



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI  
MINISTERUL ȘCOLII NAȚIONALE  
PROIECTE ȘCOLIALE DE  
PERSONALELE NAȚIONALE  
AMPCSDRU



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI  
NATIONALE  
CNPEDRU



Universitatea Tehnică  
de Construcții București

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI**

**Facultatea de Ingineria Instalațiilor**

**TEZA DE DOCTORAT**

**Rezumat**

*STUDIUL VENTILĂRII PERSONALIZATE  
ȘI  
STUDIUL MISCĂRII AERULUI ÎN SISTEMELE  
DE VENTILARE PERSONALIZATĂ*

**Doctorand**

*Ing. Iunia Antonia CRUCEANU (căsătorită Gligor)*

**Conducător științific**

*Prof. univ. dr. ing. Iolanda COLDA*

**BUCUREȘTI**

**2013**

*Titularul prezentei teze de doctorat a beneficiat pe întreaga perioadă a studiilor universitare de doctorat de bursă atribuită prin proiectul strategic „Burse oferite doctoranzilor în Ingineria Mediului Construit”, beneficiar UTCB, cod POSDRU/107/1.5/S/76896, proiect derulat în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane, finanțat din Fondurile Structurale Europene, din Bugetul Național și cofinanțat de către Univeritatea Tehnică de Construcții București.*

## Cuprins

1	Introducere .....	
1.1	Context.....	
1.2	Obiective .....	
1.3	Organizarea tezei.....	
2	Calitatea ambientală și ventilarea .....	
52.1	Corpul uman sursă de căldură.....	
2.1.1	Confortul termic.....	5
2.1.2	Panașul termic.....	6
2.2	Necesarul de aer pentru ventilare.....	6
2.3	Consumul de energie pentru ventilare.....	7
2.3.1	Descrierea localului.....	7
2.3.2	Scenariul de ocupare și sarcinile interioare .....	7
2.3.3	Descrierea sistemului de ventilare .....	7
2.3.4	Programul de simulare .....	8
2.3.5	Cazurile simulate.....	8
2.3.6	Rezultatele obținute .....	8
2.3.7	Concluzii .....	
3	Modelarea numerică.....	9
3.1	Modelarea numerică a panașului termic; studiile publicate în literatură .....	9
3.2	Modele zonale.....	9
3.2.1	Introducere .....	9
3.2.2	Istoric .....	9
3.2.3	Modele existente .....	9

3.3	Modelarea numerică a persoanei și panașului convectiv cu ajutorul modelelor zonale .....	10
3.4	Prezentarea mediului de simulare SPARK .....	10
3.5	Implementarea modelului zonal al panașului termic în SPARK.....	10
3.5.1	Implementarea modelelor zonale în mediul de simulare SPARK.....	10
3.5.2	Construcția simulării.....	10
3.6	Rezultate .....	
3.7	Modelarea numerică a sistemului de ventilare personalizată în literatură .....	11
3.8	Modelarea zonală a sistemului de ventilare personalizată .....	11
3.8.1	Implementarea dispozitivului de ventilare personalizată în modelarea zonală și cuplarea acestuia cu modelul panașului termic creat de ocupant.....	
3.9	Rezultatele modelării numerice a sistemului de ventilare personalizată.....	12
4	Studii experimentale privind jetul convectiv creat în jurul corpului uman și terminalul de introducere pentru ventilația personalizată .....	
4.1	Studii experimentale în literatură.....	
4.1.1	Studii experimentale privind curentul convectiv creat în jurul corpului uman.....	
4.1.2	Studii experimentale asupra sistemului de ventilare personalizată .....	
4.2	Manechinul experimental.....	
4.3	Principii de măsură și echipamente utilizate.....	
4.4	Campania experimentală.....	
5	Sinteza rezultatelor studiului actual .....	
6	Concluzii generale, perspective și contribuții personale .....	
	Bibliografie .....	

# 1 Introducere

## 1.1 Context

În perioada actuală oamenii își petrec o foarte mare parte din timp în spații închise. În aceste condiții asigurarea calității aerului interior are o importanță crucială. Factorii care influențează calitatea aerului includ temperatura, umiditatea, numărul de schimburi de aer de ventilare, particulele poluante, poluanții biologici.

Sistemele de ventilare au fost diversificate și îmbunătățite pentru a îndeplini condițiile de confort și condițiile igienico-sanitare. Printre sistemele folosite în prezent se numără sistemul de ventilare prin amestec (MV), sistemul de ventilare prin deplasare (DV), sistemul de ventilare tip piston având un caz particular în sistemul cu distribuție în pardoseală (UFAD). Ventilarea prin amestec (MV) presupune introducerea unui debit de aer proaspăt cu viteze destul de mari prin terminale de aer cu inducție ridicată, acest debit este amestecat cu aerul din încăperea și ajunge amestecat în zona de inhalare a ocupanților. Aerul proaspăt poate fi poluat în acest proces de amestec.

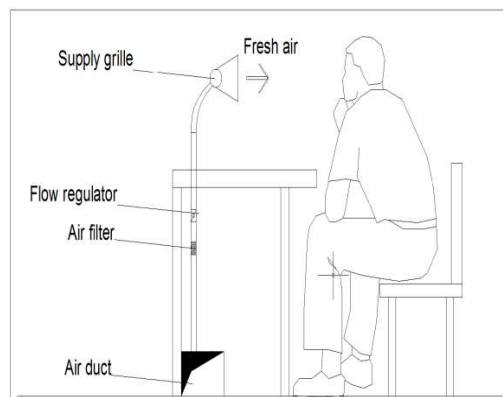
Sistemul de ventilare prin deplasare (DV) presupune introducerea aerului proaspăt în partea inferioară a încăperii cu viteze relativ mici acesta distribuindu-se uniform, și având o traiectorie ascendentă fiind antrenat de curenții determinați de sursele de căldură (persoane, echipamente). Acesta se ridică la partea superioară a încăperii fiind preluat de gurile de extracție. Acest sistem poate asigura o calitate superioară a aerului inhalat dar poate exista în continuare riscul contaminării aerului în drumul său până la zona de inhalare.

Sistemul de ventilare cu distribuție în pardoseală (UFAD) s-a dovedit similar cu sistemul de ventilare prin deplasare (DV) în ceea ce privește asigurarea calității aerului. Din punct de vedere al consumului energetic ventilația constituie un consumator important.

Criza energetică apărută în 1970 a adus în atenția specialiștilor, necesitatea și importanța economisirii energiei. În acest context atât sistemul ventilării prin amestec cât și sistemul ventilării prin deplasare, actualmente folosite în ventilarea clădirilor sunt metode de ventilare globală care implică parțial sau integral volumul încăperii. Normele de ventilare în vigoare impun un debit de aer proaspăt cuprins între 4-10 l/s în funcție de ambianță. Cu toate acestea debitul de aer implicat în respirație este de cca 0.08 l/s. Această diferență între debitul furnizat și cel inhalat se datorează faptului că aerul proaspăt este amestecat cu aerul interior înainte ca acesta să fie inhalat de către ocupanți. Aceasta indică că un sistem de ventilare prin amestec nu este foarte performant din punct de vedere energetic.

Ca urmare a acestor constatări, Fanger a prezentat sistemul de ventilare personalizată (PV) ca o alternativă mai avantajoasă din punct de vedere al calității aerului inhalat și din punct de vedere economic, la sistemul de ventilare prin amestec. În anumite cazuri cum ar fi camere având volume mari ca birourile (cu înălțimi mari) sălile de spectacole, ventilația personalizată ar fi mai potrivită deoarece ar permite satisfacția ocupanților și ar fi mult mai economică din punct de vedere energetic, deoarece s-ar ocupa doar de spațiul din jurul fiecărei persoane.

Schema de principiu a unui sistem de ventilare personalizată este prezentată în Figura 1.1



**Figura 1.1 Schemă a sistemului de ventilare personalizată ([1])**

Sistemul a fost dezvoltat pentru a realiza un control individual, a crește calitatea aerului oferind astfel posibilitatea creșterii productivității activității. Sistemul trebuie văzut asemenea unui „computer personal” care aduce gura de introducere în zona capului, în apropierea nasului. Acest sistem se bazează pe principiul inhalării aerului din miezul nepoluat al jetului de aer introdus. Spre deosebire de terminalele de aer folosite pentru ventilația prin amestec, care trebuie să realizeze cât mai rapid amestecul aerului proaspăt cu cel din încăpere reducând și diferența de temperatură, dispozitivele de introducere pentru ventilația personalizată sunt cu atât mai eficiente cu cât acest amestec se realizează într-o măsură cât mai mică.

## 1.2 Obiective

Obiectivul principal al cercetării a fost, pe lângă un studiu bibliografic al literaturii de specialitate, conceperea unui model numeric, cu o geometrie simplificată și o discretizare a spațiului în volume mai mari față de modelul CFD, pentru a surprinde fenomenul termo - aerulic și a reda în mod corect, distribuția de temperaturi și viteze pentru acest sistem. Modelul a fost testat dar și alimentat cu relații experimentale, folosind un stand și un manechin, în laboratorul Departamentului de Sisteme Termice și Hidraulice din Facultatea de Inginerie a Instalațiilor, UTCB

## 1.3 Organizarea tezei.

Este prezentată structura tezei și a capitolelor componente.

# 2 Calitatea ambientală și ventilarea

Pentru a putea privi ca un întreg, sistemul ventilării personalizate trebuie să luăm în considerare toți factorii implicați. În primul rând, un sistem de ventilare trebuie să asigure un mediu sănătos și plăcut în spațiul pentru care este destinat.

## 2.1 Corpul uman sursă de căldură

### Confortul termic

Capitolul se deschide cu un paragraf dedicat confortului termic, un sistem de ventilare trebuind să realizeze o atmosferă confortabilă din punct de vedere termic și o calitate corespunzătoare a aerului inhalat. Acești doi factori sunt necesari pentru cazul unei persoane aflată un timp mai îndelungat într-un anumit mediu. De asemenea o altă condiție este existența unui echilibru termic, fără solicitarea sistemului termoregulator, omul fiind o sursă de căldură care realizează cu mediul un schimb permanent de energie. Sunt prezentați factorii care determină senzația de confort termic: nivelul de activitate (cantitatea de căldură produsă de

corp), rezistența termică a îmbrăcămînții (valoarea în clo); temperatura aerului, temperatura medie radiantă, viteza de mișcare a aerului, presiunea vaporilor de apă în aer. Confortul termic poate fi atins printr-o multitudine de combinații a factorilor mai sus menționați ([4]).

### **Panașul termic**

Următorul paragraf este dedicat curentului convectiv ascendent, care se formează în jurul corpului uman, datorită diferenței de temperatură dintre corp și mediul ambiant. Acest curent este foarte important pentru evaluarea diferitelor strategii de ventilare, deoarece în drumul său ascendent poate antrena particule și bioefluenți de pe suprafața corpului introducându-le mai apoi în zona respirabilă.

Inițial, acest curent convectiv este laminar la nivelul picioarelor, apoi pe măsură ce urcă devine turbulent astfel încât partea superioară a corpului este învăluită într-o curgere turbulentă. La nivelul capului și umerilor acest curent suferă o separare creându-se zone de recirculație ([4.1]); ([7]). Apoi curenții de convecție la nivelul umerilor se unesc deasupra capului, cu curentul convectiv care vine de la acesta, dând naștere la ceea ce se numește în literatură panaș termic. În cazul panașului termic vorbim despre convecție liberă, astfel coeficientul de transfer convectiv are o importanță majoră. Valoarea sa este dată de relații în funcție de temperatura mediului ambiant și temperatura suprafeței corpului, în literatură existând mai multe relații pentru calculul acestui coeficient. Relația aleasă de noi pentru modelul nostru numeric este

$$h_c = 1.2(T_i - T_a)^{0.33}$$

Această relație a fost preluată mai apoi și de Dokka ([14]) în relația propusă de Skaret pentru calculul debitului de aer din panaș. Cu această justificare în studiul nostru de modelare numerică am decis adoptarea acestei relații.

## **2.2 Necesarul de aer pentru ventilare**

Un alt paragraf este dedicat necesarului de aer pentru ventilare și consumului de energie în sistemele clasice și cele de ventilare personalizată (PV). Unul dintre avantajele sistemului PV fiind economia de energie, am simțit nevoia unei cuantificări a acestei posibile economii. Potențialul de economisire al ventilării personalizate, provine în principal din introducerea unor debite de aer reduse, datorită eficienței crescute de ventilare. Eficiența se calculează prin următoarea relație:

$$\varepsilon_V = \frac{C_E - C_S}{C_i - C_S} \quad (2.1)$$

Unde  $C_i$ - concentrația de poluant în aerul inhalat (ppm)

$C_s$ - concentrația de poluant în aerul introdus (ppm)

$C_E$ - concentrația de poluant în aerul evacuat (ppm)

O valoare supraunitară a eficienței ventilării înseamnă că sistemul de ventilare este mai eficient decât sistemul de ventilare prin amestec, pentru a furniza și a distribui aerul proaspăt. Debitul minim de aer exterior poate fi astfel redus prin creșterea eficienței ventilării.

De asemenea alte două posibile strategii conduc la micșorarea consumului de energie. Prima dintre acestea este creșterea temperaturii din încăperea, în condițiile aceluiași confort, față de sistemul clasic de ventilare, deoarece sistemul de ventilație creează un mediu controlat în imediata apropiere a corpului. A doua strategie provine din faptul că furnizarea aerului prin sistemul de ventilare personalizată se va face doar atunci când ocupanții sunt la birouri.

## 2.3 Consumul de energie pentru ventilare

Considerând aceste trei strategii de economisire a energiei pentru sistemul de ventilare personalizată am realizat un studiu de evaluare a consumului energetic pentru o sală de clasă dintr-o Școală aflată în orașul București pentru sistemul de ventilare clasic și cel de ventilare personalizată folosind metoda nodală. Această metodă presupune că amestecul din încăperea este total omogen, caracterizat prin aceeași presiune, temperatură și umiditate. Modelul presupune utilizarea următoarelor relații:

- ecuații de conservare a masei pentru aerul interior și umiditate
- ecuații de bilanț termic pentru mediul ambiant; (descrise la capitolul 3 la descrierea modelului zonal, metoda nodală sau monozonă fiind un caz particular al metodei zonale),
- ecuații ale transferului de căldură conductiv în pereți, relații care descriu schimburile convective între aerul din încăperea și pereți precum și schimburile prin radiație între pereți.

Simulările au fost realizate pe parcursul a trei luni calendaristice (aprilie, mai, iunie) folosind fișierul meteo din baza de date ASHRAE. Simulările pentru acest model nodal au fost făcute cu ajutorul programului SPARK.

### Descrierea localului

Sala de clasă are o înălțime de 3,5 m. Am considerat ca pereții Vest și Sud și plafonul sunt elemente exterioare, iar ceilalți pereți și pardoseala sunt considerate elemente interioare, în contact cu spații climatizate având o temperatură de 24 °C. Peretele Sud am considerat că este un perete cortină alcătuit dintr-un geam dublu care lasă să treacă 40% din radiația solară.

Peretele Vest este alcătuit din 18 cm cărămidă, 7 cm polistiren la partea exterioară.

Pardoseala este constituită din 18 cm beton, 10 cm polistiren și 7 cm sapa din beton.

Plafonul este compus din 10 cm polistiren, 18 cm beton și 2 cm tencuiala interioară.

Pereții interiori sunt constituiți din 15 cm cărămidă cu tencuială de 2 cm la partea interioară și la partea exterioară.

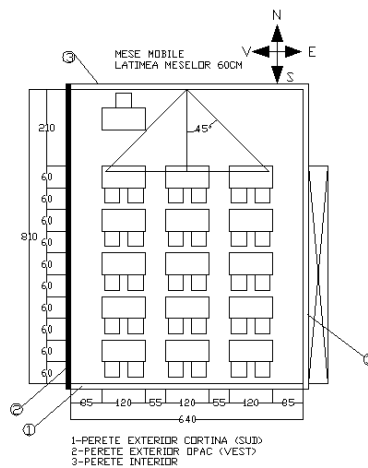


Figura 2.1 Geometria sălii de clasă modelată

### Scenariul de ocupare și sarcinile interioare

Încăperea este ocupată de 31 de persoane de la ora 8.00 până la ora 18.00, cinci zile pe săptămână. Pentru fiecare oră am considerat că există 8 minute de pauză. Pe parcursul pauzei în lunile aprilie și mai, rămân 15 persoane în clasă iar în luna iunie doar 8 persoane.

În ceea ce privește infiltrațiile, acestea depind de presiunea existentă în interiorul localului. Am considerat 0.8 V/h când sistemul de ventilare nu funcționează și 0,4 V/h când sistemul de ventilare funcționează.

Iluminatul este în funcțiune între orele 08.00 și 10.00 în lunile aprilie și mai și am considerat o sarcină de 15 W/m<sup>2</sup>).

### Descrierea sistemului de ventilare

Pentru sistemul de ventilare clasic (VC), debitul de aer introdus a fost calculat conform normativului de ventilare I5 considerând debitele de aer proaspăt pentru o persoană ca având valorile de 25m<sup>3</sup>/h și 30m<sup>3</sup>/h pentru categoria de ambianță II de clădire. Pentru întreaga încăpere au rezultat din calcul două valori ale debitului de aer introdus 840 mc/h și 995 mc/h. Temperatura de introducere variază considerând un prag minimal de 18°C și un prag maxim fixat la 18°C, 20°C 22°C sau 24°C. (8 cazuri în total)

Pentru sistemul de ventilare personalizată (VP) sunt simulate șapte situații pentru care debitele de introducere sunt pentru fiecare persoană 2,5 l/s; 4l/s; 5,5l/s; 6,5l/s; 7l/s; 8l/s și 10 l/s. Întrucât sistemul introduce aer la o distanță mică față de ocupant, vom avea mai multe restricții pentru temperatura aerului introdus. Aceasta variază între un prag minimal de 20°C și o temperatură maximă care este fixată la 22°C, 24°C sau 26°C. (aerul exterior va fi încălzit sau răcit). În total au fost studiate 21 cazuri.

Nu există ventilare mecanică iar extracția aerului se efectuează prin neetanșitățile localului.

În ambele cazuri temperatura interioară a localului fluctuează liber fără a fi reglată în vreo formă.

### Programul de simulare

Acest paragraf este detaliat în manuscrisul tezei de doctorat.

### Cazurile simulate

Am comparat cele două sisteme de ventilare, clasic și personalizat din punct de vedere energetic și al confortului termic.

### Rezultatele obținute

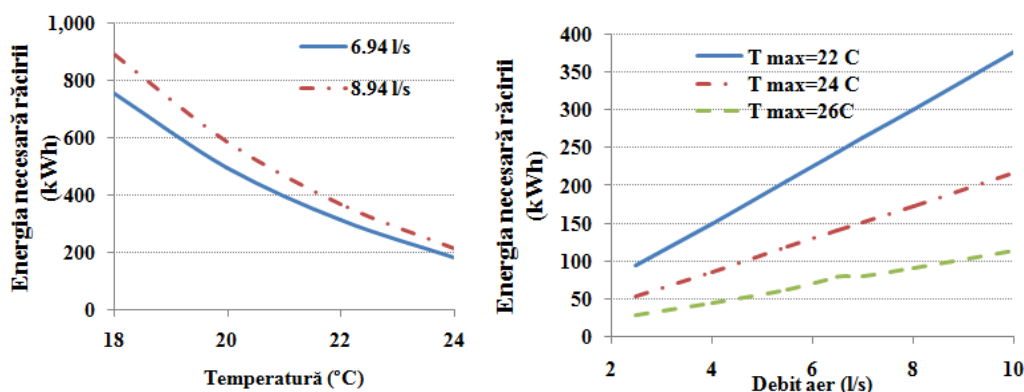


Figura 2.2 Consumul energetic necesar pentru a răci aerul introdus în funcție de debitul de aer și temperatura maximă de introducere pentru Ventilația clasică (CV)(a) Ventilația personalizată (PV)(b)

Figura 2.3 Consumul energetic necesar pentru a răci aerul introdus în funcție de debitul de aer și temperatura maximă de introducere pentru Ventilația clasică (CV)(a) Ventilația personalizată (PV)(b)



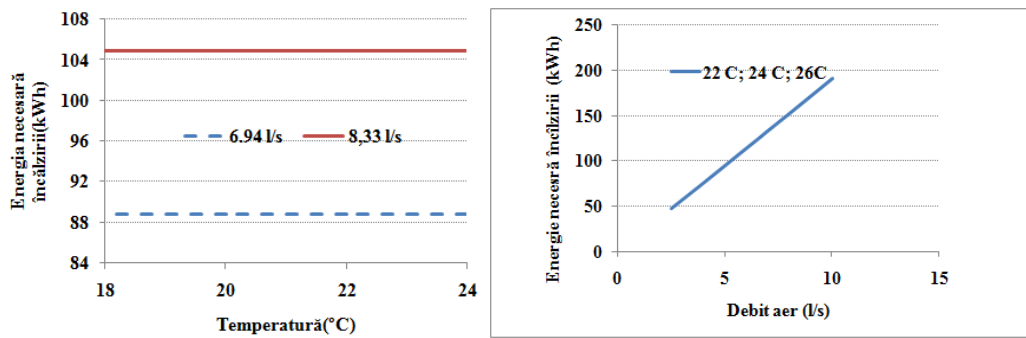


Figura 2.4 Consumul de energie necesar încălzirii aerului introdus pentru PV (a) și VC (b)

Studiul a concluzionat că în funcție de strategia de introducere a aerului în sistemul de ventilație personalizată economia realizată față de un sistem clasic de ventilare poate fi de până la 49%.

Această strategie de introducere (debit și temperatură) depinde la rândul ei, de mai mulți factori care determină eficiența terminalului de ventilare: tipul gurii de introducere, poziția terminalului de introducere față de ocupant, temperatura din încăpere, umiditatea relativă, izolația îmbrăcăminții. Toți acești factori influențează curentul convectiv care se dezvoltă în jurul corpului (panașul termic), care va fi mai ușor sau mai greu de penetrat de jetul provenit din terminalul de ventilație personalizată.

### 3 Modelarea numerică

Acest capitol este dedicat descrierii studiului de modelare numerică. Datorită diferenței de temperatură existente între mediul ambiant și corpul uman, în jurul acestuia din urmă se formează un curent de convecție ascensional. Primul pas al studiului a fost reprezentarea în modelul numeric a acestei curgeri.

#### 3.1 Modelarea numerică a panașului termic; studiile publicate în literatură

Primul pas al studiului a fost reprezentarea în modelul numeric a acestei curgeri. Având în vedere complexitatea curgerii și posibilitatea modelelor zonale de a reprezenta o astfel de curgere, a fost necesar un studiu aprofundat al lucrărilor din literatură. Studiul este descris pe larg în manuscris.

#### 3.2 Modele zonale

În acest paragraf vom face o prezentare a principiului modelării zonale, o trecere în revistă a modelelor existente de-a lungul timpului și a ecuațiilor folosite în cazul modelării zonale realizate de noi în acest studiu.

- **Introducere**

- **Istoric**

- **Modele existente**

$$\dot{m}_{i,j} = C_d \rho_{i,j} w h \left( \frac{2}{\rho_{i,j}} |\Delta P_{i,j}| \right)^{\frac{1}{2}} \times \text{semn}(\Delta P_{i,j}) \quad (3.1)$$

Modelarea zonală realizează predicția câmpului de temperaturi și a circulației aerului în încăpere, pe baza calculului câmpului de presiuni. Spațiul din încăpere este împărțit într-un număr relativ mic de volume de control în care temperatura și densitatea sunt considerate omogene, în timp ce presiunea variază după o lege hidrostatică. Ecuațiile de conservare a masei și energiei sunt aplicate fiecărei celule în parte, (ecuația 3.1) iar aerul din interior este tratat ca un gaz perfect. Debitul de masă care traversează interfața dintre două celule i

si j depinde de diferența de presiune între cele două celule (ecuatia 3.4). Astfel motorul curgerii va fi considerat diferența de presiune între cele două celule.

$$\sum_{u=1}^6 \dot{m}_{au_{u-1}} = 0 \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_{au_{u-1}} = C_d \rho_{au} w h \left( \frac{2}{\rho_{i,j}} |\Delta P_{i,j}| \right)^{\frac{1}{2}} \times \text{semn}(\Delta P_{i,j}) \quad (3.3)$$

$$\sum_{u=1}^6 \dot{m}_{sp_{u-1}} + S_{sp} = V_i \frac{\partial \rho_{sp_i}}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$\sum_{j=1}^6 \dot{m}_{as_{j-1}} C_{p_{2s}} T_j + \dot{\Phi}_{sens_i} + S_{sp} C_{p_{sp}} T_{sursa} = P_{as_i} V_i C_{p_{2s}} \frac{\partial T_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{es_i}}{\partial t} V_i C_{p_{es}} T_1 \quad (3.5)$$

$$\rho_i = \frac{P_i + P_0}{(R_{au} \rho_{au} + R_{sp} \rho_{sp})(T_i + 273,15)} \quad (3.6)$$

### **Modelul circulației motoare.**

Datorită acestei abordări, zonele cu o mișcare puternică cum ar fi jeturile sau zonele de panăș termic, nu pot fi reprezentate de aceste relații și este necesară tratarea lor cu ajutorul legilor empirice sau legilor provenite din partea experimentală. În cazul de față pentru calculul debitului din panăș și impunerea lui în interfețele dintre celule, am ales după mai multe încercări relațiile propuse de Skaret ([12]) și Popiolek ([10]).

### **3.3 Modelarea numerică a persoanei și panășului convectiv cu ajutorul modelelor zonale**

### **3.4 Prezentarea mediului de simulare SPARK**

### **3.5 Implementarea modelului zonal al panășului termic în SPARK**

#### **Implementarea modelelor zonale în mediul de simulare SPARK**

Detalierea acestor paragrafe este realizată în teză

#### **Construcția simulării**

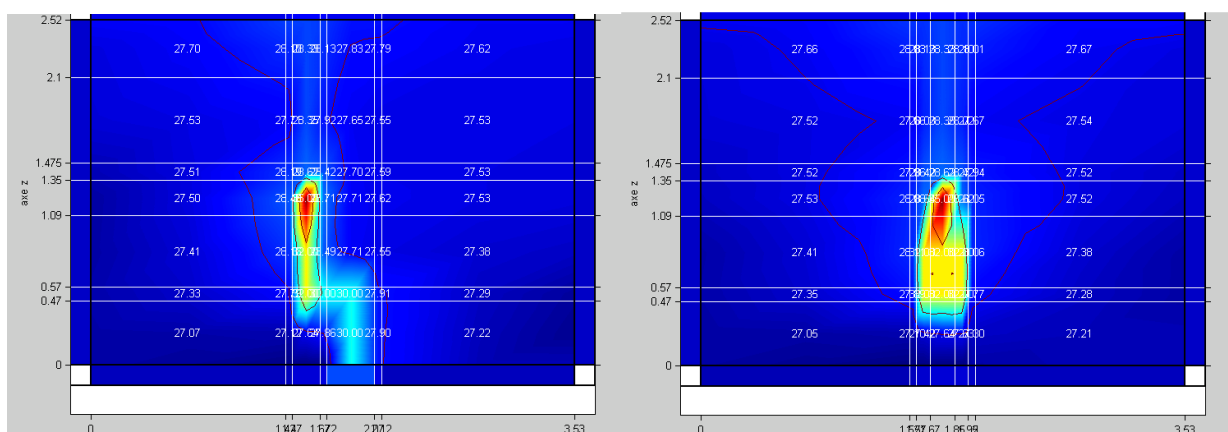
##### **3.5.2.1 Modelarea 2D**

Primul pas în demersul nostru a fost realizarea modelului în variantă 2D. După realizarea modelului zonal al încăperii, următorul pas a fost implementarea ocupantului în acest model. Acesta a fost considerat ca fiind construit dintr-o grupare de celule ale căror dimensiuni totale sunt apropiate de cele ale unei persoane în poziție șezândă. Ocupantul se comportă, în modelul nostru zonal, precum o suprafață cu o temperatură constantă impusă, implementarea lui sub formă de grupare de celule fiind făcută doar pentru a-i conferi reprezentarea geometrică și forma în cadrul încăperii.

##### **3.5.2.2 Modelarea 3D**

Modelul 2D a fost urmat de realizarea modelului zonal 3D al unei încăperi. Încăperea a fost împărțită într-un număr de 343 celule, dimensiunea acestora fiind stabilită inițial astfel încât să putem reda geometria

manechinului iar ulterior pe măsura realizării modelului numeric în funcție de rezultatele obținute aceasta a mai fost modificată urmărind influența discretizării asupra predicțiilor curgerii. Manechinul a fost plasat în centrul încăperii. În interiorul acesteia nu a existat nici un sistem de ventilare, motorul circulației în încăpere fiind doar curentul convectiv format în jurul manechinului. Implementarea acestei configurații în modelarea zonală a fost făcută cu ajutorul limbajului de programare SPARK. Bazându-ne pe cercetări recente în domeniul studiului panașului termic [2-4] pentru modelarea curgerii convective din jurul manechinului am folosit legi de variație a debitului de aer în panaș. Pentru o primă verificare, rezultatele au fost comparate cu studiul CFD al lui Jia ([3]) pentru a putea observa acuratețea predicțiilor. Studiul lui Jia ([3]) a fost realizat pentru o temperatură a mediului ambiant de 20°C și o temperatură a corpului de 25°C. În urma acestei comparații am putut remarca că predicția modelului zonal a fost satisfăcătoare față de modelul CFD, mai ales în zona inferioară și medie a încăperii, în apropierea plafonului modelul zonal având tendința de subestimare. Deoarece în realitate temperatura corpului nu este uniformă pe toată suprafața sa și este de obicei superioară temperaturii alese de Jia în studiul său, în continuare am dorit să vedem influența temperaturii corpului asupra curentului convectiv din jurul manechinului și a distribuției de temperaturi din încăpere. Pasul următor în demersul nostru a fost implementarea geometriei unui manechin și a condițiilor la limită conforme cu campania experimentală realizată în celula experimentală a Facultății de Ingineria Instalațiilor. Modelarea numerică a fost realizată pentru condițiile unei temperaturi ambientale de 26°C. Temperaturile corpului au fost impuse egale cu cele din modelul experimental pe care le vom prezenta la capitolul 4.



**Figura 3.1 Distribuția temperaturilor în încăpere pentru condițiile modelului experimental a) plan sagital; b) plan coronal**

### **3.6 Modelarea numerică a sistemului de ventilare personalizată în literatură**

Studiul este prezentat detaliat la paragraful mai sus menționat.

### **3.7 Modelarea zonală a sistemului de ventilare personalizată**

**Implementarea dispozitivului de ventilare personalizată în modelarea zonală și cuplarea acestuia cu modelul panașului termic creat de ocupant**

După implementarea modelului panașului termic, pasul următor a fost cuplarea acestuia cu modelul jetului provenit din dispozitivul de introducere pentru ventilația personalizată ales. Deoarece modelele zonale bazate pe ecuațiile caracteristice, nu pot surprinde zonele de mișcare mai puternică precum zonele de jet sau panaș,

pentru modelarea jetului de ventilare personalizată am apelat la legi de variație rezultate din campania experimentală.

Dispozitivul de introducere al sistemului de ventilare personalizată a fost reprezentat de un difuzor rectangular cu fața perforată plasat la o distanță de 45cm de manechin. Difuzorul a fost poziționat la nivelul umerilor. Temperatura de introducere a aerului în sistemul de ventilare personalizată a fost de 26 °C.

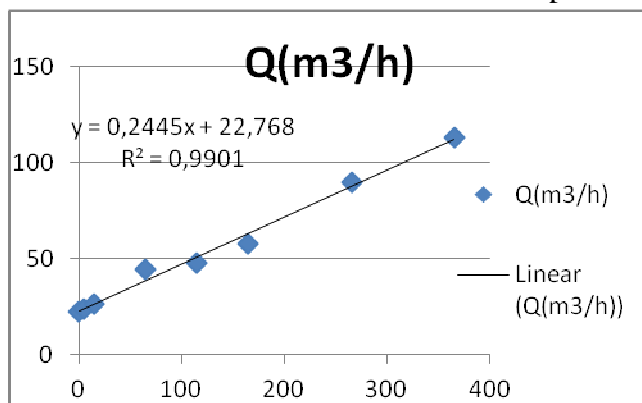


Figura 3.2 Legea de variație a debitului de aer cu distanța

### 3.8 Rezultatele modelării numerice a sistemului de ventilare personalizată

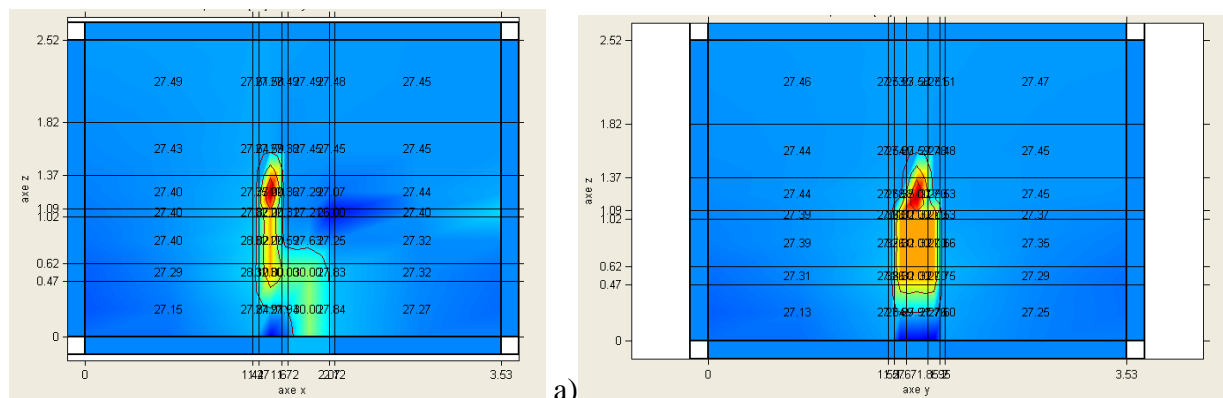


Figura 3.3 Profilul temperaturilor în încăpere pentru modelul ocupantului și al sistemului PV dispus deasupra picioarelor a) plan sagital b) plan coronal

## 4 Studii experimentale privind jetul convectiv creat în jurul corpului uman și terminalul de introducere pentru ventilația personalizată

Acest capitol se ocupă de prezentarea campaniei experimentale realizate în scopul alimentării cu date și a validării modelului numeric

### 4.1 Studii experimentale în literatură

#### Studii experimentale privind curentul convectiv creat în jurul corpului uman

În prima parte se face o prezentare a nivelului actual al cercetării experimentale în domeniu și modalitățile de evaluare a acestui tip de sistem de ventilare. Studiul bibliografic a fost împărțit în două părți, una dedicată studiilor experimentale asupra panșului termic ([43]), ([44]) ([45]) ([46]) ([47])

#### Studii experimentale asupra sistemului de ventilare personalizată

Studiile asupra sistemului de ventilație personalizată s-au concentrat asupra tipurilor de terminale de ventilație și poziției acestora ([19]), ([21]) ([22]), asupra temperaturii de introducere a aerului ([47]) ([48]), a vitezei de introducere ([50]) ([51]).

## 4.2 Celula experimentală și manechinul experimental

În primă fază am prezentat celula experimentală și conceperea standului experimental precum și aparatura folosită pentru campaniile de măsurări (termocuple, termografia infraroșu, sistemul de măsură și evaluare a confortului Confort Sense). De asemenea au fost prezentați toți pașii și studiile realizate pentru confecționarea manechinului termic. Schema manechinului experimental este prezentată în figură. Acesta a fost realizat dintr-un suport de polistiren extrudat și acoperit într-un film încălzitor a cărei performanțe au fost testate anterior pentru diferite condiții. Geometria manechinului este prezentată în Figura 4.1.

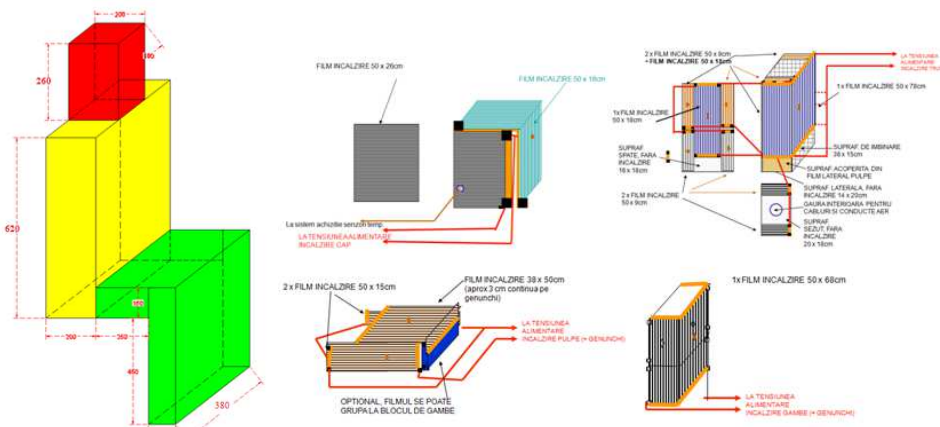


Figura 4.1 Geometria manechinului experimental și

Figura 4.2 Schema de îmbrăcare a manechinului termic (dreapta)

## 4.3 Principii de măsură și echipamente utilizate

- Termocuplul
- Termografia infraroșu
- Sistemul de evaluare și măsurare a confortului Confort Sense

## 4.4 Campania experimentală

Următorul pas a fost descrierea celor două campanii experimentale și a rezultatelor obținute.

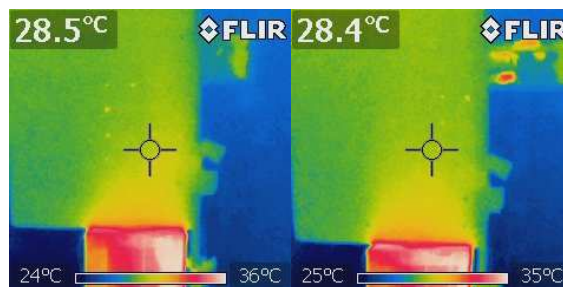


**Figura 4.3 Dispozitiv experimental - a) Grila de măsură; b) Set-up termografie**

Condițiile limită în a doua campanie de măsurări au fost:

Temperatura operativă	26,5°C
Temperatura Cap	35°C
Temperatură Trunchi	33,28°C
Temperatură Coapse	30,86°C
Temperatură Gambe	29,99°C
Temperatură Pereți	27,3°C
Umiditate relativă	35,9%
Temperatură medie radiantă	26,3°C

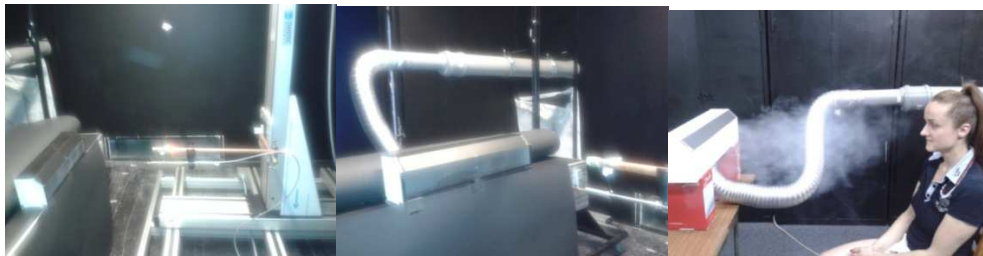
Primul pas din campaniile experimentale l-a reprezentat termografierea manechinului și a panoului termic existent deasupra capului manechinului. Temperatura părților trunchiului manechinului a fost măsurată cu ajutorul termocuplelor și de asemenea aceste zone au fost termografiate cu ajutorul camerei infraroșu. Următorul pas a fost realizarea profilului median deasupra capului manechinului termic, la diferite cote pe înălțime, pentru a putea vedea distribuția de temperaturi și viteze. Măsurătorile au fost făcute cu ajutorul sondei de măsură a temperaturii și vitezei a kit-ului de estimare a confortului de la firma Dantec Dynamics - Confort Sense, la distanțe succesive de 5cm, pornind de la 3cm deasupra capului manechinului până la înălțimea de 1,98cm, distanța maximă la care sistemul Traverse de deplasare a sondelor de la Dantec Dynamics ne-a permis poziționarea sondei pe înălțime. De asemenea au fost făcute măsurători în întreaga zonă din jurul manechinului.



**Figura 4.4 Imagine IR curent de convecție Plan sagital la diferite cote**

Campaniei de măsurători pentru investigarea curentului convectiv format în jurul corpului manechinului i-a urmat campania de măsurători pentru grila de introducere a sistemului de ventilare personalizată.

Campania experimentală a urmărit testarea comportamentului grilei de introducere și obținerea unei legi de variație a debitului de aer în jet. Măsurătorile au arătat că jetul de aer provenit din terminalul de ventilare personalizată are o tendință ascensională destul de puternică. Astfel am decis amplasarea grilei la nivelul umerilor.

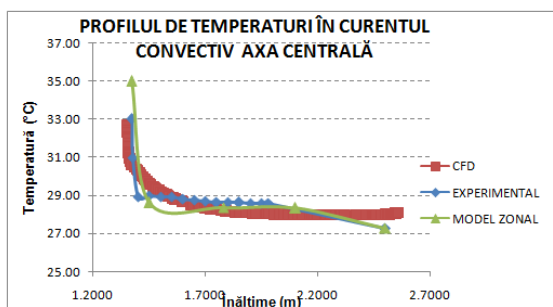


**Figura 4.5 Vizualizarea cu fum a traiectoriei jetului de aer prin dispozitivul de introducere a) până să ajungă la ocupant b) vizualizarea panașului termic deasupra ocupantului**

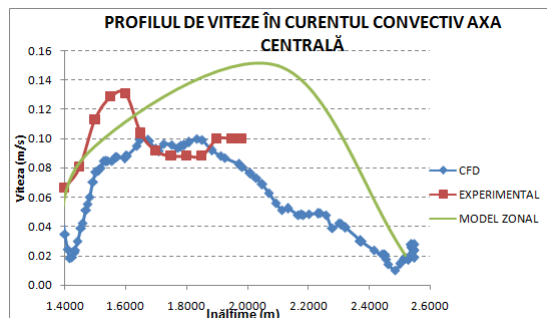
**Figura 4.6 Sistemul de ventilare personalizată, dispozitivul de măsură**

## 5 Sinteza rezultatelor studiului actual

Capitolul 5 este dedicat sintezei rezultatelor studiului realizat. Studiul a arătat că deși modelele zonale folosesc discretizări în volume mai mari față de cele ale modelelor CFD utilizate la scară largă pentru simulare acestor sisteme de ventilare, estimările lor în ceea ce privește profilele de temperaturi în panaș și în axa centrală sunt apropiate de realitate. În dorința de a vedea comportamentul modelării zonale și față de modelele CFD, s-a realizat și un model CFD cu aceeași geometrie și aceleași condiții la limită ca și modelul experimental și cel zonal. Rezultatele au arătat că, în ciuda unei discretizări în volume mai mari, predicțiile sunt destul de apropiate.



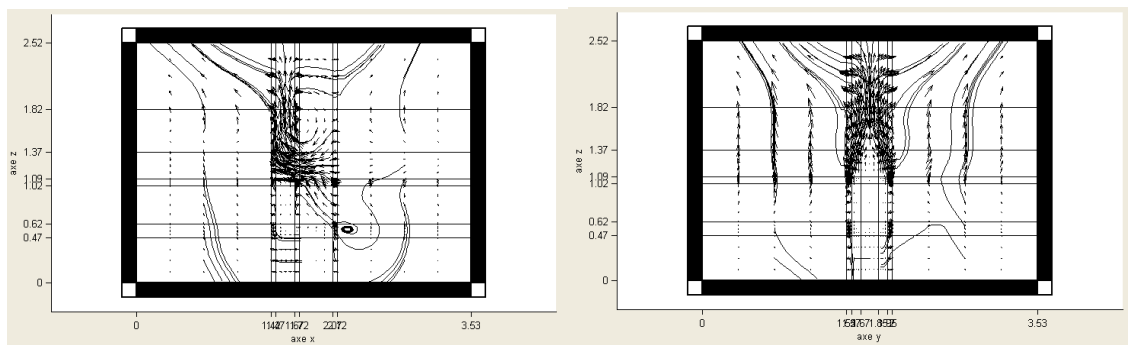
**Figura 5.1 Profilul de temperaturi în axa centrală funcție de înălțime CFD, Experimental și Model Zonal (stânga)**



**Figura 5.2 Profilul de viteză în axa centrală funcție de înălțime CFD, Experimental și Model Zonal (dreapta)**

În urma comparației, în cazul estimării profilului de temperaturi am putut observa că modelele CFD realizează o supraestimare a acestora, predicțiile modelelor zonale fiind mai apropiate de realitate. În cazul profilului de viteză, estimările modelului zonal nu sunt atât de apropiate de realitate, un motiv posibil fiind dimensiunea celulelor. Modelele zonale nefiind concepute pentru estimarea punctuală a vitezelor, pentru cunoașterea valorilor medii acestora s-a făcut un calcul cunoscând valoarea debitelor în interfețe și suprafața interfețelor. În apropierea capului manechinului, dimensiunea celulei fiind destul de mică 12,5 cm valoarea vitezei este destul de bine estimată de modelul zonal. Celula superioară având dimensiuni mai mari, viteza în interfața superioară este supraestimată, de asemenea distanța față de capul manechinului la care aceasta se atinge, este supraestimată.

În continuare am realizat și cuplarea în modelul numeric a curentului convectiv din jurul corpului manechinului, cu jetul de aer din grila de introducere. Rezultatele modelării numerice ne arată o reducere a dimensiunii panașului datorită perturbației produse de jetul de ventilare personalizată. În perspectivă, se propune o comparație a acestui model numeric cu unul experimental.



**Figura 5.3 Circulația aerului în încăpere pentru sistemul de ventilare personalizată**  
**a) Profil sagital; b) Profil coronal**

Dacă în cazul convecției libere, temperatura în celulele din imediata apropiere a manechinului, se situa peste valoarea de 28.4°C în cazul cuplării cu jetul provenit din terminalul de ventilație personalizată aceasta înregistrează o scădere până în jurul valorii de 27.5°C.

## **6 Concluzii generale, perspective și contribuții personale**

Ultimul capitol al tezei este dedicat concluziilor, perspectivelor precum și prezentării contribuțiilor personale ale acestui studiu.

În privința consumului energetic, concluzia a fost că, față de un sistem clasic de ventilare prin amestec, folosirea unui sistem de ventilare personalizată ar putea reduce consumul, în funcție de valoarea debitelor introduse și a temperaturii de introducere, cu până la 49%. Această concluzie a reprezentat o argumentare importantă pentru efectuarea cercetărilor din cadrul tezei.

Unul dintre principalele obiective ale studiului a fost realizarea unui model numeric al panașului termic convectiv format în jurul corpului și cuplarea lui cu un terminal de introducere pentru ventilare personalizată. Pentru validarea modelului am realizat o campanie experimentală folosind un manechin termic cu geometria identică cu a celui din modelul numeric. Manechinul termic a fost conceput cu trei segmente diferite de control a temperaturii (cap, trunchi, picioare) în dorința de a avea un comportament cât mai aproape de a unui ocupant. Realizarea manechinului, dorim să o menționăm ca o contribuție personală a acestui studiu, alături de folosirea unor echipamente de ultimă generație pentru realizarea măsurărilor din campania experimentală.

Comparația dintre predicțiile modelului zonal și datele experimentale, a arătat capacitatea modelelor zonale de a realiza predicții de temperatură destul de apropiate de realitate, în axa ce trece prin centrul capului manechinului. De asemenea profilele sagital și median au confirmat această capacitate. În ceea ce privește predicțiile vitezei, acestea au fost apropiate ca valori față de valorile experimentale și CFD în apropierea capului manechinului dar la distanțe mai mari predicțiile zonale au supraestimat ușor vitezele. Această supraestimare ar putea fi cauzată de o discretizare în volume mai mari a celulelor de deasupra capului. O discretizare ușor mai fină ar putea remedia acest neajuns. În perspectivă, trebuie evaluată posibilitatea unei asemenea rafinări raportând-o la durata timpilor de simulare. Realizarea și validarea acestui model zonal 3D pentru panașul termic format în jurul unui manechin reprezintă o contribuție originală a acestui studiu.

În ceea ce privește sistemul ventilării personalizate, în perspectivă, ar trebui realizate studii care să includă variabila timp în model, odată cu posibilitatea introducerii unui jet expirat atât în studiul numeric cât și în cel experimental. De asemenea ar trebui studiate diferite poziționări ale grilei de introducere utilizând gazul traser, pentru a putea evalua concentrațiile la nivelul zonei de inhalare și a evalua eficacitatea terminalului de introducere.



## Bibliografie

- [1]. I.Crueanu, C.Maalouf, I.Colda,M.Lachi, *Parametric study and energy analysis of a personalized ventilation system*. International Journal of Mathematical models and methods in applied Sciences Issue2, Volume 7, 2013, pp141-148.
- [2]. Li Liu, V. Nielsen, Yuguo LI, The thermal plume avo a standing human body exposed to different air distribution strategies.
- [3]. Xinli Jia, John B. McLaughlin, Jos Derksen a,b, Goodarz Ahmadi-Simulation of a mannequin's thermal plume in a small room. *Computers and Mathematics with applications (2011)* , www.elsevier.com/locate/camwa.
- [4]. P.O. Fanger; *Thermal Confort- Analysis and Applications in Environmental Engineering. 1970* .
- [4.1]. R.P.Clark; O.G.Edholm; *Man and his Thermal Environment, 1985*.
- [5]. E.Assmussen, M. Nielsen, Standard test method for measuring the thermal insulation of clothing using a heated manikin. *Laerebog i meneskets fysiologi. Akademisk Forlag (1991)* .
- [6]. ASHRAE, "Thermal environmental conditions for human occupancy," ANSI/ASHRAE Standard 55-2004., *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA. 2004*
- [6.1]. D.Dubois;E.F.Dubois; A formula to Estimate the Approximate Surface area if height and weight are known. *Archives of Internal Medicine* , p 863-71.
- [7]. H.E.Lewis, A.R.Foster, B.J.Mullan, R.N.Cox, R.P.Clark, Aerodynamics of the human Microenvironment. *Lancet* 322 , pp 1273-1277.
- [8]. R.P.Clark, N.Toy, Natural Convection Arround the Human Head. *J.Physiol, 1975* , pp 283-293.
- [9]. H.Brohus, Personal Exposure to Contaminant Sources in Ventilated Rooms. *Thesis, Faculty of Engineering and Science, Aalborg University, Denmark, July 1997* .
- [10.1]. Z.Popiolek, S. Treciakewicz, Improvement of a plume volume flux calculation method, . *Proceedings ROOMVENT '98 Stockhom, Sweden, Vol. 1* , 423 – 430.
- [11]. ASHRAE,ASHRAE HANDBOOK,Fundamentals, Thermal Confort,Vol. Chap. 8. 2001. *Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering* .
- [12]. Nielsen, Marius, Pedersen, Lorents, Studies on the heat loss by radiation and convection from the clothed human body, *Acta Physiol.Scand.1952*,. 27:272.
- [12.1]. Skaret E. *Ventilasjonsteknikk, Kompedium Institutt for VVS, Nordes Tekniske Hogkole, Trondheim 1986*.
- [13]. Y.Cengel, *Heat transfer.A practical approach. McGraw Hill 1998* .
- [14]. T.Helge.Dokka, P.O.Tjelflaat, A simplified model for human induced convective air flows - Model predictions compared to experimental data. *Proceedings of Room Vent 2002 (8th International Conference on Air Distribution in Rooms , Copenhagen - Denmark* , pp 269-272, 5 figs, 9 ref.
- [15]. H.Awbi, *Ventilation of buildings , Second Edition. Spon Press, London, First edition 2003*
- [16]. G.He, X.Yang, J.Srebic, Removal of contaminants released from room surfaces by displacement and mixing ventilation: modeling and validation. *Indoor Air 2005* , pp367-80.
- [17]. N.Gao,J.Niu, L.Morawska, Distribution of respiratory droplets in enclosed environments under different air distribution methods. *Building Simulation 2008;1* , pp326–35.

- [19]. A.Melikov, R. Cermak, Personalized ventilation: Evaluation of different air terminal devices. *Energy and Buildings* 34 (2002) , p.829-836.
- [20]. K.W.Tham, J.Pantelic, Performance evaluation of the coupling of a desktop personalized ventilation air terminal device and desk mounted fans. *Building and Environment* 45 (2010) 1941–1950 , 1941–1950.
- [21]. A.Melikov, T.Ivanova, G.Stefanova; Seat headrest incorporated personalized ventilation: Thermal comfort and inhaled air quality. *Building and Environment* 47 (2012) , pp 100-108.
- [22]. J.Niu, N.Gao, Experimental study of a chair-based personalized ventilation system. *Building and environment* 42 (2007) , p913-925.
- [24]. L.Mora; Prediction des performances thermo-aerauliques des batiments par association de modeles de differents niveaux de finesse au sein d'un environnement oriente objet; [6] L.Mora; Prediction des performances thermo-aerauliques des batimThese, 2003.
- [25]. L.Laurent, K.Mendoca, E Wurtz, C Inard, Simspark an object oriented environment to predict coupled heat and mass transfers in buildings. *Eighth International IBPSA Conference Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003* , 903-910.
- [26]. A.D.Tran Le, ETUDE DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES DANS LE BETON DE CHANVRE ET LEUR APPLICATION AU BATIMENT. *THESE- UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE 2010* .
- [27]. J.Lebrun, Exigences physiologiques et modalités physiques de la climatisation par source statique concentrée. *Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique 1970* .
- [28]. C.Inard, A.Meslem, P.Depecker, Energy consumption and thermal comfort in dwelling-cells : A zonal-model approach. *Building and Environment*, 33(5) , 279-291.
- [29]. C.Inard, H.Bouia, P.Dalieux, of air temperature distribution in buildings with a zonal model. *Energy and Buildings* 24 (1996) , 125-132.
- [30]. E.Wurtz, Modélisation tridimensionnelle des transferts thermiques et aérauliques dans le bâtiment en environnement orienté objet. *Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France (1995)* .
- [31]. A.Daoud, N.Galanis, Prediction of airflow patterns in a ventilated enclosure. *Science Direct Applied Energy* 85 (2008) , 439-448.
- [32]. E.Wurtz, JM.Nataf, F.Winkelmann, Two- and three-dimensional natural and mixed convection simulation using modular zonal models in buildings. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42 , 923-940.
- [33]. JW.Axley, Surface-drag flow relations for zonal modeling. *Build Environ* 2001; , 843-50.
- [34]. M.Musy, F.Winkelmann, E.Wurtz, A.Sergent, Automatically generated zonal models for building air flow simulation: principles and applications. *Build Environ* 2002; 37 , 873-81.
- [35]. A.Damian, *Modelarea zonală a calitatii aerului interior în cladiri. aplicatie la evaluarea expunerii ocupantilor. Teza doctorat*
- [36]. F.Song, B.Zhao, X.Yang, Y.Jiang, V. Gopal, G.Dobbs, A new approach on zonal modeling of indoor environment with mechanical ventilation. *Build Environ* 2008; 43 , 278-86.
- [37]. C.Croitoru; *Studii teoretice si experimentale referitoare la influenta turbulentei aerului din incaperile climatizate asupra confortului termic; Teza de doctorat 2011.*
- [38]. D.Zukowska; A.Melikov; Z.Popiolek; Impact of personal factors and furniture arrangement on the thermal plume above a sitting occupant. *Building and Environment* 49 (2012) , pp104-116.

- [39]. D.Zukowska;Z.Popiolek, A.Melikov; Prediction of the volume flux of the thermal plume above a sitting person. *Proceedings of the 9th International Healthy Buildings Conference and Exhibition 2009*Syracuse, NY, USA, 2009 , p. 384.
- [40]. Gao, N., Niu, J.,CFD study on micro-environment around human body and personalized ventilation. *Building and environment 39 (2004)* , pp 795-805.
- [41]. T.Zhang; P.Li; A personal air distribution system with air terminals embedded in chair armrest on commercial airplanes. *Building and environment 47 (2012)* , pp89-99.
- [42]. J.S.Russo, T.Q.Dang, H.E.Kaliffa,Computational analysis of reduced-mixing personal ventilation jets. *Building and Environment 44 (2009)* , 1559–1567.
- [43]. Daria Zukowska, Arsen Melikov, Zbigniew Popiolek,Thermal plume above a simulated sitting person with different complexity. *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007, Helsinki* , Vol. 3, pp. 191-198.
- [44]. B.A. Craven;A computational and experimental investigation of the Human Thermal Plume. *Journal of Fluids Engineering (2006)*, Vol 128 .
- [45]. D.Zukowska; A.Melikov; Z.Popiolek; Impact of personal factors and furniture arrangement on the thermal plume above a sitting occupant. *Building and Environment 49 (2012)* , pp104-116.
- [46]. C.M.Borges, A.R.Gaspar, D.A.Quintela, Analysis of the interactions of thermal plumes within office environment using a thermal manikin. *7th International Thermal Manikin and Modelling Meeting - University of Coimbra, September 2008* .
- [47]. Daria Zukowska, Arsen Melikov, Zbigniew Popiolek, Johanna Spletstesser, Impact of facially applied air movement on the development of the thermal plume above a sitting occupant.*Proceedings of the 12th International Conference on Air Distribution in Rooms. Roomvent 2011, June 2011, Trondheim, Norway.*
- [48]. T.Zhang; P.Li; A personal air distribution system with air terminals embedded in chair armrest on commercial airplanes. *Building and environment 47 (2012)* , pp89-99.
- [49]. T.Keck, R.Leiacker, H. Riechelmann,G.Rettinger, Temperature profile in the nasal cavity. *Laryngoscope, 2000* , 110:651-4.
- [50]. A.Melikov, J.Kaczmarczyk,Impact of air movement on perceived air quality at different level of air pollution and temperature. *Proceedings of indoor air;2008, Denmark* .
- [51]. J.Kaczmarczyk, A.Melikov, D.Sliva, Impact of air movement on perceived air quality at different level of relative humidity. *Proceedings of indoor air;2008. Denmark* .
- [52]. J.Kaczmarczyk, A.Melikov, D.Sliva, Effect of warm air supplied facially on occupants comfort. *Building and environment 45 (2010)* , p848-855.
- [53]. M.A.Skwarczynski,A.K.Melikov, J.Kaczmarczyk, V.Lyubenova;Impact of individually controlled facially applied air movement on perceived air quality at high humidity. *Building and Environment45(2010)* , p2170-2176.
- [54]. L.Li, Studies on characteristics of personalized ventilation and human response. *PhD thesis, Department of Civil Engineering, Tsinghua University ; 2004* .
- [55]. H. Amai, S. Tanabe, T. Akimoto, T.Genma; Thermal sensation and comfort with different task conditioning systems. *Building and Environment 42 (2007)* , p 3955–3964.

- [56]. W.Sun, K.W.Tham, W.Zhou, N.Gong§ Thermal performance of a personalized ventilation air terminal device at two different turbulence intensities. *Building and Environment* 42 (2007) , p 3974–3983.
- [57]. A.K. Melikow; J.Kaczmarkzyc; Air Movement and perceived air quality. *Building and Environment* 47 (2012) , pp 400-409.
- [58]. R.Li, S.C.Sekhar, A.K.Melikov, Thermal comfort and IAQ assessment of under-floor air distribution system integrated with personalized ventilation in hot and humid climate. *Building and Environment* 45 (2010) , p 1906e1913.
- [60]. Murakami, S., Kato, S., Zeng, J., Developement of a computational thermal manikin-CFD analysis of the thermal environment of a human body,. *Proceedings of Tsinghua-HVAC'95, Beijing, China, vol.2;1995;* , pp349-54.
- [62]. (The 7' th International Conference on Indoor Air Quality and Climate,Vol2, July21-26,Nagoya, Japan). S.Murakami, S.Kato, J.Zheng,. *CFD Analysis of Thermal Environment arround Human Body, Proceedings of Indoor Air,96* , pp479-484.
- [63]. Y. Xu, X.Yang, Contaminant dispersion with personal displacement ventilation. *Building and Environme* 44 (2009) , 2121–2128.