



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

3D gaisa plūsmas un koncentrācijas simulācija

Tehnoloģijas apraksts

4. pielikums

Autori

J. Virbulis, M. Surovovs, A. Sabanskis u.c.

Rīgā, 2020. gada decembrī



Saturs

Ievads	1
1. Sistēmas apraksts	4
1.1. Telpas ģeometrija	4
1.2. Galīgo elementu siets	4
2. Gaisa plūsma	5
2.1. Modeļa apraksts	5
2.2. Robežstāvokļi	5
2.3. Gaisa plūsmas rezultāti	6
3. Oglekļa dioksīda transports telpā	9
3.1. Modeļa apraksts	9
3.2. Analītiskais novērtējums (0D modelis)	9
3.3. Rezultāti - tukša telpa	10
3.4. Rezultāti - ieslēgts koncentrācijas avots	11
3.5. Rezultāti - izslēgts koncentrācijas avots	14
Kopsavilkums	15



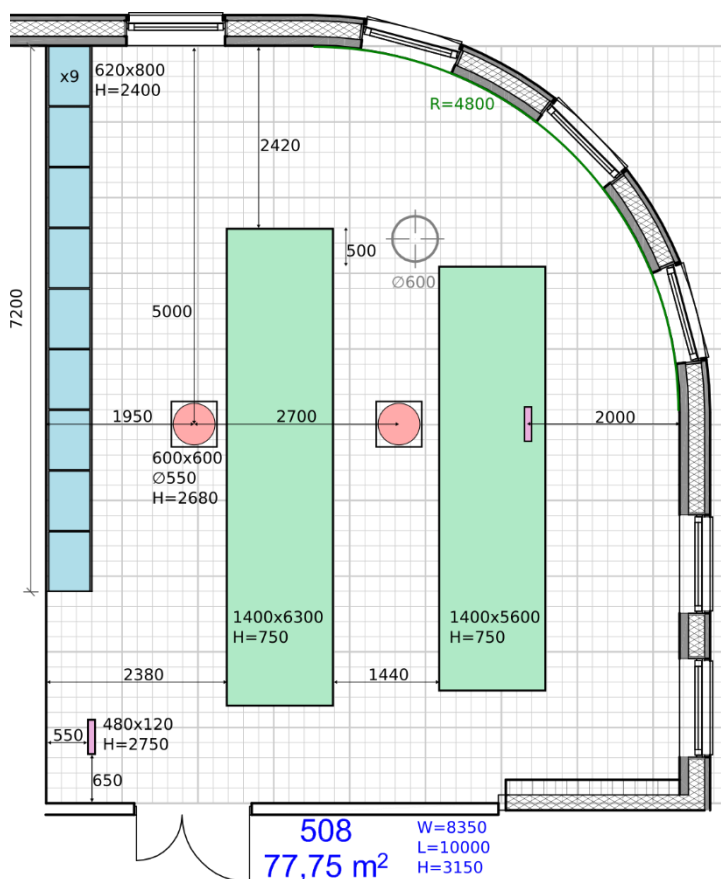
Ievads

Šajā ziņojumā ir aprakstīti gaisa plūsmas un īslaicīgā oglekļa dioksīda transporta 3D skaitliskās modelēšanas rezultāti telpā, kurā ir uzstādīta mērīšanas sistēma [1] un tiek modelēts COVID-19 infekcijas risks [2]. 3D modelēšanas mērķi ir (1) CO₂ koncentrācijas modeļa 0D validācija infekcijas riska modelī dažādiem ventilācijas ātrumiem, (2) bāzes izveide turpmākajai aerosola un daļiņu transporta modelēšanai un salīdzināšanai ar eksperimentālo sadalījumu telpā un laikā.

Sistēmas apraksts

Telpas ģeometrija

Gaisa plūsmas un oglekļa dioksīda transporta modelēšanai tika izvēlēta Latvijas Universitātes Zinātņu mājas 508. telpa, skat. 1. attēlu. Telpai ir divi ventilācijas ievadi jeb gaisa iepļūdes atveres (sarkanie apli) un divi izvadi (sarkanie taisnstūri). Telpā atrodas dažas mēbeles (skapis, galdi). Skaitlisko simulāciju atvieglošanai telpas ģeometrija tiek vienkāršota, neņemot vērā detaļas, piemēram, krēslus, sildelementus, logus un durvis.



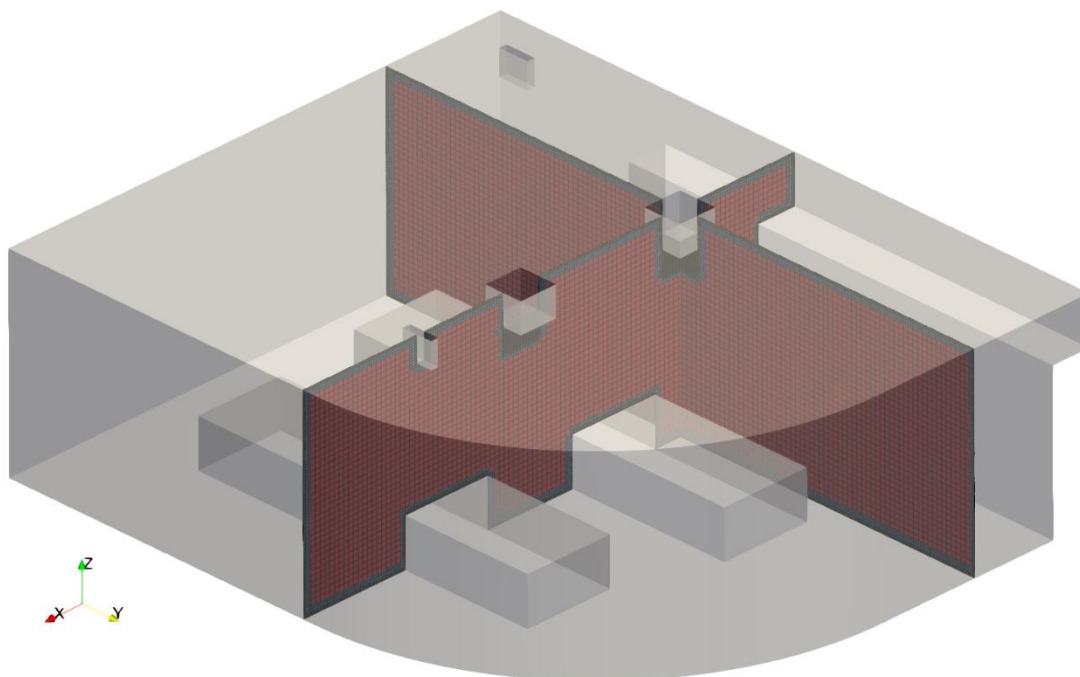
1. att. Telpas forma un izmēri (milimetros).

Galīgo elementu siets

Galīgo elementu siets (*finite element mesh*) sastāv no 7,2 miljoniem šūnu (galvenokārt sešstūra formas). Tas tiek ģenerēts, izmantojot *OpenFOAM* tīkla ģeneratoru *snappyHexMesh*. Kopējais telpas (gaisa) tilpums ir 223,85 m³.



Tiek izmantots 8 cm standarta elementa izmērs. Cietu virsmu tuvumā tīkls katrā virzienā tiek precizēts 8 reizes, kā rezultātā elementa izmērs ir 1 cm. Smalkākais siets (0,5 cm) tiek definēts ventilācijas ievadu un izvadu zonās. Turklāt, lai labāk uztvertu liela ātruma gaisa ieplūdi, siets, kas atrodas tieši zem ventilācijas ieplūdes atverēm, tiek precizēts, kā parādīts 2. att.



2. att. Ģenerētā galīgā tilpuma sieta attēlojums.

Gaisa plūsma

Modeļa apraksts

Tiek aplūkota stacionāra nespiežama turbulenta gaisa plūsma, izmantojot standarta *OpenFOAM* risinātāju *simpleFoam*. Tiek aprēķināta tikai gāzes plūsma (ātrums, spiediens, turbulentie lielumi), bet temperatūras ietekme netiek aplūkota. Tiek izmantota kinemātiskā viskozitāte $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Turbulencei tiek izvēlēts zemā Reinoldsa skaitļa $k-\omega$ SST modelis.

Robežstāvokļi

Abos **ievados** ir noteikts kopējais tilpuma plūsmas ātrums $Q = 120 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0333 \text{ m}^3/\text{s}$, kas atbilst ātrumam $U = 4.6 \text{ cm/s}$ (vērstis uz leju, vienmērīgs visā ievadā). Tika veikti papildu aprēķini ar **palielinātu** ventilācijas ātrumu ($U = 9.2 \text{ cm/s}$). Abos gadījumos tiek piemērota 10% turbulences intensitāte k ; ω ir iestatīts sajaukšanās garums 3,85 cm. Spiediena laukum izmanto nulles gradienta robežnosacījumu.

Abos **izvados** ātruma laukum un turbulentajiem lielumiem piemēro nulles gradienta robežnosacījumu. Kinemātiskais spiediens ir iestatīts uz $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

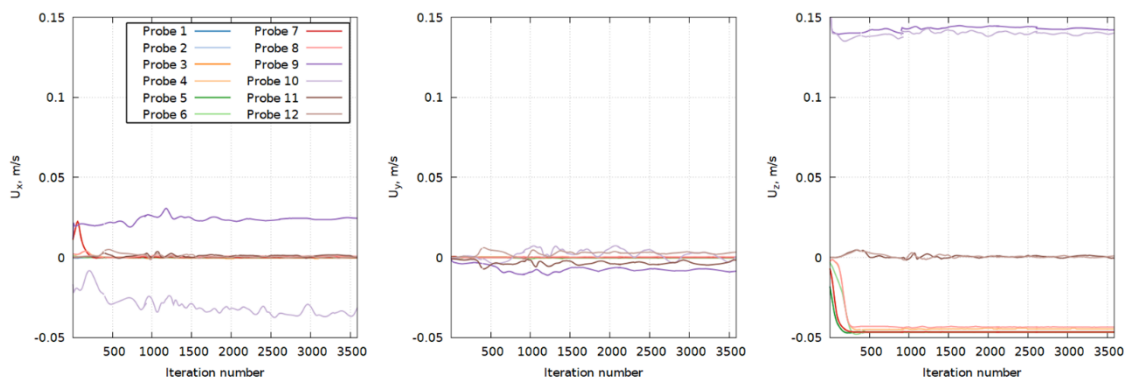
Pie cietajām virsmām ātruma laukum tiek noteikts *no-slip* jeb **sienas** robežnosacījums. k un ω laukum tiek izmantotas standarta sienas funkcijas (*standard wall functions*). Spiediena laukum izmanto nulles gradienta robežnosacījumu.



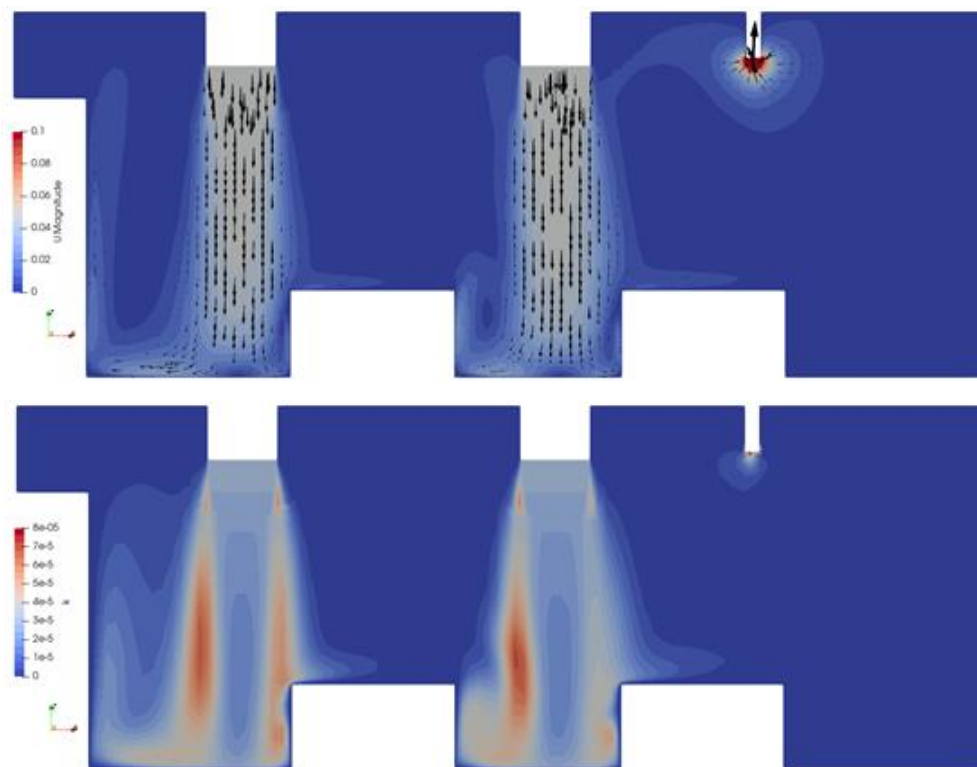
Gaisa plūsmas rezultāti

Lai novērtētu konverģenci, risinājums tika uzraudzīts 12 zondes punktos, skat. 3. att. Stacionāra stāvokļa sasniegšanai ir nepieciešami aptuveni 2000 atkārtojumu.

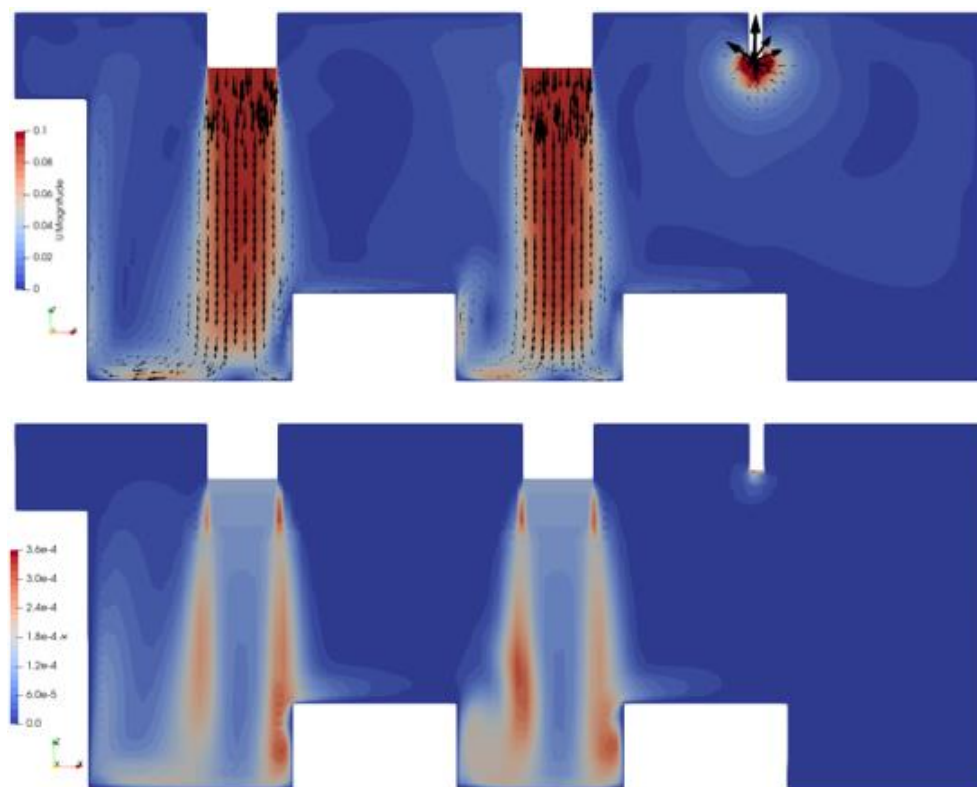
Aprēķinātie gaisa plūsmas ātruma un turbulentās enerģijas sadalījumi divās dažādās šķērsriezuma plaknēs ir parādīti 4. – 7. att. Spēcīgās strūkļas no ventilācijas ievadiem rada turbulentu plūsmu virzienā uz grīdu. Tā kā izvadu šķērsriezuma laukums ir mazāks nekā ievadu šķērsriezuma laukums, tad lielākais ātrums vērojams pie izvadiem. Veicot aprēķinus ar paaugstinātu ventilācijas ātrumu, ātruma sadalījums ir līdzīgs, bet absolūtās vērtības attiecīgi palielinās. Arī maksimālā ātruma zona izvada tuvumā ir lielāka paaugstināta ventilācijas ātruma gadījumā. Vislielākā turbulences enerģija ir ieplūdes strūkļas malās, un tā palielinās pastiprinātas ventilācijas apstākļos.



3. att. Ātruma konverģence (no kreisās uz labo: x, y un z komponentes) 12 zondes punktos.

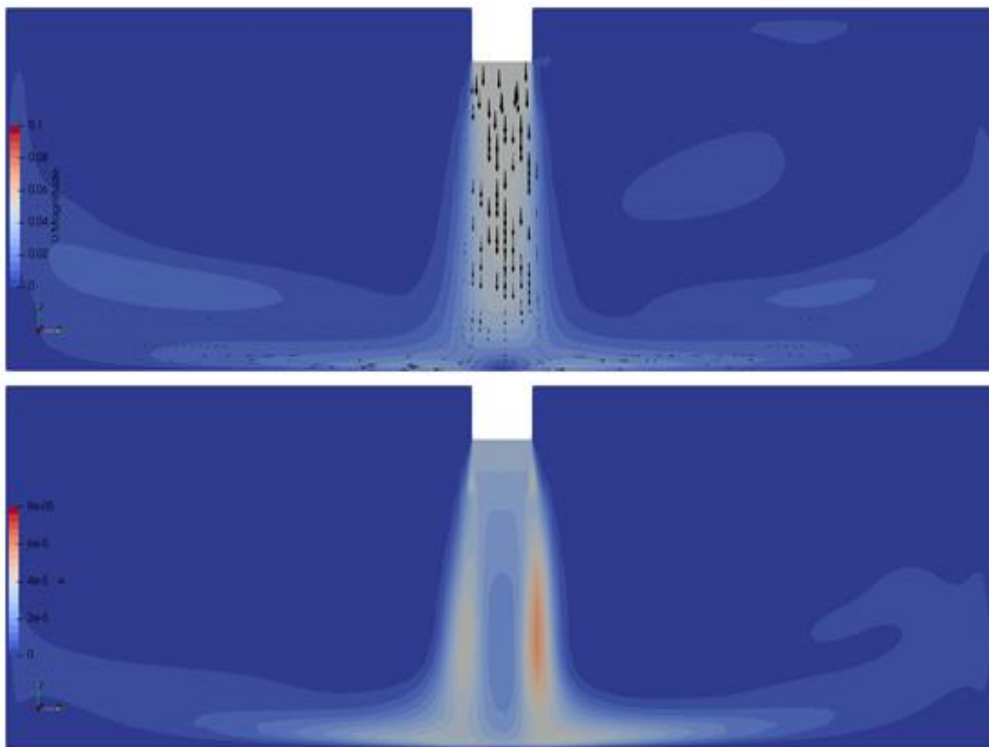


4. att. Aprēķinātie ātruma (augšējie) un turbulētās kinētiskās enerģijas (apakšējie) lauki xz šķēsgriezumiem.

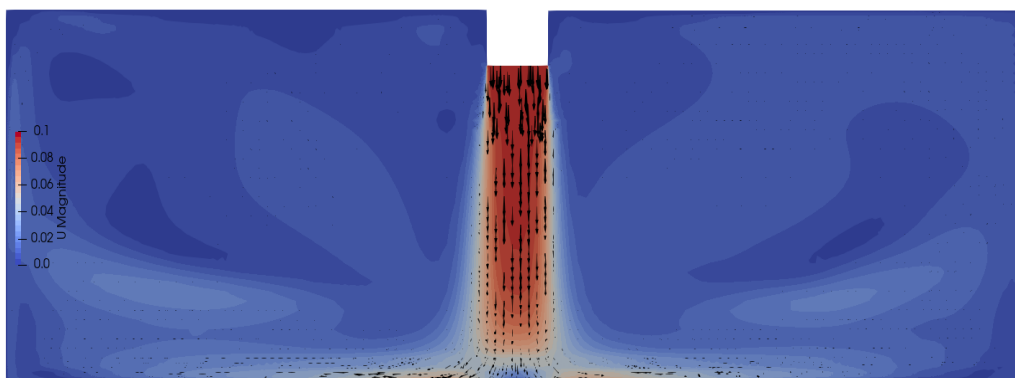


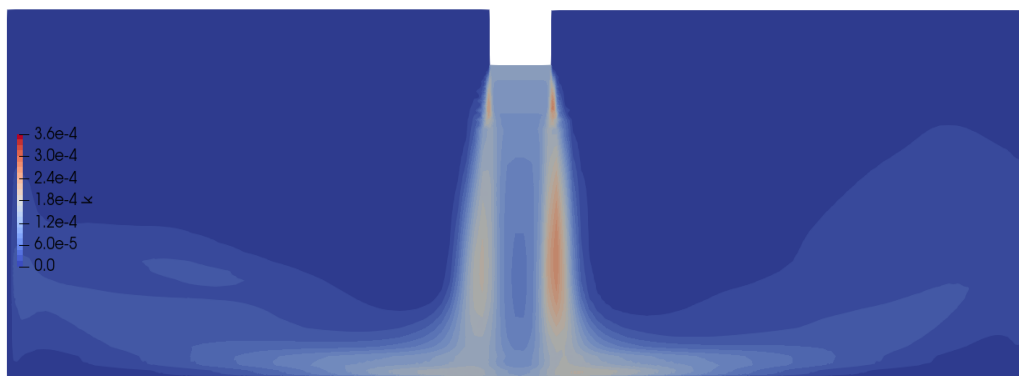


5. att. Aprēķinātie ātruma (augšējie) un turbulentās kinētiskās enerģijas (apakšējie) lauki xz šķērs griezumam **pastiprinātas** ventilācijas apstākļos.



6. att. Aprēķinātie ātruma (augšējie) un turbulentās kinētiskās enerģijas (apakšējie) lauki yz šķērs griezumam.





7. att. Aprēķinātie ātruma (augšējie) un turbulentās kinētiskās enerģijas (apakšējie) lauki yz šķērsgrīzumam **pastiprinātas** ventilācijas apstākļos.

Oglekļa dioksīda transports telpā

Modeļa apraksts

Tiek aplūkots nestacionārais oglekļa dioksīda koncentrācijas transports fiksēta ātruma laukum, izmantojot modificētu *OpenFOAM* risinātāju, lai ņemtu vērā turbulentās difūzijas koeficientu un koncentrācijas lauka (cilvēka elpošanas) avotus lietotāja noteiktos reģionos. Plūsmas modelī netiek ņemta vērā elpošanas laikā radusies gaisa plūsma.

CO₂ simulācijā tiek izmantots Šmita skaitlis 0,9. To aprēķina pēc oglekļa dioksīda molekulārās difūzijas koeficienta gaisā $D_{\text{CO}_2\text{-air}} = 1.666 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Tāpat piemēro turbulences Šmita skaitli 0,7, lai ņemtu vērā turbulences ietekmi uz koncentrācijas sadalījumu. Laika solis ir 1 sekunde.

Abiem ievadiem visu laiku tiek piemērota ārējā CO₂ koncentrācija $C_{\text{in}} = 414 \text{ ppm}$.

Analītiskais novērtējums (0D modelis)

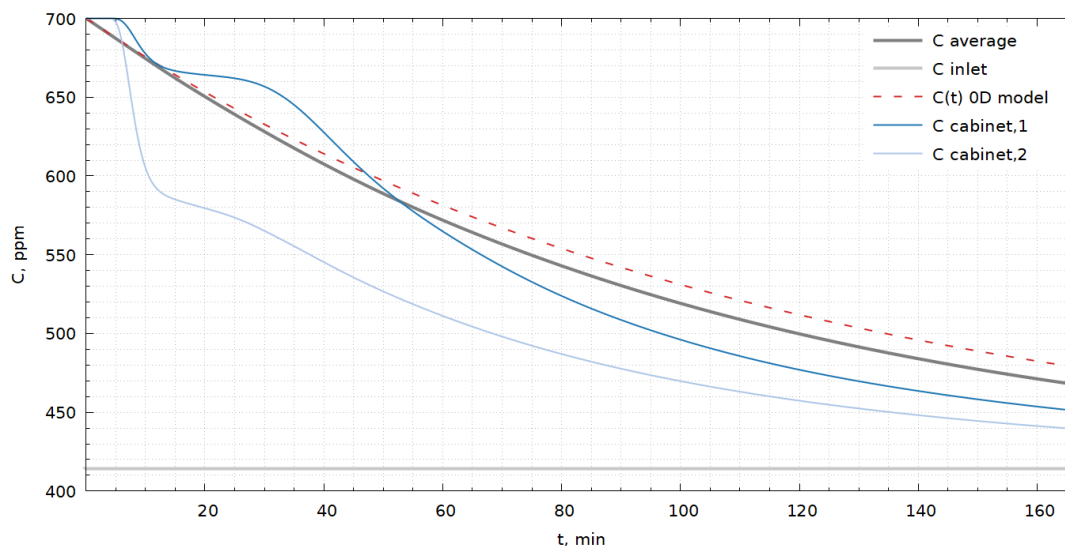
C_0 ir sākotnējā koncentrācija pie $t = 0$, C_{in} – koncentrācija ievadā, Q – tilpuma ieplūdes ātrums (vienāds ar izplūdes ātrumu), V – kopējais telpas tilpums un S – koncentrācijas avoti. No laika atkarīgo vidējo koncentrāciju, pieņemot, ka telpā notiek ideāla sajaukšanās, izsaka ar formulu:

$$C(t) = C_{\text{in}} + \left(C_0 - C_{\text{in}} - \frac{SV}{Q} \right) e^{-\frac{Qt}{V}} + \frac{SV}{Q}.$$

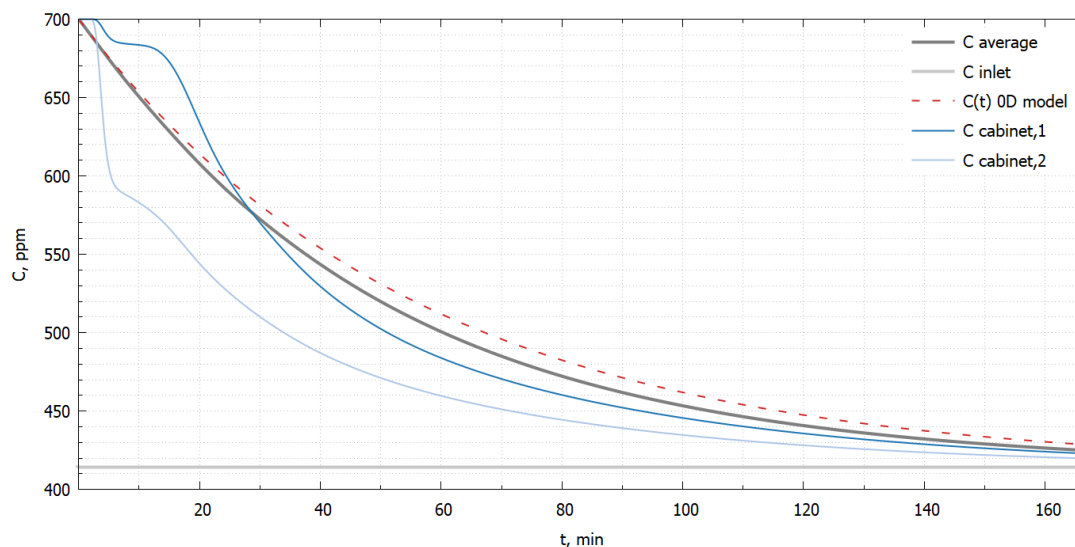


Rezultāti - tukša telpa

Šajā gadījumā tiek pieņemta pastāvīga sākotnējā koncentrācija 700 ppm. Sākotnējā koncentrācija pakāpeniski samazinās, jo caur ievadiem tiek pievadīts tīrāks gaiss. 8. attēlā redzams, ka modelis diezgan labi prognozē vidējo koncentrāciju. Skaitliski aprēķinātā vidējā koncentrācija telpā ir mazāka nekā 0D modeļa prognozētā, jo sajaukšanās nav ideāla. Pastāv aptuveni 5 minūtes ilga laika aizture pirms koncentrācija skapja tuvumā sāk mainīties. Paaugstināta ventilācijas ātruma gadījumā (9. attēls) koncentrācijas izmaiņu ātrums ir lielāks; atbilstība 0D modelim ir ļoti augsta.



8. att. No laika atkarīgās koncentrācijas, sākot no augstas sākotnējās koncentrācijas un **bez avotiem**. Zonde 1 un 2 atrodas telpas vidū attiecīgi virs un pie skapja.



9. att. No laika atkarīgās koncentrācijas, sākot no augstas sākotnējās koncentrācijas un **bez avotiem** pie **paaugstināta** ventilācijas ātruma. Zonde 1 un 2 atrodas telpas vidū attiecīgi virs un pie skapja.

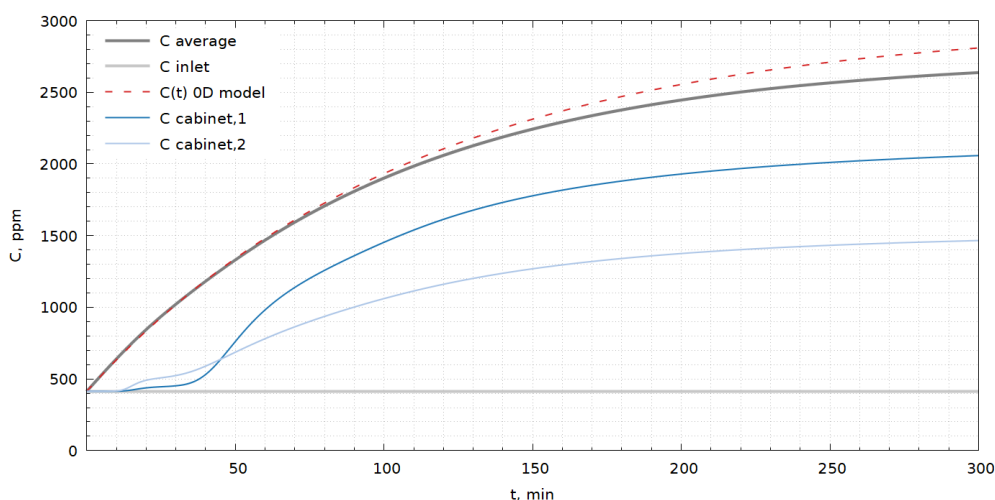


Rezultāti - ieslēgts koncentrācijas avots

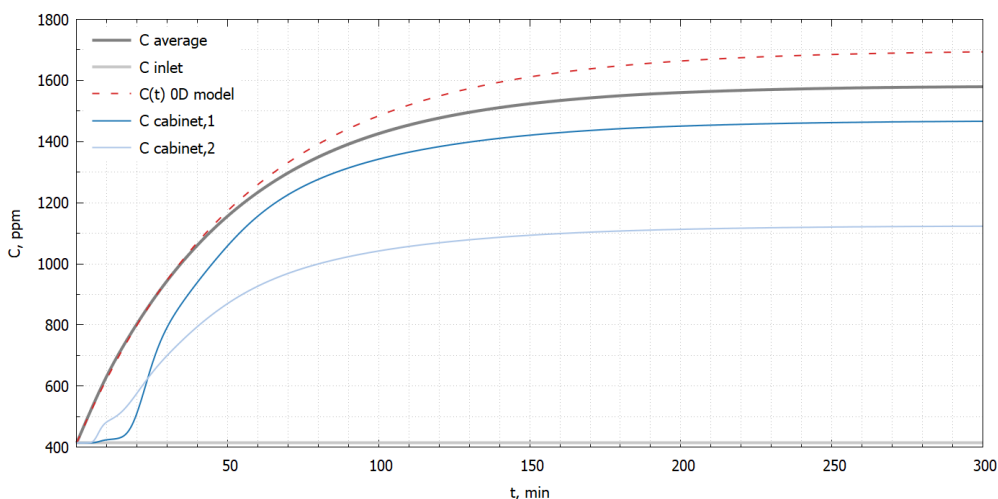
Sākotnējā 414 ppm koncentrācija tiek palielināta cilvēka elpošanu modelējošo avotu dēļ. Telpā ir 6 cilvēki. Avoti atrodas 1,2 m virs grīdas un 2 m attālumā viens no otra, skat. 12. att. Tiek pieņemts, ka katrs cilvēks sekundē izelpo 28 μg oglekļa dioksīda, veidojot kopējo avotu $S = 0.38$ ppm/s.

No laika atkarīgās koncentrācijas ir attēlotas 10. un 11. att. Tāpat kā iepriekš, 0D modelis diezgan labi prognozē vidējās koncentrācijas atkarību no laika. Pastāv aptuveni 10 minūtes ilga laika aizture pirms koncentrācija skapja tuvumā sāk mainīties. Palielināta ventilācijas ātruma gadījumā aizture tiek samazināta līdz 5 minūtēm, un rezultātā iegūtā oglekļa dioksīda koncentrācija ir ievērojami mazāka. Tomēr divreiz palielināta ventilācija nesamazina CO_2 koncentrāciju divas reizes.

CO_2 koncentrācijas sadalījums gaisā ir parādīts 12. - 13. attēlā. Palielināta ventilācijas ātruma gadījumā vietējie maksimālie reģioni avotu tuvumā ir ievērojami mazāki.



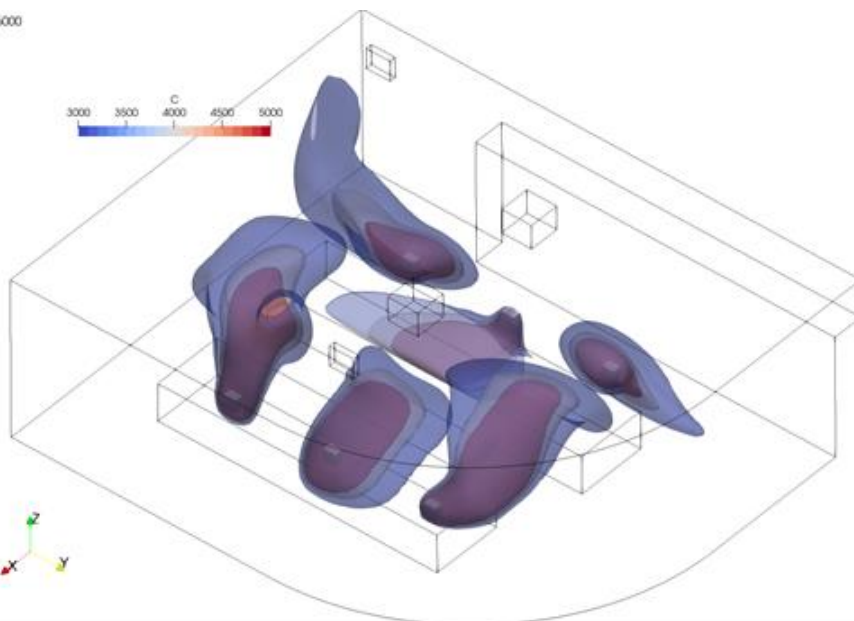
10. att. No laika atkarīgās koncentrācijas, sākot no zemas sākotnējās koncentrācijas un ar ieslēgtiem avotiem. Zonde 1 un 2 atrodas telpas vidū attiecīgi virs un pie skapja.



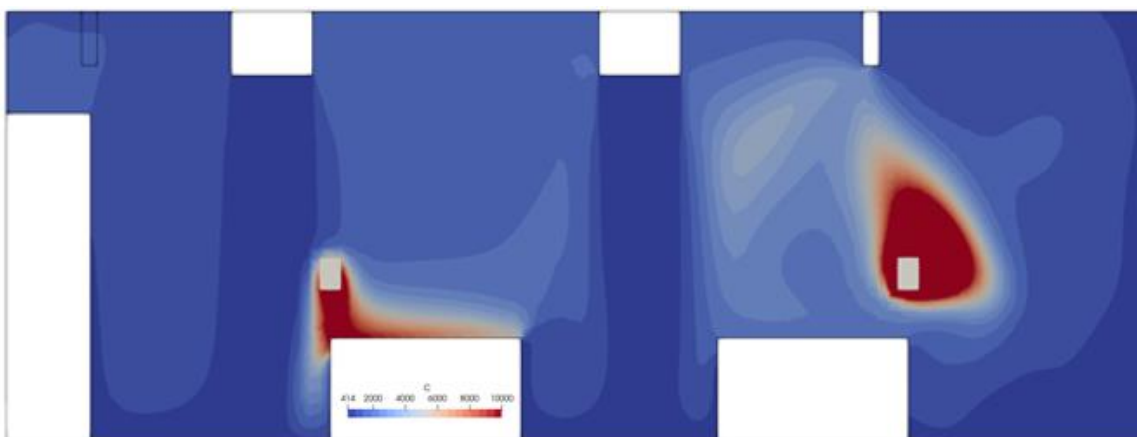
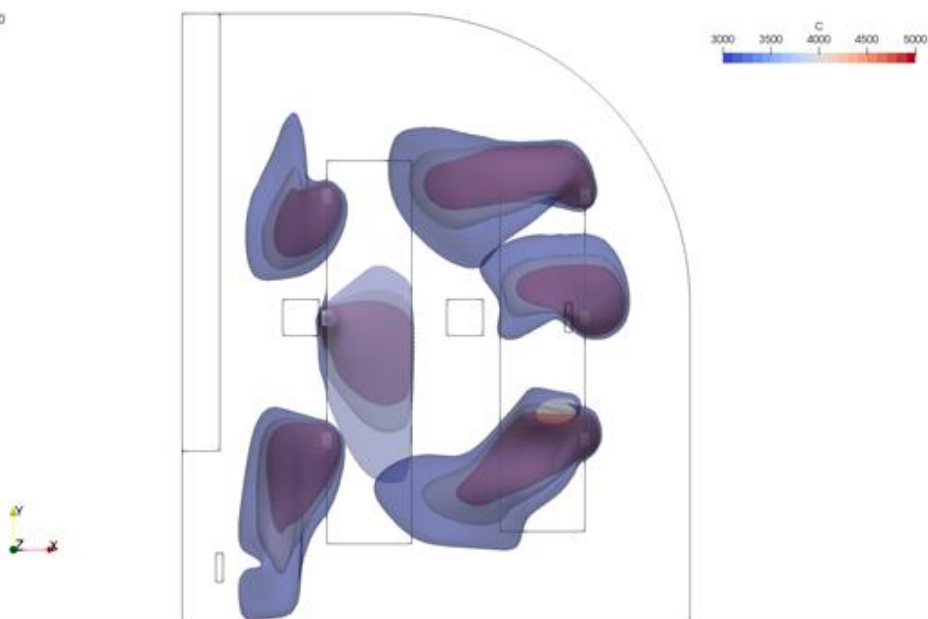
11. att. No laika atkarīgās koncentrācijas, sākot no zemas sākotnējās koncentrācijas un ar ieslēgtiem avotiem pie paaugstināta ventilācijas ātruma. Zonde 1 un 2 atrodas telpas vidū attiecīgi virs un pie skapja.



Time: 6000

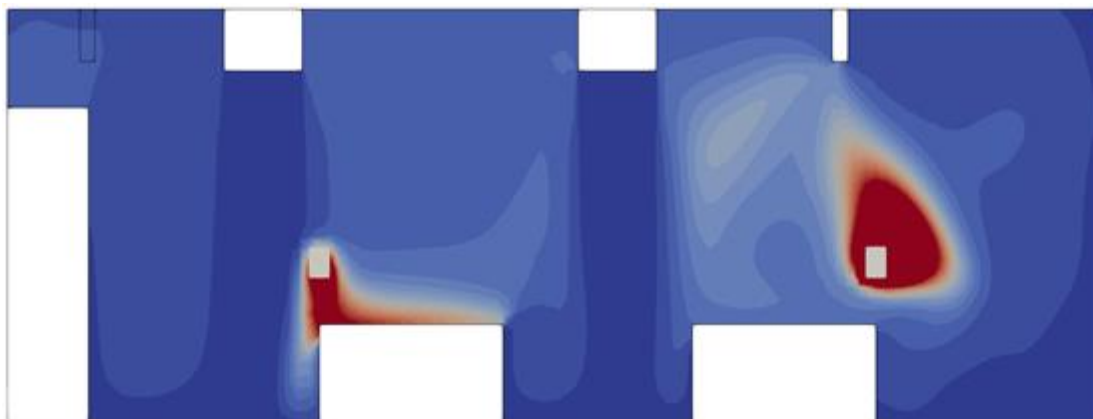


Time: 6000



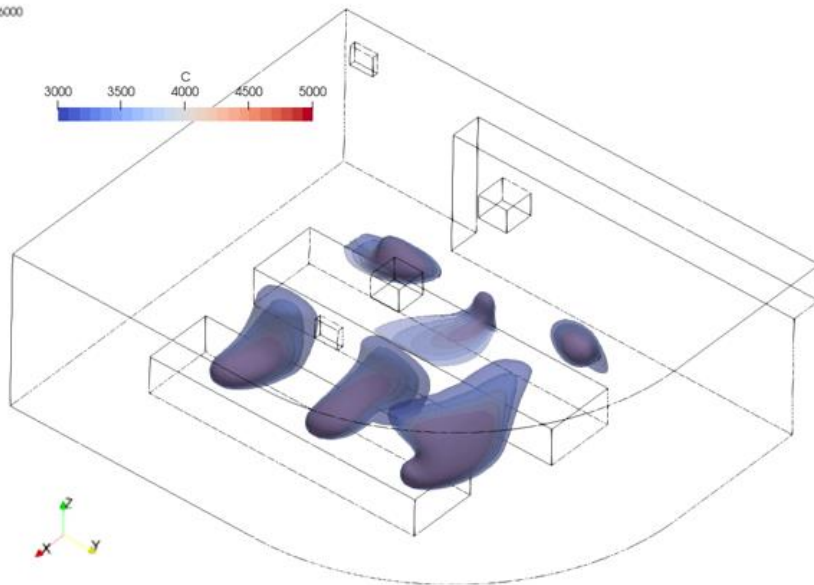
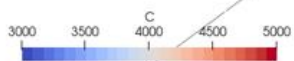


12. att. Koncentrācijas lauks gaisā pie $t = 100$ min. ar ieslēgtiem avotiem. Augšējais attēls: 3D skats, vidējais attēls: skats no augšas, apakšējais attēls: xz šķērs griezumus (atšķirīgas koncentrācijas skala).

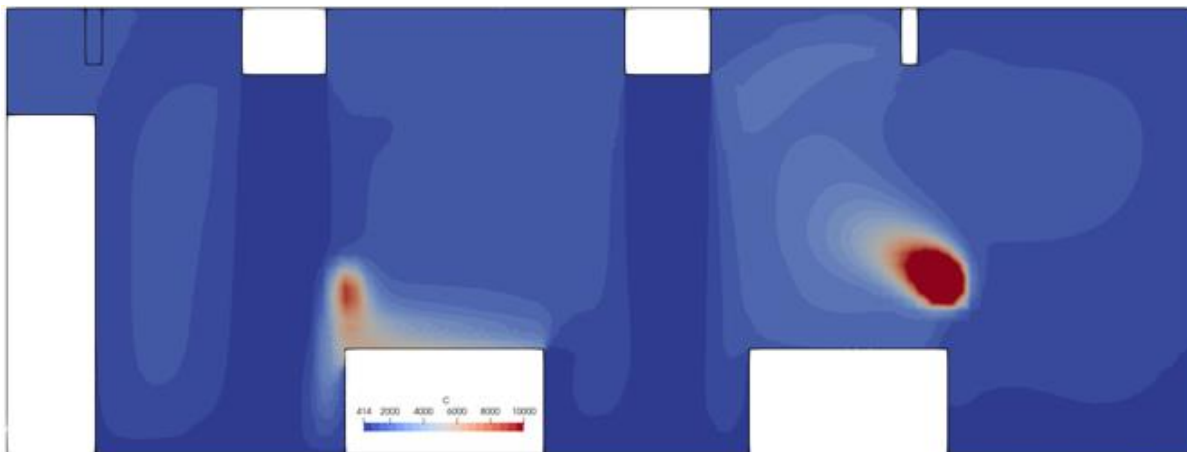
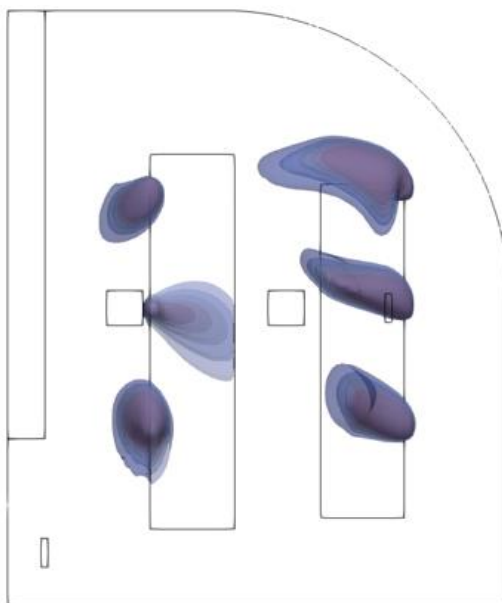
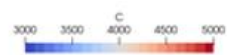




Time: 6000



Time: 6000

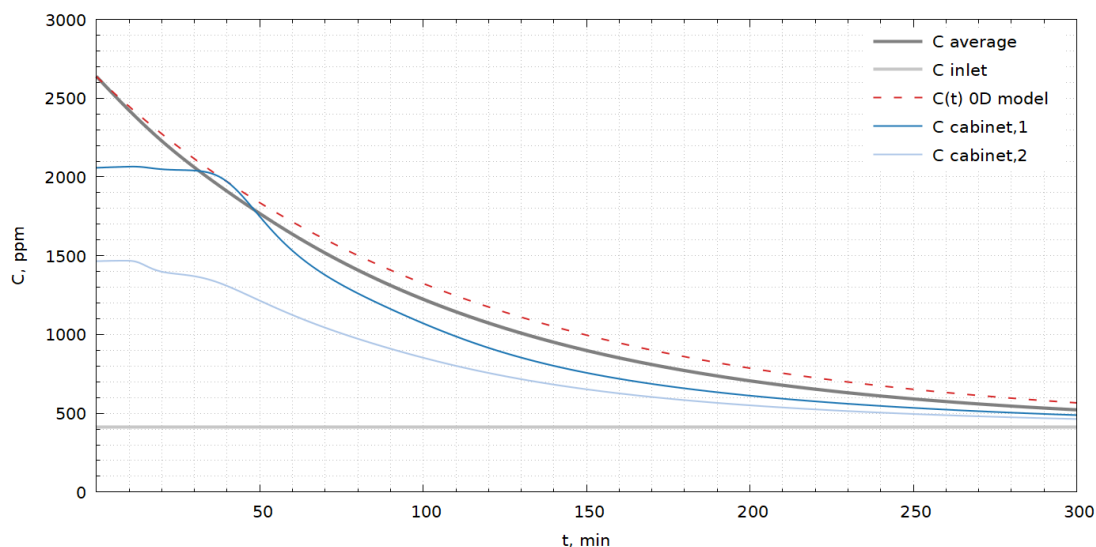




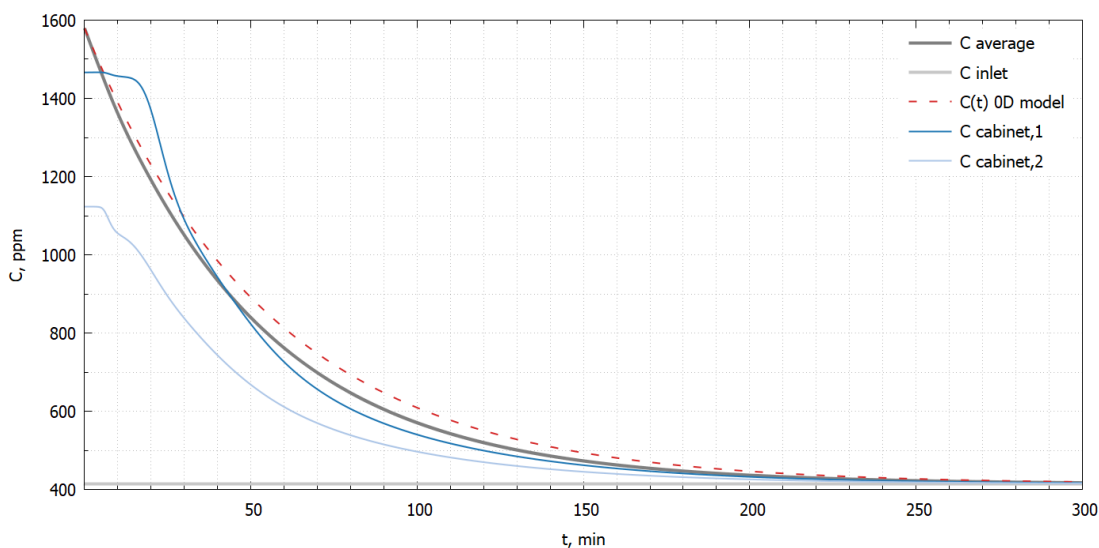
13. att. Koncentrācijas lauks gaisā pie $t = 100$ min. ar ieslēgtiem avotiem pie **paaugstināta** ventilācijas ātruma. Augšējais attēls: 3D skats, vidējais attēls: skats no augšas, apakšējais attēls: xz šķērsgriezums (atšķirīgas koncentrācijas skala).

Rezultāti - izslēgts koncentrācijas avots

Tika reģistrēts iepriekšējās simulācijas pēdējais punkts, un koncentrācijas avoti tika izslēgti (cilvēki atstāja telpu), kā rezultātā laika gaitā koncentrācija samazinājās. Rezultāti ar attēloti 14. un 15. attēlā. Tāpat kā iepriekš, OD modelis diezgan labi prognozē vidējās koncentrācijas atkarību no laika. Pastāv vēl ilgāka laika aizture, proti, 15–40 minūtes pirms koncentrācija skapja tuvumā sāk mainīties. Palielināta ventilācijas ātruma gadījumā aizture atkal sarūk, un koncentrācijas izmaiņu ātrums ir lielāks.



14. att. No laika atkarīgās koncentrācijas, sākot no zemas sākotnējās koncentrācijas un ar **izslēgtiem avotiem**. Zonde 1 un 2 atrodas telpas vidū attiecīgi virs un pie skapja.



15. att. No laika atkarīgās koncentrācijas, sākot no zemas sākotnējās koncentrācijas un **ar izslēgtiem avotiem** pie **paaugstināta** ventilācijas ātruma. Zonde 1 un 2 atrodas telpas vidū attiecīgi virs un pie skapja.



Kopsavilkums

Tika izveidots skaitliskais modelis stacionārās gaisa plūsmas un nestacionārā oglekļa dioksīda transporta aprēķinam reālā telpā. Skaitlisko simulāciju atvieglošanai, telpas ģeometrija tika vienkāršota, izlaižot dažas detaļas. Tiek aprēķināta tikai gāzes plūsma (ātrums, spiediens, turbulentie lielumi), bet temperatūras ietekme netiek aplūkota. Tika aplūkoti gadījumi ar atšķirīgu ventilācijas ātrumu, mainot ieplūdes tilpuma plūsmas ātrumu.

Spēcīgās strūkļas no ievadiem rada turbulentu plūsmu virzienā uz grīdu. Tā kā izvadu šķērsriezuma laukums ir mazāks nekā ievadu šķērsriezuma laukums, tad lielākais ātrums vērojams pie izvadiem. Ventilācijas ātruma izmaiņas ietekmē absolūtā ātruma vērtības, savukārt sadalījums lielākoties paliek nemainīgs.

Fiksēta ātruma laukā tiek uzskatīts, ka oglekļa dioksīda koncentrācija ir nestabila. Tika aplūkoti dažādi gadījumi: tukša telpa ar noteiktu sākotnējo koncentrāciju, aprēķini ar koncentrācijas avotiem, kas modelē cilvēka elpošanu, un koncentrācijas samazināšanās, kad koncentrācijas avoti tiek izslēgti.

Visos gadījumos vidējās oglekļa dioksīda koncentrācijas atkarība no laika atbilst analītiskajam novērtējumam. Koncentrācija skapju tuvumā sāk mainīties tikai pēc nelielas aizkaves, ko ietekmē ventilācijas ātrums. Palielināts ventilācijas ātrums ievērojami pazemina iegūto koncentrāciju un samazina augstas koncentrācijas reģiona izmēru gaisā.

Atsauces

[1] 2. pielikums. Jauna monitorēšanas sistēma. Rīgā, 2020. gada decembrī

[2] 3. pielikums. Skaitliskais modelis COVID-19 infekcijas riska prognozēšanai telpās. Tehniskais ziņojums. Rīgā, 2020. gada decembrī