

Универзитет у Нишу
Машински факултет

Жана Ж. Стевановић

**ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОСТОРНЕ УНИФОРМНОСТИ
ИНДИКАТОРА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА У ЗГРАДАМА
ЈАВНЕ НАМЕНЕ**

Докторска дисертација

Ниш, 2015

ЗАХВАЛНОСТ

Изражавам веома велику захвалност мом ментору др Градимиру Илићу, редовном професору Машинског факултета, Универзитета у Нишу, на свесрдној и несебичној помоћи коју ми је пружао током израде ове докторске дисертације.

Такође, желим да се захвалим сарадницима Лабораторије за термотехнику и енергетику, Института за нуклеарне науке – Винча, који су ми помогли у реализацији експерименталног дела рада.

Жана Стевановић, дипл.маш.инж.

САЖЕТАК

Предмет истраживања у датој докторској дисертацији непосредно је везан за остваривање одрживог развоја зградарства у делу анализе квалитета унутрашњег простора. Квалитет унутрашњег простора подразумева достигнути ниво топлотног, ваздушног, светлосног, звучног и естетског комфора.

У докторској дисертацији посебна пажња је посвећена топлотном комфору. Фундаментални процеси преноса материје, количине кретања и топлоте су искоришћени за описивање различитих механизма преноса осећајне и латентне топлоте са човека на околину и обрнуто. Истраживања су спроведена експерименталним, нумеричким и статистичким методама.

У току израде докторске дисертације, учињени су следећи научни доприноси:

- Када су у питању двоједначински модели турбуленције, посебна пажња је посвећена утицају чланова продукције и дисипације кинетичке енергије турбуленције услед флукуација запреминских сила.
- Варирањем емпиријских константи које садрже моделирани чланови у диференцијалној једначини за ϵ , предложена је модификација емпиријске константе $C_{\epsilon 3}$ на тај начин што је њена вредност проглашена променљивом величином у функцији односа компоненти брзине струјања у правцу вектора гравитације и латералног правца и предложен је израз за њено одређивање.
- Када је у питању модел преноса топлоте зрачењем, предложен је нови модел зрачења који третира контаминирани ваздух угљен-диоксидом као нетранспарентни медијум, и предложен је израз за одређивање ефективне емисивности контаминираног ваздуха.

Експериментално добијене вредности општих индикатора топлотног комфора су послужиле као основа за валидацију математичких модела предложених у докторској дисертацији.

Предложени модели су уграђени у нумерички код комерцијалног софтвера PHOENICS, и спроведена је параметарска анализа кроз серију од шест тест случајева, почевши од основног модела 0_2 који је карактеристичан по томе што су елементи турбулентног модела и модела преноса топлоте зрачењем стандардно уграђени, па до случаја C_V који укључује обе модификације.

Поред стандардног поступка анализе грешака, спроведена је и комплексна статистичка анализа, тако да су додатни статистички показатељи дали праву информацију о квалитету сваког модела.

На основу добијених резултата у нумеричким експериментима, показано је да модел зрачења у поређењу са турбулентним моделом у расподели топлотних карактеристика и општих индикатора топлотног комфора има доминантнију улогу.

Кључне речи: *Топлотни комфор, природна вентилација, турбулентни модели, модел нетранспарентног медијума зрачења, PMV-PPD*

ABSTRACT

The research presented in this PhD thesis is directly linked to the achievement of sustainable building development analysis of indoor environment quality. The indoor environment quality includes the achieved level of heat, air, light, noise and aesthetic comfort.

In the presented PhD thesis, special attention was paid to thermal comfort. Fundamental processes of mass, momentum and heat transfer are used to describe the various mechanisms of sensible and latent heat transfer from the human being to the environment and vice versa. The investigations were conducted by experimental, numerical and statistical methods.

While investigating within PhD thesis, the following scientific contributions have been made:

- Concerning the two-equation turbulence models, special attention was paid to the influence of production and dissipation terms of turbulent kinetic energy due to the fluctuation of body forces.
- Varying empirical constants containing modeled terms of the differential equation for ε , the modifications were proposed for the empirical constant $C_{\varepsilon 3}$ in the way that its value is declared variable as a function of the ratio of flow velocity component in the direction of the gravity vector and lateral directions, and an expression for its determination is proposed.
- Concerning the heat transfer radiation model, the new model of radiation have been proposed that treats air contaminated by carbon dioxide as a nontransparent medium, and an expression is proposed in order to determine the effective emissivity of contaminated air.

The experimentally obtained values of the general thermal comfort indicators were the basis for the validation of the mathematical models proposed in the presented PhD dissertation.

The proposed models are built into a numerical code of the commercial software PHOENICS, and parametric analysis was conducted through a series of six test cases, starting from the basic model, which is characterized by the fact that the turbulent model and heat transfer by radiation model are built-in, up to the case C_B which includes both modifications.

In addition to the standard procedure of error analysis, statistical analysis of a complex array has been conducted, so additional statistical indicators have given the right information about the each model quality.

Based on the results of the numerical experiments, it was shown that the model of radiation compared to the turbulence model in the distribution of thermal characteristics and general thermal comfort indicators has a dominant role.

Key words: *Thermal comfort, natural ventilation, turbulence models, nontransparent media model of radiation, PMV-PPD*

Научна област: *техничко-технолошке*

Ужа научна област: *термотехника, термоенергетика и процесна техника*

УДК: 697.1:536.24:[519.6+001.891.5(043.3)]

САДРЖАЈ

САДРЖАЈ	5
УВОД	10
ГЛАВА 1	10
1.1. Уводне напомене	12
1.2. Физиолошке карактеристике човека везане за топлотни комфор	13
1.3. Природна вентилација.....	19
ГЛАВА 2	20
2.1. Дефиниција топлотног комфора.....	20
2.2. Топлотна билансна једначина	23
ГЛАВА 3	31
3.1. Експериментална истраживања у основној школи “Франце Прешерн”	31
3.2. Дугорочно мерење карактеристика ветра	32
3.3. Дугорочно мерење унутрашње температуре учионице и спољне температуре	35
3.4. Краткорочно мерење: Сликање објекта и ученика термовизијском камером.....	37
3.5. Краткорочно мерење: Мерење U вредности омотача објекта школе	40
3.6. Краткорочно мерење: Мерење природне инфилтрације у учионици.....	42
3.7. Краткорочно мерење: Мерење локалних параметара PMV	44
3.8. Анкетирање деце и анализа о субјективном осећају топлоте на основу Фангерове топлотне расподеле	51
ГЛАВА 4	58
4.1. Анализа експерименталних података.....	58
4.2 Анализа општих индикатора топлотног комфора.....	61
ГЛАВА 5	65
5.1. Математички модел природне конвекције у затвореном простору.....	65
5.2. Модел турбулентног струјања	67
5.3. Модел преноса топлоте зрачењем.....	73
5.4. Сумарни математички модел природне конвекције у затвореном простору	78
5.5. Гранични услови	81

ГЛАВА 6	82
6.1. Нумерички модел природне конвекције у затвореном простору	82
6.2. Основни концепт методе коначних запремина	82
6.4. Параметри нумеричког модела	101
6.5. Карактеристике постпроцесорског приказа нумеричких резултата	107
ГЛАВА 7	111
7.1. Валидација нумеричких модела природне конвекције у затвореном простору	111
7.2. Анализа грешака	112
7.3. Анализа статистичких параметара валидације модела	115
ГЛАВА 8	119
8.1. Приказ и анализа нумеричких резултата	119
8.2. Анализа поља брзине и турбулентних карактеристика	120
8.3. Анализа поља топлотних карактеристика и концентрације угљен-диоксида	126
8.4. Анализа поља индикатора топлотног комфора	131
ЗАКЉУЧЦИ	137
Преглед литературе	141
Биографија	141

КОРИШЋЕНЕ ОЗНАКЕ

A	- параметар Weibull-ове расподеле, [-];
a	- топлотна дифузивност, [m ² s ⁻¹];
C _{CO2}	- усредњена запреminsка концентрација угљен-диоксида, ppm _v ;
C _p	- коефицијент притиска на површину позиције отвора у односу на удар ветра,-;
C _{res}	- размена латентне топлоте дисањем, W/m ² ;
C _S	- Stanton -ов број;
C _μ	- емпиријска константа турбулентног модела;
D	- пречник црне кугле, m;
E _c	- размена топлоте услед испаравања на кожи, W/m ² ;
E _{res}	- размена осетне топлоте дисањем, W/m ² ;
f	- фреквенција честине ветра, [%];
f(U)	- Weibull-ова функција расподеле, [-];
f _{cl}	- коефицијент фактора површине одеће,- ;
g _i	- гравитационо убрзање, [ms ⁻²];
h	- висина отвора на омотачу објекта, m;
h _{cg}	- коефицијент прелаза топлоте црне кугле, W/m ² K;
H	- губитци осетне топлоте, W/m ² ;
I _{cl}	- коефицијент изолације одеће, [clo],m ² °C/W ;
k	- параметар Weibull-ове расподеле, [-];
K	- кинетичка енергија турбуленције;
l	- висина просечног детета, m;
M	- производња топлоте услед метаболизма људског тела, W/m ² ;
m	- маса просечног детета ,kg;
p _a	- парцијални притисак водене паре, Pa;
p _s	- притисак сатурације водене паре, Pa
Pr	- Prandtl-ов број, -;
P _{ecf}	- Peclet-ов број, - ;
P _T	- удео притиска услед разлике температура у затвореној просторији и спољној околини, Pa;
P _U	- притисак услед конвекције ветра, Pa;
R	- гасна константа за ваздух, J/kgK;
Re	- Reynolds-ов број,-;
s	- коефицијент заклоњености површине отвора у односу на правац удара ветра,-;
s _a	- коефицијент расипања топлоте зрачењем по јединици дужине, [m ⁻¹];
S _C	- Schimdt-ов број, -;
T ₀	- спољашња температура, °C;
t _a	- температура ваздуха, [°C];
t _{cl}	- температура површине одеће, °C ;
T _{cfD}	- температура ваздуха добијена CFD симулацијом, [°C];
T _g	- температура црне кугле, K;
T _i	- унутрашња температура, °C;

t_r	- локална радијантна температура, [°C];
T_{rad}	- радијантна температура добијена CFD симулацијом, [°C];
T_{exp}	- температура ваздуха добијена експериментални путем, [°C];
T_g	- температура црне кугле, [°C];
U	- брзина ветра, [ms^{-1}];
U_a	брзина струјања ваздуха око црне кугле, [ms^{-1}];
U_a	- брзина струјања ваздуха око тела, [ms^{-1}];
U_{ar}	- средња брзина ваздуха, [ms^{-1}];
U_H	- Брзина ветра у тачки отвора, m/s ;
U_j	- компоненте вектора брзине, ($j=1, 2, 3$), [ms^{-1}];
U_{\square}	- компонента вектора брзине паралелна са вектором гравитације, [ms^{-1}];
U_{\perp}	- компонента брзине нормална на вектор гравитације, [ms^{-1}];
X_{gap}	- растојање између површина чврстих елемената унутар учионице, [m];
W	- ефективна механичка снага људског тела, W/m^2 .

АКРОНИМИ

PMV	- индикатор топлотног комфора (Predicted Mean Vote);
PPD	- индикатор топлотног комфора (Predicted Percent of Dissatisfied);
FB	- парцијално одступање;
MG	- средње геометријско одступање;
NMSE	- нормализована средња квадратна грешка;
VG	- геометријска варијанса;
FAC2	- фактор поређења две вредности;
Q	- параметар оцене.

ГРЧКИ СИМБОЛИ

ρ_{ref}	- референтна вредност усредњене густине ваздуха, kg/m^3 ;
σ_t	- турбулентан Schimdt-ов број;
σ	- Stefan-Boltzmann-ова константа, ($= 5.670373 \times 10E-8$), $W/(m^2 K^4)$;
ν	- молекуларна кинематска вискозност ваздуха, m^2/s ;
δ_{ij}	- Kronecker-ов делта оператор;
ϵ_a	- коефицијент ефективне атмосферске емисивности по јединици дужине, [m^{-1}];
$\epsilon_a(H_2O)$	- коефицијент ефективне емисивности водене паре по јединици дужине, [m^{-1}];
$\epsilon_a(O_3)$	- коефицијент ефективне емисивности озона по јединици дужине, [m^{-1}];
$\epsilon_a(CO_2)$	- коеф. ефективне емисивности угљен диоксида по јединици дужине, [m^{-1}];
$\epsilon_a(overlap)$	- коефицијент преклапања ефективне атмосферске емисивности по јединици дужине, [m^{-1}];
λ_{rad}	- ефективни еквивалент радијантне дифузивности, [m^2s^{-1}].

ИНДЕКСИ

- a - ваздух;
- cl - одећа;
- g - радијантна кугра;
- rad - радијантни;
- exp - експериментални.

УВОД

Предмет истраживања у докторској дисертацији непосредно је везан за остваривање одрживог развоја зградарства. Основни постулат одрживог развоја у зградарству је енергетска ефикасност зграде, при чему треба нагласити да се у овом контексту не подразумева само енергетски ефикасна зграда са становишта минимизације потрошње енергије, већ минимална количина потребне енергије уз обавезно остваривање квалитета унутрашњег простора. Само када су остварена оба услова, може се говорити о енергетски ефикасној згради и одрживом развоју у зградарству.

Квалитет унутрашњег простора подразумева достигнути ниво (класу) топлотног, ваздушног, светлосног, звучног и естетског комфора. У докторској дисертацији посебна пажња је посвећена топлотном комфору. Пошто је реч о субјективном осећају топлоте, човек је под утицајем когнитивних, физиолошких и психолошких процеса који прате овакве процесе. Фундаментални процеси преноса материје, количине кретања и топлоте су искоришћени за описивање различитих механизма преноса осећајне и латентне топлоте са човека на околину и обрнуто. На основу оваквог свеобухватног приступа у дефинисању топлотног комфора, прави индикатор о топлотном комфору у једној средини где борави више људи је проценат незадовољних топлотним комфором (Predicted Percentage of Dissatisfied – PPD) изражен скалом нивоа топлотне угодности (Predicted Mean Vote – PMV) од -3 (веома хладно) до +3 (веома топло) према SRPS EN ISO 7730. Када је у питању дефинисање пројектних услова система КГХ, уместо пројектне температуре ваздуха, корисније је дефинисати пројектну оперативну температуру – ОТ, која представља алгебарску комбинацију температуре ваздуха, радијантне температуре и релативне брзине опструјавања ваздуха око човечјег тела. PMV, PPD и ОТ се дефинишу као општи индикатори топлотног комфора. Иако PMV, PPD и ОТ имају локални карактер унутар простора, они се усредњавају по простору како би се на бази норматива (стандарда) дефинисала класа топлотног комфора за посматрани простор.

Када се ради о физичким параметрима, температури ваздуха, релативној влажности ваздуха, радијантној температури, релативној брзини опструјавања ваздуха око човечјег тела и интензитету турбуленције, у унутрашњем простору доминирају два кључна механизма преноса топлоте, турбулентна конвекција (турбулентно дифузионо мешање) и пренос топлоте зрачењем. Ова два физичка феномена су били у основи кључни предмети истраживања у докторској дисертацији.

У најранијој фази пројектовања методама нумеричке симулације треба тежити што униформнијим пољима општих и локалних индикатора топлотног комфора. Униформност ових поља зависи од архитектонског решења, уграђених грађевинских материјала, дизајнираног ентеријера, локацији и перформансама дистрибутивних елемената КГХ, као најутицајнијих фактора. У докторској дисертацији истраживани су ови утицаји на униформност поља индикатора топлотног комфора. За разлику од индивидуалних кућа или станова, већи простори у којима борави више људи су типични простори где је неуниформност поља индикатора топлотног комфора значајна. Такви типични простори су образовне установе (учионице, амфитетари, лабораторије), здравствене установе (веће болничке собе, спојене бокс собе), културни и верски објекти (позоришта, концертне сале, цркве), угоститељски објекти (конгресне сале),

итд. Експериментална истраживања су вршена у учионици ОШ „Франце Прешерн” у Београду.

У току израде докторске дисертације, користиле су се следеће методе истраживања:

- **Експерименталне методе.** У изабраном простору извршена су одговарајућа мерења температуре и релативне влажности ваздуха, радијантне температуре, брзине струјања ваздуха и интензитета турбуленције у карактеристичним мерним тачкама. Резултати ових мерења послужили су за компаративну анализу квалитета – тачности предложеног турбулентног модела, као и предложеног модела преноса топлоте зрачењем.
- **Нумеричке методе.** Нумеричким решавањем различитих варијанти математичког модела за изабрани простор, квантификована је тачност турбулентних модела и модела преноса топлоте зрачењем.
- **Статистичке методе.** У оквиру израде предложене докторске дисертације, анкетирањем ученика који бораве у посматраном простору, добијени су подаци чијом су статистичком обрадом верификоване или калибрисане емпиријске корелације за одређивање индикатора топлотног комфора.

Како у принципу предмет истраживања представља феномен природне конвекције у затвореном простору, основни циљ израде презентоване докторске дисертације је био да се применом савремених експерименталних и нумеричких метода истраживања квантификују утицаји нових модификација модела турбуленције и преноса топлоте зрачењем.

У току израде презентоване докторске дисертације, посебна пажња је посвећена :

- Када су у питању двоједначински модели турбуленције посебна пажња је посвећена утицају чланова продукције и дисипације кинетичке енергије турбуленције услед флукуација запреминских сила.
- Варирањем емпиријских константи које садрже моделирани чланови у диференцијалној једначини за ε , предложена је модификација емпиријске константе $C_{\varepsilon 3}$ на тај начин што је њена вредност проглашена променљивом величином у функцији односа компоненти брзине струјања у правцу вектора гравитације и латералног правца и предложен је израз за њено одређивање.
- Када је у питању модел преноса топлоте зрачењем, предложен је нови модел зрачења који третира контаминирани ваздух угљен-диоксидом као нетранспарентни медијум, и предложен је израз за одређивање ефективне емисивности контаминираног ваздуха.

Тачност модела је одређена у процесу валидације поређењем са експериментално одређеним параметрима и моделима турбуленције и зрачења који се сматрају стандардним моделима.

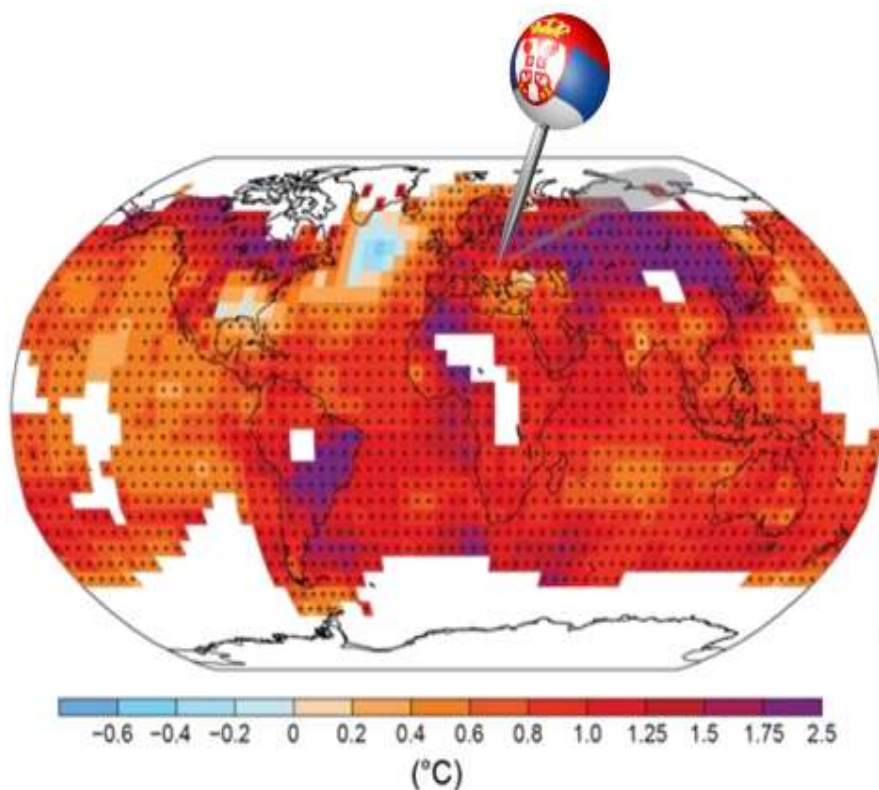
Дисертација је написана у осам глава са датим закључком и литературним прегледом. У првој глави дате су оште напомене о предмету истраживања; у глави два дати су

основни појмови и дефиниције индикатора толотног комфора, док су у трећој глави детаљно описани услови експерименталног мерења струјних и топлотних параметара у учионици и објекту ОШ “Франце Прешерн” у Београду. У глави четири, дати су резултати обрађених експериментални података. У глави пет детаљно је представљен математички модел природне конвекције у затвореном простору, а у глави шест дате су основне поставке нумеричког модела и у математичкој форми објашњени доприноси дате докторске дисертације. У глави седам детаљно су представљени резултати валидације нумеричких модела, док су репрезентативни нумерички резултати и њихова анализа дати у глави осам. На крају, у оквиру закључака сумирани су резултати докторске дисертације.

ГЛАВА 1

1.1. УВОДНЕ НАПОМЕНЕ

Енергетски ефикасне зграде су важне у циљу смањивања енергетске потрошње, која у просеку износи и до 40% укупне производње енергије. Са друге стране сусрећемо се са климатским променама које доприносе великој енергетској потрошњи. Просечна глобална температура ваздуха у периоду од 1850 до 2012 године је у тренду пораста за 2°C услед климатских промена. Што се тиче Републике Србије овај интензитет температурских промена у истом периоду износи 0.6 °C (сл.1.1) [1].



Слика 1.1 Интензитет температурских промена у периоду од 1850 до 2012

У Директиви 2010/31/EU[2], чланом 8, дефинисани су услови и мере за унапређење енергетске ефикасности зграда:

“(8) Мере за даље унапређење енергетких перформанси зграда требало би да узму у обзир климатске и локалне услове, као и амбијент унутрашње климе и исплативости. Ове мере не би требало негативно да утичу на друге захтеве када су у питању зграде, безбедност и намена.”

1.2. ФИЗИОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЧОВЕКА ВЕЗАНЕ ЗА ТОПЛОТНИ КОМФОР

Хомогено стационарно стање подразумева одржавање неутралног униформног температурског стања тела и односи се на процесе који одржавају исту унутрашњу температуру тела. Важност одржавања оваквог неутралног стања је од велике важности јер не проузрокује стресне ситуације у којима се ефикасност рада метаболизма ензима не ремети а који се одвијају у само одређеним јако екстремним температурским условима. Хормонски систем и аутономни нервни систем су јако подложни терморегулацији којом руководи хипоталамус [3]. Аутономни нервни систем такође контролише дисање као и рад срца.

Терморегулација је условљена следећим факторима:

1. Температуром тела,
2. Количином глукозе у крви и
3. Крвним притиском.

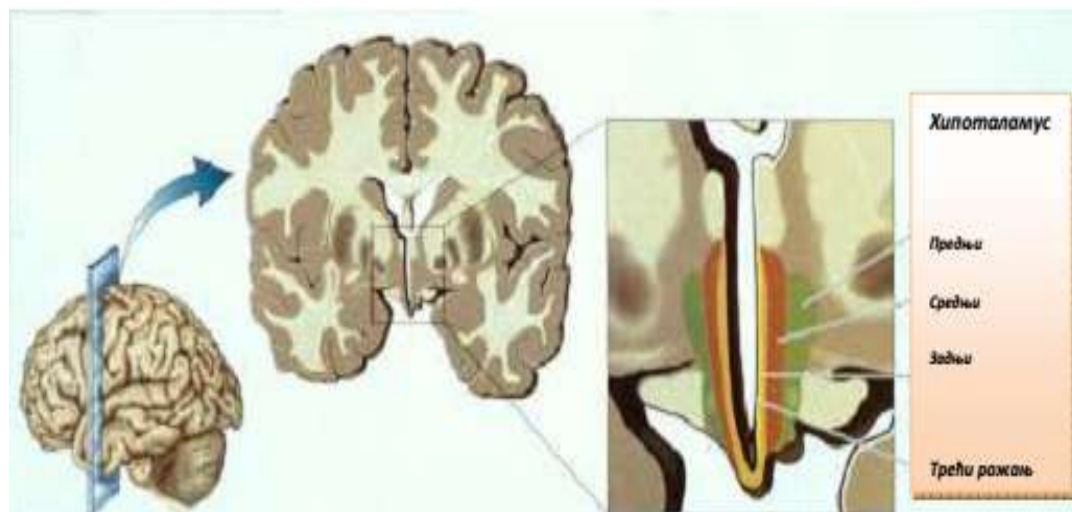
Терморегулација се контролише преко хомогених стационарних механизма. Негативни сигнали које систем региструје су они који се односе на промену константних вредности. Регистровање негативног сигнала без обзира кад се појавио у систему аутоматски повлачи корективни механизам који покушава да исправи промену унутар система и да врати систем у референтно стационарно униформно стање. То такође значи да што је већи интензитет негативног сигнала то ће одговор аутономног система бити снажнији да би се стање повратило у неутрално. На слици 1.2 приказан је ренгенски снимак рада здравог мозга који прима сигнале из топлотних рецептора и адекватно на њих реагује.



Слика 1.2 Ренгенски снимак мозга [3]

Корекција механизма негативног сигнала се може поистоветити са функционисањем електричног кола, које у кратком временском периоду полако подиже температуру да би температура се тела одржала у униформном неутралном стању.

Референтни ниво сигнала температуре тела не може бити савршено одржаван, већ осцилује око референтне тачке. Постоји неколико контролних корективних механизма код којих је најбитније јако кратко време деловања. Они могу да делују одвојено и истовремено. Главна функција корективних механизма јесте успостављање и одржавање хормонског система. Хормонски систем је под директним утицајем синтезе протеина који се после у облику хормона директно луче у крвни систем и који утичу на циркулацију читавог тела (сл. 1.3) [4].



Слика 1.3 Позиција хипоталамуса

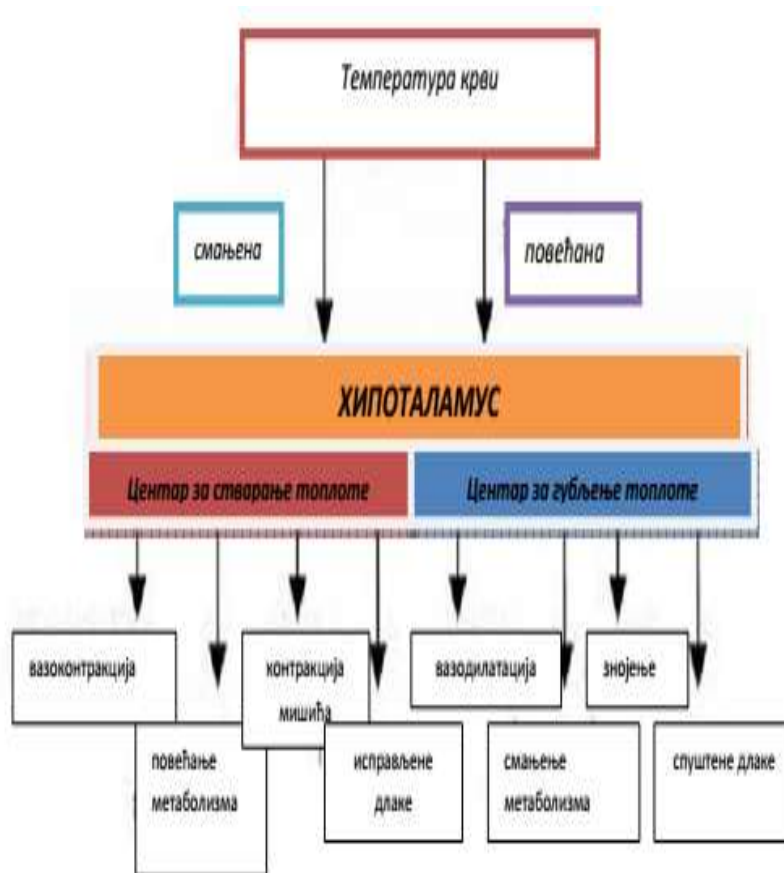
Једна од најзначајнијих величина при одржавању хомогеног стационарног стања је унутрашња температура тела. Немају сва жива бића овакву физиологију. На пример, животиње које одржавају константну температуру су птице и сисари и називају се ендодермима, док остале животиње имају варијабилну температуру, називају се

ектодермима. Ендодерми имају развијен физиолошки систем за регулацију унутрашње температуре на 35°C до 40°C и називају се топлокрвним животињама, док ектодерми немају овакав систем регулације али могу да достигну јако високе температуре када су изложени сунцу, или повећаном мускулатурном активношћу.

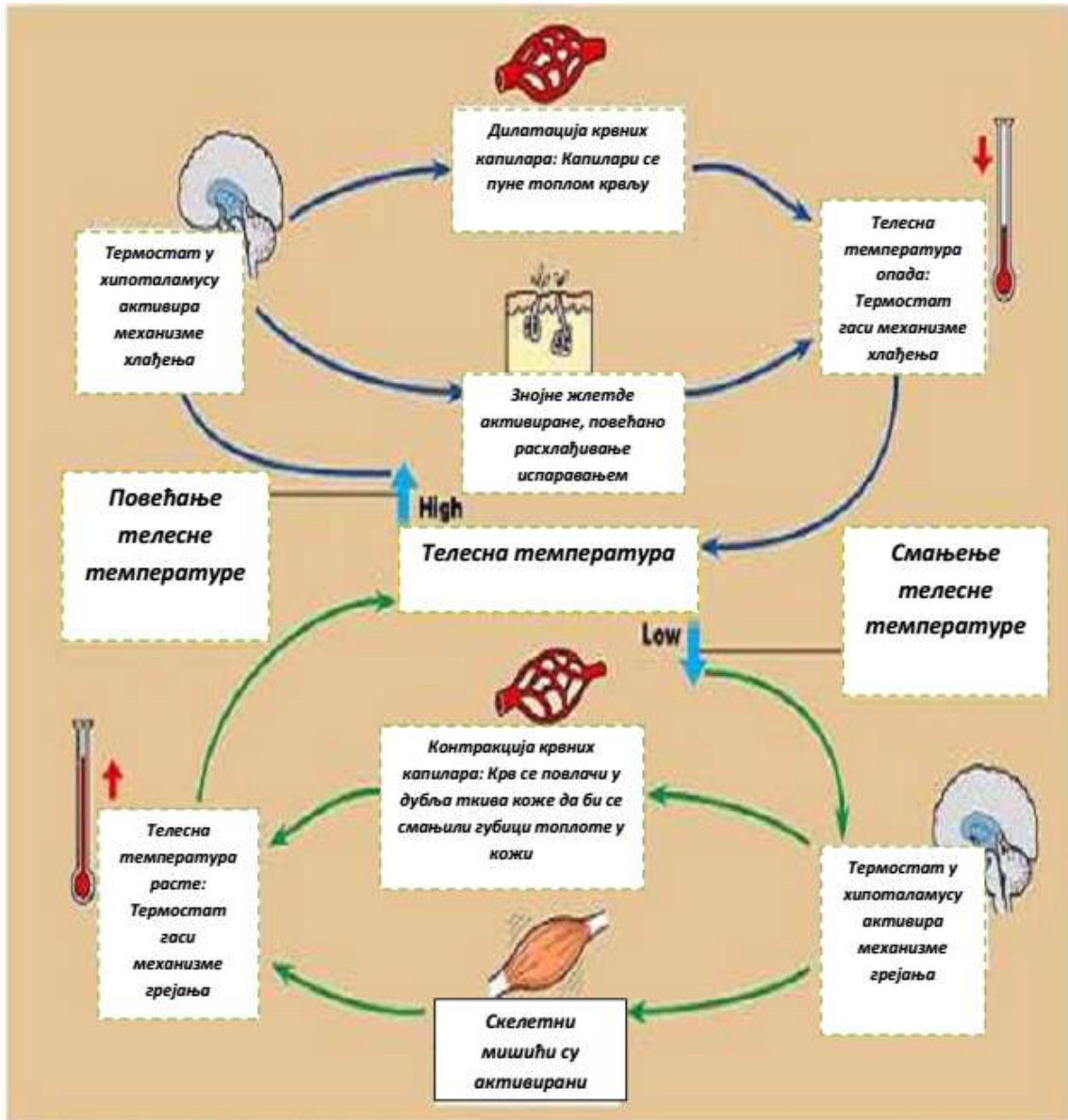
Разлика између ектодерма и ендодерма је у интеркорелативним механизмима. Ектодермални механизми користе само механизме промена понашања (нпр. лежање на сунцу када је хладно окружење, или померање у сенку када је окружење јако топло).

Овакви механизми промене понашања могу да буду јако ефектни, поготово када су подржани унутрашњим механизмима контроле циркулације крви у виталним органима (мозак, срце).

Људска унутрашња температура је контролисана терморегулационим центром који је смештен у хипоталамусу. Терморегулациони центар непрестано прима информације из две врсте терморептора: рецептора смештеног у хипоталамусу који и сам врши мониторинг над артеријском крвљу која струји кроз мозак (мониторинг температуре коре мозга) и рецептора у кожи (нарочито у леђима) који врше мониторинг спољне температуре. Оба сета информација се истовремено шаљу на обраду тако да се температура тела увек модификује зависно од примљених података. Терморегулациони центар тада шаље неколико различитих информација активирајући корекционе механизме како би се кориговала температура тела (сл. 1.4 и сл.1.5) [5].

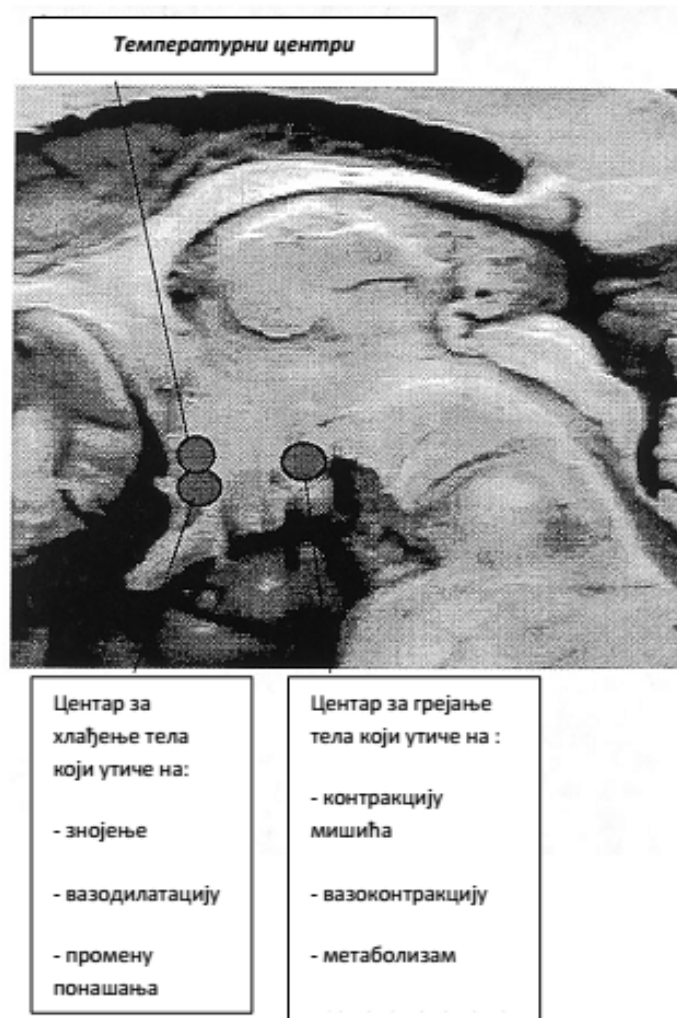


Слика 1.4 Реакције у људском организму на промену температуре у крви



Слика 1.5 Терморегулациони систем

Прва реакција на промену температуре спољне средине је промена понашања, у смислу промене врсте одеће или промене позиције у простору у односу на извор-понор топлоте. Ако механизми промене понашања нису довољни тек онда се укључује терморегулациони систем. Пошто је терморегулациони систем део аутономног нервног система, различити одговори терморегулационог система ће бити укључени као одговор на дату ситуацију (сл.1.6).



Слика 1.6 Температурски центри похрањени у артеријској крви позиционирани у хипоталамусу

У хипоталамусу којег можемо назвати и природним термометром разликујемо два сензора. У предњем делу хипоталамуса налази се центар за хладноћу, а у задњем делу налази се центар за топлоту. Оба центра похрањена су у артеријској крви тако да се мониторинг врши у реалном времену (сл.1.6).

Табела 1.1. Одговори термалних рецептора на спољашњу температуру [3]

Рецептор	Одговор на ниску спољну температуру	Одговор на високу спољну температуру
Терморептори у зидовима артеријске крви	Артеријски крвни зидови се скупљају изазивајући вазоконтракцију. Мање топлоте се емитује из крви артеријским системом према перифералним судовима.	Артеријски крвни зидови се шире изазивајући вазодилатацију. Топлота се емитује из крви артеријским путем према периферним судовима, такође су активирани и системи конвекције у облику респирације као и кондукције преко коже.
Лојне жлезде	Екстремитети у овим случајевима могу бити јако оштећени.	Кожа мења боју у црвено.
Терморептори у дубокој кожи	Нема производње зноја.	Производи се зној на површини коже који испарава. Вода има велику латентну топлоту испаравања која хлади тело.
Мишићни систем	У дубокој кожи корен длаке добија сигнал за хладноћу, подиже је у прав положај, тако да читаво тело преко длаке добија додатну изолацију спречавајући кожу да буде у директном контакту са спољном средином. Овако створен изолациони слој успорава ваздух који кружи око тела и греје га до коначног контакта са кожом.	Висока влажност као и тесна одећа онемогућавају систем регулације путем знојења.
Адреналински и тироидни систем	Мишићни систем се активира, мишићи се контрахују, метаболизам се убрзава. Долази до редукције дисања на 40%, где се конвекција као и латентна конвекција преко респирације смањује.	У дубокој кожи терморептори добијају сигнал за топлоту, чиме се повећава испаравање воде преко коже.
Механизам понашања	Хормонски систем реагује лучењем адреналина и тироксина чиме се активира апсорпција топлоте од метаболизма.	Нема активације мишићног система.

1.3. ПРИРОДНА ВЕНТИЛАЦИЈА

Природна вентилација и инфилтрација настају услед разлике притиска омотача зграде изазване струјањем ваздуха и разликом густине ваздуха између унутрашњег и спољашњег ваздуха. Разлика у спољашњем и унутрашњем притиску на одређеној локацији зависи од интанзитета локалних градијената притиска као и од карактеристика отвора на самом омотачу зграде. Хидростатички притисак у самом ваздуху зависи од густине ваздуха и висине објекта. Густина ваздуха је у функцији локалног барометарског притиска, температуре и влажности. Као последица овог, стандардни спољашњи услови се узимају у обзир приликом рачунања густине ваздуха. Сличан раст температуре ваздуха великог распона од 30°C изазива сличне промене у густини ваздуха. Када се ови фактори комбинују са висином објекта и температурским ефектима, могуће је смањење густине ваздуха и до 45%. Ефекти влажности ваздуха на саму густину ваздуха генерално су занемарљиви, тако да се густина сувог ваздуха може користити уместо густине влажног ваздуха [6].

1.3.1. МЕХАНИЗМИ ПРИРОДНЕ ВЕНТИЛАЦИЈЕ

Битну улогу у креирању термичке и струјне слике у затвореном простору играју процеци и отвори, чији утицај највише долази до изражаја у хладним или јако топлим периодима. Утицаји атмосферских прилика које подстичу ове механизме, могу бити:

- Механички, механизам конвекције под утицајем удара ветра, и
- Температурско индукована конвекција

Оба механизма су локалног карактера и за дати посматрани објекат-школу не уочава се промена густине струјања ваздуха тј. $\rho_0 = \text{const}$.

Природна вентилација кроз сваки отвор школе зависи од тоталног притиска који је у функцији оба механизма.

Притисак узрокован механизмом конвекције, односно путем ветра је дефинисан изразом:

$$P_U = \frac{\rho_0 U_H^2}{2} \quad (1.1)$$

где је:

P_U - Притисак услед конвекције ветра, Pa

U_H - Брзина ветра у тачки отвора, m/s

ρ_0 - Густина ваздуха ($\rho_0 = \text{const}$), kg/m^3

Притисак узрокован механизмом температурско индуковане конвекције је дефинисан изразом:

$$P_T = \frac{g \rho_0 (T_i - T_0)}{T_i} \quad (1.2)$$

где је:

P_T - Удео притиска услед разлике температура у затвореној просторији и спољној околини, Pa

ρ_0 - густина ваздуха ($\rho_0 = const$), kg/m^3

T_i - унутрашња температура, $^{\circ}C$

T_0 - спољашња температура, $^{\circ}C$.

Разлика притиска за сваки отвор (процеп) може се одредити емпиријским изразом:

$$\Delta p = 0.0129 s^2 C_p P_U + H P_T \quad (1.3)$$

где је:

Δp - разлика притиска за сваки отвор, Pa

C_p - коефицијент притиска на површину позиције отвора у односу на удар ветра

s - коефицијент заклоњености површине отвора у односу на правац удара ветра,

H - висина отвора на омотачу објекта, m .

Израз (3), се може применити за струјање кроз сваки отвор са одговарајућим вредностима C_p , s и H . Сваки отвор је дефинисан преко свог коефицијента притиска, коефицијента заклоњености и висине.

1.3.2. НЕУТРАЛНА ЗОНА ПРИТИСКА

Неутрална зона притиска је локација или локације на омотачу зграде у којима не постоји разлика притиска ($\Delta p = 0$). Унутрашње преграде, степеништа, окна за лифтове, вентилатори, прозори и механичка вентилација знатно компликују одређивање оваквих локација.

Код униформних отвора неутрална зона притиска појављује се у близини средње висине ових отвора. На појаву неутралног притиска утиче висина објекта, унутрашњи отпор вертикалној струји ваздуха, локални терен, заклон самог омотача на појединим деловима омотача, број отвора кроз које је струјање ваздуха веће него кроз друге делове омотача, итд. Тамо где се јавља оваква неуниформност, разлике притиска узроковане отворима у тој зони, померају место неутралног притиска према отвору. То такође значи да ако постоје отвори на крову, неутрална зона ће се померити навише

према отвору [6]. Механички системи који избацују ваздух такође утичу на померање висине неутралне зоне навише, док системи који убацују ваздух смањују висину ове зоне.

Код униформних отвора ова зона се углавном појављује у близини средине отвора по висини и карактерише је мали отпор унутрашњем струјању. Облик изобара је у функцији густине унутрашњег и спољашњег ваздуха.

У случају када је унутрашњи ваздух топлији од спољашњег, разлика притиска настаје због разлике температуре, па је очекивана неутрална зона притиска на средини отвора, с тим да доњи део отвора има струјање ка унутра (улазне струјнице), док се на вишим деловима отвора формирају излазне струјнице.

Правац струјања ваздуха је увек из подручја вишег притиска ка области нижег притиска.

У случају када је униформна разлика притиска изазвана ветром на страни која је директно изложена удару ветра, јавља се натпритисак док се у заветрини јавља потпритисак.

Ако постоји температурска разлика и ефекти ветра, притисци изазвани и једном и другом појавом се сабирају и дају укупну разлику притиска по читавом омотачу зграде.

Може доћи и до комбинације ударног ветра и температурске разлике тако да успостављају равнотежу и потиру међусобну разлику притиска на ударној површини или на површини која је у заветрини.

Од велике важности је анализа формирања поља притиска од дејства ветра и температурске разлике. Наравно, ово све зависи и од изложености зграде ветру. За сваку зграду постоје односи који су у неким границама и који се понављају у односу на брзину ветра и температурске разлике, која дефинише инфилтрацију која настаје путем оба механизма.

Како механизми и емпиријски изрази за ефекте природне вентилације строго зависе од ситуације до ситуације, најбоље је ове ефекте утврдити експерименталним путем. У току обављања реалног експеримента при изради докторске дисертације, ови ефекти су експериментално утврђени.

ГЛАВА 2

2.1. ДЕФИНИЦИЈА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА

Побољшање квалитета живота у савременим друштвима и свест јавног мњења у вези са неконтролисаним потрошњом фосилних енергетских ресурса довели су до значајног пораста пажње при проучавању животне средине, нарочито у погледу топлотних концепата.

Основни циљ КГХ-а је да обезбеди оптималне услове топлотног комфора. Дефиниција топлотног комфора јесте да обезбеди оптималне топлотне услове који ће повољно да делују на субјективни осећај задовољства код људи.

Пошто је реч о субјективном осећају доживљаја топлоте, перцепције топлоте, он је под утицајем когнитивних, физиолошких и психолошких процеса. Топлотна удобност такође зависи од људског понашања које се свесно или подсвесно руководи рецепторима топлоте и влаге у организму. Сам организам реагује да би смањио неповољне топлотне утицаје околине на њега. Неки примери су: промена одеће, мењање активности, промена држања или промена локације, подешавање термостата, отварање прозора. Такође, доказано је да и људи који живе у различитим климатским областима, различитим условима живота и различитим културама, углавном бирају сличне температуре које су им удобне. Такође, карактеристике влаге и кретања ваздуха око људског тела ће бити релативно сличне.

2.1.1. ДЕФИНИСАЊЕ ПАРАМЕТАРА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА

Једначина енергетског биланса људског тела је комбинација рационалног и емпиријског приступа који описује топлотну размену између људског тела и окружења. Фундаментални процеси преноса топлоте се користе за описивање различитих механизма преноса осећајне и латентне топлоте.

Емпиријски изрази се користе за одређивање вредности коефицијената преноса топлоте. Емпиријске једначине се такође користе за описивање термофизичких контролних механизма у функцији температуре коже, као и целокупне температуре тела. Међународни стандарди дефинишу квалитет животне средине у којој се желе остварити најповољни топлотни услови.

ASHARE 55 [10] стандард дефинише топлотни комфор као субјективни осећај доживљаја топлоте простора који се дефинише преко општих индикатора. Општи индикатори су PMV (Predicted Mean Vote) и PPD (Predicted Percent Dissatisfied). Ови индикатори се дефинишу у случају да се простор дефинише као целина. Међутим, ако се простор дефинише парцијално тј. зонално онда у свакој зони имамо локалне параметре комфора који су у даљем тексту изложени. Дефинисање локалних параметара је кључно јер њихова промена као последица има директну уштеду енергије

са променом броја измена ваздуха, температуре и релативне влажности који се директно изражава у моделу.

2.1.2. СТАНДАРДИ КОЈИМА СЕ ДЕФИНИШУ ИНДИКАТОРИ ТОПЛОТНЕ УГОДНОСТИ

У табели 2.1 приказани су стандарди који се користе за одређивање топлотних индикатора.

Табела 2.1 Стандарди који дефинишу параметре топлотне угодности.

ISO Standard/ASHRAE
ISO Thermal comfort and thermal environment standards
ISO 11399:1995. Ergonomics of the thermal environment-Principles and application of relevant International Standards.
ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
ISO 9920:2007. Ergonomics of the thermal environment-Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble.
ISO 8996:2004. Ergonomics of the thermal environment-Determination of metabolic rate.
ISO 7726:1998. Ergonomics of the thermal environment Instruments for measuring physical quantities.
ISO 7933:2004. Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain
ISO 11079:2007. Ergonomics of the thermal environment-Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects.
ISO 7726:2004. Ergonomics-Evaluation of thermal strain by physiological measurements.
ISO 10551:1995. Ergonomics of the thermal environment-Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales.
ANSI/ASHRAE 55-2004. Thermal environmental conditions for human occupancy.
ISO 15251:2007. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics

2.1.3. ИЗРАЧУНАВАЊЕ МЕТАБОЛИЗМА КОД ДЕЦЕ УЗРАСТА 8-9 ГОДИНА

Базални метаболизам представља минималну количину енергије да би виталне функције тела функционисале (плућни, кардиоваскуларни и дигестивни систем). Због потреба функционисања ова три система базални метаболизам варира у току дана. Тако да је израчунавање базалног метаболизма јако комплексно јер зависи од индивидуе до индивидуе. Због тога су се усвојили подаци о експерименталном мерењу базалног метаболизма из литературе [26] који су спроведени над популацијом деце од 10 година. Узета је средња вредност између женске и мушке популације и она износи $BMR=5,615$ MJ/дан.

Крајњи циљ је одређивање коефицијента метаболизма по јединици површине тела који се изражава у М (Met), при чему је $1Met=58,15$ W/m². На основу средње вредности усвојен је коефицијент метаболизма по јединици површине тела који износи $M=1,1207$ Met. Такође потребно је и израчунати и површину тела детета која се израчунава на основу једначине:

$$A_D = 0,108 m^{0,425} l^{0,725} \quad (2.1)$$

где је:

m – маса просечног детета узраста 8 година (експериментално је утврђено да је просек тежине ученика био 23kg), kg

l - висина просечног детета узраста 8 година (експериментално је утврђено да је просек висине ученика био 127 cm), m .

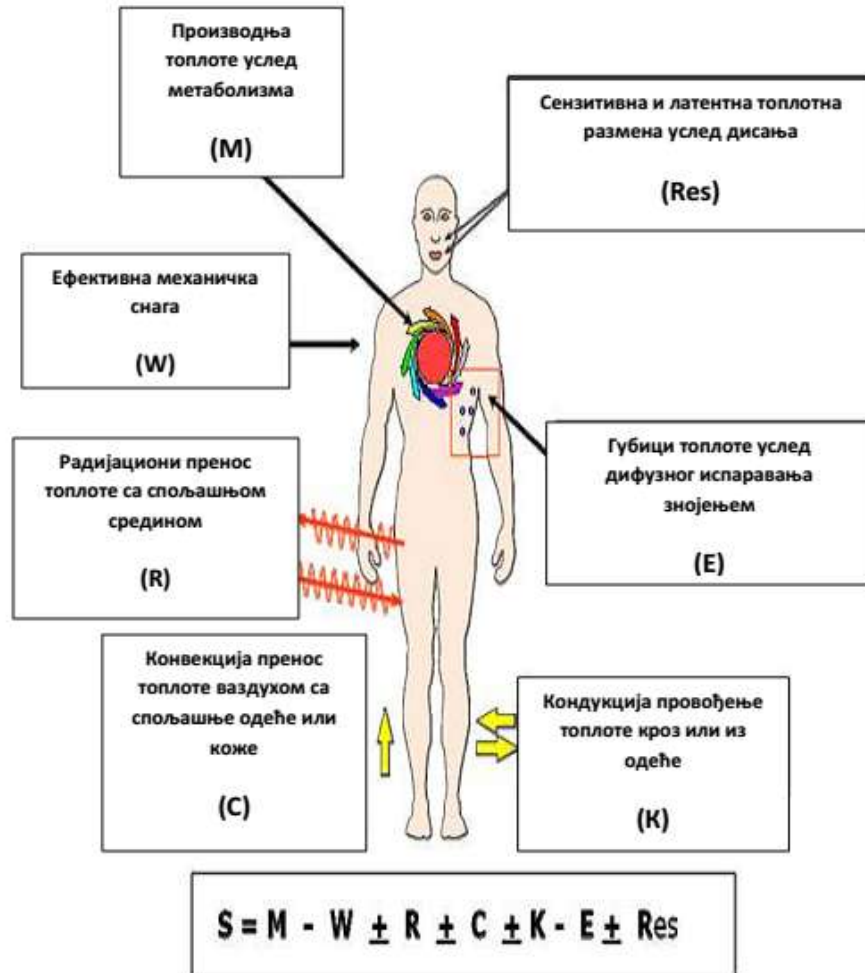
Просек површине тела за децу узраста 8 и 9 година је $A_D = 1,08$ m². Такође се рачуна и коефицијент A_R , који је једнак површини тела покривеног одећом, (табела 2.2).

Табела 2.2 Коефицијент покривености тела одећом у зимском периоду ученика узраста 8 година у учионици

Део тела (дете узраста 8. година)	A_R (m ²)
глава	0,136
торзо и леђа	0,375
руке	0,137
дланови	0,054
ноге	0,301
стопала	0,078

У зимском периоду просечна покривеност ученика узраста 8 година у зимском периоду у току грејне сезоне је $A_R = 0,891$ m², или 82,5%.

2.2.ТОПЛОТНА БИЛАНСНА ЈЕДНАЧИНА



Слика 2.1 Људско тело - Топлотна билансна једначина

За особу приказану на слици 2.1 разликује се неколико начина размене топлоте. Са M је означена количина метаболичке произведене топлоте људског тела; од ње се одузима количина топлоте која се утроши ако је људско тело изложено механичком раду W ; такође се одузима топлота која се преноси дифузијом материје услед знојења E .

Разликује се неколико начина преноса топлоте који могу допринети повећању температуре човека или је смањити. Ти начини су: преноси осећајне и латентне топлоте услед дисања R_{es} , и кондукција топлоте кроз одећу K . Ови односи потичу од људског фактора.

Што се тиче модела преноса топлоте спољашње средине на људско тело, ту су такође важна два параметра који се понашају као топлотни извори или топлотни понори зависно од параметара средине. То је конвективни пренос топлоте са ваздуха на спољашњу одећу или кожу C , и радијациони пренос топлоте са спољашњом средином R .

Вредност топлотне угодности се изражава помоћу индикатора PMV . Овај индикатор представља процену очекиваног усредњеног процента кључних параметара за дату топлотну околину. Метод овог прорачуна је развијен од стране Fanger-a (1972) [20].

Он је установио модел који даје везу између субјективног људског осећаја топлоте, израженог кроз проценат угодности на скали чији се распон креће од -3 (јако хладно) до +3 (јако топло).

За већину топлотних параметара могуће је успоставити везу између параметара и предвидети проценат људи којима су услови неприхватљиви. Људи могу бити незадовољни због општих топлотних услова и / или локалних топлотних параметара.

Такође, модел је успео да успостави разлику између топлоте акумулиране у људском телу и топлоте ослобођене од стране људског тела, која је изражена преко следеће једначине:

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)[(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}] \quad (2.2)$$

где су:

M - производња топлоте услед метаболизма људског тела, W/m^2

W - ефективна механичка снага људског тела, W/m^2 ;

H - губитци осетне топлоте, W/m^2 ;

E_c - размене топлоте услед испаравања на кожи, W/m^2 ;

C_{res} - размене латентне топлоте дисањем, W/m^2 ;

E_{res} - размена осетне топлоте дисањем, W/m^2 .

У једначини 2.2, параметри H , E_c , C_{res} и E_{res} , одговарају размени топлоте између тела и окружења и израчунавају се преко следећих једначина:

$$H = 3,96E^{-08}f_{cl}[(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a) \quad (2.3)$$

$$E_c = 3,05E^{-03}[5733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] \quad (2.4)$$

$$C_{res} = 0,0014M(34 - t_a) \quad (2.5)$$

$$E_{res} = 1,7E^{-05}M(5867 - p_a) \quad (2.6)$$

где је:

I_{cl} - коефицијент изолације одеће, $m^2 \text{ } ^\circ C/W$;

f_{cl} - коефицијент фактора површине одеће;

t_a - температура ваздуха, $^\circ C$;

t_r - радијантна температура ваздуха, $^\circ C$;

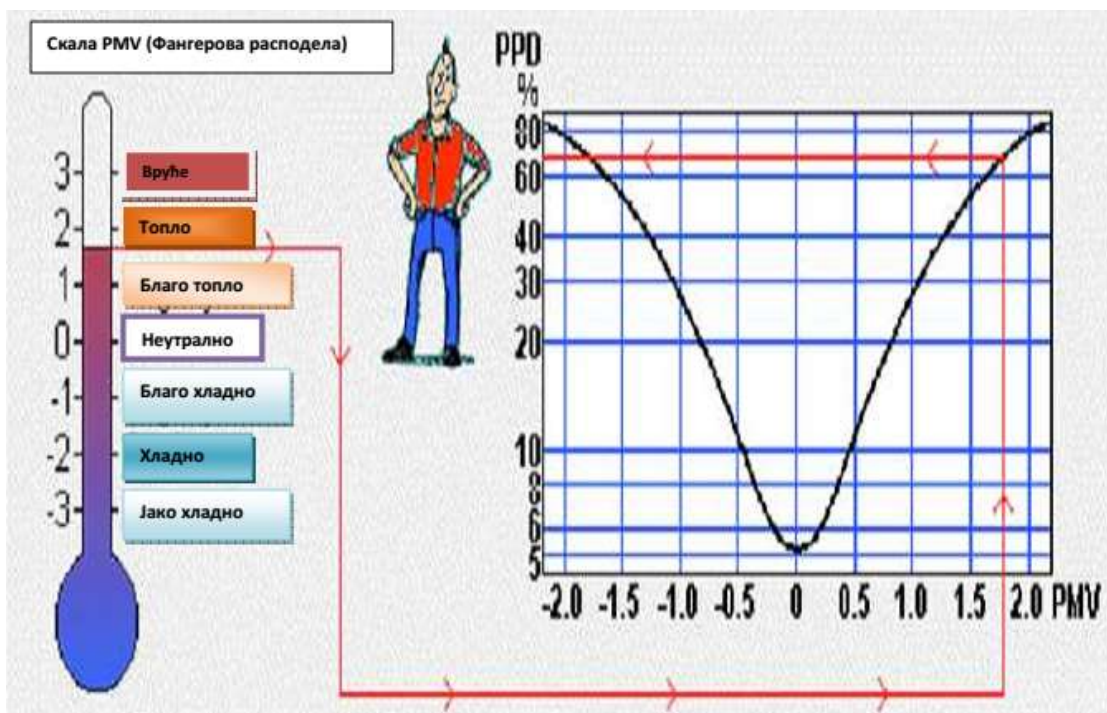
U_{ar} - средња брзина ваздуха, m/s ;

p_a - парцијални притисак водене паре, Pa ;

t_{cl} - температура површине одеће, $^\circ C$.

Други индекс који се израчунава за топлотну удобност, предложен стандардом SRPS EN ISO 7730 [16], је PPD (Predicted Percent Dissatisfied). Индекс PPD служи да квантификује очекивани проценат незадовољних људи у датој топлотној средини. Fanger је закључио у својим студијама да се промена PMV индекса може апроксимирати аналитичким изразом који одговара кривој чији изглед је сличан обрнутој Гаусовој расподели (сл. 2.2).

$$PPD = 100 - 95 e^{-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)} \quad (4.7)$$



Слика 2.2. Аналитичка зависност индекса PMV и PPD

Топлотна удобност простора се дели у три категорије: А, Б и Ц. Свака категорија је дефинисана у опсегу PMV вредности. Тако је категорија А дефинисана у опсегу од $-0,2$ до $+0,2$, категорија Б у опсегу од $-0,5$ до $0,5$, категорија Ц почиње од вредности $-0,7$ до $0,7$. Да би се обезбедила конвергенција прорачуна, улазни подаци треба да буду у оквирима примене, који су дефинисани у стандарду SRPS EN ISO 7730 [16]. Па су ограничења дата за:

- Метаболички ниво: M , од 46 W/m^2 до 232 W/m^2 ($0,8 \text{ Met}$ до 4 Met);
- Изолација одеће: I_{cl} , од $0 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ до $0.310 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ (0 clo до 2 clo);
- Температура ваздуха: t_a , од 10°C до 30°C ;
- Радијантна температура: t_r , од 10°C до 40°C ;
- Релативна брзина ваздуха: U_{ar} , од 0 m/s до 1 m/s ;
- Парцијални притисак водене паре: p_a , од 0 Pa до 2700 Pa .

Пошто су два топлотна индикатора у међусобној корелацији онда се може рећи и да су категорије топлотног комфора изражене преко *PPD* вредности за категорију А испод 6%, за категорију Б испод 10% и за категорију Ц испод 15%. Анализа дата на слици 2.2 показује да због индивидуалне разлике међу људима, чак и за ситуацију која је са идеалном топлотном неутралности ($PMV = 0$), проценат незадовољаних износи 5%. За директан метод прорачуна индикатора комфора *PMV* и *PPD* користе се следећи подаци - температура ваздуха, радијантна температура, релативна брзина ваздуха и парцијални притисак водене паре. Прорачун је дефинисан стандардом SRPS EN ISO 7730 (табела 2.3).

Табела 2.3 Вредности локалног индикатора комфора *PMV* и *PPD* за сваку позицију учионице

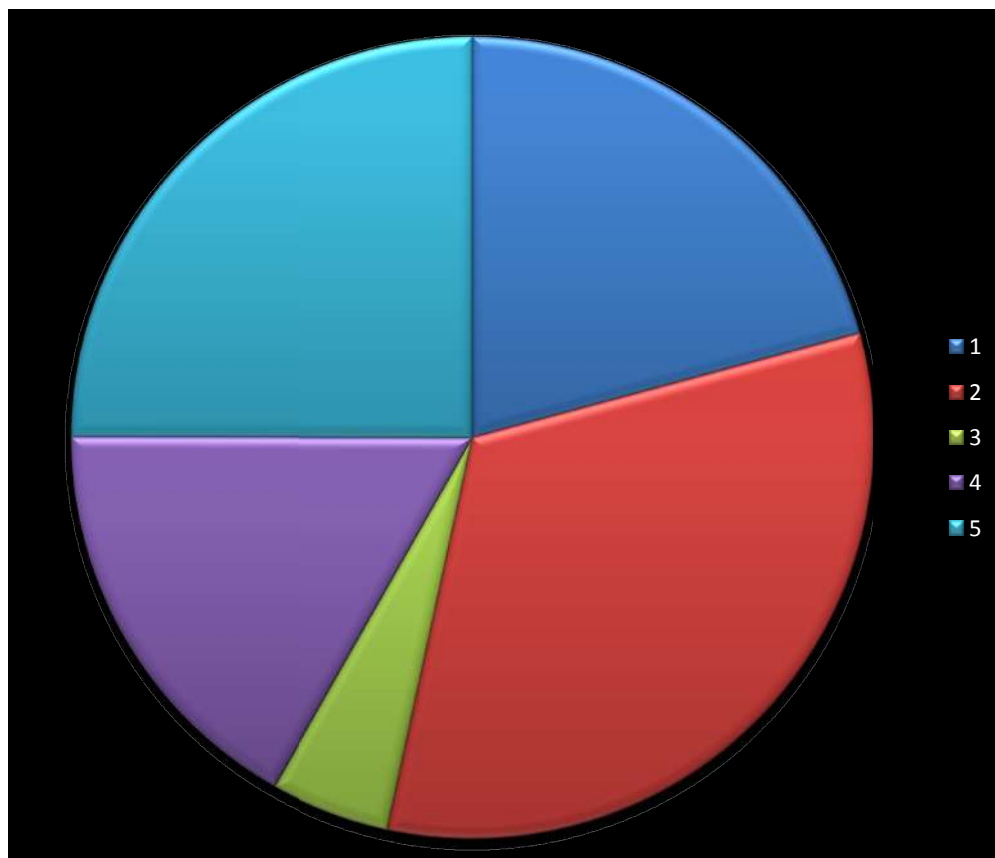
Позиција	<i>PMV</i>	<i>PPD (%)</i>
11	-0,53	10,91
12	-0,60	12,49
13	-0,53	10,91
14	-0,47	9,70
15	-0,46	9,37
21	-0,51	10,48
22	-0,60	12,61
23	-0,57	11,90
24	-0,54	11,04
25	-0,36	7,63
31	-0,71	15,51
32	-0,69	14,95
33	-0,58	12,17
34	-0,52	10,58
35	-0,36	7,75
41	-0,62	12,97
42	-0,65	13,79
43	-0,61	12,92
44	-0,58	12,08
45	-0,40	8,27
51	-0,87	21,12
52	-0,77	17,45
53	-0,61	12,93
54	-0,61	12,76
55	-0,45	9,18
61	-0,76	17,29
62	-0,67	14,53
63	-0,62	13,07
64	-0,60	12,52
65	-0,42	8,61

Вредност индикатора *PMV* експериментално добијених на свакој од 30 карактеристичних тачака у учионици је негативна. Ученици седе тако да је њихова спољна активност тј. спољни рад једнак $W = 1$, $Met = 58 \text{ W/m}^2$. У свакој од 30 позиција забележен је негативни топлотни биланс. Пошто је разлика негативна, људско тело је у процесу губљења топлоте, што значи да ће људско тело осећати хладноћу, табела 2.4, а то је случај спољашње средине као топлотног понора.

Табела 2.4. Случај спољне средине као топлотног понора у свакој позицији учioniце

Позиција	<i>M - W</i>	<i>H+Ec+Cres+Eres</i>	Топлотни биланс тела као целине (W/m^2)
11	7	16,14932293	-9,149322926
12	7	16,67125489	-9,671254894
13	7	16,77121847	-9,771218474
14	7	16,83771239	-9,837712388
15	7	16,79805333	-9,798053332
21	7	16,53004394	-9,530043939
22	7	16,67691856	-9,676918564
23	7	16,39870088	-9,398700876
24	7	17,1016192	-10,1016192
25	7	16,38939325	-9,389393245
31	7	16,91950123	-9,919501233
32	7	17,16749817	-10,16749817
33	7	16,91913025	-9,919130254
34	7	17,04672139	-10,04672139
35	7	15,82138484	-8,821384844
41	7	17,44085737	-10,44085737
42	7	17,21946781	-10,21946781
43	7	16,92169288	-9,921692876
44	7	17,08651558	-10,08651558
45	7	15,74919956	-8,749199564
51	7	19,36356598	-12,36356598
52	7	18,57482317	-11,57482317
53	7	17,53797249	-10,53797249
54	7	17,48917915	-10,48917915
55	7	16,87847967	-9,878479668
61	7	18,16967042	-11,16967042
62	7	17,76360587	-10,76360587
63	7	17,46272445	-10,46272445
64	7	17,48607235	-10,48607235
65	7	16,93851662	-9,938516618

Посебно су разматрани топлотни губитци тела ученика као целине у случају спољашње средине као топлотног понора, табела 2.5 и слика 2.3.



- 1 - (21%) Зрачење
- 2 - (33%) Конвекција
- 3 - (5%) Размене топлоте услед испаравања на кожи
- 4 - (17%) Размене латентне топлоте дисањем
- 5 - (25%) Размена осетне топлоте дисањем

Слика 2.3 – Топлотни губици тела као целине.

Табела 2.5 Односи топлотних губитака тела као целине

Конвекција %	Зрачење %	Размена топлоте преко зноја %	Размена топлоте дисањем облик Латентно %	Размена топлоте дисањем облик Осећајно %
33	21	5	17	25

ГЛАВА 3

3.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ У ОШ “ФРАНЦЕ ПРЕШЕРН”

Мерења су спроведена на објекту ОШ “Франце Прешерн” у периоду од 27.11.2013. до 28.12.2014., у току грејне сезоне. Дата мерења могу се поделити на дугорочна и краткорочна.

Дугорочна мерења која су спроведена у периоду од 27.11.2013. до 28.12.2014. са истим протоколом мерења. Подаци су бележени као средње вредности за интервал од 10 минута, и то:

- мерење брзине и правца ветра на крову зграде школе (једно мерно место),
- мерење спољне температуре и релативне влажности околине на крову зграде школе (једно мерно место),
- мерење температуре ваздуха у учионици (15 мерних места).

Краткорочна мерења су била спроведена непрекидно у интервалима од по један дан, у учионици, а обухватала су:

- сликање објекта и деце термовизијском камером,
- мерење радијантне температуре у учионици,
- мерење U вредности елемената омотача школе,
- мерење протока ваздуха у учионици природном инфилтрацијом,
- мерење брзине струјања ваздуха у учионици.

Такође, спроведена је и анкета међу ученицима првог и другог разреда о њиховом субјективном осећају топлотног комфора.

3.1.1. УСЛОВИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА

Сви мерни инструменти су калибрисани у акредитованим лабораторијама Института за нуклеарне науке “Винча”. У табели 3.1 дати су подаци о тачности мерних инструмената.

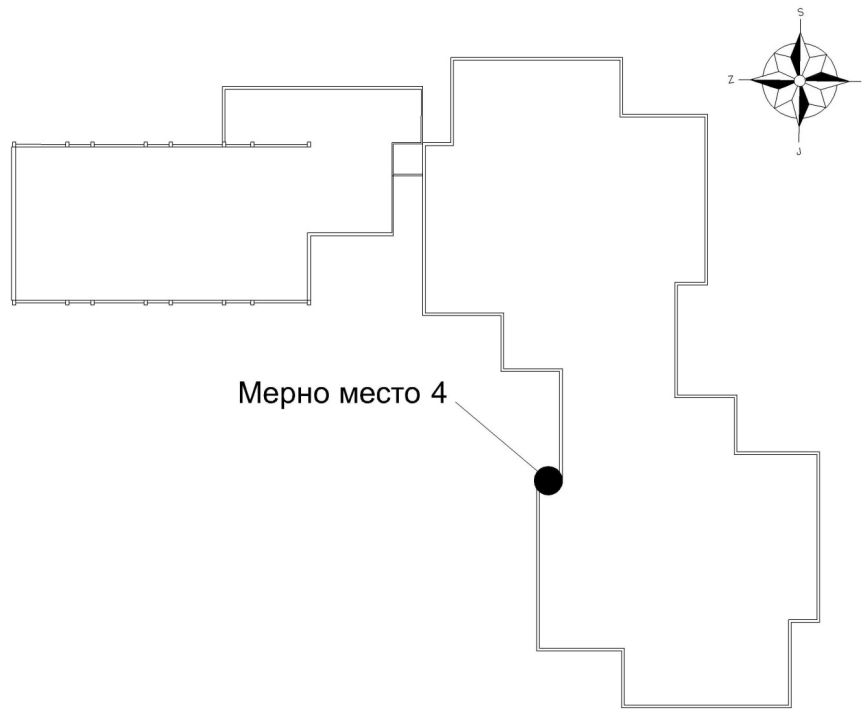
Табела 3.1. Подаци о тачности мерних инструмената

Инструмент	Мерени параметар	Опсег	Грешка мерења
Тесто 635-2	$t_e, ^\circ C$ - спољна температура ваздуха	-50°C 0°C 500°C	±0.3°C ±0.3°C ±2.5°C
	$t_i, ^\circ C$ - унутрашња температура ваздуха		
	$t_{se}, ^\circ C$ - температура спољних површина елемената зграде		
	$t_{si}, ^\circ C$ - температура унутрашњих површина елемената зграде		
Тесто 445	$t_g, ^\circ C$ - температура црне кугле	-50°C 0°C 500°C	±0.3°C ±0.3°C ±2.5°C
Тесто 435-4	$t_a, ^\circ C$ - температура ваздуха непосредно око црне кугле	-50°C 0°C	±0.3°C ±0.3°C
		500°C	±2.5°C

У процесу обраде података изабрани су поуздани резултати мерења. Како је примењена стационарна метода одређивања енергетских карактеристика омотача зграде, струјања ваздуха у учионици и мерења радијантне температуре, изабрани су подаци приближно констатних вредности током одговарајућих временских периода мерења.

3.2. ДУГОРОЧНО МЕРЕЊЕ БРЗИНЕ И ПРАВЦА ВЕТРА

Пошто је локација посматраног објекта на којем се вршило мерење доста удаљена од најближе метеоролошке станице Београд - Кошутњак, и због саме орографије локације није било могуће директно узети податке за брзину и правац ветра са ове метеоролошке станице. Ради обезбеђивања ових података постављена је локална метеоролошка станица на крову саме зграде (сл. 3.2). Објекат је L-профила, саграђен 70 - их година на падини под нагибом од 10%. На слици 3.1 приказана је основа објекта и позиција локалне метеоролошке станице (означена као мерно место 4).



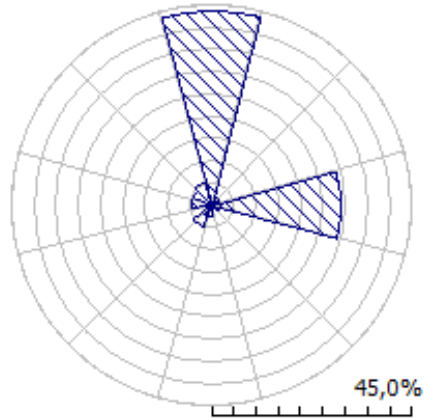
Слика 3.1 Објекат на коме је постављена локална метеролошка станица



Слика 3.2 Приказ локалне метеролошке станице

На основу измерених података добијена је ружа ветрова за дати објекат (сл. 3.3):

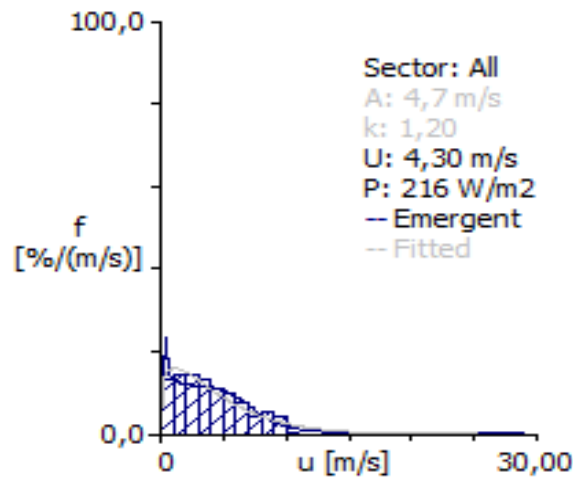
- Локација: 'ОШ Франце Прешерн';
- Положај: 22°N 43°E;
- Висина анемометра: 15m



Слика 3.3 Ружа ветрова добијена мерењем локалном метеролошком станицом на локацији 22°N 43°E

На основу мерења правца ветра у трајању од месец дана добијена је ружа ветрова која показује два доминантна правца удара ветра на објекат. Два ударна правца су северни и источни. На овим зидовима се ствара натпритисак, док се потпритисак ствара на јужним и западним зидовима. Тиме је дефинисан правац струјања ваздуха кроз објекат.

Weibull-ова расподела брзине и учестаности ветра је графички дата на слици 3.4 и табеларно у табели 3.1.



Слика 3.4 Weibull-ова статистика интензитета удара ветра за локацију 22°N 43°E

Табела 3.1. Weibull-ова статистика интензитета удара ветра

	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
A	3,6	0,5	3,9	6,0	6,7	0,5	3,1	2,8	0,5	5,3	4,3	5,2
k	0,86	10,34	1,08	2,49	5,85	10,34	0,95	1,00	10,34	1,54	1,94	2,39
U	3,90	0,49	3,82	5,34	6,16	0,49	3,15	2,79	0,49	4,76	3,84	4,61
P	328	0	169	148	160	0	129	81	0	173	68	98
f	43,7	0,5	1,9	28,8	1,9	0,5	2,6	5,4	0,5	4,4	4,4	5,4

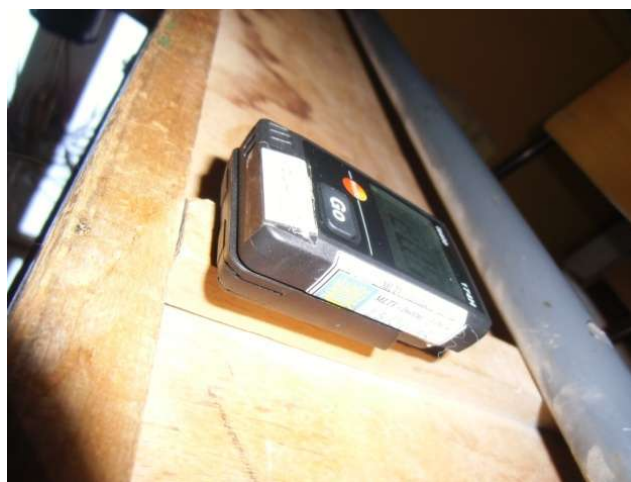
Пошто је и сама учионица оријентисана северозападно, може се извршити прикладна анализа удара ветра. Највећи удари ветра су из правца севера (0°) интензитета 3,9m/s са учесталošћу од 43,7%, и источног правца (90°) интензитета 5,34m/s са учесталošћу од 28,8%. Прозори учионице су позиционирани према западној страни света (270°) где су добијени подаци за интензитет ветра од 4,76 m/s и са учесталošћу од 4,4%.

На основу анализе струјања ветра око објекта може се закључити да је позиција прозора учионице у пољу потпритиска. Учесталост директног удара западног ветра у прозоре и ремећење унутрашњег поља притиска појављује се процентуално испод 5%, што је занемарљив проценат [11], те се може закључити да је природна инфилтрација у учионици под доминантним термичким ефектима.

3.3. ДУГОРОЧНО МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ВАЗДУХА У УЧИОНИЦИ И СПОЉНЕ ТЕМПЕРАТУРЕ

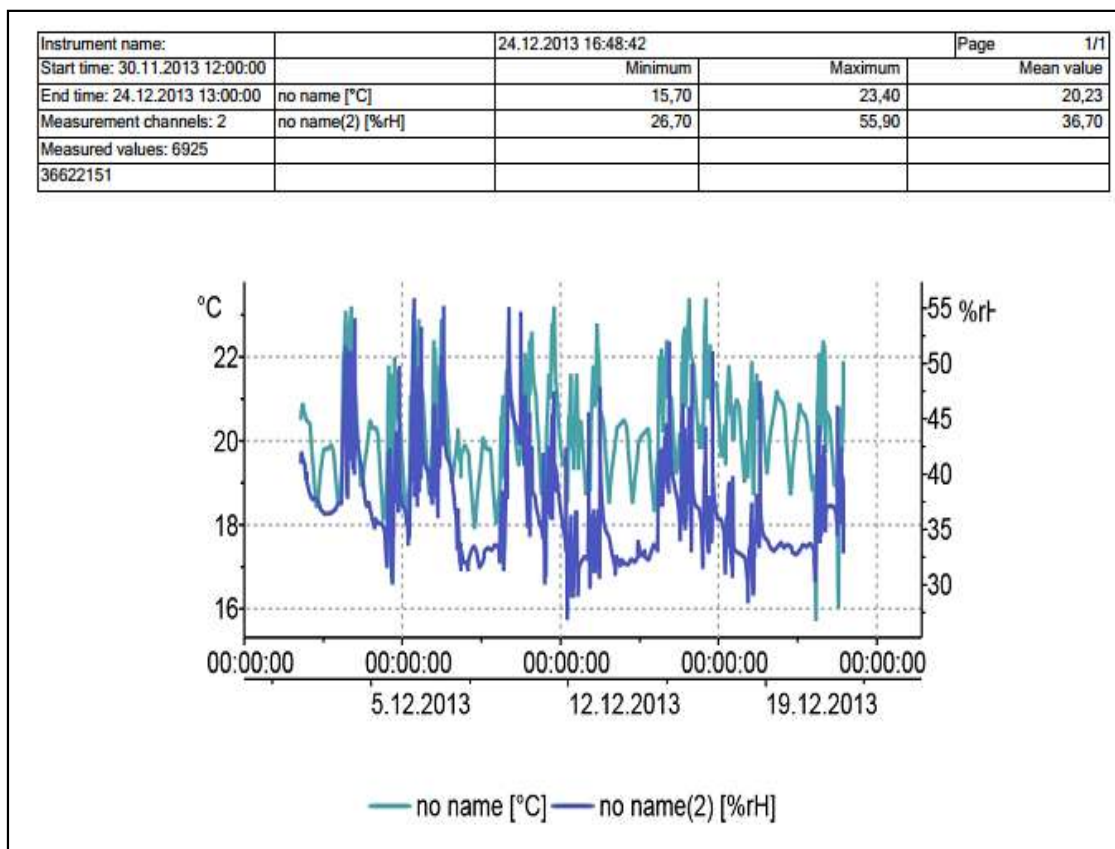
Дугорочно мерење спољне температуре и релативне влажности ваздуха спроведено је инструментом Testo 174Н [12] у периоду од 27.11.2013. до 28.12.2014. Циљ дугорочног мерења је био да се испита комплетна временски дугорочна температурска инерција саме учионице.

Мерење температуре ваздуха и релативне влажности у учионици је обављено логерима Testo-174Н [12], који су постављени испод сваке ђачке клупе на средини, њих укупно 15, уз један додатни који је постављен испод катедре наставника. Подешени су да снимају температуру на сваких 10 минута (слика 3.5).

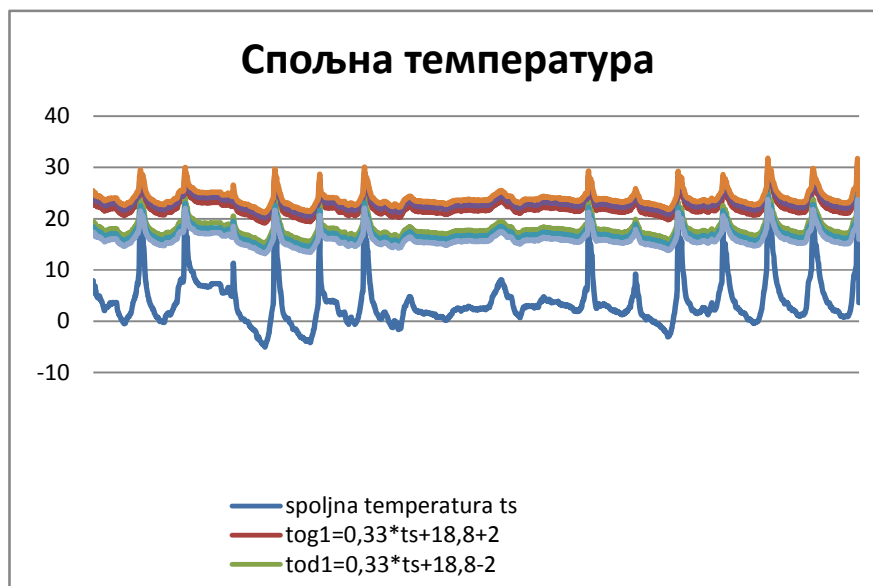


Слика 3.5 Testo-174H постављен испод сваке клупе (H=51cm).

На сликама 3.6 и 3.7 графички су приказани резултати мерења унутрашње и спољне температуре ваздуха, респективно.



Слика 3.6 Извештај са уређаја Testo-174H - постављеног између позиција 34 и 44.



Слика 3.7 Мерење спољне температуре ваздуха и границе оперативне температуре учионице

3.4. КРАТКОРОЧНО МЕРЕЊЕ: СЛИКАЊЕ ОБЈЕКТА И УЧЕНИКА ТЕРМОВИЗИЈСКОМ КАМЕРОМ

Сликање објекта и ученика термовизијском камером рађено је у периоду грејне сезоне три дана заредом у периодима три сата после укључивања даљинског грејања. Тежило се да се илустративно покажу површине термалних мостова на објекту и у учионици, топлотни губици услед природне инфилтрације, бидирекционалне површине струјања које се не могу приметити тачкастим или линијским снимањем. Такође, једино је термовизијском камером било могуће снимање температуре тела ученика, јер није постојала могућност да се спроведе контактано мерење температуре тела ученика (сл. 3.8). Мерење и снимање објекта и ученика обављено је термалном камером FLIR [14]. Калибрација термалне камере урађена је на основу већ калибрасаних термопарова постављених на три карактеристична материјала (бетон, стакло и пластика). Забележена разлика приказана је у табели 3.3.

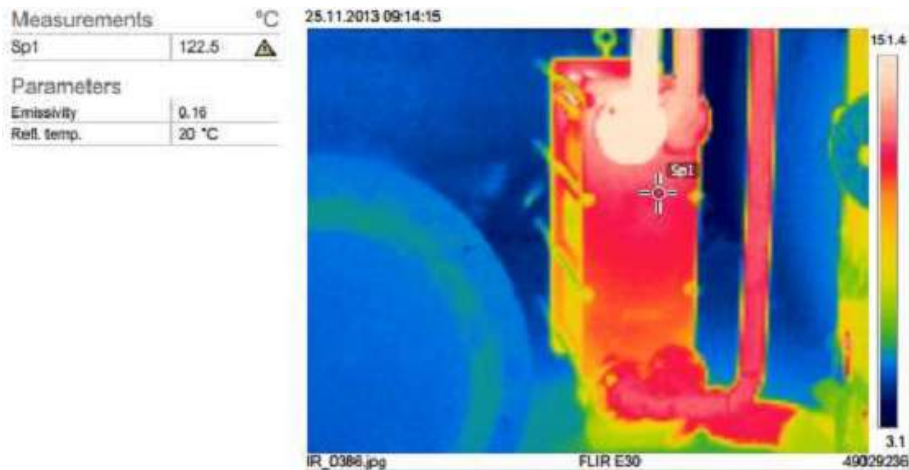
Табела 3.3 Калибрација термовизијске камере калибрисаним термопаровима

Материјал	Температура термопара (°C)	Температура термовизиске камере (°C)
бетон	13.0	12.1
стакло	17.0	16.1
пластика	12.7	12.7



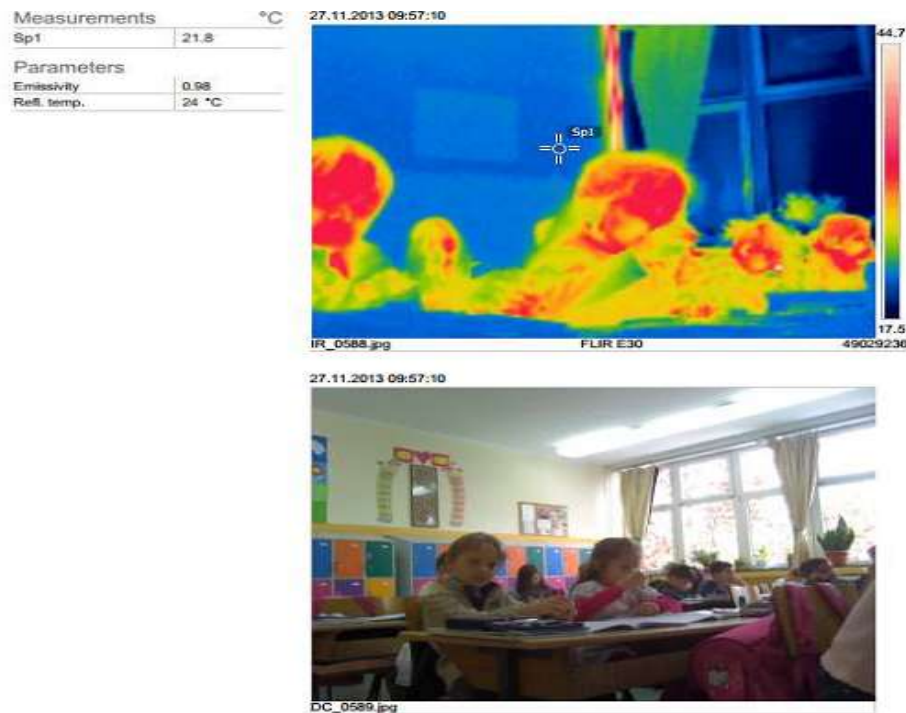
Слика 3.8 Термална слика омотача учионице

На слици 3.8 уочава се неуниформно температурско поље спољашњег зида учионице. Неуниформно температурско поље потиче од топлотних мостова. Топлотни мостови потичу од различитих површинских коефицијената пролаза топлоте U (W/m^2K) који су експериментално линијски измерени посебно за спољни зид који је бетонске конструкције и за ПВЦ прозоре.



Слика 3.9 Подстанџца објекта школе

На слици 3.9 термовизијском камером сликана је унутрашњост подстанџце школе. За систем грејања пројектован је класични двоцевни радијаторски систем грејања. Цевни развод изведен је челичним цевима. Објекат је прикључен на систем даљинског грејања. У објекту се налази топлотна подстанџца инсталисане снаге 700 KW.



Слика 3.10 Термална слика учионице и ученика

На слици 3.10 снимани су ученици термовизијском камером, како би се добио однос температуре околних зидова и тела ученика. Овакав снимак се није користио при дефинисању граничних услова.

3.5. КРАТКОРОЧНО МЕРЕЊЕ: МЕРЕЊЕ U ВРЕДНОСТИ ОМОТАЧА ШКОЛЕ

Елементи чије се U-вредности мере су сви спољашњи елементи омотача објекта, који су по својој структури различити:

- Зидови фасаде;
- Застакљене површине (прозори и стаклена фасада), при чему се обавезно мере U-вредности стакла (далеко од утицаја рама) ;
- Рам прозора;
- Кровна конструкција;
- Плафон последњег спрата.

Избор ових површина је направљен на страни фасаде где је најмањи дневни утицај директног сунчевог зрачења. При постављању мерних сонди, водило се рачуна о следећим елементима (сл.3.11):

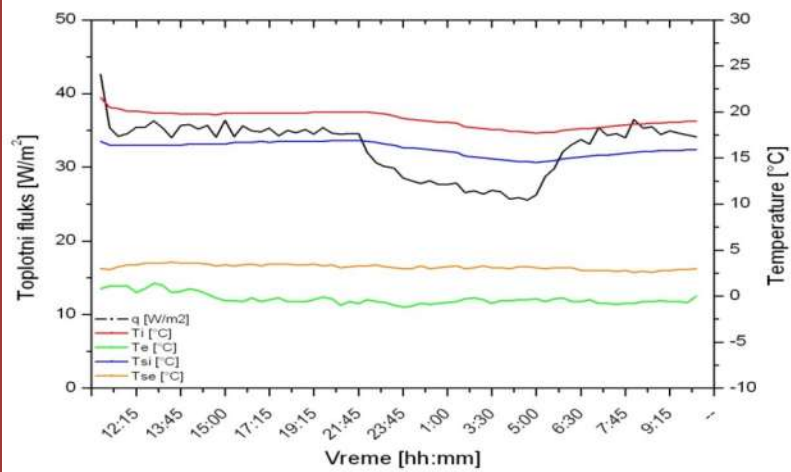
- Како је метода базирана на одређивању и мерењу топлотних флукса управних на површину елемента зграде, сонде за мерење спољашње температуре ваздуха (радио сонда), термопар за мерење спољне температуре површине фасаде (друга радио сонда), центар три контактна термопара за мерење температуре унутрашње површине (једнакостранични троугао, странице 10 до 15cm) и логер у коме се налази сонда за мерење унутрашње температуре ваздуха, постављани су приближно на истој линији, управној на мерену површину.
- Радио сонде су постављане на носач који се причвршћује са спољашње стране. Врх радио сонде је подигнут довољно да се центар унутрашњих контактних термопарова налази на таквој позицији да контактне термопарове не омета спољашњи систем припајања носеће конструкције радио сонде (вакуумски припајач).
- Иако радио сонда поседује сопствену заштиту од директног сунчевог зрачења, обезбеђена је одговарајућа заштита (панелни штитник) од директног сунчевог зрачења и других атмосферских утицаја (киша).
- При мерењу средње радијантне температуре, црна кугла је постављана приближно у центар унутрашњег простора, а сонде за мерење температуре ваздуха око црне кугле и брзине струјања ваздуха, постављане су непосредно испод црне кугле на максималном растојању од 5cm.



Слика 3.11 Мерење U вредности елемената објекта школе

Резултати
Мерења

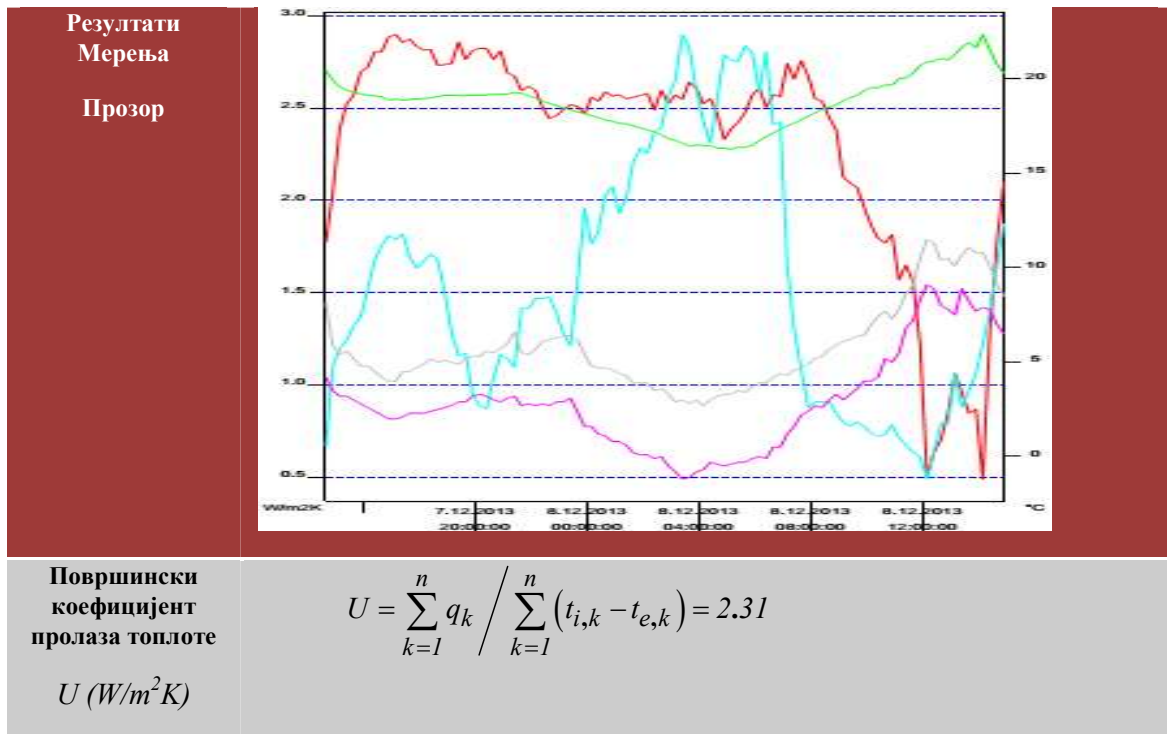
Спољни зид
фасаде



Површински
кофицијент
пролаза
топлоте

$$U = \frac{\sum_{k=1}^n q_k}{\sum_{k=1}^n (t_{i,k} - t_{e,k})} = 1.53$$

U (W/m^2K)



Слика 3.12 Резултати мерења ради одређивања површинских коэффицијената пролаза топлоте спољњег зида и прозора $U (W/m^2K)$

3.6. КРАТКОРОЧНО МЕРЕЊЕ: МЕРЕЊЕ ПРИРОДНЕ ИНФИЛТРАЦИЈЕ У УЧИОНИЦИ

Мерење је спроведено у режиму затворених прозора, методом Tracer-Gas dilution која је дефинисана у стандарду BS EN ISO 12569 [15]. Постављене су три CO₂ сонде на две висине (под 0.1m и сто 0.8 m) (сл. 3.13). Гас CO₂ се константно убацује у претходно заптивени простор учионице. Потребно је обезбедити равномерну концентрацију између тачака у којима се убацује гас. Подаци се узимају једино када је постигнута униформност поља концентрације CO₂, која у тачкама мерења концентрације не сме да одступа више од 10%.

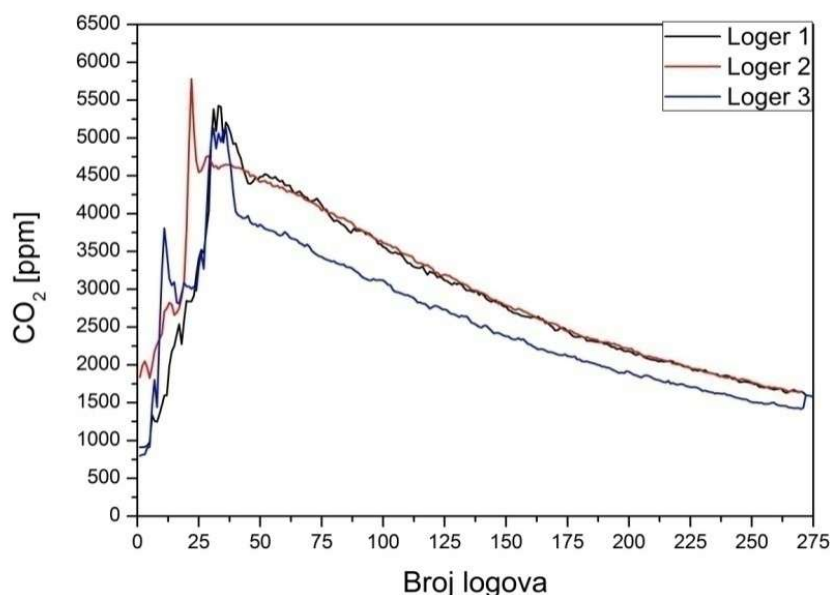
На слици 3.13 је приказана метода Tracer-Gas dilution за константну концентрацију гаса у режиму затворених прозора.



Слика 3.13 Метода CO₂ у режиму затворених прозора

За одређивање инфилтрације користи се метода са трасер гасом према стандарду: BS EN ISO 12569: “*Thermal insulation in buildings – Determination of air change in buildings – Tracer gas dilution method*”. Мерење је вршено 07.12.2013. године на мерном

месту бр. 1 – у учионици која се налази на првом спрату. На слици 3.14 приказан је оригинални извештај мерених концентрација CO₂.



Слика 3.14 Извештај о инфилтрацији добијен методом Tracer-Gas dilution према BS EN ISO 12569 [15] при потпуној заптивености учионице

3.7. КРАТКОРОЧНО МЕРЕЊЕ: МЕРЕЊЕ ЛОКАЛНИХ ПАРАМЕТАРА *PMV*

Анализа краткорочног мерења је дефинисана према стандардима SRPS EN 7730 [16], SRPS EN 7726 [17], SRPS EN 15251 [18], а подразумева одређивање локалних параметара *PMV* коришћењем одређених мерних уређаја, и обухвата:

- одређивање локалног *PMV*; коришћена је инструментација за мерење радијантне температуре (TESTO-Globe [12]), затим за мерење температуре ваздуха у околини кугле (TESTO-IAQ [12]) и анемометар са врелом жицом који је мерио брзину струјања у близини кугле у x-правцу (TESTO-Hotwire anemometer [12]), (сл. 3.15);
- одређивање локалног параметра турбуленције *PMV* помоћу сонде за турбуленцију (TESTO-Turbulent sensor [12]) за мерење укупне брзине струјања ваздуха у посебно одређеним тачкама просторије (сл. 3.16);
- мерење температурске асиметрије и одређивање локалног асиметријског *PMV*; мерење је урађено инфрацрвеним сензором (TESTO- Infrared sensor [12]).



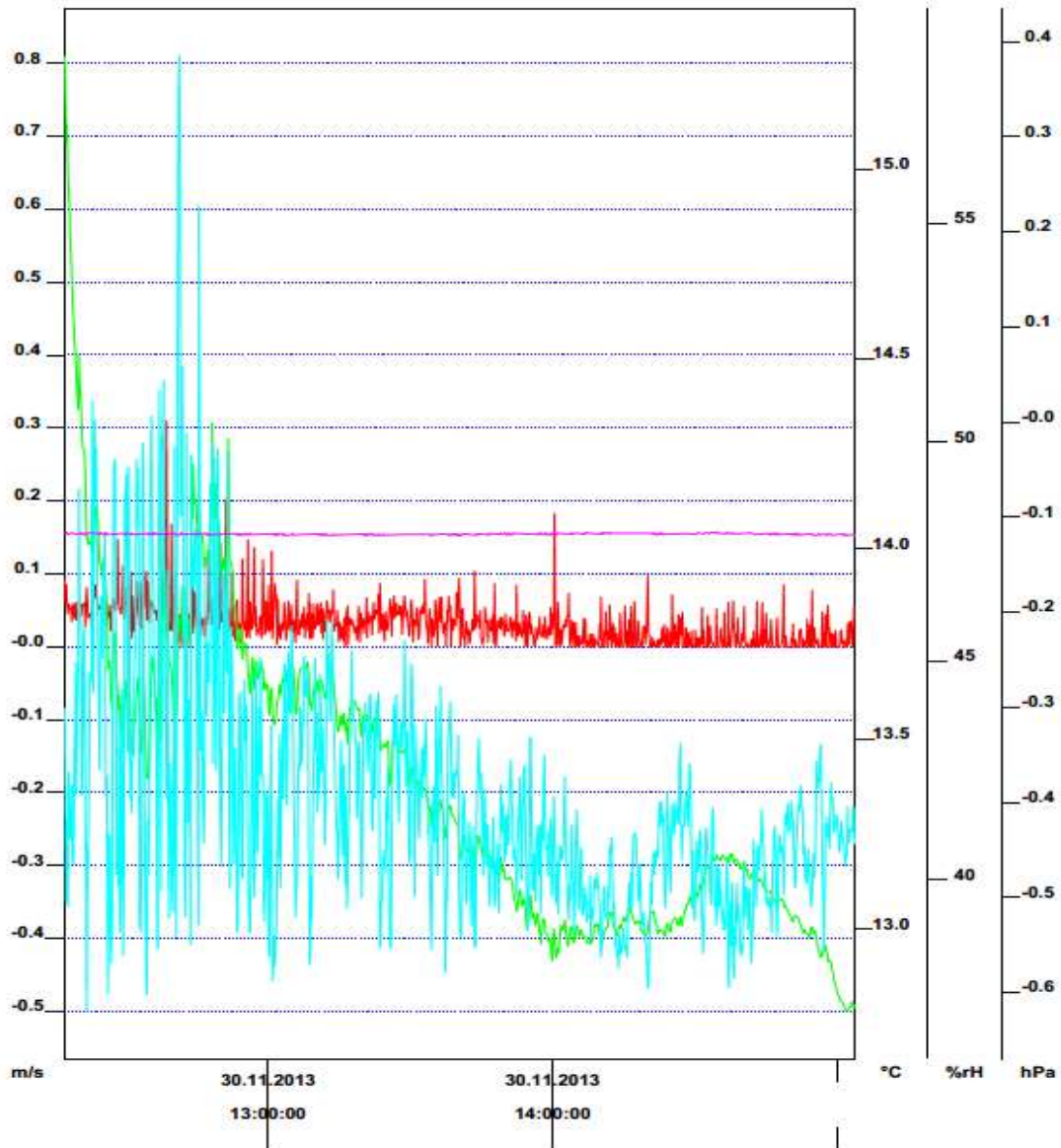
Слика 3.15 Инструменти TESTO-Globe и TESTO-Hotwire anemometer



Слика 3.16 Инструмент TESTO-Turbulent сензор за мерење интензитета турбуленције

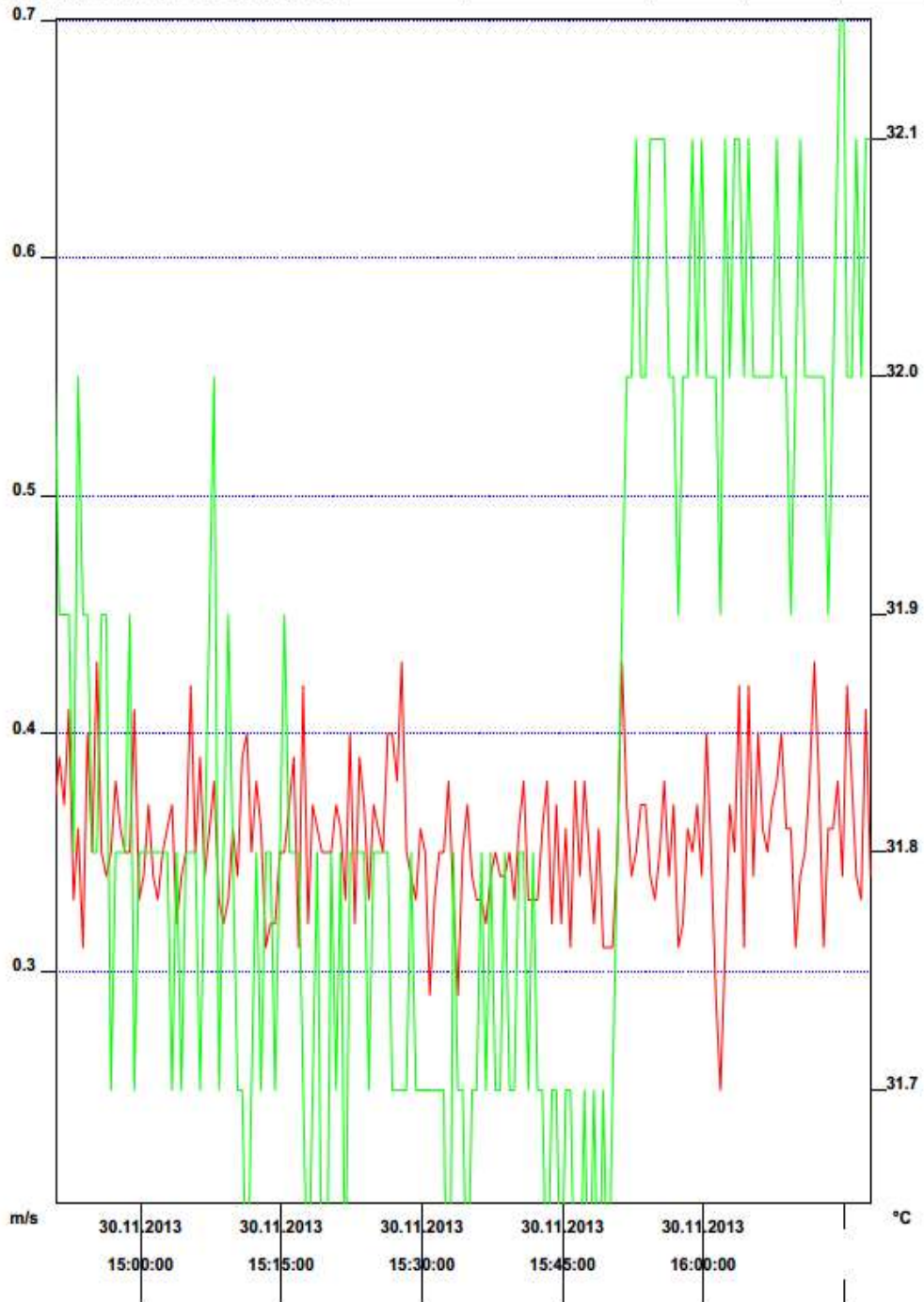
Сваки од инструмената је бележио податке у оригиналном извештају [12]. Извештаји мерења локалних параметара показују динамичку слику (сл.3.17, 3.18 и 3.19).

Comfort-Software V3	Device435-L4	Page 1/1	Min:	Max:	Mean:	
C:\Documents and			C:1 m/s	0.00	0.31	0.03
OŠ France Prešern- Energetska sertifikacija			C:2 °C	12.78	15.30	13.38
Sprovedeno: Dr. Stevanović Žarko, Nikola Mirkov,			C:3 %rH	37.00	58.83	41.76
Ivan Lazović, Stevanović Žana			C:4 hPa	-0.12	-0.12	-0.12
Hotwayer pozicija zatvoren prozor 30-11-2013						



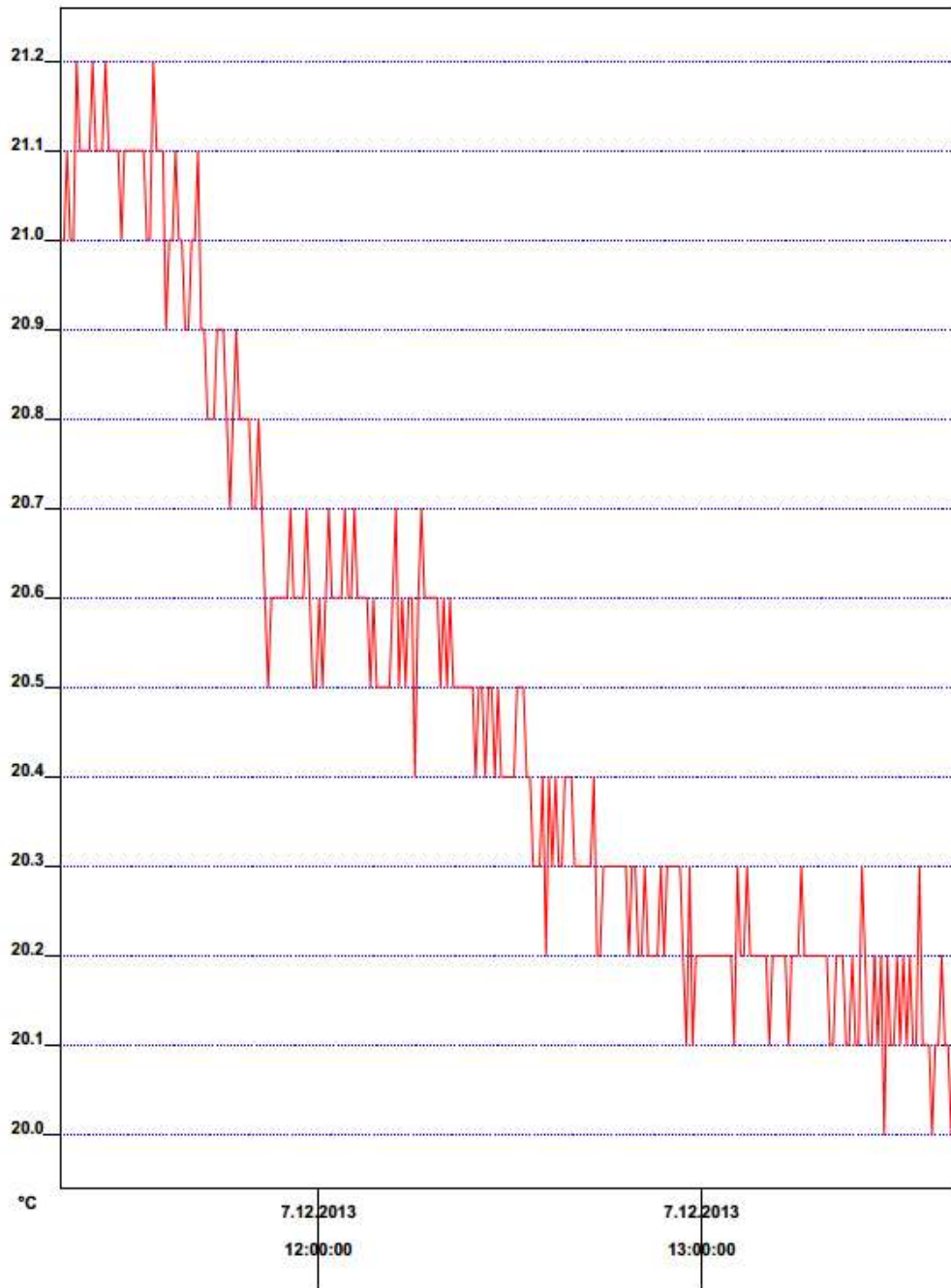
Слика 3.17 Динамичка слика струјања ваздуха у учионици спроведена под режимом затвореног прозора на инструменту TESTO-Hotwire anemometer

Comfort-Software V3	Device	Page 1/1	Min:	Max:	Mean:	
C:\Documents and			C:1 m/s	0.25	0.45	0.36
testo 445 Merenje sprovedeno 30.11.2013			C:2 °C	31.20	32.40	31.91
OŠ France Prešern-Energetski Pasoš						
Sprovedeno: Dr. Stevanović Žarko,						
Nikola Mirkov, Ivan Lazović, Stevanović Žana						
TURBULENCIJA POZ:1 ZATVOREN PROZOR						



Слика 3.18 Динамичка слика струјања ваздуха у учионици спроведена под режимом затвореног прозора на инструменту TESTO-сензор за мерење интензитета турбуленције

Comfort-Software V3	Device testo 445	Page 1/1		Min:	Max:	Mean:
C:\Documents and			C:1 °C	20.00	21.20	20.49
OS France Prešern						
Sprovedeno: Dr. Stevanović Žarko, Nikola Mirkov						
Ivan Lazović, Stevanović Žana						
KUGLA-OTVOREN PROZOR-POZICIJA:CENTAR						
7.12.2013						



Слика 3.19 Динамичка слика мерења радијантне температуре у учионици спроведена под режимом отвореног прозора на инструменту TESTO-Globe

За одређивање локалног PMV коришћена је инструментација (сл. 3.20) за мерење: радијантне температуре (TESTO-Globe [12]), температуре ваздуха у околини кугле (TESTO-IAQ-сензор за одређивање квалитета унутрашњег ваздуха [12]) и анемометар са врелом жицом који је мерио брзину струјања ваздуха у близини кугле (TESTO-Hotwire anemometer [12]).

Мерење и одређивање локацијског PMV , вршено је у 5 тачака (сл. 7.1) и то:

- доњи десни угао код катедре у учионици (близина прозора), позиција 1,
- горњи десни угао у учионици (близина радијатора), позиција 2,
- централни део у учионици, позиција 3,
- доњи леви угао у учионици (близина врата), позиција 4,
- горњи леви угао у учионици, позиција 5.



Слика 3.20 Мерење и одређивање локалног PMV

Када се прикупи одређена количина информација ради се прорачун који је дефинисан у стандарду SRPS EN 7730 [16].

Улазни физички подаци су:

- парцијални притисак водене паре у влажном ваздуху, p_a
- радијантна температура ваздуха, t_{ar}
- радијантна температура површине сензора црне кугле, t_r
- релативна брзина кретања ваздуха у правцу црне кугле, U_{ar} .

Парцијални притисак водене паре у влажном ваздуху p_a израчунава се преко психрометријских таблица, пре израчунавања парцијалног притиска сатурације, који су дати једначинама:

$$p_s = e^{\frac{16.6536 - (4030.183)}{t_{ar} + 235}} \quad (3.1)$$

где је:

p_s - притисак сатурације водене паре, Pa

$$p_a = 1000 \frac{RH}{100} p_s \quad (3.2)$$

где је:

p_a - парцијални притисак водене паре у влажном ваздуху, Pa

RH - релативна влажност ваздуха, %.

Температура ваздуха t_{ar} , представља ону температуру ваздуха коју сонда мери у непосредној близини површине црне кугле, Fanger (1985) [19].

Да би се обезбедили улазни подаци за екпериментално одређивање PMV и PPD , сва мерења су рађена у поставци црна кугла и сонда на растојању од 20 cm. Положај црне кугле и сонде је на 80 cm у односу на под учионице у било којој мерној тачки, симулирајући положај главе детета. Мерење црном куглом представља мерење седећег човека на датој локацији. У унутрашњости црне кугле налази се термопар који даје такозвану температуру црне кугле (t_g). На основу ове температуре, као и добијене температуре ваздуха и брзине струјања ваздуха непосредно у околини црне кугле, израчунава се радијантна температура. Ову методу је развио Madeson [20]. Релативна брзина кретања ваздуха око сензора црне кугле U_{ar} се добија директним мерењем сензором TESTO-Hot-wire anemometer [12].

2.8. АНКЕТИРАЊЕ ДЕЦЕ И АНАЛИЗА О СУБЈЕКТИВНОМ ОСЕЋАЈУ ТОПЛОТЕ НА ОСНОВУ ФАНГЕРОВЕ ТОПЛОТНЕ РАСПОДЕЛЕ

Општи индикатори су *PMV* и *PPD*. Метод који се користи развијен је од стране *Fanger-a* [21] (1972) и адаптиран је у стандарду SRPS EN 7730 [16]. Метод се заснива на одређивању индекса *PMV* (*Predicted Mean Vote*), који се израчунава из равнотежне термичке једначине стања за људско тело, укључујући услове унутрашње акумулације топлоте и топлотне размене са околном средином.

Пошто се ова метода првенствено заснива на успостављеној топлотној равнотежи људског тела, она је подложна модификацијама обзиром над којом популацијом људи се посматра. У овом случају посматрана популација су деца узраста 7 и 8 година. Оно што је карактеристично за овај узраст је да нема неке велике разлике између висине и тежине између дечака и девојчица [22].

За популацију деце у основној школи “Франце Прешерн”, у одељењу првог и другог разреда дошло се до података који су приказани у даљем тексту рада.

Истраживање које је вршено над овом популацијом је:

- анкетирање деце о субјективном осећају топлоте на основу Фангерове расподеле.

Циљ овакве анализе је да се покажу статистичке корелације између добијених субјективних података добијених анкетама и објективних података добијених мерењем.

Ученици су анкетирани, под условом да нису били болесни. Такође, узети су подаци о класификацији њихове активности током дана (трчање, седење, стрес), узимању хране пре анкетирања, као и о степену њихове обучености (јако обучени, средње обучени, минимално обучени) (слика 3.21).

**Упитник за одређивање топлотног комфора ученика
према Фангеровој расподели**

просечно годиште ученика: _____ датум: _____ време: _____

пол мушки: _____ пол женски: _____

позиција прозора: X отворен (1 2 3) _____ x затворен _____

укупан број ученика присутних: _____

активности пре анкетирања: _____ x јело _____ x трчање _____ x нема _____

одећа: _____ x слабо _____ x средње _____ x јако _____

гласање према Фангеровој топлотној расподели: _____



позиција ученика у учионици (шифра логера између ученика у истој клупи):

11 (174Н-4)	21	31 (174Н-13)	41	51 (174Н-3)	61
12 (174Н-9)	22	32 (174Н-11)	42	52 (174Н-17)	62
13 (174Н-20)	23	33 (174Н-21)	43	53 (174Н-15)	63
14 (174Н-8)	24	34 (174Н-1)	44	54 (174Н-19)	64
15 (174Н-10)	25	35 (174Н-2)	45	55 (174Н-7)	65

Слика 3.21 Анкета за одређивање субјективног осећаја топлоте у основној школи Франце Прешерн

Оно што је тражено у анкетирању је да се ученици изјасне о субјективном осећају топлоте у односу на позицију у учионици. Бележена је присутност, како укупна тако и позиција са које подаци нису били доступни због болести детета. Током анкетирања није забележена присутност испод 86%, тако да се у потпуности могао применити SRPS EN 7730 [16]. Такође, током анкетирања бележила се и отвореност прозора, према позицији (лево или десно од средине учионице, као и на средини учионице) као и положај отвореног прозора (широм отворен, полу-отворен, нагнут).

Осим болести, такође је вођено рачуна о топлотном прилагођавању сваког ученика, тако да анкетирање никад није спроведено током првог часа због услова аклиматизације, него увек средином четвртог часа, најмање један сат после конзумације ужине.

Тако су избегнути утицаји аклиматизације и услови повећања метаболизма услед конзумације хране, сходно Фангеровим истраживањима [23].

Анкетирање је спроведено у истом дану у јутарњој и поподневној смени ученика првог и другог разреда, у истој учионици. Од ученика је тражено да у датом тренутку гласају о субјективном стању топлоте које је било дефинисано на основу Фангерове топлотне расподеле (сл. 3.22).



Слика 3.22 Дефинисана Фангерова расподела коришћена у анкетирању ученика

Резултат анкетирања приказана су у табели 3.3.

Табела 3.3 Извештај о анкетирању ученика у односу на *PMV* који је дефинисан Фангеровом расподелом [21]

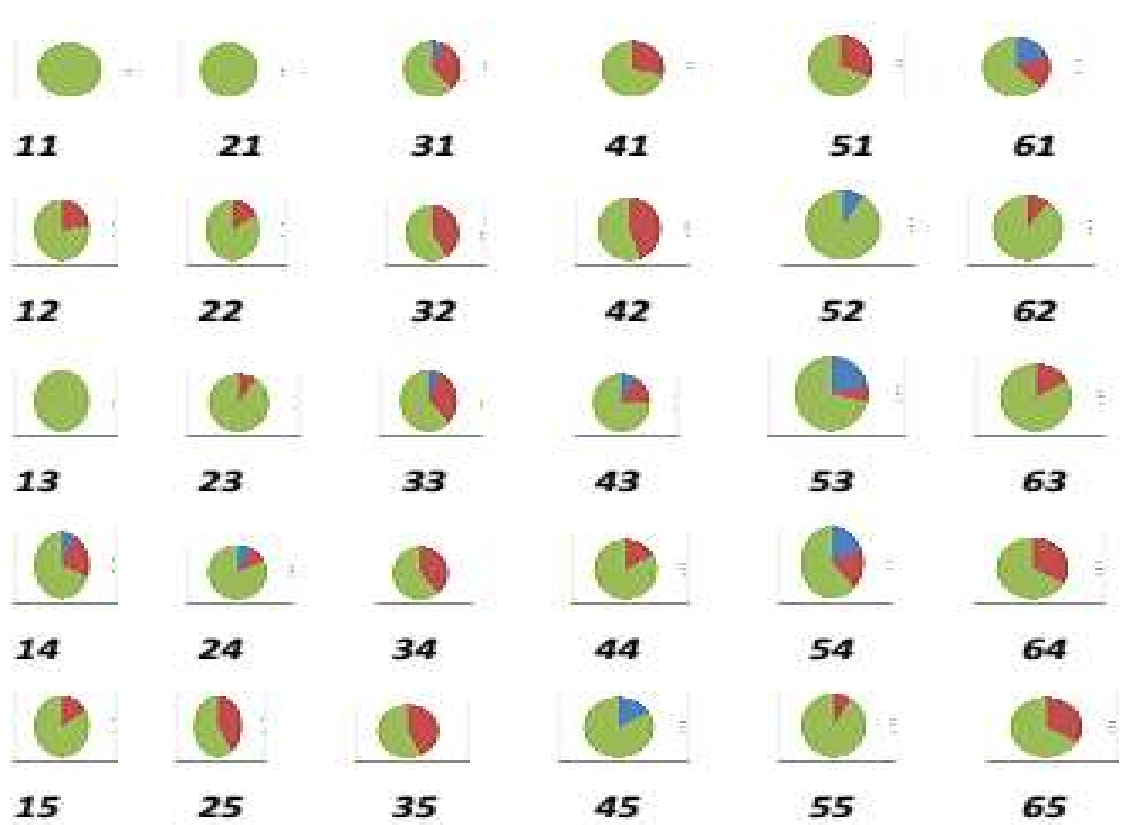
датум	време	<i>PMV</i> (анкетирани) -2,-1	<i>PMV</i> (анкетирани) 0	<i>PMV</i> (анкетирани) +1,+2	Укупан број анкетираних (%)
4.12.2013	9.00	3	20	7	100
	16.45	0	17	6	95
6.12.2013	9.00	1	24	5	100
	16.45	3	9	10	92
9.12.2013	9.00	3	11	10	100
	16.45	0	23	4	90
11.12.2013	9.00	2	10	12	95
	16.45	0	22	5	90
13.12.2013	9.00	4	13	7	100
	16.45	0	18	8	86

Након статистичке анализе гласања дошло се до резултата који су приказани у табели 3.4.

Табела 3.4 Статистичка обрада анкетирања популације првог и другог разреда у истој учионици

датум	време	<i>PPD</i> % (часовни)	<i>PPD</i> % (дневни)	<i>PPD</i> % (укупни)	Топлотно стање тела као целине (SRPS EN ISO 7730)	
					<i>PPD</i> %	<i>PMV</i>
4.12.2013	9.00	33	29.5			
	16.45	26				
6.12.2013	9.00	20	39.5			
	16.45	59				
9.12.2013	9.00	54	34.5			
	16.45	15				
11.12.2013	9.00	60	39.0	34.2	25 < <i>PPD</i> < 75	+1 < <i>PMV</i> < +2
	16.45	18				
13.12.2013	9.00	46	38.5			
	16.45	31				

Према стандарду SRPS EN 7730 [16] дефинисана је и корелација између укупног *PMV* и *PPD* која у овом случају одговара распону од $+1 < PMV < +2$. Може се закључити да је статистичка анализа показала да нема великог одступања *PPD* у укупној процени и на дневном нивоу. Једино одступање бележи се у 20 % случаја у часовној *PPD* анализи (<25%), која у том случају бележи $-0.5 < PMV < +0.5$. Статистичком анализом дефинисан је укупан индикатор топлотног незадовољства од 34.2 %, који је узрокован првенствено повећаном температуром, на коју се жалило 79% популације анкетираних ученика. На основу дате анкете могуће је одредити и однос *PPD-PMV* на локалном нивоу (слика 3.23).



Просек гласања анкетираних ученика у 10 анкета на тачно одређеним позицијама у учионици од позиције 11 до позиције 65

(позиција 11 ученик који седи у првом реду до прозора, а 65 позиција ученика у петом реду до зида)

- Ученик је гласао према Фангеровој топлотној расподели – “неутрално “0”
- Ученик је гласао према Фангеровој топлотној расподели – “топло “1”
- Ученик је гласао према Фангеровој топлотној расподели – “хладно “-1”

Слика 3.23 Одређивање просека локацијских параметра *PPD-PMV* на основу субјективног осећаја топлоте узраста 8 година на популацији од 54 ученика

Табела 3.5 Локацијски анкетирани *PMV* на свим позицијама

Бр.позиције	БРОЈ АНКЕТЕ									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	X	0	-1	1	0	1	0	1	0
15	0	X	1	X	X	0	X	0	X	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
23	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1	0		0	0	-1	0
25	0	X	1	X	X	0	X	X	X	
31	0	0	0	-1	1	1	1	1	1	0
32	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1
33	-1	0	1	0	1	0	1	1	1	0
34	1	X	0	1	1	0	1	X	0	1
35	1	X	1	X	X	1	X	0	X	
41	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
42	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
43	0	0	0	1	0	0	1	X	-1	0
44	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
45	-1	0	0	X	X	0	X	0	X	
51	0	0	0	1	1		1	0	1	0
52	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	-1	0	-1	1	-1	0
54	0	0	0	1	-1	1	-1	0	-1	1
55	0	X	0	X	X	0	X	0	0	1
61	-1	1	-1	0	-1	0	1	1	0	0
62	0	1	0	X	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
64	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1
65	0		1					0		

Места у табели 3.5, означена са X, изузимају децу која нису била присутна те самим тим нису могла бити анкетирани. На основу статистичке анализе табеле 3.5 добијају се средње вредности анкетираниог индикатора термалног комфора *PMV*, а на основу њега се прерачунава индикатор топлотног незадовољства *PPD* (%) (табела 3.6).

Табела 3.6 Средња и укупна вредност индикатора топлотног комфора PMV и PPD (%).

Бр.позиције	Средња вредност- <i>PMV</i>	<i>PPD (%)</i>
11	0,00	5,000
12	0,30	6,870
13	0,00	5,000
14	0,22	6,024
15	0,25	6,297
21	0,00	5,000
22	0,20	5,829
23	0,00	5,000
24	0,00	5,000
25	0,33	7,311
31	0,40	8,334
32	0,70	15,305
33	0,40	8,334
34	0,63	13,197
35	0,75	16,846
41	0,80	18,493
42	0,80	18,493
43	0,10	5,207
44	0,20	5,829
45	-0,20	5,829
51	0,40	8,334
52	-0,10	5,207
53	-0,20	5,829
54	0,00	5,000
55	0,17	5,576
61	0,00	5,000
62	0,11	5,256
63	0,20	5,829
64	0,50	10,225
65	0,33	7,311
укупно	0,24	7,892

На основу 10 анкетирања ученика првог и другог разреда (у обе смене) ОШ “Франце Прешерн” у периоду од 4.12.2013. до 13.12.2013. године добијен је средњи анкетирани индикатор топлотног комфора PMV који износи 0.24, а према Фангеровој расподели анкетирани индикатор топлотног незадовољства износи 7.892 %. Топлотна угодност простора се дели у три категорије: А, Б и Ц. Свака категорија је дефинисана у опсегу PMV вредности. Тако је категорија А дефинисана у опсегу од - 0.2 до + 0.2, категорија Б у опсегу од - 0.5 до 0.5, категорија Ц у опсегу - 0.7 до 0.7.

Према Фангеровој категоризацији топлотног комфора, анкетирани ученици су категорисали учионицу у категорију Б.

ГЛАВА 4

4.1. АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ПОДАТАКА

4.1.1 АНАЛИЗА ДУГОРОЧНОГ МЕРЕЊА ТЕМПЕРАТУРЕ ВАЗДУХА У УЧИОНИЦИ И СПОЉНЕ ТЕМПЕРАТУРЕ

У оквиру извештаја логера забележене су максимане и минималне температуре, у току грејне сезоне 2013. године. Пошто је уграђен даљински систем грејања у школи он је под контролом ЈР Београдске топлане које имају регулацију грејања од 6 до 22h (табела 4.1) под условом да спољашња температура није у минусу, у супротном нема обуставе грејања, грејање се спроводи 24h.

Табела 4.1 Измерене температуре ваздуха и релативне влажности у учионици

Ознака логера	Просечна релативна влажност (%)	Просечна температура у периоду од 6-22h (°C)
Testo-174H-1	36,699	13,380
Testo-174H-2	36,739	14,870
Testo-174H-3	37,865	18,905
Testo-174H-4	39,214	20,796
Testo-174H-7	35,999	22,940
Testo-174H-8	35,837	13,380
Testo-174H-9	37,146	14,870
Testo-174H-10	35,47	18,905
Testo-174H-11	37,623	20,796
Testo-174H-13	38,435	22,940
Testo-174H-15	36,643	16,470
Testo-174H-17	36,755	16,360
Testo-174H-19	36,293	19,143
Testo-174H-20	35,119	21,057
Testo-174H-21	37,099	21,925

У оквиру анализе оперативне температуре спољне и унутрашње измерене температуре према SR EN 15251 [18] дате су у табели 4.2 за читав грејни период од 24h.

Табела 4.2 Границе оперативне температуре према измереној спољној јединици према SR EN 15251

Категорија	Горњи лимит оперативне тем. (°C)	Доњи лимит оперативне температуре (°C)
А	21,99	17,99
Б	22,99	16,99
Ц	23,99	15,99

На основу измерене температуре ваздуха у учионици и очекиване оперативне температуре према SRPS EN 15251 могуће је дати категоризацију *PMV* што је дато у табели 4.3.

Табела 4.3 Категоризација *PMV* на основу оперативне температуре према SRPS EN 15251

Макс. темп. (°C)	Горњи лимит оперативне тем. (°C)	Мин. темп. (°C)	Доњи лимит оперативне тем. (°C)	Кат.	Вредност <i>PMV</i>
23,653	23,994	14,806	15,994	Ц	-0.7 < <i>PMV</i> < 0.7

На основу категоризације *PMV* према SR EN 15251 на основу оперативне температуре утврђена је категорија Ц, којој припада вредност $-0.7 < PMV < +0.7$.

Како би се стекла комплетна термална слика, урађена је и додатна статистичка анализа времена трајања у којима долази до грејања учионице, као и до хлађења.

За обученост деце просечно је усвојено *Iclo*, па се анализа *PMV* за дугорочно мерење температуре ваздуха у односу на грејна тела која су инсталирана у учионици добија на основу стандарда SRPS EN 15251 (табела 4.4).

Табела 4.4 Анализа категорије *PMV* у односу на температуру грејања ваздуха према SRPS EN 15251

Температура ваздуха °C	Процент учесталости (%)	Процент за категорију А Температура грејања ваздуха (21,0 – 23,0) °C	Процент за категорију Б Температура грејања ваздуха (20,0 – 24,0) °C	Процент за категорију Ц Температура грејања ваздуха (19,0 – 25,0) °C
< 16	0,259	28,14 %	75,93%	93,09%
< 17	0,505			
< 18	2,070			
< 19	17,16			
< 20	47,79			
< 21	21,672			
< 22	5,934			
< 23	0,534			

На основу дате анализе може се закључити да је PMV на основу дугорочног мерења температуре ваздуха у учионици за оперативну температуру категорије Ц, у просеку од **93,09%**. То практично значи да је категорија Ц заступљена **1074 часова**, категорија Б-876 часова и категорија А-325 часова. PMV за категорију Ц која је највише заступљена износи: $0,7 < |PMV|$.

Такође, извршена је и категоризација на основу релативне влажности ваздуха у учионици, према SRPS EN 15251 (табела 4.5).

Табела 4.5 Анализа категорије PMV у односу на релативну влажност ваздуха према SRPS EN 15251

Просечна релативна влажност ваздуха у учионици (%)	Категорија А
37,862	>30

На основу табеле 4.5 може се закључити да је релативна влажност ваздуха у границама категорије А, обзиром да је школски објекат у питању.

4.1.2 АНАЛИЗА КВАЛИТЕТА ВАЗДУХА И БРОЈА ИЗМЕНА ВАЗДУХА У УЧИОНИЦИ

Број измена ваздуха на час се рачуна према обрасцу:

$$n = \frac{\ln CO_2(\tau_1) - \ln CO_2(\tau_2)}{\tau_2 - \tau_1} \quad (4.1)$$

где су τ_1 и τ_2 два узастопна временска интервала где је одређена концентрација CO_2 .

Током мерења сви прозори и врата у учионици су били затворени. Из боце је испуштан угљен-диоксид. Измерене вредности концентрације CO_2 током периода стабилизације гаса у учионици су одбачене.

Анализа инфилтрације врши се према стандарду SRPS EN 15251 [18]. Пошто је одређен број измена, може се категорисати квалитет унутрашњег ваздуха (табела 4.6).

Табела 4.6 Анализа инфилтрације врши се према стандарду SRPS EN 15251

Број измена ваздуха (h^{-1})	Укупан проток ваздуха у учионици (l/s)	Проток ваздуха према броју ученика у учионици (l/s по особи)	Проток ваздуха по површини учионице (l/s по m^2)
0,47	7,6572	0,255	0,1367

Према стандарду SRPS EN 15251 потребно је одредити за измерену вредност протока ваздуха у учионици две категорије вентилације, а то су:

- категорија вентилације према популацији,
- категорија вентилације по квадратури учионице.

Категоризација вентилације према броју ученика у две смене, при чему је у првој смени 30 ученика а у другој 24 приказана је у табели 4.7.

Табела 4.7 Категоризација вентилације према броју ученика

Проток ваздуха према броју ученика у учионици (<i>l/s по особи</i>)	Кат. вентилације према популацији ученика (<i>l/s по особи</i>)	Кат.	Категорија квалитета ваздуха
0.255	0.35 - 0.2	2	Низак ниво контаминације
0.319			

Категоризација вентилације по јединици површине учионице, површине $56m^2$ је приказана у табели 4.8.

Табела 4.8 Категоризација вентилације по површини учионице

Укупан проток ваздуха у учионици (<i>l/s</i>)	Проток ваздуха по површини учионице (<i>l/s по m²</i>)	Кат.	Категорија квалитета ваздуха
7,6572	0,1367	1	Нема контаминације

Од ове две категоризације, бира се неповољнија, у овом случају то је категорија 2. Ова категорија дефинише квалитет ваздуха који у овом случају бележи низак ниво контаминације ваздуха. Према категоризацији *PPD* у овом случају за категорију 2 је 20% незадовољних, што одговара вредности $-0.75 < PMV < +0.75$.

4.2 АНАЛИЗА ОПШТИХ ИНДИКАТОРА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА

Радијантна температура представља униформну температуру сфере која представља радијациони пренос топлоте на тело човека у тачки простора. Радијациона температура се израчунава преко једначине (4.2) и представља топлотни флуks који се размени конвекцијом и топлотни флуks који се размени радијацијом између кугле и ваздуха SRPS EN 7726 [17]:

$$\varepsilon \sigma (T_r^4 - T_g^4) + h_{cg} (T_a - T_g) = 0 \quad (4.2)$$

где је:

- σ - Стефан – Болцманова константа, Wm^2/K^4
- ε - коефицијент емисивности црне кугле,
- T_a - температура ваздуха, K

T_g - температура црне кугле, K

h_{cg} - коефицијент прелаза топлоте црне кугле, W/m^2K

Коефицијент прелаза топлоте h_{cg} у случају природне конвекције се израчунава према једначини (SRPS EN 7726):

$$h_{cg} = 1.4 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} \quad (4.3)$$

где је:

ΔT - разлика температура ваздуха и црне кугле, K

D - пречник црне кугле, m

Радијантна температура (за Testo Globe је $D = 0.15m$ и $\varepsilon = 0.95$) се израчунава преко једначине:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2.4 \cdot 10^8 U_a^{0.6} (t_g - t_a) \right]^{0.4} - 273 \quad (4.4)$$

Оперативна температура представља униформну температуру која би се добила механизмима зрачења и конвекције у једној тачки. Под анализом која је дефинисана у стандарду SRPS EN 7730 [16], подразумева се и анализа оперативне температуре за сваку посматрану тачку. Оперативна температура израчунава се преко једначине:

$$t_{op} = \frac{t_r + t_a \sqrt{10 \cdot U_a}}{1 + \sqrt{10 \cdot U_a}} \quad (4.5)$$

где је U_a брзина струјања ваздуха око црне кугле.

Релативна брзина струјања ваздуха око тела се мора кориговати у зависности од активности популације ученика. У том смислу се посматра ниво активности и метаболизма, јер активност и метаболизам утичу на дисање које директно утиче на релативну брзину струјања ваздуха око тела. Зато се прво и мери брзина ваздуха у одређеним тачкама учионице, без популације, а онда се те вредности коригују фактором $0.3(M_a - 1)$ где је M_a базални метаболизам ученика [24].

Одећа смањује оперативну температуру просторије. За посматрану популацију просечни коефицијент изолације одеће износи $1,01 clo$. Површина покривености тела одећом у грејном периоду износи 80% .

У табели 4.9 дати су резултати мерења релативне брзине ваздуха у близини црне кугле сензором TESTO-Hotwire, без популације ученика, као и са популацијом ученика у седећем положају $Ma = 1.12 Met$ и $1.01 clo$.

Табела 4.9 Анализа средње брзине ваздуха и средње релативне брзине ваздуха

Поз.	Максимална средња брзина ваздуха (m/s)	Максимална средња релативна брзина ваздуха (при $Ma=1,12$ Met и $1,01$ clo) (m/s)
11	0,283	0,294
12	0,331	0,343
13	0,260	0,270
14	0,251	0,260
15	0,255	0,265
21	0,261	0,271
22	0,336	0,349
23	0,305	0,317
24	0,316	0,328
25	0,173	0,180
31	0,329	0,341
32	0,351	0,364
33	0,304	0,315
34	0,242	0,251
35	0,164	0,170
41	0,238	0,247
42	0,304	0,315
43	0,338	0,351
44	0,306	0,318
45	0,186	0,193
51	0,352	0,365
52	0,348	0,361
53	0,298	0,309
54	0,295	0,306
55	0,224	0,232
61	0,244	0,253
62	0,251	0,260
63	0,304	0,315
64	0,285	0,296
65	0,199	0,206

На основу одређене релативне брзине опструјавања тела ученика, просечне релативне влажности која износи 37% и на основу осталих података, израчунате су локацијске вредности индикатора топлотног комфора за сваку позицију ученика: оперативна температура, *PMV* и *PPD* и дате су у табели 4.10.

Табела 4.10 Оперативна температура за сваку позицију ученика.

Бр	Темп. ваздуха t_a (°C)	Температура црне кугле t_g (°C)	Максимална брз. ваздуха U_a (m/s)	Радијантна температура t_r (°C)	Оперативна температура t_{op} (°C)	PMV	PPD
11	19,698	21,170	0,294	22,899	20,978	-0,53	10,91
12	20,406	20,830	0,343	21,379	20,795	-0,60	12,49
13	20,122	20,925	0,270	21,816	20,800	-0,53	10,91
14	20,945	20,925	0,260	20,903	20,928	-0,47	9,70
15	21,027	21,020	0,265	21,012	21,021	-0,46	9,37
21	19,698	21,170	0,271	22,794	20,936	-0,51	10,48
22	20,406	20,830	0,349	21,387	20,798	-0,60	12,61
23	20,122	20,925	0,317	21,918	20,840	-0,57	11,90
24	20,945	20,925	0,328	20,900	20,927	-0,54	11,04
25	21,027	21,020	0,180	21,014	21,021	-0,36	7,63
31	19,830	20,413	0,341	21,171	20,366	-0,71	15,51
32	20,246	20,490	0,364	20,816	20,474	-0,69	14,95
33	20,471	20,755	0,315	21,103	20,724	-0,58	12,17
34	20,576	20,755	0,251	20,948	20,725	-0,52	10,58
35	20,629	21,020	0,170	21,348	20,989	-0,36	7,75
41	19,830	20,413	0,247	21,032	20,311	-0,62	12,97
42	20,246	20,490	0,315	20,790	20,464	-0,65	13,79
43	20,471	20,755	0,351	21,129	20,734	-0,61	12,92
44	20,576	20,755	0,318	20,978	20,737	-0,58	12,08
45	20,629	21,020	0,193	21,376	21,003	-0,40	8,27
51	20,009	19,580	0,365	18,998	19,605	-0,87	21,12
52	20,293	20,035	0,361	19,687	20,051	-0,77	17,45
53	20,591	20,528	0,309	20,451	20,535	-0,61	12,93
54	20,662	20,528	0,306	20,366	20,544	-0,61	12,76
55	20,573	21,020	0,232	21,476	20,934	-0,45	9,18
61	20,009	19,580	0,253	19,110	19,649	-0,76	17,29
62	20,293	20,035	0,260	19,749	20,075	-0,67	14,53
63	20,591	20,528	0,315	20,451	20,535	-0,62	13,07
64	20,662	20,528	0,296	20,368	20,544	-0,60	12,52
65	20,573	21,020	0,206	21,444	20,921	-0,42	8,61

Добијене вредности опитних индикатора топлотног комфора у табели 4.10 на бази експерименталних резултата су основа за валидацију резултата нумеричког експеримента и коначних закључака дате дисертације.

ГЛАВА 5

5.1. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ ПРИРОДНЕ КОНВЕКЦИЈЕ У ЗАТВОРЕНОМ ПРОСТОРУ

У овој глави, детаљно је приказан и образложен математички модел природне конвекције у затвореном простору. Користећи основне законе одржања материје, количине кретања и енергије, као и додатне алгебарске релације, дефинисан је математички модел у диференцијалном облику. Посебно су истакнуте математичке формулације два основна доприноса докторске дисертације:

- Модификација стандардног k - ε модела турбуленције за класе струјања природне конвекције укључивањем узгонских ефеката (buoyancy effects);
- Нови модел преноса топлоте зрачењем укључивањем доприноса нетранспарентног медијума, у овом случају контаминираног ваздуха троатомним гасовима (угљен-диоксид и водена пара).

Математички модел је генерализован општом диференцијалном једначином одржања материје, количине кретања и енергије, и заокружен дефинисањем граничних услова.

5.1.1. ПРЕТПОСТАВКЕ МОДЕЛА

За дефинисање математичког модела неопходно је увести одговарајуће физичке претпоставке за класу струјања природне конвекције у затвореном простору. Основне физичке претпоставке су следеће:

1. **Струјање је стационарно.** Ова претпоставка је оправдана с обзиром на веома мале временске промене физичких параметара стања ваздуха у учioniци, односно локалне промене параметара су занемарене. У математичком смислу, ова претпоставка имплицира да су сви изводи физичких параметара по времену једнаки нули.
2. **Струјање је турбулентно.** Иако је ова класа струјања карактеристична са малим брзинама струјања, односно малим Re бројевима, турбулентни режим струјања је присутан због изражених флукуација запреминских сила, односно великих Ra бројева. У математичком смислу, ова чињеница је условила потребу модификације стандардног k - ε модела турбуленције увођењем додатних чланова у диференцијалним једначинама турбулентног модела.
3. **Присутна су сва три облика преноса топлоте: провођење, прелажење и зрачење.** Када је у питању провођење и прелажење топлоте, симултано се третирају ови облици преноса топлоте, како кроз основни медијум (ваздух), тако и кроз чврсто тело. Када је у питању пренос топлоте зрачењем, основни медијум (ваздух) се третира као нетранспарентна средина што имплицира потребу за одређивањем функционалне релације за одређивање ефективних коефицијената емисивности и

расипања ваздуха и присутне концентрације угљен-диоксида и водене паре. У математичком смислу, овај концепт преноса топлоте зрачењем захтева развој адекватног модела зрачења. У развоју модела зрачења усвојен је концепт моделирања преноса топлоте зрачењем применом технике градијентног приступа, односно топлотни флуks преноса топлоте зрачењем дефинисан је у форми градијента (еквиваленција са класичним приступом формулације преноса топлоте провођењем).

4. **Ваздух се сматра идеалним гасом.** Ова претпоставка омогућава једнозначност математичког модела (број релација једнак броју независно променљивих). У овом случају искоришћена је једначина стања за идеалан гас.

5.1.2. ОСНОВНЕ ЈЕДНАЧИНЕ ОДРЖАЊА МАТЕРИЈЕ, КОЛИЧИНЕ КРЕТАЊА И ЕНЕРГИЈЕ

Дефинисање и математичка формулација основних једначина одржања материје, количине кретања и енергије је опште позната у широкој литератури из области механике флуида и преноса топлоте. У строго математичкој формулацији ових једначина лежи строга формулација одржања поља у дефинисаној контролној запремини променљивих граница (Reynolds-ова транспортна теорема) [27].

Основне диференцијалне једначине одржања материје, количине кретања и енергије су изведене и приказане у локално-конзервативној форми индексном нотацијом [27], како следи:

- **Једначина одржања материје (једначина континуитета):**

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5.1)$$

- **Једначине одржања количине кретања (Navier-Stokes-ове једначине):**

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) - \left(\frac{1}{\rho} \right) (\rho - \rho_{ref}) g_i \quad (5.2)$$

- **Једначина одржања енергије:**

$$U_j \frac{\partial T_a}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu}{Pr} \frac{\partial T_a}{\partial x_i} - \overline{\theta u_i} \right) + S_{rad} \quad (5.3)$$

- **Једначина одржања скалара (концентрација угљен-диоксида)**

$$U_j \frac{\partial C_{CO2}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu}{Sc} \frac{\partial C_{CO2}}{\partial x_i} \right) \quad (5.4)$$

- **Једначина стања**

$$\frac{P}{\rho} = RT_a \quad (5.5)$$

У приказаном систему основних једначина одржања материје, количине кретања и енергије искоришћене су следеће ознаке:

U_i - вектор усредњене брзине струјања ваздуха ($i = 1, 2, 3$), m/s ;

P - усредњени притисак ваздуха, Pa ;

ρ - усредњена густина ваздуха, kg/m^3 ;

ρ_{ref} - референтна вредност усредњене густине ваздуха, kg/m^3 ;

ν - молекуларна кинематска вискозност ваздуха, m^2/s ;

g_i - вектор гравитације (0, 0, -9.81), m/s^2 ;

Pr - Prandtl-ов број, -;

Sc - Schmidt-ов број, -;

C_{CO_2} - усредњена запреминска концентрација угљен-диоксида, ppm_v ;

R - гасна константа за ваздух, J/kgK .

Систем једначина 5.1 – 5.5 није једнозначан јер се у једначинама појављују додатне променљиве:

$\overline{u_i u_j}$ - тензор турбулентних Reynolds-ових напона (симетричан тензор);

$\overline{\theta u_i}$ - вектор турбулентних топлотних флуксева;

S_{rad} - топлотни флукс преноса топлоте зрачењем.

Одређивању ових додатних променљивих посветиће се посебна пажња и њихова математичка формулација у наредна два поглавља дефинисањем турбулентног модела и модела преноса топлоте зрачењем.

5.2. МОДЕЛ ТУРБУЛЕНТНОГ СТРУЈАЊА

Модел турбулентног струјања базира на претпоставци хомогене и изотропне турбуленције. Применом градијентног концепта транспортних особина, тензор турбулентних Reynolds-ових напона и вектор турбулентних топлотних флуксева се може формулисати применом Boussinesq-ове формулације:

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.6)$$

$$\overline{\theta u_i} = - \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T_a}{\partial x_i} \quad (5.7)$$

где је:

k - кинетичка енергија турбуленције;

δ_{ij} - Кронекер-ов делта оператор:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{за } j = i \\ 0 & \text{за } j \neq i \end{cases} \quad (5.8)$$

ν_t - турбулентна кинематска вискозност;

σ_t - турбулентан Schimidt-ов број.

Увођење турбулентне кинематске вискозности (ν_t) омогућује затварање система једначина турбулентног струјања и дефинише врсту модела, при чему изрази за ν_t не представљају турбулентни модел. Почевши од константне вредности, па преко Prandtl-ове теорије о дужини мешања, уочене су одређене слабости за сложенија струјања, тако да Колмогоров (1942) [28] и Prandtl (1945) [29] предлажу да се уместо повезивања корелација флукутирајућих брзина са градијентима брзине усредњеног струјања, турбулентна кинематска вискозност изрази директно преко кинетичке енергије турбуленције и карактеристичне размере турбуленције (ℓ):

$$\nu_t = C_\mu \ell \sqrt{k} \quad (5.9)$$

тако да ν_t зависи само од турбулентних карактеристика струјања а не директно од карактеристика главног струјања.

Постојали су различити предлози за одређивање карактеристичне размере турбуленције (ℓ). Кључна претпоставка двоједначинских модела турбуленције је да се карактеристична размера турбуленције одреди из сопствене транспортне диференцијалне једначине.

Након различитих покушаја посредног одређивања овог параметра увођењем променљивих \sqrt{k} / ℓ - Колмогоров (1942)[28], $\varepsilon = k^{3/2} / \ell$ - Chou (1945)[30], Давидов (1961), Jones и Launder (1972), k / ℓ^2 - Spolding (1969), $k \ell$ - Rotta (1971), показало се да је брзина дисипације турбулентне кинетичке енергије (ε) најпогоднија променљива с обзиром на њен енергетски карактер и карактеристике турбулентних процеса који се одвијају на високим Re бројевима. Преко ње, лако се могу изразити карактеристична дужинска размера ($\ell = k^{3/2} / \varepsilon$) и карактеристична временска размера ($\tau = k / \varepsilon$) турбуленције, тако да се турбулентна кинематска вискозност одређује из израза:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.10)$$

где је C_μ емпиријска константа турбулентног модела.

Сопствене диференцијалне једначине за k и ε су моделске једначине и добијају се одговарајућом техником моделирања [27]. Другим речима, оне нису производ основних принципа одржања материје, количине кретања и енергије, те се у том смислу не могу називати основним једначинама. Иако имају исту математичку форму основних једначина, оне једноставно дефинишу транспортне феномене турбулентних карактеристика скалара k и ε , те је много прецизније назвати ове једначине транспортним.

Транспортне диференцијалне једначине за кинетичку енергију турбуленције (k) и њену брзину дисипације (ε) су познате јер је овај модел доживео велику популарност још од 70-тих година прошлог века. У огромној већини случајева користи се такозвани стандардни модел који не укључује ефекте флукутирајућих гравитационих сила који у разматраној класи струјања природне конвекције доминирају. Да би се овај модел турбуленције применио за разматрану класу струјања мора доживети одговарајуће модификације.

Прва модификација се односи на транспортну једначину за кинетичку енергију турбуленције. Наиме, десна страна ове транспортне једначине мора садржати, поред стандардног продукционог члана механичке турбуленције (P_k) и њене дисипације (ε), и продукциони члан кинетичке енергије турбуленције услед значајних флукуација гравитационих сила (G_k - такозвана термална продукција кинетичке енергије турбуленције). Допуњена транспортна једначина кинетичке енергије турбуленције има облик:

$$U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} = P_k + G_k - \varepsilon \quad (5.11)$$

где је:

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \quad (5.12)$$

$$G_k = \nu_t \beta g_i \frac{\partial T_a}{\partial x_i} \quad (5.13)$$

где је $\beta = 1/T_{ref}$ коефицијент експанзије ваздуха.

Такође, и транспортну једначину за брзину дисипације кинетичке енергије турбуленције треба допунити одговарајућим чланом на десној страни једначине. Допуњена транспортна једначина за брзину дисипације кинетичке енергије турбуленције има облик:

$$U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\} = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 3} G_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (5.14)$$

У изразу 5.10 и једначинама 5.11 и 5.14 уведене су емпиријске константе турбулентног модела. Након дугог низа година оне су се мењале, али су у задњој декади постале стандардне и имају следеће вредности:

$$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu = 1.0, 1.314, 1.44, 1.92, 0.09 \quad (5.15)$$

Основна особина ових емпиријских константи је да не зависе од односа смерова основног струјања и смера гравитационог вектора. Међутим, то се не може рећи за вредност емпиријског коефицијента $C_{\varepsilon 3}$ који зависи од смера вектора гравитације. У почетку развоја овог модела, предлагане су различите вредности за овај емпиријски коефицијент, од $C_{\varepsilon 3} = 0$, што у принципу занемарује допринос термалне продукције кинетичке енергије турбуленције у ε једначини, па до $C_{\varepsilon 3} = C_{\varepsilon 1}$ што доводи до чињенице да су продукције механичке и термалне дисипације кинетичке енергије турбуленције истог нивоа амплификације. Ниједан од ова два екстремна случаја нису давали добре резултате па се у последњој декади вредност овог коефицијента узима у интервалу $C_{\varepsilon 3} = 0 \div 1.0$.

Међутим, треба имати на уму карактеристике струјања у феноменима прородне конвекције у затвореном простору. Утицај узгонских ефеката различито профилише струјну слику, тако да не постоји велика униформност правца и смера струјања у односу на вектор гравитације.

Зато је за ову класу струјања уведена претпоставка да коефицијент $C_{\varepsilon 3}$ није константа већ променљива величина зависно од локалног односа доминирајућег правца и смера струјања и смера вектора гравитације.

За избор релације којом би се одређивала локална вредност коефицијента $C_{\varepsilon 3}$ може послужити анализа два екстремна случаја. Први је да је брзина струјања у правцу вектора гравитације занемарљиво мала у односу на брзину струјања у равни нормалној на вектор гравитације, што би одговарало вредности коефицијента $C_{\varepsilon 3} = 0$. Други екстремни случај је да је брзина струјања колинеарна са вектором гравитације доминантна, односно да је брзина у равни нормалној на вектор гравитације занемарљиво мала, што би одговарало вредности коефицијента $C_{\varepsilon 3} = 1.0$. Најчешћи случајеви струјања природне конвекције се налазе између ова два екстрема, па је неопходно увести одговарајућу релацију која ће узети у обзир ове ефекте.

Најприкладнији начин је реферисати се према односу аргумената компоненте брзине у правцу вектора гравитације, на пример у вертикалном правцу ($U_\square = U_3$) и аргумента

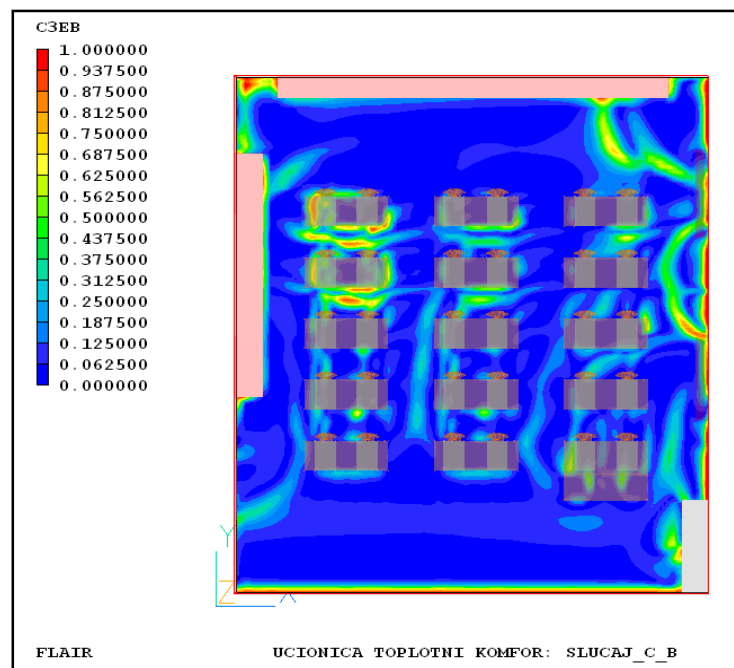
брзине у латералном правцу, на пример ($U_\perp = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$). Другим речима, однос ових брзина може бити од нула до плус бесконачно. Функција која даје вредности од нула до један за аргумент функције од нула до бесконачно је тангенс-хиперболична функција, тако да је предложени израз за променљиви коефицијент $C_{\varepsilon 3}$ дат следећом релацијом:

$$C_{\varepsilon 3} = \tanh\left(\frac{U_{\square}}{U_{\perp}}\right)$$

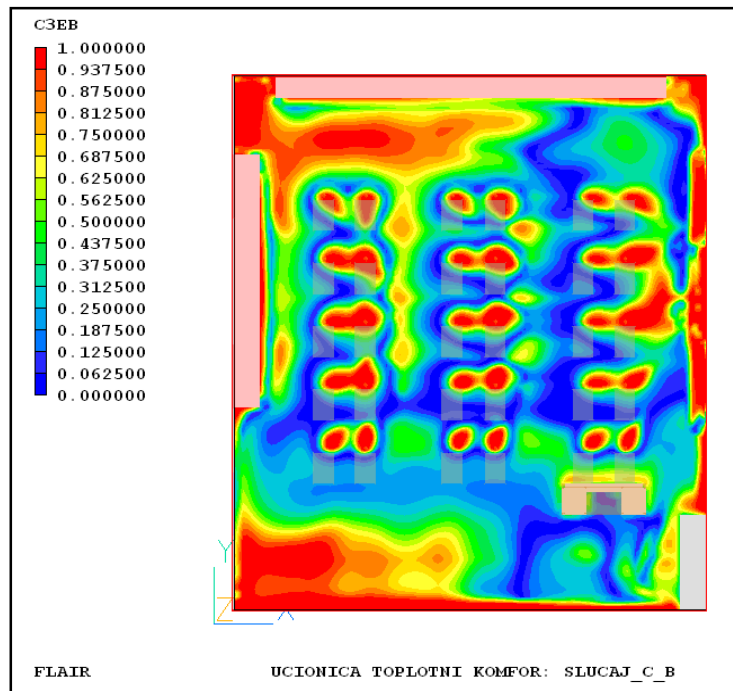
(5.16)

На овај начин формулисан је модификовани модел турбуленције за класе струјања природне конвекције, који у принципу може имати и генерални карактер за велику класу струјања како у затвореном простору, тако и за широки спектар струјања у атмосферском граничном слоју.

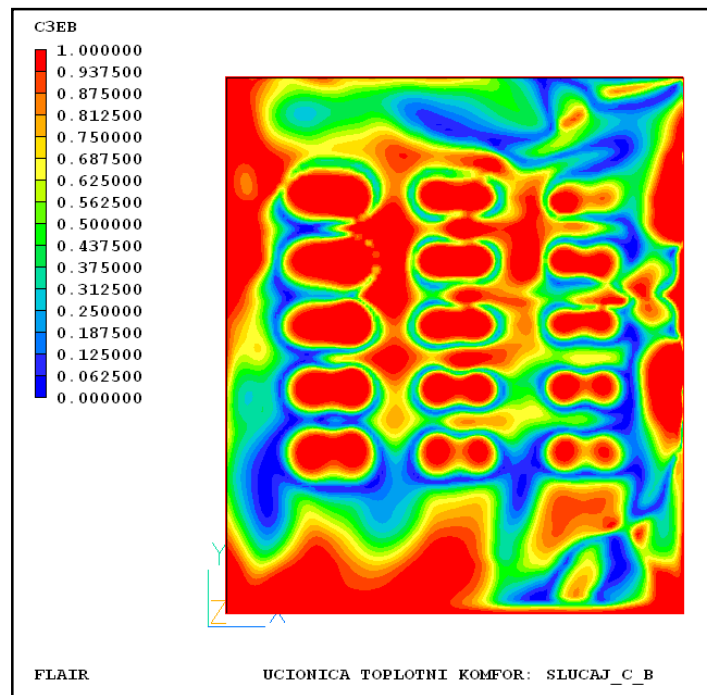
На сликама 5.1 до 5.3 приказане су вредности коефицијента $C_{\varepsilon 3}$ у хоризонталној равни на различитим висинама: 0.05, 0.8 и 2m, респективно, одакле се јасно може уочити променљивост овог коефицијента и оправданост увођења ове модификације. Јасно се може закључити да је вредност овог коефицијента близу пода приближно једнака нули, да би расла са висином, што у потпуности коинцидира са узгонским ефектима природне конвекције и топлотне стратификације у учионици.



Слика 5.1. Промена коефицијента $C_{\varepsilon 3}$ у хоризонталној равни на висини 0.05m



Слика 5.2. Промена коефицијента $C_{\epsilon 3}$ у хоризонталној равни на висини 0.8m



Слика 5.3. Промена коефицијента $C_{\epsilon 3}$ у хоризонталној равни на висини 2.0m

5.3. МОДЕЛ ПРЕНОСА ТОПЛОТЕ ЗРАЧЕЊЕМ

У досадашњој пракси дефинисања модела преноса топлоте зрачењем издвајају се три основна концепта: градијентни (аналогија са Fourier-овим законом провођења топлоте), који се у пракси често назива *radiosity model*; модел дискретних координата који је се у пракси често назива *six flux model*; и зонални модел које се у пракси често назива *view factor model*. Сваки од ових концепата има своје предности и недостатке, али је важно истаћи чињеницу да се модел треба прилагодити концепту нумеричког решавања система парцијалних диференцијалних једначина одржања материје, количине кретања и енергије, као и карактеристика домена интеграције.

У нумеричком смислу, зонални модел захтева дискретизацију простора интеграције на одговарајуће зоне које не коинцидирају са нумеричком дискретизацијом домена која се користи за решавање свих осталих променљивих тако да је овај концепт веома тешко применити у стандардној процедури нумеричког модела. Модел дискретних координата је пригодан за случајеве када унутар домена не постоје чврста тела већ је грубо речено чист. Градијентни модел има недостатак одређивања ефективног коефицијента радијације, али је у математичком и нумеричком смислу најприкладнији за третирање феномена преноса топлоте зрачењем у затвореном простору где постоје чврста тела, као што су у разматраном случају, школски намештај и ученици. За даљи развој модела преноса топлоте усвојен је градијентни концепт.

Ако са R означимо нето флукс зрачењем, односно суму свих флуксева топлотног зрачења који пролазе дату запремину независно од правца и таласне дужине, онда се он може изразити на следећи начин:

$$R = \sigma T_r^4 \quad (5.17)$$

где је:

σ - Stefan-Boltzmann-ова константа, ($= 5.670373 \times 10^{-8}$), $W / (m^2 K^4)$

T_r - радијантна температура, K

Уведена је потпуно нова физичка величина – радијантна температура која је последица само ефеката зрачења. Поставља се питање како одредити радијантну температуру. За одређивање ове температуре послужиће нам једначина 5.3 која се сада може прецизније написати у следећем облику:

$$U_j \frac{\partial T_a}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{v}{Pr} + \frac{v_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T_a}{\partial x_i} \right] + S_{air-rad} \quad (5.18)$$

где је са T_a означена температура ваздуха, како би се разликовала од радијантне температуре T_r . Имајући у виду усвојени градијентни концепт модела зрачења, радијантна температура се може одредити из своје сопствене диференцијалне једначине одржања изједначавањем леве стране претходне једначине са нулом јер конвективни допринос радијантне температуре не постоји:

$$0 = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{rad} \frac{\partial T_r}{\partial x_i} \right) + S_{rad-air} \quad (5.19)$$

где је λ_{rad} радијациони еквивалент коефицијенту провођења. Чланови $S_{air-rad}$ и $S_{rad-air}$ се одређују на следећи начин:

$$S_{rad} = S_{air-rad} = -S_{rad-air} = \varepsilon' \sigma (T_r^4 - T_a^4) \quad (5.20)$$

где је ε' коефицијент емисивности по јединици дужине ($1/m$).

Радијациони еквивалент коефицијенту провођења (λ_{rad}) се одређује као функција радијантне температуре (T_{rad}), коефицијента емисивности (ε') и коефицијента расипања (s') по јединици дужине и растојања између два суседна зида чврстог тела (X_{GAP}), на следећи начин:

$$\lambda_{rad} = \frac{4 \sigma T_r^3}{0.75 \left(\varepsilon' + s' + \frac{1}{X_{GAP}} \right)} \quad (5.21)$$

На зидовима чврстог тела, као и унутар чврстог тела, радијантна температура T_r је једнака температури чврстог материјала T_{solid} . Међутим, топлотни флуks зрачења на зидовима чврстог тела не зависи само од градијента T_r на зиду, већ и од саме емисивности чврстог тела.

Увођењем претпоставке да нето флуks зрачења не зависи од таласне дужине је доста груба претпоставка, али увођењем претпоставки о такозваном сивом медијуму овај недостатак се ублажује. То ће се показати на два екстремна случаја: ограничења за оптички танки и оптички дебели медијум, при чему се „танки” и „дебели” реферишу у односу на растојање између два зида које се може сматрати средњом дужином зрачења, једнакој реципрочной вредности збира ε' и s' . Ова два екстрема ће послужити да се одреди релација за сиви медијум.

Оба екстрема се могу наћи у пракси. На пример, у великим ложиштима термоенергетских постројења, честице и продукти сагоревања се могу сматрати оптички дебелим медијумом (нетранспарентним), док у затвореним просторима где нема продукције трoатомних гасова, медијум се може сматрати оптички танким (транспарентним).

За оптички дебео медијум, топлотни флуks зрачења се може изразити на следећи начин:

$$q_i = -\frac{4}{3} \frac{1}{\varepsilon' + s'} \sigma \frac{\partial (T_a^4)}{\partial x_i} \quad (5.22)$$

где је уместо T_r искоришћена температура медија T_a .

Ако се градијент температуре уместо на четврти степен реферише на први степен температуре, онда ефективни еквивалент провођења постаје:

$$\lambda_{eff} = \frac{16}{3} \frac{\sigma T_a^3}{(\varepsilon' + s')} \quad (5.23)$$

У случају другог екстрема, медијум је толико танак да се може сматрати потпуно транспарентним, тако да је флуks зрачења искључиво функција температура зидова, на пример топлог и хладног. Израз за флуks зрачења је у овом случају:

$$q = \left(1 + \frac{1 - \varepsilon_{topli}}{\varepsilon_{topli}} + \frac{1 - \varepsilon_{hladni}}{\varepsilon_{hladni}} \right) \sigma (T_{topli}^4 - T_{hladni}^4) \quad (5.24)$$

У поређењу са једначином 5.22 где је флуks зрачења изражен градијентом температуре, једначина 5.10 нема ту математичку форму. Да би се и ова једначина написала у градијентној форми, неопходно је учинити разлику $T_{topli} - T_{hladni}$ довољно малом. Стављањем да су коефицијенти емисивности површина зидова једнаки јединици, једначина 5.24 постаје:

$$q = 4\sigma T_a^3 (T_{topli} - T_{hladni}) \quad (5.25)$$

Како је температурски градијент између ова два зида једнак $(T_{topli} - T_{hladni}) / X_{GAP}$, где је X_{GAP} растојање између зидова, ефективни еквивалент провођења постаје:

$$\lambda_{eff} = 4 X_{GAP} \sigma T_a^3 \quad (5.26)$$

Израз 5.26 указује на чињеницу да се ефективни еквивалент провођења повећава са повећањем растојања између зидова, с обзиром да је нето флуks зрачења константан за константне температуре зидова.

Имајући изразе за ефективни еквивалент провођења 5.23 и 5.26 у екстремним случајевима, могуће је наћи израз за сиви медијум. Ако се размотре реципрочне вредности ефективних еквивалента провођења, односно топлотни отпор зрачења (Km/W):

$$\lambda_{eff}^{-1} = \frac{3}{16} \frac{(\varepsilon' + s')}{\sigma T_a^3} \quad (5.23a)$$

$$\lambda_{eff}^{-1} = \frac{1}{4 X_{GAP} \sigma T_a^3} \quad (5.26a)$$

могуће је да се за међу случај претпоставити да се чланови уз $4\sigma T_a^3$ требају сабрати и добити израз за сиви медијум:

$$\lambda_{eff}^{-1} = \frac{3}{4} \frac{\left(\varepsilon' + s' + \frac{1}{X_{GAP}} \right)}{4\sigma T_a^3} \quad (5.27)$$

Реципрочна вредност израза 5.27 даје већ написани израз 5.21 за радијантни еквивалент провођења топлоте, изражен преко температуре ваздуха уместо радијантне температуре.

Преостали део задатка дефинисања модела преноса топлоте зрачењем је одређивање коефицијента емисивности и расипања по јединици дужине. Коефицијент емисивности је познат за чврста тела и може се узети из литературе. Међутим, коефицијент емисивности и расипања за нетранспарентни медијум, у овом случају ваздух у учионици контаминиран угљен-диоксидом и воденом паром треба одредити. Угљен-диоксид и водена пара су троатомни гасови који чине да је контаминирани ваздух у учионици ипак нетранспарентна средина, поготово у последњој трећини школског часа када када просечна концентрација угљен-диоксида нарасте преко 2000 ppm_v. Релативна влажност ваздуха се може приближно сматрати константном, а концентрација приземног озона занемарљивом, тако да се може претпоставити да коефицијенти емисивности и расипања зависе само од концентрације угљен-диоксида. Претпостављена је линеарна зависност:

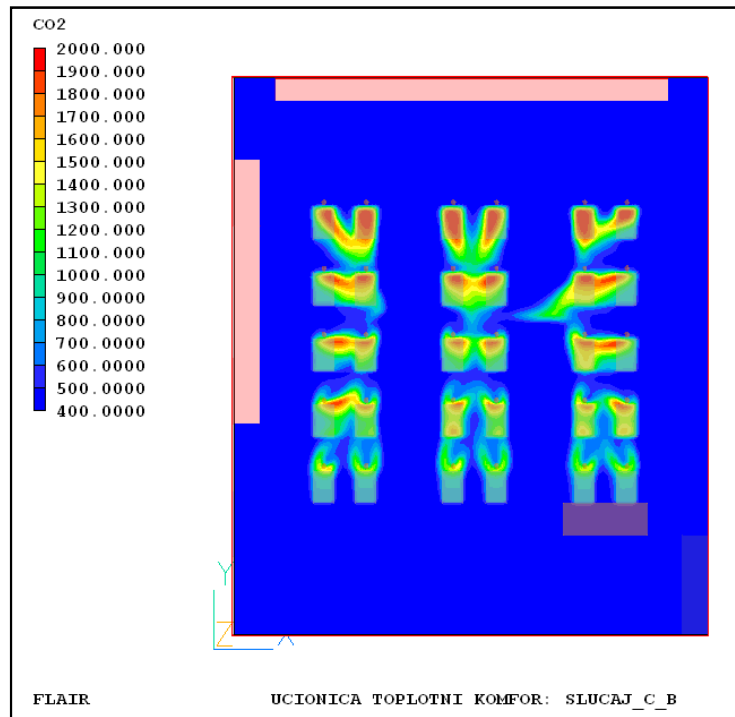
$$\begin{aligned} \varepsilon' &= A + B \square C_{CO_2} \\ s' &= 0.2 \square \varepsilon' \end{aligned} \quad (5.28)$$

Сprovedеним експериментима одређене су константе A и B :

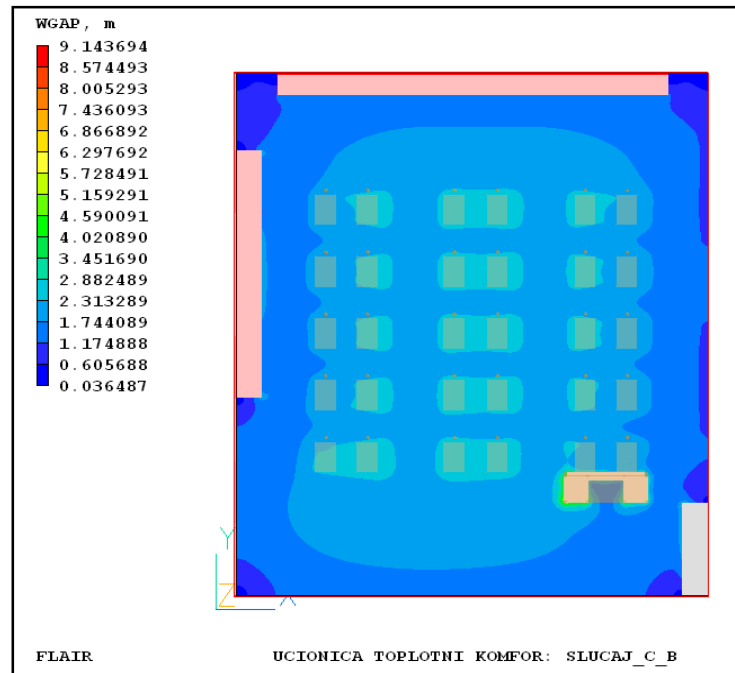
$$\begin{aligned} A &= 0.31 \\ B &= 1.852E - 4 \end{aligned} \quad (5.29)$$

Свакако треба истаћи да је приказани модел преноса топлоте зрачењем други оригинални допринос ове докторске дисертације. Иако је предлог оригиналан у смислу универзалности, ипак постоје ограничења да се изрази 5.28 и 5.29 морају одређивати за сваки случај засебно, као што су на пример ложишта котлова и пећи, или загађена урбана средина.

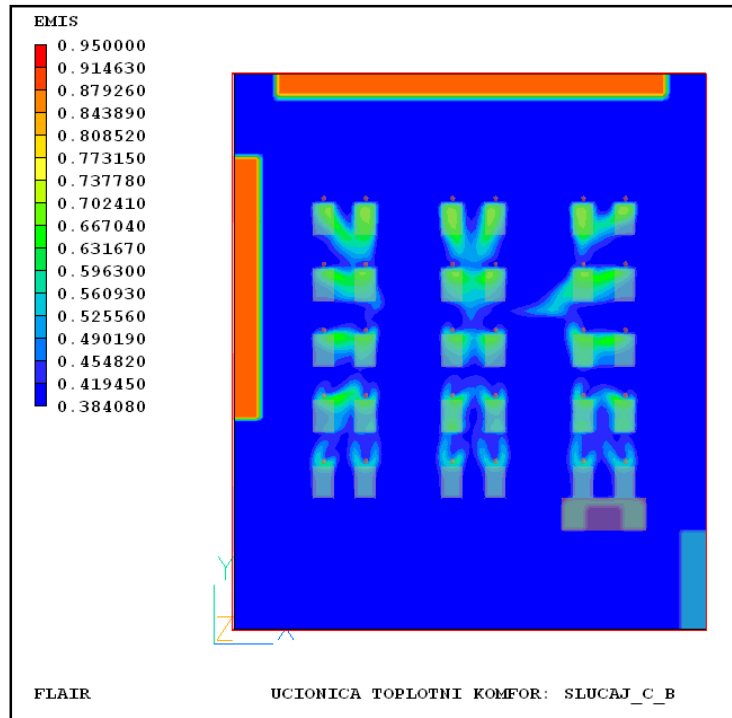
На сликама од 5.3 до 5.4 дате су расподеле величина CO₂ (ppm_v) $X_{GAP}(m)$ и $\varepsilon'(1/m)$ за ваздух у хоризонталној равни учионице на висини од 0.8m.



Слика 5.4. Промена концентрације CO₂ у хоризонталној равни на висини 0.8m



Слика 5.5. Промена растојања X_{GAP} у хоризонталној равни на висини 0.8m



Слика 5.5. Промена коефицијента емисивности ваздуха по јединици дужине у хоризонталној равни на висини 0.8m

5.4. СУМАРНИ МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ ПРИНУДНЕ КОНВЕКЦИЈЕ У ЗАТВОРЕНОМ ПРОСТОРУ

Увидом у основне диференцијалне једначине одржања материје, количине кретања и енергије (5.1 – 5.4), транспортних једначина модела турбуленције (5.11 и 5.14), као и модела преноса топлоте зрачењем (5.19), намеће се закључак да су форме ових диференцијалних једначина сличне и да припадају класи парцијалних диференцијалних једначина другог реда елиптичког типа. Ова чињеница даје за право да се може извршити генерализација ових диференцијалних једначина једном општом диференцијалном једначином. Како се написани систем парцијалних диференцијалних једначина решава нумеричким путем, ова генерализација умногоме олакшава процедуру дискретизације и прелазак на диферентни (алгебарски) еквивалент опште једначине која се даље решава у нумеричком поступку одговарајућом методом. Општа диференцијална једначина има облик [35]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (U_j \Phi) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) = S_{\Phi} \quad (5.30)$$

где је:

Φ - општа зависно променљива физичка величина поља ($I, U_i, T_a, C_{CO_2}, k, \varepsilon, T_r$);

Γ_Φ - општи коефицијент дифузије, зависно од променљиве Φ ;

S_Φ - општи изворни члан зависно променљиве Φ ;

U_i - вектор брзине струјања флуида;

τ - време;

x_i - координате у правоуглом координатном систему.

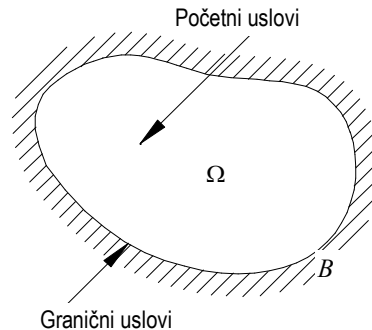
Очигледно да се за услове стационарног струјања, ова једначина редукује јер је локална промена променљиве Φ једнака нули, односно први члан са леве стране једначине постаје нула. Уобичајена је пракса да се општа форма диференцијалне једначине даје и у форми табеларног приказа (табела 5.1):

Табела 5.1. Сумарни математички диференцијални модел.

ЈЕДНАЧИНА:	Φ	Γ_Φ	S_Φ
Континуитет	I	0	0
Количина кретања	U_i	$\nu + \nu_t$	$-(I/\rho) \left[\partial P / \partial x_j + (\rho - \rho_{ref}) g_i \right]$
Енергија	T_a	$\nu / Pr + \nu_t / Pr_t$	$\varepsilon' \sigma (T_r^4 - T_a^4)$
Концентрација CO ₂	C_{CO_2}	ν / Sc	0
Кинетичка енергија турбуленције	k	$\nu + \nu_t / \sigma_k$	$P_k + G_k - \varepsilon$
Брзина дисипације кин. енергије турбуленције	ε	$\nu + \nu_t / \sigma_\varepsilon$	$(\varepsilon/k)(C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 3} G_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon)$
Радијантна температура	T_r	λ_{rad}	$-\varepsilon' \sigma (T_r^4 - T_a^4)$

5.5. ГРАНИЧНИ УСЛОВИ

Општа парцијална диференцијална једначина (5.30) има бесконачно решења по зависно променљивој Φ . Овај став формално важи за било који начин решавања једначине, директним интегралњем (ако је то могуће) или нумеричким решавањем. Да би се добило јединствено решење, потребно је увести додатне услове, који зависно од проблема који се решава, одређују једнозначно решење. Додатни услови називају се почетни и гранични услови.



Слика 5.7. Прорачунски домен интеграције

На слици 5.7 приказан је домен прорачуна, означен са Ω , у коме се траже решења зависно променљиве Φ . Домен је од околине издвојен затвореном граничном линијом (у општем случају површином), означеном са B . Почетни услови домена Ω се дефинишу за почетни тренутак $\tau = 0$, док се гранични услови дефинишу на граници B за све временске тренутке.

Ако Ω представља домен где се тражи решење зависно променљиве Φ , онда се почетни услови у тренутку $\tau = \tau_0 = 0$ морају задати за све променљиве Φ које описују посматрани нестационарни проблем. То су обично саме вредности променљиве Φ и/или комбинација са изводима ове променљиве по времену Φ_0' , Φ_0'' . Према томе, почетне услове је потребно задавати у случају решавања нестационарних проблема. У случају стационарног струјања, почетне услове није потребно задавати, што је случај разматрања у овој докторској дисертацији.

Гранични услови се обично класифицирају у три групе, а представљени су изразима (5.31-5.33). Индекс "B" је употребљен како би се посебно нагласило да се ови услови задају на границама прорачунског домена (*boundary*).

1. Позната вредност променљиве Φ на граници (*Dirichlet-ов услов*):

$$\Phi = \Phi_B \tag{5.31}$$

2. Познат извод променљиве Φ по координатној оси нормалној на граничну површ (*von Neumann-ов услов*):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)_B \quad (5.32)$$

3. Позната линеарна комбинација претходна два услова (*мешовит услов*):

$$C_1 \Phi + C_2 \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \left(C_1 \Phi + C_2 \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)_B \quad (5.33)$$

На основу претходног, може се закључити да је проблем потпуно математички формулисан ако су остварени следећи услови:

- Систем парцијалних диференцијалних једначина, чији је репрезент једначина (5.30) са задатим граничним (5.31-5.32) условима има решење,
- Решење је једнозначно, и
- Решење зависи како од вредности коефицијената постављеног система једначина, тако и од вредности граничних услова.

Последица већег броја додатних услова доводи до тога да решење не постоји, док недовољан број додатних услова узрокује вишезначност решења. Зато је задавање граничних услова од великог значаја. У табели 5.2 дате су форме граничних услова за разматрани проблем природне конвекције у затвореном простору.

Табала 5.2. Сумарни гранични услови диференцијаног модела.

Φ	ГРАНИЧНИ УСЛОВИ		
	УЛАЗ	ИЗЛАЗ	ЗИД
U_i	$(\rho U)_i _{ulaz}$	$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} _{izlaz} = 0$	$U_i _{zid}$
T_a	$T_a _{ulaz}$	$\frac{\partial T_a}{\partial x_i} _{izlaz} = 0$	$T_a _{zid}$
C_{CO2}	$C_{CO2} _{ulaz}$	$\frac{\partial C_{CO2}}{\partial x_i} _{izlaz} = 0$	0
k	$(0.1 \cdot U_i)^2$	$\frac{\partial k}{\partial x_i} _{izlaz} = 0$	k_{zid}
ε	$0.1643 k^{1.5} / \ell$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} _{izlaz} = 0$	ε_{zid}
T_r	$T_r _{ulaz}$	$T_r _{izlaz}$	$T_{solid} _{zid}$

ГЛАВА 6

6.1. НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ ПРИРОДНЕ КОНВЕКЦИЈЕ У ЗАТВОРЕНОМ ПРОСТОРУ

Нумеричко решење система парцијалних диференцијалних једначина одржања материје, количине кретања, енергије и турбулентних карактеристика, чији је репрезент општа парцијална диференцијална једначина конзервације (5.30), представља скуп коначног броја вредности зависно променљивих величина Φ у унапред изабраним временским (τ) и просторним (x_u) тачкама дефинисаног домена интеграције. Према томе, нумерички метод је сличан експерименталном приступу одређивања дистрибуције физичких величина, јер се и у једном и у другом случају као резултат добија коначан број вредности посматране физичке величине Φ . На овај начин се непрекидно решење замењује дискретним вредностима.

Да би се добило дискретно решење потребно је систем парцијалних диференцијалних једначина превести у алгебарски еквивалент чије је решавање нумерички могуће. Дискретизацијом диференцијалног облика једначине (5.30) добија се систем алгебарских једначина чије се решавање спроводи одређеним нумеричким алгоритмима. Дискретизација и алгоритам решавања зависе од изабране нумеричке методе. Поступак дискретизације система парцијалних диференцијалних једначина које описују процесе преноса материје, количине кретања и топлоте је олакшан јер је довољно дискретизовати генералну диференцијалну једначину (5.30), тако да променљива Φ , може имати значење изабраних физичких параметара (компонената брзине, температуре, масених концентрација учествујућих супстанци, турбулентних карактеристика итд).

Општа алгебарска једначина, или како се чешће назива диферентна једначина, добија се дискретизацијом диференцијалне једначине (5.30), за унапред дефинисане - изабране тачке простора и дате - изабране временске тренутке.

6.2. ОСНОВНИ КОНЦЕПТ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЗАПРЕМИНА

6.2.1. ДИСКРЕТИЗАЦИЈА ДОМЕНА ИНТЕГРАЦИЈЕ

Прва од претпоставки која се мора увести у дискретизационом поступку је карактер промене променљиве Φ између изабраних тачака интеграционог домена. Постоје различите методе проналажења ове зависности. Због своје једноставности и ефикасности издваја се линеарни, односно "изломљени" облик промене променљиве Φ , где за домен између две суседне тачке струјног простора важи један линеарни облик расподеле, за разлику од метода које базирају на степенастој промени. Код методе коначних запремина, усвојена расподела променљиве Φ важи само за једну тачку струјног простора и непосредну околину око те тачке. Ова идеја захтева такву

дискретизацију интеграционог домена на субдомене који садрже само једну тачку у којој се одређују вредности променљиве Φ , при чему за сваки субдомен важи различити линеарни облик промене променљиве Φ . Уобичајено је да се користе термини за тачку - чвор, а за субдомене - коначне запремине или ћелије.

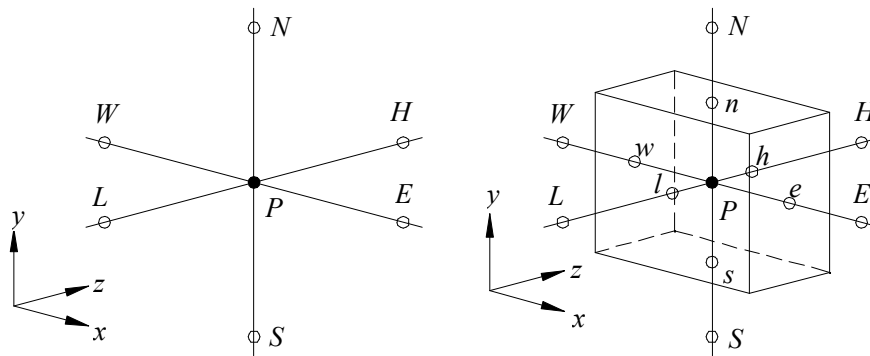
Да би се добиле алгебарске (диферентне) једначине, потребно је следити одређене кораке у методологији њиховог извођења. Овај поступак је познат у литератури, тако да су овде дате кључне секвенце како би се нумерички модел представио као целина. Дискретизација домена интеграције у околини изабраног чвора је приказана на слици 6.1, при чему је усвојено да се великим словима нумеришу тачке, односно чворови ћелије, а малим словима странице ћелија, респективно. Усвојена је оријентација и означавање чворова ћелија према странама света, позната у литератури као компасна нотација:

x (x_1) - оса: W (*West*) - E (*East*),
 y (x_2) - оса: S (*South*) - N (*North*),
 z (x_3) - оса: L (*Low*) - H (*High*),
 τ - време 0 (*Old*) - (*New*),

Централни чвор је означен са P (*Point*).

Индекси страница ћелија (*cell-face*) према усвојеној номенклатури се означавају малим словима: $cf = w, e, s, n, l, h$; а суседни чворови (*neighborhood*): $Nb = W, E, S, N, L, H$.

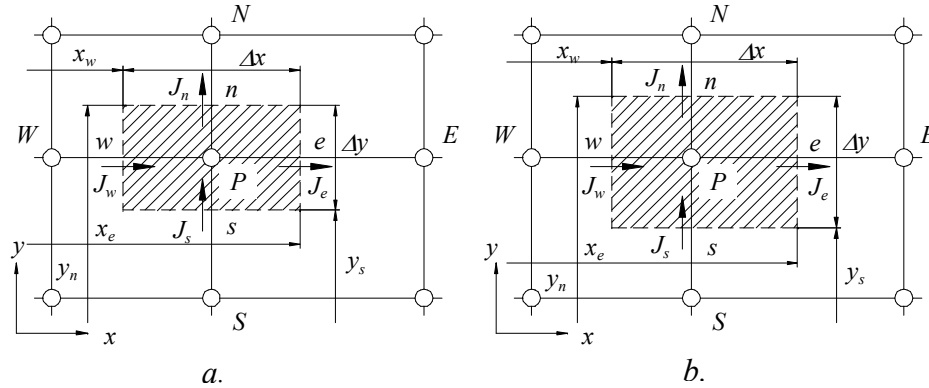
У случајевима када се суседни чворови или странице не могу индексирати једним словом, користе се парови одговарајућих слова да се тачно одреди локација странице или чвора. На слици 6.1 приказане су детаљне геометријске карактеристике произвољне коначне запремине.



Слика 6.1. Компасна оријентација у ортогоналном координатном систему, и номенклатура чворова и страница коначне запремине.

Просторна дискретизација интеграционог домена коначним запреминама може се вршити на два начина. Први начин подразумева дефинисање координата страница ћелија а затим се припадајући чвор смешта у центру ћелије (слика 6.2a). Други начин је обрнут, прво се дефинишу координате чворова ћелија а затим се странице смештају на средишним растојањима између суседних чворова (слика 6.2b). У принципу, нумеричко

решење не зависи од избора начина дискретизације, међутим, први начин има незнатну предност која се огледа у чињеници да без обзира колико је мрежа неуниформна, чворови ћелија се увек налазе у средишту коначне запремине.



Слика 6.2. Геометријске карактеристике коначних запремина у дводимензијском простору:

(*a*- ћелија са централним чвором, *b*- ћелија са централним страницама)

Према томе, интеграциони домен се просторно дискретизира мрежним линијама-површима које формирају одговарајући број коначних запремина - ћелија, у чијим се средиштима налазе чворови. На основу дефинисаних интеграционих мрежа могуће је одредити геометријске карактеристике које су неопходне у даљем дискретизационом поступку, а то су пре свега запремина ћелије, површине страница ћелије, растојања између чворова и страница. Набројане геометријске величине се једноставно добијају на основу координата страница и чворова.

6.2.2. ОПШТА АЛГЕБАРСКА (ДИФЕРЕНТНА) ЈЕДНАЧИНА

Интеграљење генералне диференцијалне једначине (5.30) се врши по произвољно изабраној коначној запремини (ћелији) V_P , тако да су чланови једначине дати изразима:

Инерцијални (локални) члан:

$$I = \int_{V_P} \frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial\tau} dV = \frac{\rho_P \Phi_P - \rho_P^0 \Phi_P^0}{\Delta\tau} V_P \quad (6.1)$$

Конвективни чланови:

$$C_x = \int_{V_p} \frac{\partial(\rho U \Phi)}{\partial x} dV = \int_A [(\rho U \Phi)_e - (\rho U \Phi)_w] dA = A_e (\rho U \Phi)_e - A_w (\rho U \Phi)_w \quad (6.2a)$$

$$C_y = \int_{V_p} \frac{\partial(\rho V \Phi)}{\partial y} dV = \int_A [(\rho V \Phi)_n - (\rho V \Phi)_s] dA = A_n (\rho V \Phi)_n - A_s (\rho V \Phi)_s \quad (6.2b)$$

$$C_z = \int_{V_p} \frac{\partial(\rho W \Phi)}{\partial z} dV = \int_A [(\rho W \Phi)_h - (\rho W \Phi)_l] dA = A_h (\rho W \Phi)_h - A_l (\rho W \Phi)_l \quad (6.2c)$$

Дифузиони чланови:

$$\begin{aligned} D_x &= \int_{V_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dV = \int_A \left[\left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_w \right] dA = \\ &= A_e \Gamma_e \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_e - A_w \Gamma_w \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_w \end{aligned} \quad (6.3a)$$

$$\begin{aligned} D_y &= \int_{V_p} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) dV = \int_A \left[\left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_s \right] dA = \\ &= A_n \Gamma_n \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_n - A_s \Gamma_s \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_s \end{aligned} \quad (6.3b)$$

$$\begin{aligned} D_z &= \int_{V_p} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) dV = \int_A \left[\left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_h - \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_l \right] dA = \\ &= A_h \Gamma_h \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_h - A_l \Gamma_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_l \end{aligned} \quad (6.3c)$$

Изворни члан:

$$S = \int_{V_p} S_\Phi dV = \bar{S} V_p = (S_C - S_P \Phi_P) V_p \quad (6.4)$$

Пре сумирања десних страна израза (6.1 - 6.4), потребно је увести услов одржања материје, односно искористити једначину континуитета. Диферентна једначина континуитета се добија из израза (6.1 - 6.4), за услове: $\Phi = 1$, $D_{cf} = 0$ и $S = 0$, тако да се добија:

$$\begin{aligned} &\frac{(\rho_P - \rho_P^0)}{\Delta t} \Delta V_p + \\ &+ (\rho U)_e A_e - (\rho U)_w A_w + (\rho V)_n A_n - (\rho V)_s A_s + (\rho W)_h A_h - (\rho W)_l A_l = 0 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Сумирањем десних страна израза (6.1 - 6.4), уз услов (6.5), и груписањем чланова уз променљиву Φ , долази се до генералне диферентне једначине:

$$a_P \Phi_P = a_W \Phi_W + a_E \Phi_E + a_S \Phi_S + a_N \Phi_N + a_L \Phi_L + a_H \Phi_H + b \quad (6.6)$$

Одређивање коефицијената a_{Nb} се базира на основу израза (6.1 - 6.4), међутим, пре него што се они дефинишу потребно је увести одговарајућа правила по којима се коефицијенти морају одредити. Правила се дефинишу на основу критеријума адекватног физичког третмана феномена које диференцијалне једначине (5.30) описују и услова нумеричке стабилности решења:

- Израз за било који флуks кроз дату страницу хелије мора бити идентичан за обе хелије којима припада дата страница.
- У већини ситуација које се разматрају у конвективним и дифузионим процесима преноса материје, количине кретања и топлоте, вредност променљиве Φ у централном чвору P је функција исте променљиве у суседним чворовима. Следећи смисао физичких процеса конвекције и дифузије, свако повећање променљиве Φ у суседним чворовима би требало довести до повећања вредности променљиве Φ у централном чвору, и обрнуто, што значи да коефицијенти a_{Nb} морају имати исти знак. Очигледно је да коефицијенти морају бити или позитивни или негативни. Усвојено је да коефицијенти буду позитивни.
- Упркос усвојеним правилима за одређивање коефицијената a_{Nb} линеаризација изворног члана S_Φ може довести до нестабилног решења у случају да је коефицијент a_P негативан. Зато претходно правило важи и за овај коефицијент, што условљава опадајући карактер линеарне форме изворног члана. Импликација овог захтева је постављање знака минус у линеарном изразу изворног члана (6.4).

На основу овако формираних правила одређују се коефицијенти a_{Nb} а њихова форма зависи од начина дискретизације, односно од типа такозваних *диферентних шема*. Међутим, како ће се касније показати, могуће је форму израза за коефицијенте a_{Nb} генерализовати за једну групу диферентних шема. Зато ће се сада навести општа форма ових коефицијената, а у наредном поглављу одредиће се тачни изрази за коефицијенте a_{Nb} .

$$a_E = D_e f(|Pe_e|) + \max[-C_e, 0] \quad (6.7)$$

$$a_W = D_w f(|Pe_w|) + \max[C_w, 0] \quad (6.8)$$

$$a_N = D_n f(|Pe_n|) + \max[-C_n, 0] \quad (6.9)$$

$$a_S = D_s f(|Pe_s|) + \max[C_s, 0] \quad (6.10)$$

$$a_H = D_h f(|Pe_e|) + \max[-C_h, 0] \quad (6.11)$$

$$a_L = D_L f(|Pe_l|) + \max [C_l, 0] \quad (6.12)$$

$$a_P^0 = \rho_P^0 \frac{V_P}{\Delta \tau} \quad (6.13)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_H + a_L + a_P^0 + S_P V_P \quad (6.14)$$

$$b = S_C \cdot V_P + a_P^0 \Phi_P^0 \quad (6.15)$$

У претходној формулацији коефицијената a_{Nb} , конвективни и дифузиони флуksеви су означени са C_{cf} и D_{cf} , респективно, а дефинисани изразима:

$$C_{cf} = (\rho U)_{cf} A_{cf} \quad (6.16)$$

$$D_{cf} = \frac{\Gamma_{cf} A_{cf}}{\delta(x_i)_{cf}} \quad (6.17)$$

при чему је у изразу (6.17) искоришћена општа ознака за координатне осе $x_i (x_1, x_2, x_3) (x, y, z)$, а $\delta(x_i)_{cf}$ представља растојање суседних чворова између којих се налази посматрана страница. Транспортни коефицијенти на страницама ћелије Γ_{cf} се одређују линеарном или хармонијском интерполацијом вредности транспортног коефицијента у суседним чворовима Γ_{Nb} . *Peclet*-ов број је дефинисан за сваку страницу ћелије као однос конвективног и дифузионог флуksа $Pe_{cf} = C_{cf} / D_{cf}$. Општа диферентна једначина (6.6) се може сада написати у компактној форми:

$$a_P \Phi_P = \sum a_{Nb} \Phi_{Nb} + b \quad (6.18)$$

Из израза (6.7 - 6.17) се види да је преостало још дефинисати бездимензијске коефицијенте $f(|Pe_{cf}|)$. Основна карактеристика ових коефицијената је да су функције *Peclet* -овог броја за посматрану ћелију, а форма зависи од типа диферентне шеме.

Развој нумеричких метода је довео до дефинисања различитих диферентних шема. У презентованом нумеричком моделу коришћене су линеарне диферентне шеме, познате у литератури под називима: централна диферентна шема (*Central Difference Scheme*) – CDS; узводна диферентна шема (*Up-wind Difference Scheme*) – UDS, и хибридна диферентна шема (*Hybrid Difference Scheme*) – HDS. У табели 6.1 дати су изрази за $f(Pe)$, зависно од коришћених диферентних шема.

Табела 6.1. Вредности функције $f(Pe)$ за различите диферентне шеме

Диферентна шема	$f(Pe)$
Централна (CDS)	$1 - 0.5 \cdot Pe $
Узводна (UDS)	1
Хибридна (HDS)	$\max [0, 1 - 0.5 \cdot Pe]$

6.2.3. ЛИНЕАРИЗАЦИЈА ИЗВОРНОГ ЧЛАНА

У досадашњем третману дискретизације генералне парцијалне диференцијалне једначине (5.30), није детаљно анализиран изворни члан S_Φ осим што су дате опште напомене о њему да је линеарног облика. Међутим, важно је уочити чињеницу да су изворни чланови различити, зависно од природе генералне променљиве Φ . Ако су у питању компоненте брзине, односно једначине за количину кретања, онда је очигледно да изворни члан представља збир парцијалног извода притиска по координатама $\partial P / \partial x_i$ и гравитационе силе $-\rho \beta (T - T_{ref}) g_i$. Посебан третман изворног члана се јавља када су у питању једначине конзервације турбулентних модела. Због тога је оправдано разврстати изворне чланове у три групе:

- стандардни (S_{ST}) као што су градијенти притиска;
- специјални (S_{SP}) као што су узгонске силе, и изворни чланови модела турбуленције и
- изворни чланови који дефинишу граничне услове (S_{GU}) на улазу, излазу, (слободне границе) и зиду.

Користећи ову концепцију поделе изворних чланова, генерална диферентна једначина (6.18) се може написати у следећем облику:

$$a_P \Phi_P = \sum a_{Nb} \Phi_{Nb} + S_{ST} + S_{SP} + S_{GU} \quad (6.19)$$

За разматрани случај природне конвекције издваја се специјални изворни члан гравитације и гранични услови дати у табели 5.2 преко изворних чланова. Зато ће се само њима посветити пажња.

Гравитациона сила настала услед температурске разлике у вертикалном правцу (z), може се дефинисати на следећи начин:

$$dF_z = -\rho \beta g (T - T_{ref}) \cdot dydx dz = -\rho \beta g (T - T_{ref}) dV \quad (6.20)$$

Линеарна форма изворног члана има следећи облик:

$$S = S_C - S_P \Phi_P = S_P \left(\frac{S_C}{S_P} - \Phi_P \right) = M \cdot C_S \cdot (\Phi_V - \Phi_P) \quad (6.21)$$

где је:

M - геометријска карактеристика ћелије (површина странице, запремина, маса);

C_S - општи коефицијент изворног члана;

Φ_V - вредност променљиве Φ у задавању изворног члана;

Φ_P - текућа вредност променљиве Φ у чвору P .

Изворни члан гравитационе силе не зависи од брзине, па се може једноставно задати као флуks по читавом домену интеграције:

$$S_{SP}^* = \underbrace{V_P}_{M} \cdot \underbrace{g(\rho_{ref} - \rho)}_{\Phi_V} \quad (6.22)$$

Задавање флуksа се врши малим коефицијентом $C_S = 10^{-20}$, тако да диферентна једначина за количину кретања, на пример у z – правцу, има следећи облик:

$$\begin{aligned} W_P &= \frac{\sum a_{Nb} W_{Nb} + V_P \cdot 10^{-20} \frac{g(\rho_{ref} - \rho)}{10^{-20}}}{a_P + \rho V_P \cdot 10^{-20}} \\ &\cong \frac{\sum a_{Nb} \Phi_{Nb} + V_P g(\rho_{ref} - \rho)}{a_P} \end{aligned} \quad (6.23)$$

6.3. ФОРМЕ НУМЕРИЧКИХ ГРАНИЧНИХ УСЛОВА

За разматрање граничних услова, у датом случају природне конвекције, најинтересантнији су гранични услови на чврстим површинама, односно на зидовима учионице и чврстих тела унутар учионице. Задавање услова на зиду се врши додатним нестандартним изворним члановима у једначинама за компоненте брзине, температуре и турбулентне параметре. Ови изворни чланови су последица промене количине кретања, топлотног флуksа и турбулентних карактеристика у граничном слоју. Генерална форма изворног члана за задавање граничних услова, на пример за e - страницу је:

$$S_{GU}^{zid} = \frac{A_e}{\Delta_{l/2}} C_S \rho_P v (\Phi_{zid} - \Phi_P) \quad (6.24)$$

где је $\Delta_{l/2}$ половина растојања између источне и западне странице граничне ћелије на e - страници, а Φ_{zid} вредност граничног услова на зиду. Овако дефинисан изворни члан се користи за ламинарни гранични слој у чвору P при чему се за коефицијент C_S узима

вредност јединице ако су у питању брзине односно реципрочна вредност ламинарног *Prandtl*-овог броја ако је у питању температура.

Међутим, коефицијент C_S се најчешће одређује преко коефицијента трења, односно преко *Stanton*-овог броја, зависно да ли су у питању брзине или температура, респективно. Оваква техника важи и за ламинарни и за турбулентни ток, тако да израз за изворни члан S_{GU}^{zid} постаје:

$$S_{GU}^{zid} = A_e \rho_P C_\Phi \left| U_{||zid} \right| (\Phi_{zid} - \Phi_P) \quad (6.25)$$

где је:

C_Φ - коефицијент трења или *Stanton*-ов број, зависно да ли су у питању брзине или температура, респективно;

$U_{||zid}$ - брзина флуида паралелна са зидом.

Пре него што се одреди коефицијент изворног члана C_S , одређује се карактер струјања преко локалног *Reynolds*-овог броја у посматраном чвору:

$$Re = \frac{\left| U_{||zid} \right| \Delta l / 2}{\nu} \quad (6.26)$$

У случају да је струјање ламинарно, независно од типа променљиве (брзине или температуре), коефицијент C_S се одређује на основу израза:

$$C_S = \frac{\nu}{\left| U_{||zid} \right| \Delta l / 2} \quad (6.27)$$

У случају да је струјање турбулентно и ако су у питању брзине, C_S представља коефицијент трења и одређује се на основу израза:

$$C_v = \left[\frac{0.435}{\ln \left(1.01 + 9C_v^{0.5} Re \right)} \right]^2 \quad \text{за } Re > 132.5 \quad (6.28)$$

$$C_v = \frac{1}{Re} \quad \text{за } Re \leq 132.5 \quad (6.29)$$

при чему се израз (6.28) решава итеративним поступком. У случају да је струјање турбулентно и ако је у питању температура, C_S представља *Stanton* -ов број и одређује се на основу израза:

$$C_T = \frac{C_v}{\sigma_{T,l} (1 + C_v^{0.5} R)} \quad \text{за } Re > 132.5 \quad (6.30)$$

$$C_T = \frac{C_v}{\sigma_l} \quad \text{за } Re \leq 132.5 \quad (6.31)$$

где је:

$$R = 9 \left(\frac{\sigma_{T,l}}{\sigma_{T,t}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_{T,t}}{\sigma_{T,l}} \right)^{0.25} \quad (6.32)$$

Гранични услови на зиду турбулентних карактеристика k и ε дефинишу се задавањем константних вредности k_{zid} и ε_{zid} према следећим изразима:

$$k_{zid} = \frac{C_v |U_{||zid}|^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (6.33)$$

$$\varepsilon_{zid} = k_{zid}^{3/2} \frac{C_D}{\kappa \Delta l / 2} \quad (6.34)$$

где је вредност емпиријских коефицијената: $C_\mu = 0.09$, $C_D = 0.1643$, $\kappa = 0.435$.

6.3.1. АЛГОРИТАМ РЕШАВАЊА НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛА - ТДМА

Диферентне једначине коначних запремина (6.18) формирају систем алгебарских линеарних једначина, са непознатим вредностима зависно променљиве величине Φ . У принципу, систем има онолико једначина колико има чворова, међутим, задавањем граничних услова, систем се редукује на број унутрашњих чворова. Као што је већ напоменуто, граничне вредности Φ_B се могу елиминисати из система, коришћењем описаних начина задавања граничних услова у претходном поглављу.

Постоје две групе метода за решавање оваквих система алгебарских једначина, директне и итеративне. За једнодимензијске случајеве, директна метода *Gauss*-ове елиминације је врло погодна јер систем има тридијагоналну матричну форму коефицијената. У овом случају, метода *Gauss*-ове елиминације доводи до врло ефикасног алгоритма, познатог у литератури као *Thomas*-ов алгоритам или тридијагонални матрични алгоритам (ТДМА). Међутим, за дводимензијске и тродимензијске просторе, директне методе захтевају велике меморијске просторе рачунара. Такође, ефикасност оваквих прорачуна је мала јер прорачуни веома дуго трају. У овим случајевима итеративне методе су много ефикасније.

Постоји велики број итеративних метода са различитим карактеристикама брзине конвергенције решења, тачности, оптерећења рачунарских капацитета, итд. Зависно од

софтверских решења, итеративне методе које су највише заступљене у решавању система диферентних једначина коначних запремина су методе:

- итерација тачка-по-тачку,
- линија-по-линију и
- блок-корекције.

У изради ове докторске дисертације коришћен је софтверски програм чији је комерцијални назив PHOENICS, што представља акроним пуног назива софтвера: *Parabolic, Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series*. Овај софтвер користи методу итерације линија-по-линију, тако да ће се само она кратко описати.

Основна идеја методе итерација линија-по-линију се састоји у решавању диферентних једначина коначних запремина дуж једне линије методом ТДМА при чему се вредности променљиве Φ у суседним чворовима који не припадају тој линији сматрају познатим. Метода ће се приказати на дводимензијском примеру, а њено проширење на општи тродимензијски простор се добија једноставном аналогијом изведеног поступка. Посматра се диферентна једначина:

$$a_P \Phi_P = a_W \Phi_W + a_E \Phi_E + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b \quad (6.35)$$

Ако се метода линија-по-линију примени на мрежне линије дуж y -осе, односно линије константног индекса i , при чему индекс j узима вредности од 1 до M , онда се претпоставља да су вредности променљиве Φ у суседним чворовима дуж линије у x -правцу, Φ_E и Φ_W познати, тако да диферентна једначина (6.35) има облик:

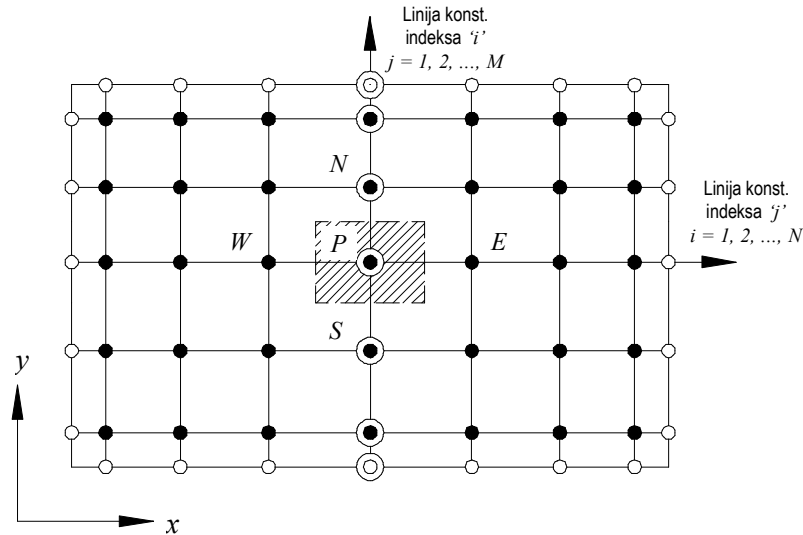
$$a_P \Phi_P = a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + (a_E \Phi_E^* + a_W \Phi_W^* + b^*) \quad (6.36)$$

где су претпостављене вредности означене звездом. Израз у загради се сматра привремено познатим. На овај начин, претходна форма диферентне једначине коначних запремина се своди на псеудо једнодимензијску тридијагоналну форму:

$$A_j \Phi_{j-1} + B_j \Phi_j + C_j \Phi_{j+1} = D_j \quad (6.37)$$

где текући индекс j означава чворове дуж линије у y -правцу, коефицијенти A_j , B_j , C_j и D_j су познати, тако да се метода ТДМА може ефикасно употребити. Из једначина (6.36 и 6.37) јасно се уочава да је:

$$A_j = -a_S; B_j = a_P; C_j = -a_N; D_j = a_E \Phi_E^* + a_W \Phi_W^* + b^* \quad (6.38)$$



Слика 6.3. Линије интеграције

Претпостављене вредности променљиве Φ^* се у првој итерацији узимају на основу задатог иницијалног поља вредности променљиве Φ , а у наредним итерацијама се узимају из претходне и/или текуће итерације. Ако се са m означи текућа итерација, онда би један од могућих начина решавања система (6.38), могао бити:

$$A_j^{m-1} \Phi_{j-1}^m + B_j^{m-1} \Phi_j^m + C_j^{m-1} \Phi_{j+1}^m = D_j^{m-1} \quad (6.39)$$

Даља процедура итеративне методе линија-по-линију се састоји у понављању описаног поступка за следећу линију константног индекса i , док се не 'прође' комплетан прорачунски домен, чиме је једна итерација по једном индексу завршена. Затим се поступак понавља за линије у y -правцу, односно линије константног индекса j , да би се за тродимензијске случајеве овај поступак поновио за линије у z -правцу, односно линије константног индекса k . Тиме је једна итерација по свим индексима завршена. Поступак се понавља док се не задовоље услови конвергенције, односно док се не добије задовољавајућа тачност нумеричког решења.

Пажња ће се сада обратити чињеници која је до сада прећутно усвојена, а то је претпоставка да је систем диферентних једначина коначних запремина линеаран, односно да су коефицијенти a_{Nb} константни. Међутим, изузимајући врло једноставне случајеве, систем диферентних једначина коначних запремина је **нелинеаран**, што значи да коефицијенти a_{Nb} зависе од вредности променљиве Φ . Такође, како променљива Φ има различита физичка значења, онда могу коефицијенти једне променљиве Φ зависити од других променљивих Φ . Ова међузависност се може лако објаснити на примеру када променљива Φ има значење температуре, тако да коефицијенти те једначине зависе од брзине, параметара турбуленције, концентрација итд. Проблем нелинеарности и међузависности коефицијената a_{Nb} се решава на нивоу итерације. Наиме, у било којој итерацији, коефицијенти a_{Nb} се могу израчунати на

основу тренутних вредности свих променљивих Φ , тако да се у тој итерацији диферентна једначина коначних запремина (6.35) може сматрати привремено линеарном и решава се већ описаним алгоритмом ТДМА како би се добиле нове вредности променљиве Φ . У наредној итерацији коефицијенти a_{Nb} се поново прерачунавају-адаптирају на основу ново-израчунатих вредности променљивих Φ . Поступак се понавља до постигнутог конвергентног решења. Према томе, коначно решење система нелинеарних и међузависних диферентних једначина коначних запремина се добија преко великог броја међурешења номинално линеарних и независних алгебарских једначина.

Такође, веома значајно је истаћи да се описаним итеративним поступком решавају зависно променљиве Φ , које су скаларног типа: температуре, концентрација угљен-диоксида и параметри турбулентног модела k и ε . Међутим, када је зависно променљива Φ вектор брзине, онда се описани алгоритам итеративног решавања не може употребити, па је неопходно дефинисати потпуно нови алгоритам.

6.3.2. АЛГОРИТАМ РЕШАВАЊА НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛА - SIMPLE

Општа диференцијална једначина (5.30), дата у конзервативној форми, лако се трансформише у једначине за количину кретања, заменом: $\Phi = U_i$, $\Gamma = \mu + \mu_t$, $S_{U_i} = -\partial P / \partial x_i + F_i$ и множењем са густином. Гравитациона сила је означена са F_i .

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho U_j U_i - (\mu + \mu_t) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = \boxed{-\frac{\partial P}{\partial x_i}} + F_i \quad (6.40)$$

Анализом ове једначине може се закључити да се брзинско поље U_i може у принципу добити итеративном методом линија по линију за решавање генералне једначине транспорта са променљивом Φ која је скалар, при чему треба нагласити строгу нелинеарност коефицијената која се превазилази у итеративном поступку на већ описани начин.

Међутим, из једначина (6.40) уочава се да једначине за количину кретања садрже значајан изворни члан: градијент притиска $-\partial P / \partial x_i$. Такође, види се да овај члан није формулисан преко U_i или неке друге променљиве Φ садржане у једначини (6.40).

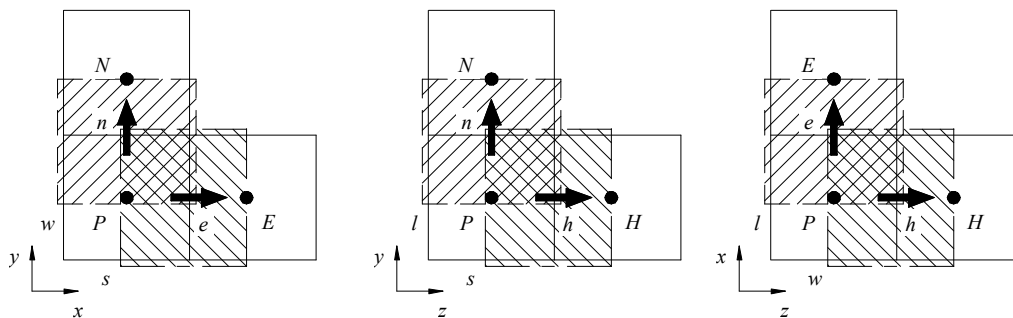
Према томе, иако је истина да једначине за количину кретања (6.40) формално имају облик опште диференцијалне једначине (5.30), оне се **НЕ МОГУ решити алгоритмом ТДМА ако градијент притиска није познат**. Јасно је да ће различито поље притиска дати различита брзинска поља. Такође, додатно ограничење које детерминише поље притиска је једначина континуитета:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (6.41)$$

Ова једначина се мора задовољити тачним пољем притиска, тако да истовремено добијено брзинско поље из једначина за количину кретања (6.40) истовремено задовољава и једначину континуитета (6.41). Посматрано са становишта итеративног решавања, ова индиректна и истовремена задовољавања више једначина нису погодна у нумеричком смислу, тако да се мора пронаћи *директан начин одређивања поља притиска*. То је основни разлог због чега је потребно формулисати посебан алгоритам за решавање спрегнутости струјног и поља притиска. Постоји и друга, веома значајна потешкоћа у спрезању брзинског и поља притиска. Наиме, ако се компоненте брзине и притисак одређују за исте чворове прорачунског домена, добијају се физички нереална решења. Овај проблем ће се детаљније обрадити, како би се указало на потешкоће и истовремено дала идеја за превазилажење проблема.

Један од начина за превазилажење проблема при решавању спрегнутог струјног поља и притиска је примена *концепта померене мреже*. Детаљи померене мреже су приказани на слици 6.4. Основни принцип овог концепта је да се све зависно променљиве Φ не одређују за исте мрежне чворове. Наиме, компоненте брзина се рачунају за чворове у ћелијама које су за половину основних ћелија померене у позитивном смеру координатних оса.

Пуним линијама су приказане основне ћелије а тачкама (•) њима припадајући централни чворови. За ове чворове се одређују вредности скаларних променљивих, као што су ρ , P , T , k , ε , итд. Испрекиданим линијама и шрафуром приказане су померене ћелије за одређивање компоненти брзине, а стрелицама њима припадајући централни чворови (\rightarrow , \uparrow). Последица ове концепције је да су компоненте брзине лоциране тачно на страницама основних ћелија и истовремено су управне на њих, што у многоме олакшава одређивање конвективних флукса на страницама. Такође, сила настала услед разлике притисака између суседних чворова основне мреже лако се уноси у једначинама за количину кретања јер су компоненте брзине лоциране на страницама, односно између суседних чворова.



Слика 6.4. Скица коначних запремина у помереној мрежи

На основу номенклатуре померених ћелија (слика 6.4), може се приступити дискретизацији једначина за количину кретања. За компоненте брзина U , V и W , добијају се изрази:

$$a_e U_e = \sum a_{cf} U_{cf} + b + (P_P - P_E) A_e \quad (6.42a)$$

$$a_n V_n = \sum a_{cf} V_{cf} + b + (P_P - P_N) A_n \quad (6.42b)$$

$$a_h W_h = \sum a_{cf} W_{cf} + b + (P_P - P_H) A_h \quad (6.42c)$$

где члан b укључује све додатне изворне чланове изузев градијента притиска, док су A_e , A_n и A_h површине одговарајућих страница ћелија. Форма коефицијената a_{cf} , a_e , a_n , a_h и b је идентична изразима (6.7 - 6.15). Међутим, мора се водити рачуна како о геометрији померене мреже, односно новој номенклатури померене мреже, тако и усвојеној диферентној шеми. Решавању диферентних једначина за количину кретања се може приступити само под условом да је тачно поље притиска P познато или претпостављено P^* . Ако поље притиска није тачно претпостављено ($P \neq P^*$), очигледно је да брзине (U^* , V^* и W^*):

$$a_e U_e^* = \sum a_{cf} U_{cf}^* + b + (P_P^* - P_E^*) A_e \quad (6.43a)$$

$$a_n V_n^* = \sum a_{cf} V_{cf}^* + b + (P_P^* - P_N^*) A_n \quad (6.43b)$$

$$a_h W_h^* = \sum a_{cf} W_{cf}^* + b + (P_P^* - P_H^*) A_h \quad (6.43c)$$

неће задовољити једначину континуитета. Основни задатак је наћи пут како извршити корекцију претпостављеног поља притиска P^* , тако да израчунато поље брзина што боље задовољава и једначину континуитета. Суштина даљег развоја алгоритма је да се пронађе формулација за одређивање корекције притиска која доводи до тачног итеративног решења.

Нека је P^+ **корекција притиска** која, када се дода претпостављеном пољу притиска P^* , даје тачно решење притиска P . Ова формулација је дефинисана изразом:

$$P = P^* + P^+ \quad (6.44)$$

Аналогно, одговарајуће **корекције компоненти брзина** ће бити U^+ , V^+ и W^+ . Аналогно изразу за притисак (6.44), релације за одређивање брзина су дате изразима:

$$U_e = U_e^* + U_e^+ \quad (6.45a)$$

$$V_n = V_n^* + V_n^+ \quad (6.45b)$$

$$W_h = W_h^* + W_h^+ \quad (6.45c)$$

На основу уведених корекција притиска и брзина, одузимањем једначина (6.42) и (6.43) и уз коришћење релација (6.44) и (6.45), добијају се **корекционе једначине**:

$$a_e U_e^+ = \sum a_{cf} U_{cf}^+ + (P_P^+ - P_E^+) A_e \quad (6.46a)$$

$$a_n V_n^+ = \sum a_{cf} V_{cf}^+ + (P_P^+ - P_N^+) A_n \quad (6.46b)$$

$$a_h W_h^+ = \sum a_{cf} W_{cf}^+ + (P_P^+ - P_H^+) A_h \quad (6.46c)$$

На овом степену развоја алгоритма потребно је донети одлуку да се из једначина (6.46) **изоставе** чланови под оператором суме $\sum a_{cf} U_{cf}^+$, $\sum a_{cf} V_{cf}^+$ и $\sum a_{cf} W_{cf}^+$. Ова одлука и њене импликације немају коначан утицај на коначно решење у последњој итерацији, па је ова претпоставка оправдана. Резултат овакве одлуке су **нове корекционе једначине**:

$$U_e^+ = d_e (P_P^+ - P_E^+) \quad (6.47a)$$

$$V_n^+ = d_n (P_P^+ - P_N^+) \quad (6.47b)$$

$$W_h^+ = d_h (P_P^+ - P_H^+) \quad (6.47c)$$

где је:

$$d_e = A_e / a_e \quad (6.48a)$$

$$d_n = A_n / a_n \quad (6.48b)$$

$$d_h = A_h / a_h \quad (6.48c)$$

Изрази за тачне компоненте брзина, сада постају:

$$U_e = U_e^* + d_e (P_P^+ - P_E^+) \quad (6.49a)$$

$$V_n = V_n^* + d_n (P_P^+ - P_N^+) \quad (6.49b)$$

$$W_h = W_h^* + d_h (P_P^+ - P_H^+) \quad (6.49c)$$

Међутим, да би се ови изрази могли решити **потребно је познавати корекцију притиска P^+ , која је у принципу још једна додатна променљива**. Зато, за одређивање корекције притиска мора постојати и додатна - нова једначина како би систем био једнозначан. Преостала једначина која се може искористити је једначина континуитета, тако да ће се она искористити за одређивање корекције притиска.

Дискретна форма једначине континуитета има облик:

$$\frac{\rho_P - \rho_P^0}{\Delta\tau} V_P + (\rho UA)_e - (\rho UA)_w + (\rho VA)_n - (\rho VA)_s + (\rho WA)_h - (\rho WA)_l = 0 \quad (6.50)$$

Ако се у једначини (6.50) уврсте корекционе једначине (6.49), те се групишу по променљивој P^+ , добија се **једначина за корекцију притиска**:

$$a_P P_P^+ = \sum a_{Nb} P_{Nb}^+ + b \quad (6.51)$$

са дефинисаним коефицијентима:

$$a_W = (\rho A)_w d_w \quad (6.52a)$$

$$a_E = (\rho A)_e d_e \quad (6.52б)$$

$$a_S = (\rho A)_s d_s \quad (6.52ц)$$

$$a_N = (\rho A)_n d_n \quad (6.52д)$$

$$a_L = (\rho A)_l d_l \quad (6.52e)$$

$$a_H = (\rho A)_h d_h \quad (6.52ф)$$

$$a_P = \sum a_{Nb} \quad (6.52г)$$

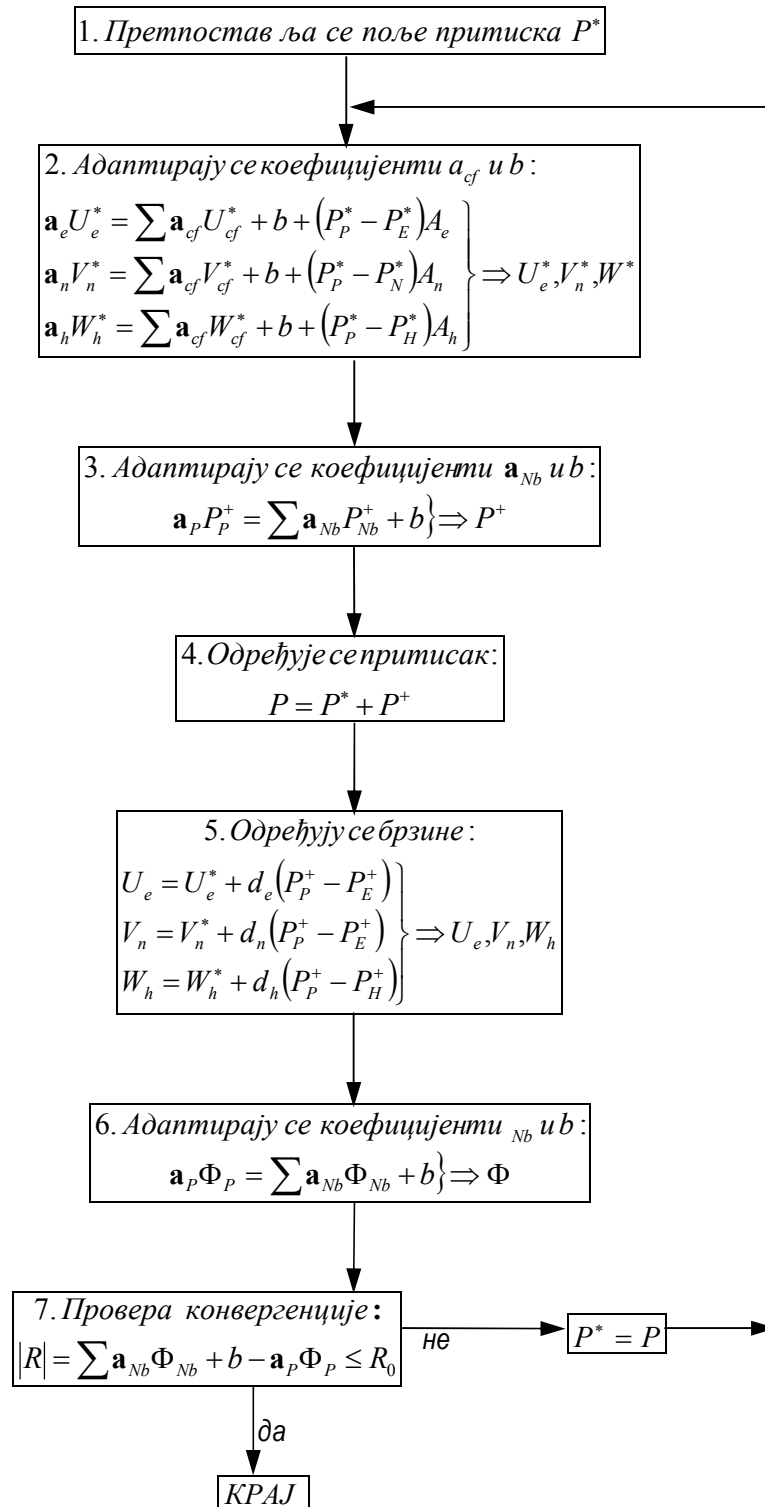
$$b = \frac{\rho_P^0 - \rho_P}{\Delta\tau} V_P + \quad (6.52x)$$

$$+ (\rho U^* A)_w - (\rho U^* A)_e + (\rho V^* A)_s - (\rho V^* A)_n + (\rho W^* A)_l - (\rho W^* A)_h$$

Како је густина одређена за чворове основне мреже, у итеративном поступку је потребно прерачунати густине за одговарајуће странице. Важно је истаћи да је форма једначине за корекцију притиска (6.51) идентична форми опште диферентне једначине коначних запремина за произвољну променљиву Φ (6.18), па се на исти начин и решава. Из израза (6.52x) може се закључити да је члан b значајан за једначину континуитета (6.50) ако се она решава са брзинама означеним звездицама. Случај да је члан b једнак нули значи да брзине и одговарајућа разлика ($P_P^+ - P_P$) задовољавају једначину континуитета и није потребна даља корекција притиска. Овако формулисан, члан b представља додатни, “**нумерички извор масе**” којег корекција притиска мора минимизирати јер су само у том случају једначине за количину кретања и једначина континуитета истовремено задовољене а поље притиска и поље брзина тачно одређена. Изведена процедура за решавање струјног поља је приказана на слици 6.5.

Овим поступком формулисан је алгоритам решавања струјног поља, познат у литератури под називом SIMPLE, што представља акроним пуног назива алгоритма у енглеској транскрипцији: *Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations*. Он се текстом дефинише и на следећи начин:

1. Претпостави се поље притиска P^* (иницијализација поља притиска пре итеративне процедуре).
2. Одређују се коефицијенти диферентне једначине количине кретања, и решавају диферентне једначине за количину кретања како би се добиле брзине U^* , V^* и W^* .
3. Одређују се коефицијенти диферентне једначине корекције притиска и решава диферентна једначина за корекцију притиска како би се добила корекција P^+ .
4. Израчунава се притисак додавањем корекције претпостављеној вредности $P = P^* + P^+$
5. Израчунавају се брзине U , V и W на основу U^* , V^* и W^* и корекције притиска P^+ .
6. Одређују се коефицијенти опште диферентне једначине коначних запремина a_{N_b} и решавају једначине за скаларне променљиве Φ (T , C_{CO_2} , k , ε и T_{rad}) које директно утичу на струјно поље, преко карактеристика флуида, изворног члана итд. Ако одређене променљиве Φ не утичу на струјно поље, онда их је боље рачунати посебно, након завршеног итеративног процеса.
7. Проверава се услов конвергенције, који може бити задат на више начина, малим бројем, или бројем итерација. У случају да услов конвергенције није задовољен, израчуната вредност притиска се проглашава за P^* , а процес се враћа на секвенцу број два.
8. Итеративни процес се одвија све док се не постигне конвергентно решење.

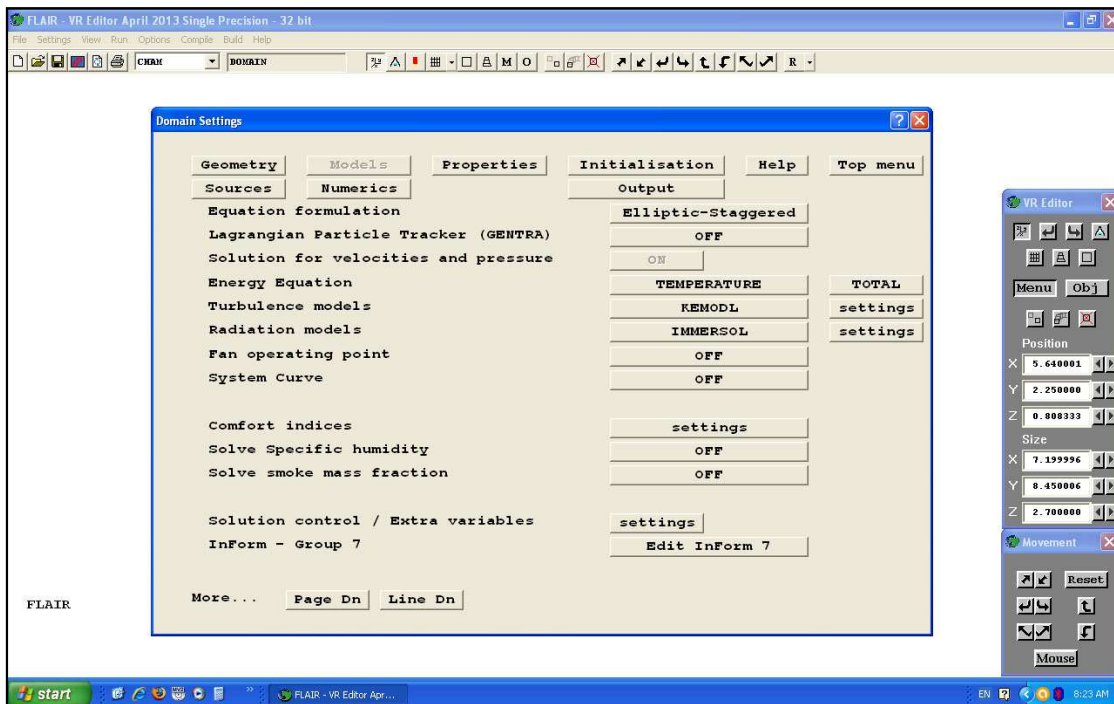


Слика 6.5. Дијаграм тока алгоритма SIMPLE

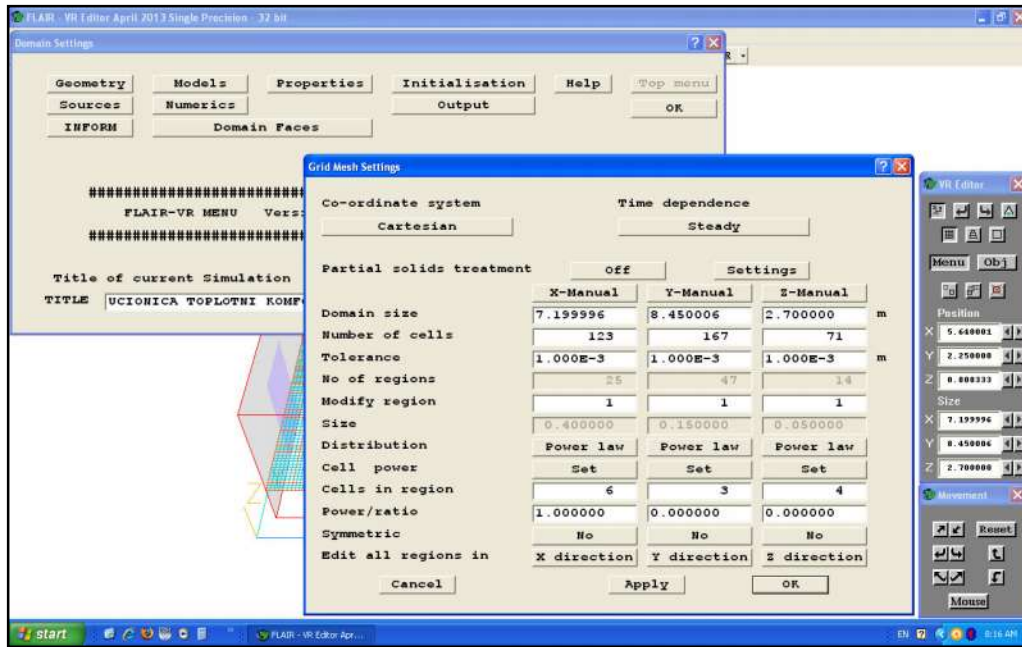
6.4. ПАРАМЕТРИ НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛА

У овом поглављу дати су детаљи сетовања развијеног математичког и нумеричког модела у посебном модулу FLAIR, софтверског програма PHOENICS. Софтверски програм PHOENICS поседује графички предпроцесор **VR Editor** за сетовање нумеричке мреже, модела и граничних услова у облику панела. На сликама 6.6 до 6.17 су приказани карактеристични панели за дефинисање модела. Опис ових панела није дат с обзиром на сликовитост панела којим се објашњавају параметри сетовања.

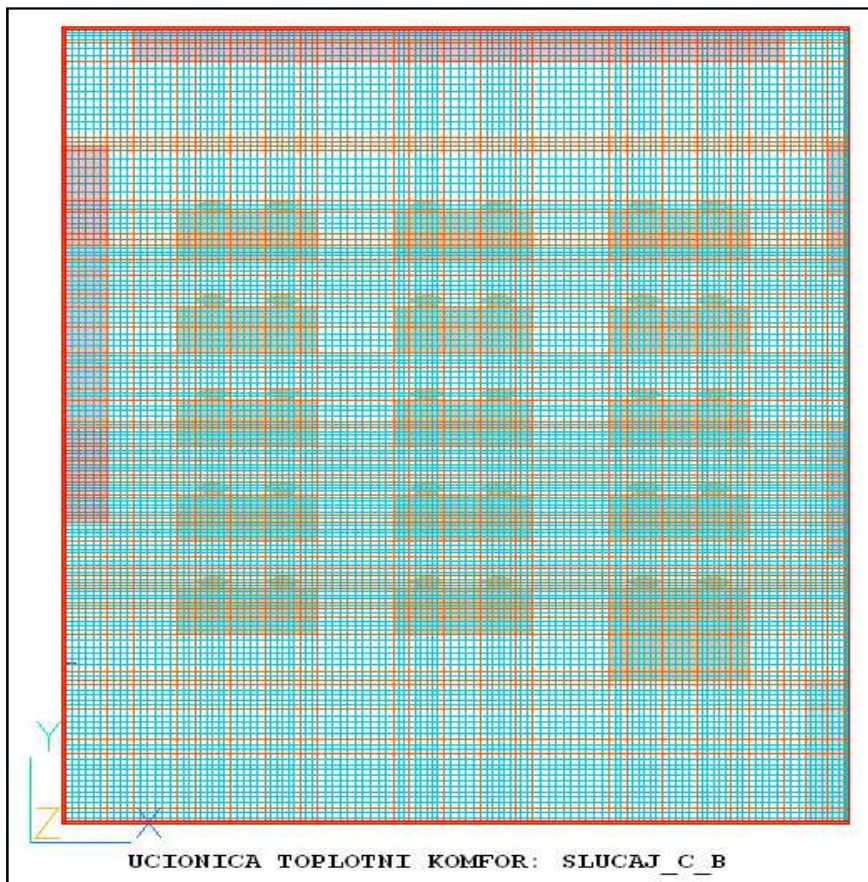
6.4.1. ФОРМА СЕТОВАЊА НУМЕРИЧКЕ МРЕЖЕ



Слика 6.6. Основни панел предпроцесора за сетовање математичког и нумеричког модела



Слика 6.7. Панел предпроцесора за сетовање нумеричке мреже

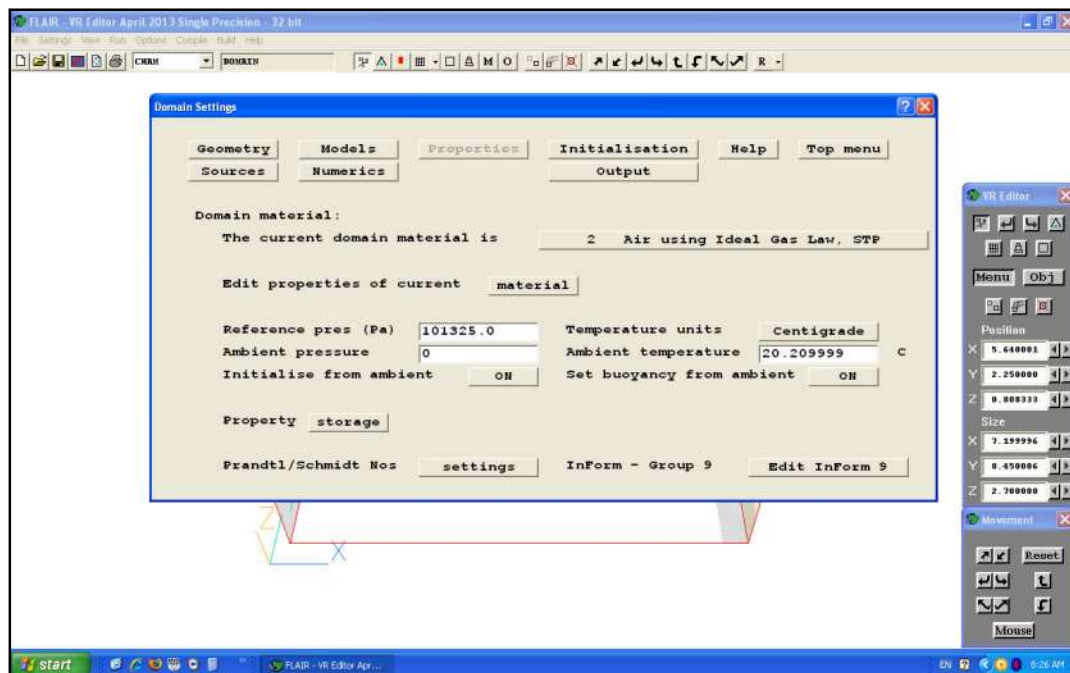


Слика 6.8. Нумеричка мрежа у $x - y$ равни

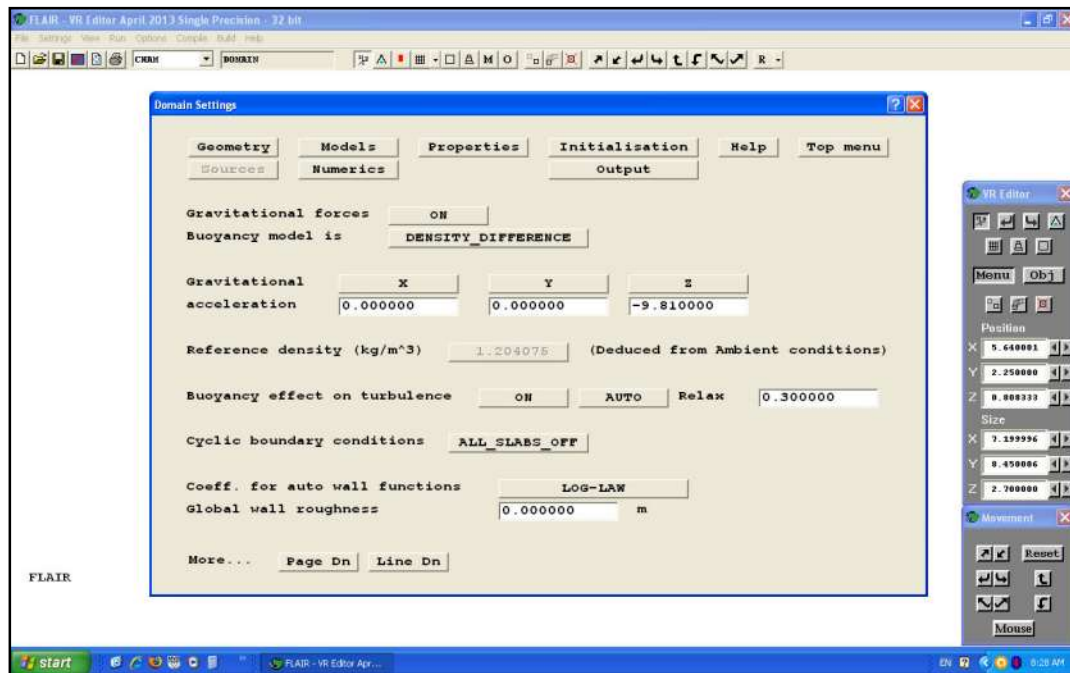


Слика 6.9. Нумеричка мрежа у $x - z$ равни

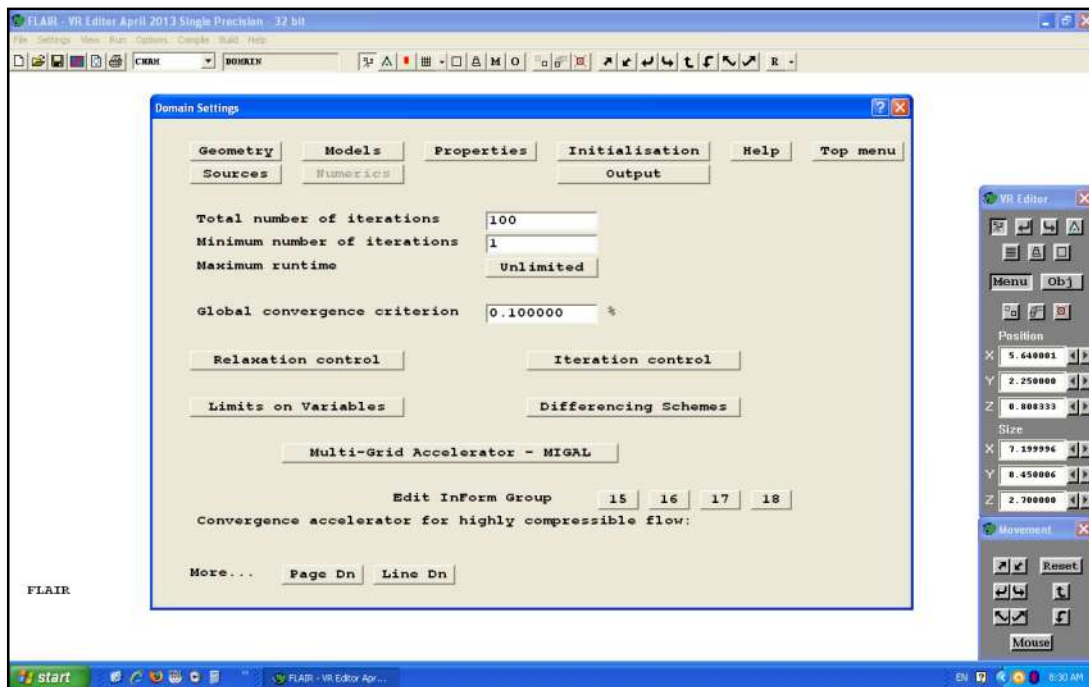
6.4.2. ФОРМЕ ПРЕДПРОЦЕСОРСКОГ СЕТОВАЊА МОДЕЛА



Слика 6.10. Панел за сетовање карактеристика флуида

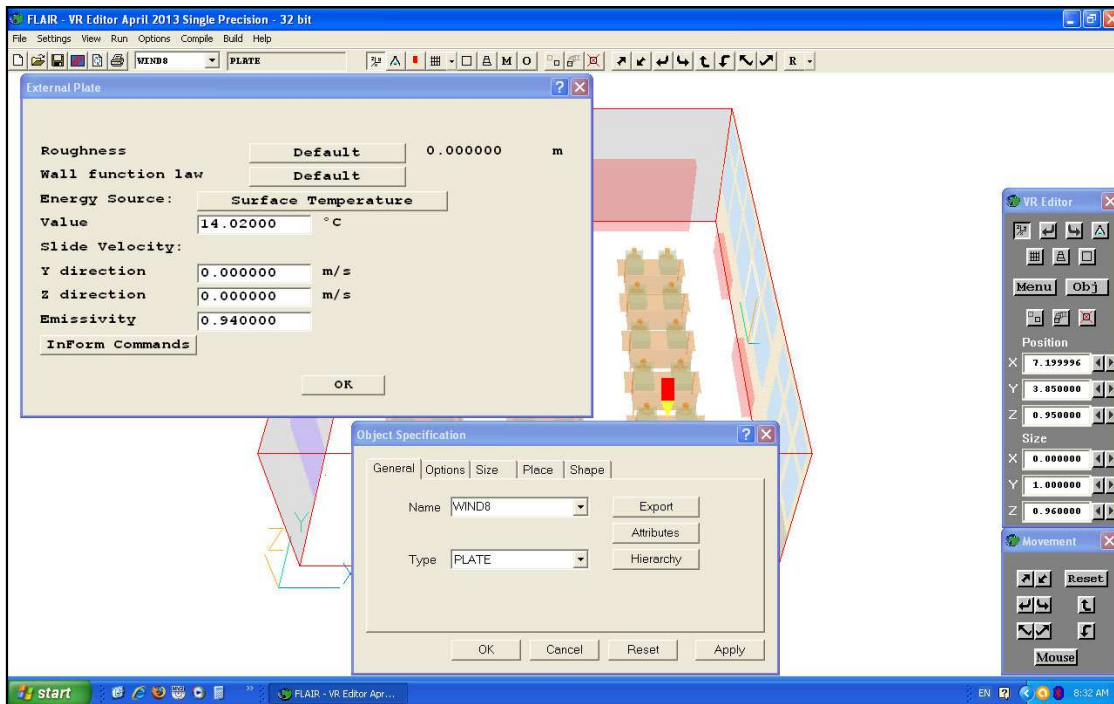


Слика 6.11. Панел за сетовање изворних чланова

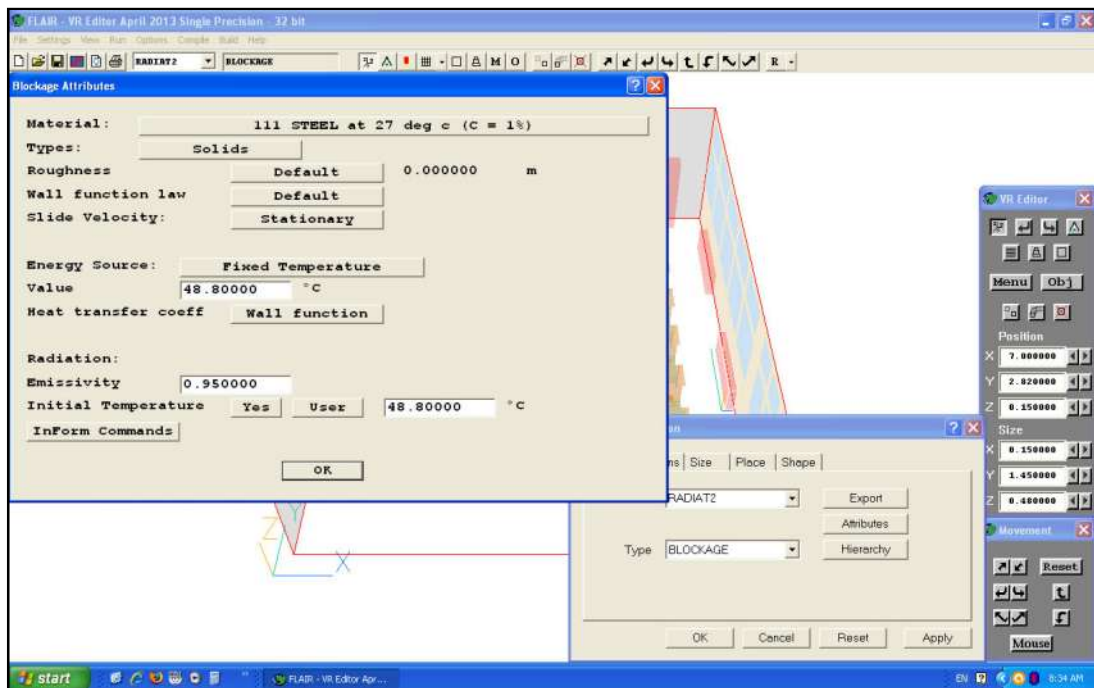


Слика 6.12. Панел за сетовање нумеричких параметара

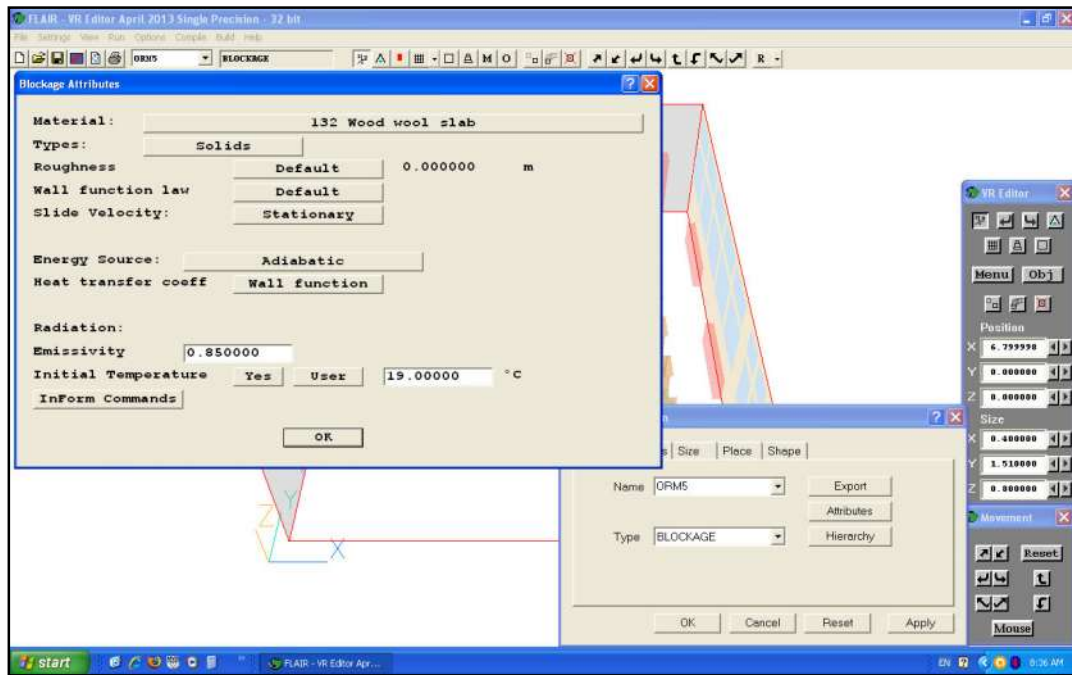
6.4.3. ФОРМЕ ПРЕДПРОЦЕСОРСКОГ СЕТОВАЊА ГРАНИЧНИХ УСЛОВА



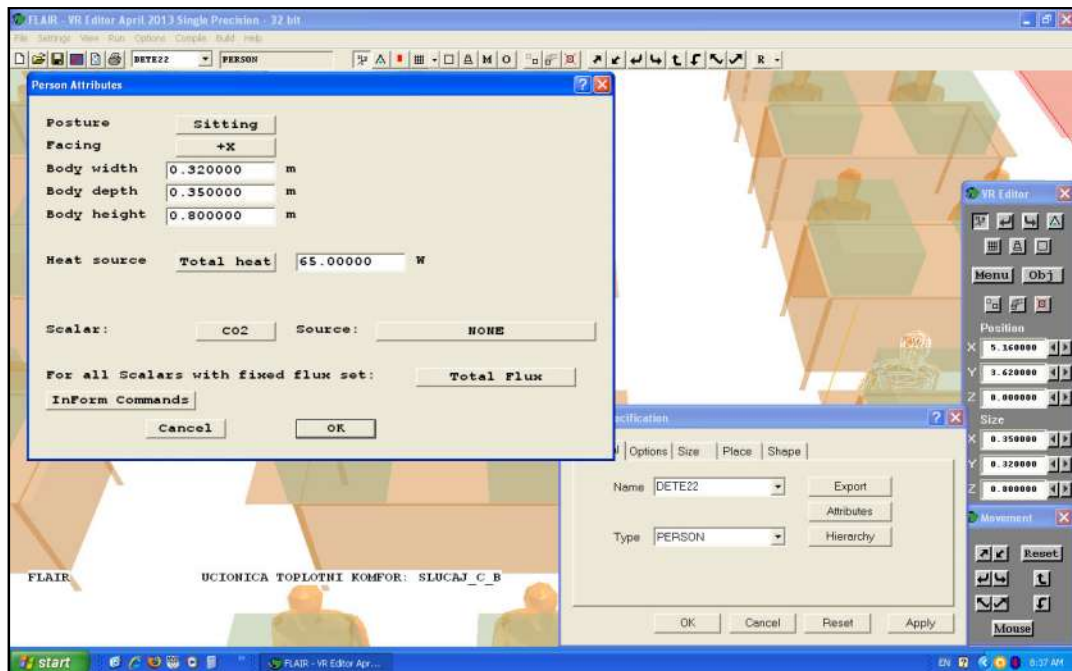
Слика 6.13. Панел за сетовање граничних услова на површини чврстог тела (прозор)



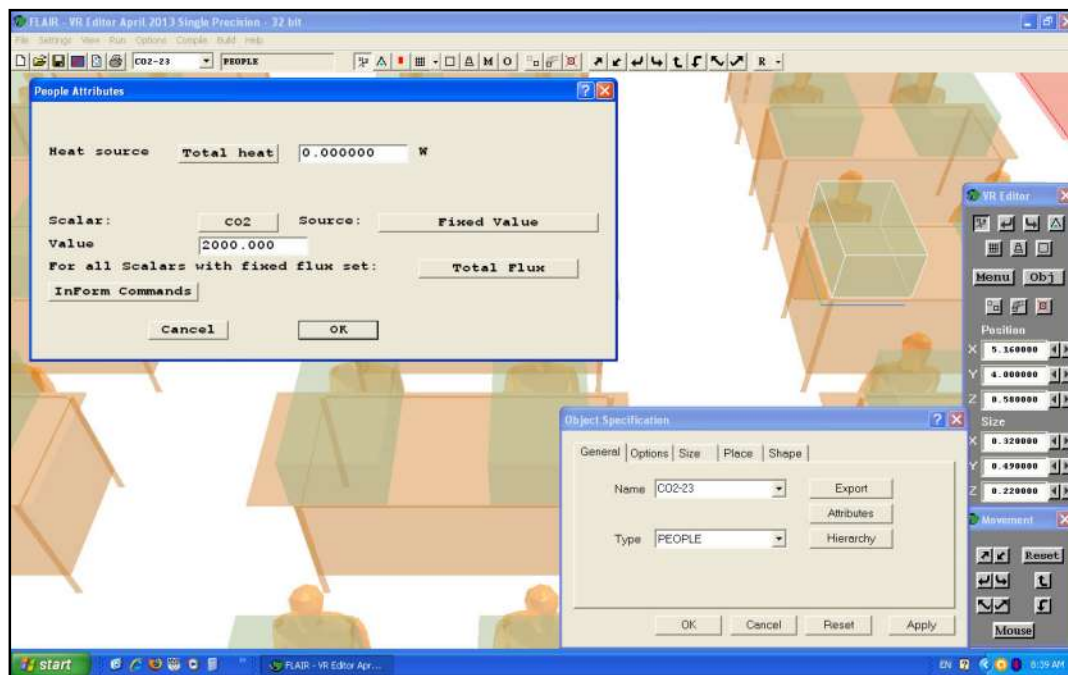
Слика 6.14. Панел за сетовање граничних услова топлотног извора (радијатор)



Слика 6.15. Панел за сетовање граничних услова чврстог тела (ормар)



Слика 6.16. Панел за сетовање граничних услова ученика



Слика 6.17. Панел за сетовање граничних услова извора угљен-диоксида

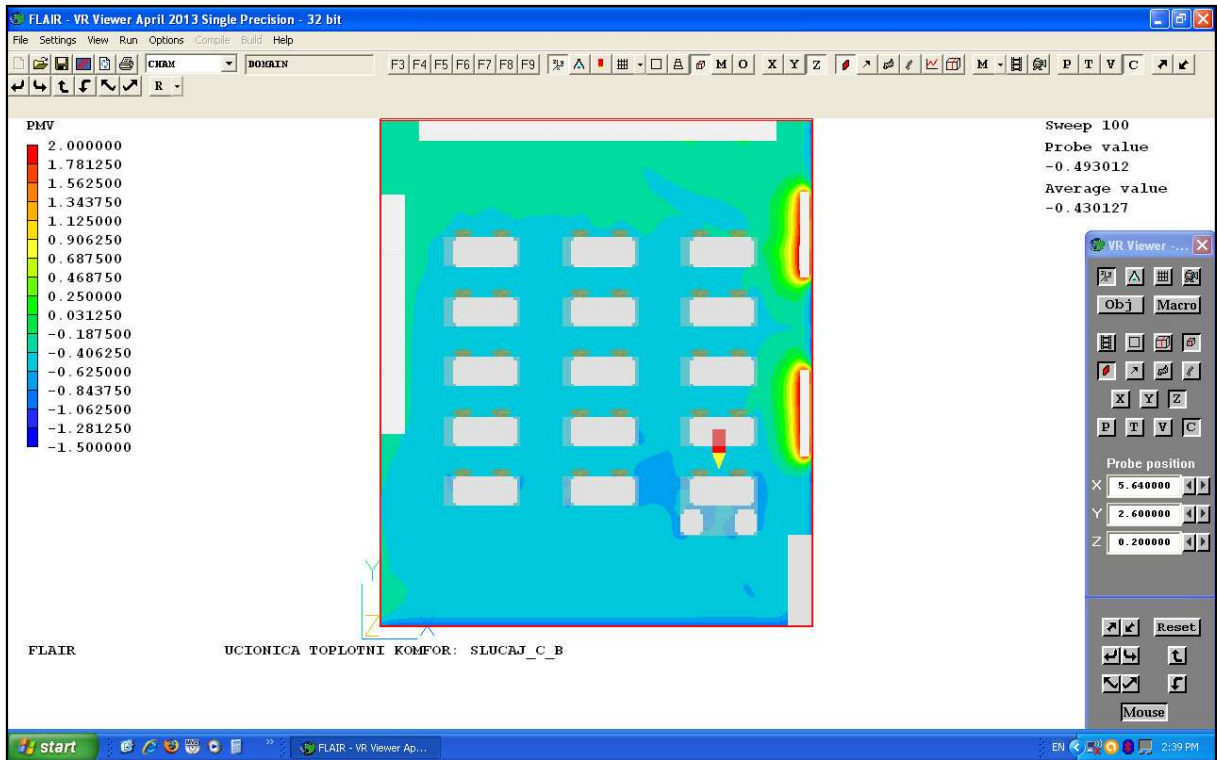
6.5. КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОСТПРОЦЕСОРСКОГ ПРИКАЗА НУМЕРИЧКИХ РЕЗУЛТАТА

Приказ нумеричких резултата се врши у графичком постпроцесору **VR Viwer**. Типичан графички приказ излазних резултата је дат на слици 6.18. На слици је приказана расподела индикатора PMV у $x - y$ равни на висини од 0.8m. На левој страни панела приказана је палета од 16 боја, од тамно плаве (најнижа вредност) до јарко црвене (највиша вредност) параметра PMV.

Поље расподеле овог параметра је приказано у облику испуне (фила) равни овим бојама које представљају нумеричке вредности параметра са палете.

У равни се може уочити црвено-жути објекат који личи на оловку. Овај објекат представља нумеричку сонду. Његовим постављањем на различите позиције (сиви панел у доњем десном углу (Probe position – x, y, z координате) добијају се нумеричке вредности параметра у изабраној тачки, а вредности параметра су приказане текстуално у горњем десном углу (Probe value). Такође, текстуално се приказује и средња вредност параметра у комплетној равни (Average value), као и укупан број итерација (Sweep).

Када у домену интеграције постоје чврста тела, као што је овде случај, чврста тела се обично приказују у боји која није саставни део палете како би се избегла конфузија у тумачењу резултата. У овом случају, ови чврсти објекти су обојени сивом бојом (столови, ормари и радијатори).



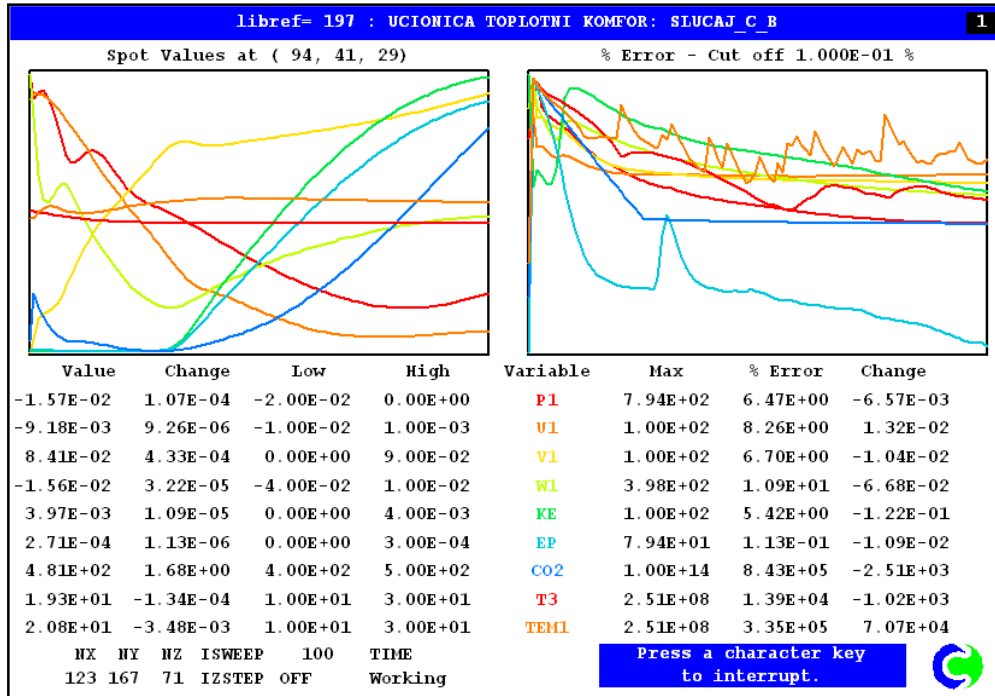
Слика 6.18. Основни постпроцесорски панел за приказ нумеричких резултата

6.5.1. КАРАКТЕРИСТИКЕ КОНВЕРГЕНЦИЈЕ РЕШЕЊА

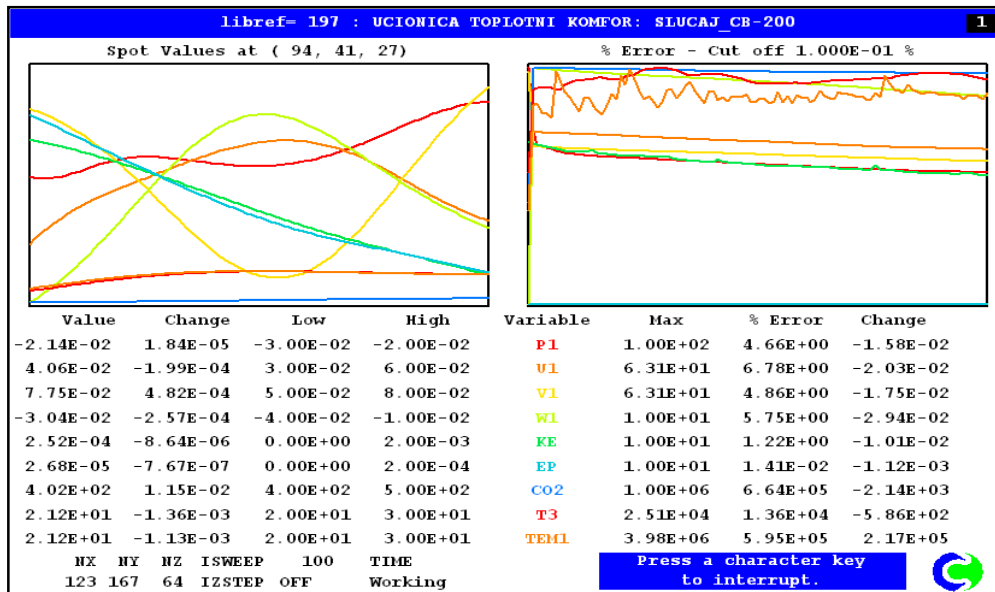
Централни и главни део програма је **Solver**. Током итеративног решавања нумеричког модела, на екрану се даје графички приказ тока конвергенције решења. Графички приказ тока конвергенције је приказан на слици 6.19. На овом панелу се могу уочити два екрана. Променљиве (Variable) су дате у средини различитим бојама како би се на екранима могао лакше пратити ток конвергенције решења. За изабрану ћелију: Spot Value at (94, 41, 29) екрану леве стране панела прате се тренутне вредности (Value) и промене између две узастопне итерације (Change) сваког параметра, као и лимити (Low, High). На десном екрану се прати ток конвергенције сваког параметра у комплетном интеграционом домену са дефинисане максималном грешком (Max), грешком у датој итерацији (%Error) и промена грешке између две узастопне итерације (Change).

Основна визуелна контрола конвергенције решења је да се на левом екрану криве за све параметре стабилизирају, а да криве на десном екрану имају опадајући карактер. Овај други критеријум је много важнији јер даје информацију о целокупној конвергенцији. Са слике се види да криве имају опадајући карактер те да се конвергентно решење добија.

На слици 6.20 је приказана историја конвергенције за дуго већи број итерација, одакле се може закључити да се значајно није побољшала конвергенција, те су сви преостали нумерички тестови рађени са 100 итерација.



Слика 6.19. Графички приказ конвергенције решења за 100 итерација



Слика 6.20. Графички приказ конвергенције решења за 200 итерација

6.5.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ НУМЕРИЧКИХ ЕКСПЕРИМЕНТА

У овом поглављу сумиране су карактеристике тестова нумеричких експеримената и приказане су у табели 6.2.

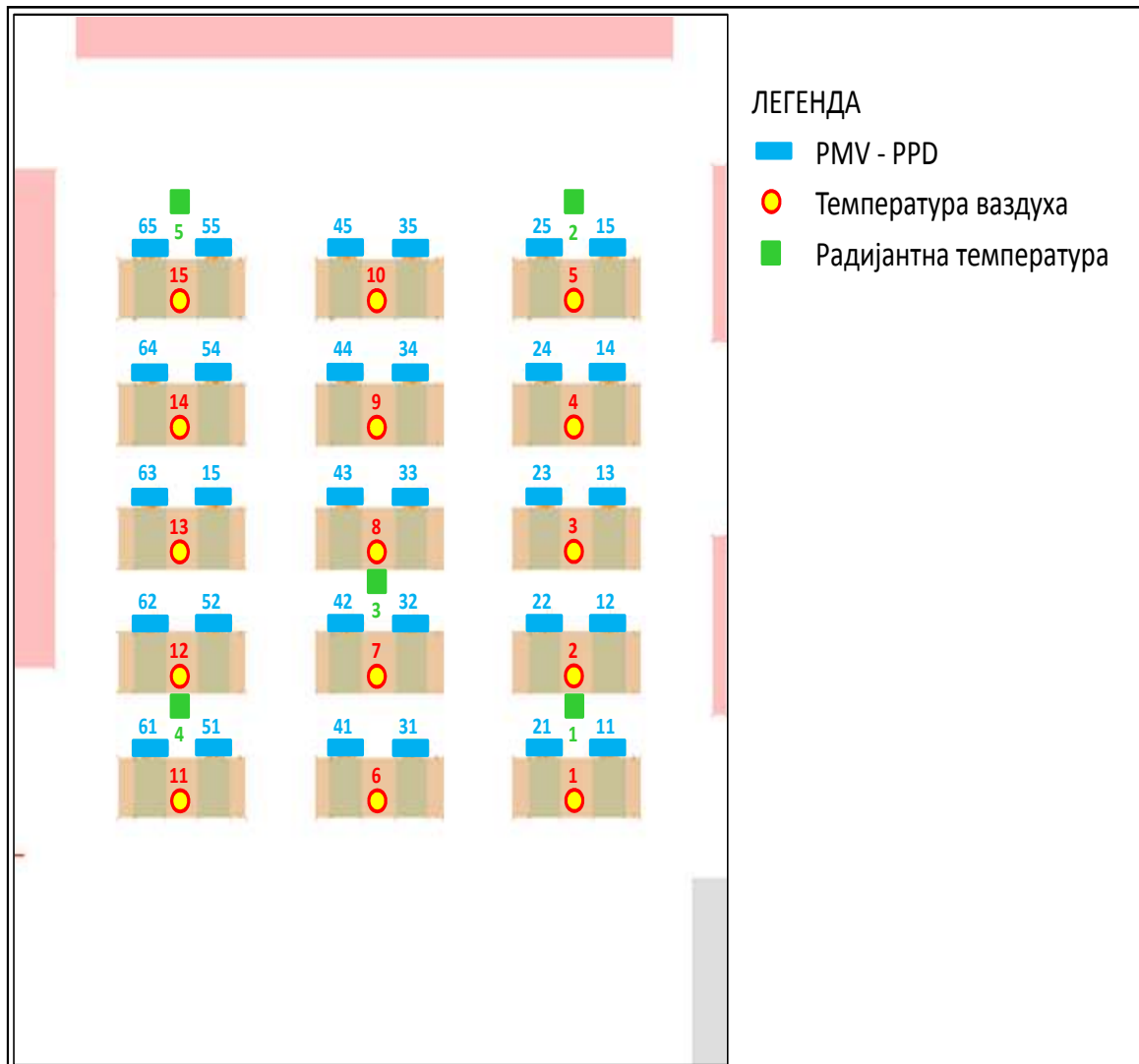
Табела 6.2. Карактеристике тест случајева нумеричког експеримента

Карактеристика модела	Акроним нумеричког експеримента					
	0_2	A_2	B_2	C_2	A_B	C_B
Модификовани $k - \varepsilon$ модел ($G_k, C_{\varepsilon 3} = 0.0$)	ДА	НЕ	ДА	НЕ	НЕ	НЕ
Модификовани $k - \varepsilon$ модел ($G_k, C_{\varepsilon 3} = 1.0$)	НЕ	ДА	НЕ	НЕ	ДА	НЕ
Модификовани $k - \varepsilon$ модел ($G_k, C_{\varepsilon 3} \neq const$)	НЕ	НЕ	НЕ	ДА	НЕ	ДА
Модел преноса топлоте зрачењем (транспарентан медијум)	ДА	ДА	НЕ	ДА	НЕ	НЕ
Модел преноса топлоте зрачењем (нетранспарентан медијум)	НЕ	НЕ	ДА	НЕ	ДА	ДА

ГЛАВА 7

7.1. ВАЛИДАЦИЈА НУМЕРИЧКИХ МОДЕЛА ПРИРОДНЕ КОНВЕКЦИЈЕ У ЗАТВОРЕНОМ ПРОСТОРУ

У презентованој глави представиће се валидација предложених модела, дефинисаних у табели 6.2, у поређењу са експерименталним подацима. Валидација модела ће се вршити за два најүтицајнија физичка параметра: температуру ваздуха и радијантну температуру, као и основног индикатора топлотне угодности – *PPD*. На слици 7.1 представљена је скица мерних места у учионици за ове параметре за које ће се извршити статистичка анализа валидације нумеричких модела.



Слика 7.1. Распоред мерних места на основу којих се врши валидација модела

7.2. АНАЛИЗА ГРЕШАКА

Процесу валидације нумеричких модела је посвећена значајна пажња. Поред уобичајених статистичких параметара, као што су релативна грешка и средња релативна грешка, користишћене се додатне статистичке категорије које дају увид у квалитет нумеричких модела, а тиме и квалитетнију основу за процену валидације сваког модела понаособ.

Основни статистички показатељ валидације је релативна грешка која се одређује према изразу:

$$Error = \left| \frac{\Phi_{exp} - \Phi_{cfd}}{\Phi_{exp}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.1)$$

где је:

Φ_{exp} - вредност физичког параметра на мерном месту добијена експерименталним путем, где Φ_{exp} има значење: Ta – температура ваздуха; Tr – радијантна температура и PPD - индикатор топлотне угодности;

Φ_{cfd} - вредност физичког параметра на мерном месту добијена нумеричком симулацијом.

У табелама 7.1, 7.2 и 7.3 дате су сумарне вредности релативне грешке нумеричких модела у поређењу са експерименталним подацима за температуру ваздуха, радијантну температуру и PPD , респективно. Критеријуми валидног модела су усвојени тако да релативна грешка за физичке параметре буде мања од 5%, а за комплексан параметар као што је PPD , који у себе укључује велики број физичких и физиолошких параметара, усвојен је критеријум да релативна грешка буде мања од 30%. У табелама су поља обојена плавом бојом са црним бројевима мерна места која задовољавају критеријуме, док поља и бројеви обојени црвеном бојом означавају мерна места која не задовољавају критеријуме. На крају сваке табеле дати су сумарни бројеви мерних места која задовољавају критеријуме валидације.

Табела 7.1. Сумарна табела релативне грешке модела за температуру ваздуха

<i>T_a, Error < 5 %</i>						
МОДЕЛ						
ММ	0-2	A-2	C-2	B-2	A-B	C-B
1	0.608	1.494	1.384	5.125	3.733	3.744
2	7.312	10.906	7.944	3.617	1.350	1.796
3	7.810	3.789	1.502	2.561	0.428	2.329
4	4.725	2.010	0.156	4.790	3.727	5.517
5	4.759	6.694	5.760	4.556	1.985	2.186
6	7.318	9.920	9.334	2.290	1.063	1.156
7	10.106	12.197	8.781	3.803	0.634	1.267
8	6.430	4.182	1.943	4.162	3.598	5.008
9	7.313	3.516	3.284	3.899	3.007	3.950
10	7.931	7.522	6.230	4.035	0.609	1.298
11	11.850	9.263	8.340	3.197	1.694	1.749
12	9.409	11.305	8.020	3.609	0.792	2.044
13	13.325	5.192	1.270	4.744	2.154	3.831
14	5.335	1.749	0.539	5.115	3.540	5.366
15	10.572	7.149	6.203	3.183	0.806	1.556
ВАЛИДНО	3	6	7	13	15	12

Табела 7.2. Сумарна табела релативне грешке модела за радијантну температуру

<i>T_r, Error < 5 %</i>						
МОДЕЛ						
ММ	0-2	A-2	C-2	B-2	A-B	C-B
1	10.556	10.556	10.556	6.070	8.013	8.024
2	2.637	2.637	2.637	1.081	0.948	0.953
3	5.568	5.568	5.568	0.791	2.497	2.522
4	0.936	0.936	0.936	3.526	1.988	1.976
5	4.785	4.785	4.785	0.607	2.291	2.303
ВАЛИДНО	3	3	3	4	4	4

Табела 7.3. Сумарна табела релативне грешке модела за *PPD*

<i>PPD, Error < 30%</i>						
МОДЕЛ						
MM	0-2	A-2	C-2	B-2	A-B	C-2
11	184.12	114.96	112.98	43.75	2.29	0.99
12	159.50	163.63	166.57	73.04	53.29	51.46
13	67.22	40.30	46.95	33.59	3.10	0.91
14	140.83	5.95	2.41	54.34	16.60	24.50
15	63.19	3.64	3.93	56.85	5.54	5.80
21	165.73	203.50	208.76	26.52	17.77	15.70
22	116.74	168.18	174.65	38.71	40.77	40.91
23	74.57	104.57	115.00	24.40	9.64	11.74
24	156.13	99.81	105.81	28.42	39.25	42.72
25	42.03	27.51	27.36	57.13	16.62	16.27
31	68.77	117.01	124.57	11.88	12.27	10.71
32	136.42	131.16	136.96	31.10	37.06	38.66
33	82.81	68.87	73.99	26.41	23.88	24.21
34	100.90	22.33	23.36	47.83	6.71	0.45
35	95.60	13.81	13.66	56.86	14.79	16.48
41	129.14	110.65	109.31	12.75	41.68	40.33
42	160.59	132.63	139.35	38.34	4.59	1.43
43	92.32	74.59	58.26	19.40	18.67	19.01
44	74.68	113.32	112.43	28.49	1.36	21.47
45	98.08	5.72	1.54	78.44	19.40	19.98
51	44.97	60.35	69.03	18.90	26.30	25.54
52	53.30	106.05	109.98	6.40	10.43	12.79
53	62.75	47.92	62.77	9.77	8.12	9.28
54	77.77	34.00	59.98	14.47	5.08	13.40
55	138.85	69.43	83.97	52.51	11.73	6.86
61	34.55	27.35	29.55	4.16	49.46	48.64
62	80.27	68.80	78.01	23.47	30.15	28.16
63	108.62	65.50	57.87	8.68	6.68	6.17
64	86.77	29.34	38.06	18.27	3.22	0.91
65	190.25	15.79	36.50	64.53	21.21	19.91
ВАЛИДНО	0	9	7	16	23	24

На основу приказаних релативних грешака по мерним местима, одређена је средња релативна грешка за комплетну учионицу према изразу 7.2 и приказана у табели 7.4.

$$Total\ Error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Error_i \quad [\%] \quad (7.2)$$

Табела 7.4. Средња релативна грешка модела

<i>Total Error %</i>			
ПАРАМЕТАР			
МОДЕЛ	<i>Ta (%)</i>	<i>Tr (%)</i>	<i>PPD (%)</i>
0-2	7.653	4.896	102.917
A-2	6.459	4.896	74.888
C-2	4.713	4.896	79.452
B-2	3.912	2.415	33.647
A-B	1.941	3.147	18.588
C-B	2.853	3.156	19.181

7.3. АНАЛИЗА СТАТИСТИЧКИХ ПАРАМЕТАРА ВАЛИДАЦИЈЕ МОДЕЛА

Додатни показатељи валидације модела који дају знатно детаљнију слику о квалитету нумеричких модела базирају се на процени додатних статистичких показатеља, дефинисаних изразима 7.3 и 7.4 [36,37], и усвојених критеријума 7.5 [38,39,40].

– Додатни статистички параметри

$$FB = \frac{\bar{\Phi}_{exp} - \bar{\Phi}_{cfd}}{0.5 \cdot (\bar{\Phi}_{exp} + \bar{\Phi}_{cfd})}$$

$$MG = \exp\left(\ln(\bar{\Phi}_{exp}) - \ln(\bar{\Phi}_{cfd})\right)$$

$$NMSE = \frac{(\bar{\Phi}_{exp} - \bar{\Phi}_{cfd})^2}{\bar{\Phi}_{exp} \cdot \bar{\Phi}_{cfd}}$$

7.3

$$VG = \exp\left[\left(\ln \bar{\Phi}_{exp} - \ln \bar{\Phi}_{cfd}\right)^2\right]$$

$$FAC2 = \frac{\bar{\Phi}_{cfd}}{\bar{\Phi}_{exp}}$$

где су:

FB - Парцијално одступање (*Fractional Bias*);

MG - Средње геометријско одступање (*Geometric Mean Bias*);

NMSE - Нормализована средња квадратна грешка (*Normalized Mean Square Error*);

VG - Геометријска варијанса (*Geometric Variance*);

FAC2 - Фактор поређења две вредности истог параметра: експерименталног и нумеричког (*Factor of Two*).

- **Параметар оцењивања (*Hit Rate*)**

$$q = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n$$

$$i_n = \begin{cases} 1 & \text{ако је: } \left| (\Phi_{exp,n} - \Phi_{cfd,n}) / \Phi_{exp,n} \right| \leq D \text{ или } \left| \Phi_{exp,n} - \Phi_{cfd,n} \right| \leq W \\ 0 & \text{за све остале случајеве} \end{cases} \quad (7.4)$$

где је:

q - параметар оцењивања;

i_n - парцијална оцена (0 или 1);

D - критеријум максималне релативне грешке (5% за температуру ваздуха и радијантну температуру, 30% за *PPD*);

W - критеријум апсолутне вредности разлике;

N - укупан број експерименталних и нумеричких парова података за оцењивање.

Да би се извршила коначна процена валидности модела у поређењу са експериментом, очигледан је закључак да је идеалан модел онај који задовољава услове да су вредности статистичких параметара *MG*, *VG*, *q* и *FAC2* једнаки јединици, а вредности статистичких параметара *FB*, *NMSE* једнаки нули. Међутим, ове идеалне услове је веома тешко постићи, па је неопходно усвојити одређене критеријуме за ове параметре који дају оцену успешне валидације модела. Усвојени критеријуми су дати изразом 7.5 [38, 39], а у табелама 7.5 до 7.7 сумиране су вредности специфицираних статистичких показатеља за температуру ваздуха, радијантну температуру и *PPD*.

$$\begin{aligned}
|FB| &< 0.3 \\
MG &0.7 < MG < 1.3 \\
NMSE &< 1.5 \\
VG &< 4 \\
FAC2 &0.5 \leq FAC2 \leq 2.0 \\
q &\geq 0.66
\end{aligned}
\tag{7.5}$$

Следећи исти принцип приказа валидних података у табелама, поља обојена плавом бојом и црним словима су нумерички модели која задовољавају критеријуме, а поља обојена црвеном бојом и белим словима су нумерички модели који не задовољавају усвојене критеријуме.

Табела 7.5. Статистички параметри валидације модела за температуру ваздуха.

ТЕМПЕРАТУРА ВАЗДУХА								ОЦЕНА
МОДЕЛ	$T_{a,sr,exp}$	$T_{a,sr,cfd}$	FB	MG	$NMSE$	VG	$FAC2$	q
0-2	20.405	21.951	0.0730	0.930	0.0063	1.006	1.076	0.200
A-2	20.405	21.720	0.0624	0.940	0.0050	1.005	1.065	0.400
C-2	20.405	21.363	0.0459	0.955	0.0031	1.003	1.047	0.467
B-2	20.405	19.605	0.0400	1.041	0.0017	1.002	0.961	0.867
A-B	20.405	20.008	0.0196	1.020	0.0005	1.001	0.981	1.000
C-B	20.405	19.821	0.0290	1.029	0.0011	1.001	0.971	0.800

Табела 7.6. Статистички параметри валидације модела за радијантну температуру

РАДИЈАНТНА ТЕМПЕРАТУРА								ОЦЕНА
МОДЕЛ	Tr,sr,exp	Tr,sr,cfd	FB	MG	$NMSE$	VG	$FAC2$	q
0-2	20.767	19.732	0.0511	1.052	0.0038	1.004	0.951	0.600
A-2	20.767	19.732	0.0511	1.052	0.0038	1.004	0.951	0.600
C-2	20.767	19.732	0.0511	1.052	0.0038	1.004	0.951	0.600
B-2	20.767	20.655	0.0054	1.005	0.0011	1.001	0.996	0.800
A-B	20.767	20.259	0.0247	1.025	0.0018	1.002	0.976	0.800
C-B	20.767	20.256	0.0249	1.025	0.0018	1.002	0.976	0.800

Табела 7.7. Статистички параметри валидације модела за индикатор *PPD*

<i>PPD</i>								ОЦЕНА
МОДЕЛ	<i>PPD,sr,exp</i>	<i>PPD,sr,efd</i>	<i>FB</i>	<i>MG</i>	<i>NMSE</i>	<i>VG</i>	<i>FAC2</i>	<i>q</i>
0-2	12.250	24.389	0.6626	0.504	0.5695	1.672	2.029	0.000
A-2	12.250	21.575	0.5514	0.621	0.5304	1.428	1.711	0.300
C-2	12.250	22.202	0.5778	0.602	0.5643	1.467	1.762	0.233
B-2	12.250	15.633	0.2427	0.769	0.0889	1.106	1.321	0.533
A-B	12.250	12.087	0.0134	1.040	0.0709	1.064	0.990	0.767
C-B	12.250	12.401	0.0123	1.014	0.0706	1.064	1.016	0.800

На основу анализе грешака и статистичких параметара валидације модела, може се закључити да модели A-B и C-B задовољавају критеријуме валидације према параметрима температуре ваздуха, радијантне температуре и индикатора PPD.

ГЛАВА 8

8.1. ПРИКАЗ И АНАЛИЗА НУМЕРИЧКИХ РЕЗУЛТАТА

У овој глави издвојени су и приказани најбитнији резултати нумеричких симулација модела чији су детаљи дати у табели 6.2. У принципу, од шест модела који су истраживани, издвајају се три кључна модела:

1. Модел 0_2 као полазни (основни) модел који је базиран на стандардном $k - \varepsilon$ моделу турбуленције и стандардном моделу зрачења (нетранспарентан медијум). Ови модели су стандардно уграђени у софтверски програм PHOENICS (посебан модул: FLAIR);
2. Други карактеристичан модел је C_2 који је карактеристичан по увођењу првог доприноса ове дисертације, а везан је за модификацију $k - \varepsilon$ модела увођењем додатних чланова у k и ε једначинама са променљивом константом $C_{\varepsilon 3}$;
3. Трећи карактеристичан модел је C_V који је карактеристичан по увођењу другог доприноса дисертације, а везан је за модификацију модела зрачења третирањем ваздуха као нетранспарентне средине. У овом моделу је уграђен и први допринос, односно и модификовани $k - \varepsilon$ модел.

Преостала три модела представљају комбинацију наведених кључних модела, тако да њихова анализа није од великог значаја. За наведена три кључна модела (0_2, C_2 и C_V) приказане су дистрибуције физичких параметара и индикатора топлотног комфора у хоризонталној равни на висини од 0.8m (висина главе ученика). Скале приказаних резултата су исте за све моделе како би се могла уочити разлика дистрибуције параметара у добијеним моделима за сваки параметар посебно. Такође, дате су и вредности параметара у идентичној позицији нумеричке сонде (*Probe value*), као и просечне вредности параметра у датој хоризонталној равни (*Average value*) ради доношења коначних закључака.

Приказ и анализа нумеричких параметара је груписана у три целине:

1. Брзинско поље и турбулентне карактеристике (слике 8.1 до 8.4);
2. Топлотне карактеристике и концентрација (слике 8.5 до 8.8);
3. Индикатори топлотног комфора (слике 8.9 до 8.12).

8.2. АНАЛИЗА ПОЉА БРЗИНЕ ВАЗДУХА И ТУРБУЛЕНТНИХ КАРАКТЕРИСТИКА

Анализа поља брзине ваздуха и турбулентних карактеристика се односи на анализу расподеле следећих физичких параметара струјања:

- Модул (интензитет) брзине ваздуха (слика 8.1):

$$V = \left(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 \right)^{1/2}; [\text{m/s}] \quad (8.1)$$

- Интензитет турбуленције (слика 8.2):

$$In = 100 \cdot k^{1/2} / V; [\%] \quad (8.2)$$

- Турбулентна дужинска размера (слика 8.3):

$$\ell = k^{3/2} / \varepsilon; [\text{m}] \quad (8.3)$$

- Реципрочна вредност турбулентне временске размере (слика 8.4):

$$1/\tau = \varepsilon / k; [\text{s}^{-1}] \quad (8.4)$$

Коментари и закључци добијених расподела ових физичких параметара струјања се односе на општу слику расподеле у хоризонталној равни учионице на висини од 0.8m, вредности физичког параметра на позицији нумеричке сонде (означена симболом црвене оловке – *Probe value*) и средњој вредности физичког параметра у тој равни (*Average value*).

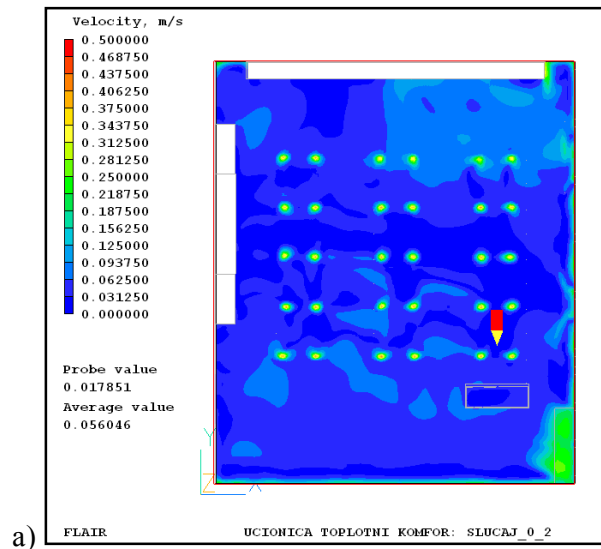
Хоризонтална раван учионице на висини од 0.8m је изабрана јер је то раван висине глава ученика, где је утицај физичких параметара на субјективни осећај ученика најизраженији. Увидом у расподеле физичких параметара струјања, могу се уочити следеће чињенице:

- Вредности модула (интензитета) брзине струјања ваздуха на позицији нумеричке сонде најмањи је код модела 0_2 (0.017851 m/s), а највећи код модела C_V (0.052738 m/s);
- Исти закључак важи и за средње вредности модула (интензитета) брзине струјања ваздуха. Добијене су вредности за модел 0_2 (0.050046 m/s), а за модел C_V (0.071235 m/s);
- Модел C_2 даје међувредности, и то на позицији нумеричке сонде (0.02453 m/s), а средња вредност модула (интензитета) брзине струјања ваздуха за овај модел је приближно иста као код основног модела 0_2 (0.055763 m/s);
- Слични закључци важе и за интензитет турбуленције, са том разликом што модел C_2 даје значајније већу вредност (42.80186 %), у односу на моделе 0_2 (20.02866 %) и модел C_V (36.63645 %);

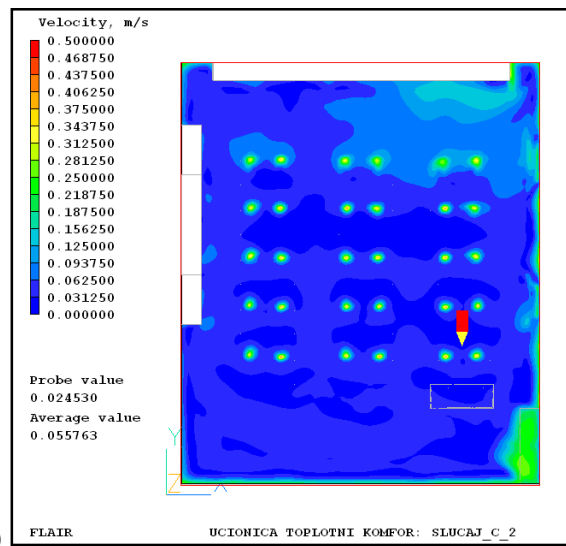
- Исти тренд важи и за турбулентну дужинску размеру, како на позицији нумеричке сонде, тако и за средње вредности;
- Иако постоје разлике, просечна вредност реципрочне вредности временске размере турбуленције је за моделе 0_2 и C_2 приближно иста (0.133423, 0.133774 s⁻¹, респективно), док је за модел C_V добијена просечна вредност (0.124892 s⁻¹).

Имајући на уму карактеристике модела 0_2, C_2 и C_V које су у математичкој форми дефинисане у глави 5, а сумиране у табели 6.2, квантификацију модела у поређењу са експерименталним резултатима што је детаљно објашњено у глави 7, као и претходно уочених чињеница у расподели физичких параметара, могу се дати следећи закључци:

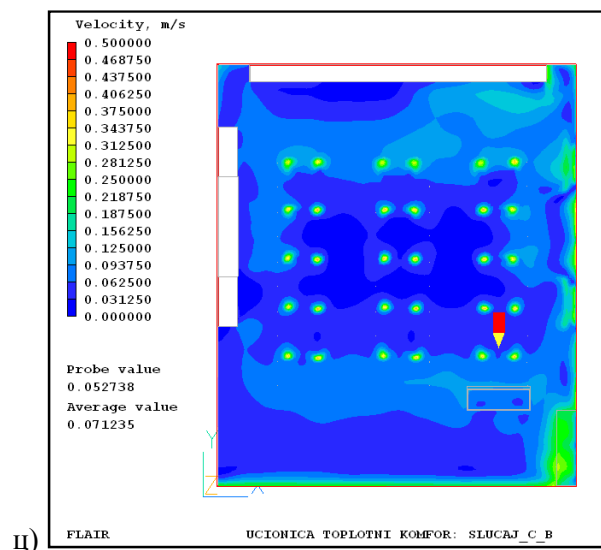
1. *С обзиром да је у процесу валидације модела у поређењу са експериментом јасно да је модел C_V дао најбоље резултате, коментари ће се односити на поређење овог модела са остала два;*
2. *У презентованој класи турбулентног струјања природне конвекције, турбулентни параметри имају значајну улогу;*
3. *Знајући да две кључне турбулентне размере, дужинска и брзинска одређују карактер турбулентног струјања, може се закључити да учињене модификације у турбулентном моделу увођењем променљиве вредности емпијског коефицијента $C_{\varepsilon 3}$ и посредним топлотним ефектима нетранспарентне средине унетим у модификацији модела зрачења дају ситнију структуру доминантних вртлога и њихово дужије трајање;*
4. *Претходни закључак је у сагласности са нивоом добијених интензитета турбуленције, што у крајњем резултира у нивоу брзина струјања основног тока;*
5. *Имајући на уму да ниво брзине струјања ваздуха и интензитет турбуленције директно утичу на вредности основних индикатора топлотног комфора, добијене вредности у моделу C_V су дале најбоље резултате, чиме су оправдано уведене модификације модела турбуленције и модела преноса топлоте зрачењем.*



a)

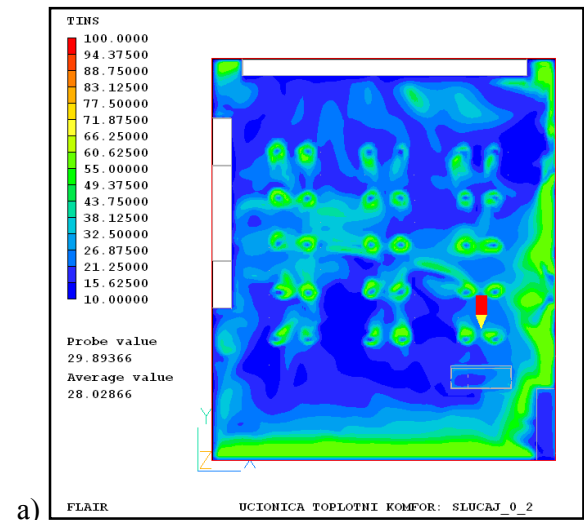


б)

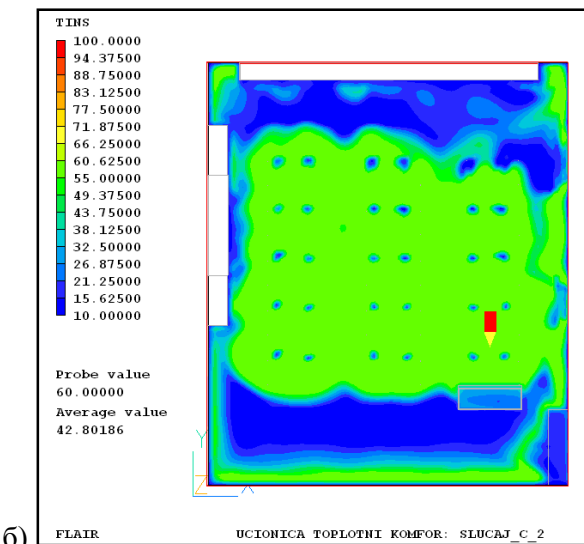


в)

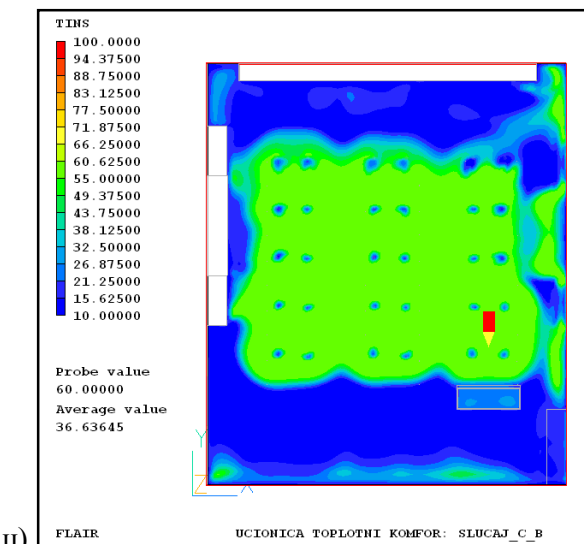
Слика 8.1. Брзине ваздуха:
а) Модел 0_2; б) Модел С_2; в) Модел С_В



a)

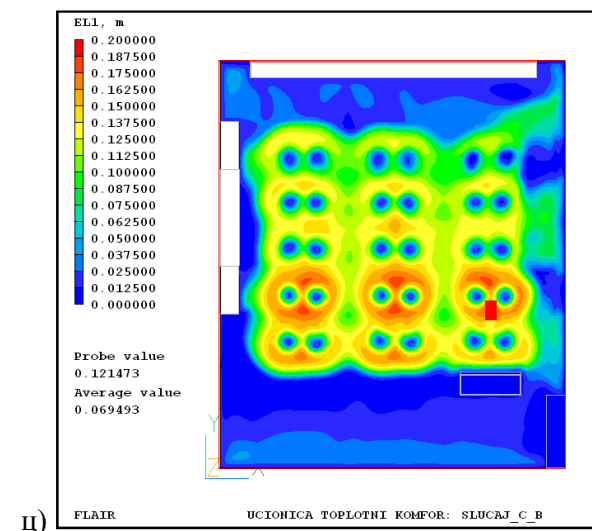
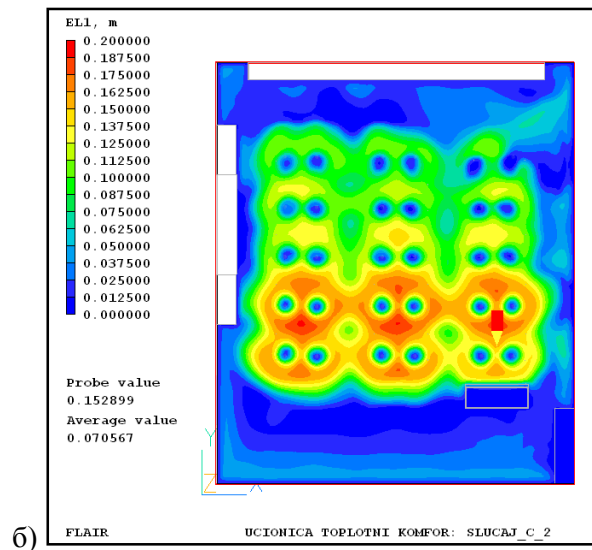
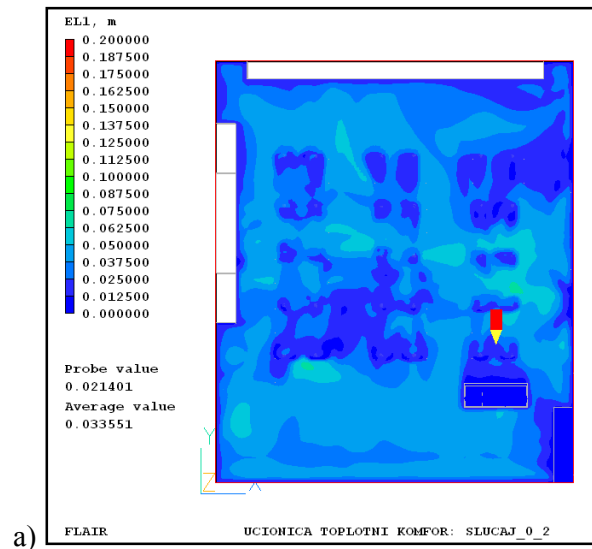


б)

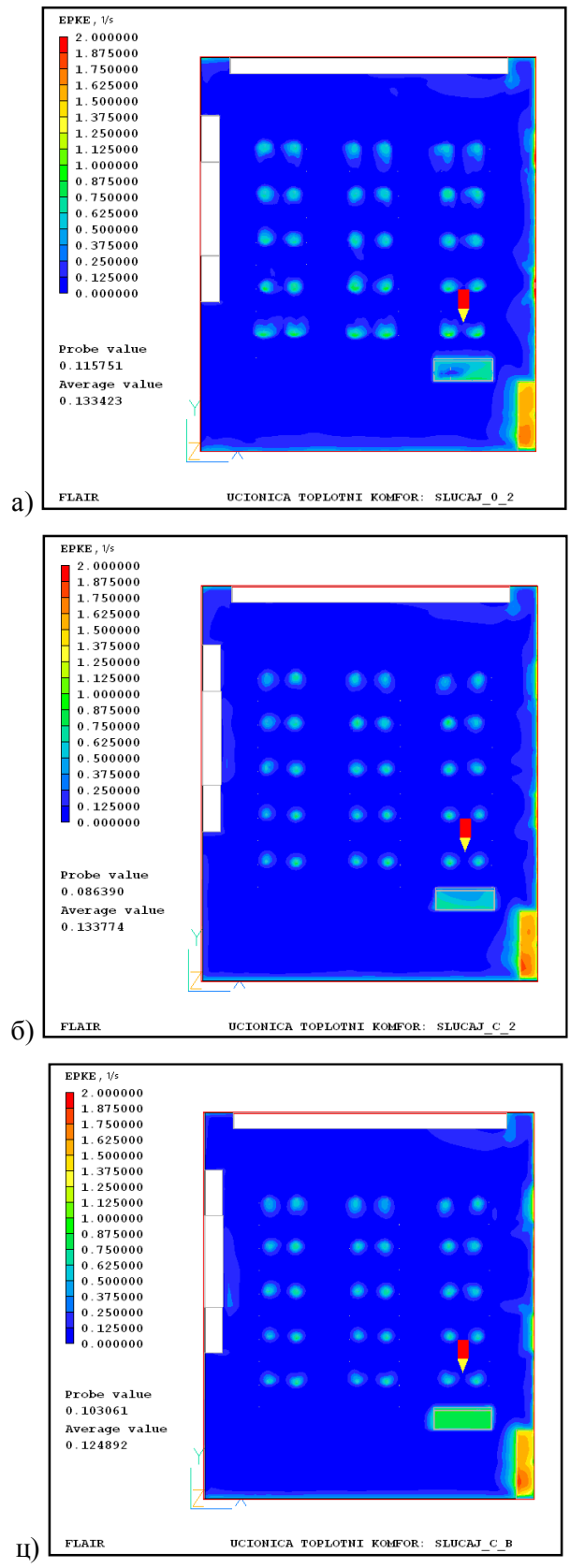


в)

Слика 8.2. Интензитет турбуленције:
а) Модел 0_2; б) Модел C_2; в) Модел C_B



Слика 8.3. Турбулентна дужинска размера:
а) Модел 0_2; б) Модел C_2; ц) Модел C_B



Слика 8.4. Реципрочна вредност турбулентне временске размере:
 а) Модел 0_2; б) Модел С_2; ц) Модел С_В

8.3. АНАЛИЗА ПОЉА ТОПЛОТНИХ КАРАКТЕРИСТИКА И КОНЦЕНТРАЦИЈЕ УГЉЕН-ДИОКСИДА

На сличан начин анализирана су добијена поља топлотних карактеристика и концентрације угљен-диоксида у истој хоризонталној равни учионице. Анализирани су следећи физички параметри:

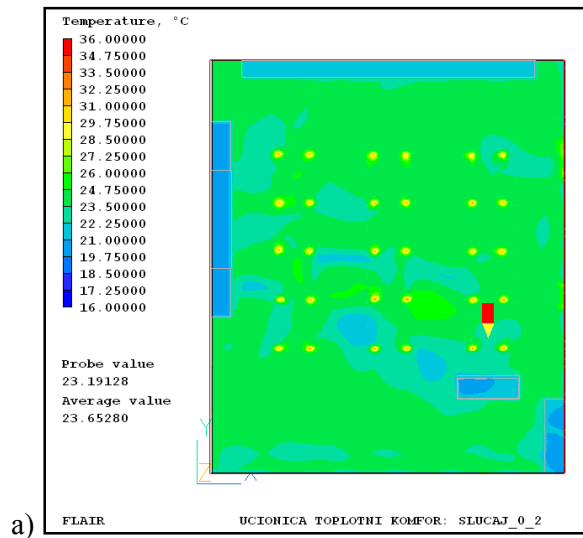
- Температура ваздуха: t_a [$^{\circ}\text{C}$];
- Радијантна температура: t_r [$^{\circ}\text{C}$];
- Вертикални специфични топлотни флуks зрачења: q_3 [W/m^2];
- Концентрација угљен-моноксида: CO_2 [ppm_v].

Увидом у расподеле физичких параметара топлотних карактеристика и концентрације угљен-диоксида, могу се уочити следеће чињенице:

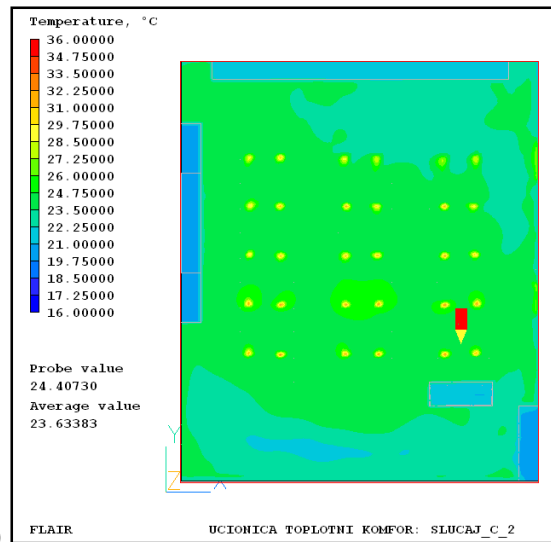
- Вредности температуре ваздуха на месту нумеричке сонде и средње вредности су најмање у моделу C_V, у поређењу са друга два модела, и то у нивоу од 1 до 2°C ;
- Супротан закључак важи за радијантну температуру, али је ниво радијантне температуре у моделу C_V за приближно 0.5 до 0.7°C већи у односу на друга два модела;
- Средњи специфични вертикални топлотни флуks зрачења је за један ред величине мањи за модел C_V ($0.399217 \text{ W}/\text{m}^2$) у односу на друга два модела који су приближно исте вредности ($5.84 \text{ W}/\text{m}^2$);
- Иако има незнатне разлике, може се закључити да је средња вредност концентрације угљен-диоксида приближно иста у свим моделима.

Имајући на уму карактеристике модела θ_2 , C_2 и C_V које су у математичкој форми дефинисане у глави 5, а сумиране у табели 6.2, квантификацију модела у поређењу са експерименталним резултатима што је детаљно објашњено у глави 7, као и претходно уочених чињеница у расподели физичких параметара, могу се дати следећи закључци:

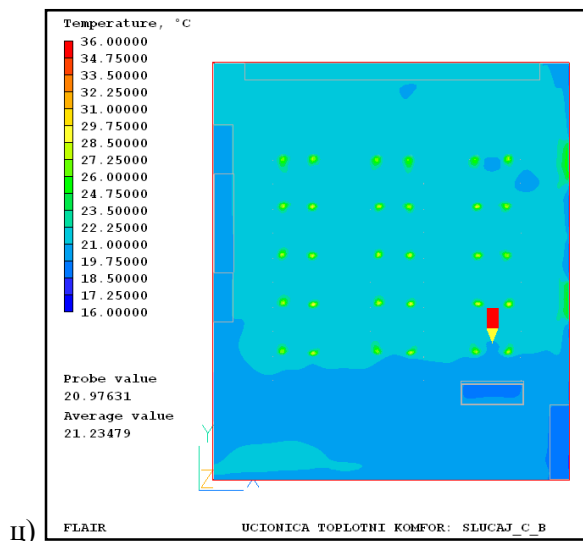
- 1. Доминантну улогу у расподели топлотних карактеристика и њиховим вредностима има модел зрачења.*
- 2. Овај закључак је лако уочљив увидом у нивое средњих вредности температуре ваздуха, радијантне температуре и специфичног вертикалног топлотног флуksа зрачења за моделе θ_2 и C_2 јер су ови параметри приближно исти за ова два модела. Другим речима, основна разлика топлотних карактеристика у односу на модел C_V је последица учињене модификације у моделу преноса топлоте зрачењем, док је утицај модификације модела турбуленције од мањег значаја.*
- 3. Ова ситуација је очекивана с обзиром на укључивање контаминираниог ваздуха као апсорбера и емитера топлотне енергије у механизму преноса топлоте зрачењем, што се најбоље види поређењем вредности средњег специфичног вертикалног топлотног флуksа зрачења.*
- 4. Најмањи утицај учињених модификација је на расподелу концентрације угљен-диоксида. Основни разлог овој ситуацији је што се дифузионе турбулентне карактеристике угљен-диоксида (најодговорнији механизам турбулентног мешања) нису значајно промениле увођењем наведених модификација турбулентног модела.*
- 5. Закључци о вредностима температуре ваздуха и радијантне температуре директно утичу на вредности основних индикатора топлотног комфора.*



a)

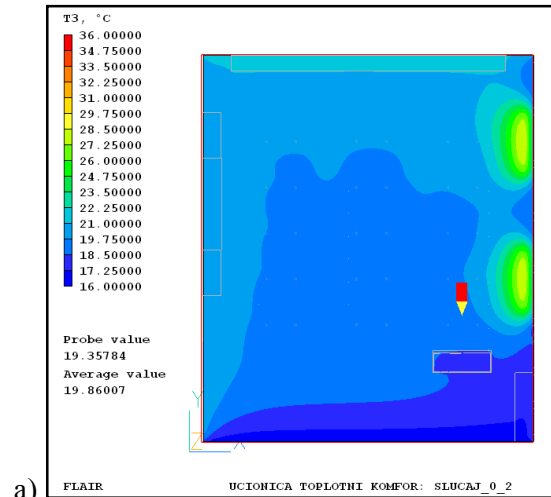


б)

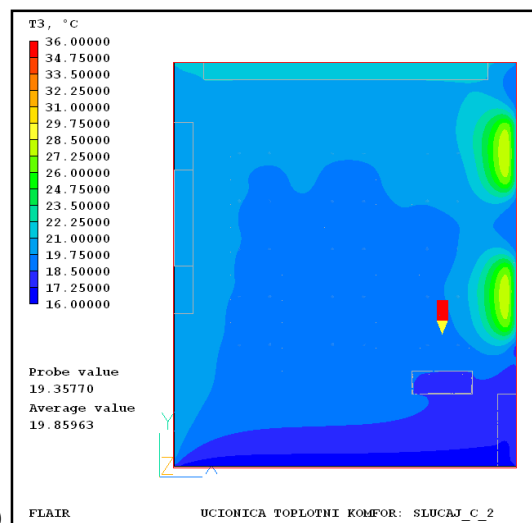


в)

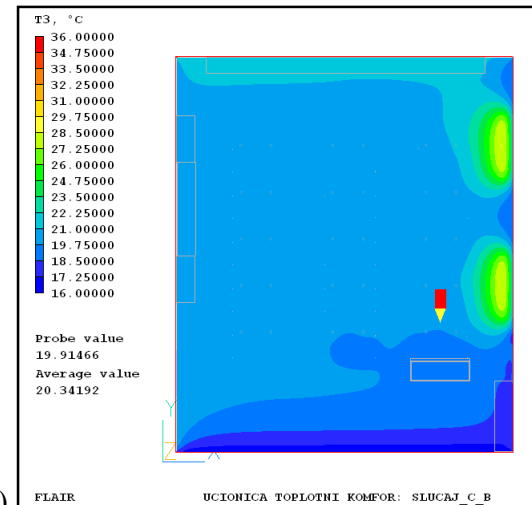
Слика 8.5. Температура ваздуха:
а) Модел 0_2; б) Модел С_2; в) Модел С_В



a)

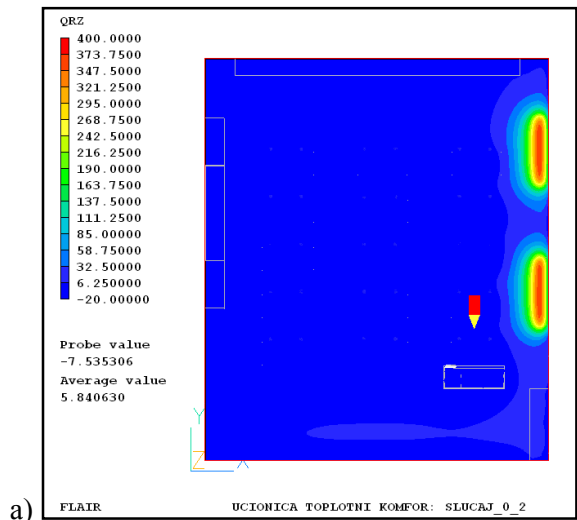


б)

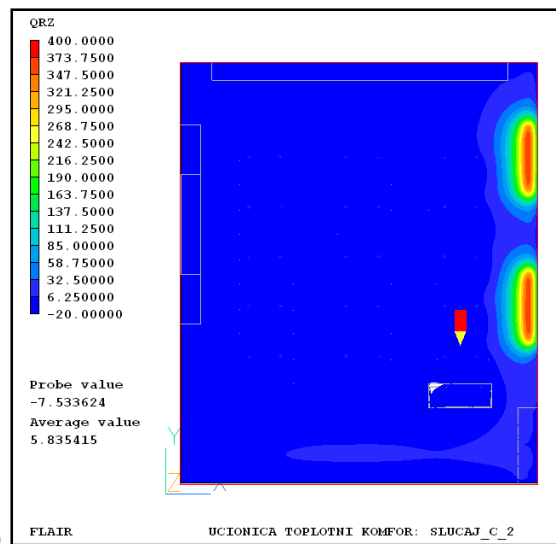


в)

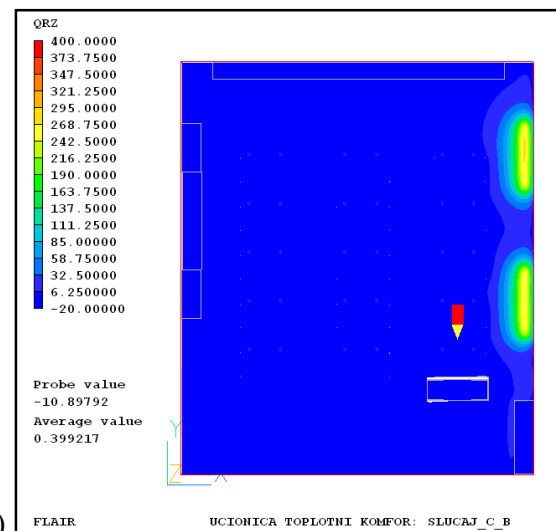
Слика 8.6. Радијантна температура:
а) Модел 0_2; б) Модел C_2; в) Модел C_B



a)



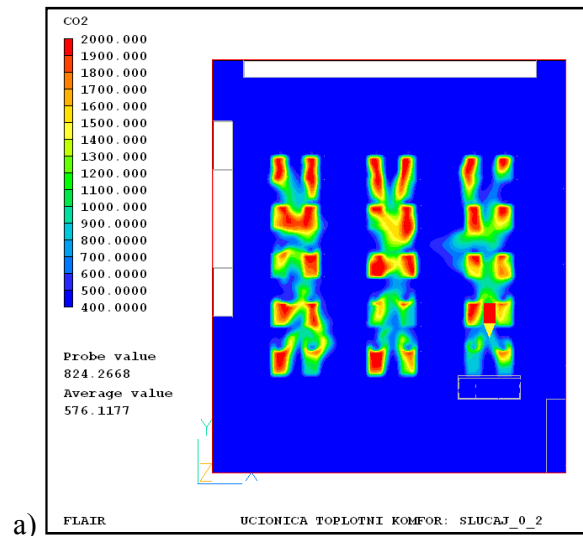
б)



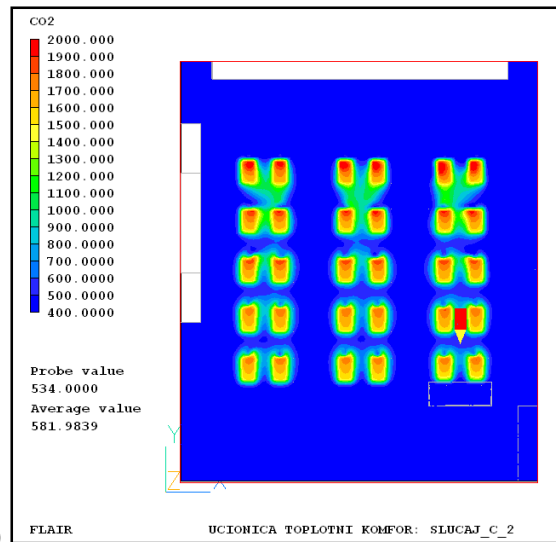
в)

Слика 8.7. Специфични вертикални флуks зрачења:

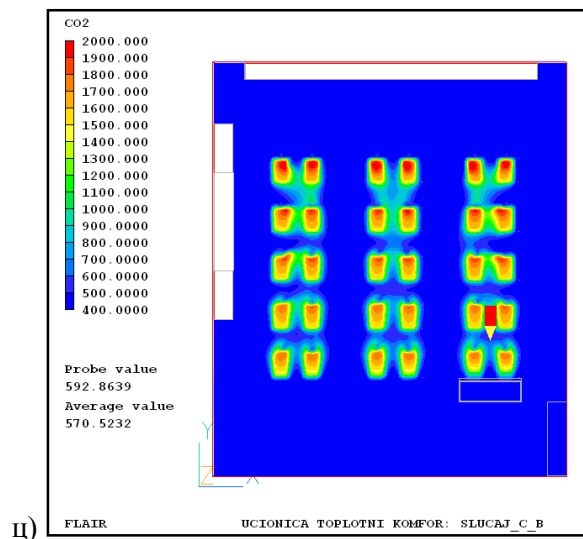
а) Модел 0_2; б) Модел C_2; в) Модел C_B



a)



б)



ц)

Слика 8.8. Концентрација CO₂:
а) Модел 0_2; б) Модел C_2; ц) Модел C_B

8.4. АНАЛИЗА ПОЉА ИНДИКАТОРА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА

Анализа добијених нумеричких вредности индикатора топлотног комфора је у принципу најважнија јер сублимира вредности физичких параметара струјања, турбулентних карактеристика и топлотних карактеристика. Разматрају се три основна индикатора топлотног комфора:

- Оперативна температура [22]:

$$t_{op} = \frac{t_r + t_a \sqrt{10 \cdot U_a}}{1 + \sqrt{10 \cdot U_a}}; [^{\circ}\text{C}] \quad (8.5)$$

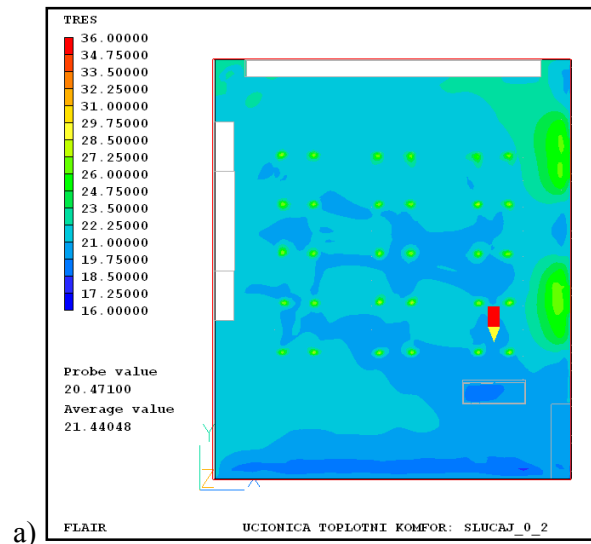
- PMV, [16]
- PPD, [16].

И у овом случају, анализа ће се односити на репрезентативни хоризонтални пресек учioniце на нивоу глава ученика од 0.8m (слике 8.9, 8.10 и 8.12). На слици 8.11 приказана је детаљна расподела индикатора PMV по површини тела ученика. Увидом у локалне вредности индикатора топлотне угодности на месту нумеричке сонде, као и средњих вредности ових индикатора у репрезентативном хоризонталном пресеку уочавају се следеће чињенице:

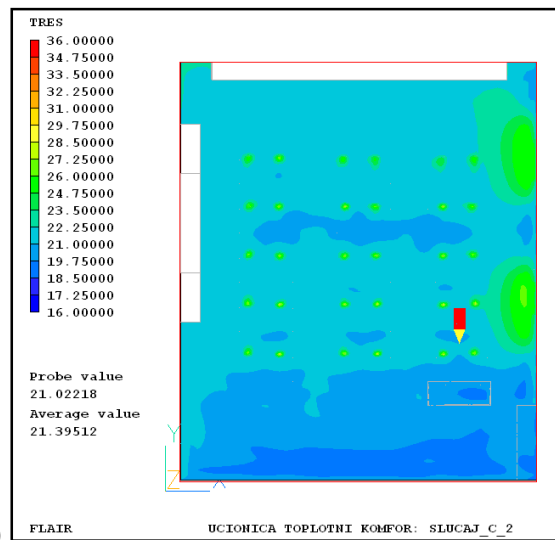
- Вредност оперативне температуре је у моделу C_V мања је за приближно 0.5 до 0.7°C у односу на друга два модела;
- Средња вредност PMV је у моделу C_V за два реда величина већа по апсолутној вредности у односу на друга два модела (-0.288274 у поређењу са -0.005724 за модел 0_2, односно 0.007923 за модел C_2);
- Сходно вредностима PMV, и вредности PPD се разликују. Како је однос између PMV и PPD експоненцијалног карактера, проценат незадовољних у моделу C_V је за око 1.5% већи у односу на вредности овог индикатора у моделима 0_2 и C_2.

На основу уочених чињеница о расподели индикатора за репрезентативне моделе, могу се донети следећи закључци:

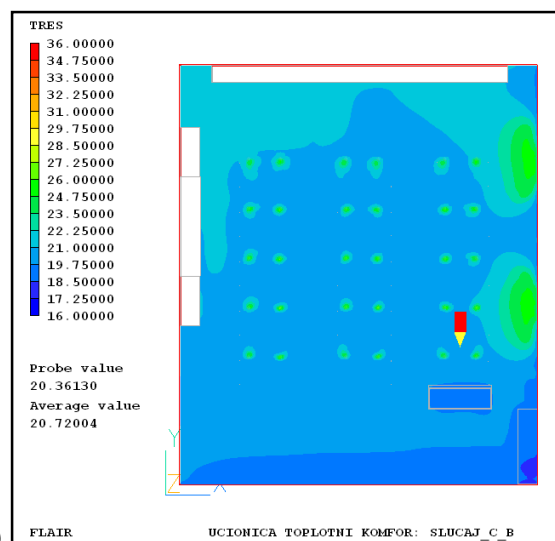
1. *Како је PPD најрепрезентативнији индикатор топлотног комфора, јер у себи директно и посредно сублимира друга два индикатора, оперативну температуру и PMV, он је изабран као кључни параметар валидације модела, што је приказано у глави 7. Увидом у табелу 7.7 може се закључити да једино модели A_B и C_B задовољавају услове валидације, што указује на веома важан закључак да је допринос у модификацији модела преноса топлоте зрачењем значајнији са аспекта коначног циља тачног одређивања индикатора топлотног комфора у односу на учињени допринос у модификацији турбулентног модела.*
2. *Овај закључак се могао и очекивати за ову класу струјања. Наиме, увидом у слику 5.2 која даје расподелу вредности емпиријског коефицијента $C_{\varepsilon 3}$ може се закључити да је вредност овог коефицијента у највећем делу хоризонталног пресека учионице на висини од 0.8m једнак јединици (поготово око ученика и топлотних извора). Вредност коефицијента $C_{\varepsilon 3}$ указује на доминантан вертикални правац конвективног струјања, што смањује разлику у моделима A_B и C_B, тако да се у првој апроксимацији, модел турбуленције може узети и са константном вредношћу $C_{\varepsilon 3} = 1.0$ а да се задовоље услови валидације.*
3. *Међутим, овај закључак не важи за модел преноса топлоте зрачењем, јер се једино модификацијом овог модела задовољавају критеријуми валидације.*
4. *Увидом у дистрибуцију индикатора PMV по телу ученика датој на слици 8.11 добијене су логичне расподеле: најхладније на ногама а најтоплије на пределу главе и груди што је у сагласности са напоменама датим у глави 2 и експерименталним резултатима.*



a)

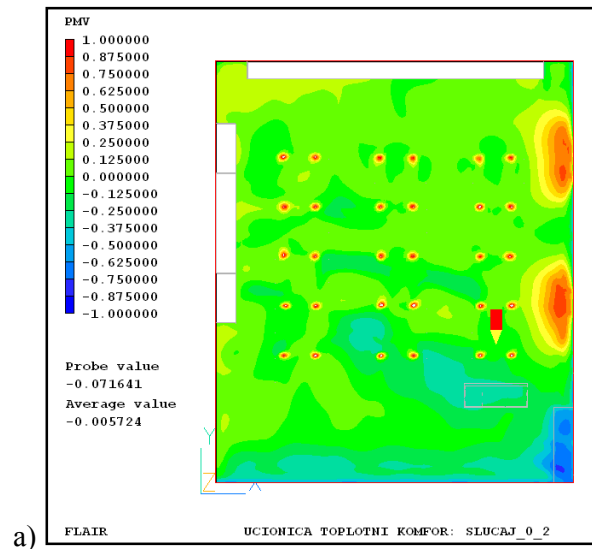


б)

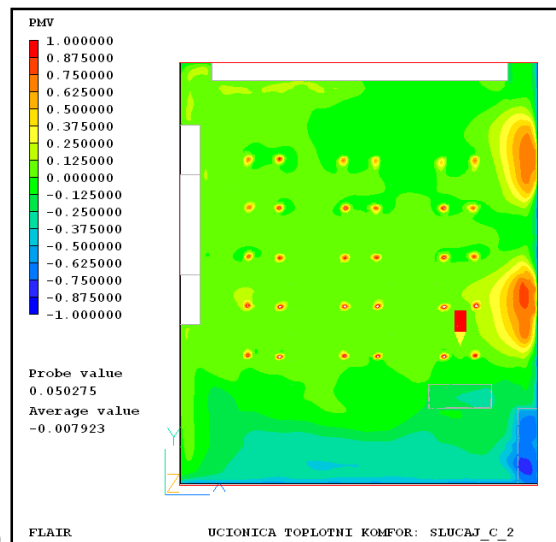


ц)

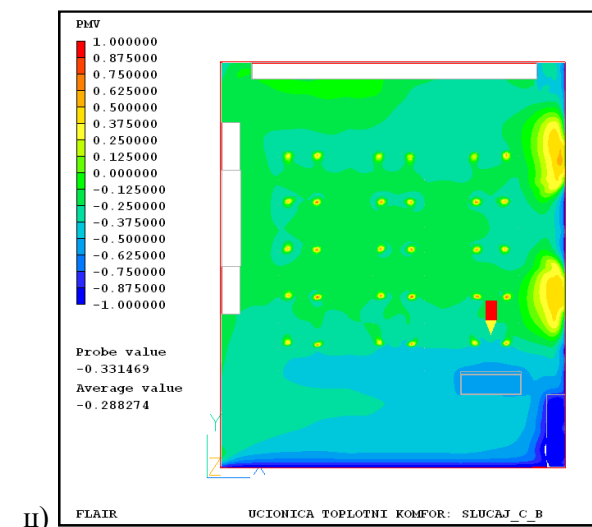
Слика 8.9. Индикатор топлотног комфора – Оперативна температура:
а) Модел 0_2; б) Модел С_2; ц) Модел С_В



a)

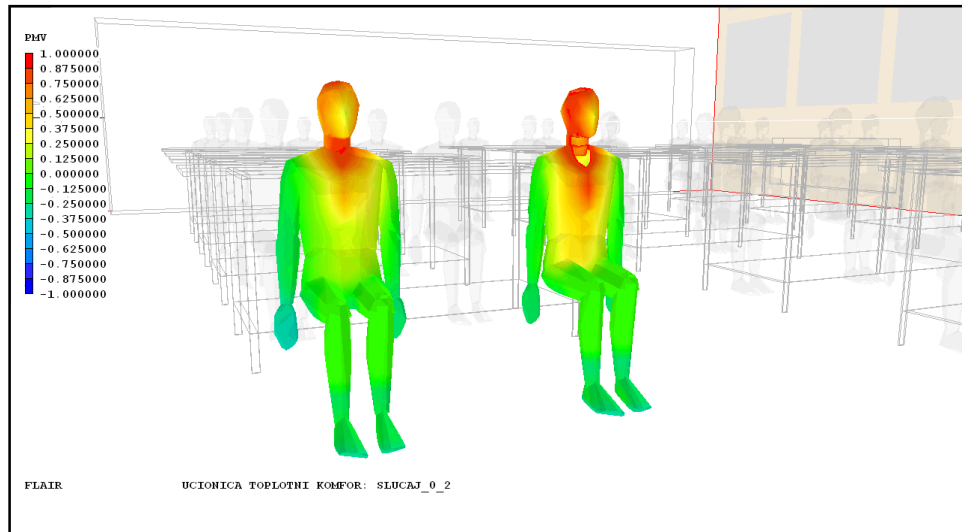


б)

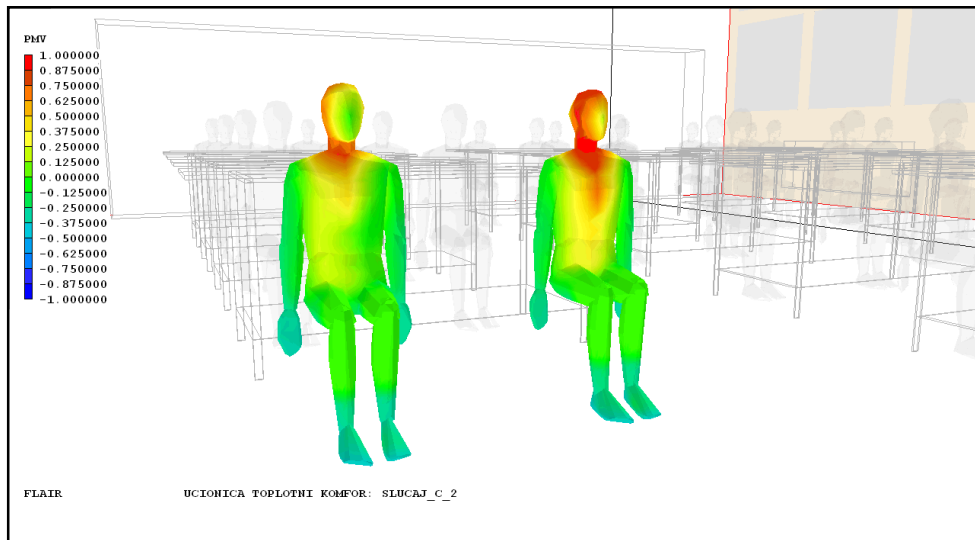


ц)

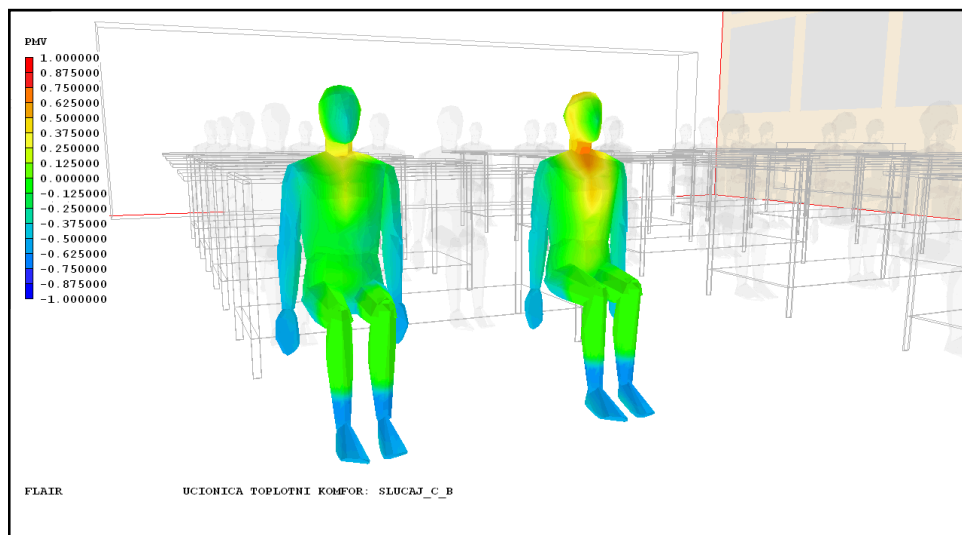
Слика 8.10. Индикатор топлотног комфора – PMV:
а) Модел 0_2; б) Модел C_2; ц) Модел C_B



a)

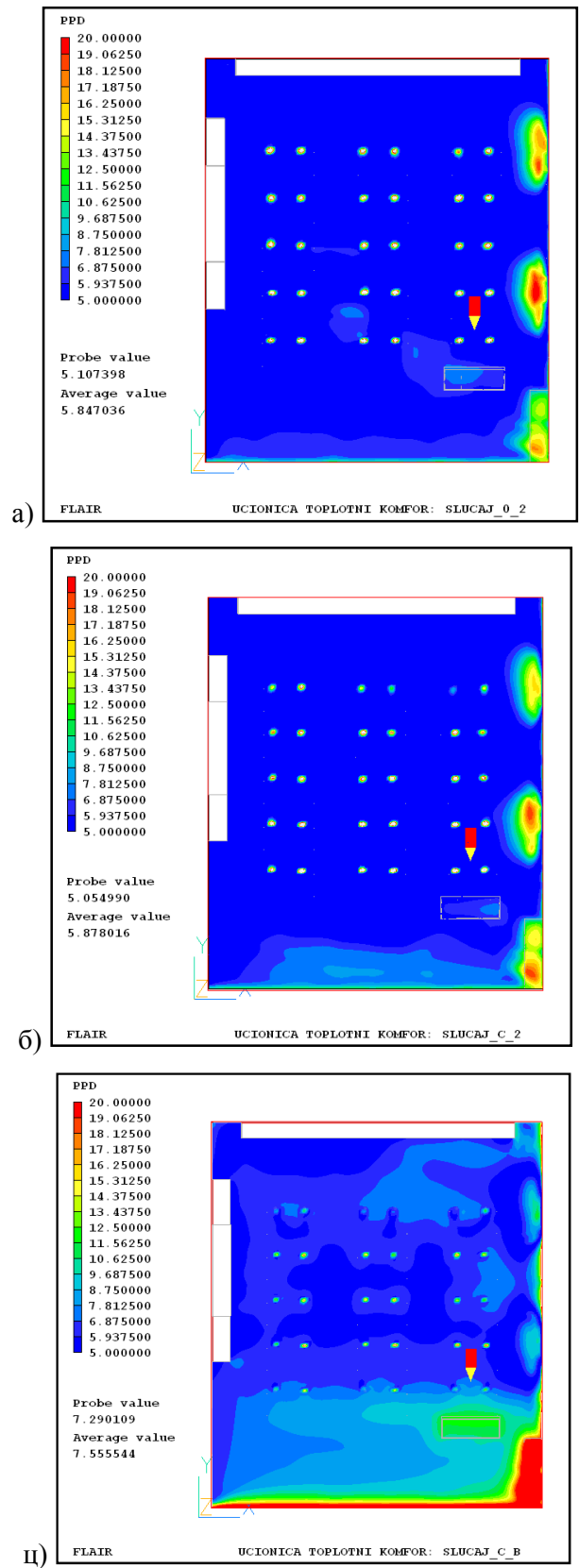


б)



ц)

Слика 8.11. Индикатор топлотног комфора - PMV ученика:
 а) Модел 0_2; б) Модел С_2; ц) Модел С_В



Слика 8.12. Индикатор топлотног комфора – PPD:
 а) Модел 0_2; б) Модел С_2; ц) Модел С_В

ЗАКЉУЧЦИ

На основу представљених експерименталних и нумеричких резултата у току израде ове докторске дисертације, могу се донети следећи закључци:

1. Експерименталним мерењем брзине и правца ветра на локалној метеоролошкој станици добијена ружа ветрова, као и положај и конфигурација терена ОШ “Франце Прешерн” указује да је учестаност и интензитет удара ветра на објекат у делу позициониране учионице која је била предмет истраживања занемарљиво мали. Ова експериментална евиденција указује на чињеницу да је разматрана учионица заклоњена од утицаја удара ветра и да у њој доминира ефекат топлотне инерције, односно ефекти природне конвекције узроковани постојањем јаким температурских градијената. Такође, ова чињеница је омогућила да се у даљој експерименталној и нумеричкој анализи посвети основна пажња феноменима природне конвекције у затвореном простору;
2. У оквиру анализе физиолошких параметара популације ђака узраста 8 - 9 година, утврђени су топлотни губици тела као целине (табела 2.5), и то: конвекцијом 33%; зрачењем 21%; размена топлоте преко зноја 5%; размена топлоте дисањем-латентно 17% и размена топлоте дисањем-осећајно 25%;
3. У оквиру реализације реалног експеримента коришћени су инструменти чија тачност задовољава критеријуме стандарда SRPS EN ISO 7726. *Ергономија топлотне средине – Инструменти за мерење физичких количина*. Основна и једина потешкоћа при мерењу је била мерење брзине струјања ваздуха. Иако су брзине струјања ваздуха мерене веома осетљивим анемометром (*hot-wire anemometer*), мерење брзине струјања у латералном правцу у односу на правац вектора гравитације, које су биле реда величине 0.1-0.5 m/s, било је веома осетљиво, тако да је поузданост мерених резултата овог параметра најмања у односу на све остале параметре;
4. Резултати анкета спроведених са ученицима о њиховом субјективном осећају топлотног комфора према Fanger-овој скали су релативно непоуздани. Основни разлог је што ученици тог узраста нису могли да дају тачно дефинисане одговоре у распону Fanger-ове скале од -3 до +3, већ су давали много генералније одговоре типа хладно, топло, неутрално. Такође, како се анкетирање ученика обављало у присуству учитељица, одговори ученика су били под сугестијом учитељица. Због тога је одлучено да даља анализа базира на експериментално утврђеним физичким параметрима и на бази њих одређеним општим индикаторима топлотног комфора;

5. Експериментално добијене вредности општих индикатора топлотног комфора (табела 4.10) су послужили као основа за валидацију математичког модела и предложених доприноса у докторској дисертацији;
6. У делу развоја математичког модела, развијена су и предложена два оригинална доприноса:
 - За класу турбулентног струјања природном конвекцијом у затвореном простору уведена је претпоставка да коефицијент $C_{\varepsilon 3}$, који се јавља у једначини за брзину дисипације кинетичке енергије турбуленције, није константа већ променљива величина, зависно од локалног односа доминирајућег правца и смера струјања и смера вектора гравитације;
 - У оквиру развоја модела преноса топлоте зрачењем, предложен је приступ да се контаминирани ваздух у учионици третира као нетранспарентни медијум, те на основу ове претпоставке, предложен је израз за одређивање ефективних коефицијената емисивности и расипања у функцији локалног нивоа концентracије угљен-диоксида. Иако је предлог оригиналан у смислу универзалности, ипак постоје ограничења да се изрази 5.28 и 5.29 морају одређивати за сваки случај засебно, као што су на пример ложишта котлова и пећи, или загађена урбана средина;
7. Предложени модели су уграђени у нумерички код комерцијалног софтвера PHOENICS, и спроведена је параметарска анализа кроз серију од шест тест случајева чије су карактеристике дате у табели 6.2. Почевши од основног модела 0_2 који је карактеристичан по томе што су елементи турбулентног модела и модела преноса топлоте зрачењем стандардно уграђени, па до случаја C_V који укључује обе модификације;
8. Нумерички резултати спроведене параметарске анализе су поређени са експерименталним резултатима како би се дала оцена о валидности предложених доприноса. Поред стандардног поступка анализе грешака, спроведена је и комплексна статистичка анализа, тако да су додатни статистички показатељи дали праву информацију о квалитету сваког модела;
9. На основу анализе грешака и статистичких параметара валидације модела, може се закључити да једино модели A_V (модификовани модел зрачења и $C_{\varepsilon 3} = 1.0$) и C_V (модификовани модел зрачења и $C_{\varepsilon 3} \neq const$) задовољавају све критеријуме валидације према параметрима температуре ваздуха, радијантне температуре и индикатора *PPD*;

10. С обзиром да је у процесу валидације модела у поређењу са експериментом, модел C_V дао најбоље резултате, закључци о добијеним нумеричким резултатима друга два референтна случаја 0_2 и C_2 се односе на поређење са моделом C_V ;
11. У презентованој класи турбулентног струјања природне конвекције, турбулентни параметри имају значајну улогу;
12. Знајући да две кључне турбулентне размере, дужинска и брзинска одређују карактер турбулентног струјања, може се закључити да учињене модификације у турбулентном моделу увођењем променљиве вредности емпиријског коефицијента $C_{\varepsilon 3}$ и посредним топлотним ефектима нетранспарентне средине унетим у модификацији модела зрачења дају ситнију структуру доминантних вртлога и њихово дуже трајање;
13. Претходни закључак је у сагласности са нивоом добијених интензитета турбуленције, што у крајњем резултира у нивоу брзина струјања основног тока и индикатора топлотног комфора;
14. Имајући на уму да ниво брзине струјања ваздуха и интензитет турбуленције директно утичу на вредности основних индикатора топлотног комфора, добијене вредности у моделу C_V су дале најбоље резултате, чиме су оправдане уведене модификације модела турбуленције и модела преноса топлоте зрачењем;
15. Доминантну улогу у расподели топлотних карактеристика и њиховим вредностима има модел зрачења;
16. Овај закључак је лако уочљив увидом у нивое средњих вредности температуре ваздуха, радијантне температуре и специфичног вертикалног топлотног флукса зрачења за моделе 0_2 и C_2 јер су ови параметри приближно исти за ова два модела. Другим речима, основна разлика топлотних карактеристика у односу на модел C_V је последица учињене модификације у моделу преноса топлоте зрачењем, док је утицај модификације модела турбуленције од мањег значаја;
17. Ова ситуација је очекивана с обзиром на укључивање контаминираног ваздуха као апсорбера и емитера топлотне енергије у механизму преноса топлоте зрачењем, што се најбоље види поређењем вредности средњег специфичног вертикалног топлотног флукса зрачења;

18. Најмањи утицај учињених модификација је на расподелу концентрације угљен-диоксида. Основни разлог овој ситуацији је што се дифузионе турбулентне карактеристике угљен-диоксида (најодговорнији механизам турбулентног мешања) нису значајно промениле увођењем наведених модификација турбулентног модела;
19. Закључци о вредностима температуре ваздуха и радијантне температуре директно утичу на вредности основних индикатора топлотног комфора;
20. Како је *PPD* најрепрезентативнији индикатор топлотног комфора, јер у себи директно и посредно сублимира друга два индикатора, оперативну температуру и *PMV*, он је изабран као кључни параметар валидације модела, што је приказано у глави 7. Увидом у табелу 7.7 може се закључити да једино модели *A_V* и *C_V* задовољавају услове валидације, што указује на веома важан закључак да је допринос у модификацији модела преноса топлоте зрачењем значајнији са аспекта коначног циља тачног одређивања индикатора топлотног комфора у односу на учињени допринос у модификацији турбулентног модела;
21. Овај закључак се могао и очекивати за ову класу струјања. Наиме, увидом у слику 5.2 која даје расподелу вредности емпиријског коефицијента $C_{\varepsilon 3}$, може се закључити да је вредност овог коефицијента у највећем делу хоризонталног пресека учионице на висини од 0.8m једнака јединици (поготово око ученика и топлотних извора). Вредност коефицијента $C_{\varepsilon 3}$ указује на доминантан вертикални правац конвективног струјања, што смањује разлику у моделима *A_V* и *C_V*, тако да се у првој апроксимацији, модел турбуленције може узети и са константном вредношћу $C_{\varepsilon 3} = 1.0$, а да се задовоље услови валидације;
22. Међутим, овај закључак не важи за модел преноса топлоте зрачењем, јер се једино модификацијом овог модела задовољавају критеријуми валидације;
23. Увидом у дистрибуцију индикатора *PMV* по телу ученика датој на слици 8.11 добијене су логичне расподеле најхладније на ногама, а најтоплије на пределу главе и груди, што је у сагласности са напоменама датим у глави 2 и експерименталним резултатима.
24. Примена оваквих модела може се користити код објеката (школа, пословних зграда, хируршких ординација) у којима се очекује висок ниво концентрације код популације које у њима бораве.

ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

- [1] http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Bilder_Infografiken/aenderung_oberflaechentemperatur_P200.jpg
- [2] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union. (2010).
- [3] IHW. *Homeostasis*. [http:// www.wikiskripta.eu/index.php/Hypotermie](http://www.wikiskripta.eu/index.php/Hypotermie), (2006).
- [4] Labrie, Fernand. *Hypothalamus and Endocrine Functions*, ISBN 978-1-4684-2598-7, (1976).
- [5] Sosnowski , Mikrut , Krauss H. *Hypothermia - mechanism of action and pathophysiological changes in the human body*. Postepy Hig Med Dosw (Online). 69(0) (2015):140-52.
- [6] ASHRAE Standard 55. *Thermal Environment Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Ventilating and Air-conditioning Engineers. Atlanta, USA. (1992).
- [7] D. Cóstola, B. Blocken, J.L.M. Hensen. *Uncertainties due to the use of surface averaged wind pressure coefficients*. Proceedings of the 29th AIVC Conference (2008):6.
- [8] Yuguo Li, Angelo Delsante, Je. Symons. *Prediction of natural ventilation in buildings with large openings*. Building and Environment 35 (2000): 191-206.
- [9] *2009 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTAL*, American Society of Heating, Ventilating and Air-conditioning Engineers. Atlanta, USA. (2009). ISBN 978-1-933742-54-0.
- [10] Walker, I.S., D.J. Wilson. *Evaluating models for superposition of wind and stack effects in air infiltration*. Building and Environment, 28 (2), (1993):201-210.
- [11] ANSI/ASHRAE 55-2004 *Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Ventilating and Air-conditioning Engineers. Atlanta, USA.
- [12] TESTO. *Measuring Instruments for Temperature*. <http://www.testo.com>.
- [13] SRPS EN 15251. Улазни параметри унутрашње средине за пројектовање и оцењивање енергетских карактеристика зграда у односу на квалитет ваздуха, топлоту средине, осветљења и акустику. Институт за стандардизацију Србије, Службени гласник Републике Србије. (2010).
- [14] FLIR Systems AB (Ed.). *Thermal imaging guidebook for building and renewable energy applications*. Infrared Training Center (ITC). (2011) <http://www.flir.com>.
- [15] EN ISO 12569. Thermal insulation in buildings – Determination of air change in buildings – Tracer gas dilution method. International Standard Organization, Geneve, Suisse.
- [16] SRPS EN ISO 7730. Ергономија топлотне средине – Аналитичко утврђивање и интерпретација топлотних комфора коришћењем прорачуна PMV и PPD показатеља и

локалних критеријума комфора. Институт за стандардизацију Србије, Службени гласник Републике Србије. (2008).

- [17] SRPS EN ISO 7726. **Ергономија топлотне средине – Инструменти за мерење физичких количина**. Институт за стандардизацију Србије, Службени гласник Републике Србије. (2008).
- [18] SRPS EN 15251. Улазни параметри унутрашње средине за пројектовање и оцењивање енергетских карактеристика зграда у односу на квалитет ваздуха, топлоту средине, осветљења и акустику. Институт за стандардизацију Србије, Службени гласник Републике Србије. (2010).
- [19] P. Fanger, B. Ipsen, G. Langkilde, B. Olesen, N. Christensen, S. Tanabe. **Comfort Limits for Asymmetric Thermal Radiation**. Energy and Buildings, 8 (1985):225 - 236.
- [20] Madsen, T.L. **Thermal comfort measurements**. ASHRAE Transactions 82(1) (1976)
- [21] Fanger, P. O. **Thermal Comfort**. Danish Technical Press (1972)
- [22] S. Karjalainen. **Thermal comfort and gender: a literature review**. Indoor Air (2012): 96–109.
- [23] P. O. Fanger, N. K. Christensen. **Perception of draught in ventilated spaces**. Ergonomics, 29:2,(1986):215-235
- [24] CIBSE Guide A: Environmental Design, January 2006 (7th edition), *The Chartered Institution of Building Services Engineers London*, ISBN-10: 1-903287-66-9, ISBN-13: 978-1-903287-66-8
- [25] Manuel Carlos Gameiro da Silva. **Spreadsheets for the calculation of Thermal Comfort Indices PMV and PPD**. Master Thesis. University of Coimbra, Portugal. (2010)
- [26] CJK Henry, S Dyer, A Ghusain-Choueiri. **New equations to estimate basal metabolic rate in children aged 10 - 15 years**. European Journal of Clinical Nutrition (1999) 53, 134-143. <http://www.stockton-press.co.uk/ejcn>
- [27] Жарко М. Стевановић, **Нумерички аспекти турбулентног преношења импулса и топлоте**. Универзитет у Нишу, Машински факултет. (2008); ISBN 978-86-80587-81-3.
- [28] Kolmogorov, A.N. **Equations of turbulent motion of an incompressible fluid**. Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Phys. vol. 6, no. ½. (1942):56-58.
- [29] Prandtl, L., **Ubereinnes Formelsystem für die aus gebildete Turbulenz**. Nachr Akad. der Wissenschaften Göttingen, van den Loekund Ruprecht. (1945):6-19.
- [30] Chou, Y. **On the velocity corrections and the solution of the equations of turbulent fluctuation**. Quart. Appl. Math. Vol.3. (1945):38-54.
- [31] Launder, B. E., Spalding D. B. **Mathematical Models of Turbulence**. Academic Press, London and New York. (1972).
- [32] Spalding, D. B. **The calculation of the length scale of turbulence in some shear flows remote from walls**. Progress in Heat and Mass Transfer, Vol.2., Oxford, Pergamon Press. (1969): 255-266
- [33] Rotta, J. Statistische, **The orienticht homogener Turbulenz**. Z. Phys., Vol.129, (1951):547-572.

- [34] R. A. Henkes, F. van der Flugt, C. Hoogendoorn, *Natural convection in a square cavity with low-Re turbulent fluid*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.34, (1991):1543-1557.
- [35] Patankar, S.V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, USA. (1980).
- [36] Steven R. Hanna, Olav R. Hansen, Seshu Dharmavaram, *FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations*, Atmospheric Environment Vol. 38 (2004):4675–4687.
- [37] Helge Rørdam Olesen, *Computing Hit Rate*, National Environmental Research Institute Aarhus University, Denmark (2007), hro@dmu.dk
- [38] Joseph C. Chang, Steven R. Hanna, Zafer Boybeyi and Pasquale Franzese. *Use of Salt Lake City URBAN 2000 Field Data to Evaluate the Urban Hazard Prediction Assessment Capability (HPAC) Dispersion Model*. Journal of Applied Meteorology, Vol 44 (2005): 485-501.
- [39] VDI: *Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung*. VDI 3783 Blatt 9. (Available in English as VDI Guideline on Environmental meteorology - Prognostic micro-scale windfield models - Evaluation for flow around buildings and obstacles). (2005)
- [40] Г. Илић, М. Вукић, Н. Радојковић, П. Живковић, И. Стојановић. *Термодинамика II - основе простирања топлоте и материје*. Машински Факултет Универзитета у Нишу, (2014).

БИОГРАФИЈА

1.1. Лични подаци

Рођена сам 04.02.1978. године у Сарајеву. Основну и средњу школу завршила сам у Београду, где и сад живим. Говорим енглески и француски језик.

1.2. Подаци о образовању

Завршила сам основну и средњу школу у Београду. Студије на Машинском факултету, Универзитета у Београду, завршила сам 01.03.2006. године, са општим успехом 7.45 на смеру процесне технике, и стекла звање дипломирани машински инжењер (мастер).

Дипломски рад под називом „Енергетска оптимизација и идејно решење ветрогенераторске фарме за производњу електричне енергије капацитета до 20MW“ одбранила сам са оценом 10.

Ради даљег студирања на Машинском факултету, Универзитета у Нишу, полагала сам пријемни испит (решење бр. 612-4/282-72-06, датум 31.05.2006.) те сам на основу члана 29. Закона о Универзитету, члана 161. Закона о општем управном поступку и члана 94. Статута Машинског факултета Универзитета у Нишу у школској 2005/2006. године и уписала прву годину магистарских студија профил Термоенергетика и термотехника на Машинском факултету у Нишу као студент који се финансира из буџета Републике Србије. Докторске студије сам уписала 2007/2008. године на основу члана 176. Статута Машинског факултета у Нишу (решење бр. 612-71-29/2008, датум 10.09.2008. члана 12. Правилник о докторским студијама, бр. 612-1157-15/007 од 18.12.2007. године, и члана 49. Статута Машинског факултета Универзитета у Нишу као студент који се финансира из буџета Републике Србије.

По одлуци Научног већа Института за нуклеарне науке - Винча, дана 30.06.2008. стекла сам истраживачко звање, **истраживач сарадник**.

Главна област научно-истраживачког рада у којој сам тренутно ангажована је енергетска ефикасност у зградарству.

Додатно образовање у струци остварила сам похађањем и добијањем сертификата на следећим међународним курсевима:

1. **DAAD Project: Computational Engineering:**
 - Annual International Course: “**Computational Engineering**”, 2-8 October 2004, Pamporovo, Bulgaria
 - Annual International Course: “**Computational Engineering**”, 11-14 Jun, 2006, Pamporovo, Bulgaria
 - Annual International Course: “**Computational Engineering**”, 2-8 October, 2006, Kopaonik, Republika Srbija
2. **EU Maria Curie Actions Project: Euroacademy on Ventilation and Indoor Climate – CLIMACADEMY: MSCF-2005-029900:**
 - Course 1: “**Indoor Air Quality and Thermal Comfort**”, 19-26 October, 2006 Pamporovo, Bulgaria
 - Course 2: “**Individually Controlled Environment**”, 8-13 May, 2007 Pamporovo, Bulgaria
3. **Ministarstvo energetike Republike Srbije i Norsk Energy. “Training on the implementation of the Kyoto Protocol Clean Development Mechanism”**, септембар и октобар 2007. Београд, Република Србија.

4. **The Regional Environmental Centre for Central and Eastern Europe, Ministry for the Environment, Land and Sea, Italy**, Environment and health Training: **School environment and respiratory health of children**, SEARCH II project May 2011, Hungary.
5. **Japan International Cooperation Agency (JICA)** Training Programs under Technical Cooperation with the Government of Japan, “**Cleaner Production through Productive Maintenance (B)**”, January- April 2012. Japan.

1.3. Подаци о професионалном ангажовању

Од 2006. године радим као истраживач приправник у Институту за нуклеарне науке Винча. По одлуци Научног већа Института за нуклеарне науке - Винча, дана 30.06.2008. стекла сам истраживачко звање, **истраживач сарадник**.

Главна област научно-истраживачког рада у којој сам тренутно ангажована је енергетска ефикасност у зградарству. Учесник сам бројних домаћих и међународних пројеката из области енергетске ефикасности, обновљивих извора енергије, термотехнике и заштите животне средине. Члан сам **ASHRE-DANUBE** (American Society for Heating, refrigerating and Air-Conditioning Engineers) и **JICA-ALUMNI SERBIA** (Japan International Cooperation Agency).



Универзитет у Нишу

Прилог 4: Изјаве аутора докторских дисертација

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

**ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОСТОРНЕ УНИФОРМНОСТИ ИНДИКАТОРА
ТОПЛОТНОГ КОМФОРА У ЗГРАДАМА ЈАВНЕ НАМЕНЕ**

која је одбрањена на ... факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу,

Аутор дисертације:

Жана Ж. Стевановић

Потпис аутора дисертације:



Универзитет у Нишу

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И ЕЛЕКТРОНСКОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Име и презиме аутора:

Жана Ж. Стевановић

Наслов дисертације:

**ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОСТОРНЕ УНИФОРМНОСТИ ИНДИКАТОРА ТОПЛОТНОГ
КОМФОРА У ЗГРАДАМА**

Ментор:

др Градимир Илић, ред. проф.

Изјављујем да је штампани облик моје докторске дисертације истоветан електронском облику, који сам предао/ла за уношење у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу.

У Нишу,

Потпис аутора дисертације:

Stevanovic' Zana



Универзитет у Нишу

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да, у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОСТОРНЕ УНИФОРМНОСТИ ИНДИКАТОРА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА У ЗГРАДАМА ЈАВНЕ НАМЕНЕ

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да подвучете само једну од шест поменутих лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста).

У Нишу,

Аутор дисертације:

Жана Ж. Стевановић

Потпис аутора дисертације:

Stevanović Žana