpimą su santykinai simetriška ir kūgine geometrija. Kosulys ir čiaudulys yra žmogaus išskiriamo aerolio šaltiniai, įvykstantys labai retai, lyginant su nuolatiniu kvėpavimo procesu [12].

Kitais tyrimais nustatyta, kad maksimalus matomas dalelių sklaidos atstumas čiaudulio metu yra 0,6 m, o didžiausias čiaudėjimo greitis, apskaičiuotas šiame atstume – 4,5 m/s. Maksimalus čiaudulio aerolio pasklidimo (dviejose dimensijose) plotas – 0,2 m<sup>2</sup>, o vidutinis sklaidos greitis – 2 m<sup>2</sup>/s. Kosulio ir čiaudulio metu išskiriamo aerolio sklaidos greičiai yra panašūs, nors atskirais tyrimais būta nustatytų ir skirtingų reikšmių (žr. 2 lentelę). Kvėpuojant per nosį maksimalus dalelių sklaidos atstumas yra 0,6 m, o sklaidos greitis – 1,4 m/s. Maksimalus kvėpavimo per nosį metu išskiriamo aerolio sklaidos plotas ir vidutinis sklaidos greitis yra atitinkamai 0,11 m<sup>2</sup> ir 0,16 m<sup>2</sup>/s. Kvėpuojant per burną maksimalus matomas dalelių sklaidos atstumas yra 0,8 m, o sklaidos greitis – 1,3 m/s. Maksimalus kvėpavimo per burną metu išskiriamo aerolio sklaidos plotas ir vidutinis sklaidos greitis yra atitinkamai 0,18 m<sup>2</sup> ir 0,17 m<sup>2</sup>/s [12]. Kalbėjimo metu skaičiuojamasis aerolio sklaidos maksimalus greitis – 2,1 m/s, o vidutinis sklaidos greitis – 0,26 m<sup>2</sup>/s [12].

**2 lentelė.** Kvėpavimo takų skirtingų veiklų išskiriamų lašelių parametrai [10] [12].

Kvėpavimo takų procesas	Koncentracija, lašeliai/cm <sup>3</sup>	Lašelių diametras, μm	Sklandos maksimalus greitis, m/s	Vidutinis sklandos greitis m <sup>2</sup> /s
Kosulys / čiaudulys	0,64	3,5	4,5	2,00
Kvėpavimas (per burną)	0,092	0,8	1,3	0,17
Kvėpavimas (per nosį)			1,4	0,16
Kalbėjimas	0,307	5,5	2,1	0,26



**3 pav.** Žmogaus kvėpavimo takų skirstymas (ET – viršutinė trachėja, TB – trachėja–bronchai, AL – alveolės) [13].

Žmogaus kvėpavimo takai modeliavimo tikslams gali būti skirstomi į tris pagrindines dalis: viršutinę trachėją, trachėją-bronchus ir alveoles (žr. 3 pav.) [13]. Kvėpavimas laikomas įprastu (taisyklingu), jeigu atitinka šiuos parametrus:

1. kvėpavimas negirdimas, kvėpavimo metu krūtinės ląsta juda neryškiai;
2. pečių juostos raumenys nejuda;
3. kvėpuojama pro nosį;
4. kvėpavimo dažnis siekia 10-15 k/min;
5. įkvėpimo ir iškvėpimo trukmės santykis ne mažiau kaip ½;
6. pridėjus delną prie nosies, iškvėpimo metu jaučiasi ne oro srovė, o šiluma [14].

Jei įkvėpimo srautas yra didesnis nei 12 L/min, trachėjoje (žr. 3 pav. TB, ET srityse) jau susidaro turbulentinis srautas su pastebima gerklų srauto čiuirkšle (dėl kvėpavimo takų bifurkacijų) [15] [16].

#### 1.2.1. Aerosolio lašelių susiformavimas

Kvėpavimo procesai – įprastas kvėpavimas, kosulys, čiaudulys ar kalbėjimas – lemia iškvepiamų lašelių susiformavimą atmosferoje juos veikiant išorės vėjo poslinkiui. Lašelių išpurškimas iš kvėpavimo takų atsiranda dėl oro srauto pratekėjimo pakankamai dideliu greičiu per kvėpavimo takų paviršių. Kiekvienas iš minėtų kvėpavimo procesų sukelia skirtingo dydžio lašelių susidarymą. Dydžio skirtumus lemia oro slėgio ir greičio kitimas skirtingose kvėpavimo takų dalyse, panašiai,

kaip atomizacijos procese. Iškvėpiamų lašelių kiekis, be kitų veiksnių, priklauso ir nuo pradinės susikaupimo vietos kvėpavimo takuose. Tikėtinos lašelių atsiradimo vietos kvėpavimo takuose nustatomos atsižvelgiant į atomizacijos ir kiekvieno žmogaus kvėpavimo takų veikimo mechanizmą. Visų pirma, pakankamas oro išpūtimo greitis susidaro, kai oras išstumiamas per kvėpavimo takų dalis, kurios yra labai susiaurėjusios. Priekinė burnos dalis yra viena iš susiaurėjimo vietų ir svarbiausia atomizacijos vieta, nes ji yra beveik uždaryta liežuviu, dantų ir lūpų. Išpučiamo oro srautas taip pat susiaurėja gerklėje (beveik uždarytoje liežuviu, tonzilių ir minkštojo gomurio), žandikauliuose (beveik uždarytuose balso raukšlių), bronchuose (užstoja sekretas), nosies ertmėje (užstoja sekrecijos) ir priekiniame pakaušyje (siauresnės normalios nosies ertmės dalys) [17].

Laminarinėmis sąlygomis lašelio vieta kvėpavimo takuose lemia lašelio dydžio pokytį. Lašeliai kvėpavimo takų centre pirmiausia garuoja tol, kol oras tampa prisotintu, o lašeliai šalia kvėpavimo takų sienelių iš karto pradeda augti dėl kondensato susidarymo. Nustatyta, kad didelę įtaką lašelių susidarymui kvėpavimo takuose turi įkvėpiamo oro santykinė drėgmė, temperatūra ir įkvėpimo srautas [18].

### 1.2.2. Aerosolio lašelių elgesys atmosferoje

Žmogaus iškvėpti lašeliai, patekę į orą, patiria įvairius fizinius ir cheminius procesus, kurie keičia jų cheminę sudėtį, fizines savybes ir koncentraciją. Fizikiniai ir cheminiai procesai, kurie turi įtakos lašelių elgesiui ore yra garavimas, sąveika su kitomis kietosiomis dalelėmis ar skysčio lašeliais, transportavimas ir pašalinimas iš oro nusėdant ant paviršių. Ore esančios dalelės ar lašeliai yra veikiami Brauno judėjimo, gravitacijos, elektrinių jėgų, šiluminių gradientų, elektromagnetinės spinduliuotės, turbulentinės difuzijos, inercinių jėgų ir santykinės drėgmės [17] [19] [20].

Difuzija yra svarbus dalelių, esančių apatiniame mikrometro diapazone, pernešimo mechanizmas, sukiantis koaguliaciją su kitomis aerosolio dalelėmis arba prisijungimą prie jų. Didesnėms nei 1  $\mu\text{m}$  dalelėms gravitacija yra reikšmingesnė nei Brauno judėjimas, tačiau gravitacijos poveikį dalelėms atsveria tos dalelės veikiamas tempimo ar trinties jėga. 3 lentelėje pateiktas lašelių dydžio ir jų nusėdimo laiko santykis, apskaičiuotas pagal Stokes ir Niutono dėsnius. Skaičiavimai pagrįsti prielaida, kad lašeliai į orą patenka be pradinio greičio, nors pradinis greitis visuomet fiksuojamas ir priklauso nuo kvėpavimo proceso. Pavyzdžiui, pradinis iškvėpiamų lašelių greitis yra didelis kosint ar čiaudint, tačiau mažesnis įprasto kvėpavimo (žr. 2 lentelę) [17].

**3 lentelė.** Kvėpavimo takų išskiriamų lašelių nusėdimo priklausomybė nuo diametro [17].

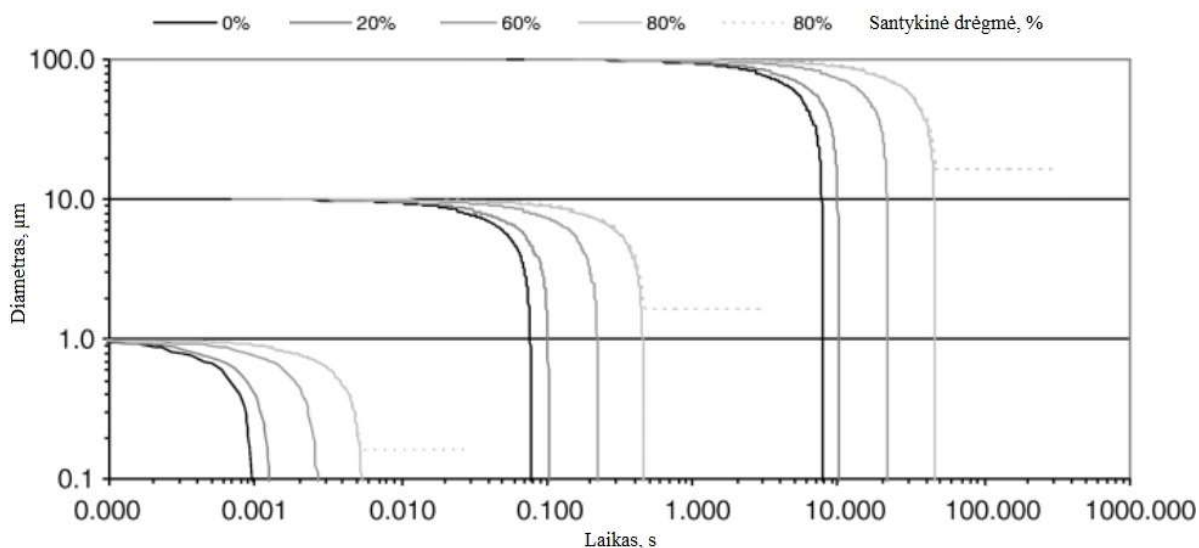
Lašelių diametras, $\mu\text{m}$	Nusėdimo laikas (1 metro atstumas), s
1000	0,3
100	3
10	300
1	30 000

4 pav. pateikiami gryno vandens lašelių skersmens pokyčiai dėl garavimo, apskaičiuoti naudojant tris skirtingus pradinius lašelių dydžius (1, 10 ir 100  $\mu\text{m}$ ) ir esant skirtingoms santykinės drėgmės sąlygoms. Pastebėtina, kad 1  $\mu\text{m}$  dydžio lašeliai išgaruoja per keletą milisekundžių net esant aukštai oro santykiniai drėgmei. 10  $\mu\text{m}$  dydžio lašeliai atmosferoje egzistuoja iki kelių dešimčių sekundžių, o labai dideli – 100  $\mu\text{m}$  skersmens lašeliai – išsilaiko beveik minutę [17]. Didžiausias žmogaus



iškvėpimo greitis gali siekti iki 10–30 m/s, sukurdamas aerozolio debesį, apimančią maždaug 7–8 m [21].

Iš 3 lentelės ir 4 pav. matyti, kad mažesni lašeliai išgaruoja prieš nusistovėdami ore, tuo metu didesni lašeliai greičiau nusėda, nei išgaruoja. Lašelių likučių po išgaravimo ore susidarymas, jų dydis ir sudėtis priklauso nuo pradinių lašelių sudėties. Tai parodyta 4 pav., kuriame punktyrine linija matomas 0,86 % druskos tirpalo lašelių dydžio pokytis (NaCl – panašus tirpalas į žmogaus seiles).



**4 pav.** Gryno vandens (1, 10 ir 100 μm diametro) lašelių skersmens pokyčiai dėl garavimo [17].

Nors gryni lašeliai visiškai išgaruoja, druskos lašelis išgaruoja sudarydamas kietosios fazės lašelių likučius. Šis procesas yra labai greitas ir sumažina druskos lašelius iki druskos likučių [17].

Lašeliai, atsirandantys dėl kūno sekrecijos, pavyzdžiui, čiaudulio ir kosulio, nėra sudaryti iš gryno vandens ir juose yra didelis kiekis kitų ištirpusių medžiagų. Taigi gryno vandens lašelių elgesys atmosferoje negali tiesiogiai būti taikomas žmogaus iškvėpamo aerozolio analizei. Tačiau lašelių dydis yra pagrindinis procesų parametras. Galutinis lašelio dydis, po išgaravimo iki kristalizacijos skersmens (mažiausio sausų likučių iš lašelių skersmens), priklauso nuo ištirpintos medžiagos kiekio. Jei iškvėpamuose aerozolio lašeliuose yra užkrečiamų patogenų, tokių kaip virusai, jie taip pat skysčiui išgaravus lieka pakibę ore [17].

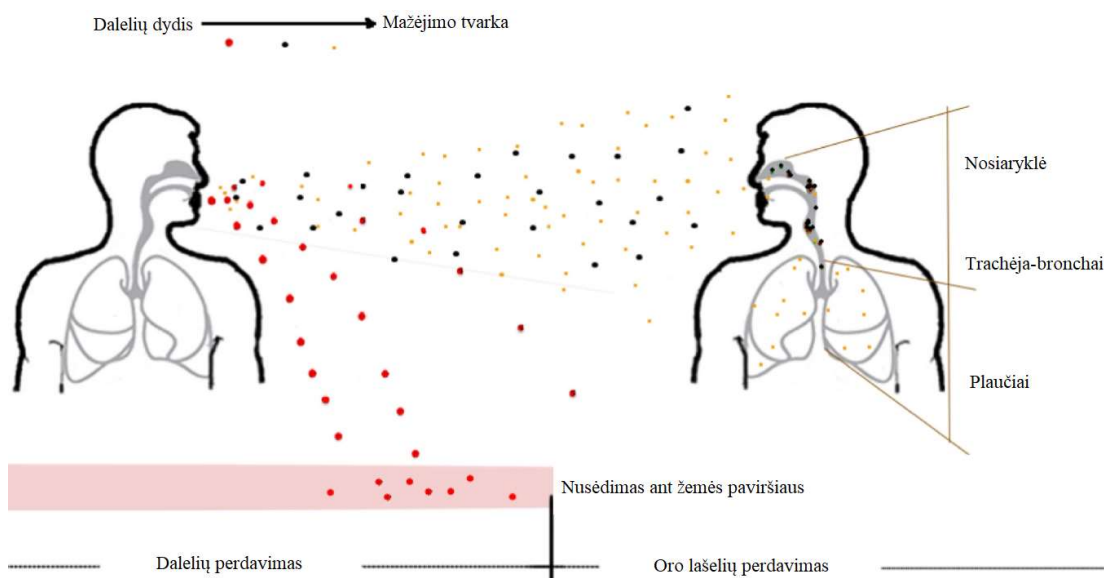
### 1.2.3. Aerozolio kietųjų dalelių aprašymas

Kietosios dalelės yra smulkūs kietieji kūnai aerozolio dispersinėje sistemoje, kurie pasižymi atsparumu mechaniniam poveikiui, patvaria forma ir kitomis kietųjų kūnų savybėmis. Jos skirstomos į pirmines, kurios yra tiesiogiai išmetamos į atmosferą ir antrines, kurios susidaro atmosferoje reaguojant dujoms [1]. Kietųjų dalelių dydis yra itin svarbus parametras tiriant jų judėjimą, kadangi nuo dydžio priklauso dalelių išsilaikymo dujinėje terpėje trukmė ir kinetika. Aerozolio kietosios dalelės tiriamos intervale nuo 1 nm iki 100 μm [20].

Dažniausiai tiriamos stambios kietosios dalelės (KD<sub>10</sub>), kurių aerodinaminis diametras mažesnis už 10 μm ir smulkios kietosios dalelės (KD<sub>2,5</sub>), kurių aerodinaminis diametras mažesnis už 2,5 μm. KD<sub>10</sub>

paprastai susidaro mechaninių procesų metu, o  $KD_{2,5}$  degimo metu arba atmosferos dujoms reaguojant į kitas daleles.  $KD_{2,5}$  yra itin pavojingos žmogui, kadangi kitaip nei  $KD_{10}$ , jos gali patekti į kvėpavimo ir kraujotakos sistemas bei kitus vidaus organus (žr. 5 pav.) [22].

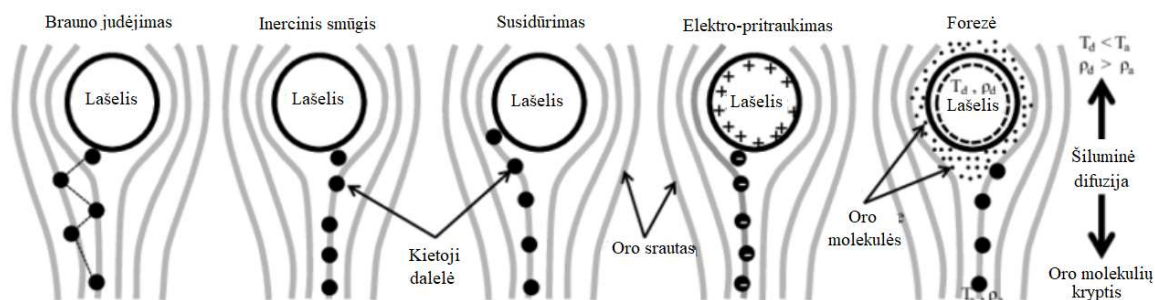
Didžiąją dalį aerozolio masės sudaro 0,05–10  $\mu\text{m}$  skersmens dalelės [1]. Bendrai sferinių ir nesferinių dalelių diametru apibrėžti naudojamas ekvivalentus aerodinaminis diametras. Tai yra hipotetinis matas, apibrėžiantis 1  $\text{g}/\text{cm}^3$  tankio sferos diametrą, kai sfera nusistovi nejudančiame ore tokiu pat greičiu kaip ir atitinkama dalelė. Ekvivalentaus aerodinaminio diametro matas yra naudingas dalelių, didesnių nei 0,1–0,5  $\mu\text{m}$ , tyrimuose, kuriuose yra svarbios jų kinetinės savybės [20].



**5 pav.** Žmogaus iškvėpiamo aerozolio lašelių (raudonai) ir kietųjų dalelių (geltonai) sklaidos palyginimas [23].

Inercinės dalelės, gabenamos skysčių srautuose, pavyzdžiui, dulkės ar nuosėdos, gali turėti labai sudėtingas trajektorijas. Trajektorijos sudėtingumas gali atsirasti dėl įvairių mechanizmų, tokių kaip Brauno judėjimas, sistemos ribos, dalelių inercija ir tarpusavio sąveika. Kadangi inercinių dalelių greitis skysčių sraute yra artimas tam skysčiui, gali susidaryti klaidingas įspūdis, kad dalelių trajektorijos yra taip pat artimos skysčio judėjimo taškų trajektorijai. Tačiau yra priešingai, nes mažas slydimo greitis dažnai lemia dalelių trajektorijas, kurios žymiai skiriasi nuo skysčių judėjimo taškų: inercinės dalelės gali kauptis įvairiose srauto zonose, nepriklausomai nuo to, koks srauto tipas (laminarinis ar turbulentinis) [24]. Daugeliu atvejų aerozolio su kietosiomis dalelėmis dinamika yra tokia sudėtinga, kad vienas palankiausių būdų ištirti tokias sistemas yra pritaikant skaičiuojamąją skysčių dinamiką.

Mechanizmai, turintys įtakos aerozolio kietųjų dalelių sulaikymo procesui vandens lašeliuose, matomi 6 pav. Iš kairės į dešinę yra Brauno judėjimas, inercinis smūgis, susidūrimas, elektro-pritraukimas ir forezė.  $T_d$  ir  $\rho_d$  yra temperatūra ir vandens molekulių tankis lašelio paviršiuje, o  $T_a$  ir  $\rho_a$  yra aplinkos temperatūra ir vandens molekulių tankis [25] [26].



6 pav. Aerozolio kietųjų dalelių sulaikymo lašeliuose mechanizmai [25].

Ekvivalentus aerodinaminis diametras, be pritaikymo kvėpavimo takų išskiriamų dalelių sklaidos aprašymui, taip pat naudojamas dalelių judėjimo cikluose, separatoriuose ir filtruose įvertinimui inertinėmis sąlygomis, nors dėl itin mažo dalelių diametro Brauno judėjimas yra dominuojantis [27]. Dažniausiai apibūdinant aerozolius priimama, kad dalelės dujinėje fazėje yra sferinės. Tuomet panaudojant aerodinaminio diametro matą ir kitus koreliacijos faktorius yra atliekami tyrimai.

### 1.3. Skaičiuojamosios skysčių dinamikos principai

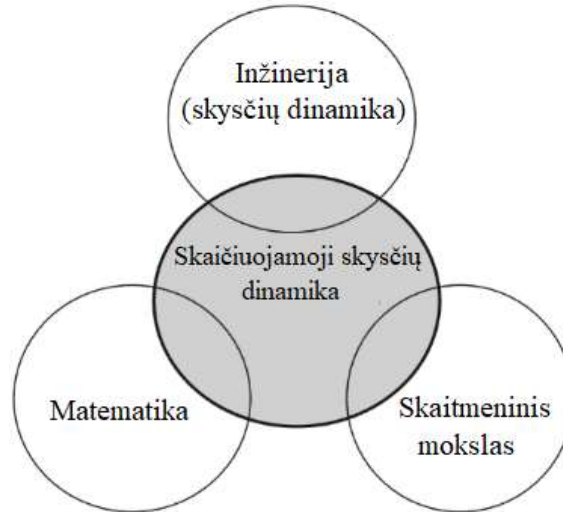
#### 1.3.1. Skysčių dinamikos apibrėžimas

Skysčių dinamika yra mokslo šaka, tirianti judančius arba stacionarioje būsenoje esančius skysčius. Skaičiuojamoji skysčių dinamika (toliau – SSD) tiria judančius skysčius ir jų tėkmės savybes, įskaitant šilumos perdavimą ir galimas chemines reakcijas su kitomis medžiagomis. Skaičiuojamoji skysčių dinamika (SSD) suteikia kokybinį (ir kartais kiekybinį) skysčių srautų numatymą:

1. matematinio modeliavimu (dalinėmis diferencialinėmis lygtimis);
2. skaitmeniniais metodais (diskreditavimo ir kitais sprendimo būdais);
3. programinės įrangos įrankiais (programinės sprendimo priemonės) [28].

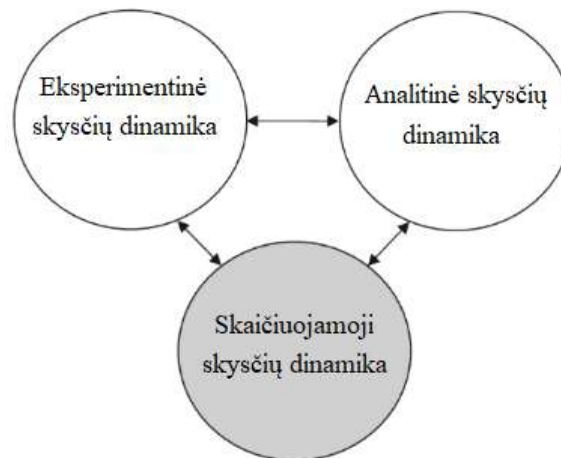
SSD tyrimai atliekami judančių skysčių dinamiką įvertinant matematinėmis lygtimis, dažniausiai diferencialinėmis. Siekiant išspręsti judančius skysčius aprašančias matematinės lygtis naudojamos kompiuterinės programos, galinčios kombinuotai pritaikyti skysčių dinamikos inžinerijos, matematikos ir skaitmeninio mokslo disciplinas (žr. 7 pav.). Ši skysčių dinamikos sritis vadinama skaičiuojamąja, nes įvertina judančius skysčius per skaitines simuliacijas, kurias atlieka pasirinktos kompiuterinės programos [29] [30]. SSD suteikia mokslininkams ir inžinieriams galimybę atlikti „skaitmeninius eksperimentus“ (t. y. kompiuterinius modeliavimus) „virtualiose srautų laboratorijose“ (t. y. programiškai apibrėžtose ribose) [28].

Pastaruju metu skaičiuojamoji skysčių dinamika tapo viena iš trijų pagrindinių metodų, naudojamų išspręsti skysčių dinamikos ar šilumos perdavimo problemas (žr. 8 pav.). Tradiciškai eksperimentinė ir analitinė skysčių dinamika buvo naudojama įvairiems skysčių dinamikos uždaviniams spręsti, tačiau su skaitmeninių technologijų (kompiuterių) itin sparčia galimybių plėtra, skaičiuojamoji skysčių dinamika tapo perspektyviu būdu, galimu pritaikyti skysčių dinamikos tyrimams [29].



7 pav. Skaičiuojamąją skysčių dinamiką sudarančios disciplinos [29].

Skaičiuojamieji tyrimai naudojant kompiuterines programas yra plačiai taikomi ne tik skysčių dinamikos modeliavimui, tačiau ir aviacijos, automobilių, biomedicinos, chemijos, statybų ir aplinkos, energijos ir sporto inžineriniuose tyrimuose [29].



8 pav. Pagrindiniai skysčių dinamikos ir šilumos perdavimo uždavinių sprendimo metodai [29].

### 1.3.2. Privalumai ir trūkumai

Skaičiuojamoji skysčių dinamika pasižymi daugeliu privalumų. SSD modeliavimas turi galimybę modeliuoti sąlygomis, kurias neįmanoma dėl apimties (pvz., cunamis, atominės nelaimės) arba kainos atkartoti realiu eksperimentu. SSD gali pateikti detalesnius, vaizdingesnius, paprasčiau suvokiamus sprendimus ir rezultatus, lyginant su analitine ar eksperimentine skysčių analize. Taip pat SSD gali

apdoroti daug įvesties duomenų, kurie gali būti lengvai keičiami tiriant skirtingus skysčius ar kitus reiškinius įvairiomis sąlygomis, kurių variacijas būtų labai brangu atkartoti realiais eksperimentais. SSD leidžia modeliuoti alternatyvius scenarijus procesams, kurie gali suteikti itin vertingos pradinės informacijos prieš kuriant realias sistemas. 4 lentelėje pateikiamas eksperimentinės skysčių dinamikos ir skaičiuojamosios skysčių dinamikos palyginimas [28].

Nors skaičiuojamoji skysčių dinamika turi daug privalumų, tai nereiškia, kad ji gali pakeisti analitinius ar eksperimentinius skysčių dinamikos tyrimus. SSD yra tik dar vienas galimas metodas spręsti skysčių dinamikos uždavinius. SSD kompiuterinėse programose gali būti skaitinių paklaidų, kurios lemia sumodeliuoto proceso skirtumus nuo proceso realiomis sąlygomis. Taip pat negalima tikėtis, kad proceso modelis visiškai atitiks realybę, kadangi kompiuterinė programa įvertina daug kintamųjų, kurie yra įvedami vartotojo, remiantis atliktais eksperimentais ar kitais duomenimis. Nors SSD pateikia grafinius vaizdinius, tokius kaip procesų greičio pokyčiai, sklaidos kryptys ir slėgio kitimai, reikia duomenis analizuoti objektyviai, pirmiausia įvertinus įvesties duomenų kokybę [29].

**4 lentelė.** Eksperimentinio ir skaičiuojamojo tyrimo palyginimas [28].

<b>Eksperimentinis tyrimas (kiekybinis srauto reiškinį aprašymas naudojant matavimus)</b>	<b>Skaičiuojamasis tyrimas (kiekybinis srauto reiškinį numatymas naudojant SSD programinę įrangą)</b>
vienas tyrimas vienu metu	daug tyrimų vienu metu
ribotas tyrimų taškų skaičius tam tikru laiko momentu	rezultatai su didele skiriamąja geba erdvėje ir laike
laboratorinio dydžio mastelis	faktinis tyrimo mastelis
pritaikomas ribotam kiekiui problemų ribotomis sąlygomis	pritaikomas praktiškai bet kokiai problemai realiomis eksploataavimo sąlygomis
daugiau sąnaudų ir ilgesnis tyrimo laikas	mažiau sąnaudų ir trumpesnis tyrimo laikas
tyrimai nuoseklūs, vienomis sąlygomis	tyrimai vykstantys paraleliai, skirtingomis sąlygomis
<b>Klaidų šaltiniai:</b> matavimo paklaidos, zondo srauto trikdžiai	<b>Klaidų šaltiniai:</b> modeliavimas, diskreditacija, iteracija, įgyvendinimas

### 1.3.3. Skaičiavimų metodika

Dujų ir skysčių srautas gali būti kiekybiškai įvertintas dalinėmis diferencialinėmis lygtimis, kurios atspindi masės, impulso ir energijos tvermės dėsnius. Skaičiuojamoji skysčių dinamika yra skysčių mechanikos šaka, kuri naudoja skaitinę analizę ir algoritmus siekiant sumodeliuoti skysčių srautų judėjimą. Didelio našumo kompiuteriai naudojami skaičiavimams, kurių reikia imituojant skysčių ir dujų sąveiką su paviršiais, apibrėžtomis ribinėmis sąlygomis. SSD yra pagrįstas Navier–Stokes, Lagrange ir Euler lygtimis [31].

Navier–Stokes lygtys taiko antrąjį Niutono dėsnį skysčio judesiui su prielaida, kad skysčio įtempis yra difuzinio klampumo ir slėgio suma. Šios lygtys apibūdina koreliaciją tarp judančio skysčio greičio, slėgio, temperatūros, tankio ir kitų parametrų [31]. Šios lygtys atsižvelgia į klampos poveikį, kuris nėra apibūdinamas Euler lygtyse. Navier–Stokes lygtimis skysčių dalelės-lašeliai yra sugrupuojamos ir vertinamos greičio vektorių lauke ( $u$ ) ir slėgio lauke ( $p$ ) laike ( $t$ ) (žr. 1.3.3.1 lygtį). Kadangi skystis negali būti suspaudžiamas, priimta, kad jo tankis yra pastovus. Skysčio elgesiui taip pat daro įtaką kūno jėgos, pavyzdžiui, gravitacija ( $g$ ) ir Reinoldso skaičius ( $Re$ ). Reinoldso skaičius

rodo klampių ir inercinių jėgų santykį, kurios veikia skystį. Klampiems skysčiams naudojama maža Reinoldso skaičiaus vertė, pvz., medus, o didelės Reinoldso reikšmės, neklampioms terpėms, pvz., orui [32].

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (1.3.3.1 \text{ lygtis})$$

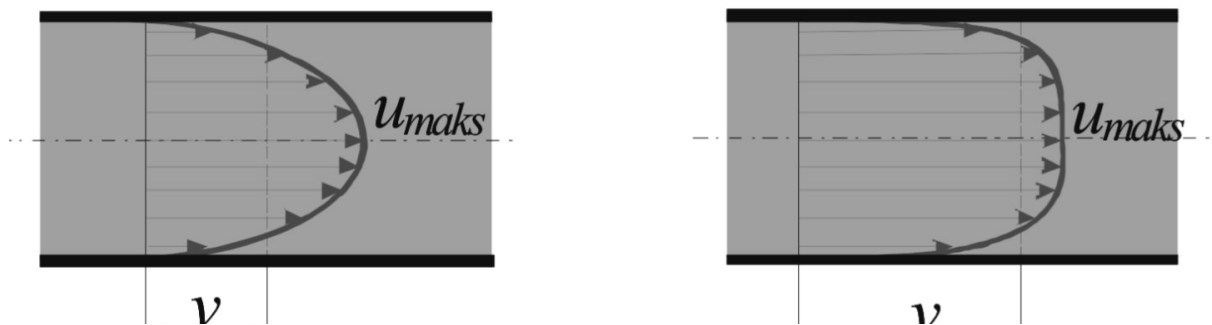
Skysčio ribiniuose elementuose slėgio ir greičio vertės negali būti pilnai apskaičiuojamos dėl nežinomų sistemos parametrų, tokių kaip skysčio trintis į sistemos ribų paviršių [32]. Tačiau sąlygas ribiniuose elementuose galima imituoti nurodant sistemos ribose vyraujančias sąlygas:

1. neslystantis paviršius – tiriamą sistemą riboja tvirtos sienos; greičio vertės kraštuose tarp skysčio ir sistemos sienos yra lygios nuliui;
2. slystantis paviršius – panašus į neslystantį, tačiau tokiu atveju skystis gali tekėti išilgai sistemos ribų be trinties;
3. ištekėjimas – sistemos ribų parametras ekvivalentus ribų neegzistavimui; greičiai šioje sistemoje yra lygūs artimiausio esančio skysčio;
4. įtekėjimas – sistemos ribų parametras, kai nustatoma fiksuota greičio vertė sistemos ribose.

Atliekant SSD analizę yra projektuojamas srauto judėjimo ir šilumos perdavimo procesai. SSD analizės metodika pagrįsta keliomis procedūromis:

1. srauto modelio supratimas – srauto atskyrimas, trumpalaikio poveikio įvertinimas, fizinės sąveikos supratimas;
2. pasirinkto modelio įrodymas – eksperimentinis rezultatų patvirtinimas, parametrų tyrimai, struktūros modeliavimas;
3. modelio optimizavimas – slėgio kritimų sumažinimas, srautų homogenizavimas, sluoksnių maišymosi pagerinimas.

SSD analizė pritaikoma laminarinio ir turbulentinio srautų judėjimo modeliavimui. Turbulentinis srautas – skysčio (dujų) srauto tipas, kuriame skystis (dujos) patiria netaisyklingus svyravimus (vyksta maišymasis). Turbulentiniame režime būdinga greičių ir slėgių pulsacija bei skysčio dalelių-lašelių intensyvus maišymasis tėkmės gretimuose sluoksniuose, dėl to vidurkiniai tėkmės greičiai tėkmės skerspjūvyje pasiskirsto tolygiau, o greičių epiūros forma artimesnė stačiakampiui (žr. 9 pav.) [33]. Laminariniame sraute skystis juda sklandžiai sluoksniais, o tėkmės greičiai pasiskirsto ypač netolygiai. Pavyzdžiui, prie sistemos ribų sienų greitis yra artimas nuliui, o sistemos ašyje – maksimalus (greičių epiūra – parabolė) (žr. 9 pav.) [33].



9 pav. Greičių pasiskirstymas laminarinėje (kairėje) ir turbulentinėje (dešinėje) tėkmėje [33].

Esant turbulencijai, skysčio greitis taške nuolat keičiasi tiek dydžiu, tiek kryptimi. Daugelio skysčių (dujų) srautai yra turbulentiški, išskyrus juose esančių kietųjų dalelių, kurios juda srauto kraštuose arba labai arti kietųjų paviršių (vamzdžio kraštų ir kt.). Reinoldso skaičius (Re) (žr. 1.3.3.2 lygtį) yra svarbus parametras, apibūdinantis srauto tipą pagal tėkmės sąlygas. Laminarinio judėjimo metu  $Re \leq 2300$ , o turbulentinio judėjimo srautui  $Re \geq 3000$ . Tarpinis srautas vadinamas pereinamuoju [31] [33].

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot V}{\mu} \quad (1.3.3.2 \text{ lygtis})$$

$$Re = \frac{v \cdot R}{\mu} \quad (1.3.3.3 \text{ lygtis})$$

Reinoldso skaičius neturi dimensijos. Kitas šios vertės apskaičiavimo būdas yra pagal hidraulinį spindulį R (žr. 1.3.3.3 lygtį). 1.3.3.2, 1.3.3.3 lygtyse Re – Reinoldso skaičius,  $\rho$  – skysčio tankis, D – pravažiavimo kelio diametras, v – skysčio greitis,  $\mu$  – skysčio klampa, R – hidraulinis spindulys.

Vandens kinematinio klamos koeficiento priklausomybė nuo jo temperatūros yra pateikta 5 lentelėje. Joje matoma, kad kinematinio klamos koeficiento vertė mažėja kylant vandens temperatūrai [33].

**5 lentelė.** Vandens kinematinio klamos koeficiento priklausomybė nuo jo temperatūros [33].

Vandens temperatūra, °C	Vandens kinematinis klamos koeficientas, (m <sup>2</sup> /s)·10 <sup>6</sup>
5	1,520
10	1,308
15	1,142
20	1,007
25	0,897
30	0,804
35	0,727
40	0,661
50	0,556

#### 1.3.4. Pritaikymas aerozolio sklaidos modeliavimo uždaviniams spręsti

Kontrolinio (geometrinio) tūrio (vadinamo domenu) arba kitaip skaičiavimo srities suprojektavimas yra pirmasis žingsnis aerozolio sklaidos modeliavimui. Kontrolinis tūris yra erdvė, kurioje vyksta srauto dalelių pernešimo ar / ir nusėdimo imitavimas. Erdvė turi būti ribojama sienų paviršių su apibrėžtomis srauto įėjimo ir išėjimo plokštumomis [34]. Geometrinį tūrį galima sukurti naudojant bet kurią 2D ar 3D projektavimo programinę įrangą. Jis turi turėti pažymėtus srautų įvadus ir išvadus, simetrijos plokštumas ir kitus paviršius su periodinėmis ribinėmis sąlygomis [35].

Kitas svarbus srauto lauko modeliavimo žingsnis yra tinklelio sugeneravimas, kuriame kontrolinio tūrio sienelės yra padalinamos į atskiras smulkias zonas. Tinklelis apima daugybę parametru, kurie yra nustatomi vartotojo. Tinklelio zonos – „akutės“ – gali būti įvairios formos (pvz., prizminės, tetraedrinės ar šešiakampės). Paprastai tinklelio zonos turi būti didesnio tankio tose vietose, kur pasireiškia dideli nuolydžiai, pavyzdžiui, sritys prie kontrolinio tūrio sienelių kraštinių. Tinklelio zonų tankis yra labai reikšmingas aerozolio transportavimo ir nusėdimo rezultatams [34]. Tinklelio

tankis taip pat yra susijęs su skysčio pasirinkimu, kadangi nuo jo priklauso, kokia jėga bus veikiamas srauto laukas [35].

Skysčių dinamikos modelio pasirinkimas yra svarbus žingsnis srauto lauko modeliavimui. Paprastai modernus SSD (angl. CFD – computational fluid dynamics) programinis paketas apima kelis skysčių dinamikos modelius, pvz., turbulencinius arba laminarinius. Praktiškai aerolio sklaida vyksta turbulentiškai, todėl tokia modelio srauto lauko forma yra tinkamiausia modeliavimui. Turbulencijos modelio ir sienų tinklelio parametrai yra labai reikšmingi aerolio transportavimo ir nusėdimo modeliavimui. Teoriškai turbulencinis srautas yra modeliuojamas kompiuterinei programai sprendžiant nepastovias Navier–Stokes lygtis, pritaikytas skysčių dinamikos vertinimui. Išsprendus šias lygtis gaunama informacija apie srauto kitimą lauke tam tikru laiku. Taip vykdomas tiesioginis skaitinis modeliavimas (angl. DNS). SSD programose dažniausiai naudojami turbulencijos modeliai yra sprendžiami naudojant Reinoldso vidurkio ir Navier-Stokes (angl. RANS) modelius. Šie modeliai yra pagrįsti Reinoldso impulso lygtimi, kuri sudaryta panaudojus Navier-Stokes lygtis [34].

Modeliavimui gali būti taikomi du skirtingi požiūriai. Naudojant Lagrange požiūrį, atskiros dalelės (arba dalelių debesis) yra stebimos joms judant skaičiavimo srityje. Lagrange tipo dalelių sklaidos sekimas vykdomas remiantis dalelių judėjimo lygtimi (žr. 1.3.4.1 lygtį).

$$\frac{dup}{dt} = \frac{Fd}{mp} + a \quad (1.3.4.1 \text{ lygtis})$$

1.3.4.1 lygtyje  $d_{up}$  – dalelių greitis,  $F_d$  – tempimo jėga;  $m_p$  – dalelių masė;  $a$  – gravitacijos, elektrostatinės jėgos, termoforezės jėgos, Brauno judėjimo ir kitų jėgų sukeliamas pagreitis, išskyrus traukos jėgą. Tačiau įprastai aeroliuose esančių dalelių koncentracija yra tokia maža, kad dalelių tarpusavio sąveikia yra nereikšminga, todėl nevertinama ir dujų dalelėms. Taikant Eulerian požiūrį, dalelių koncentracija yra laikoma skaliariniu kiekiu, kurį aprašo 1.3.4.2 lygtis [34] [36].

$$\frac{\partial \rho \cdot C_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u \cdot C_p) = \nabla \cdot (\Gamma \cdot \nabla C_p) + S_c \quad (1.3.4.2 \text{ lygtis})$$

1.3.4.2 lygtyje  $t$  – laikas,  $C_p$  – dalelių (masės ar tūrio) koncentracija,  $\rho$  – aerolio tankis,  $u$  – oro greitis,  $\Gamma$  – efektyvusis dalelių difuzinis poveikis,  $S_c$  – parametras, nusakantis dalelių šaltinį ar nusėdimo sąlygas. Lyginant du skysčių dinamikos tyrimams galimus pritaikyti požiūrius, Eulerian skaičiuojamasis modeliavimas labiau tinka itin smulkioms dalelėms, kurioms inercija yra nereikšminga, tačiau svarbus Brauno judėjimas. Tyrimuose gali būti taikomas ir Eulerian modeliavimo požiūris, tačiau su į dalelių sklaidos matematinės lygtis įtraukta inercijos jėga [34].

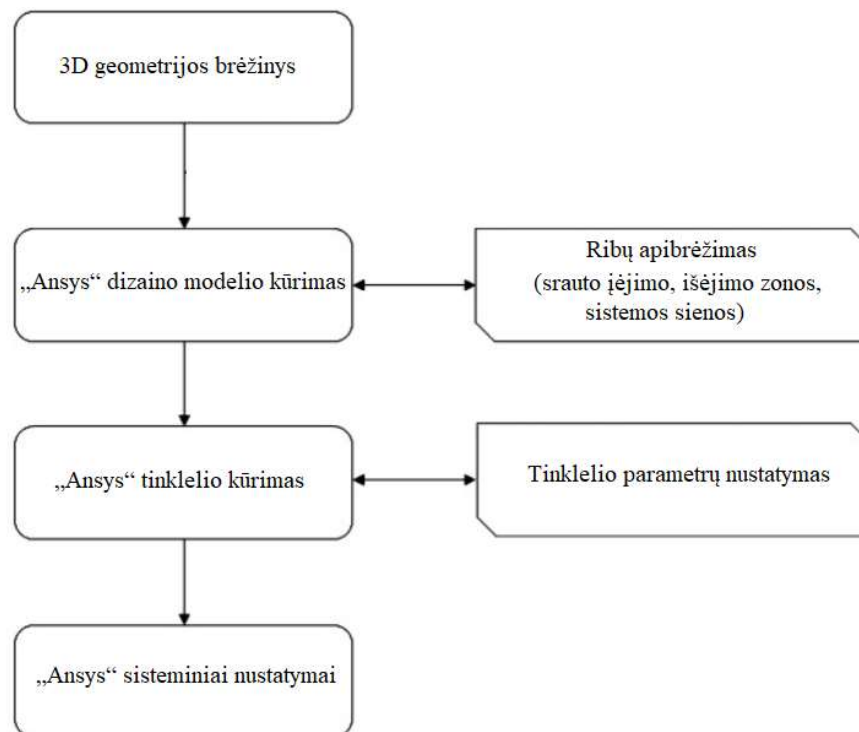
#### 1.4. Programinės įrangos „Ansys CFX“ apžvalga

„Ansys CFX“ yra didelio našumo skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programinė įranga, kuri geba pateikti greitus, patikimus ir tikslus sprendimus įvairioms skysčių dinamikos situacijoms. Programinė įranga yra efektyvi ir lanksti, kadangi turi „Ansys Workbench“ platformą – parametru tvarkytuvą – leidžiantį lengvai atlikti projekto parametru nustatymą skirtingose programos erdvėse (geometrijos sukūrimas, tinklelio nustatymas, sprendimų pateikimas ir t.t.). „Ansys CFX“ gali modeliuoti sudėtingus skysčių srautų fizikos reiškinius ir pateikti kitus daugiafazių srautų, cheminių reakcijų ir degimo modelių rezultatus. Taip pat leidžia apdoroti sudėtingus klampus, laminarinius ar



turbulentinius, vidinius ir išorinius srautus, srauto sukkelto triukšmo prognozes, šilumos perdavimą su radiacija ir be jos. „Ansys CFX“ yra pripažintas lyderiu besisukančių mašinų, įskaitant siurblius, ventiliatorius, kompresorius, dujų ir hidraulinės turbinas, modeliavimo srityje. Šie modeliai reikalauja preciziško tikslumo, tvirtumo ir greičio. Didelio našumo skaičiavimai programa atliekami greitai, siekiant, kad inžinieriai ir dizaineriai galėtų priimti geresnius sprendimus realių sistemų projektavimo ciklo pradžioje [37] [38] [39].

Programinė įranga ypač akcentuoja plataus spektro turbulencijos modelių projektavimą ir rezultatų pateikimą, siekiant tiksliai ir efektyviai užfiksuoti turbulencijos padarinius. „Ansys CFX“ palaiko visų tipų spinduliuotės mainus skysčiuose ir kietose medžiagose, esamas modelių komplektas geba užfiksuoti kelių fazių, tokių kaip dujos ir skysčiai, juose išsisklaidžiusių dalelių ir lašelių bei laisvų paviršių, sąveiką. Programa suteikia visišką kontrolinio tūrio tinklelio nustatymo lankstumą, įskaitant galimybę išspręsti srauto problemas naudojant nestruktūrizuotas tinklelio zonas, kuriomis lengvai nustatomas sudėtingų geometrinių formų paviršiaus tankis. Palaikomi tinklelio zonų – „akučių“ – tipai yra trikampiai, keturkampiai, tetraedriniai, šešiakampiai, piramidės ir prizmės formos. „Ansys Workbench“ leidžia importuoti kitomis 3D programomis sukurtas geometrines formas, paruošti jas naudojimui „Ansys Design Modeler“ (žr. 10 pav. – „Ansys“ dizaino modelio kūrimas) papildiniu ir sujungti ją automatiškai arba rankiniu būdu su „Ansys Mesh“ (žr. 10 pav. – „Ansys“ tinklelio kūrimas) komponentu. „Ansys CFX“ veikia patikimai ir efektyviai, modeliuodamas visus fizinius modelius ir srautų tipus, įskaitant pastovios būsenos ar trumpalaikius, nesuspaužiamus ar suspaužiamus, laminarinius ar turbulentinius, Niutono ar ne Niutono naudojant idealias ar realias dujas ir jų mišinius. Programa suteikia plačią iš anksto apibrėžtų medžiagų biblioteką, kurią vartotojai gali lengvai redaguoti ir išplėsti [37] [38] [39].



10 pav. Programinės įrangos „Ansys CFX“ modeliavimo žingsniai [40].

Programoje iki galimybės nustatyti sisteminius (srautų tipai, greitis ir kt.) nustatymus, visų pirma importuojamas 3D geometrinis brėžinys, kurį galima pakoreguoti pagal poreikius „Ansys“ dizaino modelio kūrimo erdvėje (taip pat geometrinis modelis gali būti neimportuojamas, o kuriamas iškart dizaino modelio kūrimo erdvėje) (žr. 9 pav.). Šioje modeliavimo stadijoje yra nurodomos srautų išėjimo, įėjimo zonos, sistemos sienų parametrai. Perėjus į „Ansys“ tinklelio kūrimo zoną, nustatomi minėtų tinklelio zonų – „akučių“ – dydžiai ir formos, siekiant modelį veikiančių jėgų tikslesnio atvaizdavimo. Po to seka „Ansys“ programoje sistemos parametrų nustatymo žingsnis, po kurio programa atlieka skaičiavimus ir sugeneruoja rezultatus (žr. 10 pav.).

### 1.5. Apibendrinimas

Pirmajame projekto skyriuje apžvelgta aerzolių klasifikacija ir kilmė, išanalizuota žmogaus plaučiuose esančio aerzolio sudėtis ir skvarba. Detaliai išanalizuota žmogaus kvėpavimo specifika, apibendrinta moksliniuose tyrimuose pateikta informacija apie žmogaus kvėpavimo ciklus, įkvėpimo ir iškvėpimo greičius, oro tūrius ir kitus parametrus. Sistemiškai pateikta informacija apie žmogaus iškvėpiamų lašelių susidarymą ir elgesį atmosferoje, aerzoliuose esančių lašelių ir kietųjų dalelių savybes ir parametrus. Atlikta skaičiuojamosios skysčių dinamikos pritaikymo aerzolio sklaidos tyrimams analizė. Analizuoti programinės įrangos privalumai ir trūkumai bei skaičiavimų metodika, skaičiuojamoji skysčių dinamika palyginta su eksperimentine skysčių dinamika. Taip pat apžvelgta programinė įranga „Ansys CFX“, kuri skirta skaičiuojamosios skysčių dinamikos uždaviniams spręsti ir buvo naudojama magistro projekto tyrimui atlikti. Daugiau apie programą ir jos atskiras funkcijas pateikiama metodinėje dalyje.

## 2. Tyrimų metodika

Antrame projekto skyriuje pateikiama pasiruošimo eksperimentams metodika, kurią sudaro:

1. eksperimentų (skaičiavimų) įrangos ir jos atliekamų analitinių procedūrų analizė;
2. skaičiavimų 3D modelio erdvės suprojektavimas ir sistemos ribų apibrėžimas;
3. tyrimų ir darbų eigos plano parengimas;
4. rezultatų statistinio patikimumo įvertinimas.

Tyrimų metodika parengta siekiant pasirengti eksperimentams, kurie skirti ištirti skirtingų žmogaus kvėpavimo takų procesų metu iškvėpiamo aerozolio lašelių sklaidos kryptis, trajektorijas ir kitus parametrus.

### 2.1. Eksperimentų (skaičiavimų) įranga ir analitinės procedūros

Matematinis žmogaus kvėpavimo proceso modeliavimas reikalauja funkcinio srauto greičio atvaizdavimo kvėpavimo metu. Eksperimentų su žmonėmis rezultatai rodo, kad žmogaus kvėpavimą galima apibūdinti sinusine funkcija, kai vieną kvėpavimo ciklą sudaro įkvėpimas ir iškvėpimas (žr. 1 pav.), nors kai kurie tyrėjai taip pat rekomenduoja atsižvelgti į pertrauką tarp kvėpavimo ciklų. Nors žmogaus kvėpavimo modelis turi didelę įtaką skaitinių skaičiavimų tikslumui, kvėpavimo proceso modeliavimui dažniausiai naudojami supaprastinti nuolatinio iškvėpimo modeliai, kuriuos įmanoma įvertinti skaitmeniniuose skaičiavimuose [11]. „Ansys CFX“ programinė įranga reikalauja daug įvesties duomenų, kurie skirti aerozolių sklaidos uždaroje patalpoje vizualiam atvaizdavimui.

Tyrimui atlikti pasirinkta „Ansys CFX“ programinė įranga (toliau – programa), kuri naudoja Navier-Stokes skaičiavimo lygtis aerozolio sklaidos modeliavimui. Šios lygtys pagrįstos trimis dėsniais: masės išsaugojimo, impulso išsaugojimo ir energijos išsaugojimo [41]. Masės išsaugojimo dėsnis teigia, kad masės negalima sukurti ar sunaikinti (žr. 2.1.1 lygtį) [42].

$$\frac{d}{dt} \int_{v(t)} \rho(x, t) dV = \int_{v(t)} \sigma(x, t) dV \quad (2.1.1 \text{ lygtis})$$

2.1.1 lygtyje  $\rho(x, t)$  – tankis,  $\sigma(x, t)$  – masės gamybos greitis per laiką  $t$  pozicijoje  $x$ .

Impulso išsaugojimo dėsnis teigia, kad medžiagos tūrio impulso pokyčio greitis yra lygus bendrajai tūrio jėgai (žr. 2.1.2 lygtį) [42].

$$\int_{v(t)} \rho \frac{Dv_i}{Dt} dV = \int_{v(t)} \rho F_i dV + \int_{S(t)} R_i dS \quad (2.1.2 \text{ lygtis})$$

Energijos išsaugojimo dėsnis teigia, kad energija negali būti sukurta ar sunaikinta, bet gali būti keičiama iš vienos formos į kitą (žr. 2.1.3 lygtį) [42].

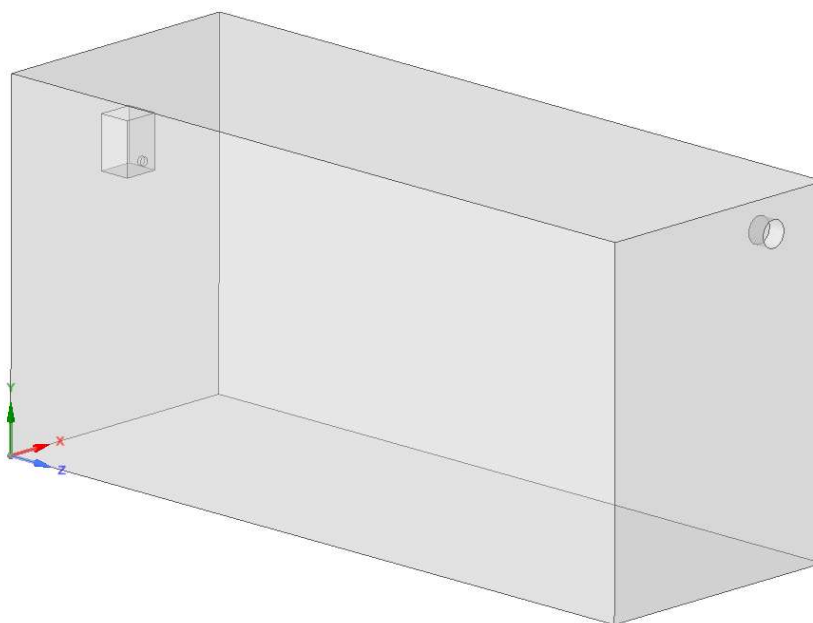
$$\frac{d}{dt} \int_{v(t)} \rho E dV = W + Q \quad (2.1.3 \text{ lygtis})$$

2.1.3 lygtyje  $E$  – bendra energija,  $W$  – skysčio aplinkos atliekamo darbo greitis,  $Q$  – papildomos šilumos pridėjimo greitis.

## 2.2. Skaičiavimų modelis

Žmogaus kvėpavimo specifiką atitinkantis aerozolio sklaidos šaltinis buvo užprogramuotas į ventiliuojamą uždara patalpą skirtingu intensyvumu skleisti aerozolį su tam tikro dydžio lašeliais. Nors plaučiai veikia įkvėpimo-iškvėpimo ciklais (žr. 2 pav.), eksperimento metu vertintas tik aerozolio su lašeliais iškvėpimo procesas. Programa buvo suprojektuota 4,5 m<sup>3</sup> patalpa su aerozolio šaltinio ir ventiliacijos angomis (žr. 11 pav.).

Patalpos aukštis – 2,0 m, plotis – 1,5 m, ilgis – 4,2 m. Atstumas nuo aerozolio sklaidos šaltinio iki sienos (išilgai) – 4 m. Patalpos 3D geometrijos brėžinys suprojektuotas programos „Geometry“ darbo lange. Reikalavimai patalpai buvo atitikti įprastai ventiliuojamas darbo patalpas, kuriose oro pasikeitimas ne didesnis nei 1 kartas per valandą.



**11 pav.** Tyrimams atlikti suprojektuotos patalpos 3D geometrijos brėžinys.

Patalpoje su anga ventiliacijai (diametras 15 cm) taip pat sumodeliuotas ir aerozolio sklaidos šaltinis, atitinkantis stovinčio žmogaus burną (diametras – 5 cm, aukštis nuo paviršiaus – 1,6 m). Patalpoje buvo imituojamos standartinės oro sąlygos (žr. 6 lentelę), kurios kartu su kitomis sistemos ribų reikšmėmis (žr. 7 lentelę) buvo įvestos siekiant aerozolio lašelių sklaidos modelio realiomis sąlygomis [36].

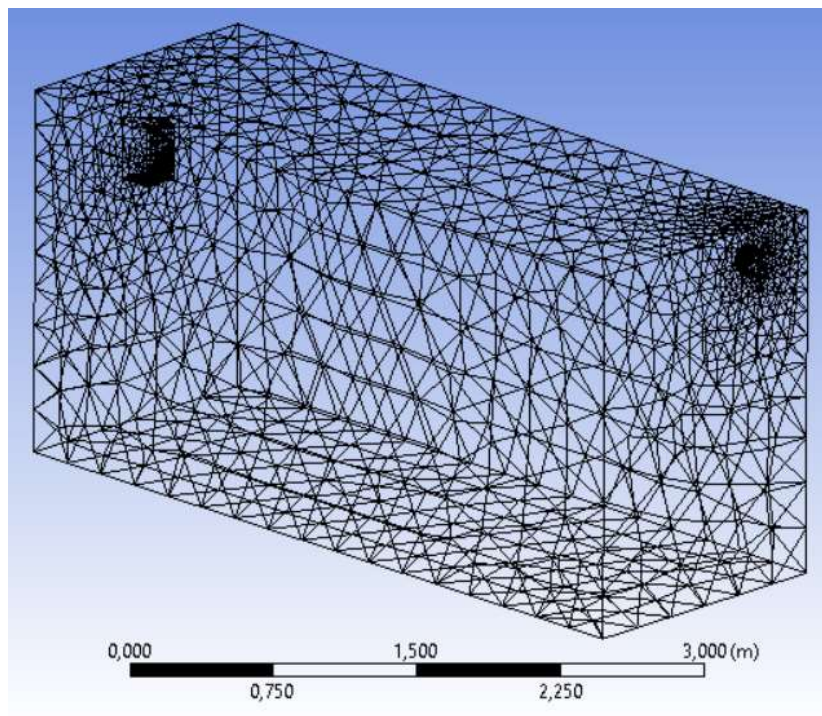
**6 lentelė.** Tyrimams parinktų standartinių oro sąlygų parametrai.

Patalpos oro parametras	Reikšmė
Pasikeitimo dažnis, k/h	1
Temperatūra, °C	25
Tankis, kg/m <sup>3</sup>	1,204
Dinaminė klampa, kg/(m·s)	$1,82 \cdot 10^{-5}$
Kinematinė klampa, m <sup>2</sup> /s	$1,51 \cdot 10^{-5}$
Specifinė šiluma, J/(kg·K)	1006,0
Santykinė drėgmė, %	60
Slėgis, Pa	101325

**7 lentelė.** Sistemos ribų parametrai.

Sistemos ribų parametras	Reikšmė
Laisvojo kritimo pagreitis, $m/s^2$	9,82
Turbulentinė kinetinė energija, $m^2/s^2$	0,1
Išsisklaidymo reikšmė, $1/s$	0,1

Suprojektuota patalpa yra uždaro tipo, kadangi programai reikia aiškių sistemos ribų, kad būtų įmanoma atlikti skaičiavimus ir sumodeliuoti sklaidos trajektorijas. Patalpos 3D geometrijos brėžinio sistemos ribos patikrinamos programos „Mesh“ darbo lange, kuriame sukuriamas tinklelis, parodantis paviršių veikiančios jėgos trajektorijas (žr. 12 pav.).



**12 pav.** Tyrimams suprojektuotos 3D patalpos sistemos ribų įvertinimas.

### 2.3. Tyrimų planas ir darbų seka

Siekiant tyrimais nustatyti ir palyginti žmogaus iškvėpiamo aerozolio lašelių sklaidos ypatumus, kai vykdomas skirtingas kvėpavimo takų procesas, tyrimų metu buvo keičiami įvesties duomenys (žr. 8 lentelę). Modeliavimui įvairių kvėpavimo takų procesų parametrai buvo pasirinkti įvertinus eksperimentinių tyrimų literatūrinę analizę, kai realiomis sąlygomis matuoti tokie parametrai, kaip žmonių iškvėpiamų lašelių koncentracija, diametras ir sklaidos greitis kosulio / čiaudulio, kvėpavimo ir kalbėjimo metu (žr. 2 lentelę) [43].

**8 lentelė.** Tyrimams parinkti kvėpavimo takų procesai ir jų įvesties parametrai.

Tyrimo numeris	Kvėpavimo takų procesas	Sistemos parametras	Sistemos parametro reikšmė
1	Kosulys / čiaudulys (lašelių diametras 3,5 μm)	Koncentracija, lašeliai/cm <sup>-3</sup>	0,64
		Lašelių diametras, μm	3,5
		Skaidos maksimalus greitis, m/s	4,5
		Vidutinis skaidos greitis m <sup>2</sup> /s	2,0
2	Kosulys / čiaudulys (lašelių diametras 3 μm)	Koncentracija, lašeliai/cm <sup>-3</sup>	0,64
		Lašelių diametras, μm	3,0
		Skaidos maksimalus greitis, m/s	4,5
		Vidutinis skaidos greitis m <sup>2</sup> /s	2,0
3	Kosulys / čiaudulys (lašelių diametras 2,5 μm)	Koncentracija, lašeliai/cm <sup>-3</sup>	0,64
		Lašelių diametras, μm	2,5
		Skaidos maksimalus greitis, m/s	4,5
		Vidutinis skaidos greitis m <sup>2</sup> /s	2,0
4	Kvėpavimas per burną	Koncentracija, lašeliai/cm <sup>-3</sup>	0,092
		Lašelių diametras, μm	0,8
		Skaidos maksimalus greitis, m/s	1,3
		Vidutinis skaidos greitis m <sup>2</sup> /s	0,17
5	Kvėpavimas per nosį	Koncentracija, lašeliai/cm <sup>-3</sup>	0,092
		Lašelių diametras, μm	0,8
		Skaidos maksimalus greitis, m/s	1,4
		Vidutinis skaidos greitis m <sup>2</sup> /s	0,16
6	Kalbėjimas	Koncentracija, lašeliai/cm <sup>-3</sup>	0,307
		Lašelių diametras, μm	5,5
		Skaidos maksimalus greitis, m/s	2,1
		Vidutinis skaidos greitis m <sup>2</sup> /s	0,26
7	Kalbėjimas dėvint apsauginį skydelį	Koncentracija, lašeliai/cm <sup>-3</sup>	0,307
		Lašelių diametras, μm	5,5
		Skaidos maksimalus greitis, m/s	2,1
		Vidutinis skaidos greitis m <sup>2</sup> /s	0,26

Tiriant skirtingų žmogaus kvėpavimo takų procesų metu iškvepiamo aerozolio lašelių sklaidą siekta nustatyti procesų sklaidos kryptis ir jų intensyvumą. Programoje eksperimentams atlikti įvestos fiksuotos aerozolio lašelių dydžio reikšmės, o ne aerozolio lašelių dydžio skirstiniai. Siekiant kosulio / čiaudulio metu išskiriamo aerozolio srauto parametų palyginimo, kai procesas išlieka toks pat, tačiau keičiasi aerozolio lašelių dydis, atlikti papildomi 2, 3 tyrimai 1 tyrimo sąlygomis, bet pakeitus aerozolio lašelių dydį. Atskirų aerozolio sklaidos procesų tyrimai 1, 4, 5, 6 rezultatai palyginti tarpusavyje. Taip pat tarpusavyje palyginti 1,2,3 tyrimų rezultatai. 7 tyrimas atliktas 6 tyrimo sąlygomis, tik kai žmogaus kvėpavimo takai yra uždengiami apsauginiu skydeliu. Eksperimentams atlikti įvesties duomenys įvedami programos „Setup“ darbo lange.

Tyrimams naudoti apibendrinti žmogaus iškvepiamo aerozolio su lašeliais parametrai, tačiau paminėtina, kad kiekvieno asmens iškvepiamo aerozolio tūrio, koncentracijos ir greičio parametrai gali žymiai skirtis. Remiantis realiomis sąlygomis atliktais tyrimais, žmogus net ir kvėpuodamas oru, kuriame nėra lašelių ir kietųjų dalelių, kiekvieną kartą iškvepia aerolį su skirtingomis lašelių ir kietųjų dalelių koncentracijomis [44].

## 2.4. Rezultatų statistinio patikimumo įvertinimas

Eksperimento metu visi skaičiavimai atliekami programiškai keičiant tyrimų sąlygas (įvesties ir išvesties duomenis). Rezultatų patikimumą užtikrina „Ansys CFX“ turimas sisteminių parametrų paketas, kurio rezultatų reprezentatyvumas yra patikrintas daugelio tyrimų, atliktų realiomis sąlygomis. „Ansys CFX“ skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programinė įranga geba pateikti patikimus ir tikslius sprendimus įvairioms skysčių dinamikos situacijoms, priklausančioms tik nuo įvesties ir išvesties duomenų. Paklaidų riziką sumažina ir statistinį patikimumą užtikrina skaičiavimų atlikimo žmogiškosios klaidos eliminavimas programai pačiai atliekant visus skaičiavimus. Modeliuojant įvertinta, kad srauto greičio turbulencija yra vidutinė (5 %).

Šio projekto apimtyje atliktų eksperimentų rezultatų statistinis patikimumas įvertintas tyrimų metu nustatytus rezultatus lyginant su panašių tyrimų rezultatais, apžvelgtais atliekant literatūrinę analizę. Taip pat rezultatų reprezentatyvumas patvirtintas ta pačia programa atlikus standartinius eksperimentus, kurių rezultatai buvo palyginti su realiomis sąlygomis atliktais eksperimentais.

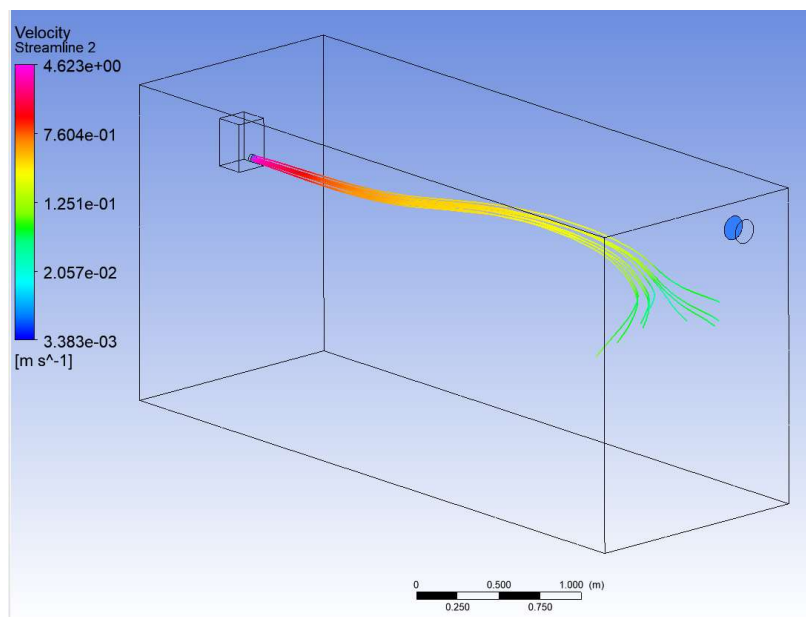
### 3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

#### 3.1. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kosulio / čiaudulio metu

##### 3.1.1. Kosulys / čiaudulys, kai aerosolio lašelių diametras 3,5 $\mu\text{m}$

Aerosolio sklaidos modeliui kosulio / čiaudulio metu panaudoti įvesties duomenys 1 tyrimui (žr. 8 lentelę). Sudarytas sklaidos modelis su aerosolio lašelių sklaidos trajektorijomis su greičio verte kiekviename trajektorijos taške (žr. 13 pav.). Grafinėje sklaidos projekcijoje matoma, kad kosulio / čiaudulio pradžioje aerosolis su lašeliais sklinda didžiausiu greičiu, o atstumui nuo aerosolio sklaidos šaltinio didėjant, srauto greitis mažėja. Aerosolio lašelių diametras – 3,5  $\mu\text{m}$ .

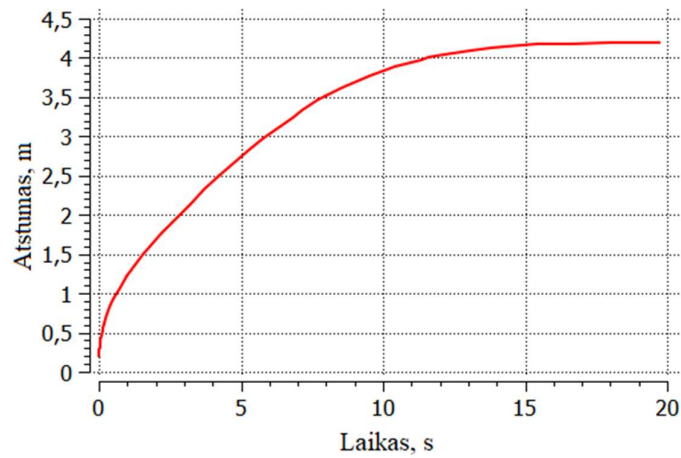
Aerosolio su lašeliais sklaidos pasiekto atstumo išilgai patalpos priklausomybės nuo laiko rezultatai (žr. 14 pav.) rodo, kad kosulio / čiaudulio metu aerosolio lašeliai 2,0 m atstumą pasiekia jau po 3,1 s, o maksimalų 4,0 m atstumą tiesia trajektorija po 15,3 s. Sklaidos pasiektas atstumas išilgai patalpos įvertintas priklausomai nuo sklaidimo trukmės. Rezultatai rodo, kad kosulio / čiaudulio metu žmogaus iškvepiamo aerosolio lašeliai itin greitai sklinda uždaros patalpos erdvėje iš pradžių tiesia trajektorija, o vėliau įvairiomis kryptimis, priklausomai nuo patalpos tūrio ir aerosolio sklaidimo terpės (žr. 6 lentelę) sąlygų.



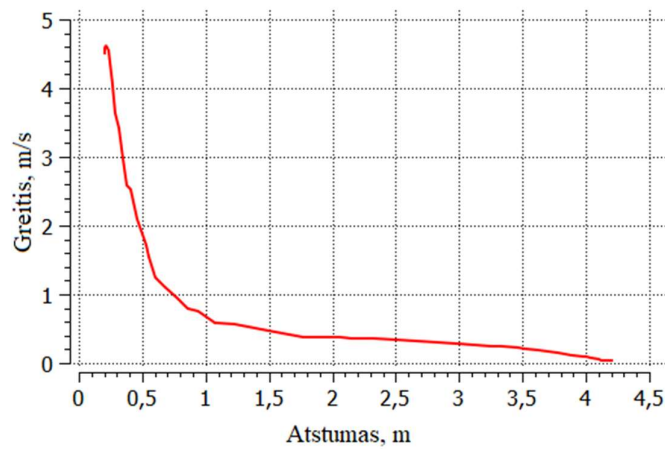
**13 pav.** Aerosolio lašelių sklaidos modelis žmogaus kosulio / čiaudulio metu (lašelių diametras – 3,5  $\mu\text{m}$ ).

Aerosolio lašelių greičio priklausomybės nuo sklaidos išilgai patalpos rezultatai (žr. 15 pav.) rodo, kad greitis eksponentiškai mažėja nuo didžiausio sklaidos greičio aerosolio sklaidos pradžios vietoje 4,5 m/s iki mažiausio tyrimo pabaigos vietoje 0,01 m/s. Sklaidos greičio pokytis įvertintas priklausomai nuo sklaidimo atstumo išilgai patalpos.





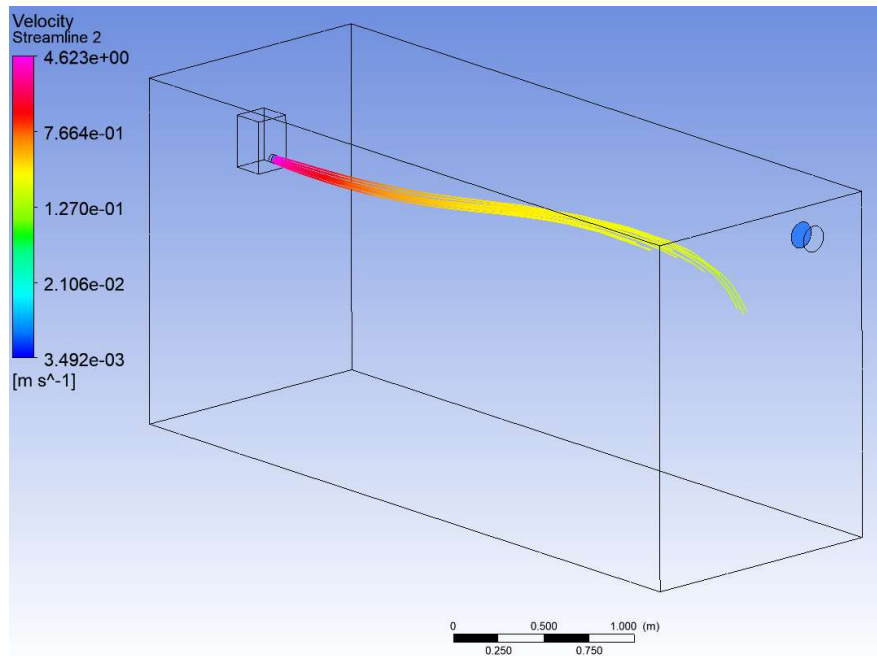
**14 pav.** Aerosolio lašelių kosulio / čiaudulio metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.



**15 pav.** Aerosolio lašelių kosulio / čiaudulio metu greičio priklausomybė nuo atstumo.

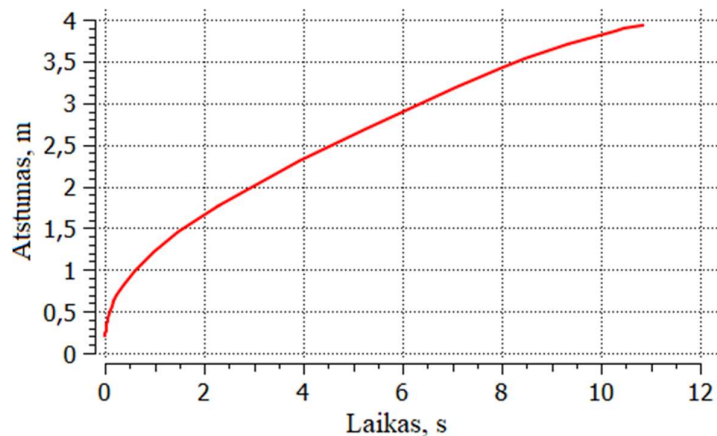
### 3.1.2. Kosulys / čiaudulys, kai aerosolio lašelių diametras $3,0 \mu\text{m}$

Aerosolio sklaidos modeliui kosulio / čiaudulio metu panaudoti įvesties duomenys 2 tyrimui (žr. 8 lentelę). Sudarytas sklaidos modelis su aerosolio lašelių sklaidos trajektorijomis su greičio verte kiekviename trajektorijos taške (žr. 16 pav.). Grafinėje sklaidos projekcijoje matoma, kad kosulio / čiaudulio pradžioje aerosolis su lašeliais sklinda didžiausiu greičiu, o atstumui nuo aerosolio šaltinio didėjant, srauto greitis mažėja. Aerosolio lašelių diametras –  $3,0 \mu\text{m}$ .



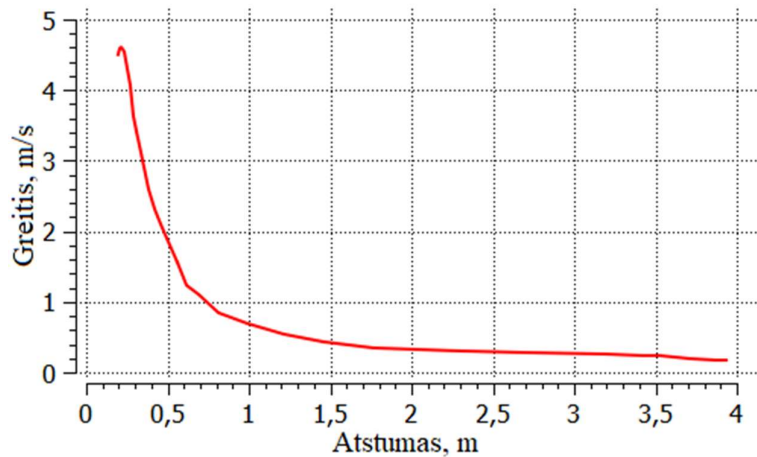
**16 pav.** Aerosolio lašelių sklaidos modelis kosulio / čiaudulio metu (lašelių diametras – 3,0  $\mu\text{m}$ ).

Aerosolio su lašeliais sklaidos pasiekto atstumo išilgai patalpos priklausomybės nuo laiko rezultatai (žr. 17 pav.) rodo, kad kosulio / čiaudulio metu aerosolio lašeliai 2,0 m atstumą pasiekia jau po 3,5 s, o maksimalų 3,7 m atstumą tiesia trajektorija po 10,6 s. Sklaidos pasiektas atstumas išilgai patalpos įvertintas priklausomai nuo sklaidimo trukmės. Rezultatai rodo, kad kosulio / čiaudulio metu žmogaus iškvepiami aerosolio lašeliai itin greitai sklinda uždaros patalpos erdvėje iš pradžių tiesia trajektorija, o vėliau įvairiomis kryptimis, priklausomai nuo patalpos tūrio ir aerosolio sklaidimo terpės (žr. 6 lentelę) sąlygų.



**17 pav.** Aerosolio lašelių kosulio / čiaudulio metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.

Aerolio lašelių greičio priklausomybės nuo sklaidos išilgai patalpos rezultatai (žr. 18 pav.) rodo, kad greitis eksponentiškai mažėja nuo didžiausio sklaidos greičio aerolio sklaidos pradžios vietoje 4,5 m/s iki mažiausio tyrimo pabaigos vietoje 0,1 m/s. Sklaidos greičio pokytis įvertintas priklausomai nuo sklaidimo atstumo išilgai patalpos.

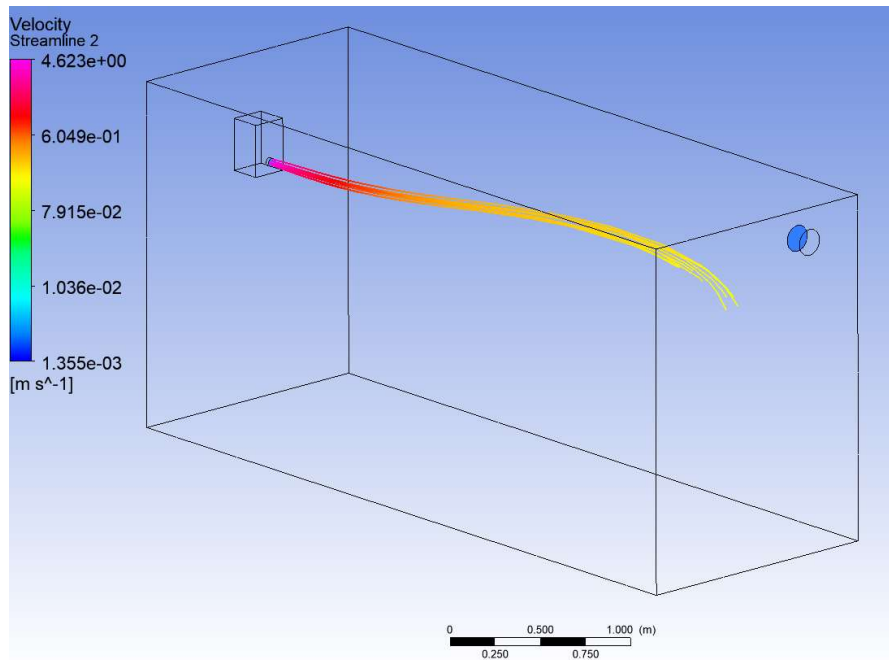


**18 pav.** Aerolio lašelių sklaidos kosulio / čiaudulio metu greičio priklausomybė nuo atstumo.

### 3.1.3. Kosulys / čiaudulys, kai aerolio lašelių diametras 2,5 $\mu\text{m}$

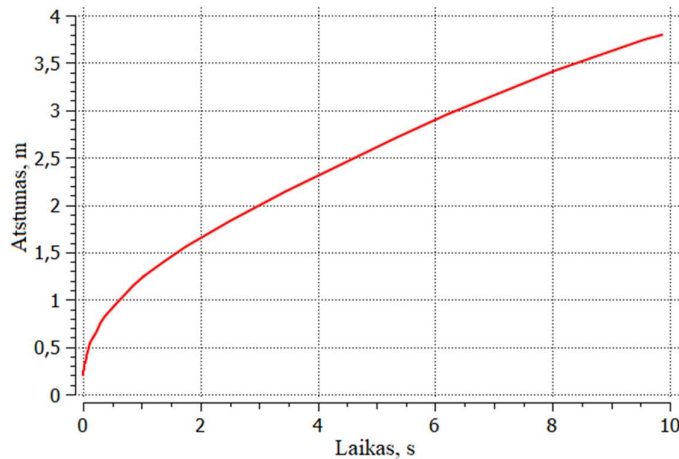
Aerolio sklaidos modeliui kosulio / čiaudulio metu panaudoti įvesties duomenys 3 tyrimui (žr. 8 lentelę). Sudarytas sklaidos modelis su aerolio lašelių sklaidos trajektorijomis su greičio verte kiekviename trajektorijos taške (žr. 19 pav.). Grafinėje sklaidos projekcijoje matoma, kad kosulio / čiaudulio pradžioje aerolis su lašeliais sklinda didžiausiu greičiu, o atstumui nuo aerolio šaltinio didėjant, srauto greitis mažėja. Aerolio lašelių diametras – 2,5  $\mu\text{m}$ .

Aerolio su lašeliais sklaidos pasiekto atstumo išilgai patalpos priklausomybės nuo laiko rezultatai (žr. 20 pav.) rodo, kad kosulio / čiaudulio metu aerolio lašeliai 2,0 m atstumą pasiekia jau po 3,8 s, o maksimalų 3,5 m atstumą tiesia trajektorija po 9,4 s. Sklaidos pasiektas atstumas išilgai patalpos įvertintas priklausomai nuo sklaidimo trukmės. Rezultatai rodo, kad kosulio / čiaudulio metu žmogaus iškvepiami aerolio lašeliai itin greitai sklinda uždaro patalpos erdvėje iš pradžių tiesia trajektorija, o vėliau įvairiomis kryptimis, priklausomai nuo patalpos tūrio ir aerolio sklaidimo terpės (žr. 6 lentelę) sąlygų.

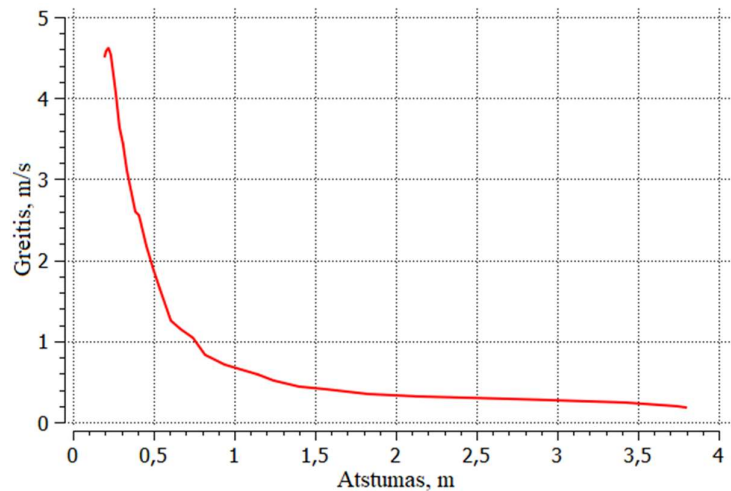


**19 pav.** Aerosolio lašelių sklaidos modelis kosulio / čiaudulio metu (lašelių diametras – 2,5 μm).

Aerosolio lašelių greičio priklausomybės nuo sklaidos išilgai patalpos rezultatai (žr. 21 pav.) rodo, kad greitis eksponentiškai mažėja nuo didžiausio sklaidos greičio aerosolio sklaidos pradžios vietoje 4,5 m/s iki mažiausio tyrimo pabaigos vietoje 0,1 m/s. Sklaidos greičio pokytis įvertintas priklausomai nuo sklidimo atstumo išilgai patalpos.



**20 pav.** Aerosolio lašelių kosulio / čiaudulio metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.

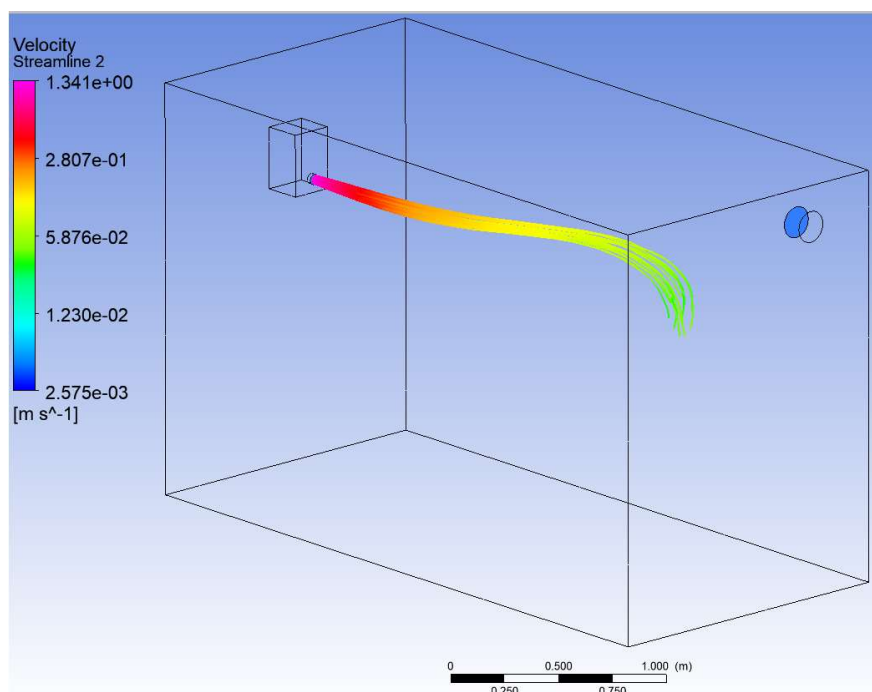


**21 pav.** Aerosolio lašelių sklaidos kosulio / čiaudulio metu greičio priklausomybė nuo atstumo.

### 3.2. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kvėpavimo per burną metu

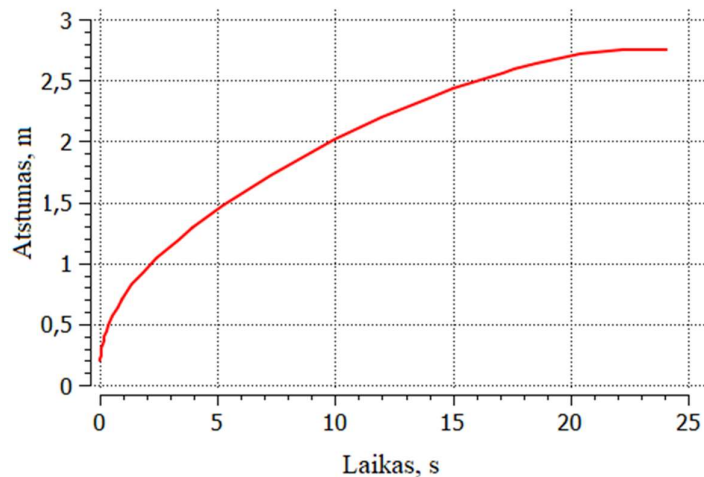
Aerosolio sklaidos modeliui kvėpavimo per burną metu panaudoti įvesties duomenys 4 tyrimui (žr. 8 lentelę). Sudarytas sklaidos modelis su aerosolio lašelių sklaidos trajektorijomis su greičio verte kiekviename trajektorijos taške (žr. 22 pav.). Grafinėje sklaidos projekcijoje matoma, kad kvėpavimo per burną pradžioje aerosolis su lašeliais sklinda didžiausiu greičiu, o atstumui nuo aerosolio šaltinio didėjant, srauto greitis mažėja. Kvėpavimo per burną metu aerosolio pradinis greitis yra 1,3 m/s, aerosolio lašelių diametras – 0,8  $\mu\text{m}$ .

Aerosolio su lašeliais sklaidos pasiekto atstumo išilgai patalpos priklausomybės nuo laiko rezultatai (žr. 23 pav.) rodo, kad kvėpavimo per burną metu aerosolio lašeliai 2,0 m atstumą pasiekia po 11,1 s, o maksimalų 2,65 m atstumą tiesia trajektorija po 21,8 s. Aerosolio lašelių srautas kvėpavimo per burną metu nepasiekia už 3 m esančios patalpos sienos, t. y. didžiausias srauto pasiektas atstumas nuo aerosolio šaltinio yra 2,65 m. Sklaidos pasiektas atstumas išilgai patalpos įvertintas priklausomai nuo sklaidimo trukmės.

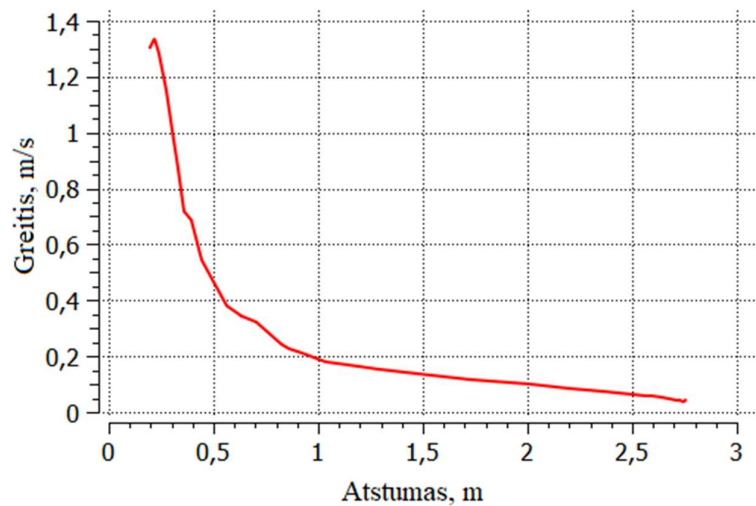


22 pav. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kvėpavimo per burną metu.

Rezultatai rodo, kad kvėpavimo per burną metu žmogaus iškvepiamas aerosolis su lašeliais sklinda uždaros patalpos erdvėje iš pradžių tiesia trajektorija, o vėliau kitomis kryptimis, priklausomai nuo patalpos tūrio ir aerosolio sklaidimo terpės (žr. 6 lentelę) sąlygų.



23 pav. Aerosolio lašelių kvėpavimo per burną metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.



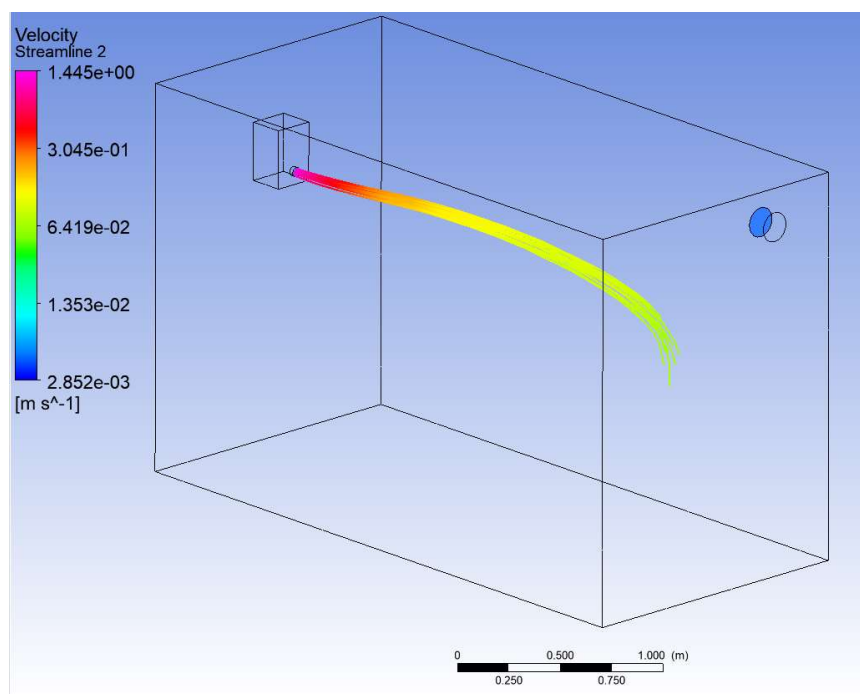
**24 pav.** Aerosolio lašelių sklaidos kvėpavimo per burną metu greičio priklausomybė nuo atstumo.

Aerosolio lašelių greičio priklausomybės nuo sklaidos išilgai patalpos rezultatai (žr. 24 pav.) rodo, kad greitis eksponentiškai mažėja nuo didžiausio sklaidos greičio aerosolio sklaidos pradžios vietoje 1,3 m/s iki mažiausio tyrimo pabaigos vietoje 0,1 m/s. Lašelių srautui pasiekus 2,65 m atstumą, jo trajektorijos izolinijos užlinksta, nors srautas nepasiekia patalpos sienos. Sklaidos greičio pokytis įvertintas priklausomai nuo sklaidimo atstumo išilgai patalpos.

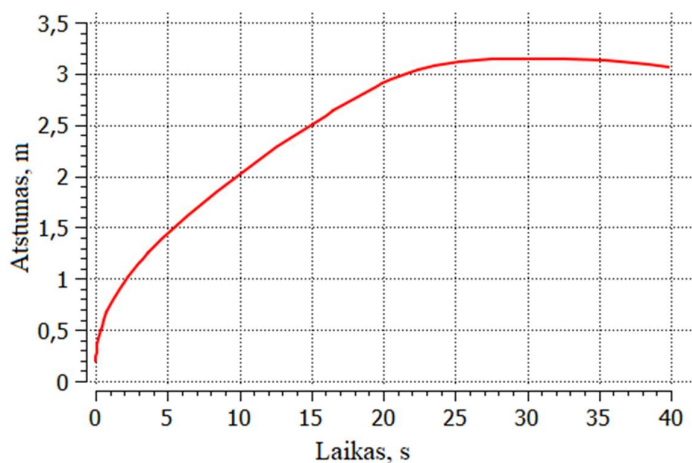
### 3.3. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kvėpavimo per nosį metu

Aerosolio sklaidos modeliui kvėpavimo per nosį metu panaudoti įvesties duomenys 5 tyrimui (žr. 8 lentelę). Sudarytas sklaidos modelis su aerosolio lašelių sklaidos trajektorijomis su greičio verte kiekviename trajektorijos taške (žr. 25 pav.). Grafinėje sklaidos projekcijoje matoma, kad kvėpavimo per nosį pradžioje aerosolis su lašeliais sklinda didžiausiu greičiu, o atstumui nuo aerosolio šaltinio didėjant, srauto greitis mažėja. Kvėpavimo per nosį metu aerosolio pradinis greitis yra 1,4 m/s, aerosolio lašelių diametras – 0,8  $\mu\text{m}$ .

Aerosolio lašelių sklaidos pasiekto atstumo išilgai patalpos priklausomybės nuo laiko rezultatai (žr. 26 pav.) rodo, kad kvėpavimo per nosį metu aerosolio lašeliai 2,0 m atstumą pasiekia po 11,8 s, o maksimalų 2,95 m atstumą tiesia trajektorija po 22,0 s. Aerosolio lašelių srautas kvėpavimo per burną metu nepasiekia už 3 m esančios patalpos sienos, t. y. didžiausias srauto pasiektas atstumas nuo aerosolio šaltinio yra 2,95 m. Sklaidos pasiektas atstumas išilgai patalpos įvertintas priklausomai nuo sklaidimo trukmės. Rezultatai rodo, kad kvėpavimo per nosį metu žmogaus iškvepiamas aerosolis su lašeliais sklinda uždaro patalpos erdvėje iš pradžių tiesia trajektorija, o vėliau kitomis kryptimis, priklausomai nuo patalpos tūrio ir aerosolio sklaidimo terpės (žr. 6 lentelę) sąlygų.



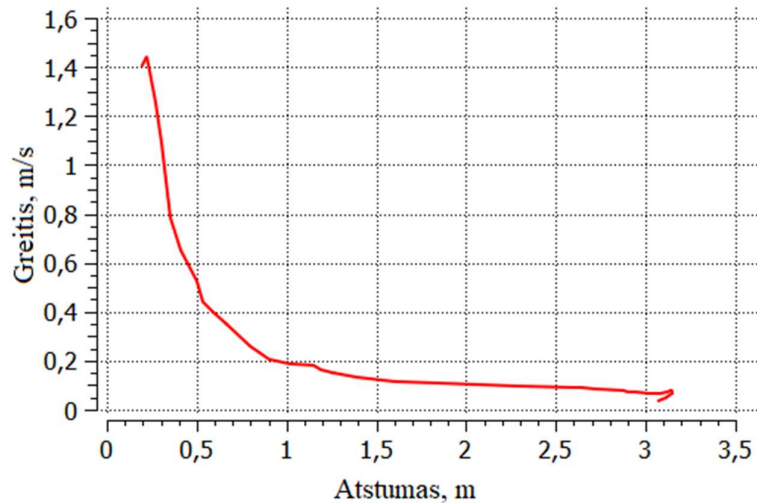
**25 pav.** Aerosolio lašelių sklaidos modelis kvėpavimo per nosį metu.



**26 pav.** Aerosolio lašelių kvėpavimo per nosį metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.

Aerosolio lašelių greičio priklausomybės nuo sklaidos išilgai patalpos rezultatai (žr. 27 pav.) rodo, kad greitis eksponentiškai mažėja nuo didžiausio sklaidos greičio aerosolio sklaidos pradžios vietoje 1,4 m/s iki mažiausio tyrimo pabaigos vietoje 0,05 m/s. Lašelių srautui pasiekus 2,95 m atstumą, jo trajektorijos izolinijos užlinksta, nors srautas nepasiekia patalpos sienos. Sklaidos greičio pokytis įvertintas priklausomai nuo sklaidimo atstumo išilgai patalpos.





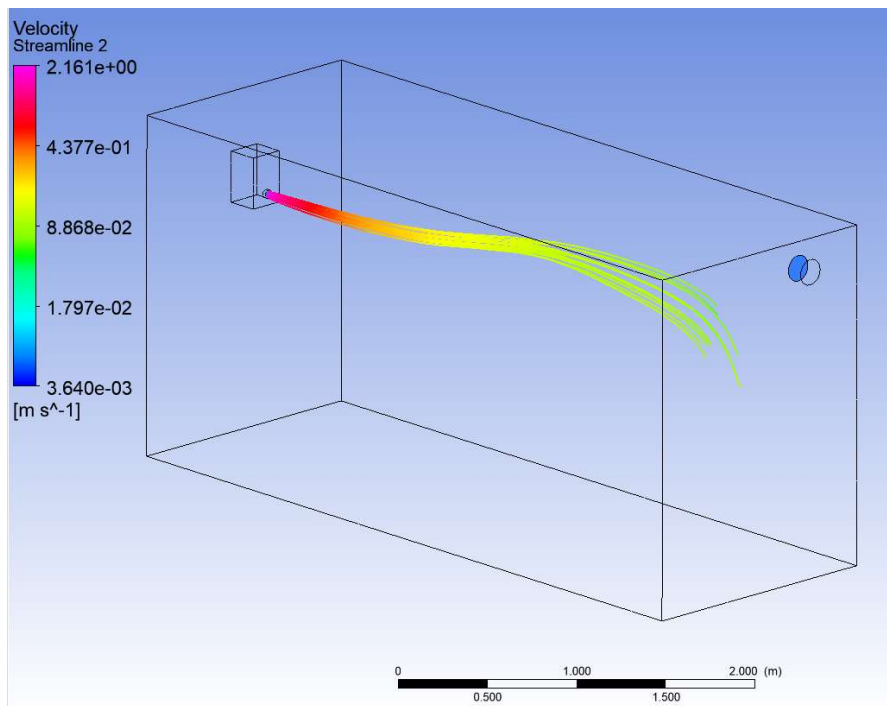
**27 pav.** Aerosolio lašelių sklaidos kvėpavimo per nosį metu greičio priklausomybė nuo atstumo.

Pastebėtina, kad žmogui kvėpuojant pro nosį aerosolis nėra išskiriamas tiesia trajektorija išilgai patalpos (žr. 25 pav.). Aerosolio lašelių sklaidos tyrimas kvėpavimo per nosį metu įvertina realų iškvėpimo per nosį greitį, bet ne realią aerosolio sklaidos trajektoriją, kuri iškvėpimo metu yra nukreipta žemyn [9]. Nors tyrimo metu nustatyti tyrimo rezultatai nepilnai atitinka realias žmogaus kvėpavimo per nosį sąlygas dėl kitos programiškai parinktos aerosolio lašelių sklaidos trajektorijos krypties, rezultatai duomenų įvesties ir išvesties prasme yra tikslūs ir naudotini palyginimui su kitų tyrimų rezultatais.

#### 3.4. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kalbėjimo metu

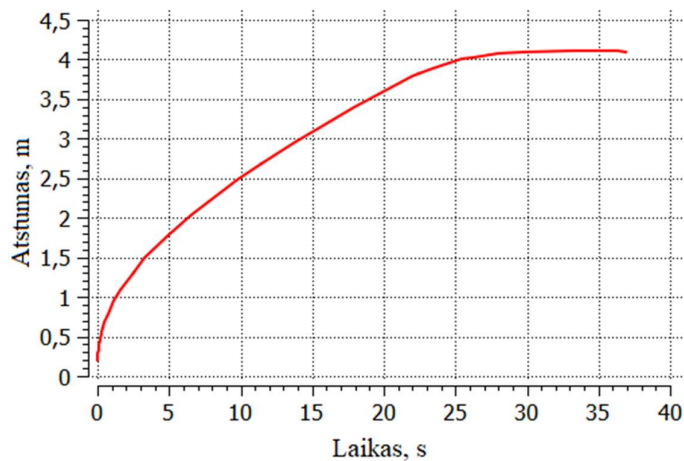
Aerosolio sklaidos modeliui kalbėjimo metu panaudoti įvesties duomenys 6 tyrimui (žr. 8 lentelę). Sudarytas sklaidos modelis su aerosolio lašelių sklaidos trajektorijomis su greičio verte kiekviename trajektorijos taške (žr. 28 pav.). Grafinėje sklaidos projekcijoje matoma, kad kalbėjimo pradžioje aerosolis su lašeliais sklinda didžiausiu greičiu, o atstumui nuo aerosolio šaltinio didėjant, srauto greitis mažėja. Kalbėjimo metu aerosolio pradinis greitis yra 2,1 m/s, aerosolio lašelių diametras – 5,5 μm.

Aerosolio lašelių sklaidos pasiekto atstumo išilgai patalpos priklausomybės nuo laiko rezultatai (žr. 29 pav.) rodo, kad kalbėjimo metu aerosolio lašeliai 2,0 m atstumą pasiekia jau po 6,5 s, maksimalų 3,9 m atstumą – po 29,0 s. Sklaidos pasiektas atstumas išilgai patalpos įvertintas priklausomai nuo sklaidimo trukmės. Rezultatai rodo, kad kalbėjimo metu žmogaus iškvėpiamo aerosolio lašeliai sklinda uždaro patalpos erdvėje iš pradžių tiesia trajektorija, o vėliau kitomis kryptimis, priklausomai nuo patalpos tūrio ir aerosolio sklaidimo terpės (žr. 6 lentelę) sąlygų.

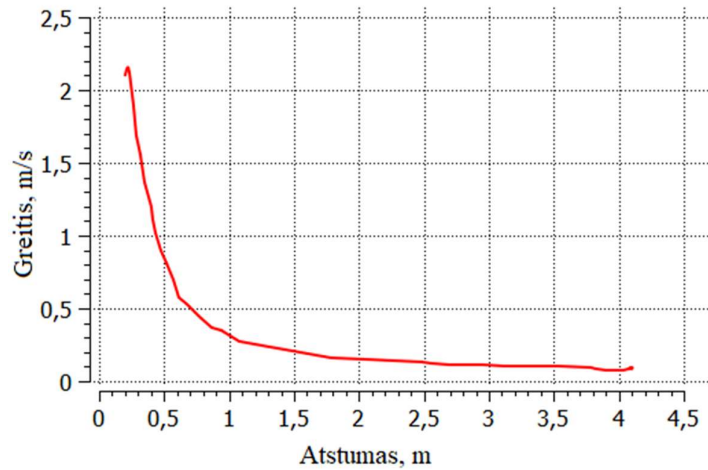


28 pav. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kalbėjimo metu.

Aerosolio lašelių greičio priklausomybės nuo sklaidos išilgai patalpos rezultatai (žr. 30 pav.) rodo, kad greitis eksponentiškai mažėja nuo didžiausio sklaidos greičio aerosolio sklaidos pradžios vietoje 2,1 m/s iki mažiausio tyrimo pabaigos vietoje 0,1 m/s. Lašelių srautui pasiekus 3,9 m atstumą (patalpos sieną), jo trajektorijos izolinijos užlinksta. Sklaidos greičio pokytis įvertintas priklausomai nuo sklaidimo atstumo išilgai patalpos.



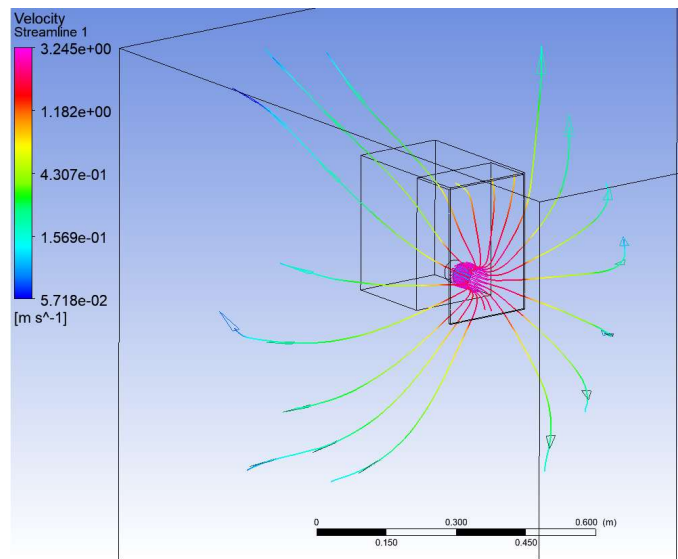
29 pav. Aerosolio lašelių kalbėjimo metu pasiekto atstumo priklausomybė nuo laiko.



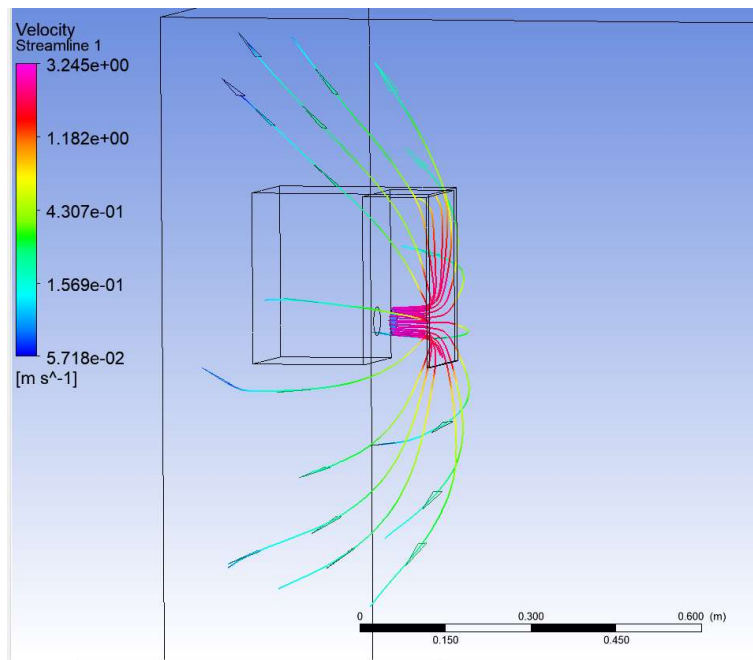
**30 pav.** Aerosolio lašelių sklaidos kalbėjimo metu greičio priklausomybė nuo atstumo.

### 3.5. Aerosolio lašelių sklaidos modelis kalbėjimo dėvint apsauginį skydelį metu

Kalbėjimo dėvint apsauginį skydelį 7 tyrimu (žr. 8 lentelę) siekta nustatyti, ar efektyviai žmogaus iškvėpiamas aerosolis su lašeliais kalbėjimo metu yra sustabdomas apsauginio skydelio. Kalbant žmogus išskiria aerazolį 2,1 m/s greičiu, o srautas už 1 m esantį asmenį pasiekia po ~ 1 s tiesia iškvėpimui trajektorija (žr. 28 pav.) uždaroje oro patalpoje. Tačiau naudojant apsauginį skydelį (žr. 31 pav.) matoma, kad srauto izolinijos dėl priešais aerolio šaltinį esančio skydelio yra priverstos pakeisti trajektoriją ir nukrypti atgal, tuo pačiu stipriai (iki < 0,74 m/s) sumažėjant srauto greičiui. Tyrimui parinktas aerosolio lašelių diametras – 5,5 μm.



**31 pav.** Aerosolio lašelių sklaidos kalbėjimo metu su apsauginiu skydeliu trajektorijos (1).



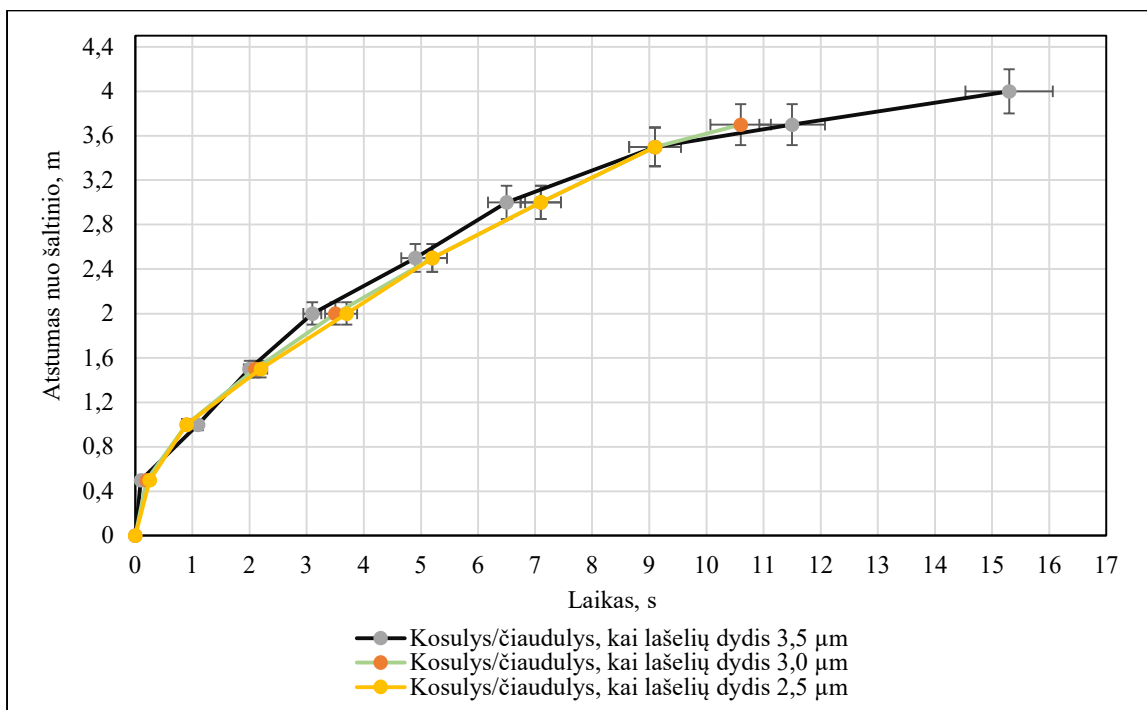
**32 pav.** Aerosolio lašelių sklaidos kalbėjimo metu su apsauginiu skydeliu trajektorijos (2).

Apsauginis skydelis (žr. 32 pav.) efektyviai sustabdo ir pakeičia aerosolio lašelių srauto trajektorijas ir greitį, o tai lemia priešais esančio žmogaus tiesioginę apsaugą nuo kito žmogaus išskiriamo aerosolio. Apsauginiai skydeliai yra naudingi tais atvejais, kai kontaktas tarp žmonių vyksta trumpą laiką, kadangi jie veikia momentiniu principu, t. y. sustabdo tiesioginį aerosolio su lašeliais srautą jį nukreipiant ir sumažinant jo greitį, tačiau ilguoju laikotarpiu lašeliai tam tikru atstumu pasklinda aplink skydelio nešiotoją. Aerosolio lašelių sulaikymas ar filtravimas nėra vykdomas asmeniui dėvint apsauginį skydelį, kadangi skydelis įprastai yra su atvirais šonais, pro kuriuos aerosolio srautas patenka į aplinką. Dėl šios priežasties apsauginis skydelis negali būti naudojamas vietoj apsauginės kaukės, kuri atlieka aerosolio sulaikymo ir filtravimo funkcijas.

### 3.6. Rezultatų palyginimas ir apibendrinimas

#### 3.6.1. Aerosolio lašelių sklaida kosulio / čiaudulio metu

Žmogaus išskiriamo aerosolio sklaidos kosulio / čiaudulio metu palyginimas, kai aerosolį sudaro skirtingo dydžio lašeliai, sudarytas labai artimose duomenų ribose, todėl negalima įvertinti lašelių srautų greičio parametro esminio skirtumo tuose pačiuose erdvės taškuose (žr. 33 pav.). Tačiau tyrimo metu nustatyta, kad kosulio / čiaudulio metu išskirtas aerosolis, kurį sudarė 3,5  $\mu\text{m}$  lašeliai, pasiekė didžiausią atstumą tiesia trajektorija – 4,0 m, kai tuo metu aerosolis su 3,0  $\mu\text{m}$  lašeliais – 3,7 m, o aerosolis su 2,5  $\mu\text{m}$  lašeliais – 3,5 m.



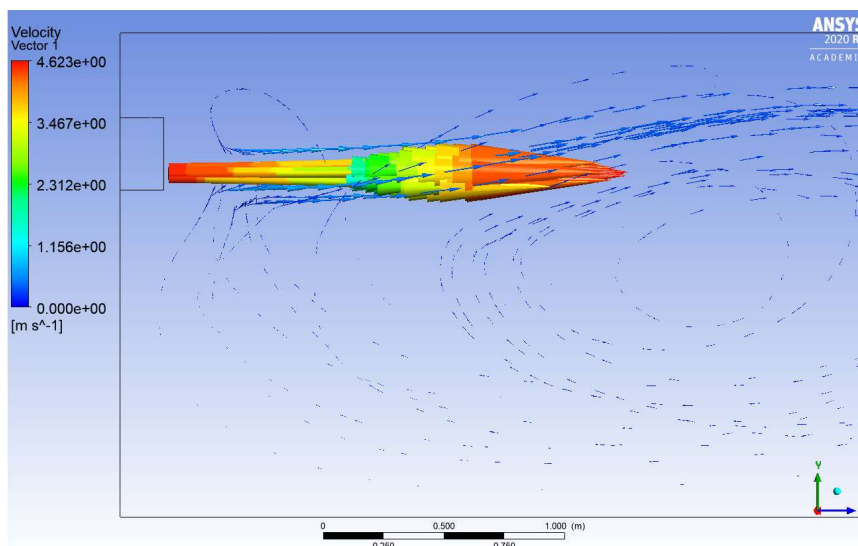
**33 pav.** Kosulio / čiaudulio išskiriamo aerosolio pasiekto atstumo priklausomybės nuo laiko priklausomybės palyginimas.

Tyrimo metu nustatyti aerosolio lašelių srautų duomenys rodo, kad aerosolio sraute esančių lašelių dydis turėjo įtaką srauto tiesia trajektorija pasiektam atstumui. Paminėtina, kad kvėpavimo organų (takų) išskiriami bet kokio dydžio lašeliai ar po išgaravimo aplinkoje likę šių lašelių branduoliai (išdžiūvusių lašelių likučiai) yra aktyvių patogenų nešėjai, jei jie iškvėpti iš infekcinėmis ligomis sergančio žmogaus [45]. Iškvėptiems lašeliams išdžiūvus, juose buvę virusai tampa nanodalelėmis, kurių neveikia sunkio jėga ir jie ištiesai kabo ore.

### 3.6.2. Aerosolio lašelių sklaida įvairių kvėpavimo takų procesų metu

Atlikus aerosolio lašelių sklaidos tyrimus, nustatyti 1, 4, 5, 6 (žr. 8 lentelę) eksperimentų rezultatai palyginti tarpusavyje (žr. 35 pav.). Kosulio / čiaudulio metu žmogaus išskirtas aerosolis su lašeliais srautas tiesia trajektorija nuo sklaidos šaltinio pasiekė 4 m, kvėpavimo per nosį metu aerosolio srautas siekė 2,95 m, kvėpavimo per burną – 2,65 m atstumą, kalbėjimo metu – 3,9 m. Kosulio / čiaudulio metu išsiskyręs aerosolis su lašeliais dėl didesnio pradinio greičio išlaikė didžiausią greitį beveik visuose erdvės taškuose 4,0 m atstumu nuo šaltinio, lyginant su kalbėjimo proceso greičiu.

Išsamus kosulio / čiaudulio metu išsiskiriančio aerosolio lašelių greičio ir trajektorijos pokytis matomas vektorinės greičio išraiškos modelyje, kuriame parodytas išilgai patalpos sklindantis srautas (žr. 34 pav.). Lašelių srauto trajektorija 4 m nuo šaltinio pradžios atstumu yra beveik nekintanti, tik plėtėjanti. Lyginant aerosolio lašelių pasiekto atstumo priklausomybių nuo laiko rezultatus (žr. 36 pav.) matoma, kad kosėjimo / čiaudėjimo metu išskirti aerosolio lašeliai 4,0 m atstumą įveikia per 15,3 s, kai kalbėjimo metu srautas įveikia beveik tą patį 3,9 m atstumą, tačiau tik per 29,0 s. Skirtumų tendencijos atitinka literatūros apžvalgos metu analizuotų tyrimų realiomis sąlygomis rezultatus.

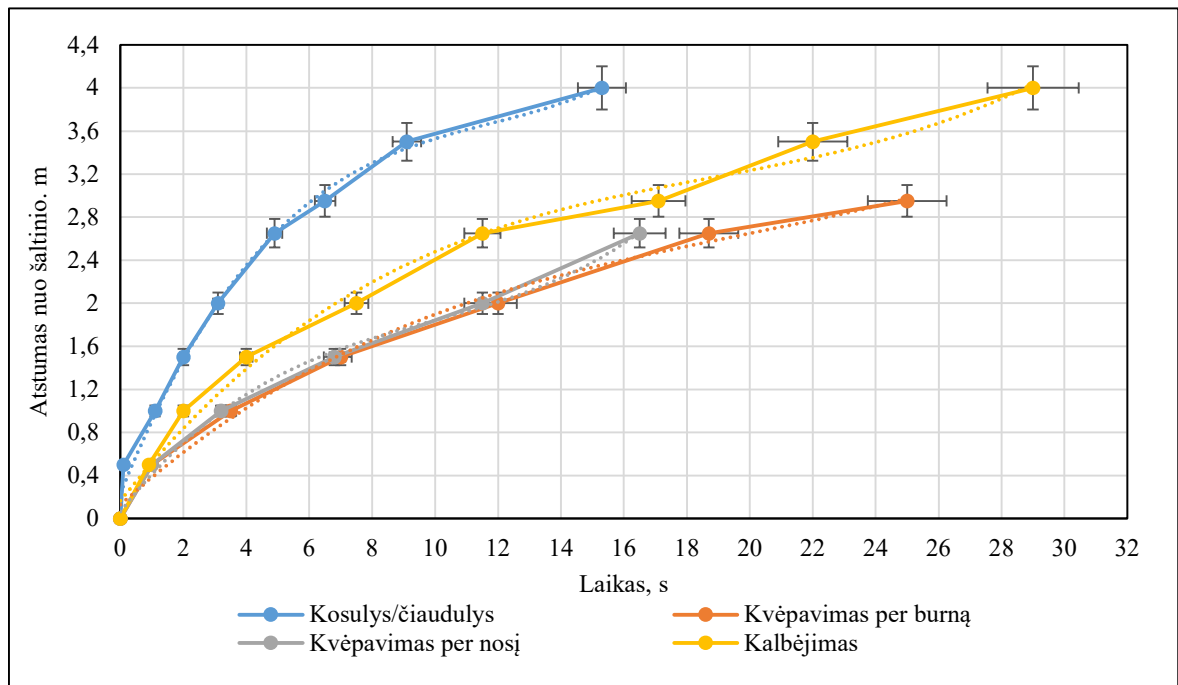


34 pav. Kosulio / čiaudulio išskiriamo aerosolio lašelių vektorinė greičio ir trajektorijos išraiška.

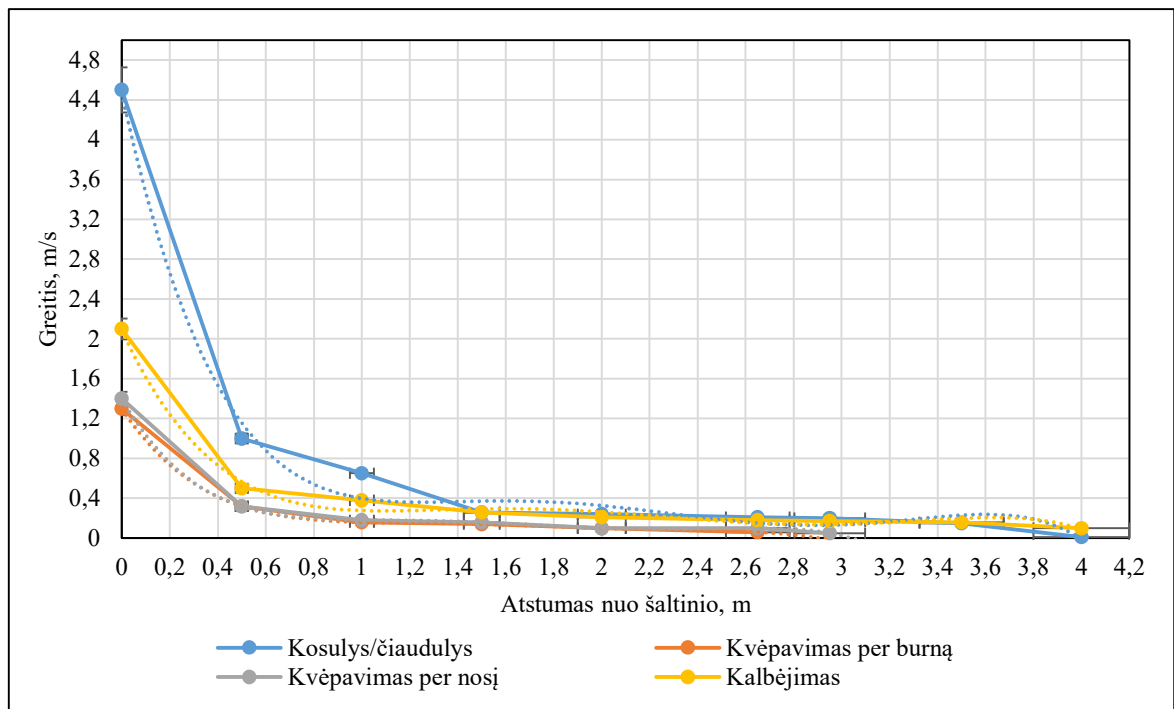
Aerosolio lašelių pasiekto atstumo priklausomybės nuo laiko palyginime (žr. 35 pav.) ir aerosolio lašelių sklaidos greičio priklausomybės nuo atstumo palyginime (žr. 36 pav.) pažymėtina, kad skyrėsi lašelių dydžiai. Kosulio / čiaudulio metu srautas modeliuotas, kai aerosolį sudarė 3,5  $\mu\text{m}$  dydžio lašeliai, o kalbėjimo metu 5,5  $\mu\text{m}$  dydžio lašeliai.

Lyginant 4 ir 5 (žr. 8 lentelę) eksperimentus, kvėpavimo per nosį metu aerosolio lašeliai tiesia trajektorija pasiekė 2,95 m, o kvėpavimo per burną – 2,65 m atstumą nuo aerosolio šaltinio (nepasiekus patalpos sienos). Po to lašelių srautų izolinijos užlinksta veikiamos gravitacijos ir kitų jėgų. Nors abu lašelių srautai modeliuoti, kai aerosolius sudarė 0,8  $\mu\text{m}$  dydžio lašeliai, sklaidos srauto pasiekto atstumo priklausomybės nuo laiko palyginime (žr. 35 pav.) ir sklaidos greičio priklausomybės nuo atstumo palyginime (žr. 36 pav.) matomi srautų parametrų skirtumai dėl nežymiai skirtingo pradinio aerosolio greičio, kai lyginamas atstumas nuo šaltinio yra 2,65 m. Kvėpavimo per nosį metu aerosolio pradinis greitis buvo 1,4 m/s, kvėpavimo per burną – 1,3 m/s.

Lyginant aerosolio lašelių srauto greičio priklausomybę nuo padėties erdvėje (žr. 36 pav.) matoma, kad aerosolio išskyrimo pradžioje, visų kvėpavimo takų veiklų lašelių srauto (aritmetinis) vidutinis greitis yra  $\sim 8$  kartus didesnis nei už 1,5 m. Toliau pernešamų lašelių sklaidos greitis išlieka 0,01-0,3 m/s intervale nepriklausomai nuo kvėpavimo takų veiklos pobūdžio. Tai rodo, kad vidutiniškai šiame diapazone žmogaus iškvepiamo aerosolio lašeliai  $\sim 4$  kartais greičiau atsimuša į priešais esančius paviršius nei į toliau esančius paviršius. Šiuo atstumu žmogaus iškvepiami aerosolio lašeliai turi didžiausią kinetinę energiją prisitvirtinti prie kitų paviršių.



35 pav. Aerozolio lašelių srauto pasiekto atstumo priklausomybės nuo laiko palyginimas.



36 pav. Aerozolio lašelių srauto greičio priklausomybės nuo padėties erdvėje palyginimas.

Pastebėtina, kad nustatyti rezultatai įvertino kvėpavimo takų momentinį aerozolio su lašeliais išskyrimą (iškvėpimą), kuris realiomis sąlygomis vyksta įkvėpimo ir iškvėpimo pasikartojančiais ciklais (žr. 2 pav.).

Šio projekto tyrimai atlikti įvertinant 0,8-5,5  $\mu\text{m}$  dydžio lašelių sklaidą, tačiau kitais tyrimais grindžiama, kad aerozolio dalelių ir lašelių dydžio diapazonas, kurį dažniausiai (vidutiniškai) išskiria

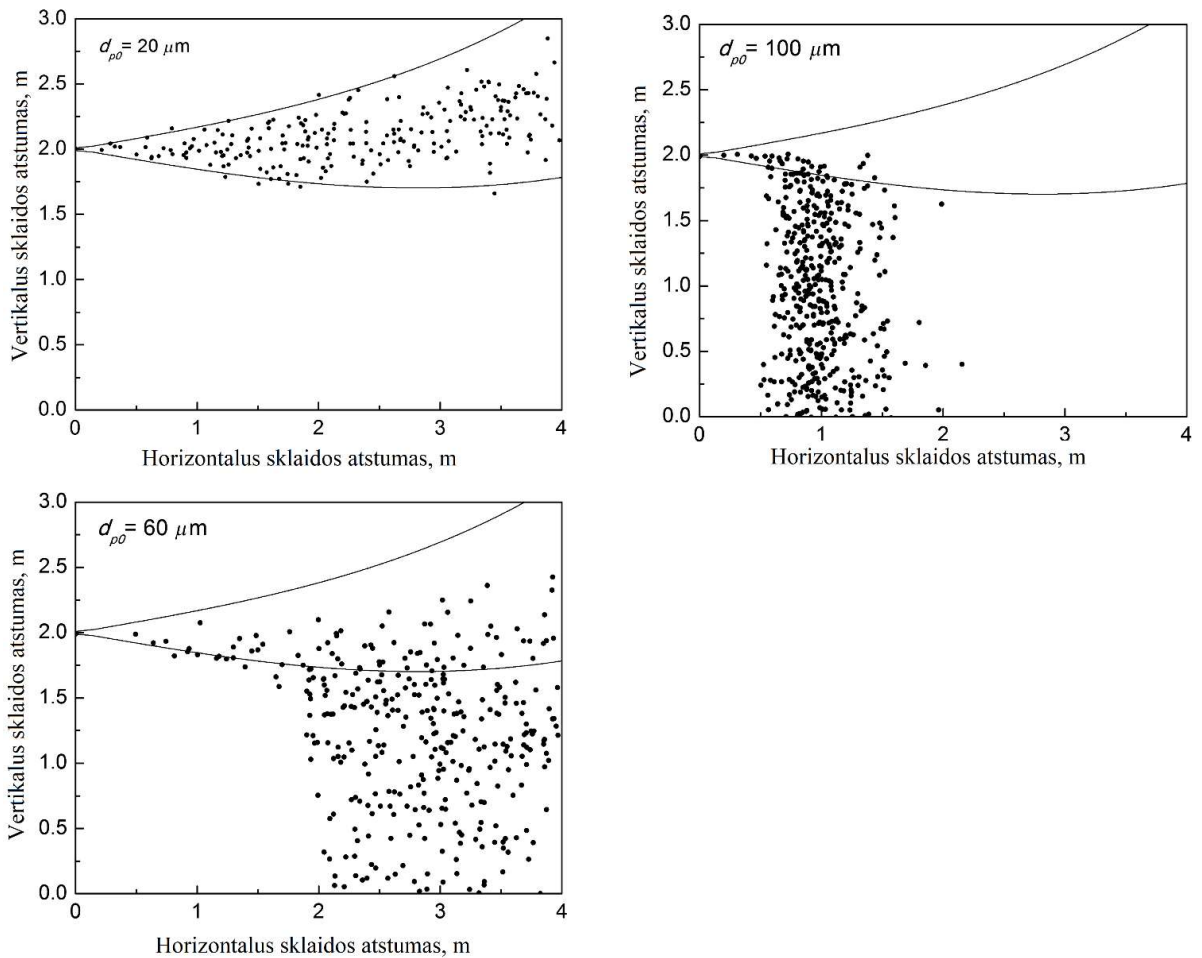
normalus kvėpavimo procesas yra 0,1-0,5  $\mu\text{m}$  [44]. Šio dydžio lašeliai ir kietosios dalelės iš iškvėpto oro srauto pašalinami keliais mechanizmais: Brauno molekulinio judėjimo ir sunkio jėgos (gravitacinis nusėdimas). Brauno judėjimas efektyviai veikia aerozolio lašelius ir kietąsias daleles diapazone nuo 0,005 iki 0,1  $\mu\text{m}$ , o sunkio jėga nusodina aerozolio lašelius ir kietąsias daleles, kurių diametras 0,5–1  $\mu\text{m}$ . Taip pat aerozolio lašeliai ir kietosios dalelės nukrypsta nuo tiesioginio iškvėpto oro srauto trajektorijos (t. y. pašalinamos iš iškvėpto oro srauto) dėl jų tarpusavio susidūrimo, lemiamo iš dalies ir oro pasipriešinimo. Šis mechanizmas veikia lašelius ir kietąsias daleles, kurių diametras didesnis nei 1  $\mu\text{m}$ . Žmogaus plaučiuose aerozolio lašeliai ir kietosios dalelės susidaro oro įkvėpimo metu apatiniuose labai mažo diametro kvėpavimo sistemos takuose. Iškvėpimo proceso pradžioje apie 200 ml aerozolio tūrio yra iškvėpami be lašelių ar kietųjų dalelių arba su labai maža jų koncentracija. Lašelių ir kietųjų dalelių koncentracija žymiai padidėja iškvėpimo tolesnėje eigoje [44].

Kitu analizuotu tyrimu grindžiama, kad lašelių sklaida dėl žmogaus iškvėpamo aerozolio yra paprastai tik mažo nuotolio procesas, kurį lemia didelių lašelių išgaravimas oro aplinkoje ir didelis jų gravitacinio nusėdimo greitis. Taip pat nustatyta, kad mažame nuotolyje ore plintančių virusų (infekcijos) rizika yra daug didesnė nei rizika tolimojo nuotolio ore. Tai paaiškinama tuo, kad tolimojo nuotolio ore daugiausiai yra žmogaus iškvėpto aerozolio išdžiūvusių lašelių likučiai, kurie kelia mažesnę infekcijos riziką nei skystos būsenos lašeliai [46].

Žmogaus iškvėpamo aerozolio lašelių sklaidos tyrimų rezultatus šio projekto apimtyje lėmė visi aukščiau paminėti procesai. Tačiau mažo diametro lašelių nusėdimą taip pat gali lemti turbulentiųjų sūkurių ar difuzinio nusėdimo mechanizmai. Tyrimų metu nustatyti duomenys yra tolimojo nuotolio, daugiausiai iki 4 m (kosulio / čiaudulio atveju). Lyginant šio projekto tyrimais nustatytus rezultatus su kitais tyrimais, atliktais panašiomis sąlygomis, rezultatai koreliuoja, tačiau jų tiesioginis palyginimas yra komplikuoatas dėl skirtingų tyrimo atlikimo sąlygų. Pavyzdžiui, analizuotas atliktas tyrimas lauko sąlygomis, kai kosulio kryptimi (sraute 50-80  $\mu\text{m}$  lašeliai) buvo numatytas papildomas oro gūsis 1,11 m/s greičiu, nustatyta, kad žmogaus iškvėpto aerozolio lašeliai pasiekia 6 m atstumą per 5 s [47]. Šio projekto tyrimuose tirta aerozolio lašelių sklaida uždaroje patalpoje su 1 k/h oro pasikeitimu, tačiau rezultatų tendencijos atitinka ir tyrimus, atliktus atviroje erdvėje su papildomais faktoriais.

Žmogaus iškvėpamo aerozolio lašelių sklaidos kiti tyrimai uždaroje patalpoje dažnu atveju apima eksperimentus, kai lašelių diametras 20-100  $\mu\text{m}$ , kadangi mažesnio diametro lašeliai ir kietosios dalelės yra sunkiai aptinkamos. Analizuoto tyrimo rezultatai (žr. 37 pav.), kai kosulio metu su aerozoliu išskiriami 100  $\mu\text{m}$  dydžio lašeliai rodo, kad lašelių pašalinimas iš tiesioginio srauto vyksta iš esmės dėl sunkio jėgos ir išgaravimo, šio dydžio lašelių kritimas aptinkamas horizontaliai 0,5-2 m atstumu nuo sklaidos šaltinio, o 60  $\mu\text{m}$  dydžio lašelių kritimas aptinkamas 2-4 m nuo sklaidos šaltinio [46]. 20  $\mu\text{m}$  dydžio lašelių sklaida tiesiogine srauto kryptimi stebima horizontaliai 4 m atstumu nuo sklaidos šaltinio be lašelių gravitacinio nusėdimo (žr. 37 pav.). Tokių lašelių pasiektą atstumą horizontalia kryptimi lemia jų mažas diametras, jų pasišalinimas iš oro vyksta dėl tarpusavio susidūrimo ir išgaravimo mechanizmų [48]. Kitu analizuotu tyrimu nustatyta, kad aerozolio mikrolašeliai (<5  $\mu\text{m}$ ) gali pasiekti ir 7 m atstumą [49].





**37 pav.** Kosulio metu iškvėpto aerosolio lašelių sklaidos pagal jų dydį palyginimas [48].

Nustatyti šiame projekte atliktų tyrimų (žr. 8 lentelę) rezultatai pagal sklaidos atstumo ir lašelių pasiskirstymo rezultatus yra koreliuojantys su aukščiau aprašyto tyrimo rezultatais, kai lašelių diametras  $20 \mu\text{m}$  (žr. 37 pav.).

Kitu analizuotu tyrimu grindžiama, kad žmogaus iškvepiami aerosolio lašeliai, kurių diametras yra maždaug  $1 \mu\text{m}$ , išgaruoja per kelias milisekundes,  $10 \mu\text{m}$  vandens lašai išlaiko tūrį aplinkos ore iki keliasdešimt sekundžių, o dideli  $100 \mu\text{m}$  dydžio lašai gali išgyventi apie minutę [50]. Vidutinio dydžio lašeliai ( $50 \mu\text{m}$  diametro dydžio) jautriausiai reaguoja į aplinkos oro drėgmę, jų nusėdimas vyksta dėl gravitacinių jėgų, turbulentinių sukurių arba difuzinio nusodinimo mechanizmų [50]. Kvėpavimo metu iškvepiamo srauto didžiausi lašeliai, kurie visiškai išgaruoja prieš pasiekdami 2 m horizontalų atstumą nuo šaltinio yra nuo 60 iki  $100 \mu\text{m}$ . 1-3  $\mu\text{m}$  dydžio dalelės kito analizuoto tyrimo metu liko pakibusios ore neribotą laiką, kai tuo metu  $10 \mu\text{m}$  dydžio dalelės pasiekė 3 m horizontalų atstumą nuo šaltinio ir nusėdo iki grindų per 17 min,  $20 \mu\text{m}$  dydžio lašeliai nusėdo per 4 min, o  $100 \mu\text{m}$  dydžio dalelės nusėdo per 10 s [50]. Tyrimė, kai aerosolio lašeliai buvo vertinami optinių dalelių skaitikliu nustatyta, kad dauguma kosulio aerosolio lašelių yra  $2 \mu\text{m}$  dydžio [51].

Pažymėtina, kad šiame skyriuje aptarti kiti analizuoti tyrimai atlikti kitomis eksperimentų vykdymo sąlygomis nei šiame projekte atlikti tyrimai, todėl visi palyginimai skirti tik bendro pobūdžio koreliacijoms ir tendencijoms įvertinti.

### 3.6.3. Rezultatų apibendrinimas

Tyrimų tikslas buvo nustatyti žmogaus iškvepiamo aerozolio lašelių sklaidos uždaroje oro erdvėje parametrus skaičiuojamosios skysčių dinamikos būdu. „Ansys CFX“ SSD programine įranga nustatyti reprezentatyvūs žmogaus iškvepiamo aerozolio greičio įvairiose erdvės taškuose, pasiekto atstumo tiesia trajektorija oro erdvėje ir šių parametrų priklausomybės nuo laiko rezultatai, kai vykdomi kosulio / čiaudulio, kvėpavimo per burną, kvėpavimo per nosį ir kalbėjimo procesai (žr. 8 lentelę). Taip pat ištirta kosulio / čiaudulio metu išskiriančio aerozolio parametrų priklausomybė nuo jų sudarančių lašelių dydžio (žr. 34 pav.), o visi skirtingi žmogaus kvėpavimo takų procesai palyginti tarpusavyje, siekiant įvertinti jų parametrų sąveiką (žr. 35 pav., 36 pav.). Kalbėjimo dėvint veido apsauginį skydelį tyrimu nustatyta, kad žmogaus iškvepiamas aerosolis kalbėjimo metu yra efektyviai sustabdomas apsauginio skydelio, kuris pakeičia aerozolio lašelių srauto trajektoriją ir greitį (žr. 31 pav., 32 pav.).

Eksperimento metu visi skaičiavimai atlikti programiškai keičiant tyrimų sąlygas (įvesties ir išvesties duomenis). Žinoma, kad procesų skirtumus lėmė skirtingi pradiniai greičiai ir aerozolio lašelių diametras (žr. 8 lentelę), tačiau „Ansys CFX“ SSD programine įranga šie skirtumai įvertinti sklaidai vykstant uždaros patalpos ore su standartiniu vienkartinio oro pasikeitimu per valandą. Nustatyti vizualūs žmogaus iškvepiamo aerozolio trajektorijos ir greičio visuose srauto izolinijų taškuose rezultatai. Rezultatų patikimumas užtikrintas „Ansys CFX“ sisteminių parametrų paketu, kurio rezultatų atitikmuo realioms sąlygoms yra patikrintas daugelio tyrimų.

## Išvados

1. Sudarytas žmogaus iškvepiamo aerosolio lašelių sklaidos uždaroje oro erdvėje modelis naudojant „ANSYS CFX“ programinę įrangą. Sklaidos modelyje suprojektuotos uždaros erdvės ribos, stovinčio žmogaus atitiktoms aerosolio sklaidos šaltinis, nustatyti sistemos parametrai įvertinant standartinės 25 °C oro sąlygas.
2. Atlikti žmogaus kosulio / čiaudulio, kvėpavimo per nosį, kvėpavimo per burną ir kalbėjimo metu iškvepiamo aerosolio lašelių sklaidos greičio ir trajektorijos pokyčių oro erdvėje tyrimai. Nustatyta, kad aerosolio lašelių sklaidos greitis oro erdvėje tiesia trajektorija 1,5 m atstumu yra lemiamas kvėpavimo takų veiklos pirminio greičio (1,4-4,5 m/s), o toliau pernešamų lašelių sklaidos greitis išlieka 0,01-0,3 m/s intervale nepriklausomai nuo kvėpavimo takų veiklos pobūdžio. Tai rodo, kad žmogaus iškvepiamo aerosolio lašeliai ~ 4 kartais greičiau atsimuša į priešais esančius paviršius 1,5 m atstumu nuo sklaidos šaltinio nei į toliau esančius paviršius. Šiuo atstumu žmogaus iškvepiami aerosolio lašeliai turi didžiausią kinetinę energiją prisitvirtinti prie kitų paviršių.
3. Apskaičiuoti žmogaus kosulio / čiaudulio, kvėpavimo per nosį, kvėpavimo per burną ir kalbėjimo metu iškvepiamo aerosolio lašelių pernešimo atstumai ir išbuvimo trukmės tiesioje trajektorijoje oro erdvėje. Tiesia trajektorija didžiausią atstumą pasiekia kosulio / čiaudulio metu išskiriami aerosolio lašeliai, o ilgiausiai oro erdvėje išbūna kalbėjimo metu išskirti aerosolio lašeliai. Kosulio / čiaudulio metu iškvepiami aerosolio lašeliai (diametras 3,5 μm) maksimalų 4,0 m atstumą tiesia trajektorija pasiekia per 15,3 s, kai kalbėjimo metu lašelių (diametras 5,5 μm) srautas įveikia maksimalų 3,9 m atstumą per 29,0 s. Kvėpavimo per nosį metu aerosolio lašeliai (diametras 0,8 μm) maksimalų 2,95 m atstumą tiesia trajektorija pasiekia per 22,0 s, o kvėpavimo per burną metu aerosolio lašeliai (diametras 0,8 μm) maksimalų 2,65 m atstumą pasiekia per 21,8 s. Taip pat ištirta kosulio / čiaudulio metu iškvepiamo aerosolio sklaidos parametru priklausomybė nuo jų sudarančių lašelių dydžio. Nustatyta, kad kosulio / čiaudulio metu išskirtas aerosolis, kurį sudarė 3,5 μm diametro lašeliai, pasiekė didžiausią atstumą tiesia trajektorija – 4,0 m, kai aerosolis su 3,0 μm lašeliais – 3,7 m, o aerosolis su 2,5 μm lašeliais – 3,5 m.
4. Įvertintas žmogaus veido apsauginio skydelio efektyvumas stabdant iškvepiamo aerosolio lašelių sklaidą. Nustatyta, kad žmogui kalbant iškvepiamas aerosolis yra efektyviai sustabdomas apsauginio skydelio, kuris pakeičia aerosolio srauto trajektoriją ir sumažina lašelių greitį. Veido apsauginiai skydeliai gali būti naudojami tik trumpos trukmės kontaktų su kitais žmonėmis metu, kadangi jie neatlieka aerosolio sulaikymo ir filtravimo funkcijų, todėl aerosolio lašeliai pasklinda visomis kryptimis aplink skydelį.

## Literatūros sąrašas

1. NADZEIKIENĖ J., „Aplinkos apsaugos inžinerija“, Akademija, 2012.
2. VOILAND ADAM, „Aerosols: Tiny Particles, Big Impact“, November 2, 2010 [žiūrėta 2020–05–08]. Prieiga per internetą: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>.
3. KAHN RALPH, YU HONGBIN, SCHWARTZ S. E., CHIN MIAN, FEINGOLD GRAHAM, REMER LORRAINE, RIND D., HALTHORE N RANGASAYI, DECOLA PHIL L, „Atmospheric Aerosol Properties and Climate Impacts“, 2009 [žiūrėta 2020–05–02]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/255991980\\_Atmospheric\\_Aerosol\\_Properties\\_and\\_Climate\\_Impacts](https://www.researchgate.net/publication/255991980_Atmospheric_Aerosol_Properties_and_Climate_Impacts).
4. BARON PAUL A., KLAUS WILLEKE, „Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications“. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2001.
5. CHANTAL DARQUENNE, OTMAR SCHMID, G KIM PRISK, „Aerosols and the human lung. An introduction“, World Scientific Publishing, ISBN 9789811212185, 2020.
6. ASADI, S., WEXLER, A.S., CAPP, C.D. *et al.* „Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness“ *Sci Rep* 9, 2348 (2019) [žiūrėta 2020–05–16]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>.
7. WATSON A.Y., BATES R.R., KENNEDY D. „Air Pollution, the Automobile, and Public Health“ Washington (DC), National Academies Press (US), 1988.
8. BULIŃSKA ANNA, BULIŃSKI ZBIGNIEW, „A CFD analysis of different human breathing models and its influence on spatial distribution of indoor air parameters“, 2015 by Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences.
9. MARTIN IVANOVA, SERGEY MIJORSKIA, „CFD modelling of flow interaction in the breathing zone of a virtual thermal manikin“, *Energy Procedia*, Volume 112, March 2017 [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217312183>.
10. L. MORAWSKA, G. R. JOHNSON, Z. D. RISTOVSKI, M. HARGREAVES, K. MENGERSEN, S. CORBETT, C. Y. H. CHAO, Y. LI, D. KATOSHEVSKI „Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities“, *Journal of Aerosol Science* Volume 40, Issue 3, March 2009 [žiūrėta 2020–05–28]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.11.002>.
11. S.A. KESHAVARZ, M. SALMANZADEH, G. AHMADI, „Computational modeling of time resolved exposure level analysis of a heated breathing manikin with rotation in a room“, *Journal of Aerosol Science*, Volume 103, January 2017 [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850216302622?via%3Dihub>.
12. JULIAN W. TANG, ANDRE D. NICOLLE, CHRISTIAN A. KLETTNER, JOVAN PANTELIC, LIANGDE WANG, AMIN BIN SUHAIMI, ASHLYNN Y. L. TAN, GARRETT W. X. ONG, RUIKUN SU, CHANDRA SEKHAR, DAVID D. W. CHEONG, AND KWOK WAI THAM, „Airflow Dynamics of Human Jets: Sneezing and Breathing - Potential Sources of Infectious Aerosols“, Tang et al, *PLoS One*. 2013 [žiūrėta 2020–05–28]. Prieiga per internetą: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3613375/>.
13. CHING, J., KAJINO, M., „Aerosol mixing state matters for particles deposition in human respiratory system“, *Sci Rep* 8, 8864 (2018) [žiūrėta 2020–06–03]. Prieiga per internetą: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-27156-z#citeas>.
14. PATRIK EDBLAD, „How to Breathe Properly – A (Surprisingly Important) Complete Guide“, Habits.

15. ZHE ZHANG, CLEMENT KLEINSTREUER, CHONG S. KIM, „Comparison of analytical and CFD models with regard to micron particle deposition in a human 16-generation tracheobronchial airway model“, *Aerosol Science* 40 (2009) 16 – 28 [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <http://calliope.dem.uniud.it/CLASS/TRASP-BIO/tracheo2.pdf>.
16. P.G. KOULLAPIS, F.S. STYLIANOU, J. SZNITMAN, B. OLSSON, S.C. KASSINOS, „Towards whole-lung simulations of aerosol deposition: A model of the deep lung“, *Journal of Aerosol Science*, Volume 144, June 2020, 105541 [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850220300306?via%3Dihub>.
17. MORAWSKA L., „Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection?“, June 2006 [žiūrėta 2020–06–02]. Prieiga per internetą: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1600-0668.2006.00432.x>.
18. NIELS GRASMEIJER, HENDERIK W. FRIJLINK, WOUTER L.J. HINRICHES, „An adaptable model for growth and/or shrinkage of droplets in the respiratory tract during inhalation of aqueous particles“, *Journal of Aerosol Science*, Volume 93, March 2016 [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002185021500186X?via%3Dihub>.
19. VÂNIA MARTINS, MARÍA CRUZ MINGUILLÓN, TERESA MORENO, XAVIER QUEROL, ELADIO DE MIGUEL, MARTA CAPDEVILA, SONIA CENTELLES, MIHALIS LAZARIDIS, „Deposition of aerosol particles from a subway microenvironment in the human respiratory tract“, *Journal of Aerosol Science*, Elsevier, 2015 [žiūrėta 2020–05–16]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.08.008>.
20. KULKARNI P., BARON P. A., WILLEKE K., „Aerosol measurement: principles, techniques, and applications“, 2011.
21. BOUROUBA L., „Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19“, *JAMA*. 2020. [žiūrėta 2020–06–02]. Prieiga per internetą: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2763852>.
22. WHALLEY JACQUELINE, ZANDI SARA, „Particulate Matter Sampling Techniques and Data Modelling Methods“, 2016 [žiūrėta 2020–05–02]. Prieiga per internetą: <https://www.intechopen.com/books/air-quality-measurement-and-modeling/particulate-matter-sampling-techniques-and-data-modelling-methods>.
23. M. PAN J.A. LEDNICKY C.-Y. WU, „Collection, particle sizing and detection of airborne viruses“, 11 April 2019, *Journal of Applied Microbiology* ISSN 1364-5072 [žiūrėta 2020–06–03]. Prieiga per internetą: <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jam.14278>.
24. ROMUALD VERJUS, ALINA SANTA CRUZ, ABDULKADER ZALT, JEAN-RÉGIS ANGILELLA, „Capture and long-term suspension of aerosols in an open cavity flow“, *Journal of Aerosol Science*, Volume 93, March 2016 [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850215001834?via%3Dihub>.
25. K. ARDON-DRYER, Y.-W. HUANG, AND D. J. CZICZO, „Laboratory studies of collection efficiency of sub-micrometer aerosol particles by cloud droplets on a single-droplet basis“, Dept. of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 19 August 2015 [žiūrėta 2020–06–04]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/281096418\\_Laboratory\\_studies\\_of\\_collection\\_efficiency\\_of\\_sub-micrometer\\_aerosol\\_particles\\_by\\_cloud\\_droplets\\_on\\_a\\_single-droplet\\_basis](https://www.researchgate.net/publication/281096418_Laboratory_studies_of_collection_efficiency_of_sub-micrometer_aerosol_particles_by_cloud_droplets_on_a_single-droplet_basis).
26. ALEXIS DÉPÉE, PASCAL LEMAITRE, THOMAS GELAIN, ANNE MATHIEU, MARIE MONIER, ANDREA FLOSSMANN, „Theoretical study of aerosol particle electroscavenging by

- clouds“, Journal of Aerosol Science, Volume 135, September 2019 [žiūrėta 2020–06–04]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850218304609>.
27. KULKARNI PRAMOD, BARON PAUL A., WILLEKE KLAUS „Aerosol measurement principles, techniques and application“.
  28. KUZMIN DMITRI, „Introduction to Computational Fluid Dynamics“, Institute of Applied Mathematics University of Dortmund [žiūrėta 2020–06–07]. Prieiga per internetą: <https://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf>.
  29. JIYUAN TU, GUAN HENG YEOH, CHAOQUN LIU, „Computational Fluid Dynamics – A Practical Approach“, third edition, 2018 Elsevier LTD, ISBN: 978–0–08–101127–0.
  30. T. J. CHUNG, „Computational Fluid Dynamics“, Second edition, Cambridge University Press, 2010.
  31. PAUL J. LANASA, E. LOY UPP, „Fluid Flow Measurement/A Practical Guide to Accurate Flow Measurement“ 3rd Edition, 2014.
  32. BARTELS STEFAN, „Interactive Simulations with Navier-Stokes Equations on many-core Architectures“, Interdisciplinary Project, Chair of Scientific Computing Technische Universitat Munchen, Germany [žiūrėta 2020–06–03]. Prieiga per internetą: [https://www5.in.tum.de/pub/bartels\\_idp\\_14.pdf](https://www5.in.tum.de/pub/bartels_idp_14.pdf).
  33. ŠIKŠNYS A., „Hidraulikos laboratoriniai darbai. 1 dalis. Hidrostatika ir hidrodinamikos pagrindai. Metodiniai patarimai“, Lietuvos žemės ūkio universitetas, Kaunas, Ardiva, 2008, ISBN 978–9955–896–41–8.
  34. YINGJIE TANG, BING GUO, „Computational fluid dynamics simulation of aerosol transport and deposition“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011 [žiūrėta 2020–06–04]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/225178258\\_Computational\\_fluid\\_dynamics\\_simulation\\_of\\_aerosol\\_transport\\_and\\_deposition](https://www.researchgate.net/publication/225178258_Computational_fluid_dynamics_simulation_of_aerosol_transport_and_deposition).
  35. YINGJIE TANG, „COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS STUDY OF AEROSOL TRANSPORT AND DEPOSITION MECHANISMS“, A Dissertation submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY, May 2012 [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://core.ac.uk/download/pdf/9069434.pdf>.
  36. HAMIDEH POURHASHEM, MICHAEL P. OWEN, NICOLAS D. CASTRO, ALI A. ROSTAMI, „Eulerian modeling of aerosol transport and deposition in respiratory tract under thermodynamic equilibrium condition“, Journal of Aerosol Science, Volume 141, March 2020, 105501 [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850219306056?via%3Dihub>.
  37. „ANSYS CFX/COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) SOFTWARE PROGRAM SOLUTIONS“, 2020 ANSYS, Inc. [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>.
  38. „ANSYS CFX FEATURES“, 2020 ANSYS, Inc. [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx/ansys-cfx-features>.
  39. „ANSYS CFX Reference Guide“, ANSYS, Inc., Southpointe, 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, November 2013 [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://itrss.mst.edu/media/informationtechnology/itrss/documents/ansysdocs/ANSYS%20CFX%20Reference%20Guide.pdf>.
  40. HARRISON S.SANTANA, ADRIANO G.P.DA SILVA, MARIANA G.M.LOPES, ALAN C.RODRIGUES, OSVALDIR P. TARANTO, JOÃO LAMEU SILVA JR., „Computational

- methodology for the development of microdevices and microreactors with ANSYS CFX“, MethodsX, Volume 7, 2020, 100765 [žiūrėta 2020–06–08]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016119303413>.
41. ZHANG, WANYI ZHANG, ZHONGPING LIN, „Particle motion simulation for an office room with an electric heater worked based on the emission intensities estimation for particle sources“, The 16th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate COEX, Seoul, Korea | November 1 - 5, 2020.
  42. ACHARYA RUTVIKA „Investigation of Differences in Ansys Solvers CFX and Fluent“, Royal Institute of Technology, KTH Stockholm, June 2016 [žiūrėta 2021–04–27]. Prieiga per internetą: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1083080/FULLTEXT01.pdf>
  43. XIONG MEI, GUANGCAI GONG, „Estimating distributions of airborne contaminants released by sources with dynamic strength and dynamic location by a probabilistic model“, Building and Environment, Volume 153, 15 April 2019 [žiūrėta 2020–10–12]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036013231930109X?via%3Dihub>
  44. SCHEUCH GERHARD, „Breathing Is Enough: For the Spread of Influenza Virus and SARS-CoV-2 by Breathing Only“, JOURNAL OF AEROSOL MEDICINE AND PULMONARY DRUG DELIVERY, Volume 33, Number 4, 2020 [žiūrėta 2021–03–21]. Prieiga per internetą: <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/jamp.2020.1616>
  45. JI YICHEN, QIAN HUA, YE JIN, ZHENG XIAOHONG, „The impact of ambient humidity on the evaporation and dispersion of exhaled breathing droplets: A numerical investigation“, Journal of Aerosol Science, Volume 115, January 2018 [žiūrėta 2021–03–22]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.10.009Scs>
  46. QIAN HUA, ZHENG XIAOHONG, „Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings“, Journal of Thoracic Disease (Influenza and Other Respiratory Viruses) Vol 10, Supplement 19 (July 2018) [žiūrėta 2021–03–21]. Prieiga per internetą: [https://jtd.amegroups.com/article/view/18723/html\\_1](https://jtd.amegroups.com/article/view/18723/html_1)
  47. DBOUKA TALIB, DRIKAKIS DIMITRIS, „On coughing and airborne droplet transmission to humans“, Physics of Fluids 32, 053310 2020 ) [žiūrėta 2021–03–22]. Prieiga per internetą: <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/5.0011960>
  48. LIU L., WEI J., LI Y., OOI A., „Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing“, Indoor Air, Jan 27 2017 [žiūrėta 2021–03–22]. Prieiga per internetą: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26945674/>
  49. PRINGLE JUSTIN, „Understanding fluid mechanics is crucial to stopping the spread of the virus“, World Economic Forum, 17 Jul 2020 [žiūrėta 2021–03–22]. Prieiga per internetą: <https://www.weforum.org/agenda/2020/07/fluid-mechanics-covid19/>
  50. WEI JIANJIAN, LI YUGUO, „Airborne spread of infectious agents in the indoor environment“, American Journal of Infection Control, Volume 44, Issue 9, Supplement, 2 September 2016 [žiūrėta 2021–03–22]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2016.06.003>
  51. SIMHA PADMANABHA PRASANNA, RAO PRASANNA SIMHA MOHAN, „Universal trends in human cough airflows at large distances“, Phys. Fluids 32, 081905 2020 [žiūrėta 2021–03–22]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1063/5.0021666>