

Universitatea Tehnica de Construcții București

Facultatea de Inginerie a Instalațiilor

Raportul II

Elaborarea unor modele numerice ale prototipului redus la scara 1:1 de cabină pentru astronauți

Doctorand

Matei-Răzvan GEORGESCU

Conducători de teză:

Ilinca NĂSTASE

Amina MESLEM

Aprilie 2019

I. Cuprins

I. CUPRINS	2
II. LISTA FIGURILOR	2
III. LISTA TABELELOR	4
IV. INTRODUCERE	5
V. TEORIE	8
VI. STUDII NUMERICE PE SUBIECTUL SSI.....	12
VII. MODELELE VIRTUALE	16
A. CQ: CIRCUITUL CU VENTILATOARE AXIALE.....	16
B. CQ: CIRCUIT VENTILATOARE TANGENȚIALE	18
C. CQ: CIRCUIT VENTILATOARE TANGENȚIALE ȘI PV	22
VIII. CARACTERIZAREA VENTILATOARELOR	25
IX. CQ SOLUTIE CU VENTILATOARE AXIALE	34
A. REPREZENTAREA VENTILATOARELOR ÎN DOMENIUL NUMERIC PRIN INTERMEDIUL COEFICIENȚILOR DE FORȚĂ.....	34
B. REZULTATE.....	35
X. CQ SOLUȚIE CU VENTILATOARE TANGENȚIALE	40
A. REZULTATE.....	41
XI. SOLUȚIA DE PV ȘI ACUMULAREA DE CO₂	49
XII. CONCLUZII ȘI POTENȚIALE DIRECȚII DE CERCETARE	57
XIII. BIBLIOGRAFIE	60

II. Lista figurilor

FIGURA 1 VARIAȚIA ÎN TIMP A PRESIUNII INSTANTANEE.....	9
FIGURA 2 CULOARUL SSI ȘI CQ.	12
FIGURA 3 MODELUL INTRODUS ÎN INTERIORUL CQ.	13
FIGURA 4 PLANUL MĂSURAT PENTRU CAZURILE CU RANS (A,B) ȘI LES (C).	14
FIGURA 5 INTERVALELE DE VITEZA PENTRU CAZURILE NUMERICE COMPARATE CU VALORILE EXPERIMENTALE.	14
FIGURA 6 CURBA DE FUNCȚIONARE A VENTILATORULUI AXIAL EBM-PAPST 4184 NXH (NUMĂRUL 3).	16
FIGURA 7 MODELUL CABINELOR DE ODIHNĂ, VEDERE CIRCUIT DE VENTILARE CU VENTILATOARE AXIALE.	17
FIGURA 8 MODELUL CABINELOR DE ODIHNĂ, VEDERE INTERIOARĂ, GRILA DE VENTILARE ȘI EVACUARE.	18

FIGURA 9 MODELUL CABINELOR DE ODIHNA, SOLUȚIE CU VENTILATOARE TANGENȚIALE, VEDERE EXTERIOARĂ.	19
FIGURA 10 MODELUL CABINELOR DE ODIHNA, SOLUȚIE CU VENTILATOARE TANGENȚIALE, VEDERE INTERIOARĂ.	20
FIGURA 11 CURBA CARACTERISTICĂ A VENTIATORULUI TANGENȚIAL EBM-PAPST QL43030-2124.	21
FIGURA 12 CURBA CARACTERISTICĂ A VENTILATORULUI TANGENȚIAL OM MFD930B-24.....	22
FIGURA 13 DIFUZORUL DE VENTILARE PERSONALIZATĂ.	23
FIGURA 14 AMPLASAREA SISTEMULUI DE VENTILARE PERSONALIZATĂ.....	23
FIGURA 15 STAND EXPERIMENTAL, VENTILATOR, SURSĂ ȘI TAHOMETRU.	25
FIGURA 16 STANDUL EXPERIMENTAL FOLOSIT DE NASA PENTRU CARACTERIZAREA VENTILATORULUI.	26
FIGURA 17 PRIZA DE PRESIUNE SI MANOMETRU DIFERENȚIAL.....	27
FIGURA 18 ANEMOMETRU CU FIR CALD.....	28
FIGURA 19 ORIFICII VARIABLE SI GRILA DE MĂSURA.....	29
FIGURA 20 PROFILURILE DE VITEZĂ PENTRU ORIFICIUL DE DIAMETRU 11 CM.....	30
FIGURA 21 PROFILURILE DE VITEZĂ PENTRU ORIFICIUL DE DIAMETRU 9 CM.....	30
FIGURA 22 COMPARAȚIE ÎNTRE CURBA PRODUCĂTORULUI ȘI CEA DETERMINATĂ EXPERIMENTAL PENTRU VENTILATORUL AXIAL.	31
FIGURA 23 COMPARAȚIE ÎNTRE CURBA PRODUCĂTORULUI ȘI CEA DETERMINATĂ EXPERIMENTAL PENTRU VENTILATORUL TANGENȚIAL.....	32
FIGURA 24 CURBA DE FUNCȚIONARE A VENTILATORULUI	36
FIGURA 25 CONTURUL VITEZELOR DUPĂ IMPUNEREA COEFICIENȚILOR DE FORȚĂ ÎN MODELUL NUMERIC.....	37
FIGURA 26 MĂSURĂTORI GRILĂ VENTILARE PE SSI [17].	38
FIGURA 27 REZULTATE NUMERICE ALE VITEZELOR LA IEȘIREA DIN GRILA DE VENTILARE.....	38
FIGURA 28 IZOSUPRAFEȚE ȘI CONTURURILE VITEZELOR ÎN PLANUL SAGITAL.	41
FIGURA 29 CONTURURILE VITEZELOR ÎN PLANURILE TRANSVERSALE.	42
FIGURA 30 CONTURURILE VITEZELOR ÎN PLANURILE CORONALE, VEDERE FRONTALĂ.	43
FIGURA 31 CONTURURILE VITEZELOR ÎN PLANURILE CORONALE, VEDERE DORSALĂ.	44
FIGURA 32 CONTURUL TEMPERATURII ÎN PLANUL CORONAL.	45
FIGURA 33 CONTURUL TEMPERATURII ÎN PLANUL SAGITAL.	46
FIGURA 34 VALORILE INDICELUI DRAFT RATE ÎN PLANUL SAGITAL.....	47
FIGURA 35 VALORILE INDICELUI DRAFT RATE ÎN PLANUL CORONAL.....	48
FIGURA 36 CIRCUITUL DE PV MONTAT PE STANDUL EXPERIMENTAL.....	49
FIGURA 37 DEBITMETRUL TSI ÎN TIMPUL MĂSURĂTORILOR.	50
FIGURA 38 FUNCȚIA SINUSOIDALĂ CARE GUVERNEAZĂ CICLUL RESPIRATOR ÎN MODELUL NUMERIC.....	51
FIGURA 39 ACUMULAREA DE DIOXID DE CARBON ÎNTR-O SITUAȚIE FĂRĂ VENTILARE ÎN CABINELE DE ODIHNĂ.	53
FIGURA 40 ACUMULAREA DE CO ₂ LA SFÂRȘITUL INSPIRAȚIEI ÎN SECUNDA 240 DIN SIMULARE.	54
FIGURA 41 VARIAȚIA PRESIUNII PARȚIALE DE CO ₂ PE O PERIOADĂ DE 60s.	55
FIGURA 42 TENDINȚA DE ACUMULARE A CO ₂ ÎN MOMENTUL EXPIRAȚIEI PE O DURATĂ DE 60s.	55

III. Lista tabelelor

TABELUL 1 PARAMETRII VENTILATORULUI AXIAL EBM-PAPST 4184 NXH.	16
TABELUL 2 PARAMETRII VENTILATORULUI TANGENȚIAL EBM-PAPST QL43030-2124.	20
TABELUL 3 PARAMETRII VENTILATORULUI TANGENȚIAL OM MFD930B-24.....	21
TABELUL 4 PUNCTELE DE FUNCȚIONARE ALE VENTILATOARELOR ÎN STANDUL EXPERIMENTAL..	33
TABELUL 5 TEMPERATURILE IMPUSE PE SUPRAFEȚELE MODELULUI UMAN.....	40
TABELUL 6 VITEZA AERULUI ȘI TEMPERATURA ATMOSFEREI INTERNE ARTIFICIALE DE PE SSI. .	41
TABELUL 7 VALOAREA PRESIUNII PARȚIALE DE CO ₂ LA DIFERITE MOMENTE ÎN TIMP.	56

IV. Introducere

Proiectul QUEST, finanțat de ROSA și regizat de CAMBI, vizează modificarea configurației de ventilație a CQ existente. Actuala teză de doctorat, care utilizează proiectul ca punct de plecare, propune un studiu aprofundat al subiectului atât din punct de vedere ingineresc, cât și din punct de vedere fenomenologic.

Problema circulației aerului în spațiul închis al cabinei poate fi comparată cu un studiu de ventilație într-o încăpere, dar este, de fapt, complicată de lipsa capacității de a reproduce cu precizie condițiile de funcționare (în special câmpul gravitațional extrem de slab). Cuplând acest lucru cu faptul că parametrii cabinelor de odihnă de pe stația spațială sunt evaluați doar indirect prin rapoartele astronautilor fără echipament special, înseamnă că orice încercare de a valida un model numeric utilizând aceste date este, în cel mai bun caz, orientativă.

Condițiile de funcționare de pe SSI sunt diferite de cele de pe Pământ, deci nu există un standard, în sensul convențional, pus în aplicare pentru a reglementa mediul artificial. Cel mai apropiat document disponibil este un manual de proiectare a navelor spațiale redactat de NASA pentru oricine intenționează să lanseze o expediție spațială [1]. Acest document este o sinteză a experiențelor echipelor de la NASA și include o gamă largă de subiecte variind de la efectele lipsei de gravitație asupra biologiei la mediul artificial creat sau optimizarea sistemelor de bord pentru ușurința utilizării de către membrii echipajului. Este cel mai complet document disponibil în prezent despre impactul mediului artificial asupra oamenilor și este documentul care a fost folosit de designerii CQ pentru a proiecta și evalua sistemul lor. Limitele parametrilor și indicațiile conținute în acest document vor fi luate în considerare în prezenta teză.

În ceea ce privește factorii de mediu relevanți pentru proiectul nostru, trebuie să considerăm problemele acustice și problemele legate de calitatea aerului (în special concentrațiile ridicate de CO_2) [2]. Potrivit mai multor rapoarte ale astronautilor, ei se confruntă adesea cu simptome de intoxicație cu dioxid de carbon atunci când se trezesc. Deși aceste rapoarte sunt pur subiective, toți astronautii sunt instruiți să recunoască simptomele sau diferitele stări de intoxicare care pot apărea în timpul unei misiuni extra-terestre. Rapoartele multiple care atribuie aceste simptome aceleiași probleme ne fac să concluzionăm că concentrația de CO_2 este într-adevăr peste limita impusă și că aceste rapoarte nu sunt doar rezultatul unei diferențe de toleranță personală.

În imponderabilitate, fluxul natural de aer convectiv datorat diferențelor de temperatură este practic inexistent. Acest lucru conduce în primul rând, la formarea de zone cu temperaturi ridicate în jurul elementelor de mediu generatoare de căldură (echipamente termoelectrice, corpul uman datorită metabolismului etc.) și, în al doilea rând, poate conduce la zone cu concentrații ridicate de componente gazoase atmosferice [3]. Astfel, toate vehiculele spațiale folosesc convecția forțată pentru a combate efectele negative ale imponderabilității. Sistemul SSI dispune de echipamente care permit descompunerea dioxidului de carbon în apă și compuși anorganici în diverse noduri și laboratoare prezente pe SSI, dar ele influențează doar indirect CQ, care au fost o adăugare ulterioară a SSI.

După o analiză mai amănunțită a situației, identificăm mai multe cauze ale acumulării de CO₂ dincolo de limita cerută. În primul rând, senzorii de concentrație a CO₂ care controlează sistemele de descompunere nu sunt plasați în interiorul cabinelor, ci pe coridorul SSI. Acumularea de CO₂ pe culoar este mai lentă decât în spațiul îngust al cabinei. Astfel, când concentrația atinge limita superioară pe coridor, ea a atins deja o valoare mai mare în spațiile restrânse în care astronauții se odihnesc sau lucrează. Acest lucru, totuși, este mai mult o observație asupra preciziei cu care putem determina concentrația de CO₂ la care astronauții sunt expuși în interiorul cabinei. Nu ar trebui să fie o problemă, deoarece viteza aerului din interiorul cabinei este suficientă pentru a preveni supra acumularea. Deși tubulatura introduce pierderi de sarcină considerabile în sistemul de ventilație datorită materialelor de etanșare și izolare fonică, acestea nu reduc viteza suficient pentru a fi o problemă. În plus, atunci când ventilatoarele rulează la viteză maximă, potrivit rapoartelor, simptomele de intoxicație cu dioxid de carbon sunt reduse. Însă, această soluție conduce la o creștere a nivelului de zgomot până la punctul în care afectează odihna astronauților. Acesta poate constitui un compromis rezonabil în funcție de toleranța personală la nivel de zgomot, dar nu este o soluție pe termen lung.

Cauza reală a acumulării de dioxid de carbon este limita maximă admisă impusă fără a lua în considerare mulți factori. În primul rând, după cum s-a menționat mai sus, cabinele echipajului au fost o adăugare suplimentară la SSI, care nu au fost luate în considerare în procesul inițial de proiectare, astfel încât limitele proiectate pentru coridoarele SSI sunt mult mai mari decât ar fi acceptabil într-un spațiu limitat precum cel al unităților de odihnă. În al doilea rând, studii suplimentare [4] arată că există și alți factori care interferează cu toleranța populației la concentrații ridicate de CO₂. Limitele admisibile sunt determinate de testele efectuate pe pământ în costume speciale. Ceea ce aceste teste nu iau în considerare este circulația sângelui într-un mediu micro gravitațional [4]. Gravitația contribuie la circulația sângelui, tinzând să favorizeze mișcarea sângelui spre picioare, reducând cantitatea de sânge prezentă în zona craniană. Într-un câmp gravitațional redus, circulația intracraniană este considerabil mai mare și prin cumularea acestui fapt, cu concentrația ridicată de CO₂ și faptul că CO₂ în sine are un efect vasodilatator conduce la apariția simptomelor de intoxicație la concentrații mult mai mici decât estimările inițiale ar fi sugerat [4].

Proiectul QUEST propune îmbunătățirea sistemului de ventilație prin înlocuirea ventilatorului axial și a conductelor deja existente cu un ventilator transversal. Această nouă soluție permite eliberarea spațiului alocat conductelor, oferind performanțe superioare din punct de vedere acustic și aerulic. Împreună cu această nouă soluție, este prezentat și studiul unui sistem de ventilație personalizat. Acest sistem ar putea fi utilizat de astronauți pentru a compensa diferențele în percepția confortului la nivel de individ.

Studiul numeric al comportamentului fluidelor (CFD) este esențial în înțelegerea unor fenomene care sunt în sine lor dificil de evaluat pe cale experimentală. Mecanica fluidelor, având de a face cu fenomenul de turbulență, prezintă incertitudini în domeniul studiat, datorate dificultăților de prezicere și calcul al acestui fenomen. Calculul numeric așadar, se folosește de diferiți algoritmi pentru estimarea turbulenței.

Prima etapă a lansării unei simulări numerice este reproducerea realității în domeniul virtual. Reproducerea tuturor fenomenelor necesită aplicarea algoritmilor de

calcul atât la scară mare cât și la scară mică. Pentru a surprinde aceste detalii, se folosește metoda volumelor finite. Aceasta constă în divizarea volumului modelului virtual, anterior menționat, într-o serie de volume mai mici printr-un proces numit discretizare. La nivelul acestor volume se va aplica algoritmul de calcul.

În ceea ce privește soluția numerică, există multiple modele simplificate, bazate pe legile hidrodinamicii care sunt folosite pentru a evalua curgerile. Aceste modele de multe ori au avantaje și slăbiciuni în funcție de domeniul studiat. Unele sunt folosite pentru a simula curgerea în stratul limită atmosferic, altele pentru spații închise sau pentru curgeri cu componente rotaționale importante. Deși teoria specifică domeniul de aplicabilitate corespunzător fiecărui model, acestea sunt foarte sensibile la condițiile la limită impuse fenomenului studiat oferind rezultate neașteptate. Este important ca rezultatele acestor simulări să fie validate cu ajutorul unor măsurători experimentale, această etapă reprezentând confirmarea că algoritmul folosit și condițiile impuse sunt corecte.

Deîndată ce modelul a fost validat în funcție de un criteriu relevant pentru fenomenul studiat (un debit, un profil de viteze, o concentrație de poluanți etc.) se poate trece la un studiu aprofundat al unor fenomene care în condiții reale ar necesita o investiție semnificativă de timp și echipamente de măsură. Din acest punct este de asemenea posibilă modificarea sistemului virtual pentru a-i studia performanțele în mai multe cazuri [5].

În contextul acestei teze de doctorat, utilizarea modelelor numerice este imperativă datorită imposibilității de a reproduce lipsa gravitației într-o instalație experimentală pe Terra. Multiple modele au fost propuse pentru studiul ventilării la interiorul cabinelor de odihnă (CQ). Primul reproduce sistemul real, utilizând ventilatoare axiale pentru a asigura debitul necesar; al doilea model va înlocui ventilatoarele axiale și tubulatura cu un sistem alcătuit din ventilatoare tangențiale datorită performanțelor acustice îmbunătățite și datorită economiei de spațiu obținute; al treilea model privește studiul unei soluții de ventilare personalizată cuplată cu alimentarea cu ventilatoare tangențiale. Ideea ultimului sistem este de a avea o modalitate de a înlătura CO_2 -ul acumulat în zona de respirație a astronautului.

V. Teorie

Acest capitol va trata teoria modelelor numerice cu ecuații mediate Reynolds. Cel mai precis mod de a executa o simulare numerică în mecanica fluidelor este simularea numerică directă, în care sunt rezolvate direct ecuațiile Navier-Stokes. Acest model necesită niște resurse considerabile în ceea ce privește puterea de calcul, ca atare este accesibil unui număr foarte mic de instituții pe plan mondial. Simularea numerică directă nu este în general folosită decât pentru aplicații care necesită un nivel de precizie deosebit.

Modelul matematic cel mai frecvent utilizat în aplicațiile ingineresti pentru calculul mișcărilor turbulente îl constituie ecuațiile mediate Reynolds, abreviate în engleză: RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*).

Toate metodele actuale utilizate în analiza mișcărilor turbulente aplică medierea statistică sau medierea spațială. Parametrii care descriu mișcarea unui fluid în regim turbulent prezintă caracteristicile unor variabile aleatorii [6].

Orice variabilă instantanee $a = a(t)$ care este dependentă de timp și spațiu, poate fi scrisă ca sumă între valoarea sa medie temporală $\bar{a}$ (mediată pe un interval de timp) și fluctuația $a'(t)$, adică:

$$a(t) = \bar{a} + a'(t) \quad (1)$$

Descompunerea (1) se numește *descompunerea Reynolds*. Media fluctuației este nulă: $\overline{a'} = 0$. Deoarece media temporală $\bar{a}$ este independentă de timp (ea depinzând numai de spațiu), orice ecuație în care aceasta va fi utilizată trebuie să fie staționară în medie.

Pentru viteză și presiune, vom utiliza următoarele descompuneri Reynolds:

$$\vec{v} = \vec{V} + \vec{v}' \quad (2)$$

cu următoarele componente în coordonate carteziane:

$$\begin{cases} v_x = V_x + v'_x \\ v_y = V_y + v'_y \\ v_z = V_z + v'_z \end{cases} \quad (3)$$

respectiv

$$p = \bar{p} + p' \quad (4)$$

În Figura 1 Variația în timp a presiunii instantanee. este prezentată variația în timp a presiunii instantanee $p(t)$, alături de palierul corespunzător presiunii medii și în aceeași figură este marcată fluctuația de presiune $p'(t)$ în raport cu valoarea medie $\bar{p}$.

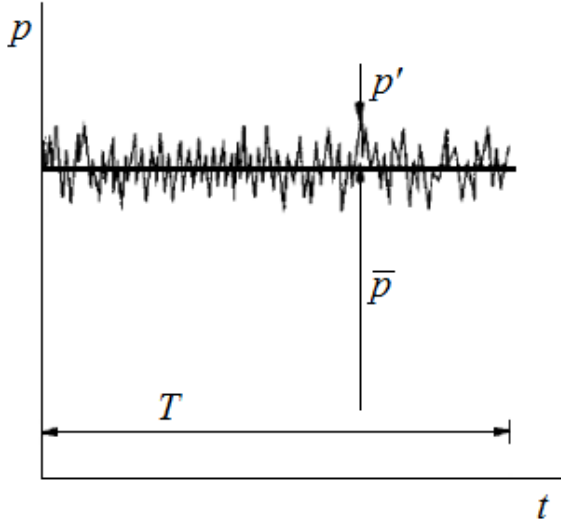


Figura 1 Variația în timp a presiunii instantanee.

Obținerea ecuațiilor mediate Reynolds presupune două faze: înlocuirea în ecuațiile Navier-Stokes a valorilor instantanee $\vec{v}$ și p cu descompuneri de forma (2) și (4), urmată de o mediere a ecuațiilor astfel rezultate.

Ținând seama de (2) și (4), pentru fluide incompresibile newtoniene, ecuația de impuls (3-7) mediată Reynolds se scrie:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \vec{V} + \nabla \cdot \overline{\tau^t} + \rho \vec{g} \quad (5)$$

unde toate variabilele sunt mărimi medii, iar $\overline{\tau^t}$ este tensorul tensiunilor turbulente, denumit și tensorul Reynolds.

În ecuația (5) apare divergența tensiunilor turbulente, datorate transportului de impuls prin fluctuații turbulente. Componentele tensorului $\overline{\tau^t}$ sunt tensiunile Reynolds τ_{ij}^t , definite sub forma:

$$\tau_{ij}^t = -\overline{\rho v_i' v_j'}, \text{ respectiv } \tau_{ii}^t = -\overline{\rho v_i'^2} \quad (6)$$

unde în coordonate carteziene indicii ij sunt pe rând: xy, xz, yz , iar indicii ii sunt: xx, yy, zz . Aceste tensiuni provin din neliniaritatea ecuațiilor Navier-Stokes. Tensorul Reynolds este simetric, adică: $\tau_{ij}^t = \tau_{ji}^t$.

Ecuațiile mediate Reynolds în coordonate carteziene se obțin proiectând ecuația (5) pe axele sistemului de coordonate, adică:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 V_x - \\ -\rho \left(\frac{\partial \overline{v_x' v_x'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v_x' v_y'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v_x' v_z'}}{\partial z} \right) + \rho g_x, \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 V_y - \rho \left(\frac{\partial \overline{v'_y v'_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'_y v'_y}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'_y v'_z}}{\partial z} \right) + \rho g_y, \quad (7b)$$

respectiv

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 V_z - \rho \left(\frac{\partial \overline{v'_z v'_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'_z v'_y}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'_z v'_z}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (7c)$$

Operatorul lui Laplace din sistemul (7) este definit sub forma: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$.

Ecuatiilor mediate Reynolds (7) li se adaugă și ecuația continuității, care aici se scrie:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0, \text{ adică } \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Din ecuațiile cantității de mișcare nu se pot obține informații asupra schimbului de impuls dintre mișcarea medie și cea fluctuantă, deoarece media impulsului mișcării fluctuante este nulă.

Energia cinetică a fluctuațiilor turbulente, denumită și energie cinetică turbulentă (pe unitatea de masă), se notează k și pentru un fluid incompresibil este definită sub forma [7]:

$$k = \frac{1}{2} \langle v'_i v'_i \rangle \quad (9)$$

unde operatorul $\langle \cdot \rangle$ este un operator de mediere statistică. În coordonate carteziene, energia cinetică turbulentă se scrie sub forma:

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{v'^2_x} + \overline{v'^2_y} + \overline{v'^2_z} \right) \quad (10)$$

"Rata de variație în timp a energiei cinetice turbulente conținută într-un volum de control antrenat de mișcarea medie este egală cu suma dintre: (a) puterea de deformare a tensiunilor turbulente; (b) puterea disipată de fluctuații prin efectul vâscozității; (c) puterea transportată prin difuzie sub acțiunea presiunii, vâscozității și turbulenței." [8]

Prin definiție, rata disipației turbulente pe unitatea de masă se notează cu ε și depinde de derivatele fluctuațiilor de viteză $\partial v'_i / \partial x_j$ și $\partial v'_j / \partial x_i$, respectiv este direct proporțională cu vâscozitatea cinematică $\nu = \mu / \rho$:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left\langle \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i} \right), \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i} \right) \right\rangle \quad (11)$$

Fizic, energia cinetică turbulentă este disipată datorită lucrului mecanic efectuat de către eforturile vâscoase fluctuante, care se opun deformării particulelor fluide.

Modelarea turbulentă cere ca tensiunile Reynolds să fie estimate corect. O metodă populară este folosirea *ipotezei Boussinesq*, care leagă tensiunile turbulente de variația vitezei medii, cu o relație scrisă pentru fluide incompresibile sub forma:

$$-\rho \overline{v'_i v'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (12)$$

unde:

vâscozitatea turbulentă μ_t este proporțională cu k^2 și invers proporțională cu ε ;

δ_{ij} este simbolul delta al lui Kronecker; acesta are următoarele valori:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{pentru } i \neq j \\ 0 & \text{pentru } i = j \end{cases} \quad (13)$$

Ipoteza Boussinesq este folosită în modelele de turbulență $k - \varepsilon$ și $k - \omega$, în care ω este rata disipației turbulente specifice (sau frecvența), definită prin relația: $\omega = \varepsilon/k$ [63].

Modelele de turbulență cu două ecuații de transport sunt, în prezent, cele mai frecvent utilizate în aplicațiile ingineresti. Prima ecuație privește transportul energiei cinetice turbulente, iar cea de-a doua este legată de determinarea scării de lungimi [9].

Cele mai cunoscute modele de turbulență cu două ecuații de transport sunt modelul $k - \varepsilon$ și modelul $k - \omega$. Dacă modelul $k - \varepsilon$ conține ecuația disipației turbulente, care reprezintă rata distrugerii energiei cinetice turbulente, modelul $k - \omega$ înglobează doar rata specifică la care se produce disipația. Validarea rezultatelor experimentale se va face folosind unul dintre aceste doua modele de turbulenta, in funcție de care da rezultate mai bune. In mod teoretic modelul $k - \omega$ ar trebui sa fie cel mai potrivit pentru studiul acestei teze, însă rezoluția grilei de calcul joaca un rol extrem de important in fiabilitatea modelelor de turbulenta.

VI. Studii numerice pe subiectul SSI

Primul studiu [3] privește ventilarea în vechile spații de odihnă în situația în care astronautul este prezent la interior, iar sistemul de ventilare este oprit. Scopul acestui studiu a fost să evalueze riscul de asfixiere în cazul în care sistemul local de ventilare de la interiorul cabinei se defectează și rămâne funcțional doar cel de pe culoarul SSI (Fig. 16). S-a folosit un model simplificat pentru astronautul din interiorul cabinei. Sursa de dioxid de carbon este reprezentată de nasul omului din interiorul cabinei.

Simularea a fost realizată în regim permanent pentru cazul inițial pe baza căruia ulterior s-a efectuat o simulare în regim tranzient. Pasul de timp pentru aceste rulări a fost de 0.2 s. Pentru a reprezenta circulația aerului pe culoarul SSI, pentru distribuțiile de aer s-a folosit condiția la limita de velocity inlet, cu valorile vitezei și direcția corespunzătoare celor din realitate. Viteza medie la nivelul fiecărui difuzor este calculată pe baza debitului pe care acesta trebuie să îi asigure. Intensitatea turbulentă și scara lungimilor sunt specificate pentru a caracteriza curgerea la introducerea pe baza unor ecuații determinate empiric.

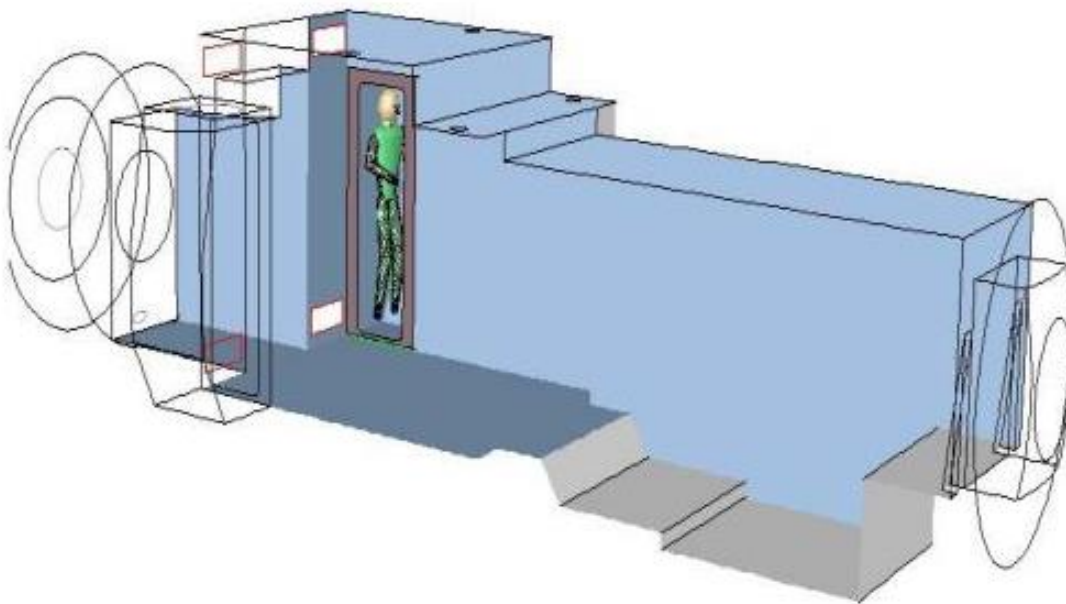


Figura 2 Culoarul SSI și CQ.

Datorită variațiilor mici de presiune în atmosfera internă a SSI, fluidul (aerul) este considerat ca fiind incompresibil. După specificarea condițiilor la limită, softul de CFD este utilizat pentru a rezolva ecuațiile pentru conservarea masei, a vitezei și substanței. Modelul de turbulență folosit este K-E standard.

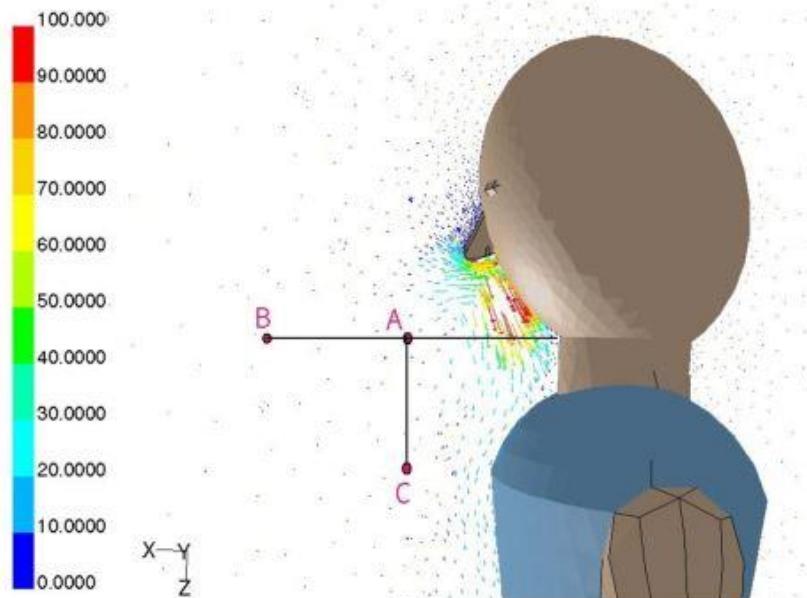


Figura 3 Modelul introdus in interiorul CQ.

Emisiile de CO_2 au fost impuse în funcție de debitul specificat de NASA pentru volumul expirat zilnic, numărul de respirații pe minut și durata medie a unei expirații (Figura 3 Modelul introdus în interiorul CQ.. Nările sunt reprezentate prin niște cercuri cu suprafața de ordinul de mărime a unei nări. Aceasta informație este folosită pentru calculul fracției volumice de dioxid de carbon. Viteza aerului la nivelul narilor este calculată folosind volumul de aer inspirat.

În cadrul acestui studiu numeric nu se găsesc informații legate de validarea experimentală a acestui model, lucru normal deoarece ar supune membrii echipajului unui risc considerabil. Nu este de asemenea prezentată explicit nici o informație legată de gradul de convergență la care s-a ajuns în timpul simulării. Din faptul că acest articol a fost citat ulterior în NASA HIDH [1], privind acumularea dioxidului de carbon indică faptul că rezultatele au fost acceptate ca fiind corecte în ciuda lipsei validării. În concluzie fie validarea experimentală se regăsește într-un raport intern NASA care nu este accesibil publicului, fie nu a fost efectuată indicând un grad mare de încredere în posibilitatea soluției numerice de a reprezenta cu acuratețe lipsa gravitației.

Următoarele studii [10]–[15] vor fi grupate împreună din mai multe considerente. În primul rând sunt doar tangențial legate de subiectul tezei, scopul lor fiind agregarea metodelor numerice folosite în studiul ventilării la bordul SSI. În al doilea rând, toate articolele prezentate sunt redactate de către același grup de oameni de știință, ca atare majoritatea sunt studii de aprofundare pentru sistemul de ventilare de pe culoarul stației spațiale.

Cel mai important din această serie de articole [14] este un studiu al diferitelor modele simplificatoare pentru a evalua performanțele lor. Rezultatele experimentale cu care acest studiu se compară fac parte dintr-un raport intern realizat de Daimler-Chrysler Aerospace pentru NASA. Au fost comparate două cazuri, primul realizat cu un model

RANS (K-E standard cu funcții standard la perete) de simulare a turbulentei, cel de-al doilea cu modele LES Figura 4.

Calcululele au fost efectuate pe o grila de calcul de 1,7 milioane celule, cu scheme de aproximare de gradul 2 pentru rezolvarea algoritmului de cuplare a presiunii si vitezei. Regimul a fost tranzitoriu, curgerea desfășurându-se pe o perioada de circa 500 s, datele statistice fiind colectate si procesate pentru cca. 350 s. S-au extras informații despre viteza medie si viteza mediata in timp atât pentru întreg câmpul curgerii cat si pentru o serie de puncte experimentale ce corespund cu datele experimentale.

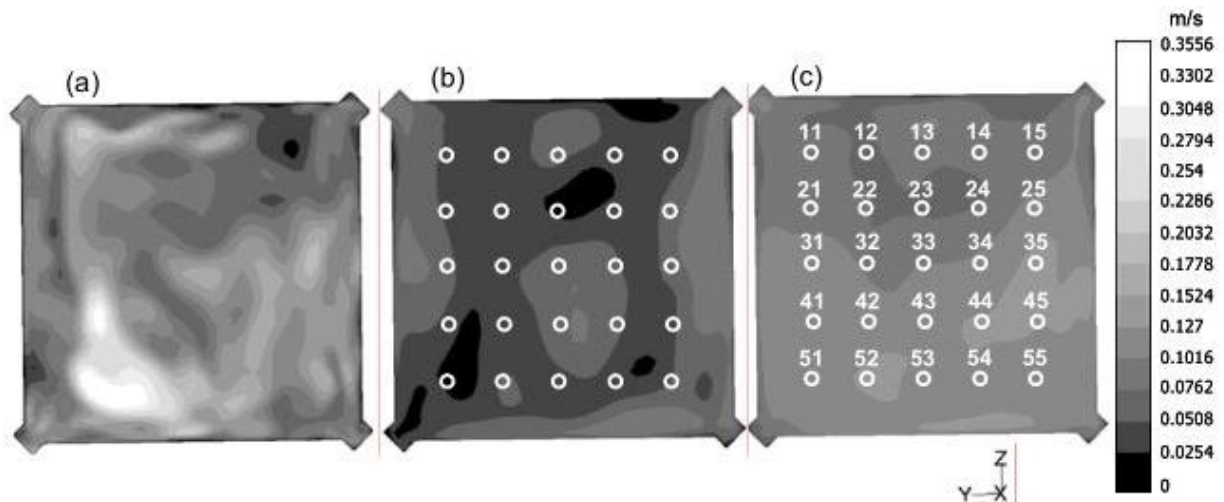


Figura 4 Planul măsurat pentru cazurile cu RANS (a,b) si LES (c).

Valorile vitezei aerului la interior au fost împărțite in 4 intervale de viteza si s-a comparat procentajul de vectori ai vitezei pentru fiecare interval cu rezultatele experimentale atât pentru întregul câmp cat si pentru punctele experimentale Figura 5. S-a observat ca modelul LES a generat rezultate foarte apropiate de măsurătorile experimentale. Vitezele mediate in timp sunt calculate separat pentru cazul RANS, deoarece spre deosebire de LES acesta nu oferă in mod direct decât viteza medie. Luând in considerare timpul si puterea de calcul necesara pentru rulara unui model LES, s-a decretat ca modelul RANS este aplicabil cu o metoda adecvata de mediere a vitezei.

	Velocity Magnitude (m/s)							
	Below 0.036		0.036 – 0.076		0.076 – 0.203		0.203 – 1.016	
	V _m	V _a	V _m	V _a	V _m	V _a	V _m	V _a
Case 1, whole interior	19.3%	3.0%	49.3%	26.4%	27.6%	62.3%	3.8%	8.3%
Case 2, whole interior	17.6%	1.0%	45.4%	17.6%	32.6%	72.9%	4.4%	8.5%
Case 2, exp. points	13.7%	0.0%	44.3%	6.3%	37.5%	82.4%	4.5%	11.3%
Case 3, whole interior	13.5%	0.9%	46.5%	20.7%	36.0%	72.2%	4.0%	6.2%
Case 3, exp. points	7.1%	0.0%	51.0%	13.2%	35.4%	78.2%	6.5%	8.6%
Experimental Data	0.0%		13.5%		79.7%		6.8%	

Figura 5 Intervalele de viteza pentru cazurile numerice comparate cu valorile experimentale.

Toate celelalte articole [10]–[13], [15] folosesc recomandările elaborate anterior [14]. Fiind toate o varianta a aceluiași studiu, metodele folosite și rezultatele obținute vor fi agregate și prezentate sumar.

Problema a fost rezolvată tranzient pentru o bună reprezentare a distribuției dioxidului de carbon pe culoarul SSI. Grila de calcul folosește celule poliedrale pentru a reduce numărul de celule necesare față de grilele cu celule tetraedrele sau hibride. Modelul de turbulență este K-E standard, cu funcții standard la perete, constanta de model a fost în general crescută cu circa 70% pentru a îmbunătăți convergența modelului. Distanța de la perete a primei celule (y^+) este între 20 și 50. Soluțiile au fost calculate folosind scheme de aproximare de gradul doi. Convergența a fost determinată în punctul în care criteriul ajunge să fie cu 5 ordine de mărime mai mic decât rezultatul inițial. Durata simulării tranziente este de aproximativ 16 ore cu un pas de timp între 0.1 și 2 secunde.

VII. Modelele virtuale

a. CQ: circuitul cu ventilatoare axiale

În cabinele de odihnă de pe SSI, ventilarea este asigurată de două ventilatoare axiale montate în serie [16]. S-a optat pentru acest tip de montaj din motive de siguranță, fiecare dintre ventilatoare fiind capabil să asigure de unul singur aportul de aer necesar pentru evitarea riscului de asfixiere (0,076 – 0,6 m/s) [1].

Tabelul 1 Parametrii ventilatorului axial EBM-Papst 4184 NXH.

Voltaj nominal	24	V
Turație nominală	4400	RPM
Debit	237	m ³ /h

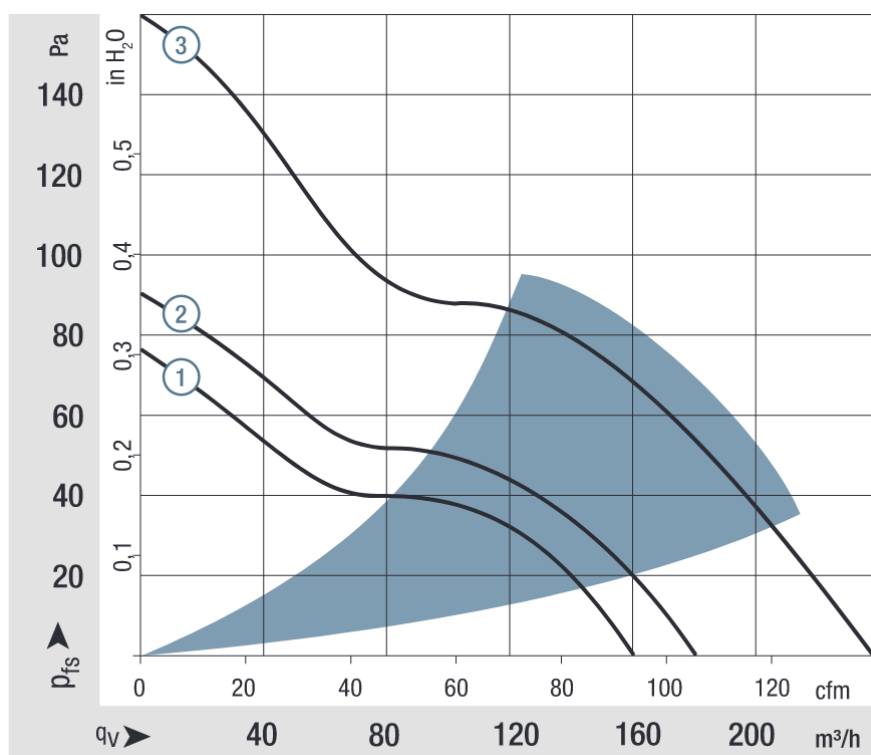


Figura 6 Curba de funcționare a ventilatorului axial EBM-PAPST 4184 NXH (numărul 3).

Atât circuitul de aspirație cât și cel de extracție prezintă coturi la 180°, introduse din considerente acustice. Aceste prelungiri, cuplate cu izolația acustică interioară a tubulaturii, duc la reducerea nivelului de zgomot.

S-a optat pentru reproducerea modelului la scara 1:1 în întregime în domeniul virtual. Reprezentarea circuitului de ventilare în întregime (Figura 7, Figura 8) permite un studiu foarte apropiat de fenomenologia reală. Ventilatoarele axiale sunt reprezentate în modelul virtual cu ajutorul unui ansamblu de 2 cilindri concentrici, cel interior

reprezentând centrul solid al rotorului, iar cel exterior zona palelor. Zonele de legătura cu mediul ambiant sunt reprezentate de aspirația și respectiv refularea modelului.

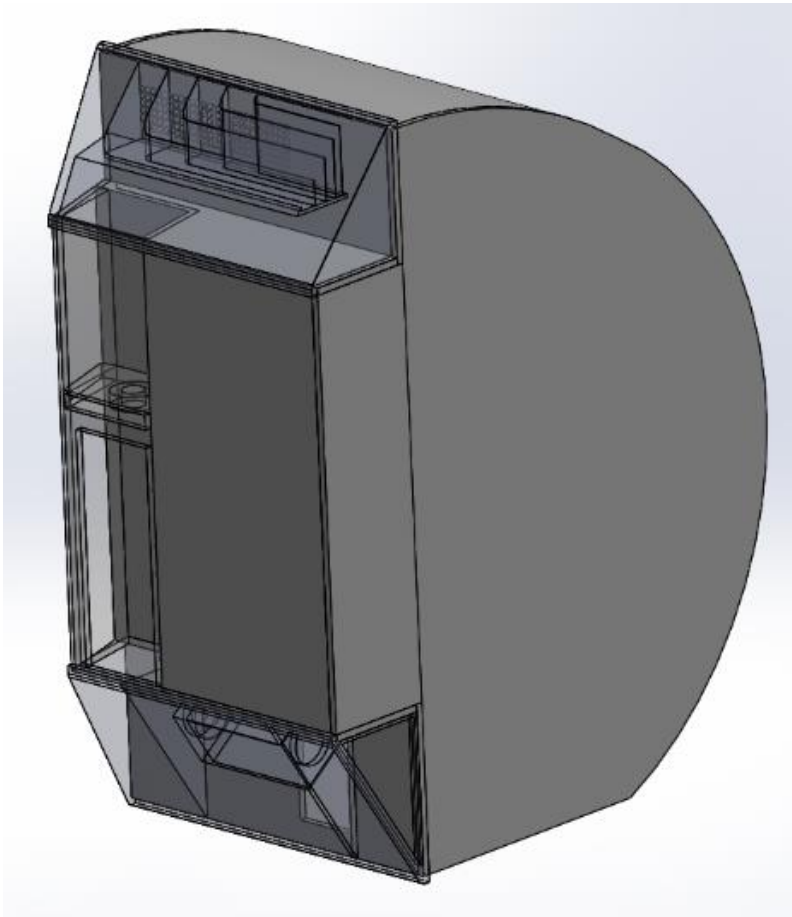


Figura 7 Modelul cabinelor de odihna, vedere circuit de ventilare cu ventilatoare axiale.

În literatură găsim măsurători ale vitezelor la refularea grilei de ventilare în interiorul CQ [17]. Nu este specificat instrumentul de măsură folosit pentru a obține aceste valori, iar în ceea ce privește metoda experimentală este specificat că măsurătorile au fost efectuate în centrul fiecărui orificiu al grilei. Aceste rezultate vor fi prezentate într-un capitol ulterior.

Reproducerea modelelor în detaliu incluzând circuitul de ventilare, aripioarele de direcționare a aerului are ca scop surprinderea dinamicii curgerii în interiorul circuitului. De asemenea poate fi folosit pentru a verifica dacă presupunerile legate de dimensiunile elementelor din interiorul circuitului au fost corecte. Pentru a aminti, în literatură nu sunt specificate dimensiunile exacte ale aripioarelor de direcționare și ale elementelor interne ale circuitului în general. Acestea au fost estimate utilizând imaginile disponibile cu circuitul și folosind ca unitate de referință, o lungime cunoscută din literatură (lățimea cabinei spre exemplu). Dacă presupunerile au fost corecte, dinamica fenomenului ar trebui reprodusă în mod corespunzător de către modelul numeric.

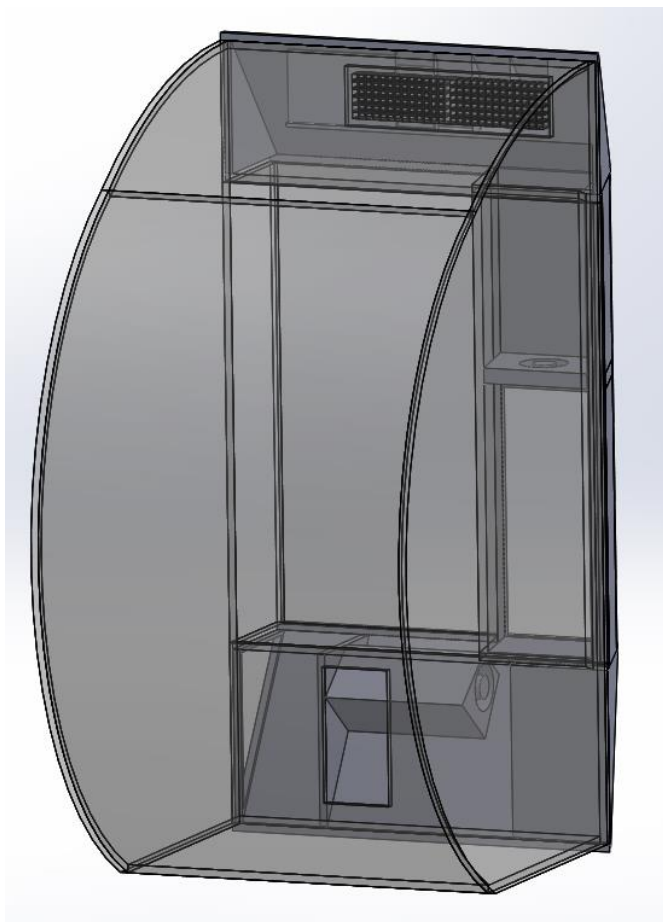


Figura 8 Modelul cabinelor de odihna, vedere interioara, grila de ventilare și evacuare.

b. CQ: circuit ventilatoare tangențiale

S-a procedat într-o manieră similară pentru soluția cu ventilatoare tangențiale. În acest caz circuitul de ventilare este cuprins în plenumurile din partea superioară respectiv inferioară a ușii de acces. Datorită faptului că rotorul ventilatoarelor tangențiale nu are o parte solidă semnificativă în direcția de curgere a aerului, se poate omite reprezentarea prin cilindrii utilizată în cazul ventilatoarelor axiale.

Din considerente constructive (forma și dimensiunile ventilatorului tangențial) s-a optat pentru instalarea ventilatorului cu aspirația montată în legătură directă cu culoarul. Alternativa ar fi fost montarea lui cu refularea legată direct la grila de ventilare din CQ lucru care ar fi impus probleme din cauza spațiului restrâns al plenumului care nu ar fi permis construirea unui difuzor între ventilator și grilă. S-a luat de asemenea în considerare alimentarea unui sistem de ventilare personalizată (PV) din același plenum lucru care ar fi fost imposibil dacă refularea ventilatorului ar fi fost în legătură directă cu grila de ventilare.

În condițiile actuale ventilatorul refulează în plenum, iar aerul intră în CQ datorită diferenței de presiune. Dacă diferența de presiune este suficient de mare, se poate evita apariția unui fenomen de distribuție asimetrică pe grilă.

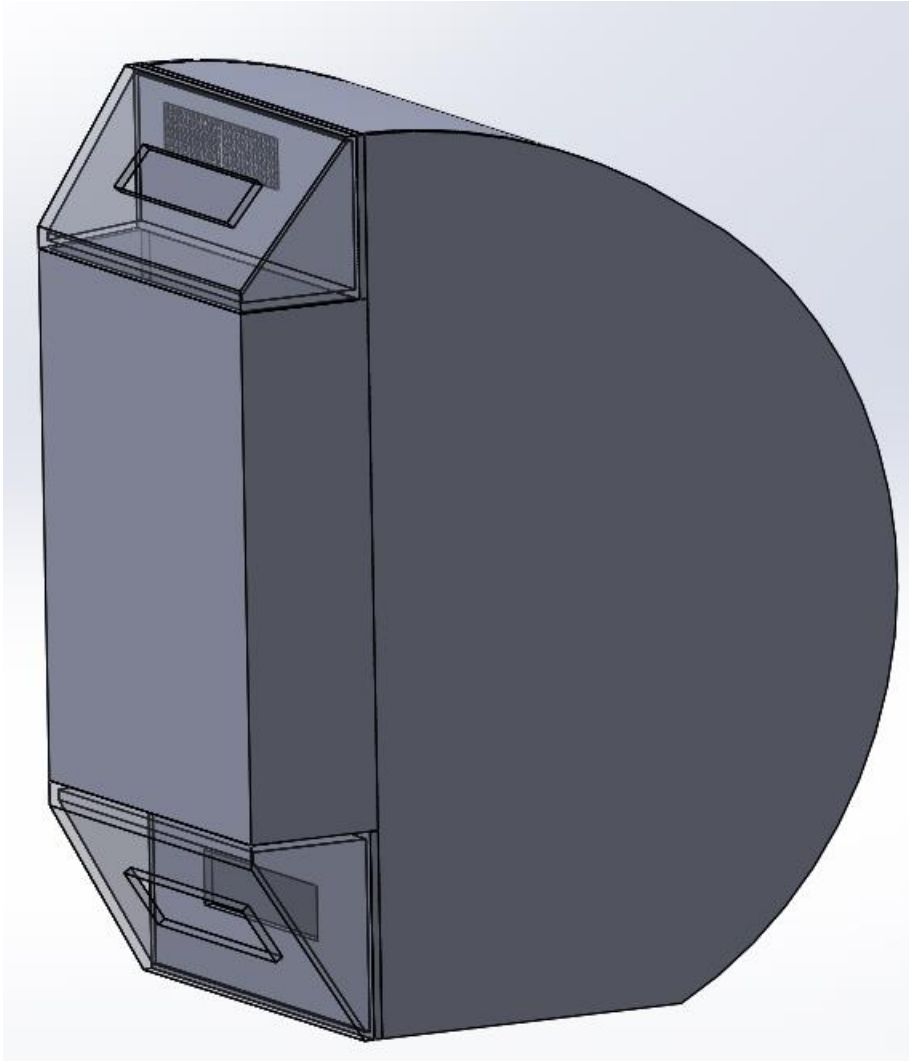


Figura 9 Modelul cabinelor de odihna, soluție cu ventilatoare tangențiale, vedere exterioară.

Se poate observa în Figura 9 **Error! Reference source not found.** spațiul eliberat la interiorul CQ unde în Figura 8 **Error! Reference source not found.** se afla circuitul de ventilare. Acest spațiu eliberat va putea fi folosit pentru depozitarea altor echipamente sau obiecte personale ale astronautilor. Pe lângă spațiul eliberat trebuie luată în calcul și reducerea greutății cabinei. În dezvoltarea echipamentelor și modulelor pentru explorarea spațiului greutatea materialelor este un criteriu foarte important deoarece o greutate redusă duce la o economie considerabilă de combustibil.

Efectul acustic al proximității ventilatorului față de capul astronautului va fi compensat de performanțele acustice superioare ale ventilatoarelor tangențiale. O evaluare cantitativă a acestor efecte va fi determinată în urma unei campanii de măsurători experimentale, urmărind metodologia folosită de NASA în etapa de proiectare a CQ [2], [16].

S-au luat în considerare două tipuri de ventilatoare tangențiale, unul dublu cu motorul situat la mijloc și câte un ventilator de-o parte și de alta și un alt ventilator simplu cu motorul montat lateral.

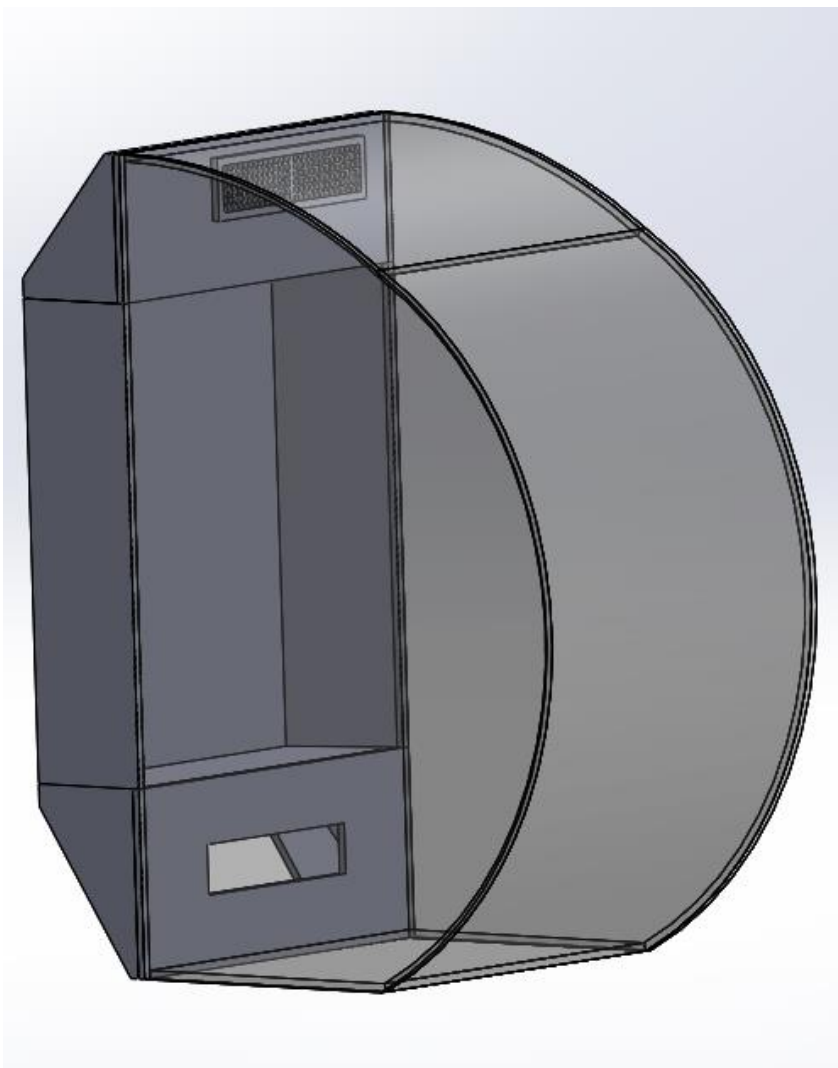


Figura 10 Modelul cabinelor de odihna, soluție cu ventilatoare tangențiale, vedere interioară.

Producătorul EBM-Papst a fost ales de către NASA pentru fiabilitatea și eficiența energetică a echipamentelor produse. Pentru a respecta parametrii aeraulici ai necesari pentru ventilarea CQ a fost necesară alegerea unui ventilator tangențial dublu din catalogul producătorului (EBM-Papst QL43030-2124) [2].

Tabelul 2 Parametrii ventilatorului tangențial EBM-Papst QL43030-2124.

Voltaj nominal	230	V
Turație nominală	1500	RPM
Debit	190	m ³ /h

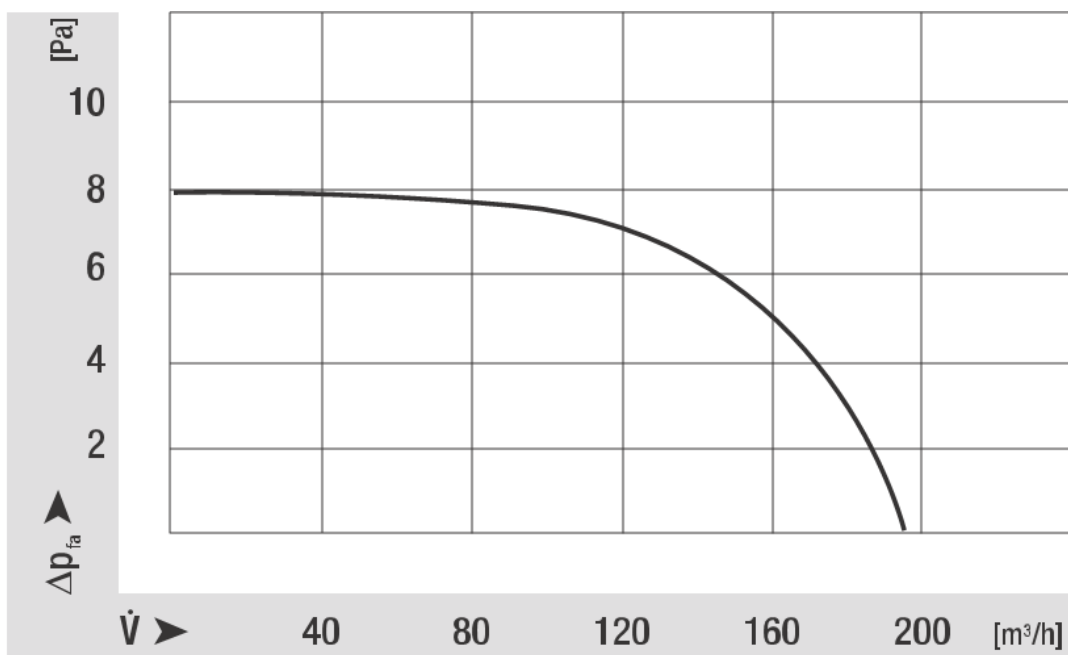


Figura 11 Curba caracteristică a ventilatorului tangențial EBM-Papst QL43030-2124.

Dezavantajul acestei soluții constă în alimentarea electrică a acestuia, fiind alimentat cu 230V curent alternativ iar SSI funcționează pe circuite de curent continuu. Deși din punct de vedere aerulic, performanțele ventilatorului ar trebui să fie identice pentru o anumită turație indiferent de modul de alimentare, s-a optat pentru alegerea unei soluții alternative, un ventilator tangențial care funcționează direct în curent continuu la o tensiune nominală de 24V, aceeași alimentare folosită de ventilatoarele axiale de pe SSI.

S-a ales ventilatorul tangențial Oriental Motors(OM) MFD930B-24.

Tabelul 3 Parametrii ventilatorului tangențial OM MFD930B-24.

Voltaj nominal	24	V
Turație nominală	2100	RPM
Debit	312	m³/h

Deși debitul necesar poate fi asigurat de ambele modele alese, acestea prezintă o serie de diferențe. În primul rând modelul de la EBM-Papst fiind un ventilator dublu, va avea debitul furnizat împărțit în două jeturi separate datorită prezenței motorului la mijlocul ventilatorului. Un astfel de fenomen este de așteptat datorită geometriei grilei de ventilare, însă există posibilitatea de agravare a situației. Lungimea unui ventilator dublu trebuie de asemenea luată în considerare datorită faptului că plenumurile unde ventilatoarele urmează a fi amplasate au dimensiunile constrânse de modulele folosite pe SSI, fără posibilitatea de a lărgi spațiul de amplasare. Ventilatorul de la OM, fiind simplu elimină această problemă însă prezintă instabilități pe caracteristica ventilatorului la debitele necesare pentru aplicații pe SSI (între 100-160 m³/h) [17], [18]. Are avantajul de a fi utilizabil pentru aplicațiile destinate explorării spațiale datorită alimentației în curent continuu, aceeași alimentare permițând și un reglaj al turației și implicit al debitului.

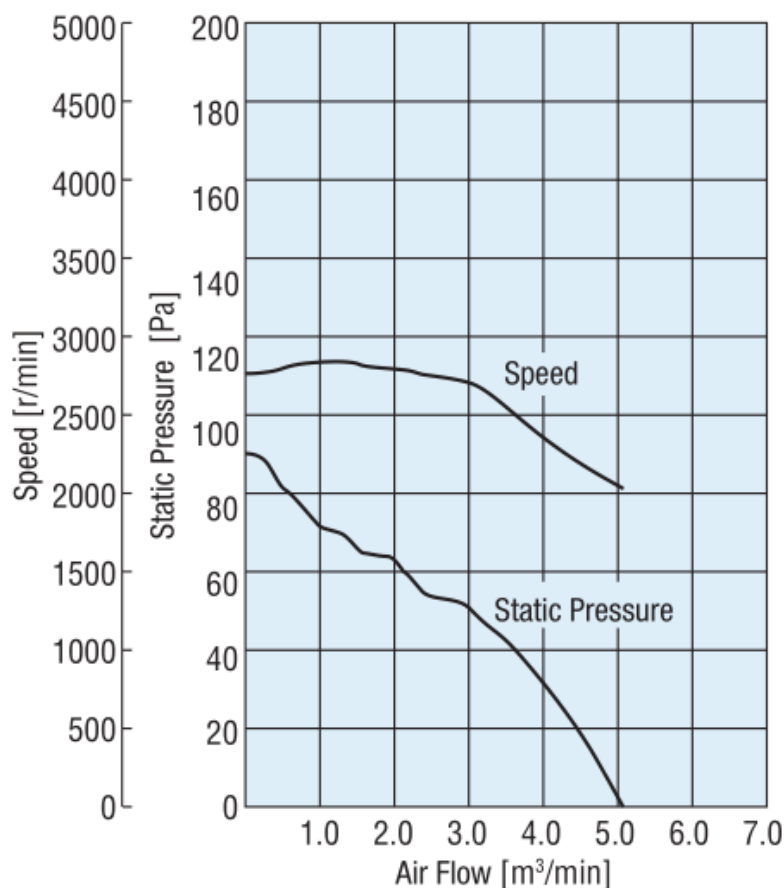


Figura 12 Curba caracteristică a ventilatorului tangențial OM MFD930B-24.

c. CQ: circuit ventilatoare tangențiale și PV

Alegerea ventilatoarelor tangențiale pe lângă eliberarea spațiului destinat tubulaturii și performanțele acustice superioare față de ventilatoarele axiale trebuie să asigure un nivel adecvat de CO₂ în interiorul CQ. Criteriile NASA privind acest subiect specifică o anumită plajă de viteze care trebuie respectată în tot volumul de aer din CQ. Acest criteriu nu vizează acumulările locale de CO₂. Studiul bibliografic ne face referire la astfel de acumulări în zona de respirație a astronautilor în timpul somnului. Pentru a rezolva această problemă doar cu sistemul de ventilare general este necesară reorientarea acestuia către capul astronautului. O astfel de soluție poate da naștere unei senzații de disconfort în timpul somnului, iar reducerea debitului suficient de mult pentru a evita acest fenomen duce la nerespectarea criteriilor de ventilare în interiorul cabinei.

O soluție propusă este utilizarea unui sistem de ventilare personalizată (PV) care va asigura un aport de aer proaspăt la nivelul zonei de inhalare, cu o viteză suficient de mică pentru a evita orice posibilă senzație de disconfort. Sistemul de PV este prezentat în Figura 13 și Figura 14, s-a optat pentru un difuzor lobat în formă de margaretă pentru un mai bun amestec al aerului furnizat [19].

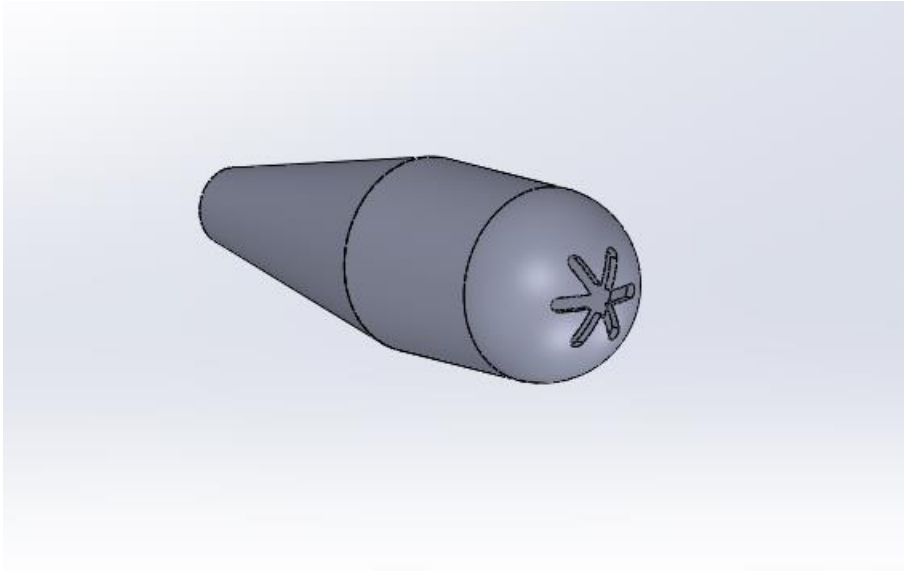


Figura 13 Difuzorul de ventilare personalizată.

Difuzorul lobat are un diametru echivalent $D_e = 3$ cm. Va fi amplasat la $2D_e$ de zona de respirație a astronautului. Alimentarea difuzorului se va face prin intermediul ventilatoarelor tangențiale din plenumul CQ. Vehicularea aerului prin circuitul difuzorului se va produce datorită diferenței de presiune dintre plenum și interiorul cabinei. Datorită faptului că debitul este asigurat în mod pasiv prin circuitul de PV valoarea acestuia depinde de dimensiunea racordului de PV.

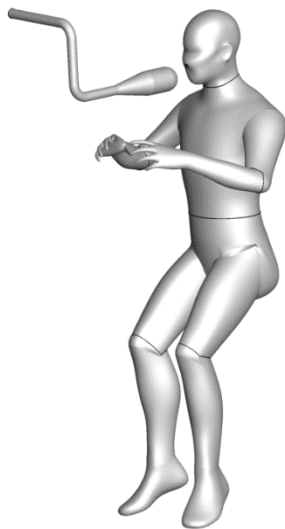


Figura 14 Amplasarea sistemului de ventilare personalizată.

Debitul asigurat este mai mic decât valorile specificate în literatură pentru ventilarea personalizată ($54 \text{ m}^3/\text{h}$) [20]. Acest lucru nu este un impediment deoarece în cazul de față scopul nu este asigurarea întregului necesar de aer proaspăt necesar unei

persoane, acest necesar fiind acoperit deja de ventilarea generală datorită volumului mic al cabinei (cca 2m³).

Pentru o bună evaluare a debitului furnizat de sistemul de ventilare personalizată este necesară o evaluare în detaliu a performanțelor ventilatoarelor alese și a sistemului instalat.

VIII. Caracterizarea ventilatoarelor

Principala metodă de evaluare a ventilatoarelor este curba lor de funcționare. Aceasta curbă, deși dată de producători nu este mereu reprezentativă pentru comportamentul real al ventilatorului. Astfel, s-a realizat un stand experimental pentru a determina caracteristica reală a ventilatorului. Întrucât curbă este descrisă de variația căderii de presiune în funcție de debit, acești parametri vor trebui măsurați. Ventilatorul a fost amplasat într-un sistem care permite varierea debitului prin introducerea unor pierderi de sarcină la ieșire fără a modifica parametrii de funcționare ai ventilatorului. Măsurând la diferite debite diferența de presiune între interiorul sistemului și mediul ambiant exterior aflat la presiune atmosferică, se va putea trasa caracteristica ventilatorului.

Sistemul a fost conceput ca o încăpăre de lemn, goală pe dinăuntru, cu latura egală cu de cinci ori diametrul ventilatorului. Acest ordin de mărime a fost ales pentru a permite o bună dezvoltare a curgerii la interior. Ventilatorul a fost montat centrat pe una dintre lateralele acestui cub, iar orificiul circular de ieșire a fost construit pe o latură perpendiculară, cu un diametru egal cu cel al ventilatorului. Ieșirea amplasată perpendicular introduce pierderi de sarcină suplimentare în sistem față de un amplasament pe peretele opus ventilatorului axial și ne permite o mai bună caracterizare a ventilatorului.



Figura 15 Stand experimental, ventilator, sursă și tahometru.

Acest sistem nu a fost ales întâmplător, unul similar fiind folosit de cei de la NASA în timpul proiectării cabinelor de odihnă pentru caracterizarea ventilatoarelor axiale (Figura 16).

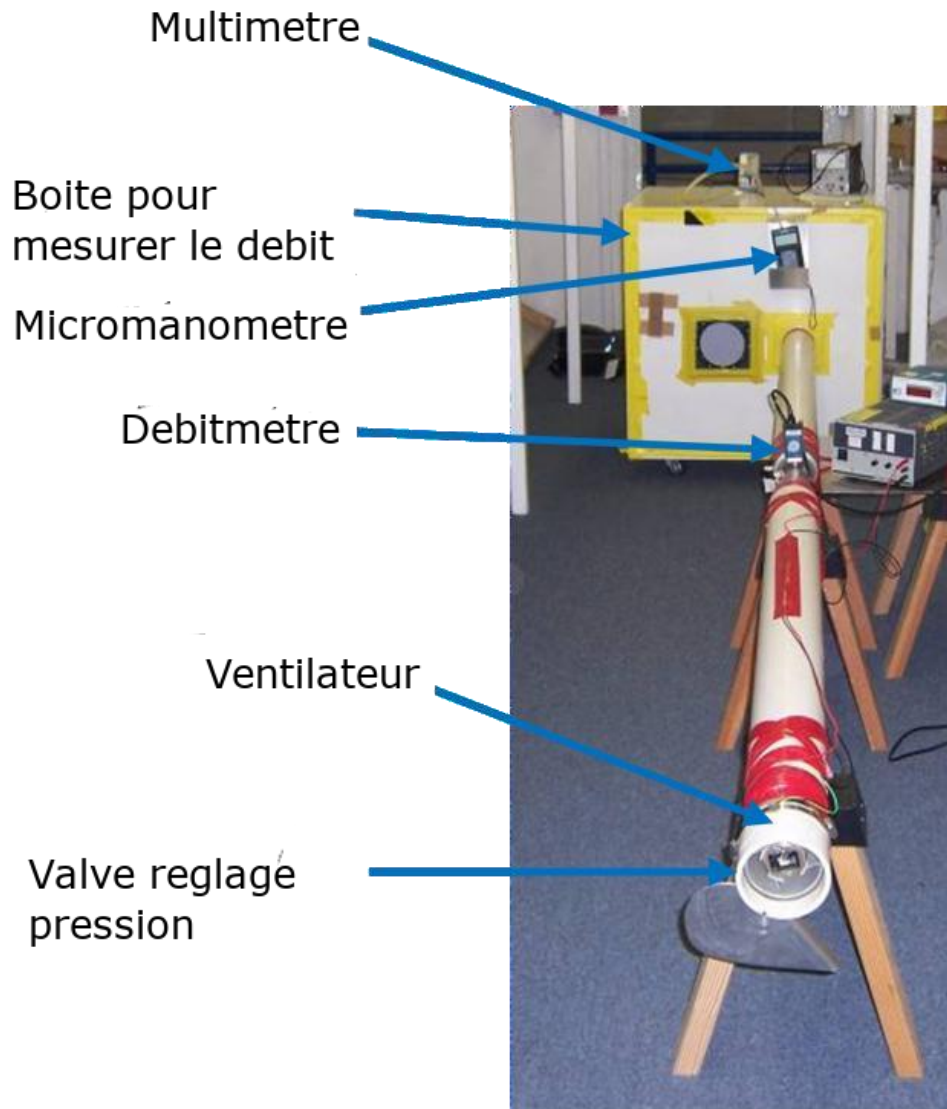


Figura 16 Standul experimental folosit de NASA pentru caracterizarea ventilatorului.

În standul experimental conceput la Universitatea din Rennes 1, debitul va fi variat cu ajutorul unor plăci cu orificii circulare de diferite diametre cunoscute. Aceste plăci variază din cm în cm între un diametru de 11 cm, aproximativ egal cu cel al ventilatorului, și 0 cm însemnând o placă plană închisă ce corespunde situației de debit nul. Pe fiecare placă există o riglă gradată în incremente de 0.5 cm care permite amplasarea echipamentului de măsură a vitezei de-a lungul razei cercului, scopul final fiind integrarea profilului de viteză măsurat pe suprafața cunoscută a orificiului. Un debitmetru industrial de înaltă precizie a fost disponibil drept o alternativă mai rapidă a acestui proces, însă la dimensiuni foarte mici ale orificiilor de ieșire, debitele obținute erau inferioare celor

minime necesare pentru măsurători, ca atare s-a renunțat la acest echipament și s-a optat pentru măsurarea vitezelor cu un anemometru cu fir cald.

Diferența de presiune a fost măsurată cu un manometru diferențial, sonda de înaltă presiune a fost introdusă prin partea superioară a standului experimental, fără să intre însă în circuitul aerului, iar sonda de joasă presiune a fost lăsată în ambientul exterior aflat la presiune atmosferică. Ventilatorul a fost alimentat de la o sursă de curent continuu la tensiunea sa nominală de 24 V. Turația ventilatorului este importantă pentru a putea determina debitul prin intermediul ventilatorului în cazul real al cabinelor de odihnă. Aceasta a fost măsurată cu un tahometru optic orientat către o bandă reflectorizantă amplasată pe una dintre palele ventilatorului.



Figura 17 Priza de presiune și manometru diferențial

Anemometrul cu fir cald a fost fixat la înălțimea corespunzătoare prin intermediul unui trepied și s-au înregistrat câte două valori ale vitezei pentru fiecare punct în lungul razei.

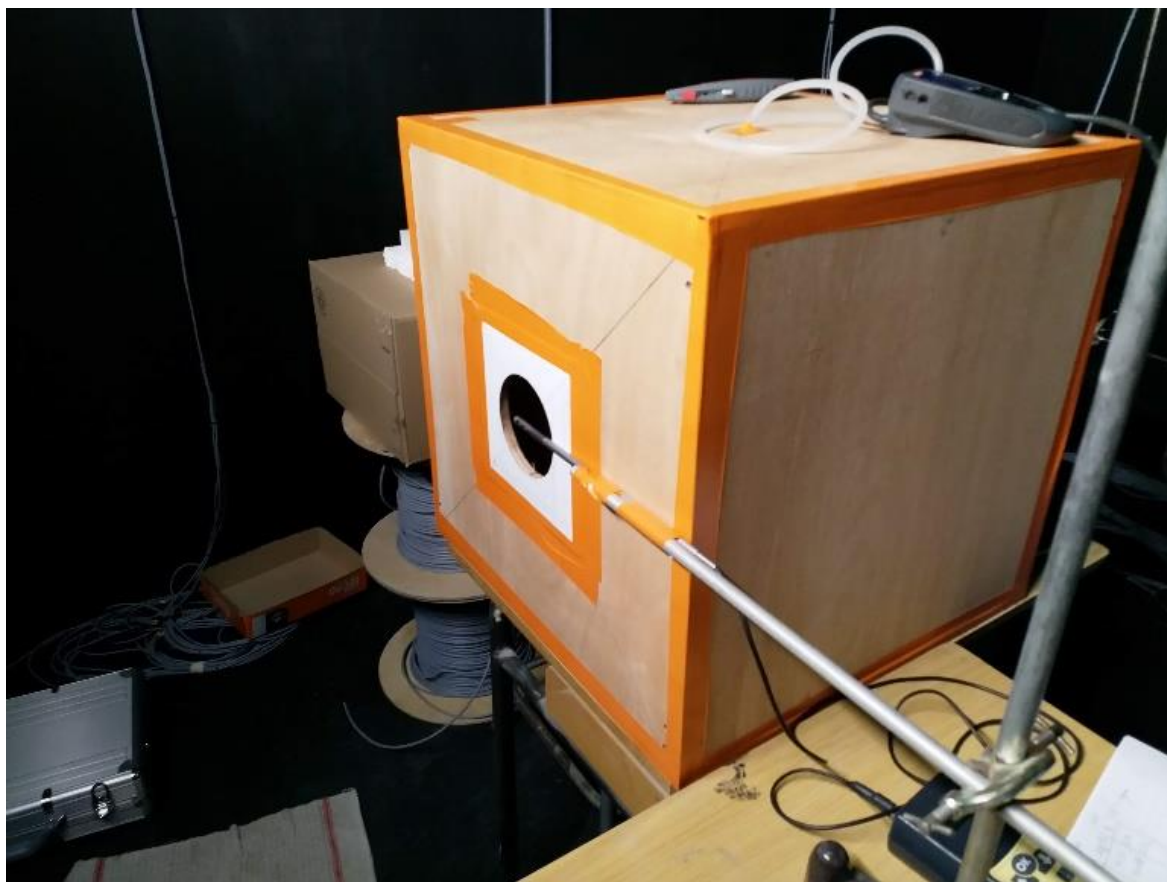


Figura 18 Anemometru cu fir cald

Fiecare din cele doua viteze măsurate este o medie aritmetica pe o perioada de 1 min. S-au efectuat doua măsurători pentru fiecare punct pentru a stabili repetabilitatea procedurii de măsură. Diferența de presiune măsurată a fost de asemenea obținută ca o medie aritmetica a fluctuațiilor de presiune timp de 1 min.

Într-o primă instanță pentru orificiile de dimensiuni mari, s-au efectuat măsurători din 0,5 în 0,5 cm atât pe verticală cât și pe orizontală, din centrul orificiului circular până la perete în ambele sensuri ale axelor imaginare. În teorie fluxul de aer prin orificiu ar trebui să fie simetric, aceasta fiind scopul dimensiunilor încăperii de lemn și amplasarea perpendiculară a ventilatorului față de refulare. Dacă profilurile de viteză sunt identice pe toate cele patru direcții, sau dacă se găsesc într-o plajă de eroare rezonabilă, se poate considera că fluxul este simetric pentru orificiile de dimensiuni mari. Acest lucru ar permite efectuare măsurătorilor pentru restul orificiilor doar pe o singură direcție reducând timpul necesar pentru măsurători.

Cu profilul de viteză determinat pentru o suprafață cunoscută, punctele fiind extrase la distanțe cunoscute debitul se poate determina prin integrarea vitezei pe suprafață prin metoda trapezelor. Știind astfel debitul pentru fiecare orificiu și diferența de presiune aferentă între interiorul standului experimental și mediul ambiant, putem trasa curba caracteristică a ventilatorului. Acest proces va fi repetat într-o manieră identică și atât pentru ventilatorul axial cât și pentru cel tangentțial.

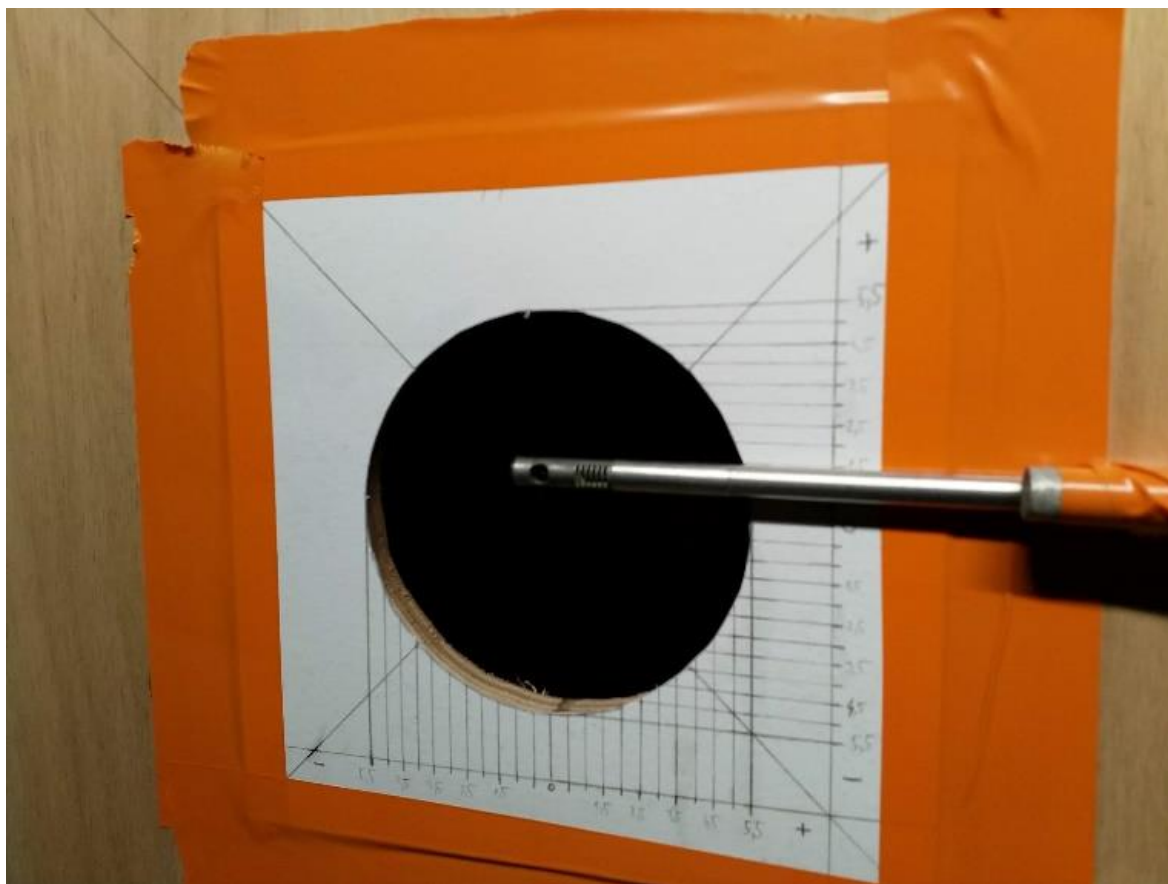


Figura 19 Orificii variabile si grila de măsura

S-au prezentat în Figura 20 și Figura 21 profilurile de viteze pentru două diametre de orificii la ieșire în cadrul măsurătorilor ventilatorului axial. Dacă în cadrul orificiului cu diametru $D = 11\text{cm}$ se poate observa o diferență între profilul vertical de viteză și cel orizontal, la orificiul cu $D = 9\text{cm}$ această diferență este aproape inexistentă. Concluzia dedusă din acest fenomen este că pe măsură ce dimensiunea orificiului este redusă fluxul de aer se apropie de simetrie.

S-a considerat că este suficientă o campanie de măsurători în lungul unei raze a cercului, urmând ca aceste viteze să fie integrate pentru determinarea debitului. Pentru a determina cea mai bună rază pe care să fie efectuate aceste măsurători s-au comparat valorile debitului obținute pentru orificiul cel mai mare ($D = 11\text{cm}$). Au fost măsurate vitezele în lungul a patru raze ale orificiului pornind din centru, două raze pe verticală și două pe orizontală. Cel mai corect mod de a calcula debitul este integrarea fiecărei raze pe un sfert de cerc pentru a obține debitul pe sfertul respectiv, iar apoi însumarea acestor rezultate pentru a obține valoarea debitului total.

Această valoare totală a fost comparată cu valorile debitului obținute prin integrarea fiecărei dintre cele patru raze pe întreaga suprafață a cercului. Eroare dintre debitul obținut prin suma celor patru raze integrate și cele două raze măsurate pe verticală a fost în jur de 1%, pe când comparația cu razele orizontale a rezultat într-o eroare de cca 10%. Această diferență importantă se datorează faptului că măsurătoarea pe

orizontală obstruie semnificativ orificiul. S-a ales folosirea măsurătorilor efectuate pe verticală în lungul razei care pornește din centrul orificiului și urcă vertical pentru toate celelalte orificii.

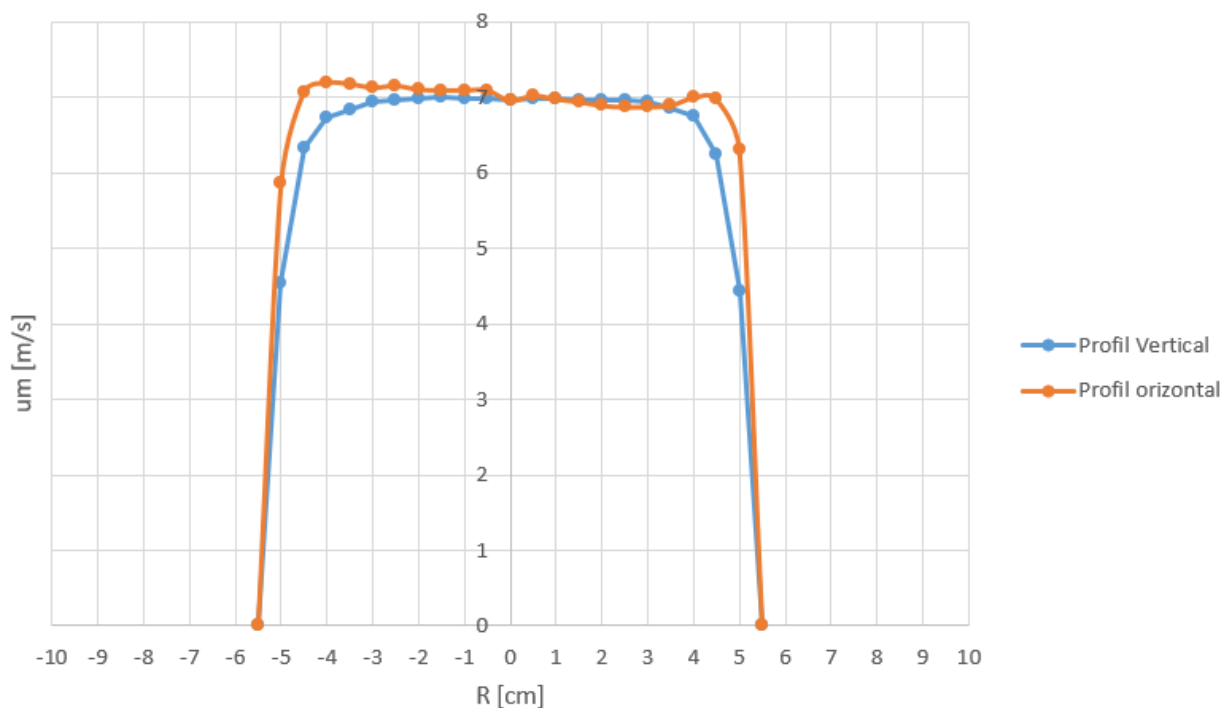


Figura 20 Profilurile de viteză pentru orificiul de diametru 11 cm.

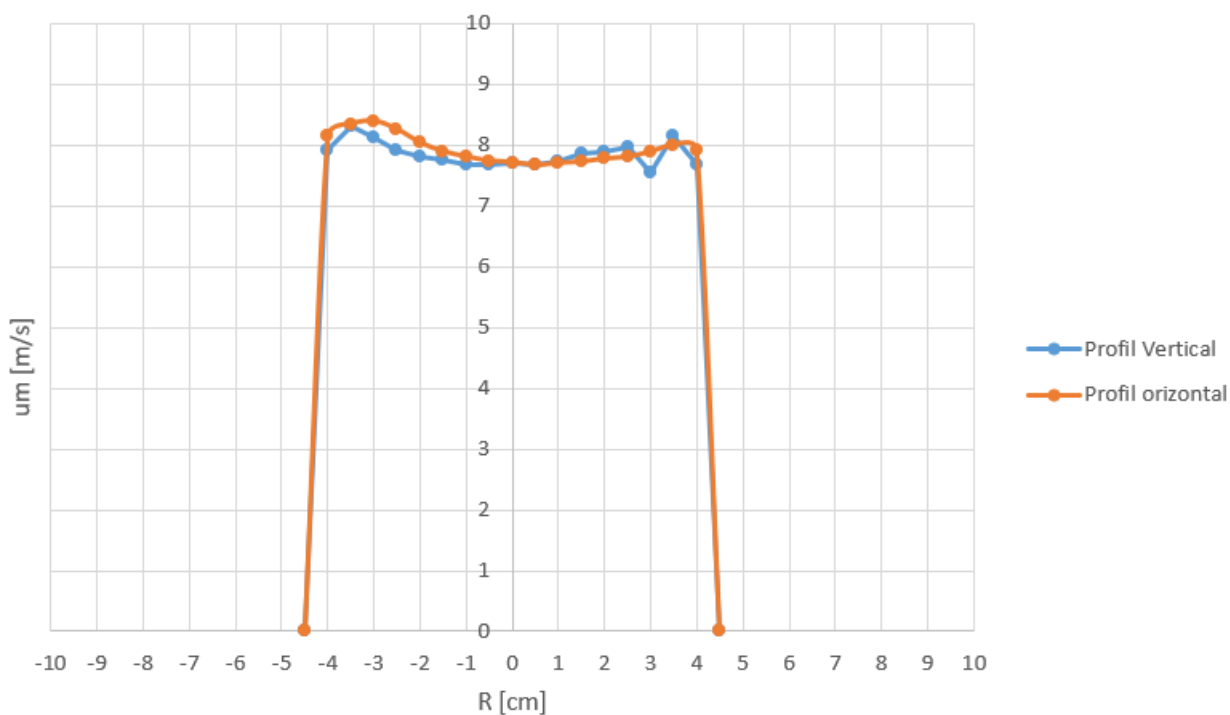


Figura 21 Profilurile de viteză pentru orificiul de diametru 9 cm.

La finalul măsurătorilor punctele au fost plasate pe un grafic diferență de presiune în funcție de debit (Figura 22). Pe lângă curba determinată pe cale experimentală a fost trasată și curba furnizată de producător. Se poate observa că diferența de presiune determinată experimental este mai mică decât cea specificată de producător. Ambele curbe au fost reprezentate cu ajutorul unei funcții polinomiale de gradul 3 pentru a ilustra o bună comparație între cele două cazuri.

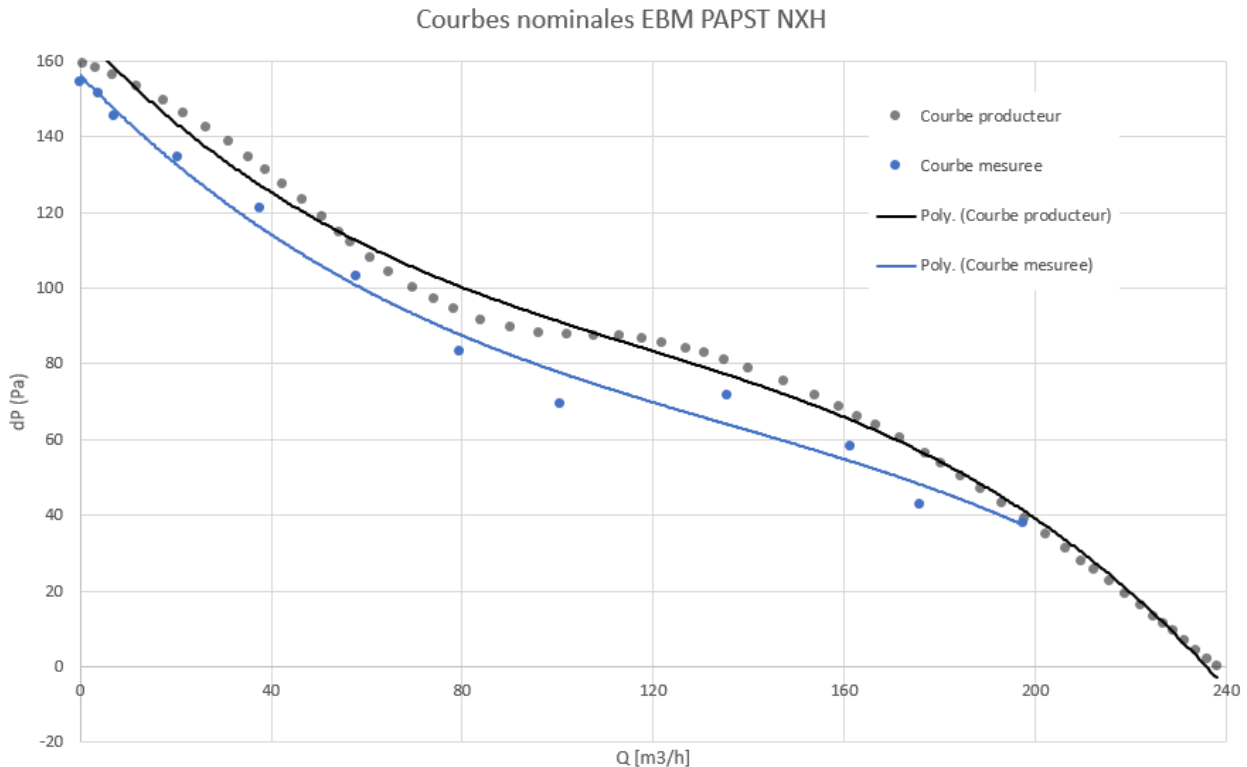


Figura 22 Comparație între curba producătorului și cea determinată experimental pentru ventilatorul axial.

Același proces a fost repetat pentru ventilatorul tangențial OM MFD-930B-24. S-a construit un orificiu rectangular de dimensiunea refulării ventilatorului pe perete opus față de ventilatorul axial, astfel încât orificiile de dimensiuni diferite vor fi poziționate perpendicular față de direcția de curgere a aerului în interiorul cutiei. Motivele pentru această decizie sunt identice cu cele pentru ventilatorul axial.

Turația ventilatoarelor a fost măsurată cu ajutorul unui tahometru optic. Un element reflectiv se instalează pe rotor sau o altă parte în mișcare și un laser este îndreptat către acest element reflectiv. Tahometrul determină turația în funcție de numărul de treceri ale elementului reflectiv prin fața laserului într-un interval de timp.

În cazul ventilatorului axial elementul reflectiv a fost montat pe o pală a ventilatorului situată către exterior (înspre mediul ambiant), iar tahometrul a fost montat vis-a-vis de această pală astfel încât direcția laserului să fie perpendiculară pe elementul reflectiv. S-au efectuat cca 10 măsurători și turația a fost determinată ca o medie

aritmetică a acestor rezultate. Ventilatorul axial a fost alimentat cu o tensiune de 24 V în curent continuu.

În cazul ventilatorului tangențial a fost nevoie de o altă soluție, datorită faptului că palele ventilatorului sunt foarte subțiri și situate la un unghi care face dificilă concentrarea laserului perpendicular pe elementul reflectiv. În plus, s-a constatat o variație foarte mare între măsurători datorită reflecției palelor în sine acestea fiind lucioase. Această problemă nu a fost întâmpinată în cazul ventilatorului axial care a fost vopsit negru mat de către producător.

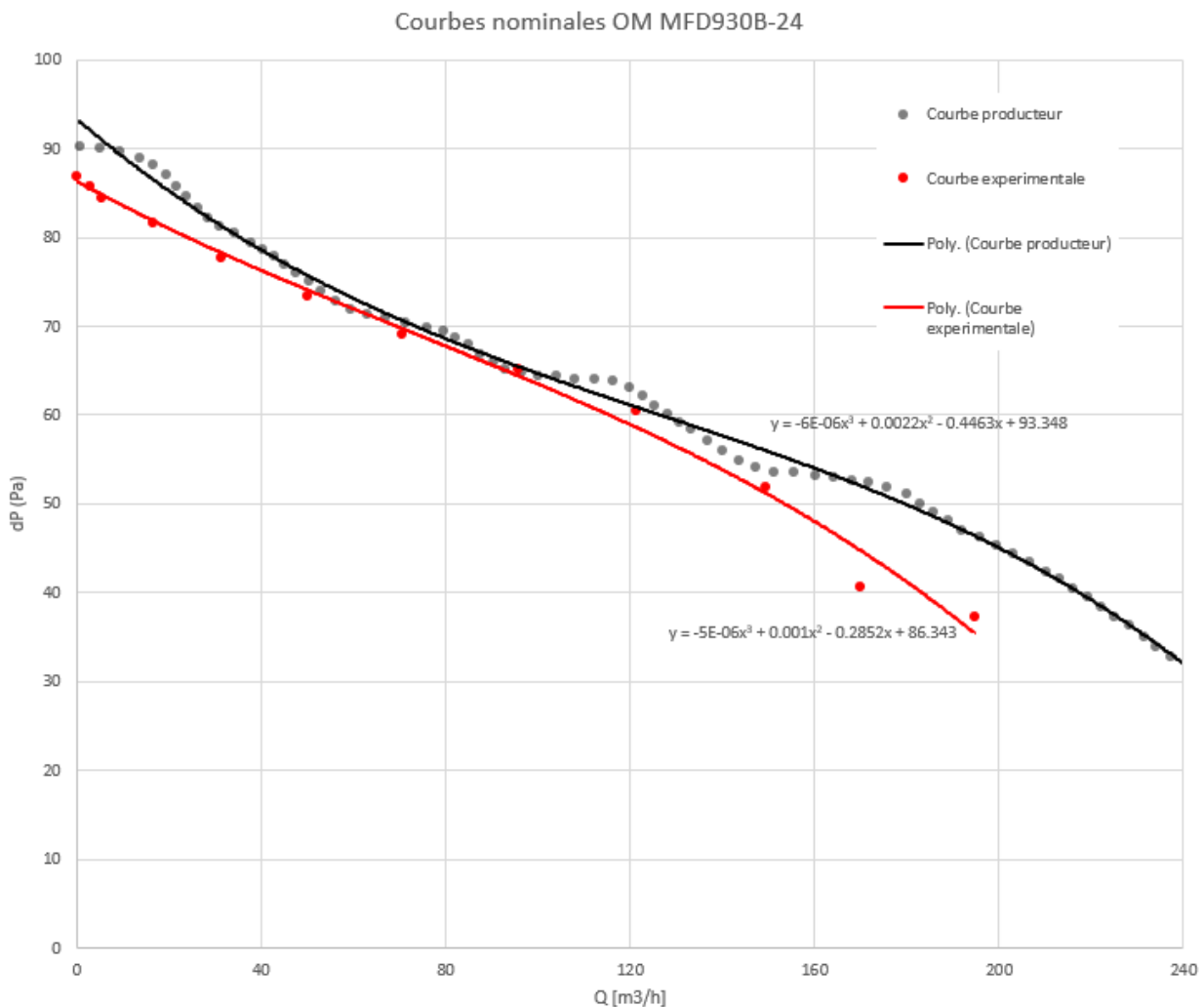


Figura 23 Comparație între curba producătorului și cea determinată experimental pentru ventilatorul tangențial.

Pentru a putea măsura turația ventilatorului tangențial s-a perforat carcasa acestuia în partea laterală opusă motorului. Acest proces a permis expunerea unei părți din rotorul de la capătul ventilatorului. Acesta a fost acoperit cu bandă adezivă neagră și elementul reflectiv a fost lipit pe rotor în dreptul perforației create. Tahometrul a fost amplasat cu direcția laserului perpendiculară pe elementul reflectiv. Această metodă a

oferit rezultate stabile între măsurători cu eroarea relativă dintre măsurători mai mică de 1%. S-au efectuat cca 10 măsurători și turația a fost determinată ca o medie aritmetică a acestor rezultate. Ventilatorul axial a fost alimentat cu o tensiune de 24 V în curent continuu.

Tabelul 4 Punctele de funcționare ale ventilatoarelor în standul experimental.

Model ventilator	Turație la tensiune nominală (24 V)	Diferență de presiune	Debit
EBM-Papst NXH 4184	3979 RPM	37,82 Pa	197,31 m ³ /h
OM MFD-930B-24	2763 RPM	37,36 Pa	191,35 m ³ /h

S-a considerat că punctul de funcționare al ventilatorului în standul experimental este cel obținut pentru orificiul cu cel mai mare diametru $D = 11\text{cm}$. Parametrii acestor puncte de funcționare se găsesc în Tabelul 4. Se poate observa că debitele furnizate sunt similare, cu o cădere de presiune aproape identică între cele două modele de ventilatoare. Turația ventilatorului tangențial este considerabil mai mică decât a celui axial.

Determinarea curbei ventilatorului pentru o anumită turație în ambele cazuri permite reglarea debitului în modelul cabinei la scara 1:1 prin varierea tensiunii de alimentare. Fiind în curent continuu o variație a tensiunii va modifica turația ventilatorului aceasta la rândul ei modificând poziția curbei. Cunoscând căderea de presiune în circuitul real de ventilare se poate determina punctul de funcționare la o turație cunoscută, iar apoi prin intermediul legilor similitudinii se poate determina turația necesară pentru obținerea debitelor utilizate de NASA (108, 138 și 156 m³/h) [16].

IX. CQ solutie cu ventilatoare axiale

Simularea numerică a soluției cu ventilatoare axială servește multiple scopuri. În primul rând, singurele măsurători de viteze în CQ pe SSI au fost efectuate în interiorul cabinelor la grila de introducere. În spatele grilei de introducere se află 4 aripioare de dirijare menite să distribuie debitul uniform pe toată suprafața grilei. Cele patru aripioare împart grila în 5 canale de curgere a aerului marcate A,B,C,D,E în Figura 26 Măsurători grilă ventilare pe SSI

Deoarece nu putem reproduce condițiile de lipsă de gravitație, o comparație cu niște măsurători similare efectuate pe modele la scară 1:1 ar putea fi pusă sub semnul întrebării. S-a optat pentru o reproducere fidelă a geometriei modelului experimental scară 1:1 prezentată în Figura 7 și Figura 8.

S-a realizat un mesh al întregului domeniu de 13,5 milioane de elemente tetraedrale într-o primă instanță. Acestea au fost transformate în elemente poliedrale reducând numărul de elemente din domeniu în același timp menținând calitatea calculului numeric. Această conversie a fost realizată de un algoritm integrat în softul ANSYS Fluent.

Condițiile la limită impuse în modelul numeric depind de parametrii ventilatorului. Pentru un model geometric identic cu situația reală impunerea parametrilor aceluiașă ventilator va rezulta în determinarea aceluiași punct de funcționare cu situația reală. Aspirația și refularea au fost impuse drept zone de Pressure Inlet și Outlet cu presiunea reglată la presiunea atmosferică pentru a nu avea influență asupra curgerii în domeniu. Datorită configurației complexe a circuitului de ventilare este importantă surprinderea în detaliu a dinamicii aerului la ieșirea din ventilatoare. O metodă de a surprinde fenomenologia dorită este reprezentarea ventilatoarelor în domeniul virtual prin intermediul unor coeficienți de forță determinați în funcție de caracteristicile ventilatoarelor și turația lor. Acești coeficienți sunt aplicați în direcția fiecărei axe. Coeficientul în direcția de curgere a aerului prin ventilatorul axial simulează mișcarea aerului datorată diferenței de presiune între aspirația și refularea ventilatorului. Coeficienții aplicați pe axele y și z reprezintă componenta rotațională dată de mișcarea palelor ventilatorului.

Dacă modelul geometric virtual și presupunerile făcute în etapa de proiectare sunt corecte, rezultatele numerice ar trebui să fie comparabile cu rezultatele măsurătorilor de pe SSI.

a. Reprezentarea ventilatoarelor în domeniul numeric prin intermediul coeficienților de forță

Simularea unui ventilator în domeniul numeric necesită o metodă de a specifica în softwareul specializat impulsul transmis aerului de către palele ventilatorului în funcție de poziție în ventilator. Ecuația fundamentală a turbomasinilor caracterizează curgerea ideală printr-o mașină hidraulică perfectă parcursă de un fluid perfect. Aceasta ecuație prezintă mici variații în funcție de tipul de mașină hidraulică (axială, centrifugală etc.). În cadrul ei, circuitul fluidului prin mașină hidraulică este descris prin intermediul unui

triunghi de viteze care descompune viteza particulei de fluid in toate cele trei direcții cardinale. [1]

Găsim în literatura [2] situații de simulare a unei turbomasini axiale prin intermediul unor coeficienți de forță deduși din ecuația fundamentală a turbomasinilor. Acești coeficienți de forță (notați $F_{x/y/z}$) reprezintă o forță aplicată pe o suprafață [N/m^3] în interiorul ventilatorului în funcție de poziția particulei de fluid. Coeficientul de forță principal pentru o mașină axială este în direcția curgerii și este determinat de diferența de presiune între aspirație și refulare, depinzând de curba de funcționare a mașinii hidraulice (14). Coeficienții pe celelalte două direcții depind în mare măsură de diferența de presiune și de turația turbomasinii (15), (16).

$$F_x = \frac{\Delta p}{h} \quad (14)$$

$$F_y = \frac{\Delta p^2}{\rho r_y^2 n^2 \pi^2 8h} \quad (15)$$

$$F_z = \frac{\Delta p^2}{\rho r_z^2 n^2 \pi^2 8h} \quad (16)$$

Unde:

- Δp : pierderea de sarcină calculată din caracteristica instalației ca o funcție de debit [Pa].
- h : diametrul ventilatorului [m].
- n : turația ventilatorului [rps].
- ρ : densitatea fluidului [kg/m^3].
- r : coordonata spațială [m].

Pentru calculul acestor coeficienți este necesară curba de funcționare a mașinii hidraulice utilizate, turația la care funcționează aceasta pentru un anumit debit și măsurarea debitului în instalația în care este amplasată.

b. Rezultate

În urma măsurărilor cu tahometrul optic, a rezultat o valoare a turației ventilatorului de 3979 rpm. Curba ventilatorului a fost trasată în urma măsurărilor experimentale și comparată cu curba furnizată de producător și ecuația curbei a fost extrasă pentru a putea fi integrată în componenta legată de debit a coeficienților de forță.

În urma unor măsurători de debit realizate în modelul la scară 1:1, s-a obținut la tensiune nominală o valoare de $161 \text{ m}^3/\text{h}$ la turația nominală. Legile de similitudine ne permit determinarea turației necesare pentru două valori cunoscute de debit după următoarea relație:

$$\frac{Q_1}{n_1} = \frac{Q_2}{n_2} \quad (17)$$

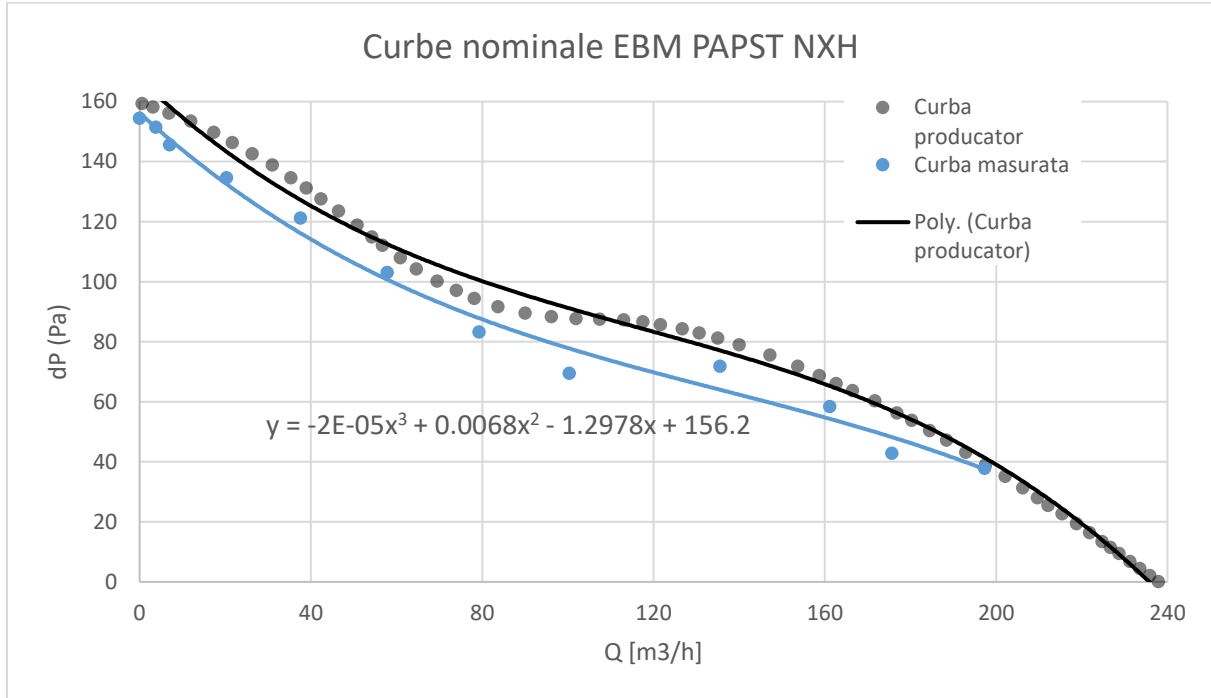


Figura 24 Curba de funcționare a ventilatorului

Unde Q reprezintă debitul și n turația ventilatorului. Cunoșcând debitul măsurat în modelul scară 1:1 și turația nominală, se poate deduce turația necesară pentru debitul dorit. Astfel pentru a obține debitul minim impus de NASA de 138 m³/h [17], [21], este necesară o turație de 3410 rpm. Tot în funcție de debitul măsurat în cabina la parametrii nominali se poate obține pierderea de presiune din curba ventilatorului, rezultând o valoare de cca 55 Pa pentru debitul de 161 m³/h.

Cu pierderea de presiune în modelul scară 1:1 cunoscută și cu turația necesară de 3410 rpm, putem determina pierderea de presiune pentru debitul de 138 m³/h după următoarea lege de similitudine:

$$\frac{dp_1}{n_1^2} = \frac{dp_2}{n_2^2} \quad (18)$$

Caracteristica instalației aferente modelului scară 1:1 poate fi scrisă sub forma:

$$dp = MQ^2 \quad (19)$$

În cazul nostru Q este debitul cerut de NASA de 138 m³/h, iar dp este căderea de presiune aferentă lui. Acești parametri ne permit determinarea coeficienților de forță aferenți sistemului nostru după ecuațiile teoretice.

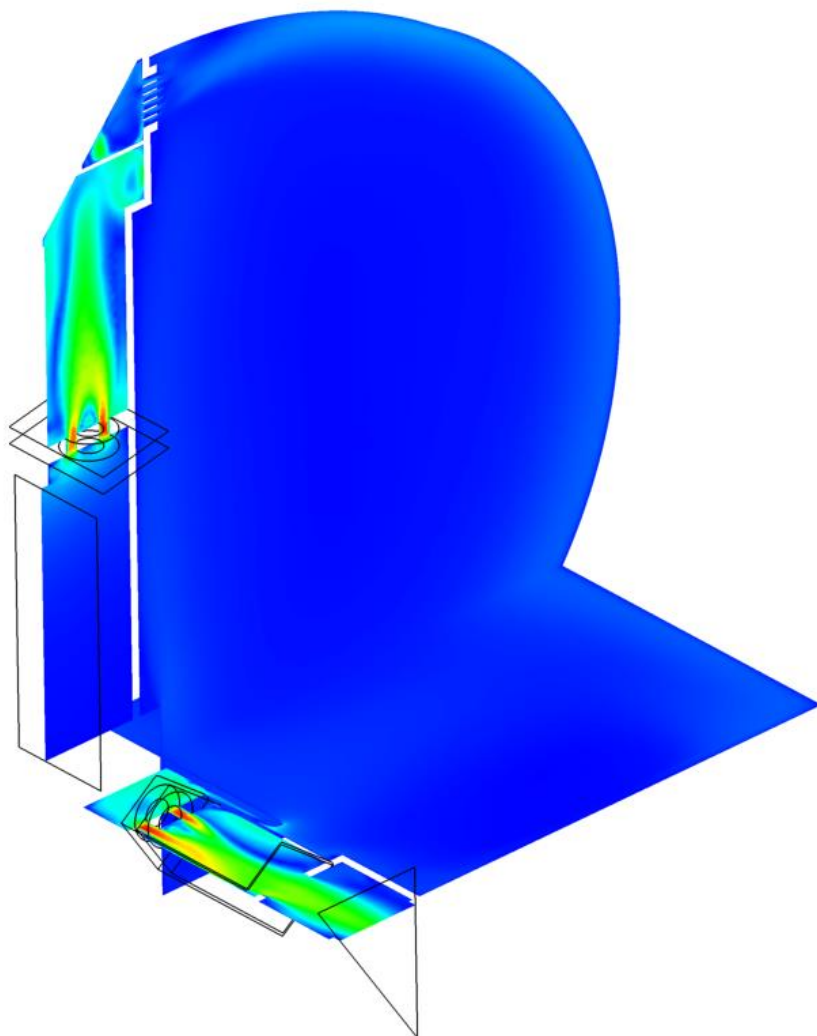


Figura 25 Conturul vitezelor după impunerea coeficienților de forță în modelul numeric.

Figura 26 prezintă măsurătorile efectuate de NASA la bordul stației spațiale pentru un debit de $138 \text{ m}^3/\text{h}$. Măsurătorile sunt efectuate în centrul fiecărui orificiu din grila de ventilare. Literele A,B,C,D,E determină cele 5 canale prin care aerul este distribuit. Se observă că zonele cu viteză ridicată se găsesc în regiunile dintre două canale de distribuție. Vitezele cele mai mari se găsesc în partea superioară la intersecția dintre canalele A și B, corespunzând drumului cel mai scurt al aerului prin instalație. În consecință cele mai mici viteze se afla la sfârșitul canalului E corespunzând drumului cel mai lung al aerului prin instalație.

Figura Y prezintă rezultatele unei simulări numerice cu coeficienții de forță impuși la nivelul ventilatorului, cu toată geometria modelului la scară 1:1 reprodusă exact. Se observă o tendință similară de distribuție a vitezelor la nivelul grilei. Zonele cu viteză ridicată se găsesc la limita dintre două canale de circulație a aerului. Se observă aceeași tendință de descreștere a vitezei aerului, cu cât canalul de circulație se îndepărtează de punctul de origine și aceeași preponderență de viteze mari în zonele superioare ale canalelor de circulație A și B.

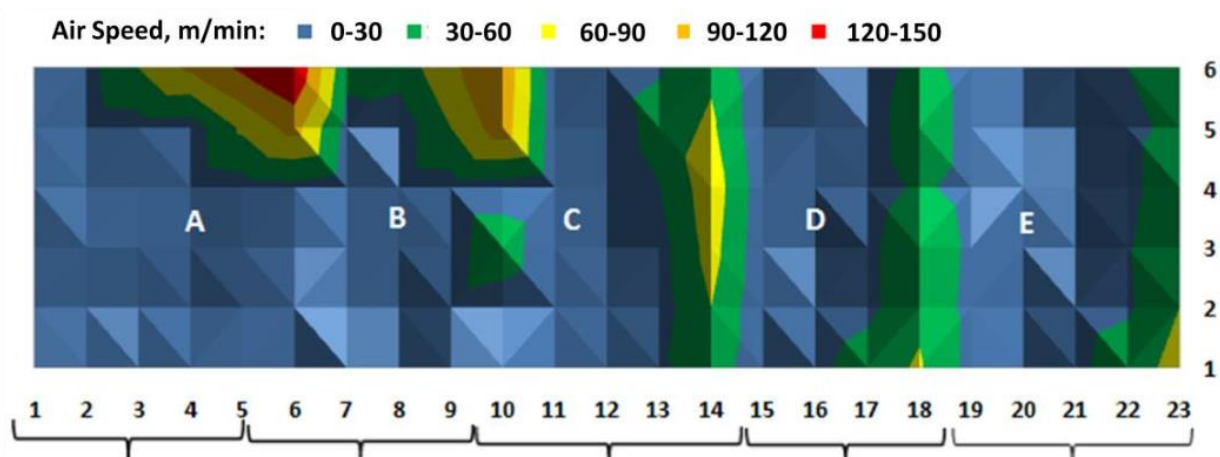


Figura 26 Măsurători grilă ventilare pe SSI [17].

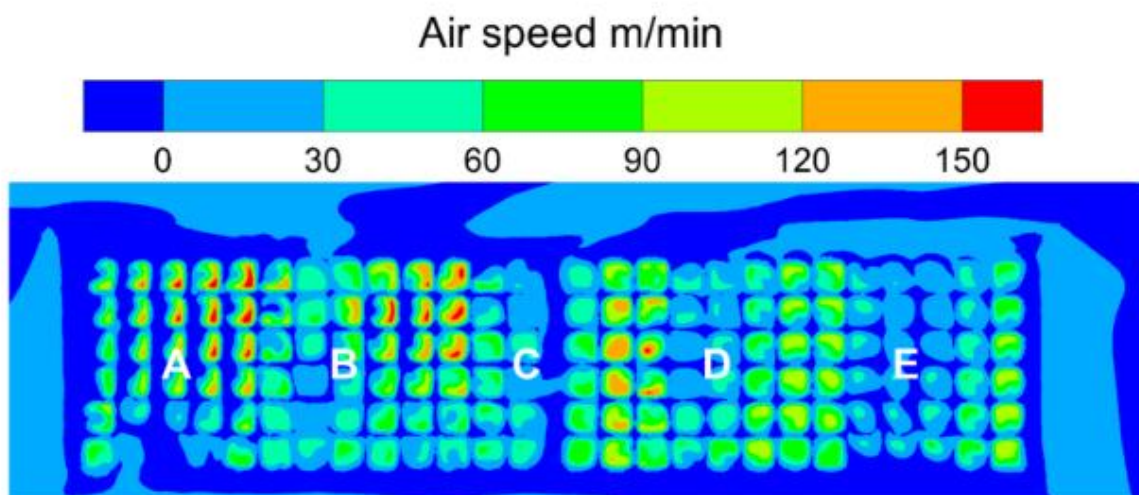


Figura 27 Rezultate numerice ale vitezelor la ieșirea din grila de ventilare.

Se distinge o diferență de rezoluție între măsurătorile experimentale de pe SSI și rezultatele numerice. Este specificat în literatură că măsurătorile au fost efectuate în centrul fiecărui orificiu al grilei de ventilare. Nu este specificat instrumentul de măsură utilizat. Rezoluția măsurătorilor experimentale, faptul că fiecare orificiu rectangular are două sau mai multe valori ale vitezei împărțite după o diagonală, considerând metodologia descrisă, sugerează că s-a efectuat o interpolare în urma măsurătorilor. Natura acestei interpolări nu este descrisă, prin urmare diferențele de rezoluție dintre cele două imagini vor fi luate în calcul în evaluarea comparației.

Alte diferențe între cele două imagini se datorează mai multor factori. În primul rând modelul scara 1:1 urmărește designul CQ de pe ISS cat mai aproape posibil, însă exista diferența datorate lipsei unor planuri exacte de design. Elemente cum ar fi construirea canalelor de circulație a aerului, raza lor de curbura, dimensiunea lor exactă

pot fi estimate suficient de precis însă, pana si mici diferențe pot schimba parametrii curgerii. Grila in sine prezinta diferențe, cum ar fi prezenta unei obstrucții in zona de mijloc si un număr mai ridicat de orificii de evacuare. Toate aceste elemente influențează parametrii curgerii, însă tendința generala de distribuție a aerului este aproximativ identica in circuitul din amonte de grila intre modelul scara 1:1 si CQ de pe SSI.

X. CQ soluție cu ventilatoare tangențiale

Modelul numeric care vizează soluția cu ventilatoare tangențiale nu are până în prezent măsurători experimentale cu care să fie comparat în detaliu datorită unor probleme legate de achiziționarea ventilatoarelor. S-a decis lansarea simulărilor numerice în anticiparea rezultatelor experimentale complete.

Măsurătorile efectuate pe modelul scară 1:1 cu ventilatoare tangențiale instalate au fost realizate pentru ventilatorul EBM-Papst QL43030-2124. S-au măsurat vitezele la ieșirea din grila de ventilare în interiorul cabinei. Profilul de viteze obținut a fost impus drept condiție la limită în modelul numeric la nivelul aceleiași grile de ventilare prezentată în Figura 9 și Figura 10.

S-a urmărit evaluarea câmpului de viteze în interiorul cabinei pentru determinarea distribuției jetului de ventilare în spațiul ambiant al CQ precum și posibile zone de recirculare pentru a studia posibilitatea de acumulare a dioxidului de carbon.

Modelul numeric a fost construit cu un mesh de 9 milioane de elemente tetraedrale într-o primă instanță bazat pe o variantă modificată a modelului numeric folosit pentru evaluarea ventilatoarelor axiale. Celulele tetraedrale au fost transformate în elemente poliedrale reducând numărul de elemente din domeniu în același timp menținând calitatea calculului numeric. Această conversie a fost realizată de un algoritm integrat în softul ANSYS Fluent.

În ceea ce privește condițiile la limită, s-a impus profilul de viteze măsurat la ieșirea grilei de ventilare dinspre interiorul cabinei. Condiția la limită impusă a fost de velocity inlet cu un profil definit în funcție după măsurătorile experimentale. S-a folosit o intensitate turbulentă de 5% și diametrul hidraulic pentru a caracteriza geometria modelului. Evacuarea din sistem a fost desemnată drept pressure outlet cu o presiune egală cu 1 atm, valoarea menținută pe culoarul stației spațiale. Evacuarea a fost caracterizată de o intensitate turbulentă de 5% și de diametrul hidraulic.

S-a folosit un model de energie pentru calculul transferului termic. S-a impus o temperatură pe pereții cabinei de odihnă de 18°C, temperatura aerului din mediul ambiant pe stația spațială internațională. Omul din interiorul modelului a fost împărțit în multiple regiuni, fiecare cu o temperatură specifică reprezentând diferențele de temperatură dintre diferitele părți ale corpului omenesc. Valorile impuse se găsesc în Tabelul 5.

Tabelul 5 Temperaturile impuse pe suprafețele modelului uman.

t	t _{head}	t _{neck}	t _{torso}	t _{shoulders}	t _{arms}	t _{forearms}	t _{hands}	t _{thighs}	t _{shins}	t _{feet}
°C	36	35	34	34	33	32	30	32	30	28

Evaluarea finală vizează evaluarea unui indice de confort care indică posibilitatea apariției unei senzații de curent.

Acest indice va indica zone de risc al apariției senzației de curent în jurul modelului uman și va fi util în evaluarea unor posibile ajustări cum ar fi orientarea curentului de ventilare.

a. Rezultate

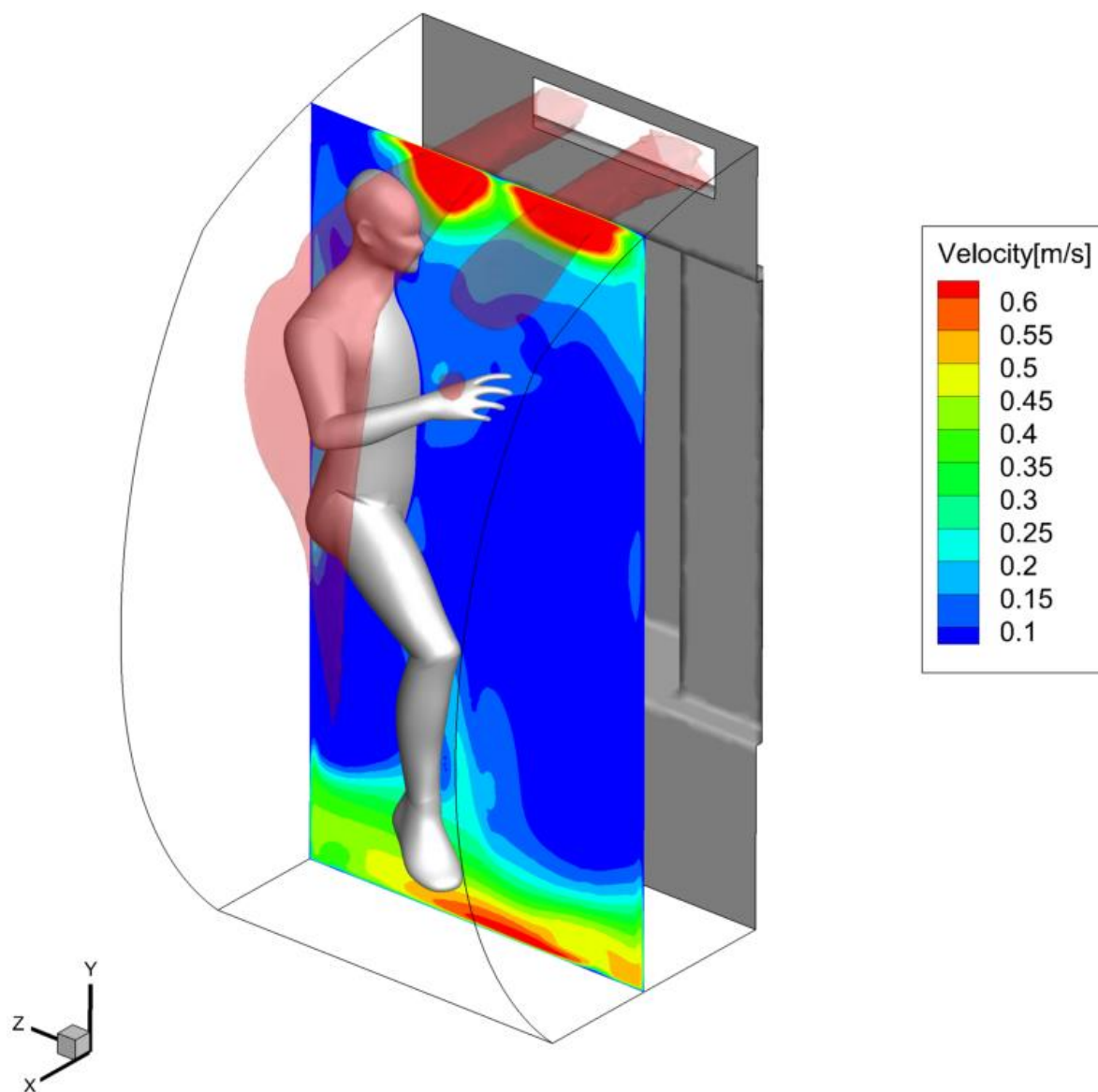


Figura 28 Izosuprafețe și contururile vitezelor în planul sagital.

În Figura 28 s-a extras un plan sagital la mijlocul modelului uman și s-a reprezentat distribuția modului vitezei în respectivul plan. S-au reprezentat izosuprafețele modului vitezei mai mari sau egale cu 0.6 m/s pentru a evidenția zonele cu viteze mari ale aerului la interior. Valoarea maximă de 0.6 m/s a fost aleasă deoarece este limita superioară considerată de NASA în cerințele legate de viteza de circulare a aerului pentru evitarea acumulării de dioxid de carbon. Valorile vitezei și temperaturile recomandate de NASA sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Tabelul 6 Viteza aerului și temperatura atmosferei interne artificiale de pe SSI.

Air velocity	Temperature
66% of values between 0.076 – 0.6 m/s	18 – 27 °C

Se pot observa două jeturi separate ieșind din grila de ventilare cu viteze mai mari sau egale cu 0.6 m/s. Distanța semnificativă dintre cele două jeturi se datorează faptului că profilul de viteză a fost măsurat pe ventilatorul tangențial dublu EBM-Papst QL43030-2124. Jeturile trec pe deasupra capului modelului uman și se îndreaptă către perete, valoarea vitezei scăzând treptat.

În planul sagital se observă valori ale vitezelor între 0.3 și 0.45 m/s în proximitatea capului la nivelul frunții și al ochilor. Se mai distinge o zonă cu viteze ridicate la nivelul picioarelor, între 0.2 și 0.4 m/s. O altă observație notabilă este viteza scăzută la nivelul abdomenului și chiar la nivelul nasului (viteze mai mici de 0.2 m/s) indicând o zonă de stagnare a aerului.

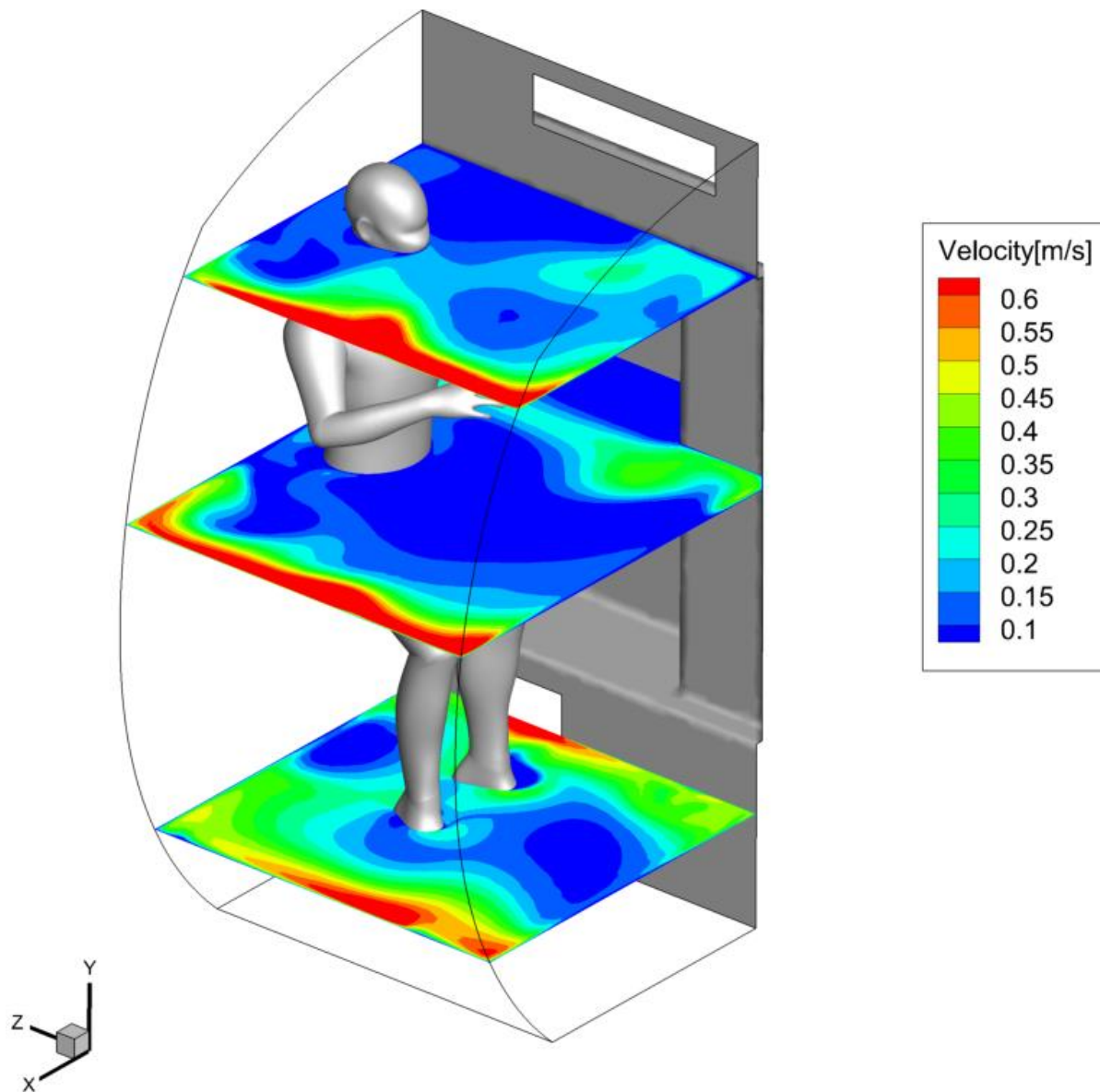


Figura 29 Contururile vitezelor în planurile transversale.

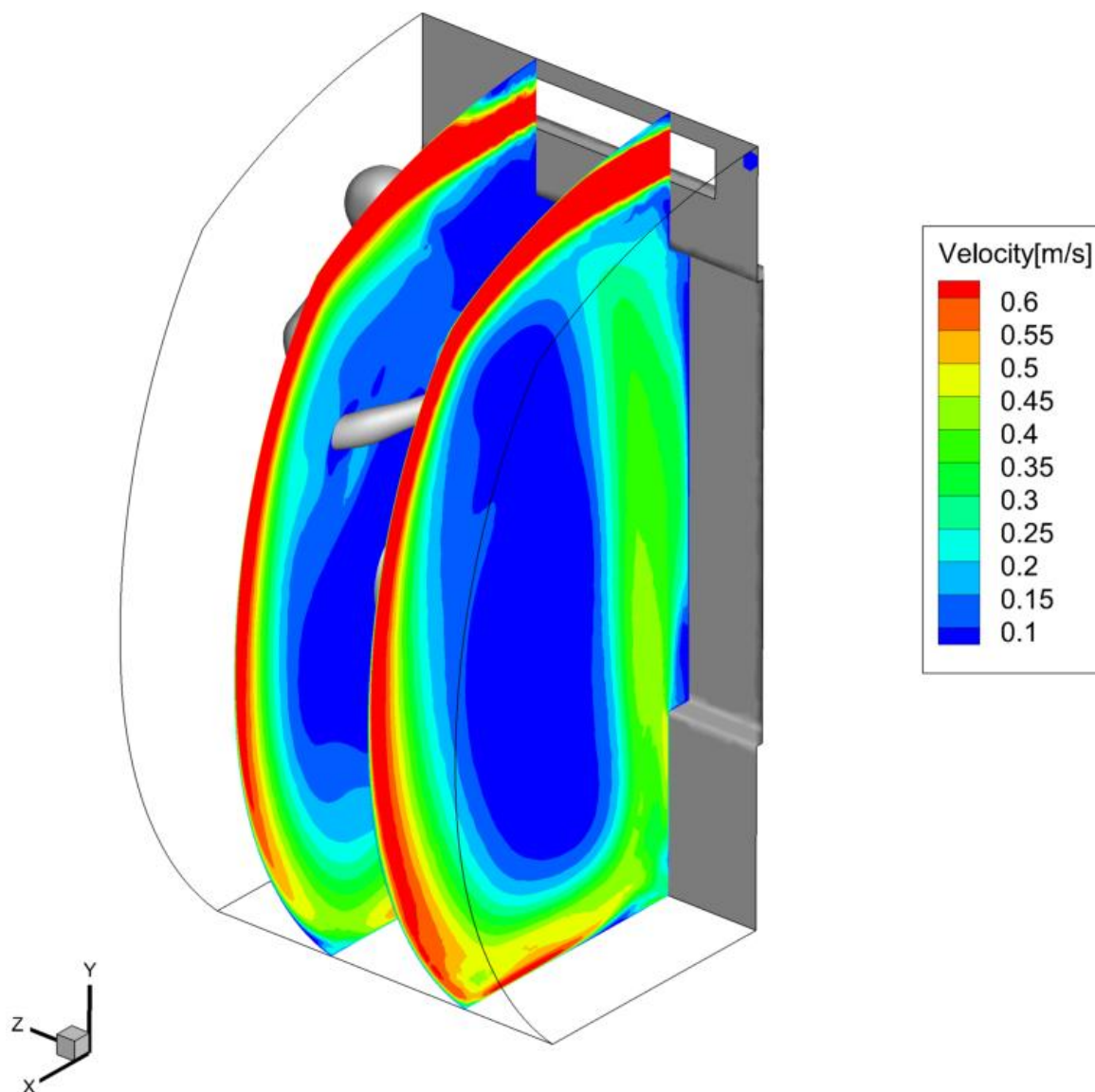


Figura 30 Contururile vitezelor în planurile coronale, vedere frontală.

În Figura 29 s-au extras 3 planuri transversale, unul la nivelul nasului modelului uman, al doilea la nivelul abdomenului și al treilea la nivelul picioarelor în dreptul evacuării.

La nivelul nasului se observă viteze mai mici de 0.2 m/s iar către peretele cabinei se observă fenomenul de atașare a jeturilor de perete. Se mai observă o zonă cu viteze ridicate sub grilă în fața astronautului către peretele opus. În planul transversal de la nivelul abdomenului este în continuare evidențiat fenomenul de atașare a jeturilor de perete, cu o zonă cu viteze mari vis a vis de peretele curbat al cabinei în fața modelului uman. La nivelul abdomenului vitezele sunt mai mici de 0.15 m/s. În ultimul plan transversal la nivelul picioarelor se observă detașarea jeturilor de perete precum și uniformizarea vitezelor în tot planul datorită evacuării aerului. În jurul picioarelor s-au constatat viteze între 0.2 și 0.4 m/s. Aerul evacuat are o valoare mai mare sau egală cu 0.6 m/s.

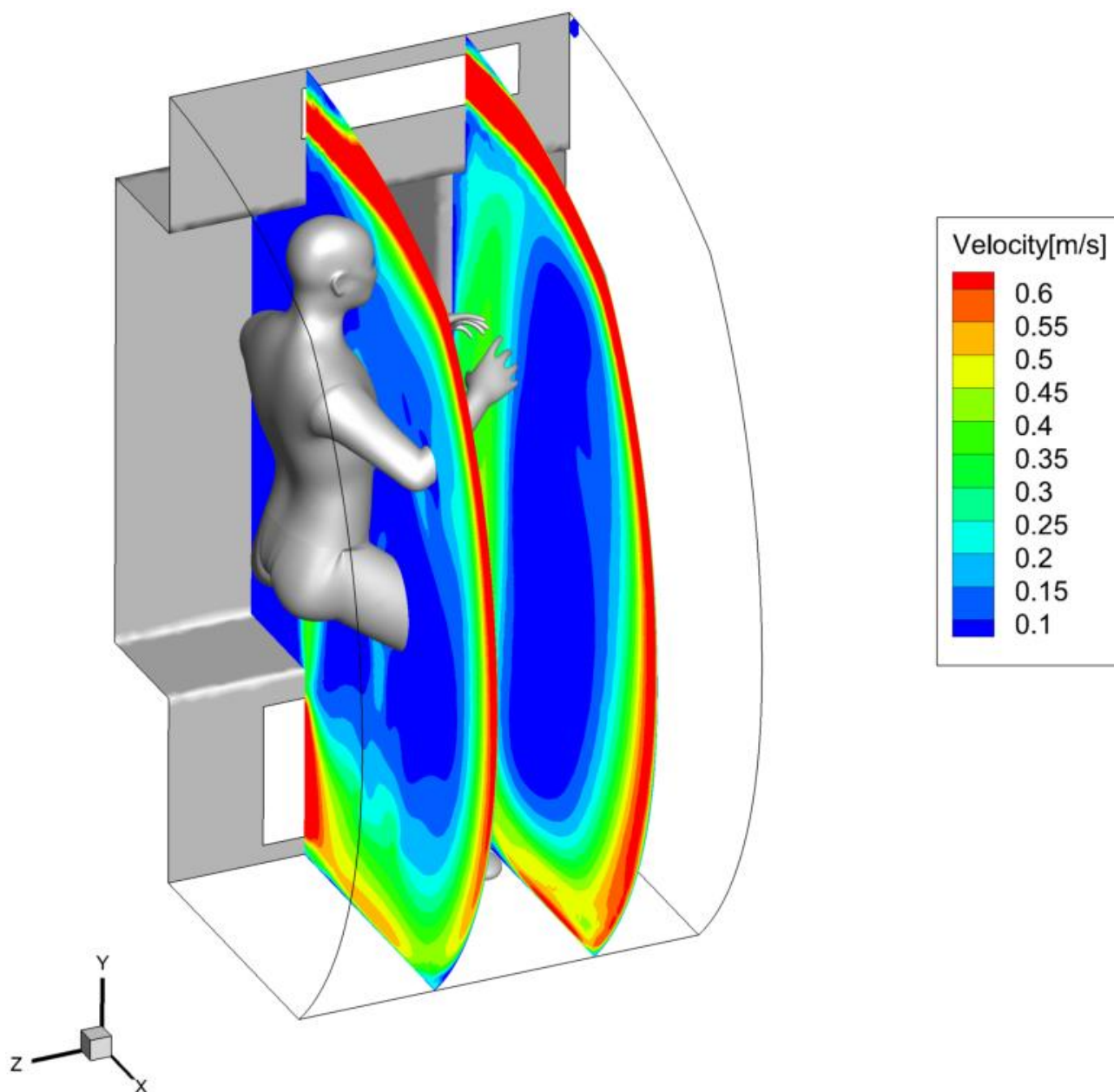


Figura 31 Contururile vitezelor în planurile coronale, vedere dorsală.

În Figura 30 și Figura 31 s-au extras două planuri coronale unul în fața nasului modelului uman și al doilea în dreptul zonei de viteze ridicate dinspre perețele de vis a vis de modelul uman. S-au prezentat două imagini pentru a putea studia zonele de suprapunere.

În ambele figuri se observă o zonă de stagnare a aerului datorată fenomenului de atașare a curentului de aer la pereți. Această zonă este redusă în apropierea peretelui din fața modelului uman. Această reducere nu este prezentă în planul din dreptul nasului datorită prezenței evacuării aerului în același plan. În zona de recirculare vitezele sunt între 0.25 și 0.5 m/s.

În Figura 32 este prezentat un plan coronal care cuprinde capul și corpul modelului uman. Contururile prezentate reprezintă temperatura în mediul ambiant. Temperatura pereților a fost impusă 18°C iar a corpului uman după valorile descrise în Tabelul 5.

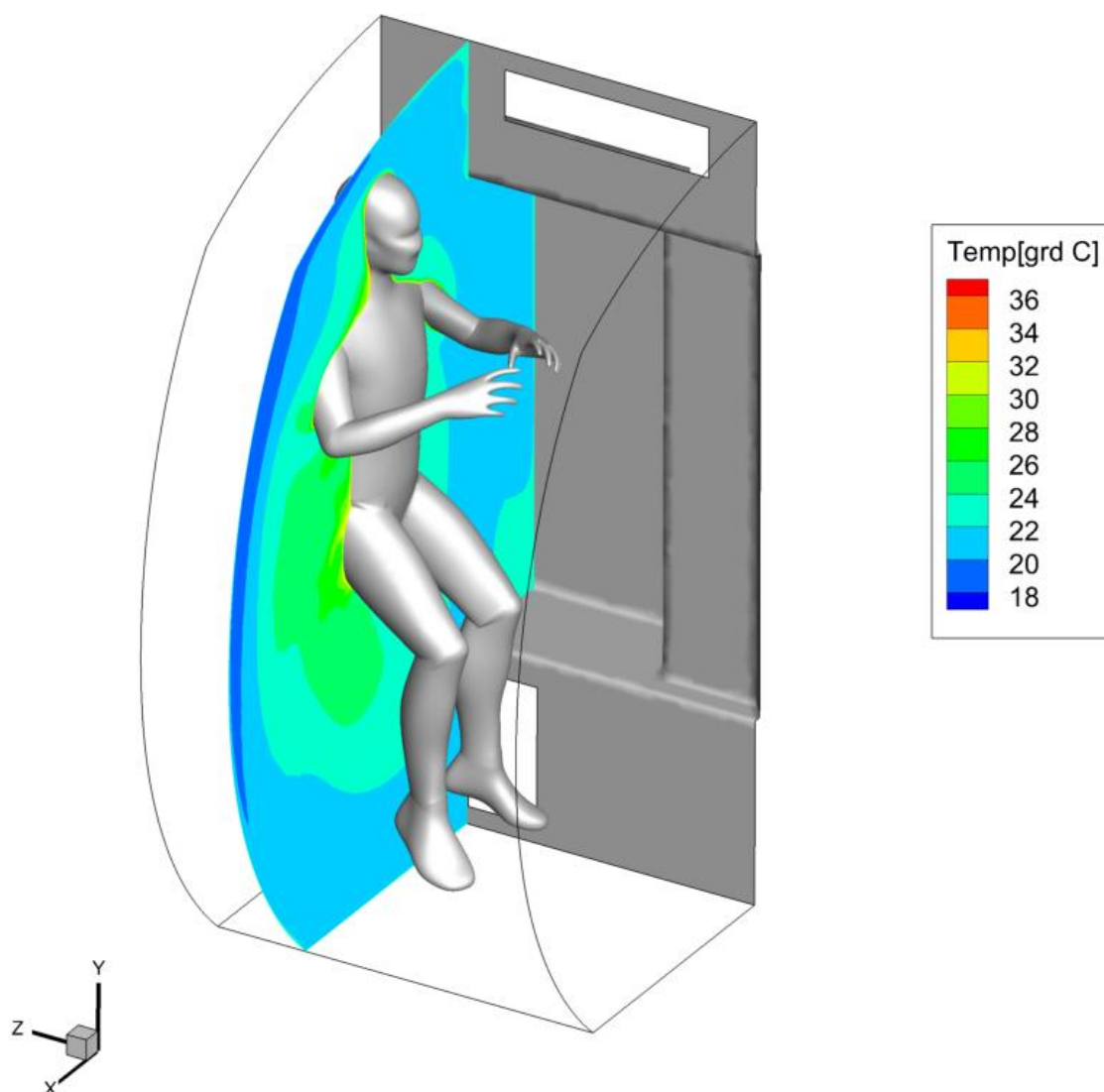


Figura 32 Conturul temperaturii în planul coronal.

Se poate observa o stratificare termică în jurul modelului uman, cu o tendință a aerului cald de a urmări direcția de curgere globală a aerului în cabină. Acumularea de căldură cât și lipsa mișcării ascendente a aerului cald se datorează faptului că simulările, precum și situația reală de pe stația spațială internațională sunt lipsite de gravitație. Această lipsă cauzează fluxul natural convectiv datorat diferenței de temperatură să fie practic inexistent. Deși diferența de temperatură modifică densitatea fluidului în ambele situații lipsa unei forțe care să acționeze asupra masei de fluid duce la dispariția fenomenului.

Avem așadar de a face cu o acumulare de căldură în jurul oricărei surse (corpul uman datorită activității metabolice, echipamentelor electronice, echipamentelor în mișcare etc.). Se observă acest fenomen în aerul din jurul modelului uman care a crescut

în mod aproape uniform de la 18°C, valoarea lui inițială, la între 22°C și 24°C în jurul modelului uman. La contactul cu corpul valoarea aerului se apropie de temperatura impusă pe suprafața respectivă.

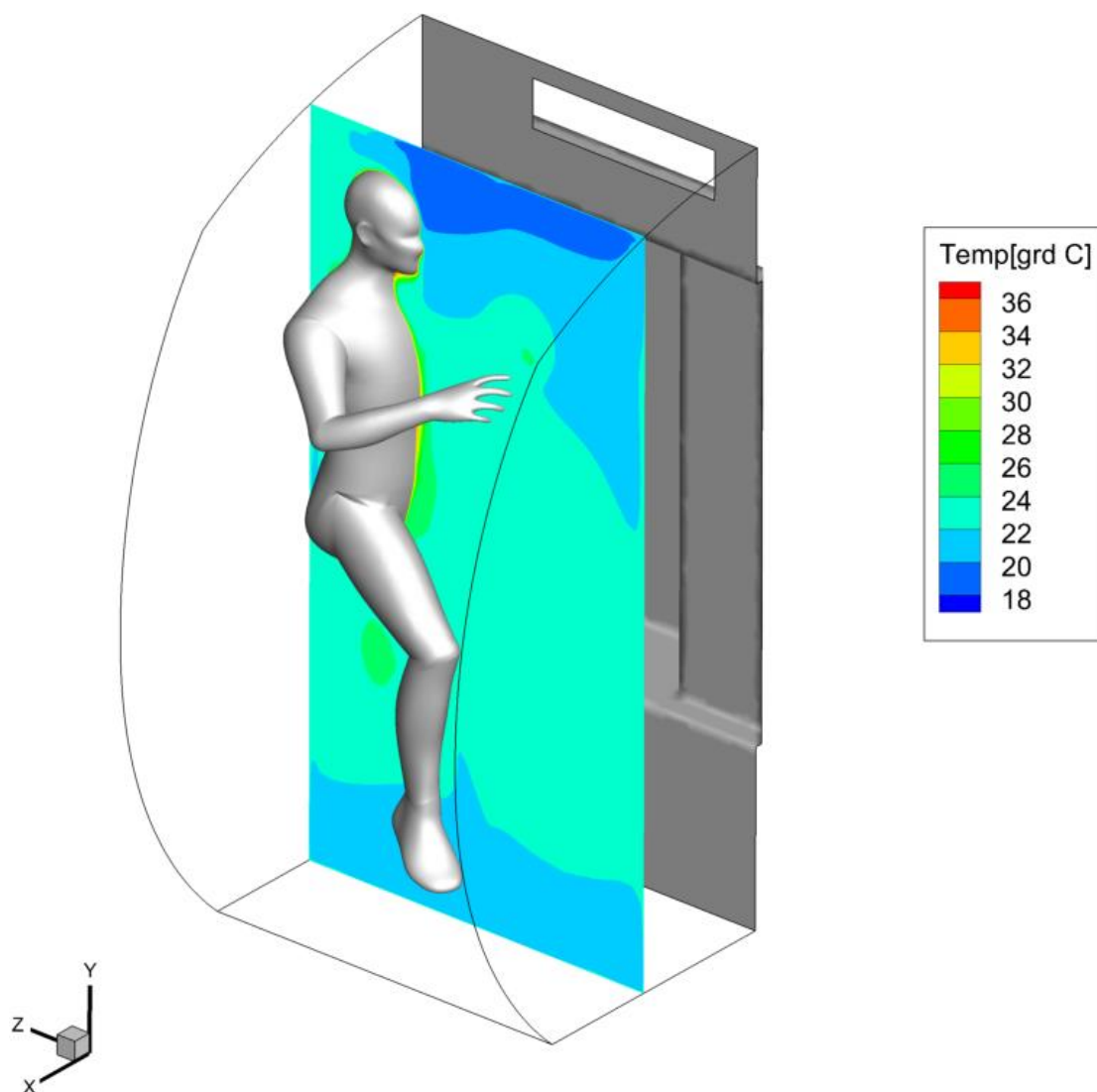


Figura 33 Conturul temperaturii în planul sagital.

În Figura 33 se observă aceeași acumulare de temperatură în jurul modelului uman. Vitezele ridicate din jurul capului, datorită proximității față de grila de ventilare, reduc acumularea de temperatură la acest nivel până la cca 24°C în apropierea feței. Acest nivel de temperatură riscă să ducă la o stare de răcoare. Fenomenul de recirculare în zona din fața modelului uman duce la o creștere de temperatură locală în această zonă, acest fapt contribuind la reducerea încălzirii aerului în proximitatea astronautului. Putem presupune că această acumulare ar fi fost înrăutățită de o zonă de recirculare mai puternică la nivelul planului coronal prezentat în Figura 32.

Deși viteze mai mari ale aerului la nivelul feței astronautului poate contribui la înlăturarea dioxidului de carbon, dar valorile ridicate ale vitezei se observă o scădere de

temperatură care poate duce la disconfort. Mai departe s-a hotărât evaluare Draft Rateului la nivelul modelului uman.

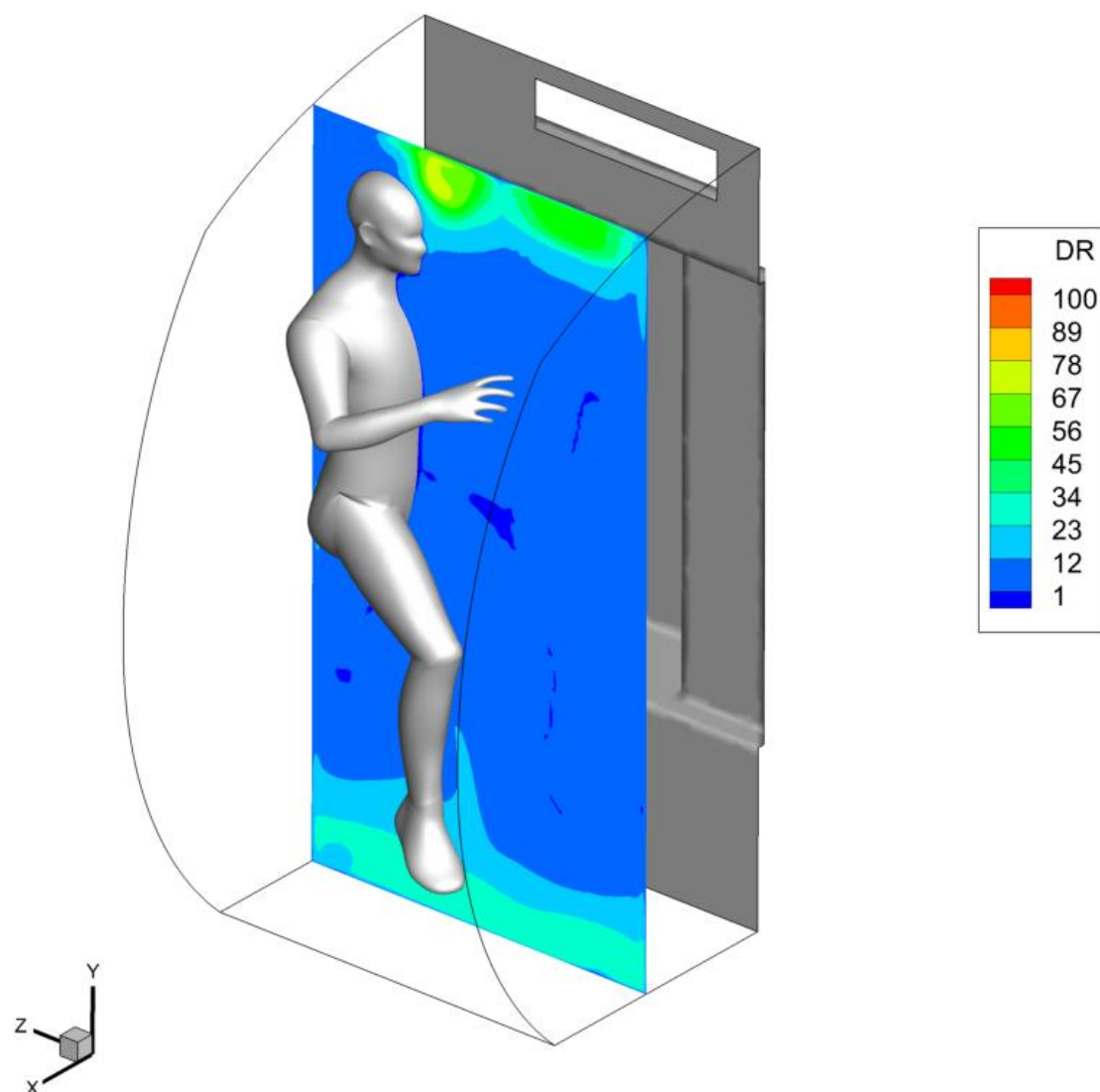


Figura 34 Valorile indicelui Draft Rate în planul sagital.

În Figura 34 și Figura 35 este reprezentat indicele Draft Rate în aceleași planuri coronale și sagitale utilizate în Figura 32 și Figura 33.

Se observă o creștere a draft rateului în zona feței. Zona de stagnare din jurul corpului prezintă un avantaj reducând acest indice la valori neglijabile. Indicele capătă valori între 23 și 34 la nivelul picioarelor datorită fenomenului de atașare a curentului de perete și datorită desprinderii acestuia la nivelul evacuării aerului.

Rezultatele indică un avantaj din punct de vedere al confortului dacă curentul de ventilare generală ar trece pe deasupra capului astronautului. Acest lucru ar reduce capacitatea ventilării de a combate acumulare de dioxid de carbon la nivelul feței. Efectul poate fi combătut prin utilizarea unui sistem similar celor folosite pentru ventilarea

personalizată la un debit mic care să asigure doar un aport de aer proaspăt la nivelul zonei de respirație.

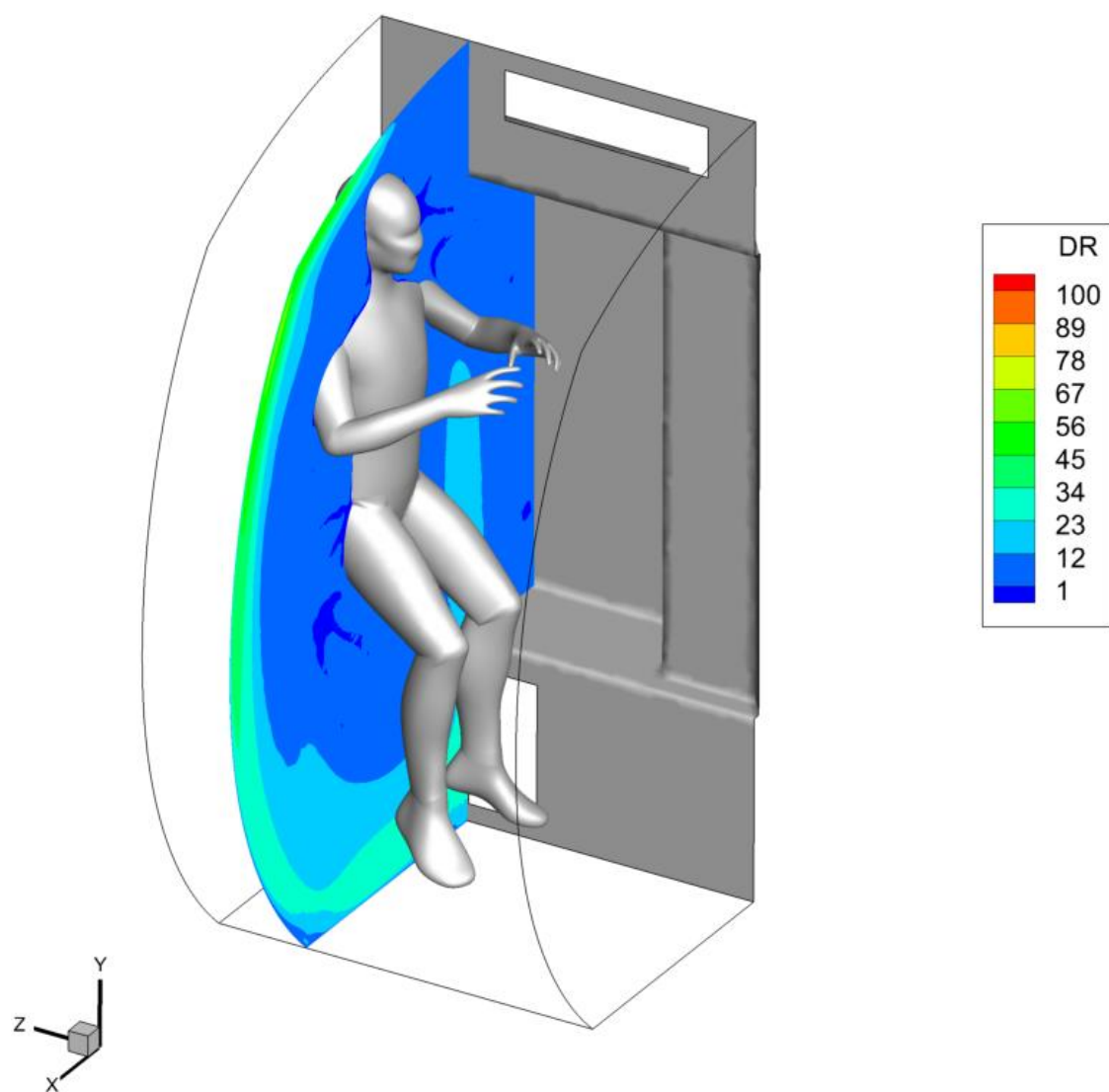


Figura 35 Valorile indicelui Draft Rate în planul coronal.

XI. Soluția de PV și acumularea de CO₂

Următoarea etapă a studiului este evaluarea numerică a unei soluții care cuplează sistemul de ventilare personalizată, cu soluția de ventilare bazată pe ventilatoare tangențiale.

Circuitul de ventilare personalizată preia aer din plenumul în care refulează ventilatorul tangențial. Aerul urmărește traseul conductei până la difuzorul de ventilare personalizată. Orificiul difuzorului este sub forma unei margarete cu 6 lobi, această formă oferă un mai bun amestec al aerului cu mediul ambiant [19].



Figura 36 Circuitul de PV montat pe standul experimental

Circuitul a fost proiectat pe baza studiilor anterioare din domeniu [19], [20], [22]. Distanța dintre duză și fața astronautului este de doua diametre echivalente. Această distanță a fost aleasă datorită debitului scăzut furnizat de circuitul de PV.

Valoarea debitului a fost determinată prin măsurători experimentale în standul folosit pentru caracterizarea ventilatoarelor axiale și tangențiale. S-a montat circuitul de ventilare personalizată în două poziții: perpendicular și în direcția de curgere a aerului furnizat de ventilator (Figura 36 Circuitul de PV montat pe standul experimental) în interiorul standului experimental pentru a determina influența componentei cinetice a vitezei asupra debitului. S-a constatat că diferența este nesemnificativă fapt care indică o influență predominantă a componentei cauzate de diferența de presiune. Debitul măsurat de debitmetrul TSI (Figura 37) a fost de 20 l/min în ambele cazuri.



Figura 37 Debitmetrul TSI în timpul măsurătorilor.

Rezultatul acestor măsurători indică că circuitul poate fi legat oriunde în plenumul cabinei de odihnă oferindu-ne un grad mare de libertate în amplasarea acestuia ușurând constrângerile spațiale anterioare.

Circuitul a fost reprodus în modelul numeric și debitul măsurat a fost impus drept condiția la limită velocity inlet cu o viteză constantă pe suprafață pentru a obține debitul măsurat de 1.2 m³/h. Pentru asigurarea ventilării generale s-a impus același profil de viteze folosit în evaluarea numerică a ventilatoarelor tangențiale, pentru a asigura debitul general de 138 m³/h utilizat în studiul numeric realizat de NASA privind acumularea de dioxid de carbon [3].

Meshul modelului a fost construit cu cca 6 milioane de elemente tetraedrale, acestea au fost transformate în elemente poliedrale reducând numărul de elemente din domeniu în același timp menținând calitatea calculului numeric.

Condiția la limită pentru evacuare a fost de pressure outlet cu valoarea presiunii egală cu presiunea atmosferică menținută pe culoarul stației spațiale internaționale. Ultima condiție la limită impusă în acest model a fost respirația omului. Valorile impuse au fost aceleași folosite de NASA în studiile lor numerice [3]. Aceasta a fost reprezentată cu o funcție sinusoidală menită să reprezinte ciclul respirator (Figura 38 Funcția sinusoidală care guvernează ciclul respirator în modelul numeric.). Astfel de funcții au mai fost utilizate în literatura care privește studiul sistemelor de ventilare personalizată [22].

Rezultatele numerice care includ ventilarea personalizată nu vor fi prezentate în acest raport deoarece este necesară îmbunătățirea grilei de calcul pentru o bună surprindere a fenomenelor dinamice prezente.

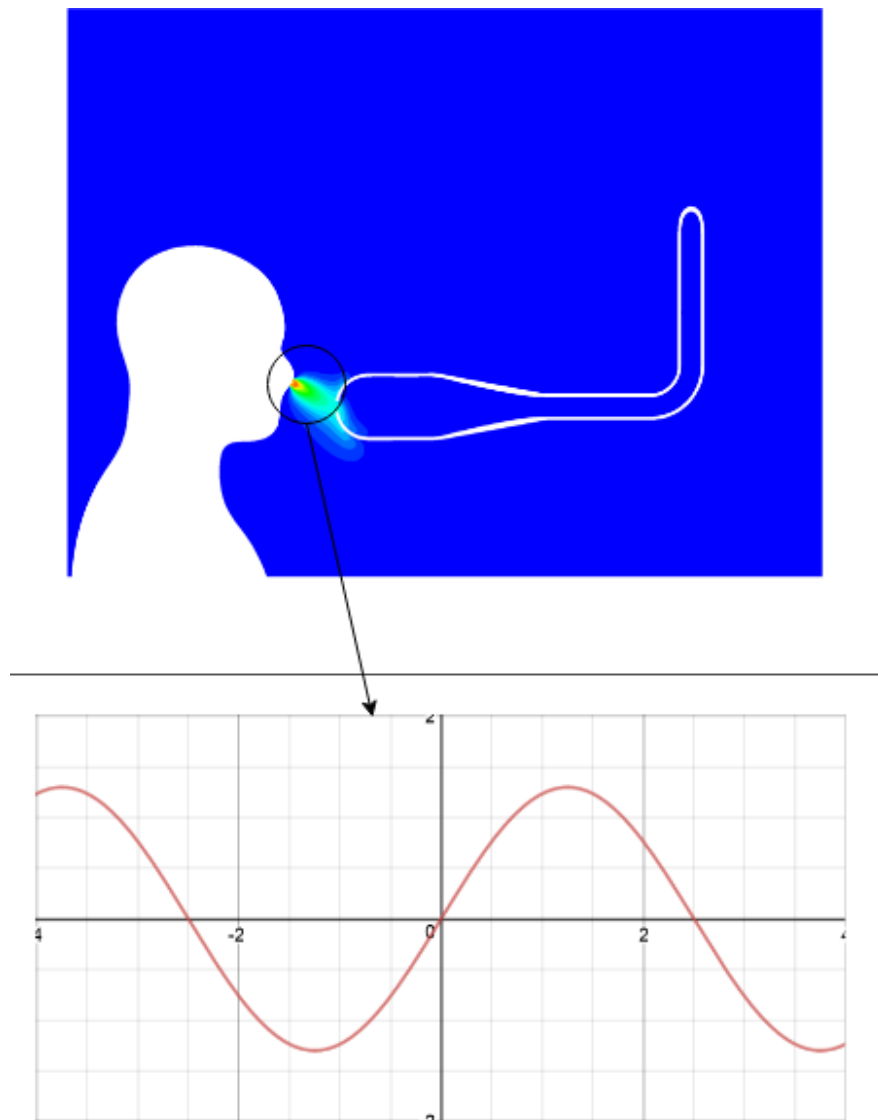


Figura 38 Funcția sinusoidală care guvernează ciclul respirator în modelul numeric.

Acumularea de CO₂ în CQ

Pentru a realiza un studiu numeric al acumulării dioxidului de carbon, s-a activat în ANSYS Fluent modelul de fază discretă. Acest model permite specificare unei concentrații masice de dioxid de carbon la fiecare intrare în sistem.

Documentația privind acumularea dioxidului de carbon pe stația spațială internațională [4], [23]–[25] declară concentrația ambientală (exprimată în presiune parțială de CO₂) ca fiind minim 3 mmHg. Ca punct de referință aceeași presiune parțială pe Terra are la nivelul mării în condiții normale o valoare de 0.3 mmHg. Ordinul de mărime diferență între cele două este explicat de unitățile de reciclare a dioxidului de carbon instalate pe SSI. Sunt doar două unități care deservește toată stația, iar funcționarea lor simultană nu poate reduce nivelul mai jos de 2 mmHg [23]. Cele două nu funcționează simultan ci intermitent atunci când detectează concentrații prea mari (mai mari ca 5 mmHg) din considerente de eficiență energetică și economie a materialelor folosite pentru realizarea reciclării. Acestea s-ar uza prea repede și ar necesita rezerve, lucru care ar fi foarte costisitor considerând faptul că orice element uzabil trebuie trimis către SSI de pe Terra.

Limita superioară a concentrației de CO₂ este de 5 mmHg. Senzorii care monitorizează nu această concentrație nu monitorizează decât în vecinătatea lor [1], [26], ducând la posibile situații în care dioxidul de carbon se poate acumula local la valori mult peste limita impusă dacă acest fenomen se petrece la o distanță suficient de mare de un senzor. Ventilarea generală a SSI va redistribui în cele din urmă această concentrație în tot volumul dar în funcție de viteza de acumulare este posibil ca unitățile de reciclare a dioxidului de carbon să intre în funcțiune mult mai târziu decât este necesar.

În plus, conform documentației [2], [16], cabinele de odihnă nu sunt echipate cu astfel de senzori însemnând că acumulările locale nu pot fi detectate. Studiile numerice asupra acumulării de CO₂ [3] studiază un caz fără ventilare locală folosind doar ventilarea generală de pe culoar, cabinele de odihnă având ușile deschise. Modelul numeric include reprezentarea virtuală a unui om în interiorul cabinei de odihnă care respiră introducând dioxid de carbon în cameră.

S-au înregistrat pe SSI valori ale presiunii parțiale de CO₂ de până la 7 mmHg. În ciuda valorilor de între 10 și 20 de ori mai mari ca pe Terra, aceleași studii arată că nu au fost disponibile suficiente date pentru a stabili o corelație directă între concentrațiile de dioxid de carbon și înrăutățirea capacității astronautilor de a-și efectua sarcinile în mod corespunzător. Până la ora actuală se pare că după perioada inițială de adaptare a corpului uman la condițiile atmosferei interne de pe SSI, toleranța personală a fiecărui astronaut este factorul principal în evaluarea influenței concentrației ridicate de CO₂ asupra performanței [4], [23]–[25].

Modelul numeric are 500 de mii de elemente tetraedrale. Simularea a fost rulată în regim tranzitoriu cu un pas de timp de 0,2 secunde timp de 10 minute. Modelul de turbulență folosit a fost K-E standard cu funcții îmbunătățite la perete. Respirația a fost impusă ca un debit constant care ajunge să echivaleze dioxidul de carbon introdus de un ciclu respirator de 5 respirații pe minut. Concentrația de CO₂ din mediul ambiant a fost impusă ca 3 mmHg, valoarea medie înregistrată pe SSI.

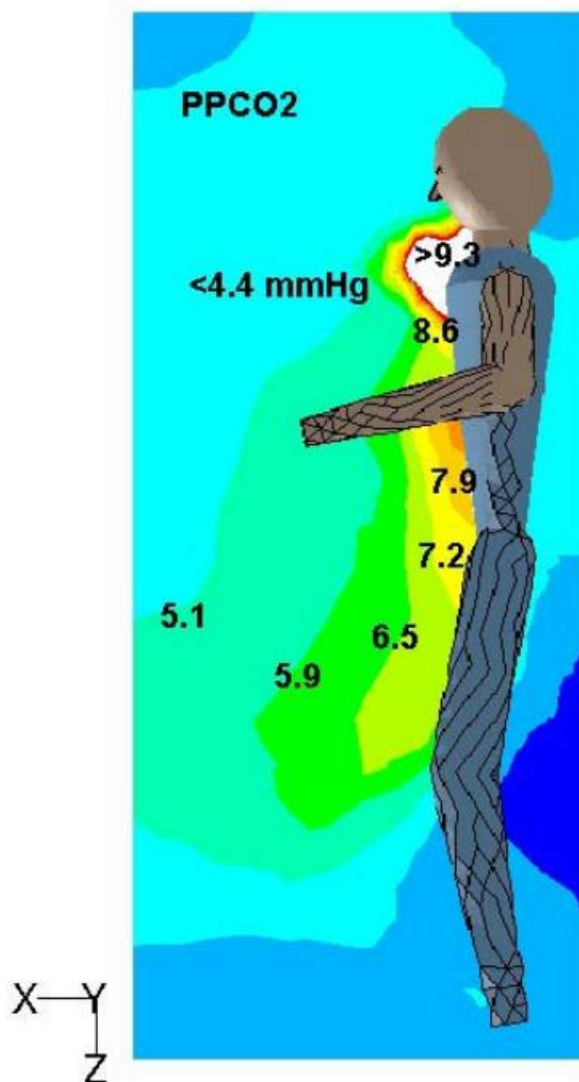


Figura 39 Acumularea de dioxid de carbon într-o situație fără ventilare în cabinele de odihnă.

Se constată o acumulare importantă de dioxid de carbon în zona pieptului și a gâtului modelului uman din Figura 39 Acumularea de dioxid de carbon într-o situație fără ventilare în cabinele de odihnă. În mediul ambiant se observă o creștere a concentrației până la 4,4 mmHg o creștere de aproape 50% față de mediul ambiant. Judecând după diferențele între valorile contururilor afișate care par să crească în pas de 0,7 mmHg, putem presupune că celelalte nuanțe de albastru nemarcate corespund unor valori de 3,7 și respectiv 3 mmHg, în conformitate cu valorile impuse pentru atmosfera internă.

Lipsa convecției naturale reduce semnificativ mecanismul de difuzie al dioxidului de carbon în cabină, acesta efectuându-se într-o situație fără ventilare exclusiv prin difuzie moleculară. Difuzia moleculară este un proces lent, care permite o acumulare importantă aproape de zona de respirație a astronautilor.

Întreaga zonă situată în fața modelului uman, depășește limita superioară impusă pe SSI de 5 mmHg reprezentând un potențial risc pentru astronaut.

Acest studiu numeric [3] este relativ vechi (2002), lucru vizibil în numărul de celule al modelului numeric. Se poate lua în considerare posibilitatea ca rezoluția spațială să nu fie suficientă pentru a surprinde în mod corespunzător zonele de acumulare datorită unor dimensiuni de celule foarte mari. Cu toate acestea, studiile recente de la NASA privind efectele dioxidului de carbon [1], [4], [11] folosesc rezultatele acestui studiu, indicând faptul că până în acest moment sunt considerate valide.

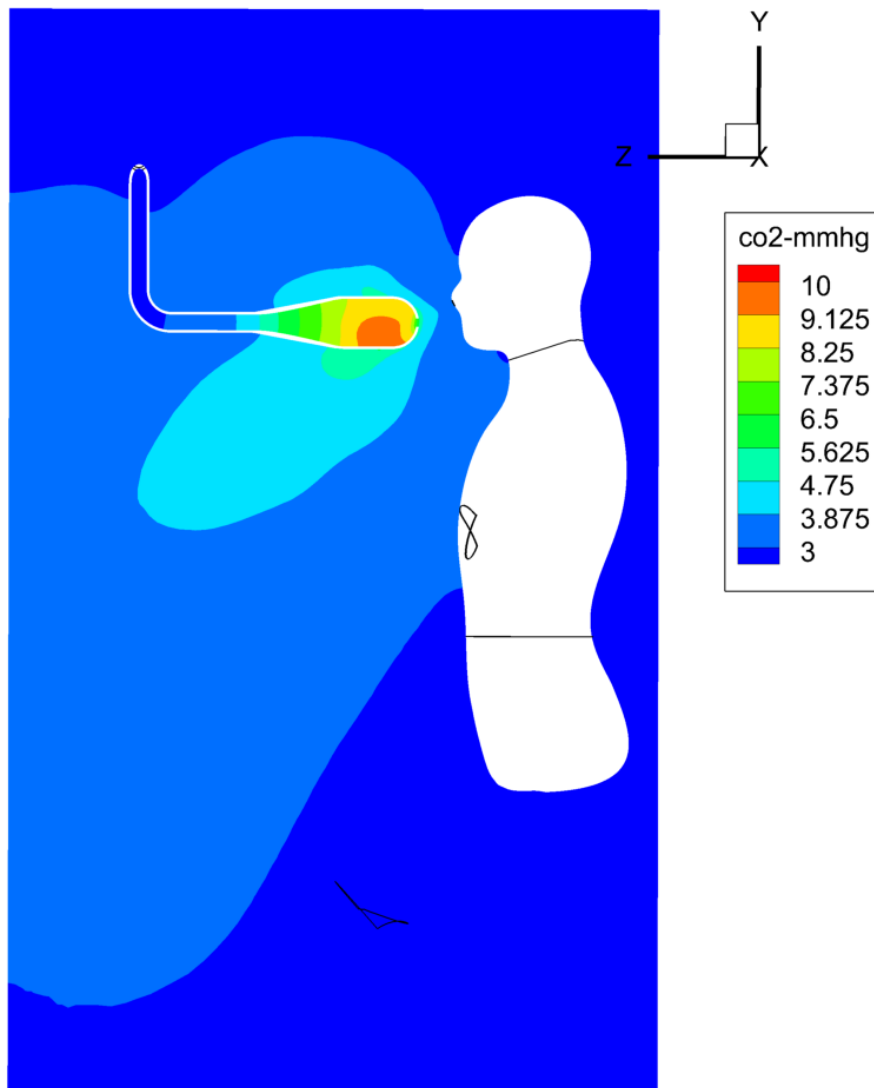


Figura 40 Acumularea de CO_2 la sfârșitul inspirației în secunda 240 din simulare.

Modelul numeric pentru studiul respirației a folosit aceiași parametri ca referința bibliografică numărul [3]. Presiunea parțială a dioxidului de carbon în mediul ambiant a fost impusă ca 3 mmHg, modelul uman a folosit același ciclu respirator de 5 respirații pe minut impus ca o funcție sinusoidală cu debitul de aer expirat determinat din literatura folosită de NASA [1], [3], [28].

Se observă (Figura 40) o acumulare de dioxid de carbon în zona din fața modelului uman, cu precădere în difuzorul de ventilare personalizată care nu furnizează aer în

această simulare. Valorile locale în zona de respirație a astronautului au crescut până la 4 mmHg după 4 minute.

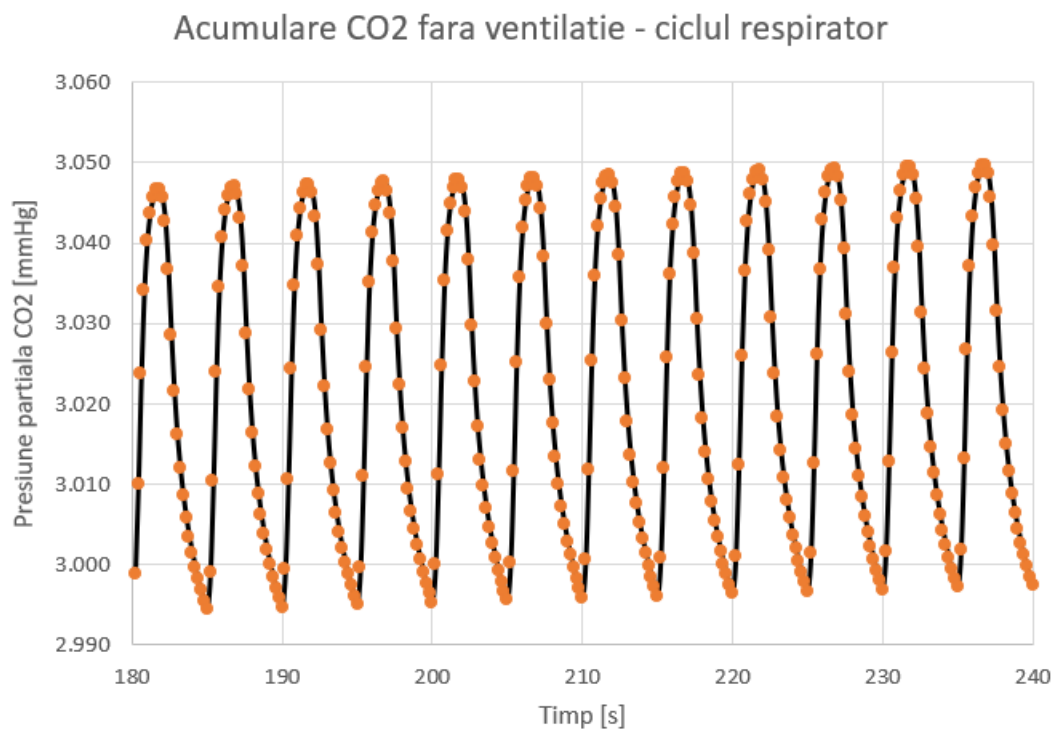


Figura 41 Variația presiunii parțiale de CO₂ pe o perioadă de 60s.

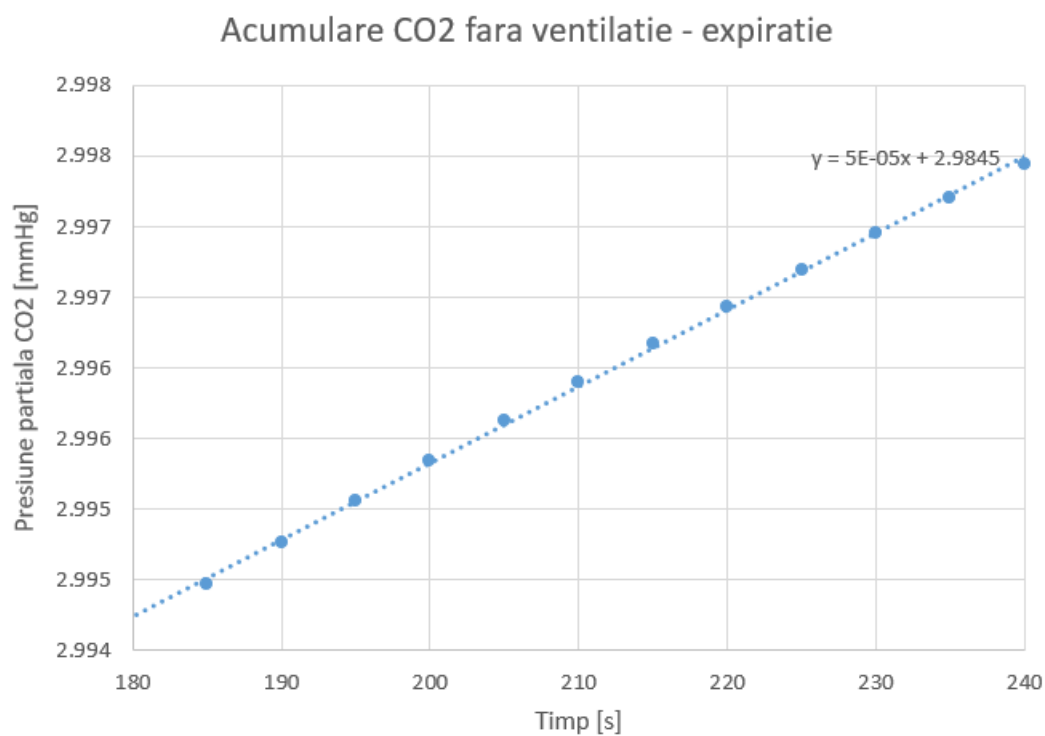


Figura 42 Tendința de acumulare a CO₂ în momentul expirației pe o durată de 60s.

Pentru o mai bună evaluare a fenomenului s-a delimitat un volum în jurul capului modelului uman, volum la interiorul căruia s-a calculat valoarea medie a presiunii parțiale de dioxid de carbon în funcție de timp. Volumul delimitat este un cub cu latura de 30 cm centrat pe capul modelului uman. Rezultatele sunt prezentate în Figura 41.

Se observă variația sinusoidală a presiunii parțiale, fenomen de așteptat datorită felului în care a fost impusă respirația modelului uman. Se observă o tendință ascendentă slabă însă o variație exactă este imposibil de determinat în condițiile acestei sinusoide. S-a optat pentru extragerea punctelor aflate la finalul inspirației (multipli de 5s).

Afișarea valorilor presiunii parțiale în același moment al ciclului respirator ar trebui să reprezinte în mod corespunzător panta graficului. Rezultatele sunt prezentate în Figura 42. S-au afișat rezultatele în ultimul minut de simulare (între 180-240 s). Se observă o creștere slabă a concentrației exprimată în mod liniar prin ecuația pantei prezentate în Figura 42.

Tabelul 7 Valoarea presiunii parțiale de CO₂ la diferite momente în timp.

Moment în timp [s]	Presiunea parțială de CO ₂ calculată cu ecuația de acumulare [mmHg]	Eroarea față de valorile măsurate [%]	Acumulare procentuală față de nivelul ambiental de 3 mmHg [%]
185	2,9938	0,0239	N/A
240	2,9965	0,0316	N/A
3600 (1h)	3,1645	N/A	5,483
28800 (8h)	4,4245	N/A	47,483

S-a extrapolat acumularea de dioxid de carbon pentru diferite perioade de timp după această formulă. Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 7. Pentru momentele de timp la 185 respectiv 240 s, rezultatele obținute prin utilizarea variației liniare prezintă erori față de rezultatele numerice de ordinul E-02, fiind mai mult decât acceptabile. S-au mai prezentat valorile presiunii parțiale în volumul din jurul capului astronautului după o perioadă de o oră, pentru a determina creșterea orară, cât și pentru o perioadă de 8 ore, corespunzătoare timpului recomandat de somn al unui om.

Se constată că după o oră, de la valoarea ambientală de 3 mmHg, s-a ajuns la o valoare de 3,16 mmHg, o creștere de aproape 5,5%. La finalul perioadei de somn, după 8 ore, valoarea ajunge la 4,42 mmHg, o creștere de aproape 50% și suficient de aproape de limita maximă admisă pe SSI de 5 mmHg.

XII. Concluzii și potențiale direcții de cercetare

Caracterizarea ventilatoarelor a fost realizată cu succes oferind posibilitate de determinare a parametrilor necesari obținerii debitelor cerute. Impunerea acestor condiții în modelul numeric a dat rezultate dincolo de așteptări dată fiind lipsa de informații tehnice exacte legate de construcția modelelor cabinelor de odihnă scară 1:1.

Reprezentarea ventilatoarelor în domeniul numeric prin curba lor caracteristică și prin coeficienții de forță au rezultat într-o bună reprezentare a dinamicii curgerii, cu coeficienții de forță oferind o calitate mai bună, însă fiind mai dificil de determinat pentru geometria ventilatoarelor tangențiale. Prin urmare, reprezentarea ventilatoarelor tangențiale se va face prin curba lor caracteristică, o variantă net superioară impunerii unui profil de viteză într-o condiție la limită de tip velocity inlet.

Studiul numeric al ventilatoarelor tangențiale a scos la iveală un puternic fenomen de atașare a curentului de aer la perete. În consecință apare o zonă de stagnare a aerului în dreptul modelului uman la mijlocul zonei de recirculare a aerului. Această zonă are potențialul de a contribui la fenomenul de acumulare a dioxidului de carbon, iar recircularea generală din cabină va reduce eficiența evacuării acestuia.

Se observă o acumulare de temperatură în jurul modelului uman datorită lipsei convecției naturale, faptul că modelul uman se află în zona de stagnare a aerului în cabină poate duce la un efect de încălzire a corpului uman peste limita de confort. În același timp în zona superioară a capului precum și în zona picioarelor există o posibilă senzație de curent datorită curentului de aer din cabină.

Studiul numeric al acumulării dioxidului de carbon indică o acumulare importantă la sfârșitul perioadei de somn (o creștere de cca 50%). Această rată de acumulare este mai redusă decât cea prezentată în studiile bibliografice. Diferențele dintre cele două constau în principal în direcția de expirație a modelului uman, cele două modele folosite fiind diferite. Deși ciclul respirator este identic, impunerea unei funcții sinusoidale spre deosebire de o expirație continuă echivalentă are un potențial efect asupra dinamicii aerului în zona de acumulare.

Nu există o metodologie clară folosită de NASA pentru studiile de acumulare a dioxidului de carbon. Se va evalua acumularea globală de dioxid de carbon în interiorul cabinelor de odihnă pentru a putea efectua o comparație cu rezultatele numerice deja existente în bibliografie în scop de validare. Valoarea presiunii parțiale de CO_2 pe volum nu este neapărat o metrică relevantă deoarece nu oferă informații legate de zonele locale de acumulare.

Se consideră o posibilă îmbunătățire a rezoluției domeniului de calcul pentru aceste măsurători, însă timpul de procesare și specificațiile unităților de calcul vor trebui luate în considerare. Simulările în tranzitoriu sunt foarte costisitoare din punct de vedere al timpului de calcul și al spațiului de stocare mai ales pentru pași mici de timp și perioade mari de studiu. Faptul că documentația NASA încă folosește ca referință singurul studiu numeric pe care îl au legat de acumularea de CO_2 , realizat pe o grilă de calcul cu o rezoluție spațială de mai mult de 10 ori mai mică, indică faptul că problema îmbunătățirii grilei de calcul este secundară.

În momentul de față cele două modele scară 1:1 au fost realizate. Primul dintre ele, cel care trebuie să reproducă sistemul de pe SSI a fost dotat cu aceleași ventilatoare și cu un circuit care a urmărit cât mai bine schemele disponibile. Pereții au fost căptușiți cu aceleași materiale izolatoare fonice ca pe SSI, urmând ca la scurt timp să înceapă măsurătorile acustice și de CO₂. După ce măsurătorile au fost efectuate în primul model se va trece la studiul soluției alternative de ventilare pe al doilea model.

Modelul numărul doi a fost echipat cu ventilatoarele tangențiale duble EBM-Papst QL43030-2124 și căptușit la interior cu aceleași materiale izolatoare fonice ca pe SSI.

S-au achiziționat 6 senzori de dioxid de carbon care vor fi amplasați în diferite puncte cheie în cabina de odihnă, unde vor înregistra continuu variația concentrației de CO₂ pe timpul măsurătorilor.

Modelul la scară redusă a fost folosit pentru efectuarea unor măsurători PIV. Până acum au fost identificate o serie de probleme legate de construcția modelului care au făcut aceste măsurători dificile. Un al doilea model la scară redusă a fost construit și este în proces de livrare. Experimentele PIV vor fi refăcute pe acest model pentru o bună caracterizare a câmpurilor de viteză.

S-au efectuat măsurători pe sistemul de ventilare personalizată construit la universitatea din Rennes. Câmpul de viteze în plan transversal al jetului de ventilare personalizată a fost măsurat cu un anemometru cu fir cald și cu o sondă omnidirecțională la diferite distanțe față de punctul de amplasare al difuzorului. S-a măsurat de asemenea variația vitezei în lungul axului jetului.

Aceste măsurători vor fi folosite pentru validarea studiului numeric privind ventilarea personalizată studiu numeric care este în curs de desfășurare începând cu un studiu de mesh pentru a asigura calitatea necesară surprinderii dinamicii fenomenelor studiate.

Partea de studiu numeric este în continua dezvoltare. Se prevede îmbunătățirea modelului numeric din punct de vedere al geometriei și grilei de calcul pentru diferite situații. În viitorul apropiat modelele numerice vor fi folosite pentru validarea rezultatelor experimentale obținute cu PIV pe modelul la scară redusă precum și a măsurătorilor de dioxid de carbon în cele două modele scară 1:1 și măsurătorile jetului de ventilare personalizată măsurat.

Următoarea etapă importantă a tezei va fi validarea modelelor numerice prin rezultatele experimentale. Caracteristicile ventilatoarelor vor fi folosite pentru generarea curgerii în modelele numerice cu circuitele de ventilare complete, iar măsurătorile de câmpuri de viteză obținute prin PIV vor fi folosite pentru a verifica o bună surprindere a dinamicii curgerii la interiorul cabinei.

Măsurătorile de dioxid de carbon efectuate în modelele scară 1:1 vor fi comparate cu rezultate numerice. Se vor evalua valorile în aceleași puncte măsurate pentru a verifica condițiile la limită impuse legate de sursele de dioxid de carbon și o bună reprezentare a condițiilor reale în domeniul numeric.

Toate aceste validări vor fi efectuate pe modele numerice cu câmp gravitațional. Imposibilitatea reproducerii stării de imponderabilitate pe Terra ne obligă să ne bazăm pe modelele numerice pentru reprezentarea fenomenelor în lipsa gravitației. După validare,

acclerația gravitațională va fi dezactivată în modele pentru o ultimă serie de calcule care vor furniza rezultatele finale ale tezei.

Studiul bibliografic este un proces continuu care va continua pe tot parcursul tezei de doctorat pentru a putea rezolva orice obstacole întâmpinate și în același timp pentru a asigura actualitatea teoriilor și modelelor considerate. Se prevede redactarea de articole științifice legate de subiectul tezei pentru publicare în conferințe și jurnale științifice de specialitate.

XIII. Bibliografie

- [1] NASA, "National Aeronautics and Space Administration HUMAN INTEGRATION DESIGN HANDBOOK," *Spaceflight (Lond)*., pp. 1–27, 2010.
- [2] J. Broyan, D. Welsh, and S. Cady, "International Space Station Crew Quarters Ventilation and Acoustic Design Implementation," *40th Int. Conf. Environ. Syst.*, pp. 1–16, 2010.
- [3] C. H. Son, J. L. Zapata, and C. Lin, "Investigation of Airflow and Accumulation of Carbon Dioxide in the Service Module Crew Quarters," no. 724, 2002.
- [4] D. Law J., Watkins S., Alexander and W. S. Law J., "In-Flight Carbon Dioxide Exposures and Related Symptoms: Associations, Susceptibility and Operational Implications," *NASA Tech. Rep.*, no. June, pp. 1–21, 2010.
- [5] "Computational Methods For Fluid Dynamics - Ferziger Book.pdf." .
- [6] S. Danaila, "Ecuatiile mediate Reynolds," pp. 1–9.
- [7] S. Danaila, "Ecuatiile energiei cinetice," pp. 1–8.
- [8] S. Danaila, "Modele cu două ecuații de transport pentru turbulența dezvoltată," pp. 1–24.
- [9] S. Danaila, "Domeniul de aplicabilitate al modelelor de turbulență cu două ecuații de transport," pp. 2–4.
- [10] E. M. Smirnov, N. G. Ivanov, D. S. Telnov, C. H. Son, and V. K. Aksamentov, "Computational Fluid Dynamics Study of Air Flow Characteristics in the Columbus Module," no. July, 2004.
- [11] C. H. Son, N. G. Ivanov, E. M. Smirnov, and D. S. Telnov, "CFD analysis of node 1 ventilation and carbon dioxide transport for the maximum stowage configuration," *40th Int. Conf. Environ. Syst. ICES 2010*, pp. 1–9, 2010.
- [12] C. Son, N. Ivanov, D. Telnov, and E. Smirnov, "Integrated Ventilation Modeling for Crew Quarter Airflow," *41st Int. Conf. Environ. Syst.*, no. March 2016, 2011.
- [13] C. H. Son, V. K. Aksamentov, E. M. Smirnov, N. G. Ivanov, and D. S. Telnov, "CFD Modeling for Ventilation : a Method for Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) Data Correlation," no. May, 2006.
- [14] E. M. Smirnov, N. G. Ivanov, D. S. Telnov, and C. H. Son, "CFD modelling of cabin air ventilation in the international space station: A comparison of RANS and LES data with test measurements for the Columbus module," *Int. J. Vent.*, vol. 5, no. 2, pp. 219–227, 2006.
- [15] C. H. Son, E. M. Smirnov, N. G. Ivanov, and D. S. Telnov, "Cfd Modeling of International Space Station and Visiting Spacecraft Ventilation : Evaluation of Design Solutions for Complex on-Orbit Operations," vol. 3, no. June, 2011.
- [16] J. L. Broyan, M. A. Borrego, and J. F. Bahr, "International Space Station USOS Crew Quarters Development," *38th Int. Confeence Environ. Syst.*, 2008.

- [17] T. P. Schlesinger and B. R. Rodriguez, "International Space Station Crew Quarters On-Orbit Performance and Sustaining Activities," *Int. Conf. Environ. Syst.*, pp. 1–9, 2013.
- [18] J. L. Broyan Jr, M. A. Borrego, and J. F. Bahr, "International {Space} {Station} {United} {States} {Operational} {Segment} {Crew} {Quarters} {On}-orbit vs. {Design} {Performance} {Comparison}," *SAE Int. J. Aerosp.*, vol. 4, no. 1, pp. 98–107, 2011.
- [19] I. Nastase, A. Meslem, and P. Gervais, "Primary and secondary vortical structures contribution in the entrainment of low Reynolds number jet flows," *Exp. Fluids*, vol. 44, no. 6, pp. 1027–1033, 2008.
- [20] Z. Bolashikov, A. Melikov, M. Spilak, I. Nastase, and A. Meslem, "Improved inhaled air quality at reduced ventilation rate by control of airflow interaction at the breathing zone with lobed jets," *HVAC R Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 238–250, 2014.
- [21] S. Fairburn and S. Walker, "'Sleeping With the Stars' – The Design of a Personal Crew Quarter for the International Space Station," no. 724, 2001.
- [22] D. Al Assaad, K. Ghali, N. Ghaddar, and C. Habchi, "Mixing ventilation coupled with personalized sinusoidal ventilation: Optimal frequency and flow rate for acceptable air quality," *Energy Build.*, vol. 154, no. 2017, pp. 569–580, 2017.
- [23] C. M. Matty, "Overview of Carbon Dioxide Control Issues During International Space Station/Space Shuttle Joint Docked Operations," *40th Int. Conf. Environ. Syst.*, vol. 2, pp. 1–9, 2010.
- [24] J. T. James, V. E. Meyers, W. Sipes, R. R. Scully, and C. M. Matty, "Crew Health and Performance Improvements with Reduced Carbon Dioxide Levels and the Resource Impact to Accomplish Those Reductions," no. July, pp. 1–7, 2011.
- [25] C. M. Matty, "Overview of Carbon Dioxide Control Issues During International Space Station / Space Shuttle Joint Docked Operations," vol. 2, 2019.
- [26] R. M. Bagdigian, N. Marshall, and S. Flight, "International Space Station Environmental Control and Life Support System Mass and Crewtime Utilization In Comparison to a Long Duration Human Space Exploration Mission," no. July, 2015.
- [27] N. Sp--, "National Aeronautics and Space Administration HUMAN INTEGRATION DESIGN HANDBOOK," *Spaceflight (Lond).*, pp. 1–27, 2010.
- [28] G. Halek, "Physics of breathing," *British Medical Journal*, vol. 1, no. 4700. p. 246, 1951.