



VPP

Valsts pētījumu
programma



Projekts Nr. VPP-COVID-2020/1-0025

**Jaunās tehnoloģijas Covid-19 pacientu tēmētai monitorēšanai, testēšanai
un terapijai (3-T Project)**

Projekta papildu (specifiskie) rezultāti Nr.17

**Skaitliskais modelis COVID-19 infekcijas riska
prognozēšanai telpās**

Tehnoloģijas apraksts

3. pielikums

Autori:

J. Virbulis, M. Surovovs, M. Sjomkāne u.c.

Rīga, 2021

Satura radītājs

Ievads	3
Skaitliskā modeļa parametrizēšanā izmantotās literatūras apskats	3
Izdalītais gaisa apjoms	3
Pilienu izmēra sadalījums	4
Vīrusa koncentrācija	6
Temperatūras un gaisa relatīvā mitruma ietekme	7
Matemātiskais modelis.....	9
Pārskats	9
Modeļa telpas raksturojums	9
Vīriņu avoti	9
Pilienu iztvaikošana	10
Sedimentācija un difūzija.....	10
Nogulsnešanās jeb sedimentācija uz sienām.....	11
Ventilācija.....	11
Dzīvotspējas korekcija.....	11
Ieelpošana	12
Riska funkcija	12
Modeļa mijiedarbība ar mērījumu sistēmu	12
Ievads.....	12
Mijiedarbība ar modeļa serveri	13
Mijiedarbība ar modeli.....	14
Rezultāti.....	15
Parametru pētījumi vienkāršiem scenārijiem.....	15
Riska funkcijas aprēķins reālajai mērījumu sistēmai	18
Kopsavilkums	20
Atsauces	21

Ievads

Inficēšanās ar SARS-CoV-2 notiek ne tikai tiešā gaisa-pilienu ceļā vai kontaktā ar piesārņotām virsmām, bet iekštelpās nozīmīgs ir arī aerosola transports. Izstrādātais skaitliskais modelis novērtē COVID-19 infekcijas risku noteiktā telpā, pamatojoties uz lokālas zemu izmaksu sensoru sistēmas [1] veiktajiem temperatūras, mitruma, CO₂ un daļiņu koncentrācijas mērījumiem, cilvēku skaitu un sarunu, klepus un šķaudīšanas biežumu telpā. Modelis spēj dinamiski nodot šo informāciju atpakaļ mērīšanas sistēmai vai ēkas vadības sistēmai.

Modelis ir nedalāms un ņem vērā simulēto mainīgo lielumu vidējās vērtības. Tomēr pilienu un aerosola daļiņu koncentrācijai ir neviendabīgs vertikālais sadalījums. Sekrēta pilienu, kurus potenciāli infekciozs cilvēks izdala noteiktā augstumā elpojot, runājot, klepojot un šķaudot, raksturo kopējais izvadītā šķidrums daudzums, pilienu lieluma sadalījums un vīrusa daļiņu (virionu) koncentrācija. Pilienu iztvaikošanas ātrums ir atkarīgs no temperatūras un relatīvā gaisa mitruma (RH). Turbulentā difūzija un gravitācijas spēks vertikāli pārdala pilienu telpā. Ja galīgais pilienu diametrs ir < 5 μm, tad uzskata, ka tie spēj izplatīties gaisa pārnesei ceļā, turklāt var atstāt telpu tikai ar ventilācijas palīdzību vai nogulsņējoties uz virsmām Brauna difūzijas ceļā caur lamināro robežslāni. Kad persona, kas atrodas telpā, ieelpo šos pilienu un aerosolu, infekcijas risks paaugstinās, palielinoties absorbēto virionu skaitam. Absorbējot 300 virionus, infekcijas varbūtība ir 50% [2].

Modelis tiek realizēts kā programmatūras risinājums, kas integrēts telpā uzstādītajā mērīšanas sistēmā. Datu apmaiņai starp modeli un mērījumu sistēmu ir izstrādāts *MQTT* protokols. Protokols mijiedarbībā ar serveri var uzsākt un apturēt modeļa vērtības (*model instances*) atlasītajiem modeļa mērījumu mainīgo pāriem.

Skaitliskā modeļa parametrizēšanā izmantotās literatūras apskats

Lai novērtētu risku inficēties ar COVID-19 iekštelpās, mēs apskatījām dažādu nozaru pētījumus, salīdzinājām informāciju no daudziem rakstiem un secinājām, kādus parametrus vislabāk iekļaut mūsu modelī, lai noteiktu infekcijas risku pēc konkrētu mērījumu kopuma, piemēram, temperatūras, mitruma, CO₂ un daļiņu koncentrācijas, cilvēku skaita telpā un runāšanas, klepus un šķaudīšanas notikumiem.

Izdalītais gaisa apjoms

Dažādu aktivitāšu laikā, piemēram, elpojot, runājot, klepojot vai šķaudot, tiek izdalīts atšķirīgs gaisa apjoms, turklāt dažādiem cilvēkiem tas būtiski atšķiras [4]. Ir veikti daudzi pētījumi, lai noteiktu daļiņu koncentrāciju izdalītajā gaisā [5, 6, 7]. Lai noteiktu kopējo izdalīto pilienu tilpumu, ir jānosaka arī kopējais izdalītā gaisa tilpums.

S. Chaudhuri et al. [5] COVID-19 pētījuma ietvaros modelēja pilienu sadalījumu gaisā un konstatēja, ka pilienu koncentrācija šķaudot ir 59 ppm, klepojot - 549 ppm, bet skaļi runājot - 263 ppm. Tika pieņemts, ka vienā izelpā cilvēks izelpo vidēji 0,5 litrus gaisa. Izelpu skaits minūtē mainās, bet vidēji ir no 10 līdz 18 izelpām, kas nozīmē, ka cilvēks minūtē izelpo vidēji 5 līdz 9 litrus gaisa. Šķaudīšanas laikā pilienu tiek izplatīti ar ātrumu 50 m/s, runāšanas laikā - 3 m/s. [6]



P. Fabian et al. pētījumā [7] tika ierosināts, ka kopējais 3,53 sekundēs izelpoto pilienu tilpums ir $2.49 \times 10^{-11} m^3$, bet klepošanas gadījumā jau 6.7×10^{-11} . Identiskam laika ilgumam *Gerone et al.* pētījumā [8] tika pierādīts, ka kopējais pilienu tilpums klepojot ir $2.0 \times 10^{-13} m^3$ un šķaudot - $5.9 \times 10^{-13} m^3$. *J.F. Duguid* [9] demonstrē, ka pilienu tilpums šķaudot ir $5.5 \times 10^{-7} m^3$, klepojot - $7.5 \times 10^{-9} m^3$ un runājot - $9.6 \times 10^{-12} m^3$. *K.G. Jitendra et al.* [10] minēja $7.5 \times 10^{-11} m^3$ tilpumu klepojot, $3.7 \times 10^{-12} m^3$ runājot un $4.0 \times 10 m^3$ šķaudot.

Tā kā izdalīto pilienu kopējā tilpuma vērtības mainās atkarībā no dažādām pētījumu metodēm un paraugu izmēriem, šajā modelī tiks izmantotas *J. F. Duguid* pētījumā [9] minētās vērtības.

Pilienu izmēra sadalījums

Kad ir zināms vidēja cilvēka kopējais izdalīto pilienu tilpums, ir ļoti svarīgi aplūkot šo pilienu izmēra sadalījumu, jo atkarībā no piliena diametra tas vai nu nosēdīsies uz virsmām vai sienām, vai pārvērtīsies aerosolā, kas atradīsies gaisā pat vairākas stundas.

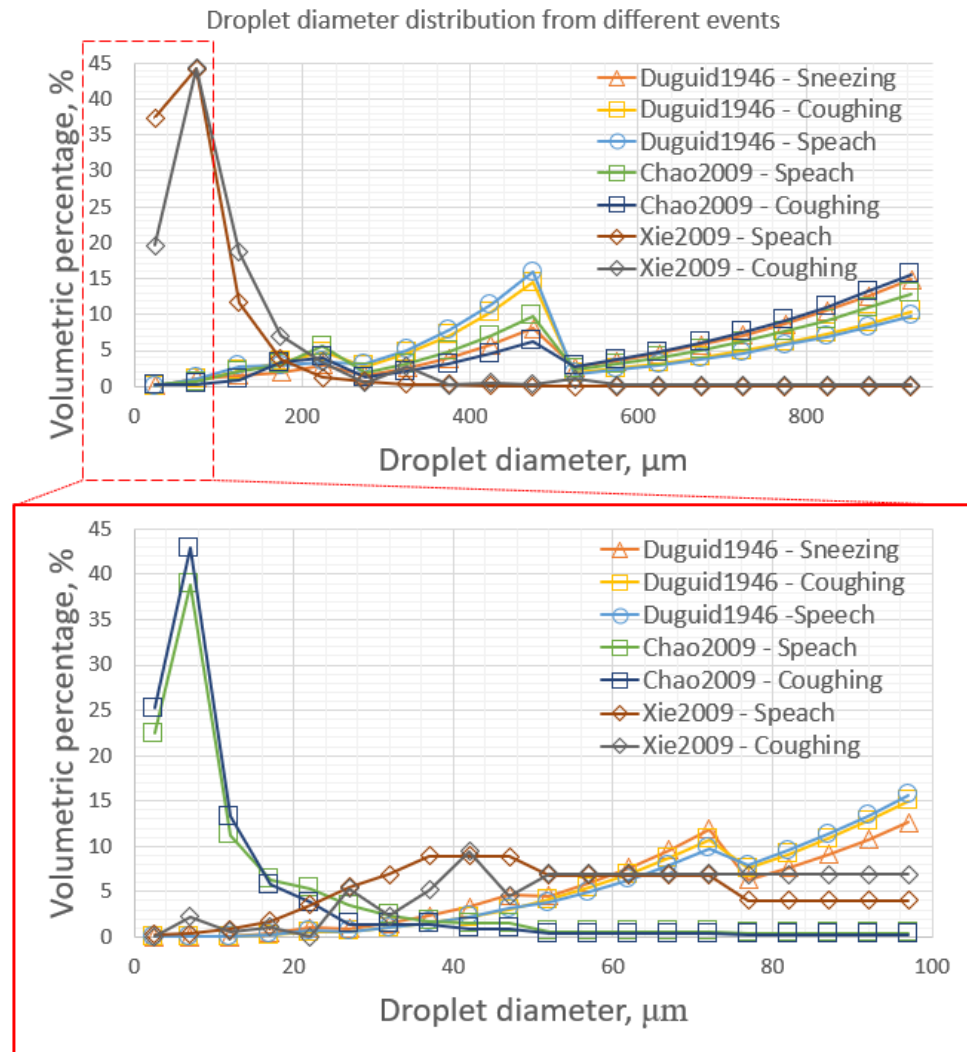
C.Y.H. Chao et al. [11] izmantoja interferometrisko metodi un atklāja, ka klepus laikā izdalīto pilienu vidējais ģeometriskais diametrs bija 13,5 μm, bet runāšanas laikā (skaitot no 1 – 100) izdalīto pilienu diametrs bija 16,0 μm. Kopējais izdalīto pilienu skaits svārstījās no 947 līdz 2085 vienā klepošanas epizodē un no 112 - 6720 vienā runāšanas epizodē. Pilienu koncentrācija klepus laikā bija robežās no 2,4 līdz 5,2 cm⁻³ un runāšanas laikā no 0,004 – 0,223 cm⁻³.

X. Xie et al. [12] eksperimentālajā pētījumā piedalījās 7 dalībnieki. Pētījumā salīdzināja pilienu koncentrāciju un to izmēra sadalījumu klepus un šķaudīšanas gadījumā. Tika konstatēts, ka pilienu biežākais diametrs abu darbību rezultātā ir robežās no 35 līdz 100 μm. Tas ir salīdzināms ar konkrēto darbību radīto pilienu biežāko diametru *Duguid et al.* pētījumā [9], kur tika konstatēts, ka diametrs ir robežās no 15 līdz 25 μm, un *Loudon et al.* pētījumā [13], kur diametrs tika noteikts robežās no 22 līdz 73 μm.

Y. Shinhao et al. [14] eksperimentāli noteica, ka klepus gadījumā vidējais pilienu diametrs ir 0.58 – 5.42 μm, turklāt 82% pilienu bija izmēru diapazonā no 0.74 – 2.12 μm, pilienu izmēra kopējais intervāls bija 0.58 – 15.9 μm; tika noteikta arī vidējā gaisa plūsma klepojot, kas bija 0,47 litri sekundē, un pilienu koncentrācija, kas bija vienāda ar 586 pilienu uz cm³.

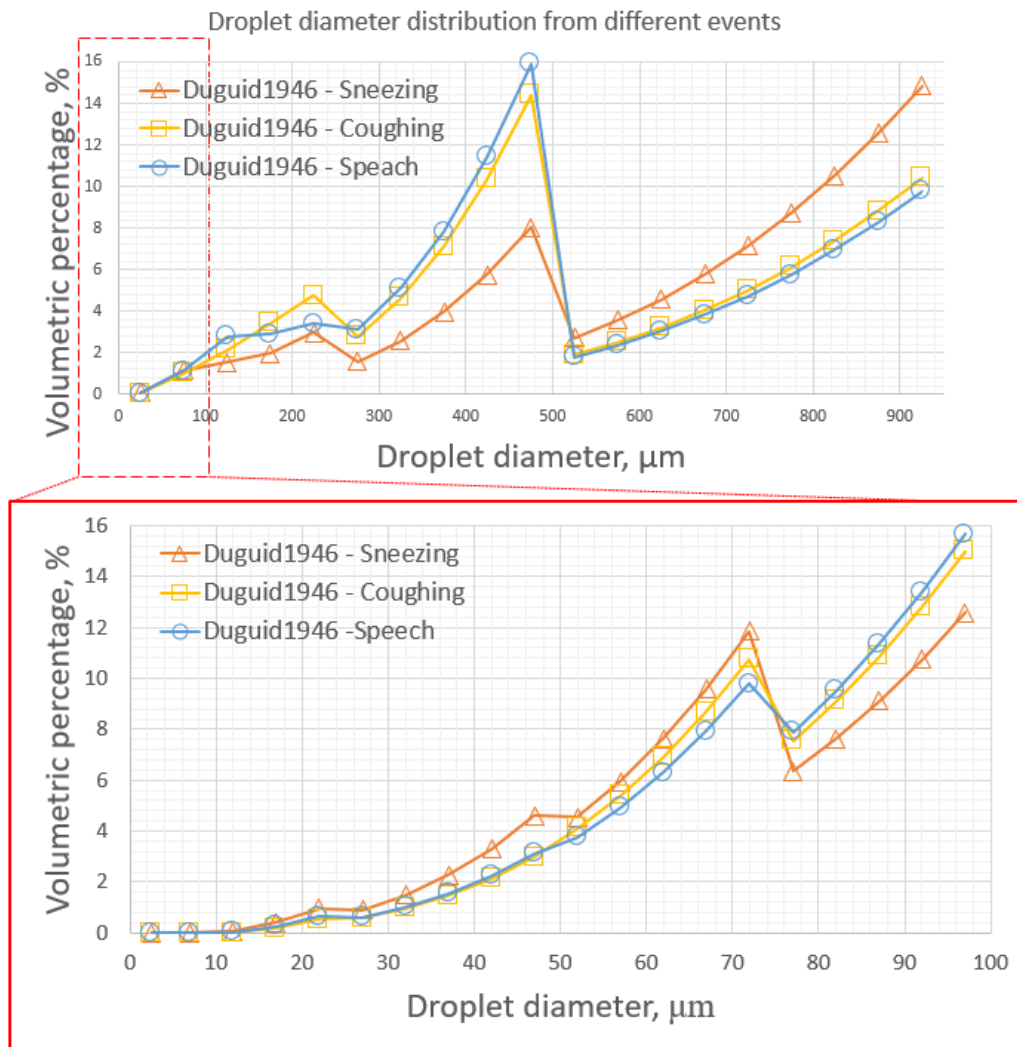
P. Fabian et al. [7] salīdzināja izelpoto pilienu koncentrāciju 3 veseliem pacientiem un 16 pacientiem ar cilvēka rinovīrusa infekciju. Tika konstatēts, ka pacienti ar elpceļu infekciju simptomiem izelpoja apmēram 32 pilienu/litrā gaisa. 82% šo pilienu bija diametra diapazonā no 0.300 – 0.499 μm. Šķaudot lielākā daļa pilienu iekļaujas diametra diapazonā no 341.5 – 398.1 μm, bet vidējais aprēķinātais diametrs bija 74,4 μm. [15]

Apkopojot minēto, var secināt, ka cilvēki izdala pilienu, kuru izmērs ir robežās no 0.25 μm līdz 1000 μm. Izmērs, kā arī kopējais tilpums ir atkarīgs no tā, kā šie pilieni tiek izvadīti. Tāpat kā pētījumos par izdalīto pilienu kopējo tilpumu, arī pilienu sadalījumi ir ļoti atšķirīgi, jo noteiktā diametra diapazonā tika izmantotas dažādas pilienu skaita noteikšanas metodes. Mēs salīdzinājām vairākus pilienu diametra sadalījumus, un rezultāti ir apkopoti 1. un 2. attēlā.



1. att.: Salīdzinājums pilienu izmēra sadalījumam pēc tilpuma dažādām pilienu izdalīšanas darbībām. Ir izmantotas dažādas pilienu diametra skalas. Augšējā diagrammā ir parādīts standartizēts tilpuma procents pilienu diametra diapazonā no 0 līdz 1000 μm. Apakšējā grafikā redzams diametra sadalījums diapazonā no 0 līdz 100 μm. [9, 11, 12]

1. attēlā ir redzams, ka sadalījumi dažādu pētījumu rakstos ir ļoti atšķirīgi. Tas ir galvenokārt tāpēc, ka katrā pētījumā ir maz dalībnieku un sadalījuma noteikšanai izmantotas atšķirīgas metodes. Modelī tiek izmantots [9] aprakstītais daļiņu sadalījums (skat. 2. attēlu).



2. att.: Salīdzinājums pilienu izmēra sadalījumam pēc tilpuma dažādām pilienu izdalīšanas darbībām. Ir izmantotas dažādas pilienu diametra skalas. Augšējā diagrammā ir parādīts standartizēts tilpuma procents pilieniem diametra diapazonā no 0 līdz 1000 μm. Apakšējā grafikā redzams diametra sadalījums diapazonā no 0 līdz 100 μm. [9]

Vīrusa koncentrācija

Vīrusa koncentrācija dažādos avotos atšķiras (no 10^4 līdz 10^6 kā vidējā koncentrācija mRNS/ml). Šis skaits mainās arī atkarībā no dienu skaita, cik sen persona ir inficējusies, proti, ir robežās no 10^2 līdz 10^{11} . [16, 2, 17] Inficētai personai vienā sekrēta pilienā ir vidēji $10^{5.4} = 251'188$ RNA/ml vīrusa [2]; infekcijas sākuma fāzē šis skaitlis ir lielāks.

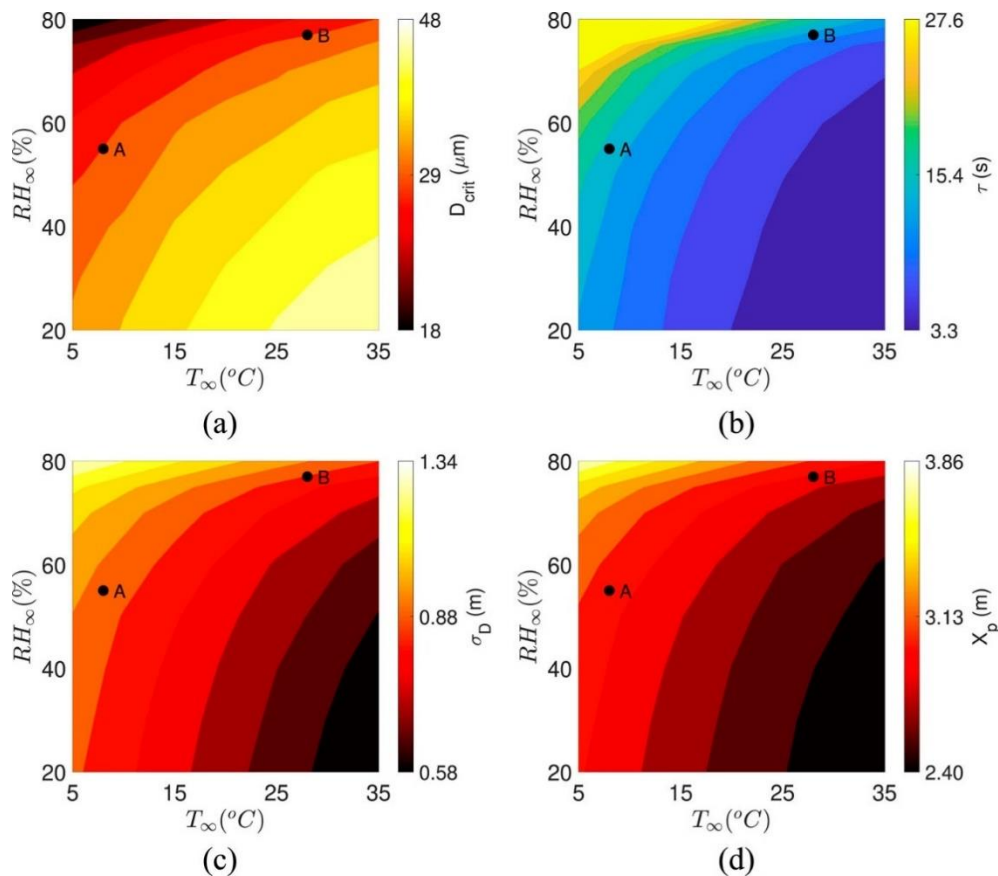
Lai riska funkcija, kas aprakstīta modeļa aprakstā, būtu precīza, mums bija jānovērtē vidējā infekciozā deva ID_{50} , kas raksturo vīrusu skaitu, kas nepieciešams, lai ar SARS-CoV-2 inficētu 50% parauga populācijas. S. Basu [2] veica pilienu nazofaringeālas pārnesšanas un ieelpošanas skaitlisku simulāciju un atklāja, ka parasta augšējā COVID-19 infekcijas deva ir 300. S. Karimzadesh et al. [18] pētījumos ar dzīvniekiem šis skaitlis tika aplūkots kontekstā ar citiem līdzīgiem vīrusiem un SARS-CoV-2 infekciozās devas testiem. Šo pētījumu aprakstošajā rakstā tika secināts, ka SARS-CoV-2 infekciozā



deva ir nedaudz lielāka nekā SARS-CoV-1 un mazāka nekā MERS. Modelēšanas pētījumā [2] konstatētā infekciozo devu secība atbilst šim rezultātam.

Temperatūras un gaisa relatīvā mitruma ietekme

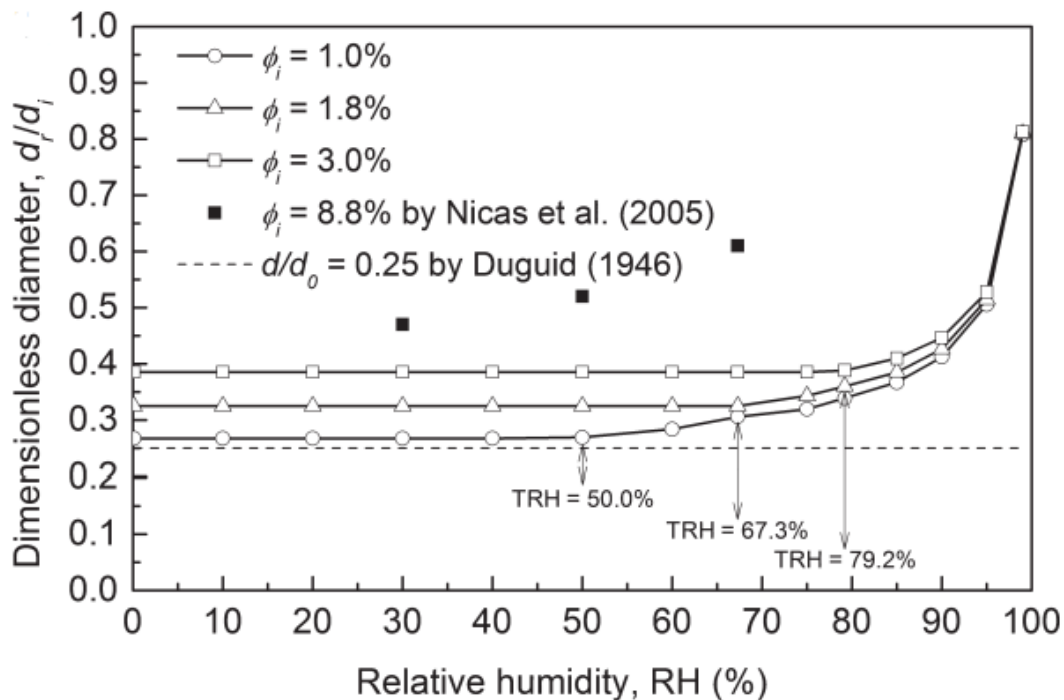
S. Chauduri et al. [5] skaitliskā modeļa pētījuma rezultāti parāda, ka iztvaikošanas laiks ir atkarīgs no relatīvā gaisa mitruma un temperatūras, kā arī ir atšķirīgs dažādiem pilieņu izmēriem (skat. 3. attēlu). 3. (a) attēlā var redzēt, ka augstas temperatūras un zema relatīvā gaisa mitruma apstākļos pat lieli pilieni iztvaiko ātri. Pretējos apstākļos – pie zemas temperatūras un augsta relatīvā gaisa mitruma, kritiskais pilieņu diametrs ir liels. 3. (b) attēlā ir redzams, ka augstas temperatūras un zema relatīvā gaisa mitruma apstākļos pilieņu mūža ilgums ir visīsākais. 3. (c) attēlā ir redzama sakarība - jo lielāks pilieņa mūža ilgums, jo lielāku attālumu tas spēj veikt un jo lielāks pilieņu mākonis veidojas (skat. 3. (d) att.). Apvienojot šos rezultātus, mēs varam secināt, ka zema temperatūra un augsts relatīvais gaisa mitrums pagarina pilieņu mūža ilgumu.



3. att.: Temperatūras un relatīvā gaisa mitruma ietekme uz pilieņu raksturlielumiem: (a) D_{crit} – kritiskais diametrs. Pilieni, kas ir mazāki par kritisko diametru, iztvaiko, bet pilieni, kas ir lielāki par kritisko diametru, nosēžas uz virsmām. Pilieni, kas ir vienādi ar kritisko diametru, vislabāk pārnēsā vīrusu. (b) attēlā redzams kritiskā diametra pilieņu iztvaikošanas laiks. (c) attēlā redzams aksiālais izplatīšanās attālums X_p vai minimālais fiziskais attālums starp cilvēkiem šajos apstākļos. (d) attēlā redzams pilieņu mākoņa izmērs - attālums, kuru pilieņš var veikt dažādos vides apstākļos. A gadījumā $T = 8^{\circ}C, RH = 55\%$, B gadījumā $T = 28^{\circ}C, RH = 77\%$. [5]

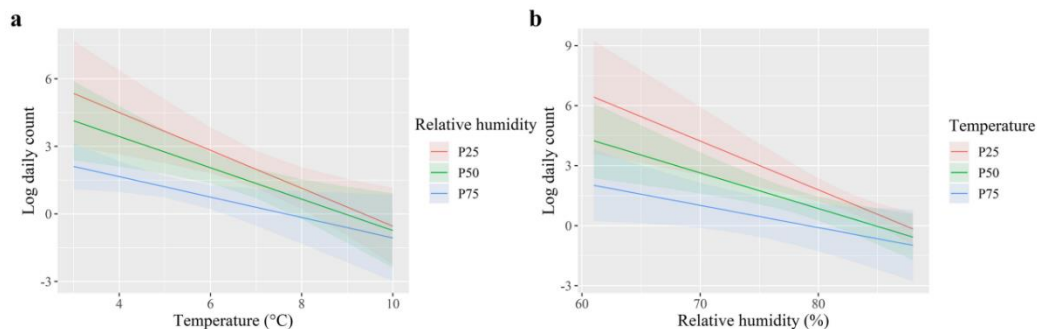


L. Lui et al. [19] izstrādāja teorētisko modeli, lai prognozētu relatīvā gaisa mitruma ietekmi uz pilienu diametru un iztvaikošanu. Tas atbilst iepriekš aprakstītajam daļiņu izmēra sadalījumam un skaitliskajam modelim [5].



4. att.: Pilienu atlikušā izmēra bezdimensionālais diametrs. Atlikušā izmēra atkarība no daļiņu sākotnējās tilpuma attiecības Φ_i ($c_i = 0,9\%$). TRH - relatīvā gaisa mitruma sliekšnis (threshold relative humidity). [7]

S. Chauduri et al. [5] secinājumi atbilst empīriskiem novērojumiem. Hongchao Qi et al. pētījumā [20] tika aplūkoti laikapstākļi un analizēta to ietekme uz jaunu infekciju skaitu noteiktā laika periodā kādā Ķīnas provincē. Tika secināts, ka relatīvā gaisa mitruma diapazonā no 67% līdz 85,5%, temperatūrai paaugstinoties par 1 grādu pēc Celsija, infekciju skaits samazinājās par 36% līdz 57%. Ja relatīvais gaisa mitrums palielinās par 1%, infekciju skaits samazinās par 11% līdz 22%, ja gaisa temperatūras intervāls ir 5,04 līdz 8.20°C.



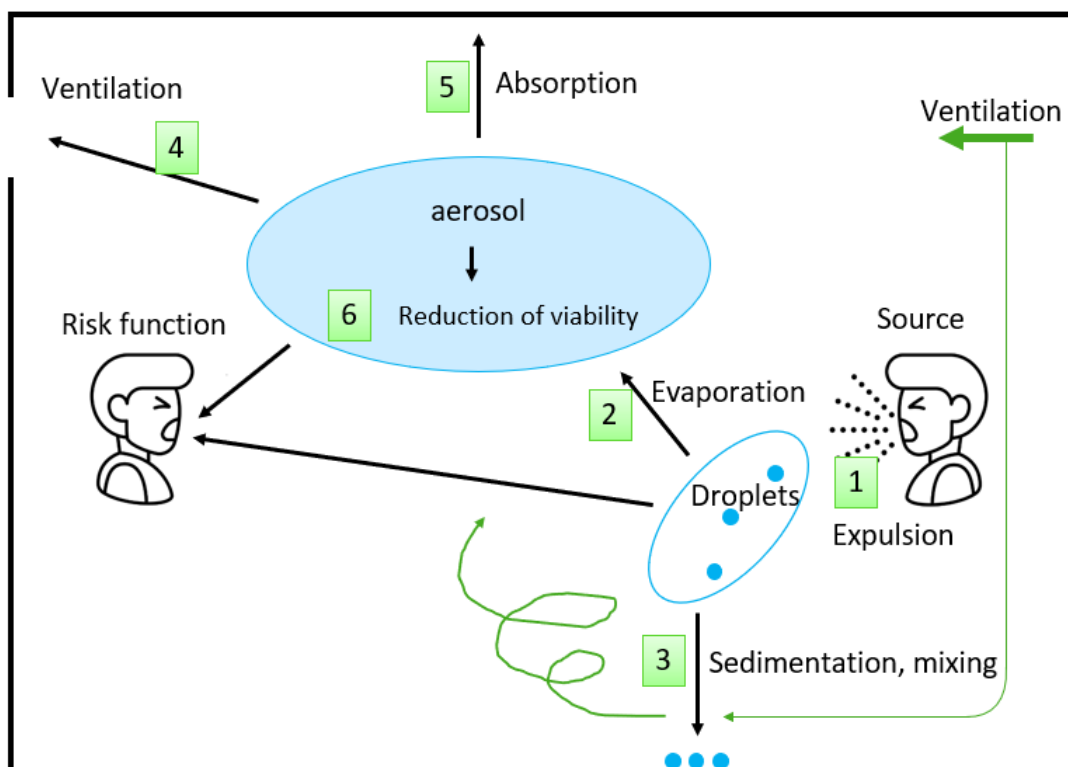
5. att.: Relatīvā gaisa mitruma un temperatūras ietekme uz jaunu infekciju skaitu [20].



Matemātiskais modelis

Pārskats

Modelis izmanto sensoru datus, lai novērtētu infekcijas risku personai, kas atrodas telpā. Galvenie aplūkoto vīrusu pārvešanas procesi ir parādīti 6. attēlā. Izdalītie pilieni (1) zaudē masu iztvaikošanas ceļā (2) un/vai nosēžas kā depozi (3) uz grīdas. Sīkas daļiņas veido aerosolu, kas ilgstoši spēj izplatīties bez sedimentācijas. Virioni aerosolā tiek izvadīti no telpas ar ventilāciju (4), daļēji absorbēti uz virsmām (5) un zaudē dzīvotspēju (6).



6. att. Modelī aplūkoto procesu shematisks attēlojums.

Modeļa telpas raksturojums

Telpai ir zināms garums, platums un augstums. Vidējās temperatūras T un relatīvā gaisa mitruma RH vērtības tiek ņemtas no mērījumu sistēmas. Ventilācijas intensitāti kontrolē pēc nepieciešamības. Telpu raksturo arī pēc kopējās CO_2 masas, sīko aerosola daļiņu (pilienu) daudzuma gaisā, kopējā virionu skaita aerosola daļiņās un uz virsmām (galvenokārt uz grīdas). Sedimentācijas, iztvaikošanas un transporta aprēķinos ņem vērā arī lielo pilienu skaitu un izmēru sadalījumu gaisā.

Virionu avoti

Vīrusu telpā ievada inficēta persona sekrēta pilienu veidā, kas izdalās elpošanas, runāšanas, klepus un šķaudīšanas laikā. Katru notikumu raksturo ar noteiktu sekrēta tilpuma izdalīšanos pilienu veidā, kuru rādiuss svārstās no $1,25 \mu m$ līdz $500 \mu m$. Izdalītie pilieni sākotnēji izplatās 9 cm platā slānī aptuveni 1,2 m augstumā virs grīdas - tas atbilst cilvēka novietojumam sēdus (visticamākā pozīcija aplūkotajiem telpu veidiem). Tiek pieņemts, ka pilienu skaita blīvums mainās tikai vertikālā virzienā, jo precīzas cilvēku un inficēto personu pozīcijas *a priori* nav zināmas.



Tiek pieņemts, ka vidējā COVID-19 koncentrācija sekrētā ir $10^{5.4}$ RNA/ml. 20% no inficētajām personām pārnēsā vairāk nekā 10^7 RNA/ml un 5% no inficētajām personām pārnēsā $> 10^8$ RNA/ml [16].

Pilienu iztvaikošana

Vissvarīgākais izdalīto pilienu process ir iztvaikošana. Pilienu iztvaikošana tiek aprēķināta pēc Chaudhuri [5] aprakstītā. Tiek aplūkotas šādas materiāla īpašības: ūdens blīvums, ūdens siltumietilpība, gaisa īpatnējā siltumvadītspēja, temperatūras vadītspēja gaisā, iztvaikošanas apslēptais siltums, ūdens tvaiku difūzija gaisā, gaisa relatīvais mitrums un gaisa temperatūra, pilienu sākotnējā temperatūra.

Iztvaikošanas masas plūsmai ir divi komponenti:

$$\frac{dm_1}{dt} = -4\pi\rho_v D_v R_s \ln(1 + B_M)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = -4\pi\rho_v \alpha_g R_s \ln(1 + B_T)$$

B_M un B_T ir Spaldinga masas (*Spalding mass*) un siltumpārneses skaitļi

$$B_M = \frac{Y_{1,s} - Y_{1,\infty}}{1 - Y_{1,s}}$$

$$B_T = \frac{C_{p,l}}{h_{fg}} \cdot (T_s - T_\infty)$$

Enerģijas bilanci regulē pēc formulas

$$m c_{p,l} \frac{\partial T_s}{\partial t} = -k_g A_s \frac{\partial T}{\partial r} + h_{fg} \frac{dm_1}{dt} - e_l \frac{dm_2}{dt}$$

Pilienu izmēra un temperatūras izmaiņas laikā tiek aprēķinātas skaitliski, līdz tiek sasniegts minimālais izmērs (atkarībā no RH) vai piliens kļūst mazāks par 5 μm un pievienojas gaisa pārneses daļai, par kuru pieņemts, ka tā paliek gaisā bezgalīgi ilgu laiku. Minimālais diametrs ir aptuveni 25% no sākotnējā pilienu diametra un ir atkarīgs no relatīvā gaisa mitruma [7].

Sedimentācija un difūzija

Sedimentācija ir vēl viens svarīgs process, kas ietekmē pilienu izmēru. Sedimentāciju modelē divos veidos. Iztvaikojošām daļiņām sedimentācijas ātrumu un vertikālo stāvokli aprēķina katrā laika solī pēc formulas [21]:

$$v_{sed} = \sqrt{\frac{4 \rho_{water} g D}{3 \rho_{air} C_D}}$$

$$C_D = \left(\left(\frac{24}{Re} \right)^{0.52} + 0.32^{0.52} \right)^{\frac{1}{0.52}}$$

$$Re = \frac{\rho_{air} D v_{sed}}{\nu}$$



līdz ir sasniegta grīda vai piliens sasniedz savu galīgo izmēru. Sasniedzot galīgo izmēru, pilienu dinamiku aprēķina, atrisinot viendimensijas (telpas vertikālās dimensijas) konvekcijas-difūzijas vienādojumu, kur konvekciju raksturo iepriekšminētais sedimentācijas ātrums, bet difūzija nosaka turbulento gaisa sajaukšanos telpā. Vienādojumu atrisināšana katrai izdalīto daļiņu grupai reālā laika darbības modelī nav iespējama, tāpēc aprēķins visām pāra kombinācijām ar 16 diametriem un 16 turbulentām difūzijām tiek veikts iepriekš. Iegūtie laiksadalījumi 1,2 m augstumā ir pēdējie lielumi, kas aprēķināti, izmantojot divu eksponentu kombināciju, un interpolēti jebkurai daļiņu diametra un turbulentās difūzijas kombinācijai. Turbulentās difūzijas koeficientu K aprēķina pēc telpas tilpuma V un ventilācijas Q saskaņā ar [22].

$$K = 16.7 Q/V$$

Pieņem, ka pilieni ir nogulsējušies, ja to koncentrācija 1,2 m ieelpšanas augstumā ir $\leq 0,1\%$ no sākotnējās koncentrācijas.

Nogulsšanās jeb sedimentācija uz sienām

Mazu gaisā esošu daļiņu sedimentāciju uz virsmām aprēķina saskaņā ar [23]. Šis sedimentācijas mehānisms ir Brauna difūzija caur lamināro robežslāni. Pretstatā vertikālajai sedimentācijai, kas lielākām daļiņām ir ātrāka, Brauna difūzija ir izteiktāka mazākām daļiņām. Zaudējumu līmenis sienās (*wall loss rate*) kopējam daļiņu skaitam N ir definēts kā

$$\frac{dN}{dt} = -\beta N.$$

Zaudējumu līmeņa sienās (*wall loss rate*) ātruma koeficients

$$\beta = \frac{D_{Br} A}{d_{BL} V}$$

ir atkarīgs no virsmas laukuma A , tilpuma V , laminārā robežslāņa biezuma d_{BL} (tiek pieņemts, ka tas ir 1 cm) un difūzijas koeficienta

$$D_{Br} = \frac{k_B T C_{slip}}{6 \pi \nu R}$$

Ja:

$$C_{slip} = 1 + \frac{l}{R} \left(1.26 + 0.418 e^{\frac{-0.867 R}{l}} \right)$$

l ir brīvā ceļa garums un R ir daļiņas rādiuss.

Ventilācija

Ventilācija tiek aplūkota pieņemot, ko notiek ideāla sajaukšanās. Svaigais gaiss no ventilācijas ievada nesatur pilienus vai virionus. Tas sajaucas ar telpas gaisu un izplatās vidējā telpas koncentrācijā. Daļiņu skaits N ir ventilācijas plūsmas tilpuma Q un telpas tilpuma V funkcija

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{Q}{V}$$

Šis vienkāršās pieejas pareizība ir pierādīta ar 3D gaisa plūsmas simulāciju tipiskā telpā [24].

Dzīvotspējas korekcija

Vīrusa dzīvotspēja aerosolā un mazos pilienos ar laiku samazinās [25]. Modelis pieņem šādu dinamiku:

$$N^{i+1} = N^i e^{-1.64e-4 dt}$$

kur eksponenta konstante tiek iegūta, digitalizējot eksperimentālos datus attēlā no [25].

Ieelpošana

Persona, kurai tiek aprēķināts infekcijas risks, sekundē ieelpo 0,4 litrus gaisa, kas satur vidējo aerosola un pilienu koncentrāciju telpā 1,2 m augstumā. Atkarībā no to izmēra tiek absorbēti 19% līdz 95% inhalēto daļiņu [26]. Tā rezultātā organismā nonāk virioni, kuru skaitu izmanto, lai aprēķinātu infekcijas risku.

Riska funkcija

Riska funkciju (infekcijas varbūtību) aprēķina, pamatojoties uz [2]. Pašlaik tiek uzskatīts, ka nav stingra infekcijas sliekšņa absorbēto virionu skaita ziņā un pat viens virions var izraisīt infekciju. Tomēr infekcijas varbūtība pieaug līdz ar absorbēto virionu skaitu. Ieelpojot tikai dažas daļiņas, infekcijas varbūtība ir zema. Šo mērogošanas likumu sauc par devas-infekcijas atbildes modeli (*dose-infection response model*). 50% infekcijas varbūtība atbilst 300 absorbētiem virioniem:

$$R_{infection} = 1 - (1 - 0.0023)^N$$

N ir absorbēto virionu skaits.

Lai prognozētu infekcijas risku, ir jāizmanto daži pieņēmumi par notikumu biežumu, kas saistīti ar dažādiem vīrusu avotiem telpā. Pirmajā scenārijā tiek pieņemts, ka pirmā persona telpā vienmēr ir inficēta un izdala vīrusu ar noteiktu koncentrāciju, kas atbilst reģistrēto elpošanas, šķaudīšanas u.c. notikumu biežumam. Infekcijas risks tiek aprēķināts otrajai personai, kas ienāk telpā. Tas pats attiecas arī uz citiem infekcijas izplatīšanās gadījumiem - visi runas, klepus un šķaudīšanas notikumi tiek piešķirti inficētajai personai.

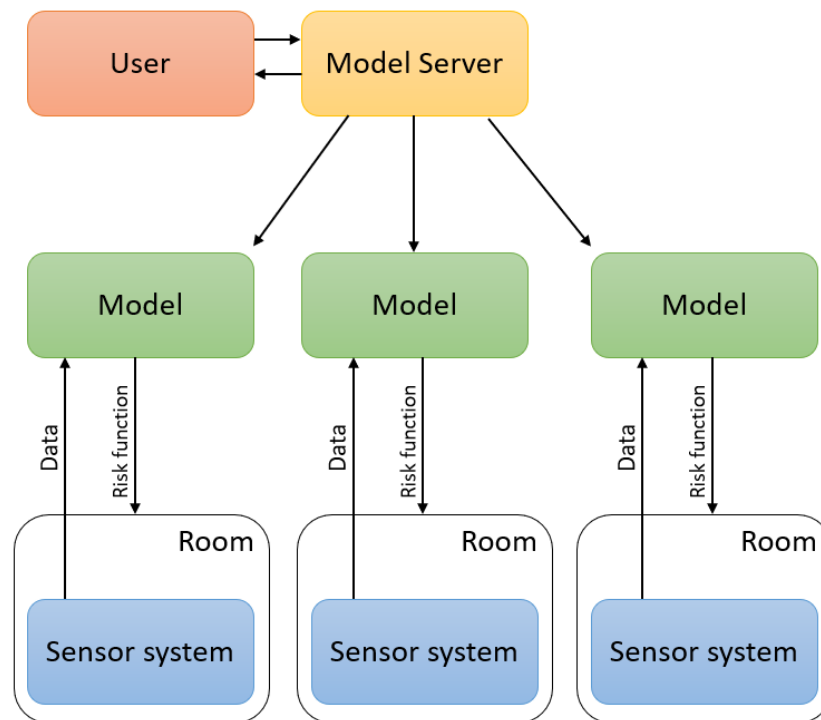
Otrajā scenārijā tiek ņemta vērā infekcijas izplatība populācijā. Katram telpā esošajam cilvēkam, izņemot otro cilvēku, ir noteikta slimības iespējamība atkarībā no epidemioloģiskā stāvokļa valstī vai reģionā. Telpā izdalīto virionu skaits tiek reizināts ar aktuālo izplatību un telpā esošo cilvēku skaitu. Infekcijas izplatība nav labi zināma un var strauji mainīties, tāpēc pirmo scenāriju ir vieglāk analizēt, īpaši, ja tiek novērtēta vai salīdzināta apkārtējās vides parametru un telpas īpašību ietekme.

Modeļa mijiedarbība ar mērījumu sistēmu

Ievads

Šajā nodaļā ir īsi aprakstīta COVID modeļa programmatūras servera lietošana infekcijas riska aprēķināšanai pēc sensoru datiem.

Sensoru un modeļa komunikācija norisinās caur *MQTT* protokolu. Sistēma (sensori + modelis) darbojas telpā, kuru nosaka *MQTT* tēma. Modelis saņem sensora datus, aprēķina riska funkciju un ieraksta to telpas tēmā kā *MQTT* ziņojumu, skat. 7. attēlu. Informācijas apmaiņa par dažādām tēmām notiek caur *MQTT* serveri (modeļa servera tēma un telpas tēmas).



7. att. Lietotāja, modeļa un sensoru sistēmas mijiedarbības shēma

Mijiedarbība ar modeļa serveri

Modeļi var palaist, izmantojot *MQTT* mijiedarbību ar COVID modeļa serveri. Serveris seko tēmai "TTT-WP1/Model/#". Ja šīs tēmas ziņojums satur daļēji noderīgu informāciju, piemēram, *JSON* formātā “{“Run”:true, ...}”, serveris tēmai atbild "TTT-WP1/Model/Answer/".

Lai sāktu COVID modeļa instanci, šī ziņojuma minimālā prasība ir bibliotēka ar vienumiem “Run”:true un “Topic”:“/My/Sensor/System/Topic/” u.c.

```
“{“Run”:true, “Topic”:“TTT-WP1/Company01/House01/Room01/”}”
```

Serveris atbildēs tēmā "TTT-WP1/Model/Answer/" līdzīgi kā

```
{“roomLength”: 3, “roomVent”: 30, “RiskScenario”: 1, “ts”: 1606077626.83893, “roomWidth”: 3, “Status”: “OK”, “Topic”: “TTT-WP1/Company01/House01/Room01/”, “UniqueName”: “case-20201122-hsqtjsqwqiauvaoz”, “roomHeight”: 3, “Duration”: 60}*
```

Var norādīt šādus mainīgos:

'Duration' – modeļa darbības ilgums (sekundēs)

'RiskScenario' –

Riska scenārijs = 1: Pirmā persona ir 100% inficēta, otrā persona ir vesela. Risks tiek aprēķināts otrajai personai. Visas citas personas ir veselas. Visi klepus, šķaudīšanas, runāšanas gadījumi tie piešķirti inficētajai personai.

Riska scenārijs = 2: Otrā persona ir vesela, visas pārējās personas ir inficētas atbilstoši infekcijas izplatībai (piemēram, izplatība Rīgā 01.11.2020. tiek aprēķināta kā 14 dienu vidējais rādītājs dalīts ar 14 un ar Rīgas iedzīvotāju skaitu, proti, $1270/14/895000 = 0,001$).



Visi klepus, šķaudīšanas, runāšanas gadījumi tie piešķirti inficētajām personām.

'Height' telpas augstums (m)

'Width' telpas platums (m)

'Length' telpas garums (m)

'Vent' – ventilācija m³/s (15 m³/s ir LBN prasība vienai personai)

‘Broker’ – publiskā *MQTT* brokera adrese projekta noklusējuma *MQTT* brokera vietā

* - neizmantojot “roomHeight” u.tml. – tā vietā *MQTT* ziņojumā izmantot modeļa atbildi – “Height”, kā aprakstīts iepriekš

'UniqueName' – to var norādīt, vai tas tiks piešķirts automātiski un ierakstīts servera atbildē, piemēram, "case-20201122-hsqjtsqwqiauvaoz". Šis nosaukums ir jāzina/jāizmanto modeļa apturēšanai noteiktā telpā pirms noteiktā laika.

“Topic” – *MQTT* tēma, kurā sensori un modelis ieraksta datus (*MQTT* ziņojumus), beidzas ar “/”.

{"Run":false, "UniqueName": "case_XXX"} tiek izmantots, lai apturētu modeļa izpildi noteiktam gadījumam.

Mijiedarbība ar modeli

Šajā nodaļā ir aprakstīta sensoru sistēmas mijiedarbība ar COVID modeli. Kad modelis tiek palaists (izmantojot *MQTT* mijiedarbību ar serveri) noteiktai telpai, tas sāk aprēķināt riska funkciju. Modelis saņem ziņojumus noteiktā tēmā, kā arī padziļināti (saņemšanas funkcijai tiek pievienota atzīme #) un meklē šādas atslēgas:

'T' vai 'temperature' – temperatūra [C]

'RH' vai 'humidity' – relatīvais gaisa mitrums [%]

"person" – cilvēku skaits telpā

‘CLASS’ – skaņas notikumu atpazīšanas klase. Iespējamās vērtības ir: "1cough", "2sneezing", "3laughing", "4speech". Sensora ziņojumā jāiekļauj arī atslēga “PROBABILITY” ar atbilstošu vērtību no 0,7 līdz 1,0. Šī vērtība jāņem vērā.

Modelis izseko arī “CO2” un “co2” [ppm] un informāciju par daļiņām “PM10”, “PM2.5”, kas tiks izmantota nākamajās versijās. CO₂ mērījumu datus varētu izmantot kontekstā ar telpā esošo cilvēku skaitu, lai nākotnē pielāgotu bieži neapzināto ventilācijas intensitāti.

Riska funkcija, kas atbilst aprakstam, pieaug tikai tad, ja telpā ir vismaz 2 cilvēki. To aprēķina par otro personu, precīzāk, par laiku, kad otrā persona atrodas telpā.

Tāpēc, ja telpa ir aprīkota tikai ar vienkāršu temperatūras un mitruma sensoru, cilvēku skaits jānorāda manuāli, piemēram, neilgi pēc modeļa palaišanas vai atbilstoši plānotajam grafikam, vai citiem apsvērumiem par telpas izmantošanu. Tas pats attiecas uz virtuālajiem notikumiem kā runāšana, klepus vai šķaudīšana, kur tieši šķaudīšana ir vissvarīgākā izdalīto pilienu daudzuma ziņa.

Tipiski *MQTT* ziņojumi, kurus atpazīst modelis, ir:

```
{"person": 0, "ts": 1605948917.194026}
```

```
{"person": 2}
```



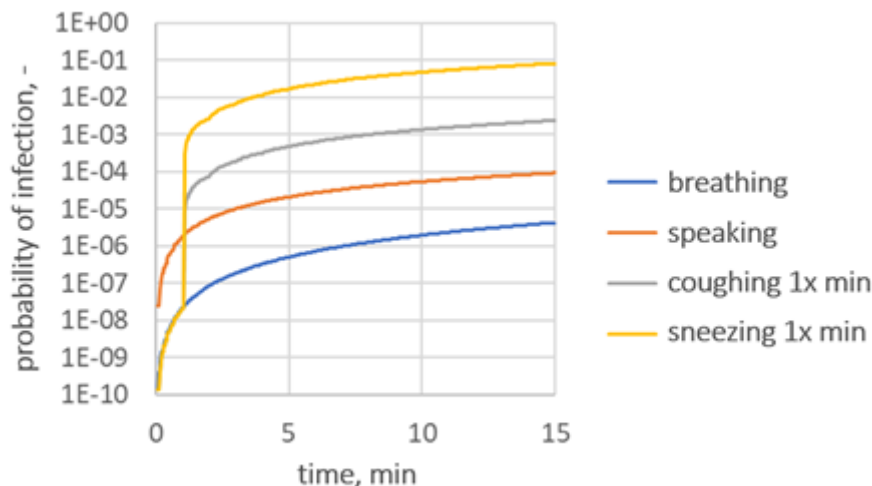
{"CO2": 458.0, "T": 26.17, "ts": 1605948918.765278, "PM10": 2.7, "RH": 19.36, "PM2.5": 2.5}

{"PROBABILITY": 0.7127669960244242, "CLASS": "4speech", "ts": 1605948909.8944602}

Rezultāti

Parametru pētījumi vienkāršiem scenārijiem

Sākumā vairāku modeļa parametru ietekme tiks parādīta vienkāršā scenārijā, kad 2 cilvēki (viens inficēts un viens vesels) ieiet telpā bez vīrusa piesārņojuma. Telpas izmērs ir 3x3x3 m, temperatūra 25°C, relatīvais gaisa mitrums 50%. Abas vērtības ir nemainīgas. Tiek pētīti dažādi vīrusa izvadīšanas scenāriji - ar nepārtrauktu elpošanu un runu, kā arī ar klepu vai šķaudīšanu vienu reizi minūtē. Rezultāti ir atainoti 8. att. Log-skala uz y ass skaidri parāda milzīgo riska līmeņa atšķirību atkarībā no vīrusa avota veida. Runāšana palielina risku aptuveni desmit reizes, salīdzinot ar tikai elpošanu. Klepošana palielina risku desmit reizes, salīdzinot ar runāšanu. Šķaudīšanai ir visaugstākais saistītais infekcijas risks, kas ir ievērojami lielāks nekā klepum. Nepieciešamais laiks ievērojamam infekcijas riskam (10%) ir salīdzināms ar “cieša kontakta” definīciju - 15 minūtes 2 metru attālumā. Ņemiet vērā, ka tas ir arī parastais attālums starp cilvēkiem modelētajā 3x3 m telpā.



8. att. Infekcijas iespējamība laika griezumā, kad inficēta persona atrodas tuvumā un elpo, runā, klepo vai šķauda vienu reizi minūtē 3x3x3 m telpā bez ventilācijas

Inficētās personas sekretā esošā vīrusa koncentrācijas nozīme uz infekcijas risku ir parādīta 9. attēlā. Ir parādīti trīs dažādi gadījumi - tipiska vidējā koncentrācija (50% no pārbaudītajiem cilvēkiem ir augstākas vērtības), augšējie 20% un augšējie 5% inficēto. Tiek pieņemts, ka šķaudīšanas biežums ir viena reize minūtē. Uzturoties telpā ar ļoti infekciozu cilvēku, inficēšanās varbūtība būs gandrīz 100% jau pēc 5 minūtēm.

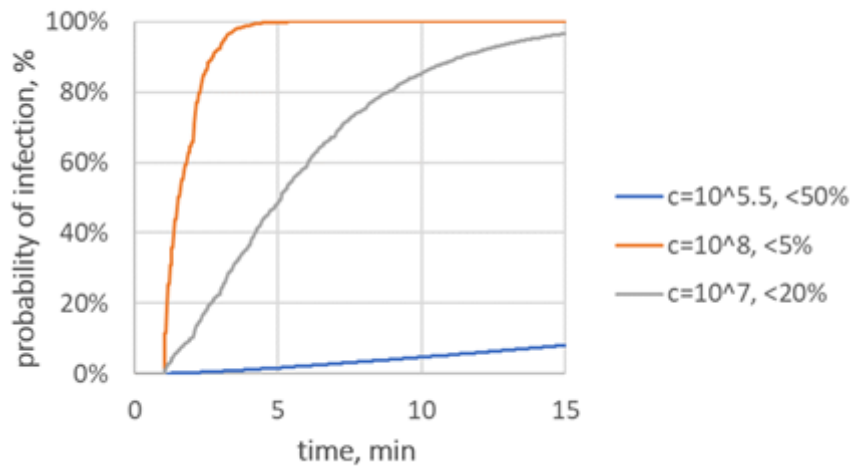


VPP

Valsts pētījumu programma

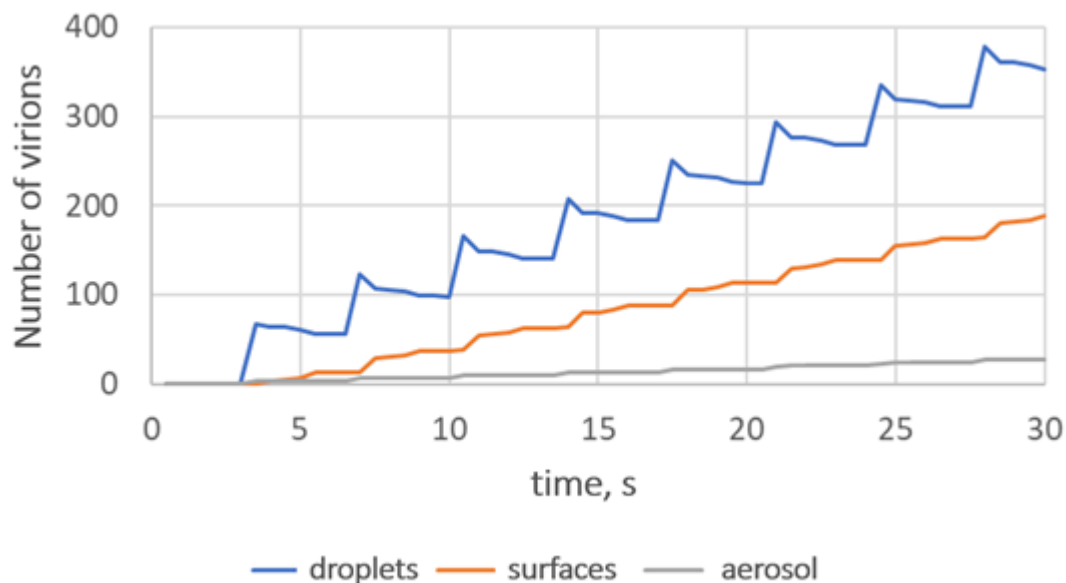
3T CONCEPT
TRACING · TESTING · TREATMENT

“Jaunās tehnoloģijas Covid-19 pacientu tēmēšanai, testēšanai un terapijai (3-T Project)” (Nr. VPP-COVID-2020/1-0025)



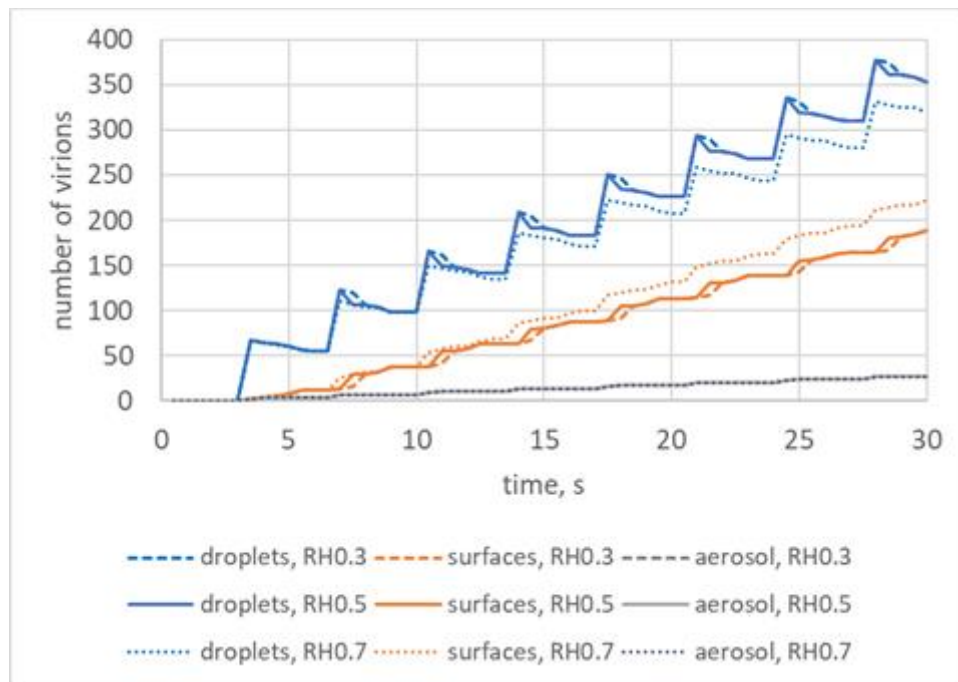
9. att. Infekcijas varbūtība dažādām vīrusa koncentrācijām (c) inficētas personas sekrētā ar pieņemtu šķaudīšanas biežumu vienu reizi minūtē $3 \times 3 \times 3$ m lielā telpā bez ventilācijas

Modelis atklāj arī virionu izplatību un dinamiku telpā. 10. att. ir redzams virionu skaits pilienos ($D > 5 \mu\text{m}$), aerosolā ($D < 5 \mu\text{m}$) un uz virsmām pēc tam, kad inficētā persona ienāk telpā un sāk runāt. Lielākā daļa virionu ir ietverti lielos pilienos, divreiz mazāk nogulsņējas uz virsmām un vēl mazāk ir aerosolā.



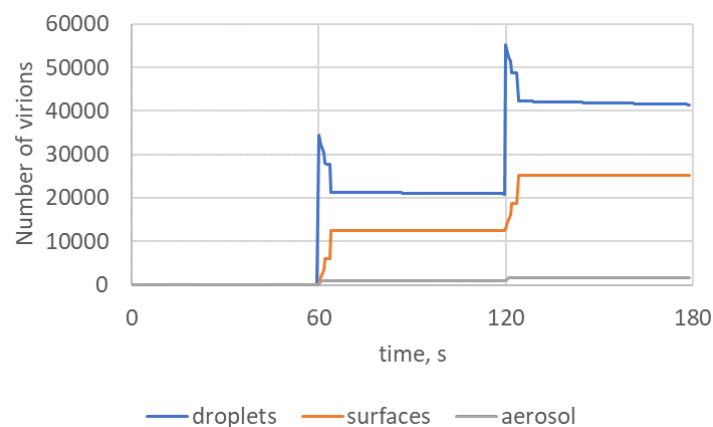
10. att. Virionu skaits pilieniņos, uz virsmām un aerosolā, ja inficētā persona ar augstu vīrusa koncentrāciju gļotās ($c = 1e8$ RNS/ml) pēc ieiešanas telpā nepārtraukti runā.

Relatīvā gaisa mitruma izmaiņu ietekme iepriekšminētajos apstākļos ir parādīta 11. attēlā. Pie augsta relatīvā gaisa mitruma mazāk virionu atrodas pilieniņos un vairāk nogulsņējas uz grīdas.



11. att. Relatīvā gaisa mitruma ietekme uz virionu skaitu pilieniņos, uz virsmām un aerosolā, ja telpā atrodas un runā inficēta persona ar augstu vīrusa koncentrāciju gļotās ($c = 1e8$ RNS/ml).

12. att. (līdzīgi kā 10. attēlā, bet ilgstošā novērošanas periodā) ir redzams, ka ievērojama daļa virionu atrodas pilieniņos, kuru diametrs ir lielāks par $5 \mu\text{m}$, un mazāk nekā 50% pēc vienas minūtes nogulsņējas uz virsmām. Tas galvenokārt ir saistīts ar turbulento difūziju, kas neitralizē gravitācijas sedimentāciju.

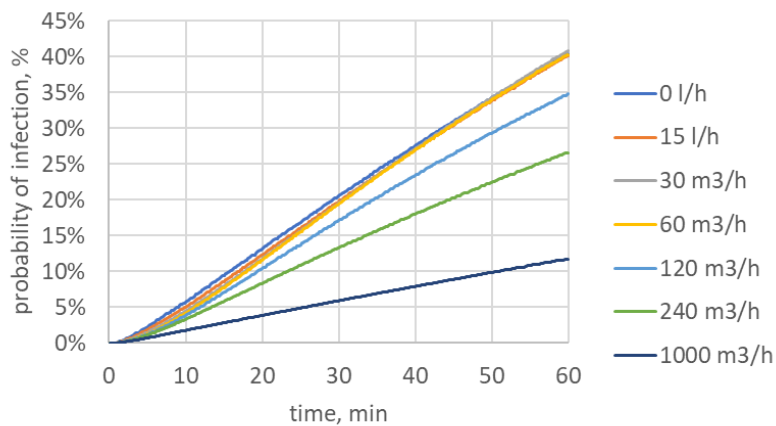


12. att. Virionu skaits pilieniņos, uz virsmām un aerosolā, ja telpā atrodas inficēta persona ar augstu vīrusa koncentrāciju gļotās ($c = 1e8$ RNS/ml). Pieņemts, ka inficētā persona klepo vienu reizi minūtē.

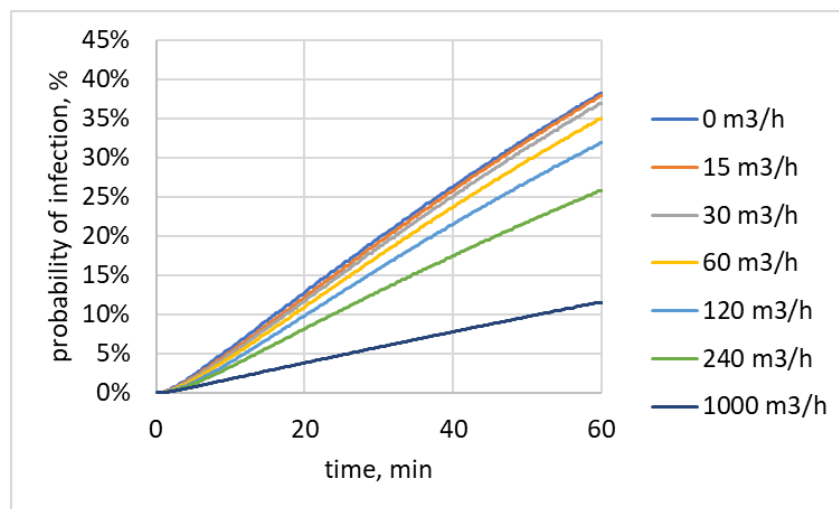
Ventilācijas ietekme uz infekcijas iespējamību ir parādīta 13. attēlā. Ja inficētā persona regulāri klepo vienu reizi minūtē, infekcijas risks tiek samazināts tikai tad, ja ventilācijas intensitāte tiek palielināta līdz $60 \text{ m}^3/\text{h}$, norādot sliekšņvērtību. Turbulentā difūzija pastiprinās, palielinoties ventilācijas ātrumam [9], tāpēc tikai ļoti augsts ventilācijas ātrums ievērojami samazina risku. Ventilācijas ātrums $\sim 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ atbilst scenārijam ar pilnībā atvērtu logu. Tomēr citos pētījumos, kur aplūkots telpas izmērs, ir konstatēts, ka ventilācija daudz mazāk ietekmē turbulento difūziju [27]. Ar turbulento difūziju



infekcijas varbūtība tiek samazināta labāk, ja ventilācijas ātrums atbilst 14. attēlā redzamajam. Precīzākai ventilācijas parametru noteikšanai telpai var veikt 3D gaisa plūsmas simulāciju, kā parādīts šī ziņojuma 4. pielikumā [44].



13. att. Infekcijas varbūtība 3x3x3 m telpā ar dažādu ventilācijas intensitāti, kad inficētā persona ar vīrusa koncentrāciju gļotās $c=1e7$ klepo vienu reizi minūtē.



14. att. Infekcijas varbūtība 3x3x3 m telpā ar dažādu ventilācijas intensitāti, ja saslimis cilvēks ar vīrusa koncentrāciju gļotās $c=10^7$ RNA/ml klepo vienu reizi minūtē. Šeit tiek izmantota turbulences parametru noteikšana, kā aprakstīts [43].

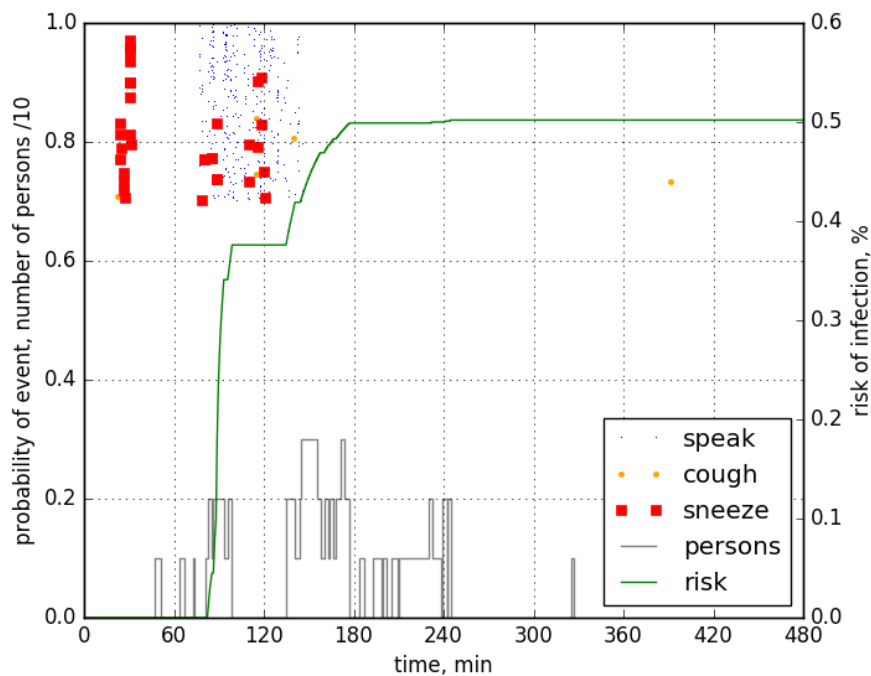
Riska funkcijas aprēķins reālajai mērījumu sistēmai

Modelis ir integrēts izstrādātajā mērījumu sistēmā [1], izmantojot iepriekš aprakstīto *MQTT* saskarni. Uzstādītā sistēma mēra parametrus, kas nepieciešami riska funkcijas prognozēšanai - temperatūru, relatīvo gaisa mitrumu, cilvēku skaitu telpā, runāšanas, klepošanas un šķaudīšanas notikumu biežumu. Izmērītie dati un aprēķinātā infekcijas varbūtība ir parādīta 15. attēlā. Ir redzams, ka infekcijas risks izteikti palielinās, ja notiek šķaudīšana un telpā ir 2 personas. Tam seko klepus, kad telpā atrodas 2 personas.

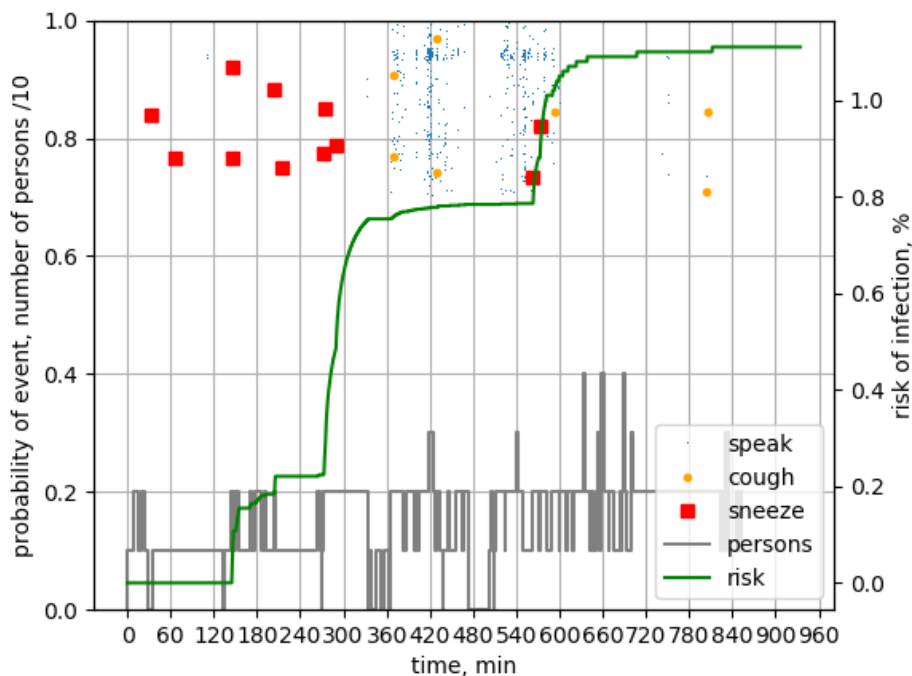
Vēl viens piemērs ir parādīts 16. att. Tāpat infekcijas risks ir ievērojami palielināts aptuveni 260 minūtē un 560 minūtē, kad telpā atrodas vairāk nekā viena persona un notiek vairāki šķaudīšanas gadījumi. Tas ir skaidrojams ar virionu skaitu gaisā, kas parādīts 17. attēlā. Lielākā daļa virionu ir ietverti pilienos,



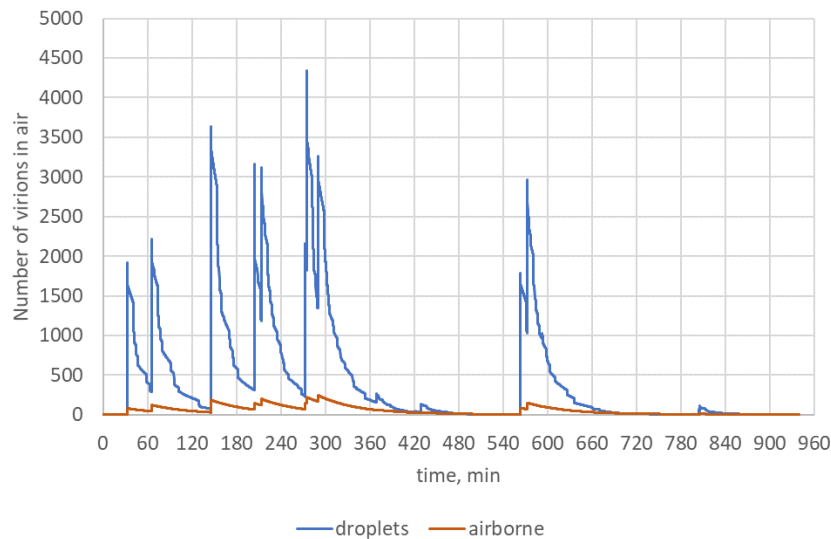
kuru izmērs ir > 5 mm . To skaits strauji palielinās pēc šķaudīšanas un apmēram 30 minūšu laikā atkal uz pusi samazinās.



15. att. Infekcijas risks, kas aprēķināts reāliem mērījumu datiem.



16. att. Infekcijas risks, kas aprēķināts reāliem mērījumu datiem.



17. att. Virionu skaits pilienos un aerosolā atbilstoši 16. att. parādītajam piemēram.

Kopsavilkums

Ir Izstrādāts skaitliskais modelis COVID-19 infekcijas riska novērtēšanai noteiktā telpā. Parametru pētījumi vienkāršiem, definētiem scenārijiem parāda vairāku parametru ietekmi uz infekcijas riska pieaugumu:

- Runāšana, salīdzinot ar elpošanu, palielina risku aptuveni desmit reizes. Klepošana palielina risku desmit reizes, salīdzinot ar runāšanu. Šķaudīšanai ir visaugstākais saistītais infekcijas risks, kas ir ievērojami lielāks nekā klepum.
- Vīrusa koncentrācija inficēto personu sekrētā var vairākkārtēji atšķirties, tāpēc, uzturoties telpā ar ļoti infekciozu cilvēku (augšējie 5%), kurš šķauda vienu reizi minūtē, jau pēc 5 minūtēm infekcijas risks būs gandrīz 100%.
- Modelis atklāj arī virionu izplatību un dinamiku telpā. Ievērojama daļa virionu atrodas pilieniņos, kuru diametrs ir lielāks par 5 mm, un mazāk nekā 50% pēc vienas minūtes nogulsņējas uz virsmām.
- Simulācijas ar dažādu ventilācijas ātrumu parāda, ka, lai ievērojami samazinātu infekcijas risku, ir nepieciešams ļoti liels ventilācijas ātrums (salīdzināms ar atvērtu logu).

Modelis izmanto datus no telpā uzstādītās mērīšanas sistēmas un operatīvi aprēķina infekcijas risku. Datu apmaiņas saskarne starp sensoru un modeļa programmatūru vienlaikus tiek realizēta un arī darbināta - tiek demonstrēta infekcijas simulācija reālā telpā.

Tiek izstrādāts modeļa serveris, kas spēj paralēli iedarbināt modeļu gadījumus vairākām telpām, kas aprīkotas ar mērīšanas sistēmu. Sistēma ir instalēta augstas veiktspējas datoru klasterī un, ja nepieciešams, to var viegli pielāgot simtiem vai tūkstošiem telpu.

Nākamie soļi modeļa uzlabošanai būs:

- automātiska ventilācijas ātruma prognozēšana, pamatojoties uz CO₂ mērījumu datiem un telpā esošo cilvēku skaitu;

- modeļa paplašināšana, iekļaujot temperatūras un mitruma ietekmi uz vīrusa dzīvotspēju aerosolā;
- nepārtraukta modeļa parametru atjaunināšana, kad tiek iegūta jauna un nozīmīga informācija arvien pieaugošajos literatūras avotos.

Atsauces

- [1] 2. pielikums. Jauna monitorēšanas sistēma. Tehniskais ziņojums. Rīgā, 2020. gada decembrī
- [2] Saikat Basu. Computational characterization of inhaled droplet transport in the upper airway leading to SARS-CoV-2 infection. medRxiv doi: <https://doi.org/10.1101/2020.07.27.20162362>
- [3] MQTT starpnieka un datubāzes izstrāde. Tehniskais ziņojums. Rīgā, 2020. gada decembrī
- [4] C. Kleinstreuer, Z. Zhang. “Airflow and particle transport in the human respiratory system”. Annual review of fluid mechanics 42 (2010), p. 301.—334.
- [5] Swetaprovo Chaudhuri et al. Modeling the role of respiratory droplets in Covid-19 type pandemics. Physics of Fluids 32.6 (2020), 63309
- [6] Michael A Kohanski, L James Lo, Michael S Waring. “Review of Indoor Aerosol Generation, Transport and Control in the Context of COVID-19”. *International forum of allergy & rhinology*. Wiley Online Library. 2020.
- [7] Fabian, Patricia, et al. "Origin of exhaled breath particles from healthy and human rhinovirus-infected subjects." *Journal of aerosol medicine and pulmonary drug delivery* 24.3 (2011): 137-147.
- [8] Gerone, Peter J., et al. "Assessment of experimental and natural viral aerosols." *Bacteriological reviews* 30.3 (1966): 576.
- [9] Duguid, J. F. 1946 The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *J. Hyg.* 4, 471 –480.
- [10] Gupta, Jitendra K., Chao-Hsin Lin, and Qingyan Chen. "Characterizing exhaled airflow from breathing and talking." *Indoor air* 20.1 (2010): 31-39.
- [11] Chao, Christopher Yu Hang, et al. "Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening." *Journal of Aerosol Science* 40.2 (2009): 122-133.
- [12] Xie, Xiaojian, et al. "Exhaled droplets due to talking and coughing." *Journal of the Royal Society Interface* 6.suppl_6 (2009): S703-S714.
- [13] Loudon, R. G. & Roberts, R. M. 1967 Droplet expulsion from the respiratory tract. *Am. Rev. Resp. Dis.* 95, 435 –442.
- [14] Shinhao Yang u. c. “The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects”. *Journal of Aerosol Medicine* 20.4 (2007), p. 484.—494.
- [15] ZY Han, WG Weng un QY Huang. “Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze”. *Journal of the Royal Society Interface* 10.88 (2013), p. 20130560.
- [16] Schijven, Jack F., et al. "Exposure assessment for airborne transmission of SARS-CoV-2 via breathing, speaking, coughing and sneezing." *medRxiv* (2020).

- [17] Sean Wei Xiang Ong u. c. “Air, surface environmental, and personal protective equipment contamination by severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) from a symptomatic patient”. *Jama* 323.16 (2020), p. 1610.—1612.
- [18] Karimzadeh, Sedighe, Raj Bhopal, and Huy Nguyen Tien. "Review of infective dose, routes of transmission, and outcome of COVID-19 caused by the SARS-CoV-2 Virus: comparison with other respiratory viruses." (2020).
- [19] Liu, Li, et al. "Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing." *Indoor Air* 27.1 (2017): 179-190.
- [20] Hongchao Qi u. c. “COVID-19 transmission in Mainland China is associated with temperature and humidity: A time-series analysis”. *Science of the Total Environment* (2020), p. 138778.
- [21] H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops in air. IMAG report 2003 – 12 Wageningen UR July 2003
- [22] Timothy Foat, Joseph Drodge, James Nally, Simon Parker. A relationship for the diffusion coefficient in eddy diffusion based indoor dispersion modelling, *Building and Environment*, Volume 169, 2020,106591,ISSN 0360-1323
- [23] S.H.Park. Wall Loss Rate of Polydispersed Aerosols, *Aerosol Science and Technology* 35: 710–717 (2001)
- [24] Appendix 4. 3D Air Flow and Concentration Simulation. Tehniskais ziņojums. Rīgā, 2020. gada decembrī
- [25] Neeltje Van Doremalen u. c. “Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1”. *New England Journal of Medicine* 382.16 (2020), p. 1564.—1567.
- [26] Stahlhofen, W. G. A. C., G. Rudolf, and A. C. James. "Intercomparison of experimental regional aerosol deposition data." *Journal of Aerosol Medicine* 2.3 (1989): 285-308.
- [27] Cheng, Kai-Chung & Acevedo-Bolton, Viviana & Jiang, R.-T & Klepeis, Neil & Ott, Wayne & Hildemann, Lynn. (2011). Association of turbulent diffusion coefficient with air change rate in naturally-ventilated residences. 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2011. 1. 740-741.