

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Иван М. Лазовић

**УТИЦАЈ ЕФЕКТА ТЕРМИЧКИХ ОСТРВА У
ГРАДСКИМ СРЕДИНАМА НА ПОВЕЋАНО
КОРИШЋЕЊЕ ЕНЕРГИЈЕ У ЗГРАДАМА**

докторска дисертација

Београд, 2019

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Ivan M. Lazović

**THE EFFECTS OF URBAN HEAT ISLANDS
ON INCREASED USE OF ENERGY IN
BUILDINGS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019

Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације

Ментор:

Проф. др Милош Бањац, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински Факултет

Чланови комисије

Проф. др Мирко Коматина, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински Факултет

Проф. др Маја Тодоровић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински Факултет

др Вукман Бакић, научни саветник,
Институт за нуклеарне науке „Винча“

Проф. др Мирјана Лаковић-Пауновић, ванредни професор,
Универзитета у Нишу, Машински факултет

Датум одбране:

Захвалност

Ова докторска дисертација је настала као резултат рада на пројекту III42008 „Унапређење енергетских карактеристика и квалитета унутрашњег простора у зградама образованих установа у Србији са утицајем на здравље“ реализованог у оквиру Института за нуклеарне науке „Винча“, Лабораторије за термотехнику и енергетику, под покровитељством Министарства просвете, науке и технолошког развоја.

Велику захвалност дугујем ментору, проф. др Милошу Бањцу редовном професору Машинског факултета, Универзитета у Београду на изузетно квалитетном и ефикасном вођењу процеса израде овог рада, као и на драгоценим саветима и сугестијама захваљујући којима је овај рад добио свој завршни облик. Такође, захвалност дугујем и осталим члановима комисије на сугестијама и саветима којима су такође помогли да овај рад буде реализован.

Свим својим колегама из Лабораторије за термотехнику и енергетику, Института за нуклеарне науке „Винча“, захваљујем за подршку током израде тезе. На првом месту бих желео да се захвалим руководиоцима пројеката III42008, др Жарку Стевановићу и др Валентини Турањанин који су дали велики допринос мом раду у Институту за нуклеарне науке „Винча“.

Посебно се захваљујем сјајним људима, колегама и пријатељима др Николи Миркову, др Зорану Марковићу и др Растку Јовановићу на подршци и помоћи приликом израде докторске дисертације.

Такође, захваљујем се Горану Шиловићу на драгоценим саветима.

Овај докторат посвећујем својој породици.

УТИЦАЈ ЕФЕКТА ТЕРМИЧКИХ ОСТРВА У ГРАДСКИМ СРЕДИНАМА НА ПОВЕЋАНО КОРИШЋЕЊЕ ЕНЕРГИЈЕ У ЗГРАДАМА

Резиме

Услед интензивне урбанизације, глобалног загревања и повећаних енергетских потреба становника, утицај термичких острва је све израженији, услед чега се јавља потреба за систематичним и мултидисциплинарним изучавањем ове појаве.

Ова дисертација представља резултате истраживања утицаја појава термичких острва у градској средини на повећано коришћење енергије за хлађење зграда током летњег периода.

Циљ рада је дефинисање функционалне зависности између величина стања које описују унутрашње и спољашње стање средине, које настаје услед појаве градских термичких острва, те одређивање њиховог утицаја на додатне енергетске потребе за хлађењем зграда. Независно од додатних енергетских потреба у зградама, један од циљева овог рада био је и да се обави карактеризација термичких острва и њихова квантификација.

У овој дисертацији, за истраживање градских термичких острва, коришћене су експерименталне и нумеричке методе.

Експериментална истраживања су спроведена у одабраном градском подручју града Београда и можемо их поделити на временски кратка и дуга. Мерења која су трајала дужи временски период имала су за циљ праћење вредности интензитета термичких острва у периоду од шест месеци, док су остала мерења имала за циљ прибављање потребних параметара за прорачун енергетских карактеристика одабраног репрезентативног објекта. Поред ових мерења одављена су и мерења интензитета саобраћаја на основу којих су добијени подаци о емисији гасова на главним саобраћајницама у одабраном градском подручју.

У оквиру нумеричког дела истраживања, у комерцијалном софтверу креиран је тродимензионални нумеричко-аналитички модел и обављене су нумеричке симулације струјно-термичког поља одабраног дела градске средине, при чему су резултати мерења коришћени као гранични, просторни и временски услови. Нумеричке симулације су урађене током једног дана за три временска периода, која су дефинисана као три случаја, ујутру (S1), поподне (S2) и увече (S3), након заласка

сунца. Дискретизација система диференцијалних једначина обављена је нумеричком методом коначних запремина. Провера тачности нумеричког модела утврђена је упоређивањем експерименталних резултата, чиме је потврђена поузданост и применљивост формираног нумеричког модела

Анализом добијених експерименталних и нумеричких резултата успостављена је зависност интензитета термичких острва од урбаних и метеоролошких параметара, као и зависност повећане потрошње енергије током летњег периода од интензитета термичких острва. Испитана је поузданост нумеричког модела за предвиђања динамичког понашања температурног, брзинског поља и поља концентрација угљен-диоксида у градској средини. На овакав начин је омогућено да за сваку познату градску средину буде праћен процес промене интензитета термичког острва, што уз познавање параметара енергетске ефикасности, омогућава да буде праћена и промена потрошње енергије у зградама. Планирана примена коришћена у унапређеним приступима обликовања урбаних средина којима, савременим научним методама, бива обезбеђена мања енергетска потрошња у зградама и већи комфор становника градске средине.

Кључне речи: термичка острва, енергетска ефикасност зграда, експериментална истраживања, нумеричке симулације

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Термомеханика

УДК број: 551.584.5:697(043.3)
551.584.5:551.50]:004.942(043.3)

THE EFFECTS OF URBAN HEAT ISLANDS ON INCREASED USE OF ENERGY IN BUILDINGS

Abstract

The impact of urban heat islands is increasingly important due to intensive urbanization, global warming, and increased energy needs of people who live in urban areas, which provokes the need for a systematic and multidisciplinary study of this phenomenon.

The results of the impact of the urban heat islands occurrence on increased energy use for buildings' cooling during the summer period are presented in this dissertation.

The aim of this dissertation is to define the functional dependence between the magnitudes of the conditions, resulting from the phenomenon of urban heat islands, that describe the indoor and outdoor environment, and to determine their effects on the additional energy needs for buildings' cooling. Apart from the additional energy needs in buildings, one of the aims of this dissertation was to characterize the thermal islands and quantify them.

For the purpose of this dissertation, experimental and numerical methods have been used for the research of urban heat islands.

The experimental studies were conducted in the selected urban area of Belgrade city. These measurements can be divided into short-term and long-term measurements. The measurements, which lasted for a long period of time, were aimed at monitoring the values of the urban heat island intensity over a period of six months, while the other measurements aimed at obtaining the necessary parameters for the calculation of the energy characteristics of the selected representative object. In addition to those measurements, traffic intensity measurements were also conducted. The traffic intensity measurements provided data about gas emissions at major roads in the selected urban area.

The three-dimensional numerical-analytical model was created in commercial software in the numerical part of the research, and numerical simulations of the thermal flow field of the selected part of the urban environment were performed. The results of the measurements were used as a boundary, spatially and temporally conditions. Numerical simulations were performed for a single day at three time periods, defined as three cases, in the morning (S1), afternoon (S2), and evening (S3), after sunset. The discretization of the system of differential equations was performed using the finite volume numerical method.

The verification of the accuracy of the numerical model was performed by comparison with the corresponding experimental results, which confirmed the reliability and applicability of the formed numerical model.

The analysis of the obtained experimental and numerical results established the dependence of urban heat island intensity on urban and meteorological parameters, as well as the dependence of increased energy consumption during the summer period on the intensity of thermal islands. The reliability of the numerical model for predicting the dynamic behavior of the temperature, velocity field, and carbon dioxide concentration field in an urban environment was examined. In this way, it is possible to monitor the process of changing the intensity of each urban heat island. In addition, knowing the parameters of energy efficiency, allows us to monitor the change of energy consumption in buildings. Planned implementation, used in advanced urban design approaches, through modern scientific methods, provides less energy consumption in buildings and greater comfort for urban residents.

Key words: urban heat island, energy efficiency of buildings, experimental research, numerical simulations

Scientific field: Mechanical engineering

Scientific subfield: Thermal mechanics

UCD number: 551.584.5:697(043.3)

551.584.5:551.50]:004.942(043.3)

Садржај

Резиме	
Abstract	
1 Увод	1
1.1 Циљ истраживања	10
1.2 Предмет рада докторске дисертације	11
2. Теоријске основе термичких острва	14
2.1 Интензитет термичког острва	14
2.2 Аналитички модел	16
2.3 Утицај вегетације на термичка острва	17
2.3.1 Утицај вегетације кроз евопоративно хлађење и испаравање	17
2.3.2 Утицај вегетације кроз осенчење	17
2.4 Утицај саобраћаја на термичка острва	19
2.5 Термичка острва као локални феномен	20
2.5.1 Термичка острва у Београду	22
2.6 Потрошња енергије зграде услед термичких острва	26
2.6.1 Преглед литературе потрошње енергије за хлађење зграда услед утицаја термичких острва	26
3. Термички параметри спољашње средине	28
3.1. Индекси за мерење спољашњег термичког комфора	29
3.2 Изложеност људи у урбаној средини	32
4. Експериментална истраживања	34
4.1 Експериментално мерење у руралној средини	36
4.2 Експериментална мерење у градској средини	37
4.2.1 Опис локације објекта и мерених параметара	37
4.2.2 Опрема и стандарди коришћени приликом експерименталног истраживања	38
4.2.3 Мерења која су обављана дужи временски период	39
4.2.3.1 Мерење брзине и правца ветра	39
4.2.3.2 Мерење температуре и релативне влажности	41
4.2.3.3 Мерење интензитета Сунчевог зрачења	43
4.2.4 Временски кратка мерења	44
4.2.4.1 Мерење параметара потребних за прорачун коефицијента пролаза топлоте (U-вредности)	44
4.2.4.2 Мерење параметара потребних за прорачун природног броја измена ваздуха у згради	48
4.2.4.3 Мерење интензитета саобраћаја	49
4.3 Анализа експерименталних података	51
4.3.1 Анализа мерених података за прорачун коефицијента пролаза топлоте	51
4.3.2 Анализа података добијених мерењем за прорачун броја измена ваздуха у згради	55
4.3.3 Анализа резултата емисије из возила	56
4.3.4 Мерење радијантне температура у урбаној средини	62
4.4 Преглед добијених резултата мерења	64
4.4.1 Преглед добијених резултата који су коришћени за анализу интензитета термичких острва	64

4.4.1.1	Промена интензитета термичког острва услед брзине ветра	70
4.4.1.2	Промена интензитета термичког острва са температуром ваздуха	71
4.4.2	Преглед добијених резултата који су коришћени за прорачун потрошње енергије током летњег периода	72
4.4.2.1	Одређивање мерне несигурности мерења коефицијента пролаза топлоте	75
5	Математичко-нумерички модел	77
5.1	Физички модел	77
5.2	Математички модел	78
5.2.1	Претпоставке модела	78
5.2.2	Основне билансне једначине	79
5.2.3	Моделирање турбулентног струјања коришћењем k-ε модела	80
5.2.4	Модел преноса топлоте зрачењем	83
5.3	Испитивање мреже	88
5.4	Домен интеграције и гранични услови	89
5.5	Нумерички модел	95
5.5.1	Метода коначних запремина	95
5.5.2	Избор мреже	95
5.5.3	Избор итеративног поступка	95
5.5.4	Диферентна шема	95
5.5.5	Софтвер PHOENICS CHAM	96
6	Резултати нумеричких симулација	100
6.1	Анализа утицаја финоће мреже	101
6.2	Преглед и анализа резултата	105
6.2.1	Валидација модела	114
6.2.2	Анализа резултата	116
6.3	Утицај вегетације на интензитет термичких острва	118
6.4	Утицај ветра на интензитет термичких острва	122
7	Прорачун и анализа потрошње енергије репрезентативног објекта	124
7.1	Примена детаљне методологије одређивања потребне енергије за хлађење	125
7.2	Калибрација модела	129
7.3	Резултати симулације потрошње енергије	131
7.3.1	Резултати калибрације модела	131
7.3.2	Резултати прорачуна потребе за хлађењем модела објекта за случај да се налази на својој стварној локацији	134
7.3.3	Прорачун потреба за хлађењем модела објекта за случај да се налази на локацији која се не налази у зони термичког острва (рурална локација)	135
7.3.4	Прорачун потреба за хлађењем модела објекта за случај да се налази на различитим локацијама унутар термичког острва	135
7.4	Преглед и анализа добијених резултата	139
8	Закључак	142
	Литература	152
	Прилог	161
	Биографија	

Списак ознака

T_{urban}	°C	температура ваздуха у градској средини
T_{rural}	°C	температура ваздуха у руралној средини
T_a	°C	температура ваздуха
T_{md}	°C	средња радијантна температура
T_g	°C	температура црне кугле
T_s	°C	температура граничне површине
T_i	°C	унутрашња температура ваздуха у граничном слоју
T_e	°C	унутрашња температура граничне површине елемента
T_{si}	°C	спољашња температура ваздуха у граничном слоју
T_{se}	°C	спољашња температура граничне површине елемента
v_a	m/s	стварна брзина амбијенталног ваздуха
U	m/s	средња брзина ваздуха у x -правцу
RH	%	релативна влажност ваздуха
p	hPa	атмосферски притисак
p_a	Pa	парцијални притисак водене паре
p_s	Pa	притисак сатурације водене паре
CO_2	ppm	концентрација угљен-диоксида
D_g	mm	пречник црне кугле
ε_g	-	емисивност црне кугле
q	W/m ²	топлотни флукс
U	W/m ² K	кофицијента пролаза топлоте
λ	W/mK	топлотна проводљивост
P	-	популација
n	1/h	просечан број измена ваздуха
τ	h	време
$f(U)$	-	Weibull-ова функција расподеле
k	-	параметар Weibull-ове расподеле
S_d	-	стандардна девијација мерених величина
δ_u	-	мерна несигурност уређаја којим је обављено мерење
δ_{S_d}	-	мерна несигурност резултата мерења
h	J/kg	енталпија
\bar{u}_z	m/s	брзина струјања ваздуха у правцу вектора гравитације
\bar{u}_\perp	m/s	брзина струјања ваздуха у равни нормалној на вектор гравитације
σ	W/m ² K ⁴	<i>Stefan-Boltzmann</i> -ова константа зрачења црног тела
A	m ²	површина
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu$		константе $k - \varepsilon$ модела турбуленције
l	-	карактеристичне размере турбуленције
c_p	J/kgK	специфични топлотни капацитет
Pr	-	Прантлов број
R	J/kgK	гасна константа за ваздух
Re	-	Рејнолдсов број
$Q_{an,C}$	kWh/a	годишња потребна енергија за хлађење зграде

Скраћенице

UHI	°C	термичка острва у градској средини (енгл. <i>Urban Heat Island</i>)
UHI	°C	интензитет термичког острва у градској средини (енгл. <i>Urban Heat Island intensity</i>)
PET	°C	физиолошки еквивалентна температура (енг. <i>Physiologically Equivalent Temperature</i>)
SET	°C	стандардна ефективна температура (енгл. <i>Standard Effective Temperature</i>)
UTCI	°C	универзални термички климатски индекс (енг. <i>Universal Thermal Climate Index</i>)
ISB		Међународно удружење биометеоролога (енг. <i>International Society of Biometeorology</i>)
WMO		Светска метеоролошка организација (енг. <i>World Meteorological Organization</i> –)
EEA		Европска агенција за заштиту животне средине (енг. <i>European Environment Agency</i>)

Грчки симболи

ρ	kg/m ³	густина ваздуха
ε'_a	1/m	коэффициент ефективне атмосферске емисивности по јединици дужине
μ	Pa s	динамичка вискозност флуида
δ_{ij}	-	Кронекеров делта оператор
k	m ² s ⁻²	кинетичка енергија турбуленције
ν_t	m ² s	турбулентна кинематска вискозност
σ_t	-	Шмитов број.
β	-	коэффициент температурне експанзије ваздуха
λ_{rad}	W/m ² K	радијациони еквивалент коoeffицијента провођења
λ_{eff}	-	ефективна топлотна проводљивост

1. Увод

Појава урбанизације становништва, односно прелазак становништва из села у градове, интензиван је након индустријске револуције почетком XX века што доводи до динамичног развоја градова.

У 1900. години само 10% светске популације живело је у градовима, док сада живи више од 50% [1]. Број становника који је живео у градовима у 2011. години био је 3,6 милијарди, и предвиђено је да ће до 2050. године бити повећан на 6,3 милијарде, углавном услед сталног раста броја становника у мање развијеним регионима Азије и Африке [2].

Према првом званичном попису становништва у Србији из 1834. године, 93,5% укупног становништва у Србији живело је у сеоским насељима. Тај број се почетком XX века незнатно смањило, да би након Другог светског рата процес урбанизације у Србији био значајно промењен и убрзан. Процес урбанизације базиран на миграцији сеоског становништва у градове, био је веома интензиван све до седамдесетих година прошлог века. Веома интензивно и дуготрајно деловање процеса урбанизације, уз селективност старосног доба становништва, довело је до „подмлађивања“ градских подручја и „старења“ руралних средина. Према статистичким подацима из пописа становништва, у Србији број градског становништва 1991. био је 50,6%, а 2002. порастао је на 56,4%, док је у 2011. години та вредност била 59,4% [3].

Урбанизацију можемо пратити на основу нивоа урбанизације, тј. удела броја становника који живе у градовима у поређењу с укупним бројем становника. Како не постоји тачно одређен стандард којим могу бити дефинисане урбане средине, велики број земаља развио је сопствени скуп критеријума за поделу средина на руралне и урбане области: величина (бројност) популације, густина насељености, величина изграђене области, проценат људи који не зависе од пољопривреде, доступност електричне енергије, доступност здравствених услуга, могућност образовања, итд. Овако различите дефиниције отежавају поређења међу државама, па су Уједињене нације дале јединствену дефиницију урбаних средина: „Насеље је градско уколико има више од 2.500 становника. Урбана средина са више од 20.000

становника јесте град, а више од 100.000 велики град, док су градови са више од 5 милиона становника мегалополиси “[4].

Урбанизација друштва у физичком смислу узрокује велике промене локалних микроклиматских услова и утиче на квалитет ваздуха.

Један од најчешће мерених и најбоље документованих параметара микроклиматских услова јесте пораст температуре земље и ваздуха. Овај добро познати параметар добио је назив урбано термичко острво. Први научник који је описао овај феномен јесте *L. Howards* почетком XIX века. Он је уочио постојање „Вештачког вишка термичке енергије“ у Лондону у поређењу са околним руралним подручјем [5]. *Manley* је 1958. године ову разлику температура у свом раду први пут назвао градско термичко острво (*urban heat island-UHI*, енг.) [6].

За што детаљнију и потпунију анализу термичких острва потребно је упоређивати што дуже временске периоде посматрања мерења температуре ваздуха. У идеалном случају мерење температуре би требало започети пре изградње града. Тада би био уочљив чист антропогени утицај. Међутим, данас је врло тешко обезбедити такве низове осматрања.

Урбана термичка острва нису просторно хомогена. Структура градског простора је основни фактор ове нехомогености. Такође, њихов интензитет не расте континуирано од периферије ка градском центру, што ће бити показано и у овој дисертацији.

Стање термичких острва најчешће бива описано помоћу величине која се назива интензитет тармичких острва. Ова величина је дефинисана као разлика температуре ваздуха у урбаној и одговарајућој руралној средини.

Као главни узрок овог феномена бива навођена појава да се на једном, релативно великом простору концентришу несразмено велики број објеката од бетона (зграде), површине од асфалта (улице, тротоари, итд.) и других материјала који у односу на природне материјале и површине, зелене и водене површине, а посебно површине под шумом, имају својства повећане топлотне акумулације. Истовремено, својство топлотне акумулације, у овим просторима, јавља се и као последица интензивног саобраћаја и индустријске активности, чиме, истовремено, бива остварено повећано

аеротермичко загађење. Повећана концентрација гасова који бивају добијани из емисије услед преноса топлоте зрачењем доводе до већег задржавања топлоте, чиме значајно бива повећана температура ваздуха у градској средини.

Ефекти термичких острва су многобројни, у наставку су наведени само најзначајнији:

- повећана температура ваздуха;
- повећана потрошња енергије за хлађење објеката;
- повишена емисија гасова стаклене баште и загађење ваздуха;
- опасност по здравље људи;
- неадекватан спољашњи топлотни комфор;
- опасност за воду и водене системе;
- утицај на вегетацију и животиње.

Као директни узроци настанка и ширења термичких острва могу бити наведени следећи фактори:

1. неадекватно просторно планирање;
2. употреба неодговарајућих грађевинских материјала;
3. смањење зелених површина;
4. повећање интензитета саобраћаја и
5. неиспуњавање препорука из области енергетске ефикасности у зградарству.

Стварањем окружења измењене природне средине и измене неких термодинамичких својстава има за последицу да у тој микро средини долази до:

1. повећања долазног дуготаласног зрачења услед апсорпције земљишта и задржавања топлоте услед загађења урбане атмосфере. Током дана, урбане средине добијају енергију од Сунца путем Сунчевог зрачења. Енергија Сунчевог зрачења се рефлектује или апсорбује, с тим да се велики део апсорбоване енергије најинтензивније одаје у условима када је температура ваздуха околине нижа, тачније, у вечерњим и ноћним сатима;
2. смањење дуготаласне емисије тла које се рефлектује и емитује у уличним кањонима (*street canyon*, енг.). Геометрија уличних кањона доприноси

смањењу губитка дуготаласног зрачења као резултат комплексне размене топлоте између зграда. Инфрацрвено зрачење се емитује од зграда и уличних површина унутар кањона. Зграде апсорбују велики део инфрацрвеног зрачења од земље и зраче назад значајно увећану количину топлоте;

3. повећања апсорпције краткоталасних зрачења због мале вредности албеда* у улучним кањонима. Геометрија кањона смањује ефикасност албедо система због вишеструких рефлексција краткоталасног зрачења које емитује површина кањона;
4. повишене дневне акумулације топлоте услед термичких својстава урбаних материјала (већи топлотни капацитет). Количина апсорбоване енергије зависи од термичке масе објекта изложеног Сунчевом зрачењу, али и од осталих физичких карактеристика. Грађевински материјали у градским срединама често имају тенденцију да апсорбују и акумулирају топлотну енергију. После заласка Сунца, енергија се у дужем временском периоду ослобађа таласним зрачењем. У градским срединама где је велика густина грађевинских објеката на малом растојању, проценат дуготаласног зрачења који се рефлектује директно у атмосферу значајно је мањи него у руралним срединама. Дакле, енергија која се апсорбовала на зградама, топлотним зрачењем поново бива емитована на локално окружење и изазива загревање ваздуха;
5. ефекат стаклене баште у урбаним срединама доприноси повећању дуготаласног зрачења из загађене урбане атмосфере. Овај додатни добитак од зрачења у граду значајно смањује укупно зрачење које се одводи из града.

Неки од ових фактора имају значајан утицај само у дневним условима, док остали имају изражен утицај и у ноћним условима, када узрокују повећање температуре ваздуха.

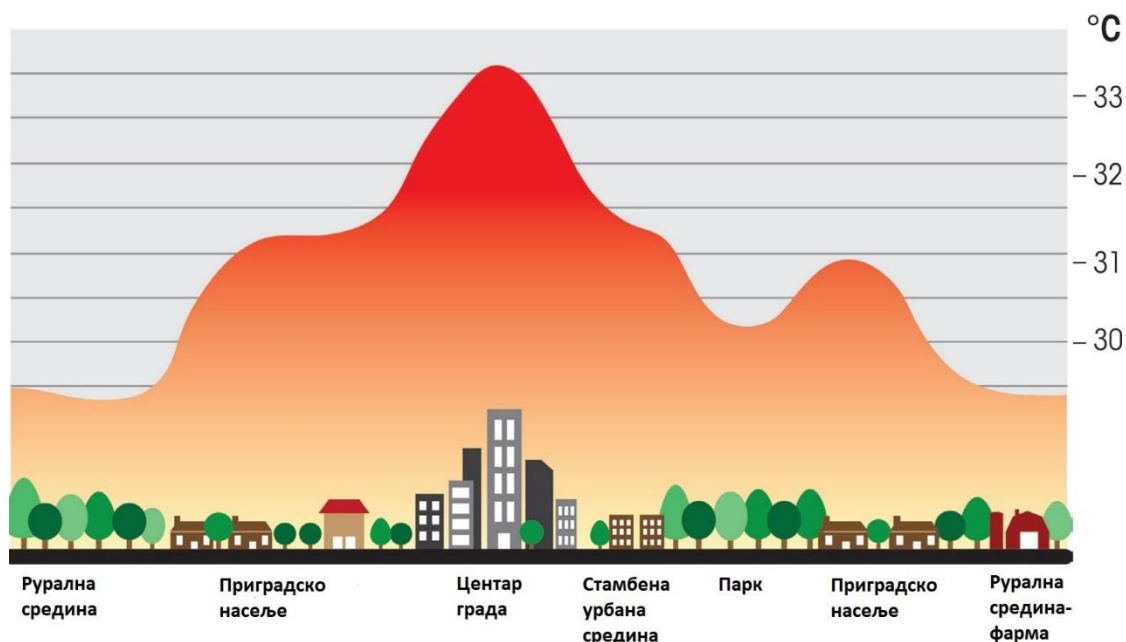
За одређивање појединих заједничких карактеристика термичких острва у урбаним областима коришћене су студије које су разматрале климатске карактеристике [7-9]. Утицај термичких острва се манифестује повећањем средње дневне, минималне и

* алbedo, *lat.* белина

максималне температуре ваздуха [10]. Једна од основних карактеристика термичког острва јесте да је његов интензитет већи у ноћном периоду него у дневном [11]. Овај ноћни ефекат уочен је на основу брзог раста интензитета термичког острва у периоду заласка Сунца, с тим да се приликом изласка Сунца вредност интензитета термичког острва смањује [11,12]. Јасно је да је узрок овој појави постојање објеката веће термичке инерције у урбаној средини и њихово одсуство у руралним срединама. У градовима са већим бројем становника утицај термичких острва на животну средину је израженији [10]. Значајно је истаћи да интензитет термичког острва не мора увек бити позитиван и у директној вези са бројем становника [11,13]. Интензитет термичких острва у градској средини често може да варира као и сама урбана форма града. У деловима града који су гушће насељени или имају мање вегетације вредност интензитета термичких острва је израженија.

Климатско подручје града може да утиче на вредност интензитета термичких острва, а у одређеним случајевима и да га елиминише [14]. На више појединачних примера [15, 16] показано је да се температурна разлика повећава са брзином струјања ветра и да се повећава турбулентни транспорт загрејаног градског ваздуха. Такође је уочено да повећана облачност смањује интензитет термичких острва [15, 16]. Због високог атмосферског притиска, који је забележен услед повећаног интензитета термичких острва, долази до слабијег интензитета ветрова и мање облачности [17]. Из горе наведеног закључено је да су климатски услови града и термичка острва, као засебан феномен, у узајамној спрези.

На Слици 1.1 дат је шематски приказ температуре ваздуха у градској, приградској и сеоској средини у условима ведре ноћи без ветра. Може јасно бити уочена типична расподела температура ваздуха, као и температурне границе [18]. Могуће су варијације у профилу температуре узроковане различитим врстама подлоге и топографије градске средине, као што су паркови, рекреацијска подручја, комерцијална и индустријска постројења, али и језера, реке и интензитет саобраћаја.



Слика 1.1 Шематски приказ промене вредности температуре ваздуха од руралног према урбаном подручју*.

Како су термичка острва нестационаран феномен, она подлежу како периодичним тако и непериодичним променама. Након настанка термичког острва у урбаној средини, његов интензитет, према правилу, током времена расте, а простор који захвата се шири. Осим ових промена, јављају се и друге, непериодичне промене интензитета термичких острва, условљене метеоролошким факторима, а ређе антропогеним утицајима, као што могу бити интервенције или грађевински радови у близини мерне станице или мерног места на реалним локацијама.

Максимални интензитет градског термичког острва обично се постиже неколико сати након заласка Сунца [18].

Вегетација, а нарочито дрвеће, поседује неколико механизма за хлађење и може бити веома ефикасна за ову сврху. Међутим, у којој мери вегетација расхлађује урбане средине зависи од избора, врсте и расподеле постављања одређене врсте дрвећа на одређеним местима. Многе пејзажне архитекте и пројектанти урбаних средина непрекидно улажу напоре за очување постојећих зелених површина у

* преузето из: Authority GL. London's urban heat island: a summary for decision makers. London: Greater London Authority. 2006 Oct.

односу на урбани развој, то јест, теже да очувају и/или постигну баланс између урбане градње и отвореног простора.

Како термичка острва повећавају температуру унутар градских средина, то често доводи до негативних последица по здравље локалног градског становништва. Метеоролошки догађаји попут топлотних таласа могу довести до пораста смртности [19]. Неки од значајних топлотних таласа су се десили у Француској 2003. године, што је узроковало 15 хиљада смртних случајева [20] и Чикагу 1995. године, где је било 739 смртних случајева [21]. У случају који је 2003. године задесио Француску, средња вредност летње температуре била је виша за $3,7^{\circ}\text{C}$ у односу на период од 1950. до 2003. године због карактеристика термичких острва које су у раду [22] приказане у корелацији са променама у стопи смртности.

Повећање температуре ваздуха у урбаним срединама директан је узрок повећања енергетских потреба становништва за хлађењем [23]. Ниво повећања енергетских потреба за хлађењем зависи од енергетске ефикасности самих објеката [24]. Повишена температура ваздуха услед термичких острва може узроковати повећано коришћење клима уређаја током најтоплијих периода, што може довести до додатног повећања температуре ваздуха у градској средини, од $0,5^{\circ}\text{C}$ или више у улицама где су објекти поређани континуално са обе стране [25, 26].

Рационализација и смањење специфичне потрошње енергије у свим секторима, главни је приоритет у готово свим земљама света, који, поред осталог, утиче на текуће трошкове за енергију, коришћење резерви фосилних горива и заштиту животне средине. Стога је проучавање утицаја термичких острва на енергетску ефикасност зграда, иако тренутно занемарен, веома значајан аспект.

У Европској унији, постојеће зграде троше више од 40% укупне потрошње финалне енергије и учествују са око 36% у емисији CO_2 [27]. Сектор зградарства је највећи потрошач финалне енергије, а процене су да ће тај тренд и у будућности бити настављен. Енергетска ефикасност у стамбеном сектору у Србији на знатно је нижем нивоу у односу на земље чланице ЕУ. Домаћинство је сектор који је одговоран за трећину укупне потрошње финалне енергије у Србији [28].

Тренутно се у све већем броју земаља јавља потреба да буду процењене и спроведене мере које могу ублажити даља повећања температуре околног ваздуха у урбаним зонама и повезаних негативних утицаја на топлотну угодност код људи, као и енергетску ефикасност објеката. Владе многих земаља препознале су користи позитивног ефекта природног еко-система те се директивама Европске уније намећу стандарде за квалитет ваздуха и воде. Ово се такође огледа у све већем интересовању и потреби за развојем и применом одрживог развоја у урбаним срединама, са циљем значајно већег коришћења урбаних простора.

Урбани климатолози су посматрали и документовали ефекат термичких острва у стотинама градова широм света [29-33]. На основу наведене документације израђен је и публикован широк опсег радова са дефинисаним сложеним научним методологијама за мерење интензитета градског термичког острва. Неопходно је истаћи да су у различитим публикацијама неретко присутне разлике у препорученој методологији мерења интензитета градског термичког острва, што такође указује на потребу за даљим испитивањима, али и за унификацијом методологије испитивања.

Последњих деценија, нумеричка механика флуида (*Computational Fluid Dynamics*–CFD, енг.) интензивније бива коришћена за процену квалитета унутрашњег простора зграда, као и топлотног и масеног транспорта између унутрашњих просторија и омотача зграде [34]. Значајно бива коришћена и у истраживању струјања ветра и процеса који су повезани са струјањем у спољашњем окружењу (око зграда), што такође обухвата и термички комфор спољашње средине [35], дисперзије загађивача [36], конвективан пренос топлоте на фасадама [37], природну вентилацију [38]. Напретком рачунара, могуће је направити квалитетније и финије прорачунске мреже, тако да нумеричким симулацијама можемо решавати сложене геометрије, комплексна струјања, како код унутрашњег тако и код спољашњег комплексног простора.

Енергетске симулације су такође користан алат у процењивању потрошње енергије у зградама, како у фази пројектовања, тако и у осталим фазама животног века зграде. Последњих година, енергетске симулације значајно помажу истраживачима и инжењерима приликом пројектовања нових објеката, али и код анализа потрошње

енергије и мера унапређења постојећих објеката. Проблеме приликом израде енергетских симулација често представљају непотпуни и нетачни улазни подаци, али и упрошћење постојећих модела. Неколико студија указало је на велика неслагања између симулираних и мерених вредности енергетских перформанси зграда [39-41]. Једино решење да се приближимо реалној потрошњи енергије објекта приликом енергетских симулација јесте валидација модела измереним вредностима одређених параметара или калибрација. Калибрацији компјутерских програма који симулирају даје се све више на важности приликом многих истраживања.

Све наведено су били разлози да ова дисертација буде посвећена управо истраживању утицаја термичких острва на повећано коришћење енергије за хлађење. У том смислу, дефинисан је и основни циљ истраживања који је описан у следећем поглављу.

1.1 Циљ истраживања

Основни циљ ове дисертације јесте да применом савремених експерименталних и нумеричких метода буде квантификован утицај и успостављена аналитичка зависност између градских (распоред зграда, карактеристика омотача зграда, заступљеност зелених површина, интензитет саобраћаја) и метеоролошких (температура ваздуха, релативна влажност ваздуха, концентрација CO_2 , интензитет сунчевог зрачења, брзина и правац ветра) параметара на вредност интензитета термичких острва. Такође, други циљ ове дисертације јесте да буде квантификован утицај и успостављена аналитичка зависност између интензитета термичких острва и повећане потрошње енергије у зградама током летњег периода, другим речима, да буде препоручена побољшана методологија прорачуна за остваривање оптималног топлотног комфора при пројектовању градских средина.

Да би били остварени дефинисани циљеви ове дисертације било је неопходно да буде:

- систематизовано прегледана стручна и научна литература из области предвиђања и понашања „термичких острва“, у којој су коришћене различите мерне методе, аналитички и нумерички модели;
- формирана база експерименталних података о међусобној зависности промене температуре, релативне влажности, правца и брзине струјања ваздуха, радијантне температуре и концентрације угљен-диоксида у спољашњем ваздуху, температуре спољашње површине омотача објекта (фасаде), температура ваздуха унутар (репрезентативног, школског) објекта, те топлотног протока кроз омотач објекта;
- формиран нумеричко-аналитички модел којим ће моћи да буде поуздано предвиђено динамичко понашање температурног, брзинског поља и поља концентрација угљен-диоксида у градским срединама;
- формиран нумеричко-аналитички модел којим ће моћи да се, за унапред дефинисане вредности параметара енергетске ефикасности зграда и квалитета животне средине, урбанистички пројектују градске средине;
- формирана база репрезентативних података као резултат нумеричких симулација, који ће моћи да послужи за даљи развој и проверу тачности

других нумеричко-аналитичких модела као и за даље установљивање зависности процеса промене интензитета термичког острва и потрошње енергије у зградама.

1.2 Предмет рада докторске дисертације

Предмет рада ове дисертације јесте испитивање понашања термичких острва, праћење узрока настанка, интензитета и размере термичких острва као и његовог понашања у времену и простору под утицајем метеоролошких услова (температуре ваздуха, радијантне температуре, релативне влажности ваздуха, брзине ваздуха и интензитета сунчевог зрачења) и локалних особености и својстава микросредине, са циљем одређивања утицаја термичких острва на повећану потрошњу енергије за хлађење објеката.

У складу са постављеним задатком, а ради стицања општег увида у ову проблематику, у 1. поглављу ове дисертације обухваћена су уводна разматрања, приказани су основни појмови у области дисертације и циљеви докторске дисертације.

У поглављу 2, приказане су теоријске основе термичких острва у градској средини, утицај вегетације и саобраћаја на вредности интензитета термичких острва. Приказане су карактеристике термичких острва као локалног феномена на примерима многих градова међу којима је и Београд. На крају, приказан је преглед литературе о потребним повећаним количинама енергије за хлађење зграда услед утицаја термичких острва на локалним примерима.

У поглављу 3, дати су преглед и анализа доступне литературе о термичким параметрима спољашње градске средине, који су такође од суштинског значаја за урбано планирање, а у директној су вези са параметрима који утичу на вредности интензитета термичког острва у градској средини.

У поглављу 4, детаљно су приказани резултати експерименталних истраживања, резултати за изабрану градску и руралну средину, детаљни описи метода, образложење разлога избора локације, опис начина постављања мерне опреме (мерна места) и временски периоди мерења дефинисани према одговарајућим међународним и домаћим стандардима.

Начини формирања нумеричко-математичког модела и нумеричког решавања струјног и температурног поља, за формирану физички модел одабране урбане средине, приказани су у поглављу 5. Дате су једначине за описивање струјно-термичких процеса за посматрани случај и приказане су основе моделирања преноса топлоте зрачењем. Нумеричке симулације засноване на методи коначних запремина обављене су коришћењем комерцијалног софтвера *CHAM Phoenix*.

У поглављу 6, приказани су резултати обављених нумеричких симулација струјних и температурних поља изабране репрезентативне урбане средине. Нумеричке симулације, приказане у овом поглављу, урађене су током једног дана за три временска периода, која су дефинисана као три случаја, ујутру (Случај 1 – S1), поподне (Случај 2 – S2) и увече (Случај 3 – S3), након заласка сунца.

Поређењем изабраних вредности добијених коришћењем нумеричке симулације у дефинисаним тачкама поља са одговарајућим вредностима резултата експерименталних испитивања, обављена је валидизација предложеног и развијеног нумеричког модела.

Поглавље 7 посвећено је одређивању корелације између повећаног интензитета термичког острва на повећање потребе за хлађењем објеката који се налазе унутар термичког острва. У ту сврху, прорачунате су потребе за грејањем и потребе за хлађењем одабраног модела објекта – Високе текстилне школе за дизајн, технологију и менаџмент. Прорачуни су спроведени помоћу методологије прописане стандардом SRPS EN ISO 13790 и коришћењем комерцијалног софтвера *Design Builder*. У сврху одређивања ове корелације било је неопходно спровести три врсте прорачуна.

Први прорачуни потребе енергије за хлађење и грејање за модел објекта који се налази у зони термичког острва, на својој стварној локацији – општини Палилула, Старине Новака бр. 24. Прорачуни су спроведени применом софтвера *Design Builder*. Претходно је модел валидизиран поређењем података добијених нумеричким симулацијама помоћу софтвера *Design Builder*, са вредностима које су добијене аналитичким прорачуном на основу стандарда SRPS EN ISO 13790.

Други, за прорачун потребе за хлађењем модела објекта, уколико би се он налазио на локацији у општини Гроцка, Винча, Мике Аласа 12-14, која се не налази у зони термичког острва. На овој локацији је био постављен метеоролошки стуб. У овом случају урађен је прорачун помоћу софтвера *Design Builder*.

Коначно, у трећој врсти прорачуна, прорачунаване су потребе за хлађењем модела објекта који се више није налазио на својој стварној локацији, него на локацијама унутар термичких острва. Ови прорачуни рађени су аналитичким методама на основу смерница стандарда SRPS EN ISO 13790, а као улазни, тзв. метео-подаци, коришћени су подаци претходно добијени помоћу нумеричких симулација спроведених коришћењем софтвера *CHAM Phoenix*.

У закључку, поглављу 8, дат је резиме свих сегмената рада. Добијени резултати су сумирани прегледно. Дата су закључна разматрања уз критички осврт на остварене резултате спроведених истраживања. Истакнути су научни и практични доприноси дисертације у погледу применљивости резултата истраживања. Поред тога, дате су смернице за даља истраживања.

2. Теоријске основе термичких острва

2.1 Интензитет термичког острва

Најважнија карактеристика термичких острва јесте интензитет термичког острва (*urban heat island intensity-УИИ*, енг.). Ова величина се дефинише као разлика температура ваздуха између урбане и руралне средине:

$$УИИ = T_{urban} - T_{rural} \quad (2.1)$$

Непосредна околина урбане средине или референтна рурална средина мора да испуњава услов да није захваћена урбаним утицајима посматране средине, како би мерења температуре која се користе за прорачун интензитета термичког острва била валидна.

Градови представљају динамичке целине које су карактерисане свакодневним активностима њихових становника, различитим облицима трансформације енергије чије свакодневно дејство утиче на састав атмосфере у градовима. Структура површине коју град захвата се такође стално мења чиме се мења и структура самих градова. Услед описане динамичке природе градске средине, непрекидно се мењају и топлотни услови у тој средини. Те промене су, као што је већ речено, према правилу такве да условљавају повећану потрошњу и веће задржавање енергије у простору који град захвата. Услед тога, температура ваздуха у граду расте. С друге стране, у мање насељеној околини градова, таквих промена нема, или су често занемарљиве.

У публикованим студијама постоје значајне разлике у приступу и критеријумима за израчунавање интензитета термичких острва топлоте [42-46]. Поменуто разлике су, пре свега, у вези са начином мерења температуре у урбаној и руралној средини, тако да је пре свега потребно јасно дефинисати начин на који желимо да дефинишемо интензитет термичких острва. Прегледом литературе закључено је да се издвајају следећа два начина дефинисања интензитета термичких острва:

- дефинисање интензитета термичких острва на бази температуре ваздуха;
- дефинисање интензитета термичких острва на бази температуре граничних површина.

Интензитети термичких острва дефинисани на основу температуре граничних површина углавном бивају одређени на основу обрађених сателитских података, што може довести у питање њихову тачност. Вредности температуре ваздуха добијене комплексним експерименталним мерењима на реалним локацијама за израду енергетских симулација и прорачун интензитета термичких острва дају прецизније и доступније податке. Због тога је одлучено да у овој дисертацији за прорачун интензитета термичких острва буде коришћен приступ заснован на измереним вредностима температуре ваздуха.

2.2 Аналитички модел

У прошлости је било више покушаја да вредност интензитета термичког острва буде изражена математичким изразом, такозваним аналитичким моделом, који даје везу између најбитнијих параметара који утичу на ову вредност као што су: ветар, градијент температуре регистрован у руралној области или параметри који одређују величину града као што је популација. Ludwig и Kealoha [47] су за градове који имају више од два милиона становника, предложили да се вредност интензитета термичког острва, UHI [$^{\circ}\text{C}$] опише следећим математичким изразом

$$UHI = 2.6 - 14.8 \cdot \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta p}\right) \quad (2.2)$$

Где је:

$\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta p}\right)$ градијент температуре у вертикалном правцу у зависности од атмосферског притиска,

Овај израз је касније модификовано и унапредио F. Ludwig [48] увођењем броја становника као новог утицајног чиниоца, $P[-]$:

$$UHI = P^{\frac{1}{4}} \left[0.663 - 0.298 \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta p}\right) \right] \quad (2.3)$$

Такође Оке [49] је развио математички израз за прорачун максималне вредности интензитета термичких острва на нивоу целог града, увођењем средње брзине струјања ветра, \bar{u} [m/s]:

$$UHI = \frac{P^{\frac{1}{4}}}{4 \cdot \bar{u}^2} \quad (2.4)$$

Овај израз није довољно тачан за посматрање енергетских потреба за хлађење зграда на одређеној градској локацији.

Поређењем резултата за горе приказане релације установљено је значајно одступање за многе европске градове. Термичка острва могу да настану и око појединачне зграде или дуж неке улице, тако да температурне разлике могу бити и до 4°C у улицама са различитиом урбаном структуром [50].

2.3. Утицај вегетације на термичка острва

Поред саме структуре града, вегетација (дрвеће, паркови) у великој мери утичу на амбијенталну температуру у градској средини.

Урбану климу могуће је ефикасно модификовати променом количине топлотне енергије која се апсорбује, чува и преноси. Вегетација може бити веома ефикасна, јер даје неколико механизма за хлађење који делују истовремено и међусобно су комплементарни. Механизми хлађења коришћењем вегетације детаљно су објашњени у наставку.

2.3.1 Утицај вегетације кроз евапоративно хлађење и испаравање

Основу овог поступка чини испаравање финих капљица воде топлотом из ваздуха. Термичка енергија ваздуха користи се ради процеса преласка воде из течног у гасовито стање, чиме се снижава температура ваздуха. Као споредни ефекат, овим поступком овлаживања се повећава влажност ваздуха. Када се вода налази у биљкама, на њиховој површини или у земљишту, процес се назива испаравање. Зелене површине задржавају воду дужи временски период него бетонске површине, што је један од најбитнијих разлога да је ваздух хладнији у околини где се налази дрвеће.

Дакле, термичка енергија се користи за процес испаравања уместо да буде пребачена у топлоту коју човек осећа [18]. Вегетације генерално има мање у урбаним срединама, градовима, него у руралним срединама, а како овакав начин хлађења у летњим периодима може значајно да утиче на интензитет термичких острва, те је јасна потреба за озелењавањем урбаних средина.

2.3.2 Утицај вегетације кроз осенченост

Крошња дрвета у летњем периоду смањује директне Сунчеве зраке који се апсорбују на земљино тло, чиме се смањује загревање локалног окружења.

Дрвеће такође може да смањи директне добитке енергије кроз прозоре објеката чиме се смањује унутрашњи ефекат стаклене баште. На овај начин се смањује потреба за коришћењем електричних уређаја за хлађење унутрашњег простора, који због добро познатог начина рада, могу додатно да утичу на повећање спољашње амбијенталне

температуре ваздуха у градским срединама.

Интензитет хлађења локалне градске средине значајно зависи од одабира врсте вегетације. Дрвеће са густим грањем значајно смањује долазну сунчеву енергију зрачења, смањује соларно загревање, али смањује и светлосни комфор. Уколико употреба вештачког осветљења може довести до локалног загревања, потребно је направити одговарајућу равнотежу између ова два утицаја.

Помоћу предходно наведених механизма хлађења које пружа дрвеће значајно може да се умањи амбијентална температура ваздуха. Веома је важно да се у градским срединама одржавају одговарајући услови за очување зелених површина и влаге тла. Ако влага тла постане ограничена или озбиљно угрожена, стабла губе своју способност хлађења околног амбијента.

Уочено је да је температура ваздуха на висини од 1,2 метра изнад травнате површине нижа за 2°C него температура саме подлоге [51]. Интензитет и правац ветра такође могу да утичу на вредност амбијенталне температуре око зелених површина [52, 53]. Мерења која су обављена у приградском делу Сакраманта, САД, у насељима са великим дрвеним крошњама, показала су да је дневна температура ваздуха нижа за 1,7-3,3°C него у областима без дрвећа [54]. Анализа података са вредностима температуре ваздуха прикупљених широм града Портланда, у Орегону, показује да су дрвене крошње један од најважнијих фактора смањивања температуре у урбаним срединама [55].

2.4. Утицај саобраћаја на термичка острва

Емисија издувних гасова из аутомобила један је од главних фактора који одређују ниво загађења у урбаним срединама. Гасови који се добијају из емисије доводе до феномена преноса топлоте и зрачења, а јављају се између ваздуха и земљине површине и доводе до повећања температуре у градским срединама.

У Европи, 80% становништва живи у градским областима и највећи допринос концентрацији аерозагађивача у градским срединама има саобраћај, а нарочито друмски саобраћај [56]. Технолошка унапређења, као и закони којима се ограничава емисија аерозагађивача из возила довела је до појединачног смањења емисије из возила. Међутим, пораст укупног броја возила утиче на то да наведене мере нису довољне да би били достигнути све рестриктивнији стандарди квалитета ваздуха. Основе емпиријских односа између аерозагађења и карактеристика саобраћајног тока постављене су још пре више деценија [57, 58]. Међутим, све до 60-их година прошлога века, штетност емисије аерозагађивача услед градског саобраћаја сматрана је релативно малим проблемом по здравље становништва који живе у тим срединама.

Од тада се обим саобраћаја повећавао, узрокујући све чешћа саобраћајна загушења, а тиме и веће урбано-еколошке проблеме. Опсег наведеног може нам описати добро утврђена чињеница да сваки литар сагорелог фосилног горива произведе приближно 100 g CO₂, 20 g VOC*, 30 g NO_x, 2.5 kg CO и много других штетних и отровних материја, попут једињења сумпора и чврстих честица [59], а када се наведени подаци повежу са информацијом да штетну емисију код модела аутомобила старијих генерација чини 75% емисија издувних гасова, 20% загушљивих испарења из картера и 5% штетних испарења из резервоара за гориво и из карбуратора [60]. Допринос возила може варирати од 90%, 60% и 40% за емисије гасова CO, HC и NO_x наведеним редоследом, у односу на удео других загађивача, попут индустријских, енергетских, или из осталих видова саобраћаја [61].

* Испарљива органска једињења, енг. *Volatile organic compounds*

2.5 Термичка острва као локални феномен

Значајно је истаћи да је број истраживања посвећен карактеристикама термичких острва спровођен широм света у сталном порасту и да је до данас публикован велики број радова на ову тему.

У Атини, мерењем амбијенталне температуре на четрдесет метеоролошких станица забележено је да разлика дневне температуре у градској средини варира у интервалу од 4 до 15°C у поређењу са руралном средином [29]. На примеру Брисела највећи интензитет термичких острва у летњем периоду у ведрим временским условима је у вечерњим сатима након заласка сунца [62]. Максимални интензитет термичких острва одређен у Барселони, 7-8°C, добијен је поређењем дневне максималне температуре измерене у градској средини са температуром која је измерена на аеродрому [63]. Такође за град у јужном делу Шпаније, Гранада, забележен је интензитет термичких острва у опсегу 3-3,5°C у зависности од доба дана [64].

Средње сатне вредности интензитета термичког острва у Мексико Ситију износиле су 6,5°C. Такође је закључено да се термичка острва чешће јављају у ноћном периоду, 75% анализираних мерења [30]. Истраживањем термичких острва за град Њујорк показано је да се максимална вредност интензитета термичких острва појављује након заласка сунца [65]. Још једна релевантна студија за град Њујорк показује да температура ваздуха варира 2°C између различитих локација у граду [66]. Већи интензитет термичких острва за Токијо забележен је у зимском периоду у вредности 45°C у односу на лето када се та вредност кретала у интервалу 1-1,5°C [67]. Такође већи интензитет термичких острва у зимском периоду је забележен за град Мелбурн и његова максимална вредност је износила 2,4°C [68].

Негативан интензитет термичких острва -4°C утврђен је за Рејкјавик, главни град Исланда, током свих летњих дана [69]. Разлог томе је географска ширина Исланда којој одговара мали угао Сунца у летњем периоду који ствара сенку на објектима у северним градовима. Високе зграде у центру града могу да онемогуће добијање сунчеве светлости у уличним кањонима. Температура ваздуха у градским улицама је много нижа него у руралном подручју где има пуно сунчеве светлости у раним јутарњим сатима. За пустињски град Финикс, САД такође је забележен негативан

интензитет термичких острва у току дана, док је позитиван интензитет термичких острва 3-8°C уочен током ноћи [70].

Интензитет термичког острва може да варира у самом граду и може имати неједнаке вредности и ефекте. На примеру града Финикса, САД, показано је да се интензитет термичког острва повећава, када се средња вредност температуре у становима смањи. Како је неминовно да тренд пораста становништва у урбаним срединама буде настављен, градови ће имати значајно већи интензитет термичког острва што ће утицати и на саме енергетске потребе локалног становништва [71].

У Лондону је спроведено истраживање интензитета термичких острва током различитих годишњих доба. Утврђено је да су просечни интензитети термичких острва током ноћи били слични током лета и зиме [31, 72]. Један од већих пројеката праћења температурне разлике, такође је урађен за Лондон [73]. У овој студији је коришћено 80 мерача температуре ваздуха, постављених на више локација у Лондону. Утврђен је просечан интензитет термичких острва током ноћи 3-4°C. Максимални забележен интензитет термичког острва износио је 8°C.

Watkins [57] је такође показао добре односе између интензитета термичких острва и брзина и правца ветра, удаљености од центра града и руралне температуре. Он се није бавио детаљним утицајима термичких острва у уличним кањонима. *Watkin*-ов рад је основа за термичка острва у Водичу CIBSE A [74].

У табели 2.1 су приказани интензитети термичких острва за поједине веће европске градове.

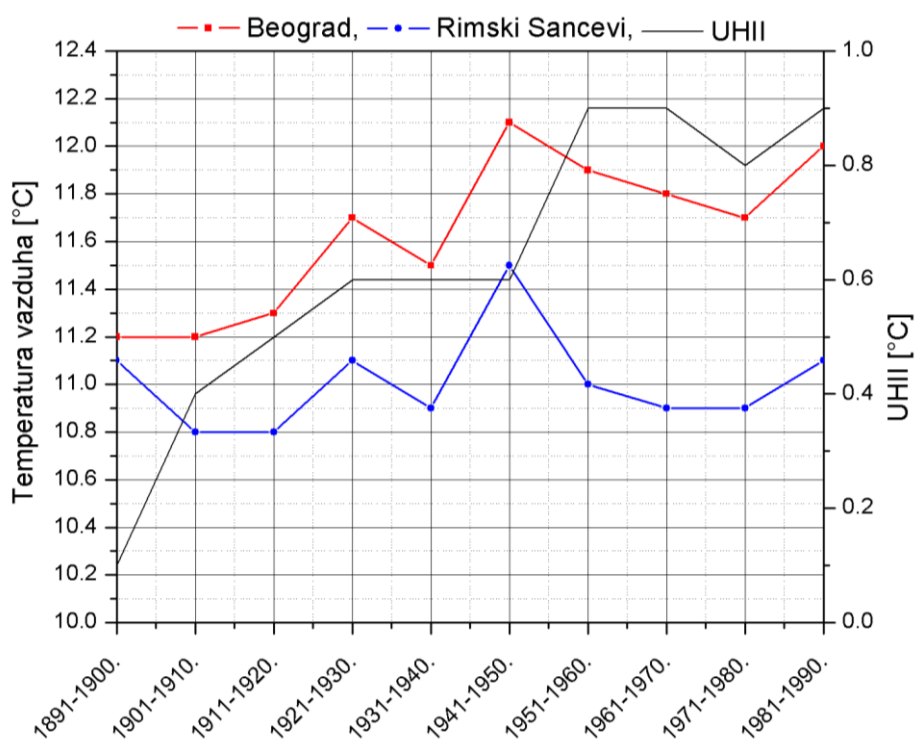
Табела 2.1 Интензитет термичког острва за неке европске градове

Држава, град	Интензитет термичког острва [°C]	Референца
Немачка, Фрибург,	10	<i>Nuebler 1979. [75]</i>
Швајцарска, Базел	6	<i>Wanner et al. 1983. [76]</i>
Швајцарска, Берн	5	<i>Wanner et al. 1983. [76]</i>
Швајцарска, Фрајбур	5	<i>Wanner et al. 1983. [76]</i>
Швајцарска, Цирихl,	7	<i>Wanner et al. 1983. [76]</i>
Шведска, Гетеборг,	5	<i>Eliasson 1996. [77]</i>
Пољска, Лођ	12	<i>Klysik et al. 1999. [78]</i>
Грчка, Атина	10	<i>Santamouris et al. 2001. [79]</i>
Мађарска, Сегедин	2.6	<i>Unger et al. 2001. [80]</i>
Француска, Париз	8	<i>Lemonsu et al. 2002. [81]</i>
Енглеска, Лондон	7	<i>Watkins et al. 2003. [82]</i>
Мађарска, Будимпешта	2.3	<i>Pongracz et al. 2006. [83]</i>
Италија, Рим	5	<i>Bonacquisti et al. 2006. [32]</i>

На основу наведеног, закључено је да ефекат термичких острва постоји у великом броју градова, независно од континента на којем се налазе, али да дефинисани интензитет може значајно да варира од начина посматрања и проучавања измерених параметара.

2.5.1 Термичко острво у Београду

Мерење температуре ваздуха у Београду започето је 1. јануара 1848. године, док су мерења у опсерваторијуму почела јула 1887. године. Метеролошки опсерваторијум је смештен у Карађорђевог парку, у Београду, где је надморска висина 132 метра, док су координате $44^{\circ}48'$ и $20^{\circ}28'$. Ипак, записани резултати о мерењу температуре у околини Београда нису постојали доста дуго. Први подаци о мерењу температуре на некој станици у широј околини Београда, постоје за метеоролошку станицу у Римским Шанчевима [84], која се налази у непосредној близини Новог Сада, тачније 10 километара северно од центра Новог Сада. На основу података са ове две мерне станице и вредности средњих десетогодишњих температура ваздуха у Београду, установљено је да је интензитет београдског термичког острва порастао од $0,1^{\circ}\text{C}$ у периоду 1891-1900. године све до $0,9^{\circ}\text{C}$ у периоду 1981-1990. године [85]. За поменуте локације уочава се да је дошло до раста температуре од $0,8^{\circ}\text{C}$ у стогодишњем периоду. На слици 2.1 и табели 2.2 јасно се види да интензитет термичких острва интензивно расте до тридесетих година прошлог века што одговара периоду итензивне изградње и развоја Београда.



Слика 2.1 Температура ваздуха и интензитет термичког острва између Београда и Римских Шанчева током периода 1891-1990. године

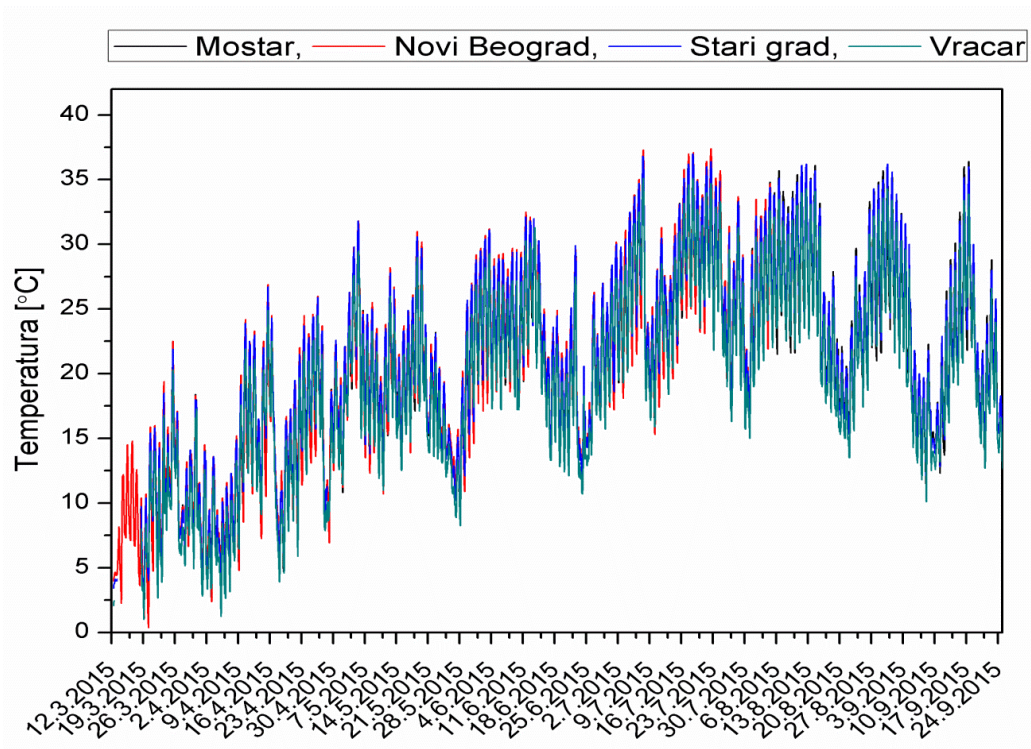
Табела 2.2 Стогодишњи ток средњих декадних температура ваздуха у Београду и у Римским Шанчевима [85]

Период	Београд- Карађорђевог парк	Римски Шанчеви	Разлика
1891-1900.	11,2	11,1	0,1
1901-1910.	11,2	10,8	0,4
1911-1920.	11,3	10,8	0,5
1921-1930.	11,7	11,1	0,6
1931-1940.	11,5	10,9	0,6
1941-1950.	12,1	11,5	0,6
1951-1960.	11,9	11,0	0,9
1961-1970.	11,8	10,9	0,9
1971-1980.	11,7	10,9	0,8
1981-1990.	12,0	11,1	0,9

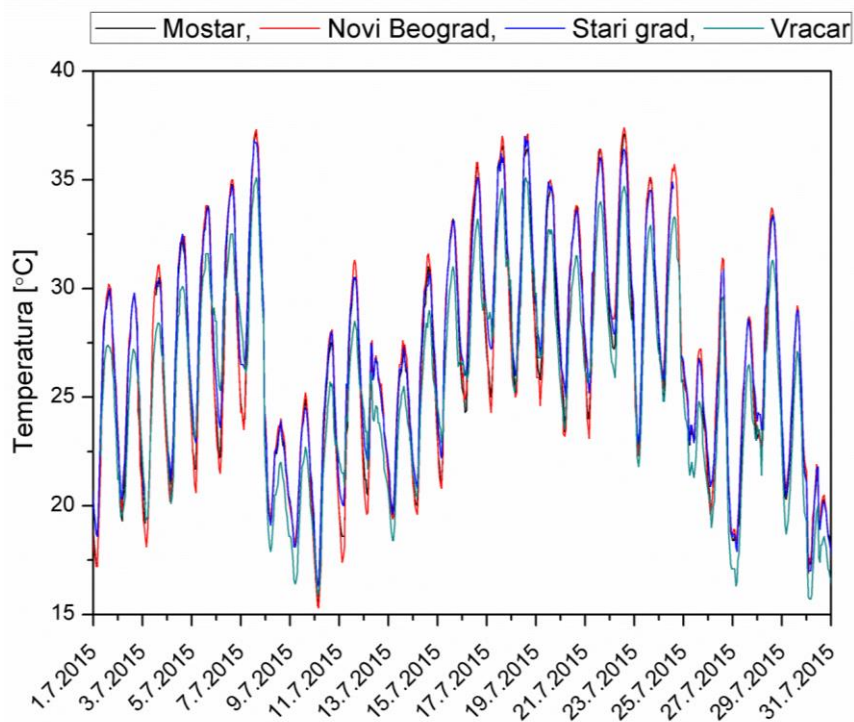
У Табели 2.2 је приказан само раст интензитета термичког острва за дате локације, међутим, оно се током историје града ширило у простору. Недостатак мреже станица на целом данашњем простору града током тог вишегодишњег периода онемогућава егзактно доказивање просторног ширења београдског термичког острва.

Истраживања новијег датума у којима је праћена вредност интензитета термичких острва и уједно покушана да се успостави зависност измерене температуре ваздуха са интензитетом саобраћаја, обављена су на ауто-путу на Новом Београду, тачније код Београдске арене (Штарк арене). Измерени подаци су поређени са подацима аутоматске метеоролошке станице у Кошутњаку, на основу чега је забележен интензитет термичких острва у интензитету $1,5-6,1^{\circ}\text{C}$, у зависности од доба дана [86]. Такође, нумеричким симулацијама, на основу граничних параметара који су добијени мерењем, идентификован је висок степен корелације за мерени период између интензитета термичких острва и протока саобраћаја на ауто-путу ($R^2 = 0.98$) [86].

Поред наведеног, на сликама 2.2 и 2.3 приказане су вредности температуре ваздуха које су забележене на четири метеоролошке станице у различитим деловима града Београда (Мостар, Нови Београд, Стари Град и Врачар) током 2015. године. Ови подаци су приказани за исти период када је рађено и експериментално истраживање у овој докторској дисертацији. На сликама се јасно види да у зависности од дела града, структуре града, у великој мери зависи и спољашња температура ваздуха која поред утицаја на потрошњу енергије у зградама има велики утицај и на спољашњи комфор и квалитет живота у том делу града.



Слика 2.2 Температура ваздуха на различитим метеоролошким станицама у Београду током 2015. године



Слика 2.3. Температура ваздуха на различитим метеоролошким станицама у Београду, у јулу 2015. године

2.6 Потрошња енергије зграда услед термичких острва

Повећана потреба за хлађењем унутрашњег простора не настаје само због повећања спољашње температуре ваздуха већ је узрокована већим соларним топлотним добицима, са све већим застакљеним површинама објеката и већим добицима топлоте од унутрашњих електричних апарата и осветљења. Такође, на повећану потребу за хлађењем унутрашњег простора у будућности ће утицати и значајно смањење потенцијала пасивне ноћне вентилације узроковано предвиђеним повећањем температуре у урбаним срединама.

Осим што значајно утиче на потрошњу енергије за хлађење у зградама, висока спољашња температура ваздуха у урбаним срединама доприноси повећању емисије аерозагађивача (сумпор-диоксида, угљен-моноксида, азотних оксида и суспендованих честица) [87].

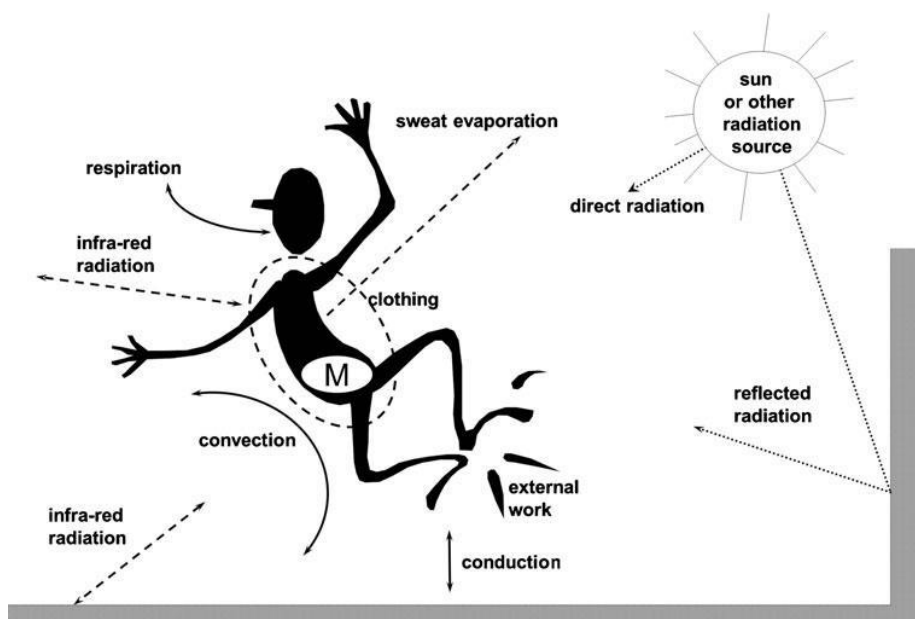
2.6.1 Преглед литературе потрошње енергије за хлађење зграда услед утицаја термичких острва

Утицај термичких острва на енергетске потребе зграда потврђен је у великом броју научних радова, од којих су неки приказани у наставку. Поређењем резултата добијених за Атину, утврђено је да је просечна енергија потребна за хлађење објекта у градској средини за 13% већа него за тај исти објекат у руралној средини. Поред тога, заључено је да се укупна просечна потрошња енергије за грејање и хлађење у периоду 1970-2010 повећала за 11% [88]. Такође за Атину је забележен интензитет термичких острва 6-8°C за одређену градску локацију и на примеру динамичке симулације пословне зграде установљено је да је расхладно оптерећење веће за 120% и смањена потреба за загревањем објекта за 38% у односу на референтну руралну локацију [79]. Интензитет термичких острва 4,5°C забележен за Рим током јула и августа и на основу детаљних нумеричких симулација, показали су да је за градску зону потребно 18-24 kWh/m² за хлађење објекта док је за референтну руралну зону потребно 10 kWh/m² [89]. У Лондону, на основу података са 20 метеоролошких станица и на основу динамичке симулације пословне зграде за све те локације добијено је да потребна енергија за хлађење објекта виша 24-43 kWh/m² у односу на референтну руралну област [90]. За Бостон је забележен интензитет термичког острва 1,3-2,8°C поређењем једне урбане и две руралне метеоролошке станице.

Динамичким симулацијама мале пословне зграде и породичне куће закључено је да је потребна енергија за хлађење канцеларије 20-37% виша за урбану област у односу на руралну, док је за породичну кућу та вредност виша за 3-9% [91]. Анализом потрошње енергије за нову зграду у Мелбурну, где је забележен интензитет термичких острва 1,4°C виша је за 17% за урбану област у поређењу са референтном руралном облашћу [92]. Прорачуном потрошње енергије на основу средњих месечних температуре ваздуха за период од 1900. до 2003. године за Цирих, утврђено је да је потреба за хлађење типичне зграде увећана за 35% [93]. За четири града у Грчкој, анализом климатских података за период од 1970. до 2010. године и прорачуном енергетских потреба за хлађење пословне зграде, забележен је пораст од 13,5 -27,2 kWh/m²/а у зависности од локације [94].

3. Термички параметри спољашње средине

Спољашњи термички комфор дефинисан је у *ASHRAE* стандарду [95] као „стање које изражава термичку угодност човека у изграђеном или неизграђеном окружењу и процењује се по субјективној евалуацији.“ Дефиниција је прихваћена на међународном нивоу и одређује шест основних фактора који морају бити узети у обзир приликом дефинисања услова за топлотну угодност: метаболизам, ниво одевености, температура ваздуха, средња температура зрачења, брзина ветра и релативна влажност ваздуха. Ових шест фактора независни су један од другог, али заједно доприносе термичкој угодности на отвореним просторима. Наведени параметри имају значајан утицај на топлотну угодност, јер они утичу на топлотну равнотежу људског тела, односно генеришу равнотежу топлоте у процесу метаболизма, конвекције, зрачења и испаравања [96]. На слици 3.1 приказано је узајамно дејство људског тела и околине [97].



Слика 3.1 Узајамно дејство људског тела и околине [97]

Карактеризација спољашњег топлотног окружењу захтева примену комплетног топлотног модела која узима у обзир све механизме размене топлоте.

3.1. Индекси за мерење спољашњег термичког комфора

Потешкоће приликом мерења топлотне удобности у сложеним урбаним срединама узрокована је недостатком одговарајућих индекса [98, 99]. За процену спољашњег термичког комфора, развијени су следећи термички индекси:

- физиолошки еквивалентна температура [100];
- стандардна ефективна температура [101];
- универзални термички климатски индекс [102-104].

Физиолошки еквивалентна температура (енг. *Physiologically Equivalent Temperature – PET*) дефинисана је као температура ваздуха при којој је у типичном затвореном окружењу, без ветра и сунчеве радијације, топлота људског тела у равнотежи са истом температуром коже као код спољашњих термичких услова [100]. Физиолошки еквивалентна температура се углавном користи за спољашњу термичку процену [105]. Међутим, индекс физиолошке еквивалентне температуре није калибрисан према субјективном осећају, а такође нису позната истраживања овог индекса за азијски континент.

Стандардна ефективна температура (енг. *Standard Effective Temperature – SET*) обухвата такође све променљиве које су у вези са климатским подацима, метаболичком функцијом и нивоом одевености. У поређењу са *PET* индексом, *SET* је у значајно мањој мери коришћен за процену спољашњег термичког комфора [106].

Универзални термички климатски индекс (енг. *Universal Thermal Climate Index – UTCI*) јесте температурни еквивалент за дату комбинацију ветра, радијантног зрачења, влажности ваздуха и температуре ваздуха [104]. Универзални термички климатски индекс представља топлотну угодност код људи на отвореном и четири параметра су кључна за његов прорачун: брзина ветра, температура ваздуха, влажност ваздуха и интензитет сунчевог зрачења. Сунчево зрачење се узима у обзир преко средње температуре зрачења. Поједностављена процедура и алгоритам за израчунавање *UTCI* индекса обавља се помоћу следећих улазних параметара – температуре ваздуха, брзине ветра, радијантне температуре и релативне влажности који фигуришу као зависни чланови у једначини за *UTCI*. Једначина може бити изражена (са ограничењем сваке променљиве) [107, 108] као:

$$UTCI = f(T_a, T_{rad}, v_a, p_a) \quad (3.1)$$

где су:

T_a – температура ваздуха, (°C)

T_{rad} – средња радијантна температура, (°C)

v_a – брзина струјања ваздуха, (m/s)

p_h – парцијални притисак водене паре (hPa)

Апроксимација функције зависно променљивих у једначини (3.1) важи само под следећим условима:

- брзина ваздуха мора бити између 0,5 и 17 m/s;
- средња радијантна температура мора бити између 30°C и 70°C;
- температура ваздуха треба да буде између -50°C и +50°C;

У једначини (3.1), температура ваздуха, средња радијантна температура и влажност ваздуха имају позитиван однос на UTCI, што значи да UTCI расте са повећањем ова три параметра. UTCI опада са повећањем брзине ветра у интервалу од 0,5 m/s до 17 m/s, при константним вредностима осталих параметара. Прорачун вредности овог коефицијента може бити израчунат помоћу комерцијалног софтвера који је развијен у COST Action 730 [109].

У Табели 3.1 приказане су UTCI категорије топлотног оптерећења и подела у зависности од вредности UTCI индекса [110].

Табела 3.1 UTCI категорије топлотног оптерећења

UTCI опсег [°C]	Топлотно оптерећења
изнад +46	Екстремно топло
од +38 до +46	Веома јако топло
од +32 до +38	Јако топло
од +26 до +32	Настанак
од +9 до +26	Не постоји
од +9 до 0	Умерено хладно
од 0 до -13	Јако хладано
од -13 до -27	Веома јако
од -27 до -40	Екстремно хладно

Међународно удружење биометеоролога (*International Society of Biometeorology* – ISB) и Светска метеоролошка организација (*World Meteorological Organization* – WMO)

формирали су посебну радну комисију у циљу даљег развијања и праћења UTCI индекса у свету.

3.2 Изложеност људи у урбаној средини

У овој дисертацији је за праћење термичке угодности за репрезентативну градску област као индикатор изабран универзални термички климатски индекс – UTCI. Међутим, температура ваздуха може варирати у различитим деловима градске средине, а поред тога битан је и субјективни осећај саме особе.

Из наведених разлога, често није најпогодније да тоplotно оптерећење буде представљено према просеку по сату UTCI. Прорачун тоplotног оптерећења током дана/ноћи у зависности од универзалног термичког климатског индекса зависи и од узраста и понашања особе. Понашање особе директно утиче на тоplotно оптерећење људи током дана/ноћи; на пример, старији становници су мање отпорни на тоplotно оптерећење. За посматрање тоplotне угодности одабране су две врсте градског становништва, особе средњих година и старије особе. Узимајући у обзир понашање и продуктивност поменутих особа током дана, тоplotно оптерећење, у зависности од UTCI, приказан је у Табели 3.2.

Особе средњих година већину свог времена проводе радећи дању и углавном немају проблема са сном, тако да је утицај UTCI већи у дневном периоду. За старије људе, који већи део дана проведу унутра, утицај UTCI код ове популације је једнако подељен између ноћног и дневног периода.

Табела 3.2 Профил две типичне врсте урбаног становништва

Урбано становништво	Дневни утицај UTCI (%)	Ноћни утицај UTCI (%)	Карактеристике
Особе средњих година – категорија (а),	65	35	Радно време током дана, мања шетња током дана, вежбање, здраво спавање
Старије особе – категорија (б)	50	50	Већи део дана проводе унутра, осетљивији на тоplotу, мало спавања, мања продуктивност

Тоplotно оптерећење треба посматрати за све узрасте на посебној скали, јер би требало да буду узети различити критеријуми при његовом израчунавању. На основу UTCI скала за мерење, нове скале за процену тоplotног оптерећења урађене су и приказане у Табели 3.3 [111]. Старије особе имају мању отпорност на тоplotно

оптерећење, тако да је скала процене за старије особе око 2°C нижа од скале за особе средњих година.

Табела 3.3 Модификоване UTCI категорије топлотног оптерећења

UTCI [°C] опсег Особе средњих година – категорија (а)	Топлотно оптерећење	UTCI [°C] опсег Старије особе – категорија (б)
Више од 45	1-Екстремно топло	Више од 42
38-45	2-Веома јако топло	36-42
33-38	3-Јако топло	31-35
27-32	4-Средње топло	25-30
22-26	5-Благо топло	22-24
9-21	6-Не постоји	9-21

4. Експериментална истаживања

Експериментална мерења у овој дисертацији коришћена су како би била одређена вредност интензитета термичких острва у одабраној градској средини града Београда, као и за анализу утицаја термичких острва на потрошњу енергије у зградарству и топлотни комфор спољашње средине.

Резултати (комплексних) мерења су коришћени при прорачуну вредности интензитета термичког острва, као просторни и временски гранични услови математичко-нумеричког модела, за проверу (валидацију) математичко-нумеричког модела и за прорачун количине енергије потребне за хлађење одабраног репрезентативног објекта.

На одабраној градској локацији града Београда, у непосредној околини зграде Високе текстилне струковне школе за дизајн, технологију и менаџмент и репрезентативној руралној средини, насељу Винча, Институту за нуклеарне науке извршена су детаљна мерења температура ваздуха, радијантне температуре, релативне влажности ваздуха, брзине ваздуха и интензитета сунчевог зрачења. Ови параметри су коришћени како би био прорачунат и процењен утицај одређених параметара на вредност интензитета термичких острва и као улазни подаци за математичко-нумерички модел. Поред тога, у градској локацији измерен је број возила, разврстаних у седам типичних категорија, који су коришћени да би била прорачуната емисија одређених аерозагађивача услед обављања саобраћаја у одабраној градској средини. Добијене вредности емисије су коришћени како би била формирана база загађивача од саобраћаја у градској средини, док је вредност угљен-диоксида коришћена и као улазни податак за математичко-нумерички модел.

Вредности температуре ваздуха, концентрације угљен-диоксида и радијантне температуре измерени су на додатним локацијама у градској средини, тачније у непосредној близини школске зграде и добијени резултати су коришћени за валидацију математичко-нумеричког модела.

Као репрезентативни објекат одабрана је зграда Високе текстилне струковне школе за дизајн, технологију и менаџмент која је изграђена 1917. године и која не поседује грађевинско техничку документацију о карактеристикама енергетских омотача зграде. Због тога су обављена мерења енергетских перформанси омотача зграде

односно параметара потребних за прорачун коефицијента пролаза топлоте сваког од конструктивних елемената омотача зграде, као и параметре потребне за прорачун броја измена ваздуха.

Приликом експерименталног мерења коришћена је савремена мерна опрема, а поступци мерења и обрада измерних вредности обављени су према важећим међународним прописима и стандардима који су такође приказани у овом поглављу.

Експериментална истраживања су урађена у периоду март-септембар 2015. године.

4.1. Експериментално мерење у руралној средини

Као репрезентативна рурална средина за ово експериментално истраживање изабрано је насеље Винча које се налази у непосредној околини Београда. Локални метеоролошки стуб, постављен у оквиру Института за нуклеарне науке „Винча“, мери физичке параметре који су коришћени за прорачун интензитета термичког острва (Слика 4.1). Физички параметри који су мерени на локалној станици јесу:

- амбијентална температура ваздуха;
- релативна влажност;
- интензитет брзине ваздуха и правац струјања ваздуха;
- сунчево зрачење и
- дифузионо зрачење.



Слика 4.1 Локација мерне станице у Институту за нуклеарне науке „Винча“

4.2. Експериментална истраживања у градској средини

4.2.1. Опис локације објекта и мерених параметара

Као реперзентативна градска средина у овом истраживању изабрана је локација центра града Београда. Мерења су рађена у Високој струковној школи за дизајн, технологију и менаџмент, која се налази на општини Палилула у ширем центру града, Слика 4.2. Мерење је спроведено у периоду од 2.3.2015. до 24.9.2015.



Слика 4.2 Локација школске зграде.

Положај зграде Високе струковне школе за дизајн, технологију и менаџмент:

- географска дужина: $44^{\circ} 48' 37''$
- географска ширина: $22^{\circ} 28' 42''$
- надморска висина: 113 м.

Експериментална мерења на овој локацији могу бити подељена на мерења која су рађена дужи временски период и дневна или тренутна мерења.

Подаци мерења која су рађена дужи временски период бележени су као средње вредности за интервал од 10 минута ради процене интензитета термичких острва за одабрану градску област, и то:

- мерење брзине и правца ветра на крову зграде школе (једно мерно место);
- мерење интензитета сунчевог зрачења (једно мерно место);
- мерење спољне температуре и релативне влажности околине на крову зграде школе (једно мерно место);
- мерење температуре ваздуха у учионици (16 мерних места).

Остала мерења су била спроведена у различитим интервалима од један или више дана, у објекту и ван њега. Ова мерења су рађена ради процене енергетске ефикасности и енергетских својстава репрезентативног објекта, као и улазни параметри за математичко-нумерички модел и валидацију математичко-нумеричког модела, а обухватала су:

- мерење параметара потребних за прорачун коефицијента пролаза топлоте (U вредности) елемената омотача школске зграде (стакло, рам, спољни зид дебљине 35 цм, спољни зид дебљине 55 цм, спољни зид у сутерену, међуспратна конструкција ка негрејаном таванском простору, под на тлу);
- мерење протока ваздуха у учионици природном инфилтрацијом,
- мерење температуре објекта термовизијском камером;
- мерење температуре омотача објекта и околиних површина контактном сондом;
- мерење спољне радијантне температуре;
- мерење интензитета саобраћаја.

4.2.2. Опрема и стандарди коришћени приликом експерименталног истраживања

Сви мерни инструменти су калибрисани у акредитованим лабораторијама, Института за нуклеарне науке „Винча“. У Прилогу 1, приказана је листа инструмената који су коришћени приликом свих експерименталних мерења у градској средини са дефинисаним опсезима и грешкама мерења.

За сва мерна места коришћени су следећи аквизициони системи и инструменти:

1. Testo 435 са топлотним флуксметром и радио-сондом. На Testo 435 логеру постоји сензор који мери температуру унутрашњег ваздуха у граничном слоју 20цм – 25цм од унутрашње површине. На овај логер бива постављена сонда за мерење топлотног флукса мерене површине и радио-сонда. Радио-сонда бива постављена са спољне стране и мери релативну влажност и спољашњу температуру ваздуха у граничном слоју, 20цм – 25цм од спољних површина.
2. Testo 635 са радио-сондом и термопаром са три жице. На Testo 635 логер повезан је термопар са три жице који мери унутрашњу температуру мерене површине као средњу вредност измерених температура које су добијене

помоћу три термопара. Са спољне стране је постављена радио-сонда на којој је закачен термопар који мери спољну температуру мерене површине.

3. Testo 435 са IAQ сондом, мери температуру, релативну влажност, атмосферски притисак и концентрацију угљен-диоксида,
4. Testo 435 са анемометар сондом за мерење брзине струјања,
5. Testo 445 са црном куглом,
6. Термовизијска камера марке FLIR,
7. Testo 830 T2 – логер за мерење температуре инфрацрвеним зрацима

Методологија одређивања термичких карактеристика омотача зграде дефинисана је према врсти структуре омотача. Списак коришћених стандарда приликом овог истраживања дат је у Прилогу 2.

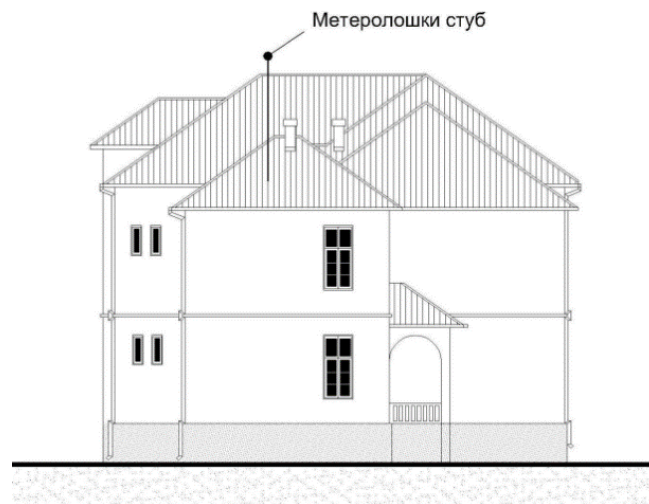
4.2.3. Мерења која су рађена дужи временски период

4.2.3.1. Мерење брзине и правца ветра

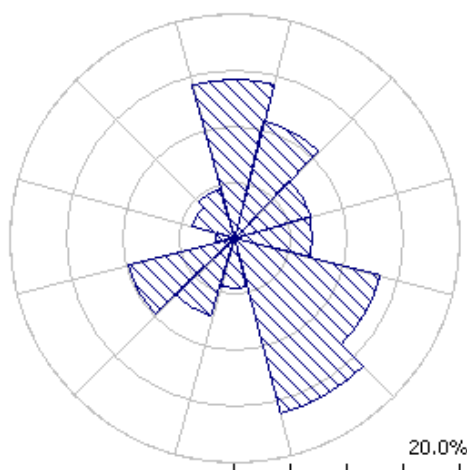
Локација посматраног објекта на којем је рађено мерење удаљена је од најближе метеоролошке станице у Београду толико да због саме орографије локације није било могуће директно узети податке за брзину и правац ветра са ове метеоролошке станице. Ради обезбеђивања ових података, постављена је локална метеоролошка станица на крову саме зграде (Слика 4.3.). Објекат је саграђен на терену који је у стрмом паду према улици Цвијићева са дијагоналним правцем пада око 10%. Оријентација комплекса је подужно у правцу исток-запад. Објекат стоји самостално на парцели, тако да све четири стране објекта немају додира са другим зградама и умерено су изложене ветровима. Корисна површина објекта износи 1259 m². На слици 4.4 приказан је попречни пресек објекта и позиција локалне метеоролошке станице. Висина на којој је постављен анемометар у односу на тло је 15 метара.



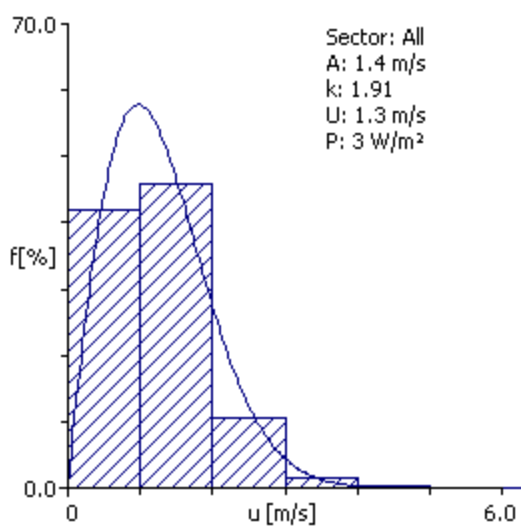
Слика 4.3 Приказ локалне метеоролошке станице



Слика 4.4 Шема објекта на којем је постављена локална метеоролошка станица
На основу измерених података добијена је ружа ветрова за дати објекат, као и Weibull-ова расподела интензитета удара ветра за метеоролошки стуб у урбаној локацији (Слика. 4.5):



Слика 4.5 Ружа ветрова добијена мерењем локалном метеоролошком станицом на локацији 22°N 44°E



Слика 4.6 Weibull-ова расподела интензитета удара ветра за локацију

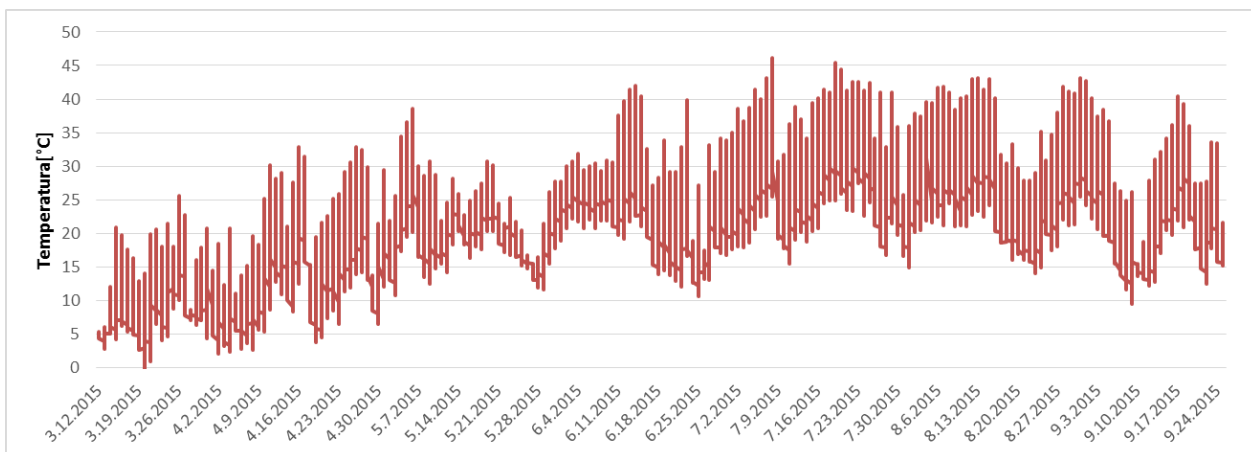
Табела 4.1 Weibull-ова расподеле интензитета удара ветра

	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	Total
A	1,3	1,3	,0	1,1	1,5	1,9	1,5	1,4	1,5	1,2	1,5	1,2	1,4
k	1,91	1,70	1,73	1,94	2,22	2,00	2,08	2,15	2,17	1,91	2,52	2,03	1,91
U	1,14	1,16	0,87	0,95	1,36	1,69	1,29	1,24	1,31	1,05	1,29	1,08	1,28
f	14	11	7	7	13	16	4	7	10	2	4	5	100

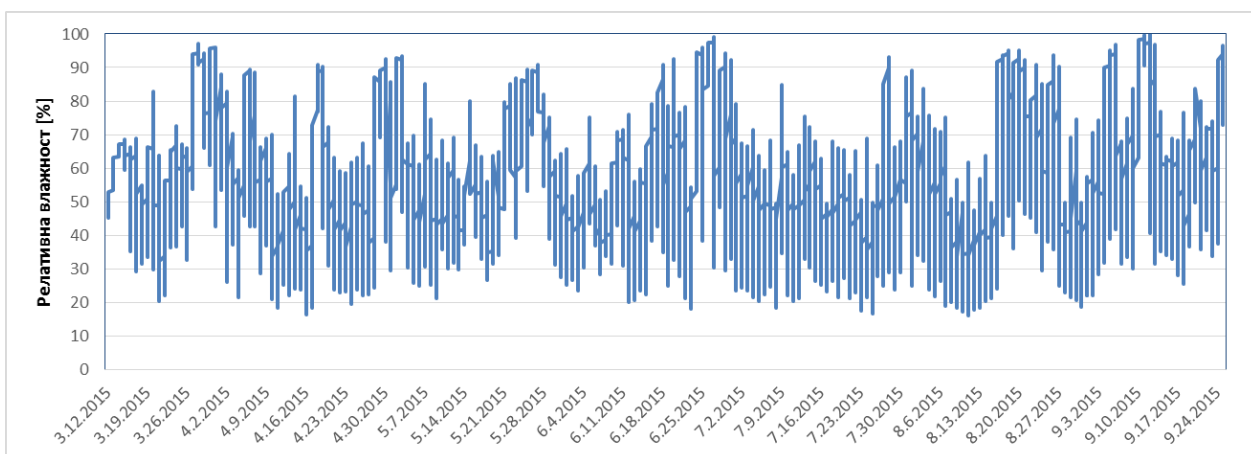
4.2.3.2. Мерење температуре и релативне влажности ваздуха

Мерење спољне температуре и релативне влажности ваздуха спроведено је помоћу логера Testo 174Н током целог периода истраживања. Резултати мерења приказани су на Слици 4.7 и 4.8. Циљ ових мерења је био да се измери амбијентална температура ваздуха у градској репрезентативној средини и да се испита комплетна

топлотна инерција објекта у дужем временском периоду. Мерење температуре ваздуха и релативне влажности у школи обављено је на шеснаест мерних места. За ова мерна места су коришћени логери Testo-174Н, који су постављени испод ђачке клупе на средини сваке одабране просторије, Слика 4.9. Логери су подешени да записују податке на сваких 10 минута. Шема позиције логера који су мерили унутрашњу температуру и релативну влажност приказани су на Слици 5.10, док су резултати мерења ових логера дати у Прилогу 3 ове дисертације.



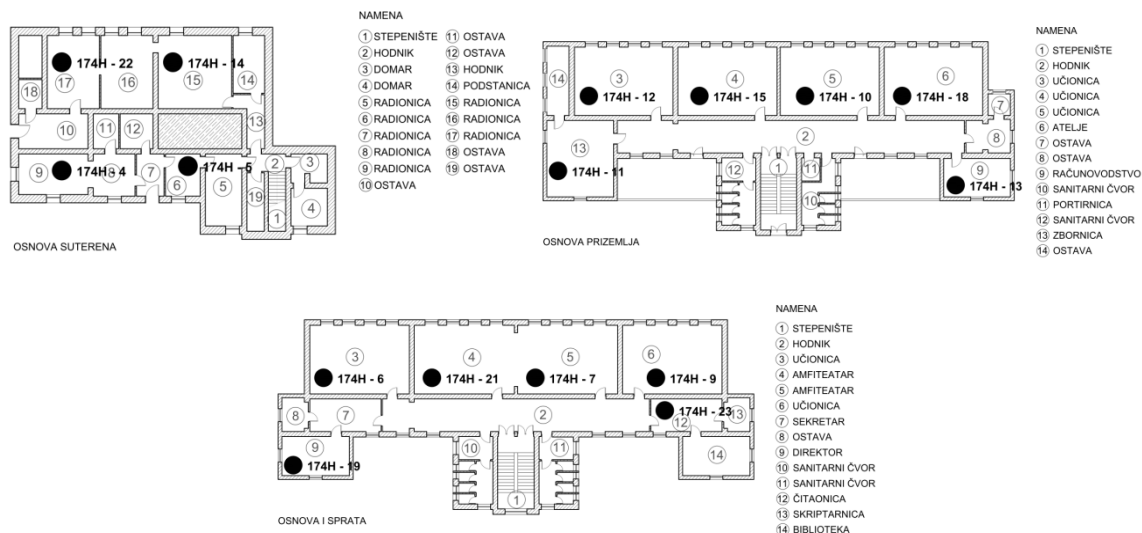
Слика 4.7 Резултати мерења спољашње температуре ваздуха у околини објекта



Слика 4.8 Резултати мерења релативне влажности ваудуха у околини објекта



Слика 4.9 Testo-174Н постављен испод клупе (Н=50 цм)



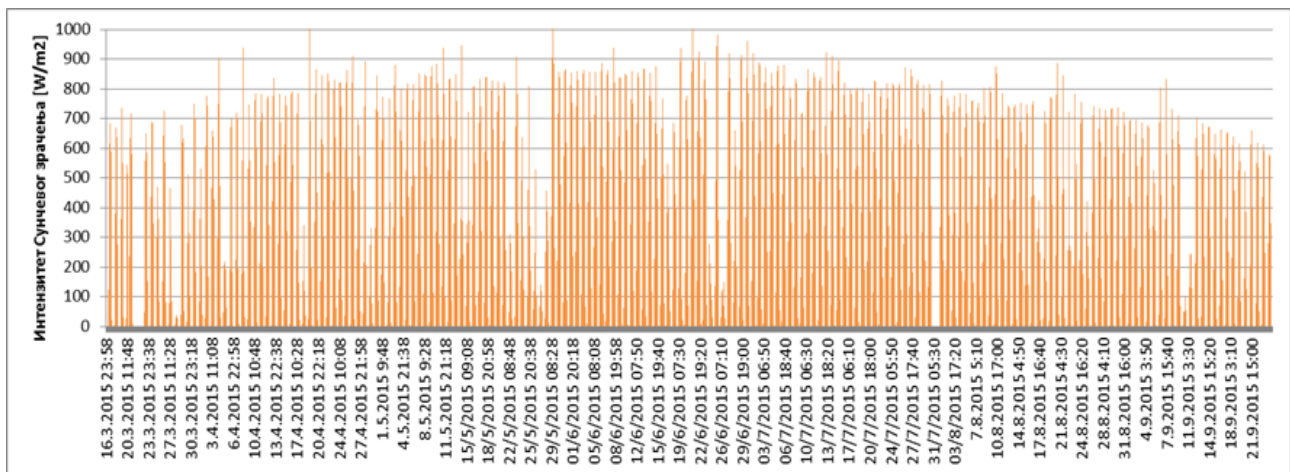
Слика 4.10 Основа школске зграде са позицијама логера Testo-174Н

4.2.3.3. Мерење интензитета сунчевог зрачења

Интензитет директног сунчевог зрачења бива мерен инструментом званим пирхелиометар, док је интензитет дифузног, глобалног и рефлектованог зрачења мерен пиранометром. Инструменти који су коришћени за експериментална мерења функционишу на принципу термоелемената.

Термоелементат је једноставан систем у којем се обавља трансформација топлотне у електричну енергију, па може бити сматрана генератором једносмерне струје. То је спој два различита метала кроз који тече једносмерна електрична струја, ако се спојеви држе на различитим температурама. Због тога се термоелемент не користи као генератор, него за мерење разлике температура која представља меру неког топлотног ефекта.

Углавном се код пиранометара и пирхелиометара, пријемник састоји од више термоелемената који сачињавају термобатерију. Један спој термоелемента, у термобатерији загрева се под утицајем зрачења, док се други спој одржава на константној температури. Графички приказ експерименталних резултата мерења Сунчевог зрачења који доспева на квадратни метар хоризонталне површине приказан је на Слици 5.10. за период од 16.03.2015. до 25.09.2015. године, за локацију зграде Високе текстилне струковне школе за дизајн, технологију и менаџмент.



Слика 4.11 Резултати мерења интензитета сунчевог зрачења

4.2.4. Временски кратка мерења

Омотачи зграда често не задовољавају прописане нормативе, што за резултат има лошије енергетске перформансе, односно неодговарајући комфор унутар саме зграде. Такође често се дешава да доступна техничка документација није потпуна и адекватна, што за последицу има потребу за утврђивањем стварних карактеристика омотача зграде. Због тога је неопходна примена метода идентификације и квантификације стварних карактеристика омотача.

4.2.4.1. Мерење параметара потребних за прорачун коефицијента пролаза топлоте (U-вредности)

На примеру зграде Високе текстилне школе у Београду, која датира из 1917. године и нема потребну грађевинскотехничку документацију, на објекту зграде обављена су детаљна мерења енергетских перформанси, то јест параметара потребних за прорачун коефицијента пролаза топлоте сваког од конструктивних елемената термичког омотача зграде.

На основу измерених параметара елемената термичког омотача зграде, израчунати су и представљени резултати прорачуна финалне енергије потребне за хлађење зграде.

Елементи омотача за које су урађена мерења потребних параметара за прорачун U-вредности јесу:

- стакло (Слика 4.12.);
- рам (Слика 4.13);

- спољни зид дебљине 35 цм (Слика 4.14);
- спољни зид дебљине 55 цм (Слика 4.15);
- зид у тлу (Слика 4.16);
- међуспратна конструкција ка негрејаном таванском простору (Слика 4.17);
- под на тлу.

Прозори и врата су једини елементи омотача за које зграда поседује техничку документацију, зато што су они постављени приликом реконструкције зграде 2005. године. Прозори су направљени од трокоморног ПВЦ профила са стаклом у пакету 4+15+4 испуњеним ваздухом. За ове елементе су обављена мерења како би било утврђено да ли је услед старости и временских услова дошло до промене термичких својства у односу на сертификат.

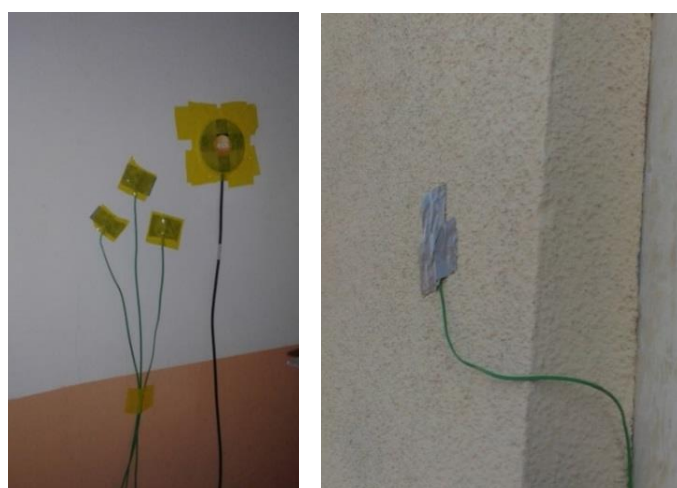
Избор мерних тачака је обављен тако да је минимизиран утицај директног сунчевог зрачења на површину омотача. При постављању мерних уређаја, вођено је рачуна о: сондама за мерење спољашње температуре ваздуха (радио-сонда), термопару за мерење спољне температуре површине фасаде (друга радио-сонда), центру три контактна термопара за мерење температуре унутрашње површине (једнакостранични троугао) и логеру у којем се налази сонда за мерење унутрашње температуре ваздуха. Радио-сонде су постављане на носач који је причвршћен 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 од директног сунчевог зрачења и других атмосферских утицаја (киша).



Слика 4.12 Приказ мерења топлотног флуksа и температура за стакло (слика лево - унутрашње мерење, слика десно - спољашње мерење)



Слика 4.13 Приказ мерења топлотног флуksа и температура за рам



Слика 4.14 Приказ мерења топлотног флуksа и температура за спољни зид дебљине 35цм (слика лево - унутрашње мерење, слика десно - спољашње мерење)



Слика 4.15 Приказ мерења топлотног флукса и температура за спољни зид дебљине 55 цм (слика лево - унутрашње мерење, слика десно - спољашње мерење)



Слика 4.16 Приказ мерења топлотног флукса и температура за спољни зид у сутерену



Слика 4.17 Приказ мерења топлотног флукса и температура за међуспратну конструкцију ка негрејаном таванском простору (слика лево - унутрашње мерење, слика десно - мерење на тавану)

4.2.4.2. Мерење параметара потребних за прорачун природног броја измена ваздуха у згради

Мерење је спроведено у две учионице, методом разблаженог гасног маркера (*Tracer gas dilution method*, енг.) која је дефинисана у стандарду SRPS EN ISO 12569 (Слика 4.18. и Слика 4.19). Постављене су три CO₂ сонде на школским клупама на висини од око 0,8 метара. Помоћу боца напуњених угљен-диоксидом гас се константно убацује у претходно затворену учионицу. Потребно је обезбедити што је могуће равномернију расподелу убацивања гаса у запремину учионице, што је урађено са малим вентилаторима. Подаци бивају узети једино када је постигнута униформност поља концентрације угљен-диоксида, која у сваком тренутку за мерна места не сме да одступа више од 10%.



Слика 4.18 Приказ мерења параметара потребних за прорачун природног броја измена ваздуха у згради



Слика 4.19 Приказ мерења параметара потребних за прорачун природног броја измена ваздуха у згради

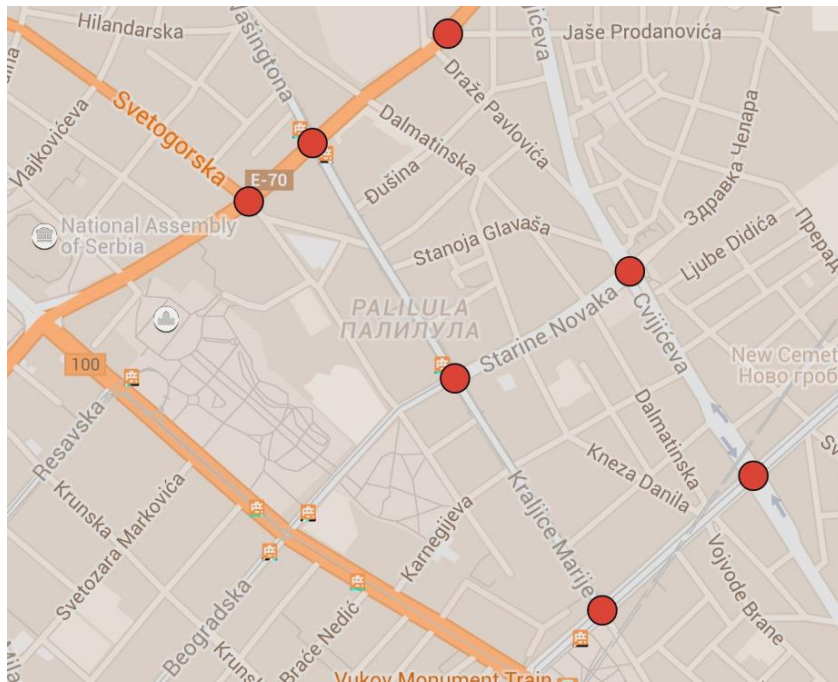
4.2.4.3. Мерење интензитета саобраћаја

Мерења саобраћајног протока обављено је на следећих седам раскрсница:

- 1) Цвијићева - Здравка Челара - Старине Новака;
- 2) 27. марта - Старине Новака;
- 3) 27. марта - Таковска;
- 4) Таковска - Светогорска;
- 5) Рузвелтова - Цвијићева;
- 6) Таковска - Јаше Продановића;
- 7) Краљице Марије - Рузвелтова.

Мерења саобраћајног протока урађена су на седам најпрометнијих раскрсница која се налазе у кругу од 500 метара у односу на постављени метеоролошки стуб у градској средини. Возила су бројана методом мануелног мониторинга у периоду од 6:00 до 19:00 часова, за три раскрснице и у периоду од 6:00 до 22:00 часова за четири раскрснице. Једночасовна дистрибуција возила на раскрсницама које су приказане на слици 4.20 представља збир једночасовних оптерећења раскрснице из улица које се укрштају у датој раскрсници. Свако регистровано возило је разврстано у једну од седам категорија:

1. Бицикл,
2. Мотоцикли,
3. Путничко возило -ПВ,
4. Комби,
5. Аутобус - БУС,
6. Лако теретно возило - ЛТВ и
7. Тешко теретно возило - ТТВ.



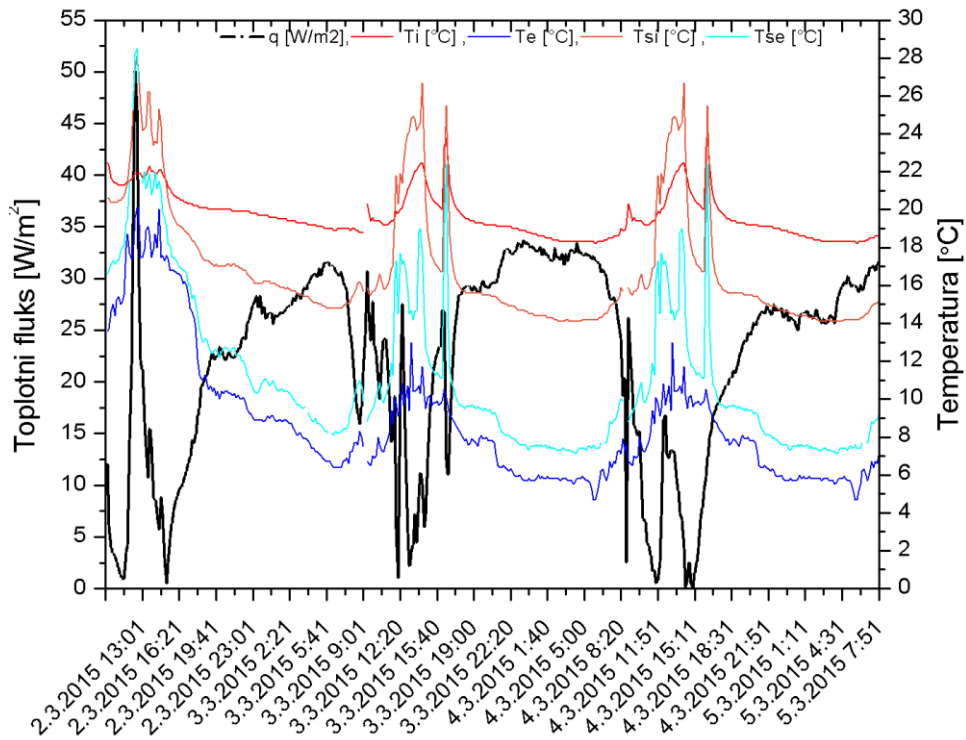
Слика 4.20 Приказ локација мерења интензитета саобраћаја

4.3. Анализа експерименталних података

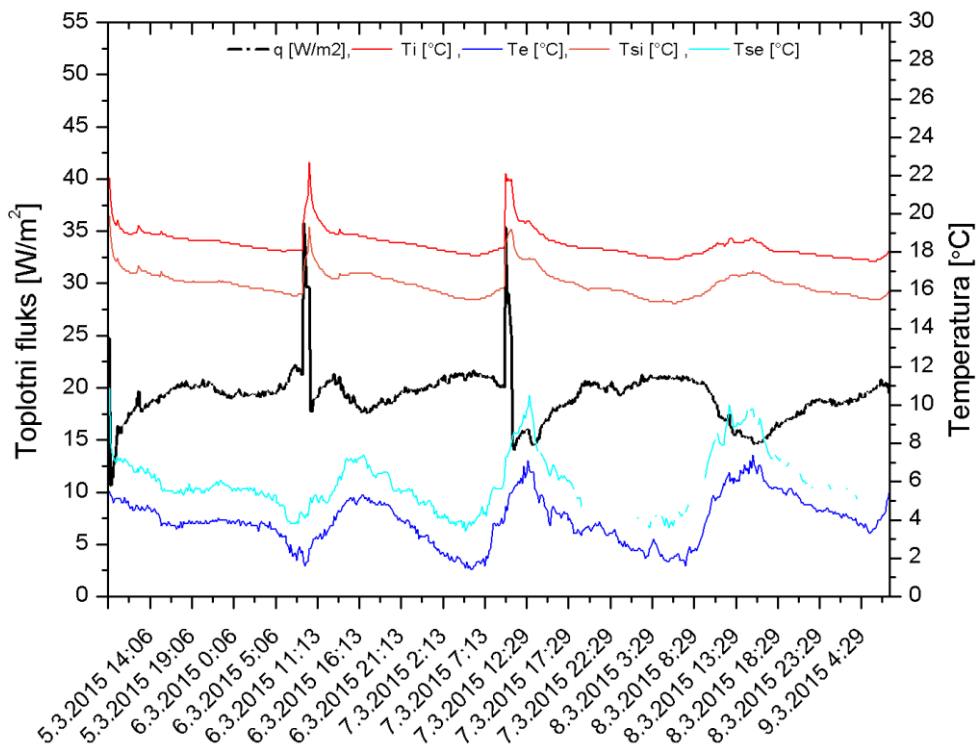
4.3.1. Анализа мерених података за прорачун коефицијента пролаза топлоте

Приликом прорачуна коефицијента пролаза топлоте, коришћени су само подаци који су измерени током ноћи, јер се према стандарду ISO 9869 захтева да прорачун буде урађен само уз услов стационарности топлотног протока кроз мерени део омотача. На основу измерених резултата, детаљном анализом података, закључено је да услед директне осунчаности фасада топлотни флуksеви нису постигли квазистационарност, због тога дневна мерења нису коришћена за израчунавање коефицијента пролаза топлоте.

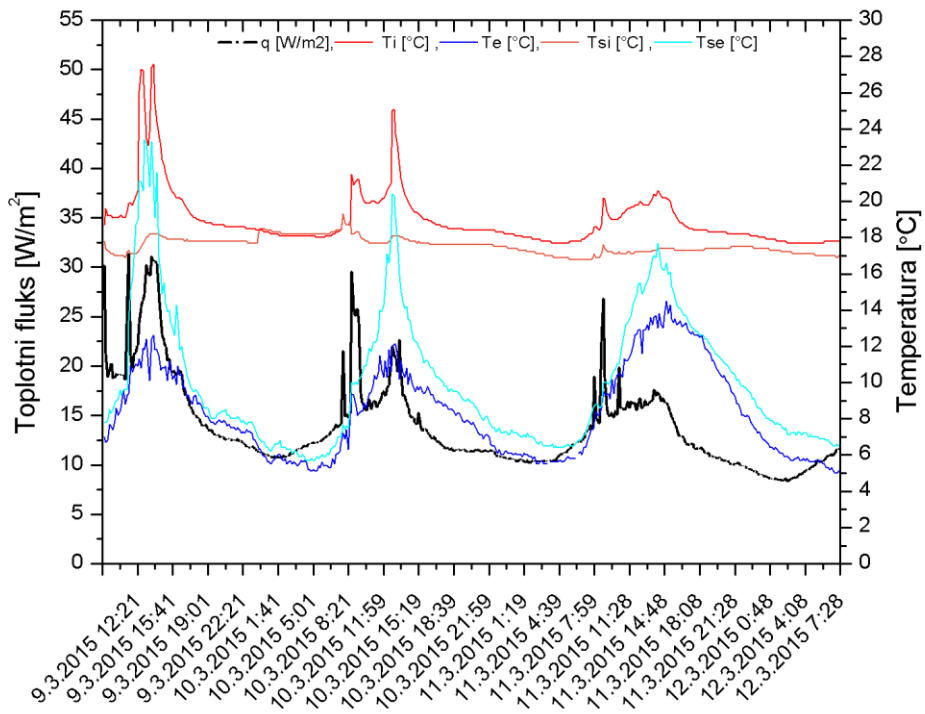
На следећим сликама су приказани резултати мерења топлотног флуksа и температура (T_i - унутрашња температура ваздуха, T_a - спољна температура ваздуха, T_{si} - температура унутрашњих површина елемената зграде, T_{se} - температура спољних површина елемената зграде) коришћених за прорачун коефицијента пролаза топлоте за одређене елементе омотача зграде.



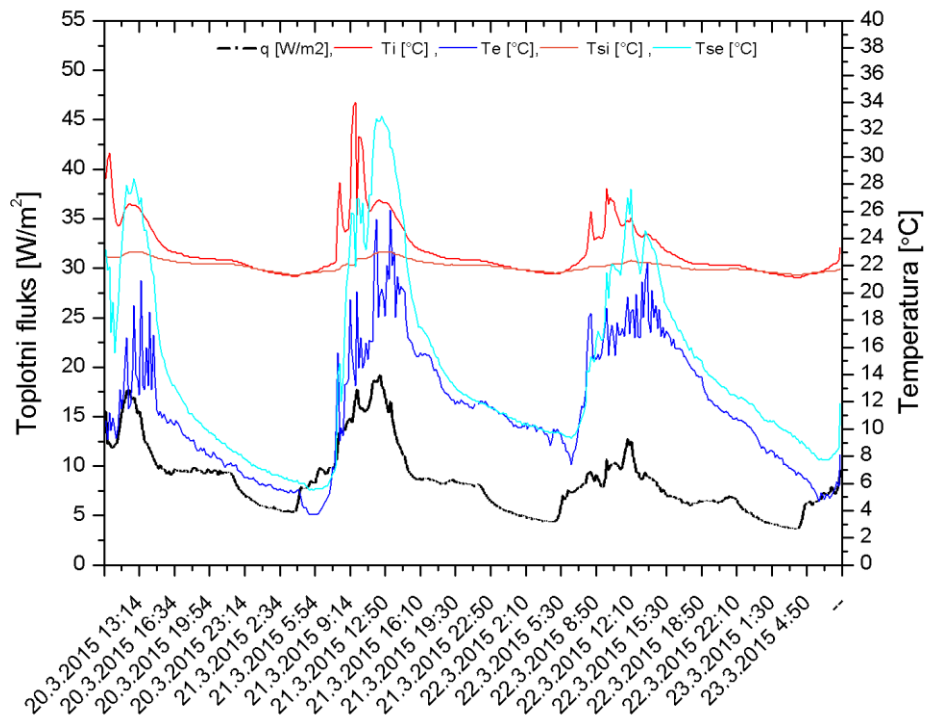
Слика 4.21 Резултати мерења топлотног флукса и потребних температура за прорачун коефицијента пролаза топлоте за стакло



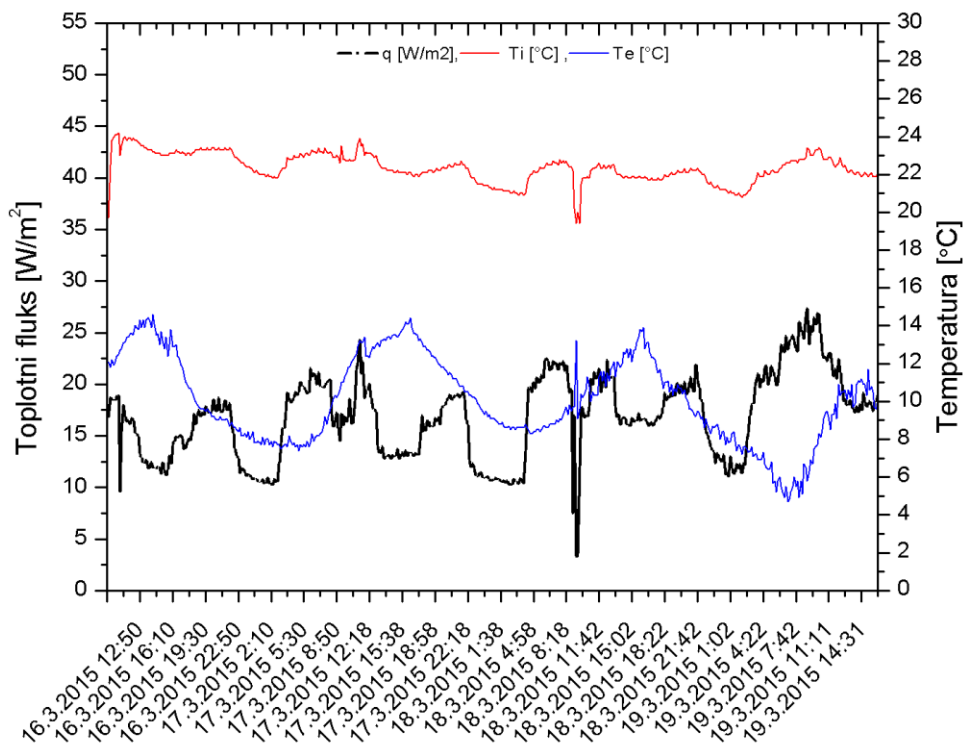
Слика 4.22 Резултати мерења топлотног флукса и потребних температура за прорачун коефицијента пролаза топлоте за ПВЦ рам



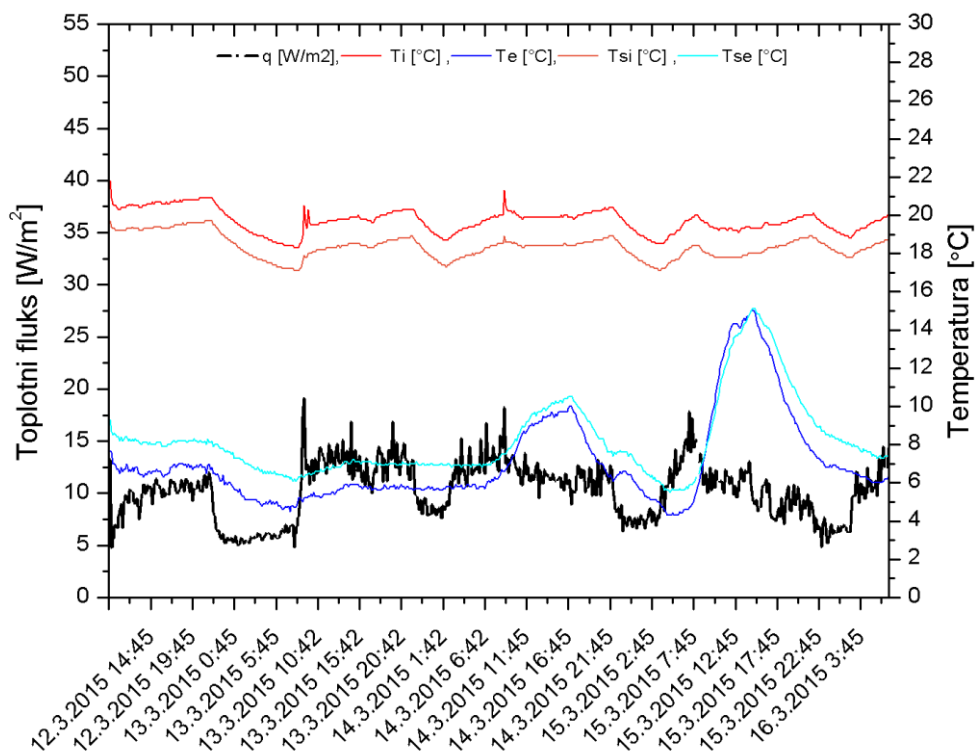
Слика 4.23 Резултати мерења топлотног флукса и потребних температура за прорачун коефицијента пролаза топлоте за спољни зид дебљине 35 цм



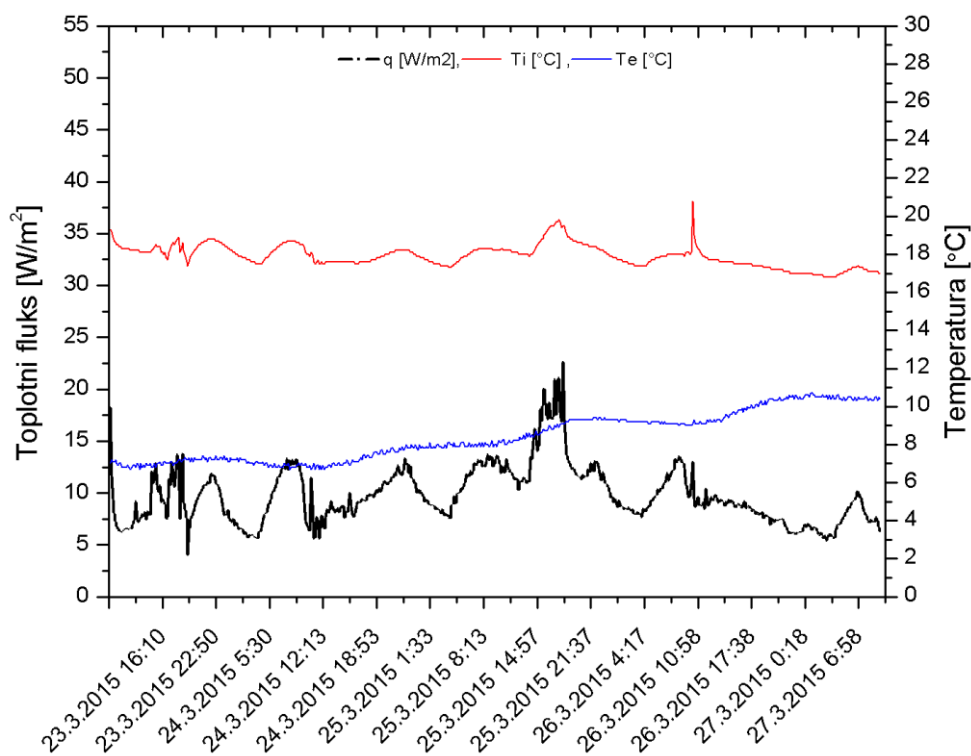
Слика 4.24 Резултати мерења топлотног флукса и потребних температура за прорачун коефицијента пролаза топлоте за спољни зид дебљине 55 цм



Слика 4.25 Резултати мерења топлотног флукса и потребних температура за прорачун коефицијента пролаза топлоте за зид у тлу



Слика 4.26 Резултати мерења топлотног флукса и потребних температура за прорачун коефицијента пролаза топлоте за међуспратну конструкцију на негрејаном таванском простору



Слика 4.27 Резултати мерења топлотног флукса и потребних температура за прорачун коефицијента пролаза топлоте за под на тлу

На основу мерења, урађен је прорачун коефицијента пролаза топлоте, U-вредности, за све елементе омотача зграде, према следећем математичком изразу:

$$U = \sum_{i=1}^n q_i / \sum_{i=1}^n (T_{un,i} - T_{sp,i}) \quad (4.1)$$

4.3.2. Анализа података добијених мерењем за прорачун броја измена ваздуха у згради

Прорачун броја измена ваздуха у згради је урађен коришћењем методе која је описана у стандарду SRPS EN ISO 12569:2014 Топлотне перформансе зграда и материјала – Одређивање специфичног интензитета протока ваздуха у зградама – Метода разблаженог гасног маркера. Мерење је рађено у две учионице 14.03.2015. и 21.03.2015. године на мерном месту које се налази на првом спрату. Приказ измерених података је дат на Слици 4.28.

Број измена ваздуха у згради на час може бити израчунат према обрасцу:

$$n = \frac{\ln CO_2(t_1) - \ln CO_2(t_2)}{t_2 - t_1} \quad (4.2)$$

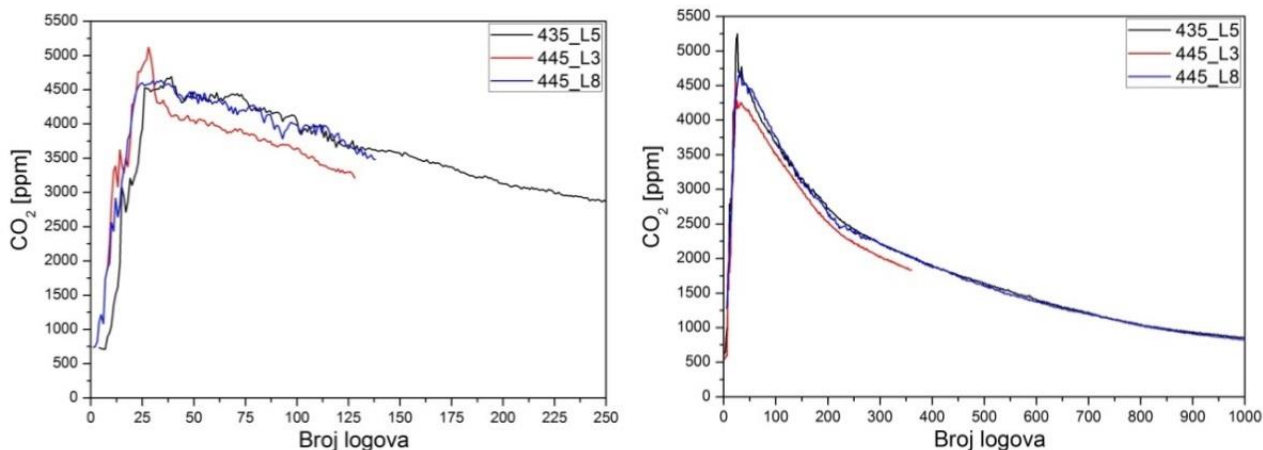
Где је:

n – просечан број измена ваздуха (1/h),

t – време (h),

$CO_2(t_i)$ – концентрација CO_2 [ppm] у просторији у тренутку t_i .

Током мерења, сви прозори и врата у учионици били су затворени. Из боце је испуштан угљен-диоксид док није достигнута концентрација око 5000 ppm. Измерене вредности концентрације током периода стабилизације гаса у учионици одбачени су.



Слика 4.28 Приказ мерених вредности угљен-диоксида на три логера за два мерна места

4.3.3. Анализа резултата емисије из возила

Анализа измерених података о протоку возила урађена је помоћу софтверског алата *COPERT* (Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport, енг.). *COPERT* се користи широм света за прорачун емисија загађивача ваздуха и гасова стаклене баште из друмског саобраћаја. Софтвер је направљен са циљем да процењује емисију најзначајнијих штетних материја и појединих тешких метала коју емитују различите категорије возила (путничка, лака и тешка теретна возила, мопеди и мотоцикли). *COPERT* методологија је развијена за прорачун великог броја загађујућих материја, као и потрошњу горива самих возила. За прорачун емисије издувних гасова у овој дисертацији поред категорије возила која је добијена мануелним мониторингом, као улазни подаци коришћени су и подела возила по врсти горива коју користи, што је добијено на основу статистичких података и базе коју поседује сам софтвер за сваку државу, средња брзина кретања возила и пређене дужине пута. Дужина пута, које возило пређе је посматрана само за физички модел који је креиран. *COPERT* рачуна емисију на основу емисионих фактора за сваку штетну материју понаособ.

Развој софтверског пакета *COPERT* координирала је Европска агенција за животну средину (*European Environment Agency - EEA*) и он је развијен за званичну процену

емисије у друмском саобраћају у земљама чланицама *ЕЕА*. Такође, може бити коришћен и у свим релевантним истраживањима. *COPERT* је додатно развио методологију емисије у зависности од укупно пређене километраже возила и карактеристике погонског горива.

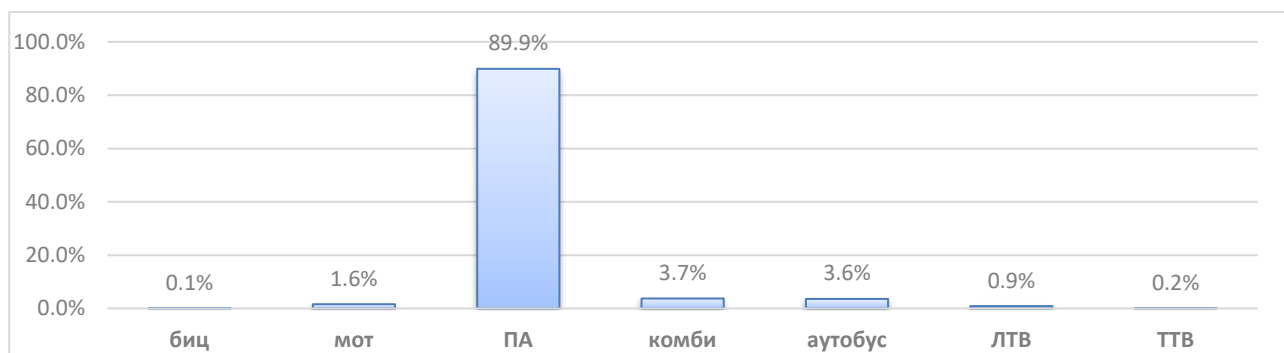
COPERT Street Level је самосталани софтвер дизајниран за кориснике који желе да израчунају емисију на нивоу једне улице. Методологија се базира на софтверу *COPERT*. Софтвер може израчунати емисију за једну улицу или целу градску мрежу. То захтева минимални скуп улазних података, као што су број возила по категоријама, дужина пређеног пута, просечна брзина кретања возила. На основу унетих података добијају се загађења CO_2 , VOC , NO_x , CO и PM на уличном нивоу и нивоу раскрсница. У Табели 4.2 је дат укупан број возила која су избројана за одређене локације.

Табела 4.2 Укупан број возила по улицама и раскрсницама

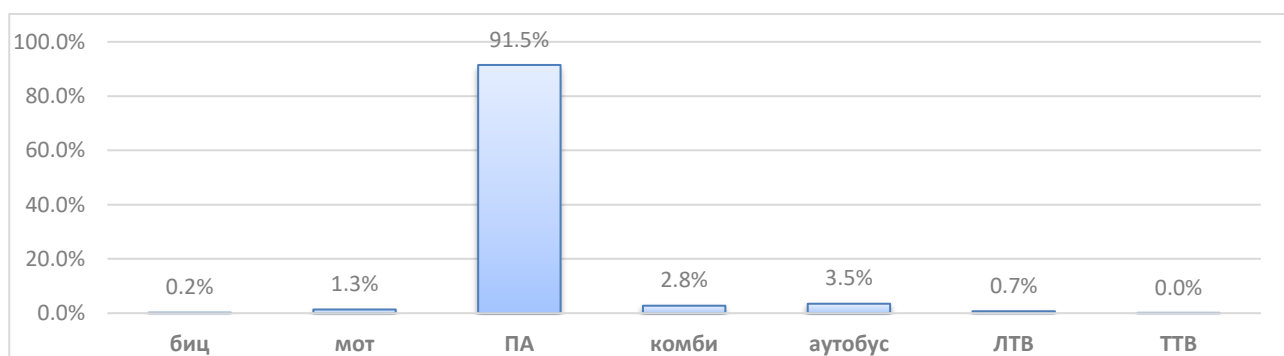
Време	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00
Раскрсница 1	2232	5316	5642	5142	4932	5322	5506	5440	5490	6010	6900	5404	4296	3612	3450	2754
Улица 1	402	1062	1302	1269	1188	1284	1340	1376	1339	1342	1863	1358	1019	769	751	532
Улица 2	773	1429	1383	1411	1403	1541	1551	1566	1424	1517	1416	1314	1147	1094	995	813
Улица 3	527	1265	1288	1007	1039	1040	1140	1043	1363	1496	1565	1405	1127	878	847	705
Улица 4	641	1441	1389	1201	1098	1139	1252	1205	1547	1682	1612	1496	1231	1043	948	859
Раскрсница 2	1960	5008	4968	4718	4370	4494	5066	5050	6296	6330	5892	5442	4898	4594	3952	3576
Улица 5	244	769	858	820	859	884	1001	995	1050	1009	1026	978	921	933	781	685
Улица 6	710	1592	1546	1386	1177	1213	1406	1426	1915	1969	1763	1660	1457	1379	1076	1029
Улица 7	278	815	1029	990	1020	1034	1175	1158	1318	1324	1298	1156	1047	968	892	717
Раскрсница 3	3130	5018	5744	5564	5234	5272	5818	5736	6584	6440	6480	6028	5626	5068	4838	3876
Улица 8	1207	1665	1644	1615	1515	1463	1537	1562	1800	1721	1708	1690	1637	1454	1216	1205
Улица 9	1342	2011	1995	1960	1819	1779	1939	1860	2124	2062	2073	1946	1905	1694	1674	1363
Улица 10	333	747	1131	1061	1048	1102	1279	1255	1398	1442	1495	1328	1139	1021	899	714
Раскрсница 4	3240	5860	5948	-	-	-	-	-	6052	6126	6376	6100	5856	-	-	-
Улица 11	181	525	561	-	-	-	-	-	657	587	624	691	637	-	-	-
Улица 12	1474	2475	2479	-	-	-	-	-	2472	2557	2645	2447	2366	-	-	-
Раскрсница 5	2528	6132	6442	-	-	-	-	-	5920	6532	7048	6322	5080	-	-	-
Улица 13	607	1324	1390	-	-	-	-	-	1259	1326	1388	1290	1102	-	-	-

Раскрсница 1-Цвијићева - Здравка Челара - Старине Новака, Улица 1 - Здравка Челара, Улица 2 - Цвијићева (од Бул. Деспота Стефана до раскрснице 1), Улица 3 - Цвијићева (од раскрснице 2 до Рузвелтове), Улица 4 - Старине Новака, Раскрсница 2 - 27 марта - Старине Новака, Улица 5 - Краљице Марије, Улица 6 - Београдска, Улица 7 - 27. марта, Раскрсница 3 - 27. марта - Таковска, Улица 8 - Таковска (од раскрснице 3 до Јаше Продановића), Улица 9 - Таковска (од раскрснице 3 до Светогорске), Улица 10 - Џорџа Вашингтона, Раскрсница 4 - Таковска - Светогорска, Улица 11 - Мајора Илића, Улица 12 - Таковска (од раскрснице 4 до Булевару Краља Александра), Раскрсница 5 - Рузвелтова - Цвијићева, Улица 13 - Рузвелтова

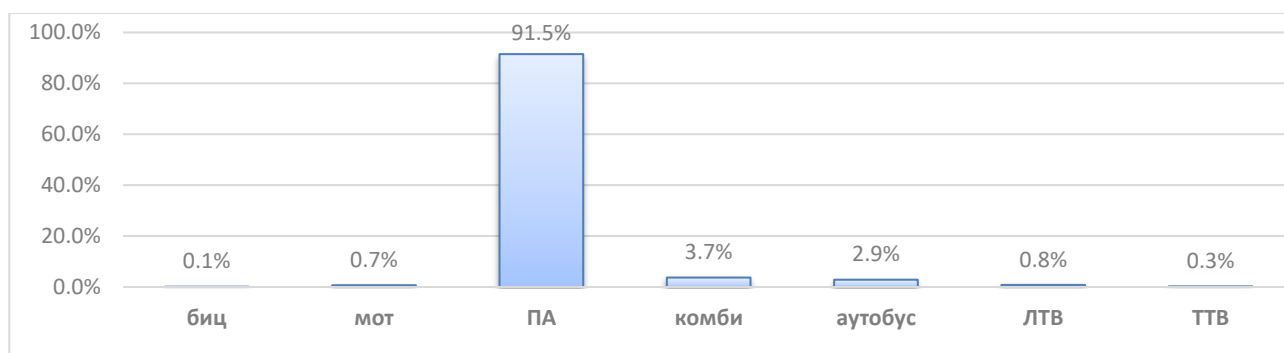
Удео возила у процентима по раскрсницама на којима је урађено бројање приказано је на следећим сликама.



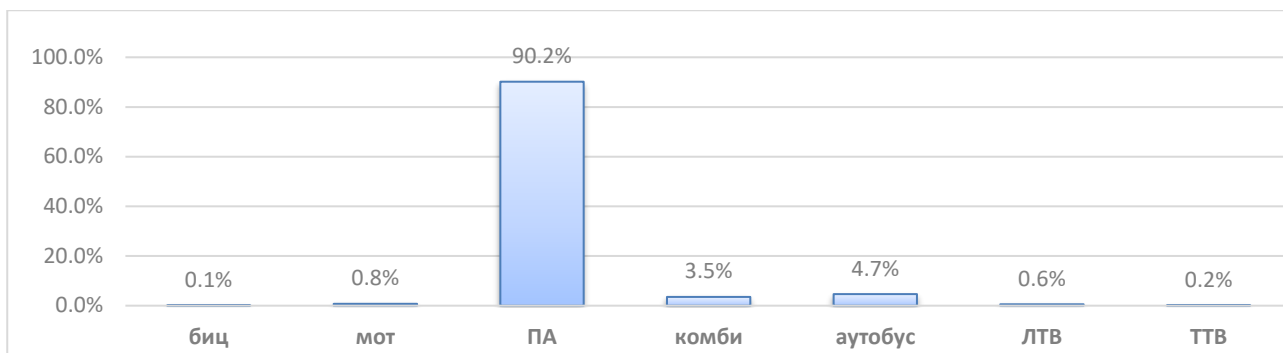
Слика 4.29 Удео возила у процентима за раскрсницу 1 – Цвијићева - Здравка Челара - Старине Новака, време бројања саобраћаја од 6:00 до-22:00



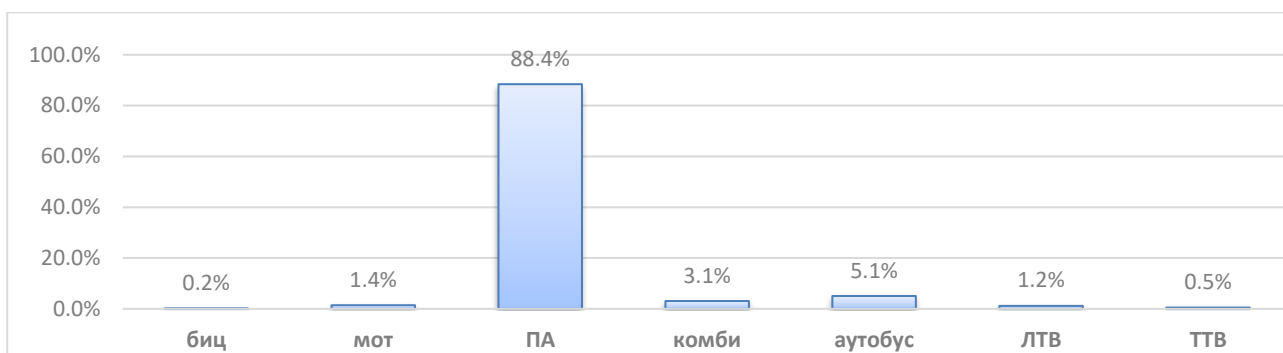
Слика 4.30 Удео возила у процентима за раскрсницу 2 - 27. марта - Старине Новака, време бројања саобраћаја од 6:00 до 22:00



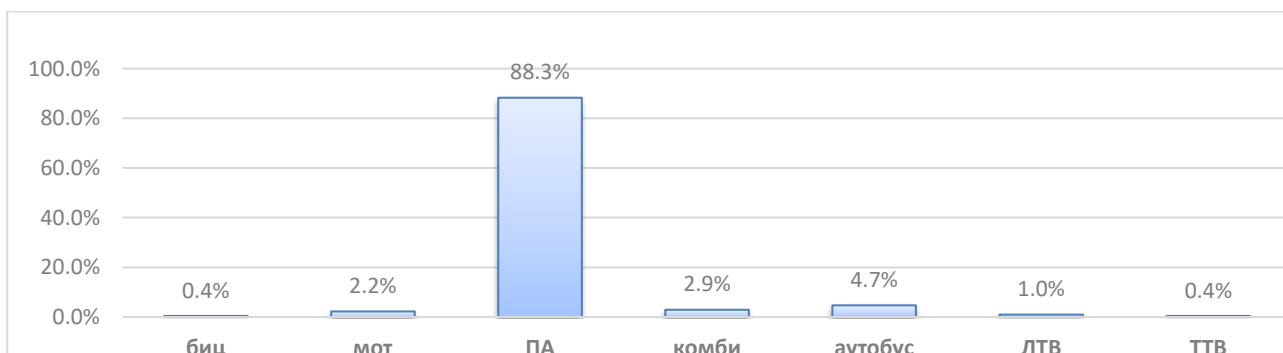
Слика 4.31 Удео возила у процентима за раскрсницу 3 - 27. марта - Таковска, време бројања саобраћаја од 6:00 до 22:00



Слика 4.32 Удео возила у процентима за раскрсницу 4 – Таковска -Светогорска, време бројања саобраћаја од 6:00 до 20:00 (од 6:00 до 10:00 и од 14:00 до 20:00)



Слика 4.33 Удео возила у процентима за раскрсницу 5 – Рузвелтова -Цвијићева, време бројања саобраћаја од 6:00 до 20:00 (од 6:00 до 10:00 и од 14:00 до 20:00)



Слика 4.34 Удео возила у процентима за раскрсницу 6 - Краљице Марије - Рузвелтова, време бројања саобраћаја од 6:00 до 20:00 (од 6:00 до 10:00 и од 14:00 до 20:00)



Слика 4.35 Удео возила у процентима за раскрсницу 7 – Таковска - Јаше
Продановића, време бројања саобраћаја од 6:00 до 22:00

Резултати количине уличног загађења од интензитета саобраћај добијени симулацијама помоћу софтвера *COPERT Street Level* приказани су у Прилогу 4.

4.3.4 Мерење радијантне температура у урбаној средини

Одређивање радијантне температуре урађено је мерењем температуре црне кугле. Ову теорију детаљно је објаснио *L.A.Kuehn* са групом аутора 1970. године [112]. Температура измерена помоћу црне кугле јесте резултат топлоте добијене и изгубљене путем радијације и конвекције [113]. Температура црне кугле представља средњу вредност температуре зрачења и амбијенталне температуре. Радијантна температура може бити израчуната према следећој једначини:

$$T_{rad} = \left[(T_g + 273.15)^4 + \frac{1.1 \cdot 10^8 v_a^{0.6}}{\varepsilon_g D_g^{0.4}} \cdot (T_g - T_a) \right]^{0.25} - 273.15 \quad 4.7$$

где су:

T_g -температура црне кугле [$^{\circ}\text{C}$],

v_a -брзина ваздуха [m/s],

T_a -температура ваздуха [$^{\circ}\text{C}$],

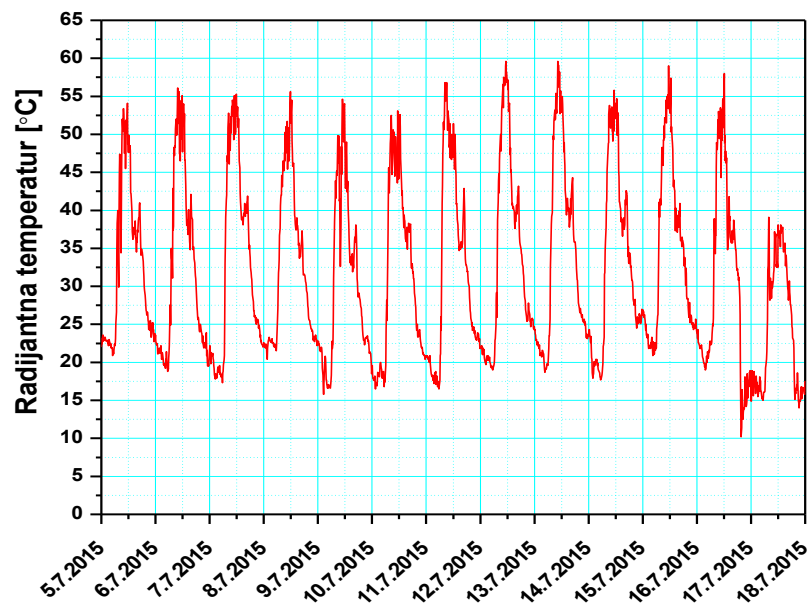
D_g -пречник црне кугле [mm],

ε_g -емисивност црне кугле [-].

Емисивност црне кугле је 0,95, док је пречник 150 милиметара.

У изразу $1,1 \cdot 10^8 v_a^{0.6}$, вредност $1,1 \times 10^8$ и изложилац брзине ветра 0,6, је средње вредности конвективног коефицијента црне кугле које су емпиријски израчунате.

Током летњег периода, у периоду када су предвиђене највише вредности амбијенталне температуре на репрезентативној урбаној локацији, урађено је мерење параметара потребних за прорачун радијантне температуре. Радијантна температура касније може бити коришћена за прорачун топлотног оптерећења у спољашњој средини и проверу вредности нумеричких симулација радијантне температуре. На слици 4.36 приказане су прорачунате вредности радијантне температуре за репрезентативну градску средину.

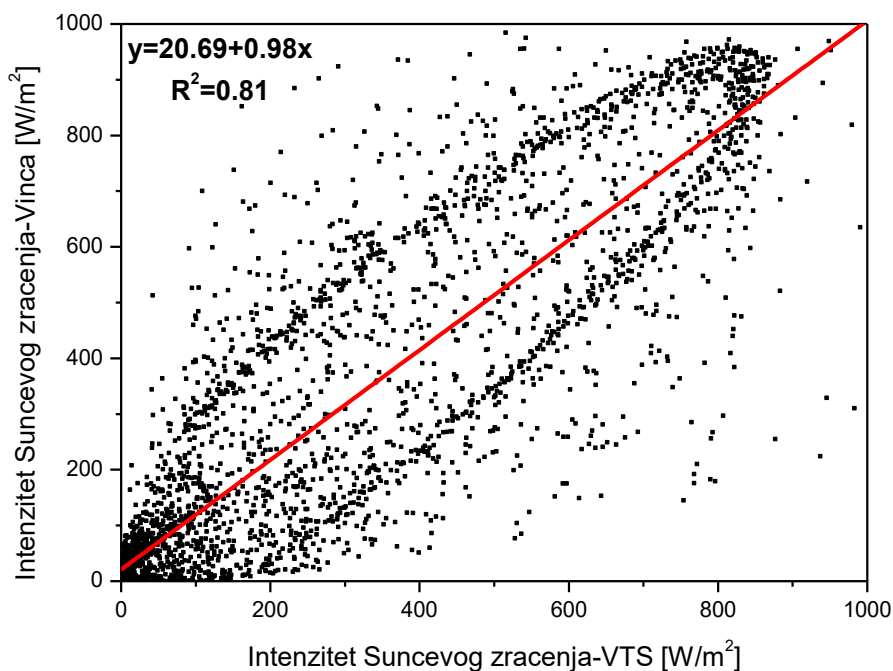


Слика 4.36 Радијантна температура у околини репрезентативног објекта

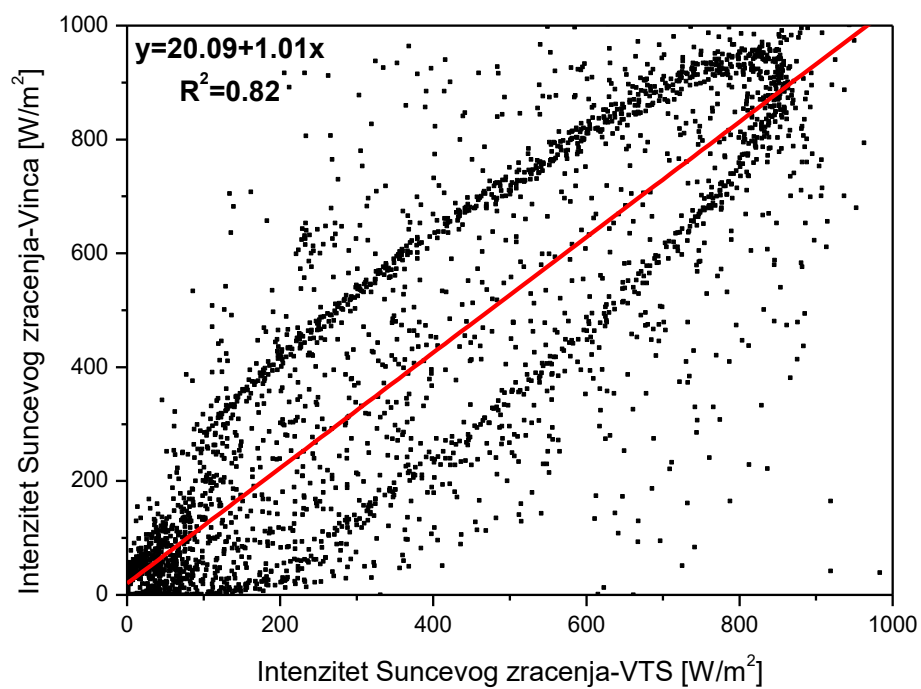
4.4 Преглед добијених резултата мерења

4.4.1. Преглед добијених резултата који су коришћени за анализу интензитета термичких острва

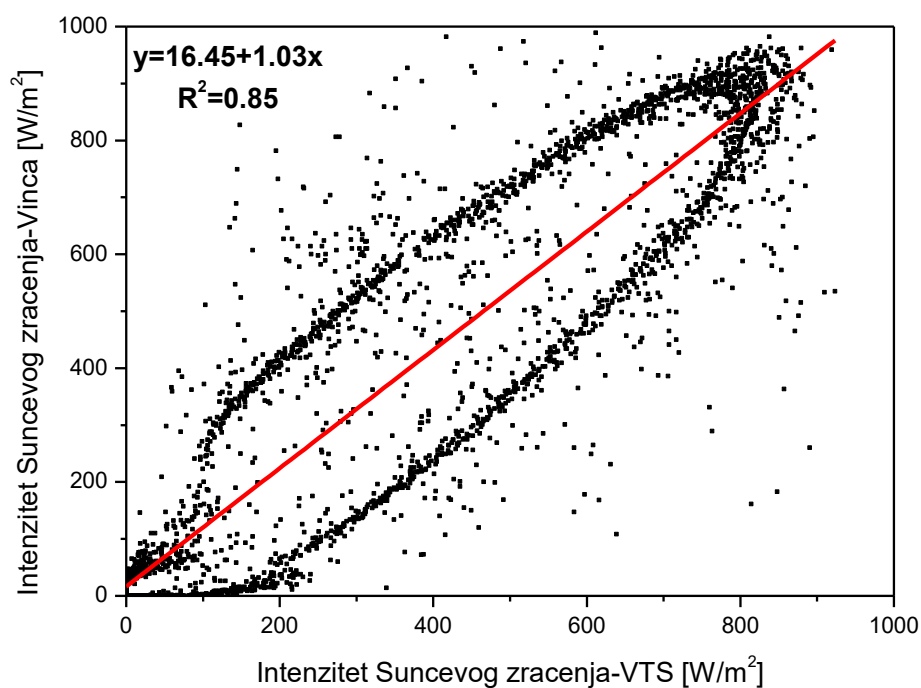
На основу детаљне анализе интензитета укупног сунчевог зрачења измереног у руралној и градској средини помоћу постављених локалних метеоролошких станица уочена је висока корелација за летње месеце мерења. Из наведеног може бити закључено да су добици топлоте од сунчевог зрачења за руралну и урбану област приближног интензитета. Овај закључак нам указује да интензитет термичких острва за период мерења зависи само од структуре града. На сликама 4.37 - 4.41. приказане су криве зависности.



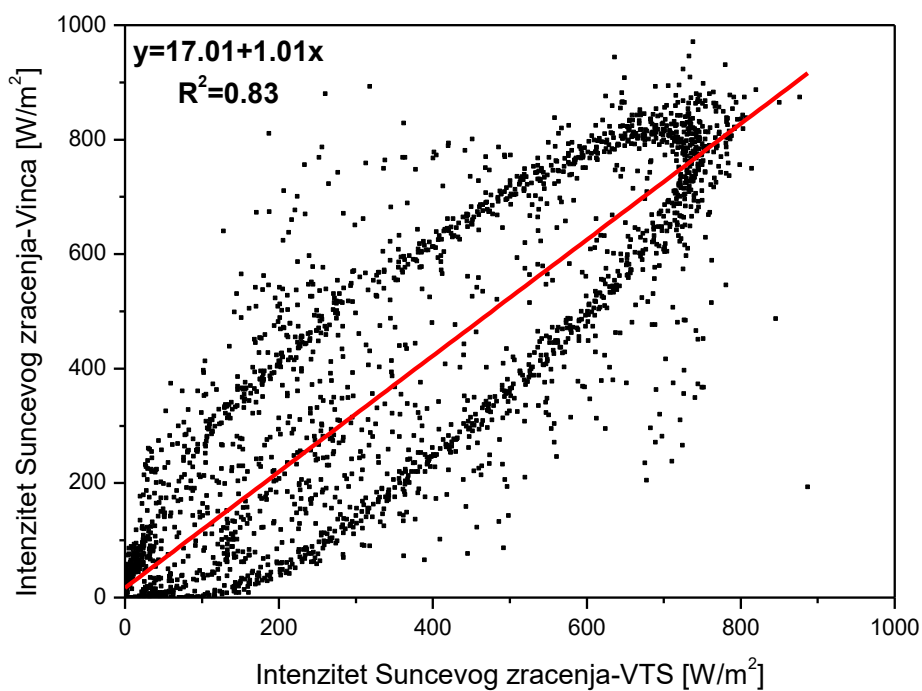
Слика 4.37 Дијаграм расипања са позитивном праволинијском везом између интензитета сунчевог зрачења за месец мај



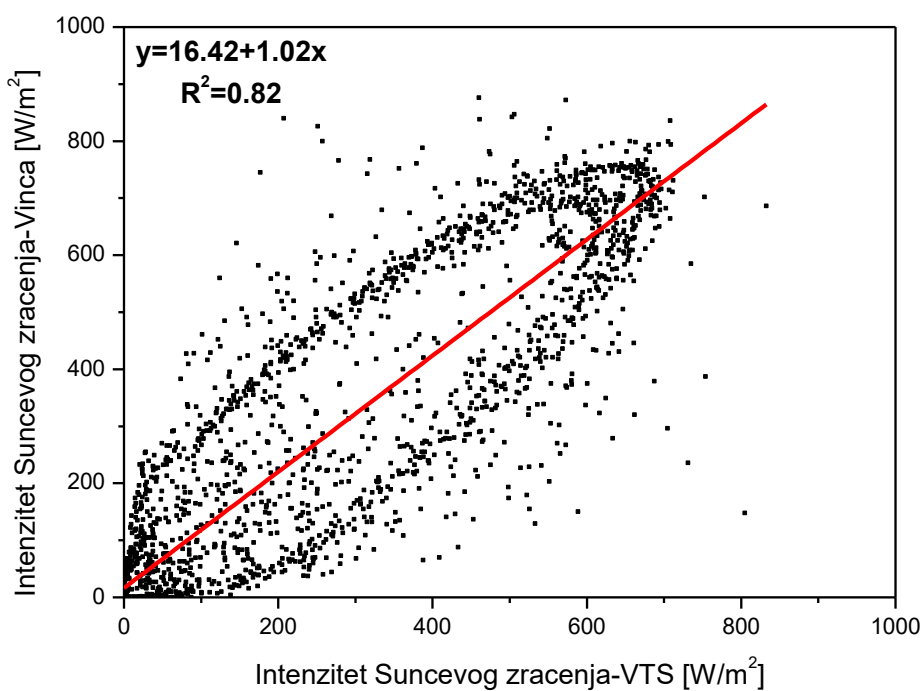
Слика 4.38 Дијаграм расипања са позитивном праволинијском везом између интензитета сунчевог зрачења за месец јун



Слика 4.39 Дијаграм расипања са позитивном праволинијском везом између интензитета сунчевог зрачења за месец јул

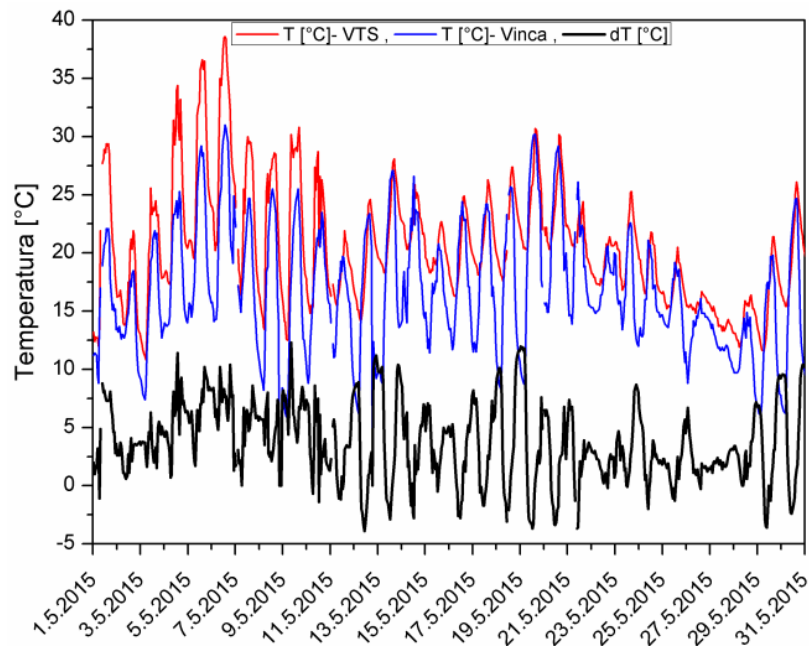


Слика 4.40 Дијаграм расипања са позитивном праволинијском везом између интензитета сунчевог зрачења за месец август

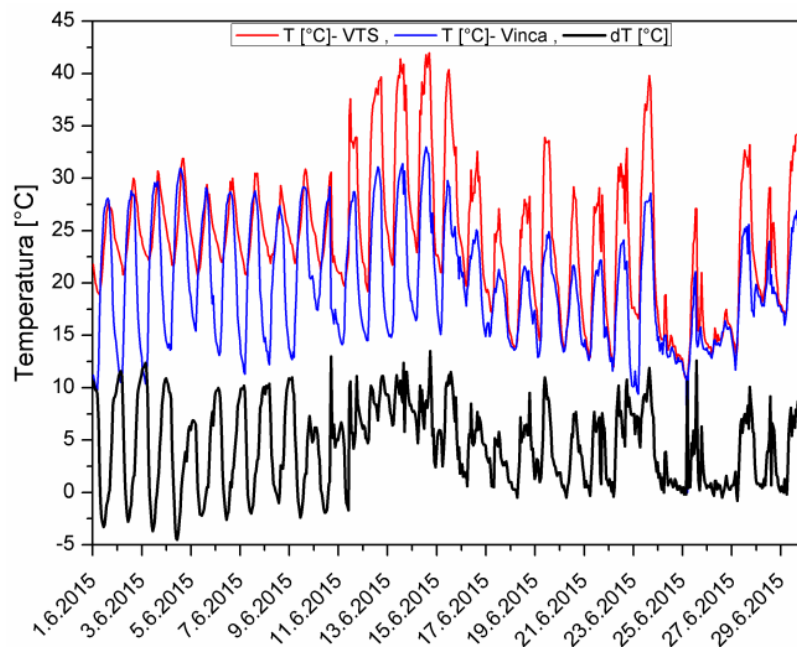


Слика 4.41 Дијаграм расипања са позитивном праволинијском везом између интензитета сунчевог зрачења за месец септембар

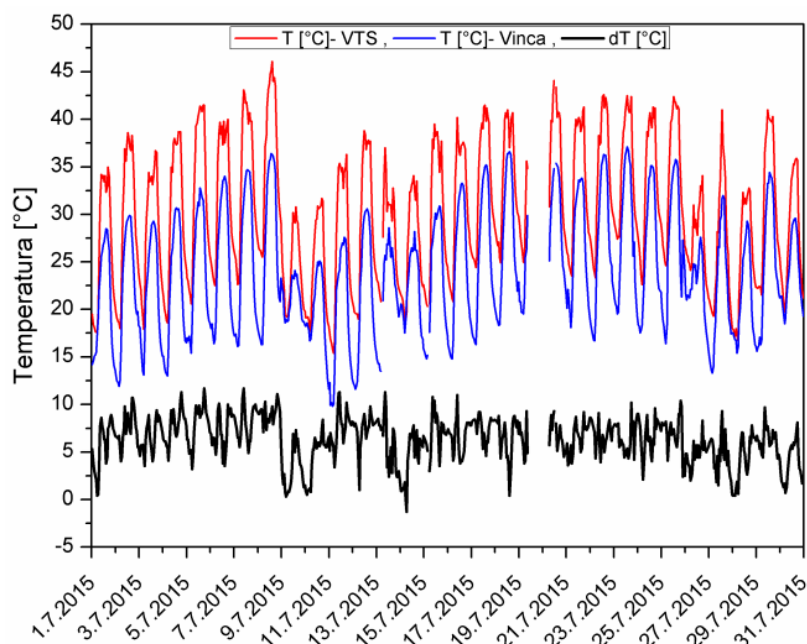
Вредности измерених температура ваздуха за урбану средину, руралну средину и интензитет термичких острва за различите месеце приказани су на сликама 4.42 - 4.46.



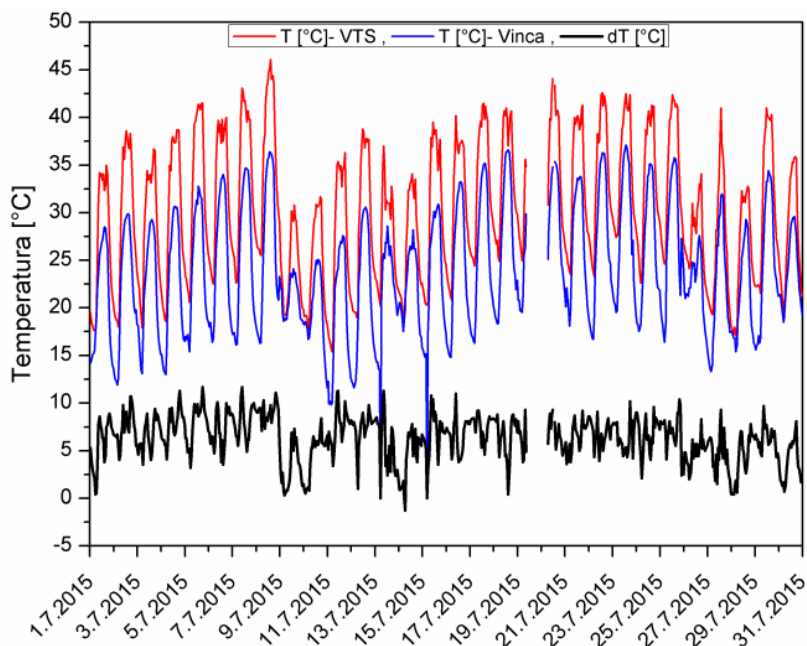
Слика 4.42 Температура ваздуха у руралној средини (Винча), градској средини (Београд) и интензитет термичког острва у мају



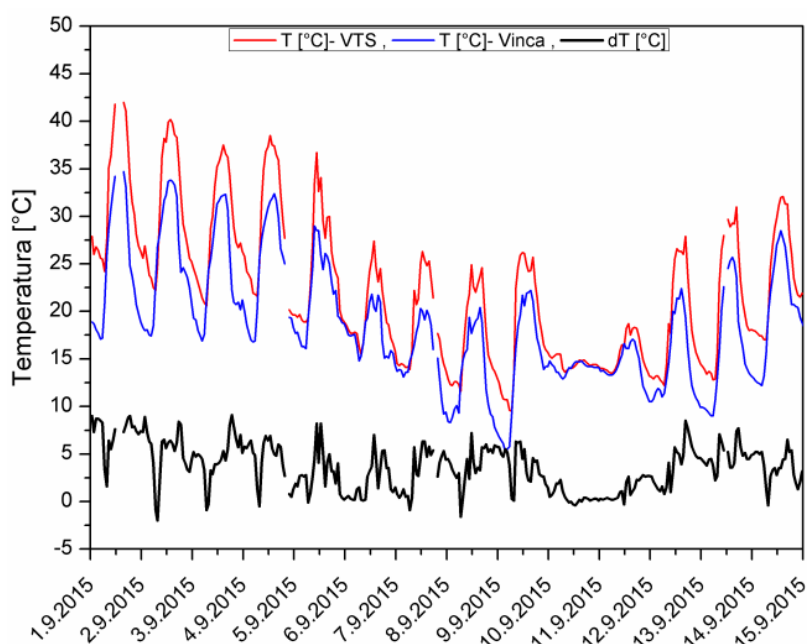
Слика 4.43 Температура ваздуха у руралној средини (Винча), градској средини (Београд) и интензитет термичког острва у јуну



Слика 4.44 Температура ваздуха у руралној средини (Винча), градској средини (Београд) и интензитет термичког острва у јулу



Слика 4.45 Температура ваздуха у руралној средини (Винча), градској средини (Београд) и интензитет термичког острва у августу

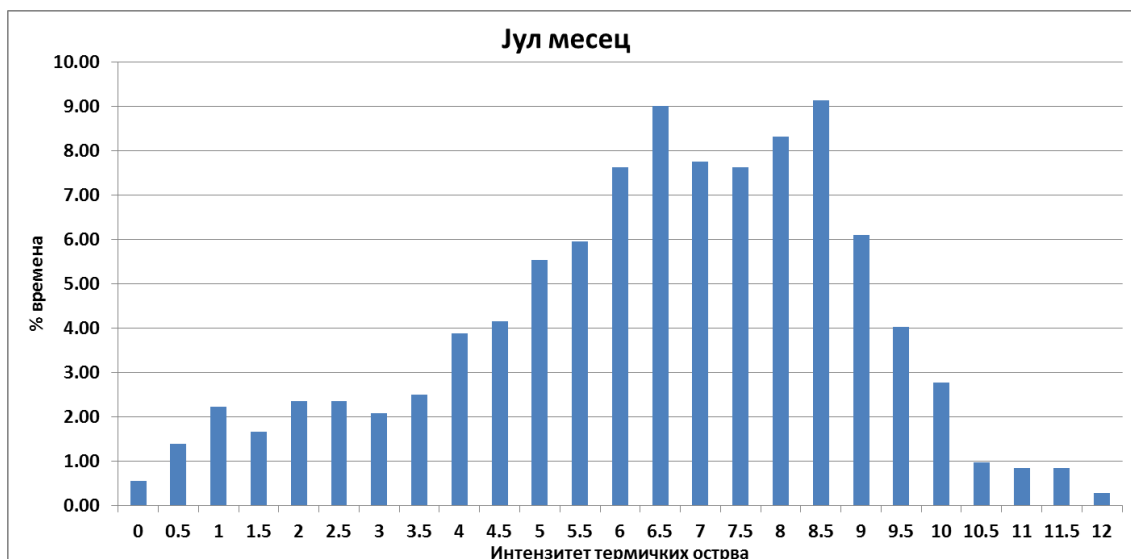


Слика 4.46 Температура ваздуха у руралној средини (Винча), градској средини (Београд) и интензитет термичког острва у септембру

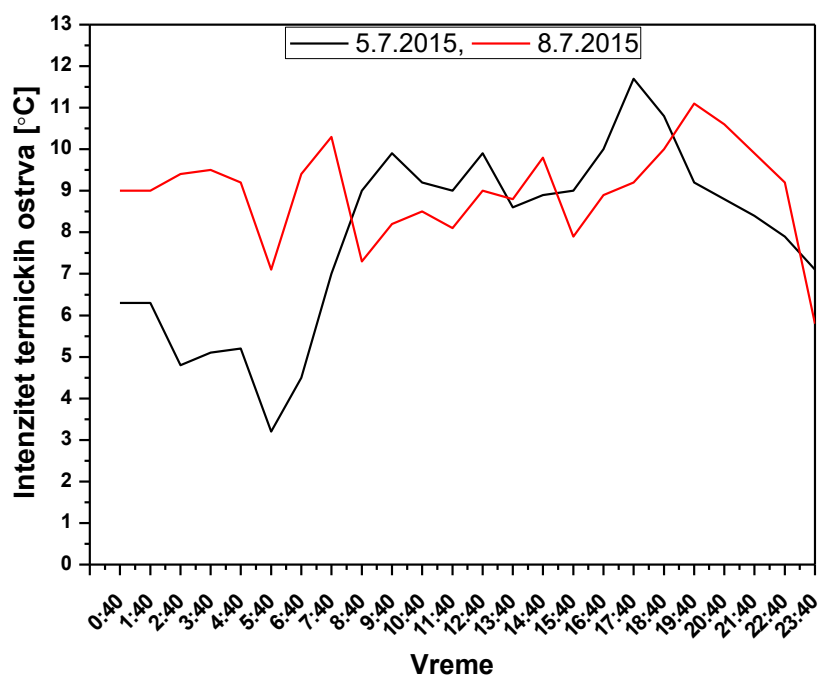
Табела 4.3 Средње и максималне вредности температуре ваздуха и средње вредности интензитета термичких острва током периода мерења

Месец	Максимална темп. ваздуха [°C] ДМТ	Средња темп. ваздуха [°C] ДМТ	Максимална темп. ваздуха [°C] Винча	Средња темп. ваздуха [°C] Винча	Средња вредност ИНИ[°C]
Март	25,6	10,2	22,2	7,5	2,60
Април	32,9	15,1	26,7	11,6	3,5
Мај	38,6	20,6	31,0	16,7	3,8
Јун	42,0	24,2	33,0	19,7	4,5
Јул	46,1	29,9	37,1	23,6	6,2
Август	43,1	28,2	37,1	23,1	5,0
Септембар	42,0	23,3	34,7	19,2	4,0

На Слици 4.47 је приказана учесталост вредности интензитета термичких острва за месец јул, када је измерена највиша вредност температуре на репрезентативној урбаној локацији 46.1°C. Максимална вредност интензитета термичких острва у јулу кретала се до 12 °C, али највећи проценат, више од 65% времена, вредност интензитета термичких острва кретала се у интервалу 5-9°C. Такође, уочене су веће вредности интензитета термичких острва у ноћном периоду, што може бити виђено на Слици 4.48 на примеру два најтоплија дана у јулу.



Слика 4.47 Расподела вредности интензитета термичких острва за јул

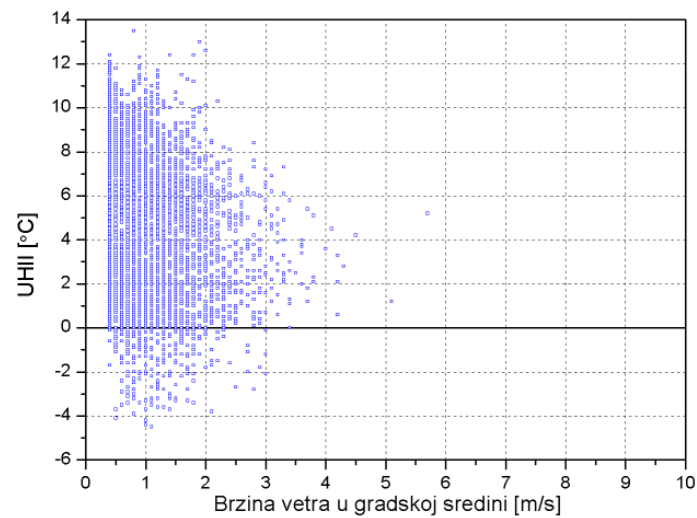


Слика 4.48 Вредности интензитета термичког острва за два најтоплија дана у јулу

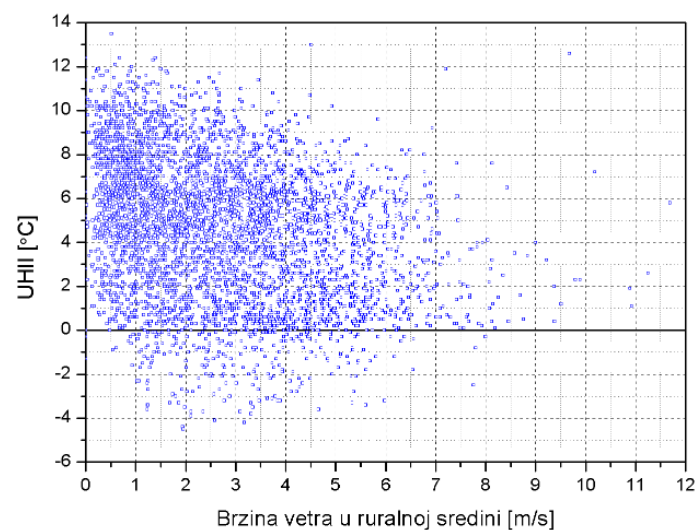
4.4.1.1 Промена интензитета термичког острва услед брзине ветра

Приликом већих брзина струјања ветра, мешање ваздуха је учесталије и могуће је смањење вредности амбијенталне температуре, што утиче и на мању вредност интензитета термичког острва. Измерени подаци брзине струјања ветра за градску и руралну средину коришћени су за анализу утицаја ветра на интензитет термичких острва, слика 4.49 и 4.50. Може се видети да:

- Интензитет термичког острва опада са повећањем струјања ваздуха;
- Измерена брзина струјања ветра је значајно виша у руралној средини у односу на градску средину;



Слика 4.49 Брзина ветра у градској средини и интензитет термичког острва



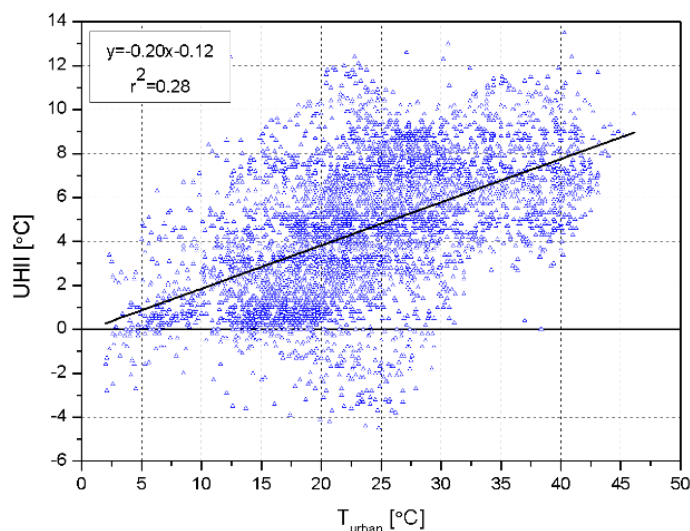
Слика 4.50 Брзина ветра у руралној средини и интензитет термичког острва

4.4.1.2 Промена интензитета термичког острва са температуром ваздуха

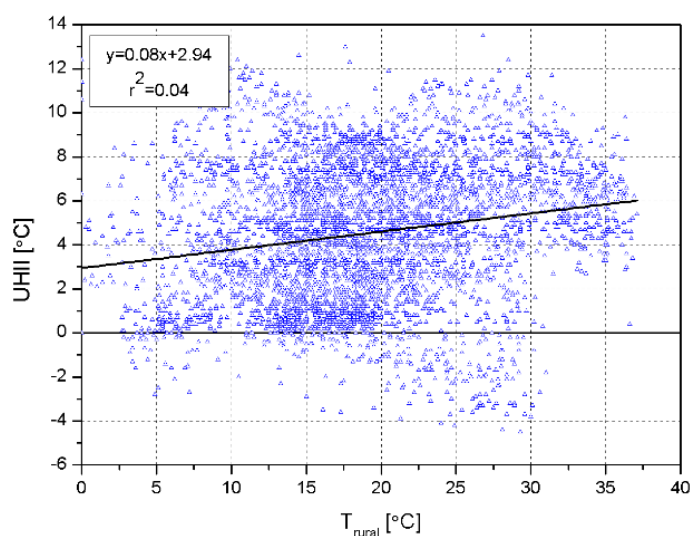
У овом делу је приказана веза између термичког острва и амбијенталне температуре у градској и руралној средини, слика 4.51 и 4.52.

Већа је повезаност интензитета термичког острва и градске температуре, док је та веза са руралном температуром веома мала.

Коефицијент корелације интензитета термичког острва и градске температуре је $r^2=0,28$, али можемо да уочимо да уз пораст амбијенталне температуре расте и вредност интензитета термичког острва. Насупрот томе, корелација промене интензитета термичког острва са променом температуре у руралној средини јесте само $r^2=0,04$.



Слика 4.51 Температура ваздуха у градској средини и интензитет термичког острва



Слика 4.52 Температура ваздуха у руралној средини и интензитет термичког острва

4.4.2 Преглед добијених резултата који су коришћени за прорачун потрошње енергије током летњег периода

У овом поглављу дат је приказ добијених резултата мерења енергетских перформанси одабраног репрезентативног школског објекта који су коришћени као

улазни подаци за прорачун потрошње енергије у летњем периоду помоћу компјутерског програма *Design Builder*.

У Табели 4.4, приказан је удео мерених површина на којима је рађено мерење у укупној површини омотача зграде и вредности коефицијента пролаза топлоте за све мерене компоненте омотача зграде Високе струковне школе за дизајн, технологију и менаџмент, која се налази у улици Старине Новака бр. 24 на Палилули, као испитиване зграде. Све вредности које су добијене прорачуном, изнад су максималних вредности препоручених Правилником о енергетској ефикасности зграда, што је и разумљиво, с обзиром на то да зграда датира из 1917. године, када и није много вођено рачуна о термичким карактеристикама омотача зграде. Такође, измерене вредности параметара за спољашње прозоре и врата такође су изнад максималне вредности дозвољене Правилником, поред тога што су првобитни прозори замењени ПВЦ прозорима пре десетак година.

Табела 4.4 Структура омотача зграде и приказ коефицијената пролаза топлоте за делове омотача школске зграде

Врста компоненте омотача зграде	Површина коју заузима компонента (m ²)	Удео површине поједине компоненте у укупној површини омотача зграде (%)	Коеф. пролаза топлоте U (W/m ² /K)
Спољни зид 35 цм	437,91	17,76	0,93
Спољни зид 50 цм	516,63	20,95	0,47
Спољни зид у сутерену	214,98	8,72	0,82
Зид у тлу	41,20	1,67	0,82
Под на тлу	530,78	21,52	1,10
Међуспратна конструкција према негрејаном простору - таван	530,78	21,52	0,87
Прозор 1	9,68	0,39	2,09
Прозор 2	144,55	5,86	2,15
Прозор 3	5,92	0,24	2,16
Прозор 4	2,31	0,09	2,36
Прозор 5	1,26	0,05	2,20
Прозор 6	1,47	0,06	2,22
Прозор 7	2,32	0,09	2,18
Прозор 8	3,20	0,13	2,10
Прозор 9	1,25	0,05	2,24
Прозор 10	0,43	0,02	1,96
Прозор 11	5,00	0,20	2,11
Врата 1	3,83	0,16	1,77
Врата2	8,58	0,35	1,89
Врата 3	3,88	0,16	1,45

На основу измерених резултата закључено је да је дневно мерење изразито нестационарно. Због тога, приликом прорачуна U-вредности, коришћени су само подаци који су измерени током ноћи, јер се према стандарду ISO 9869 захтева да прорачун буде урађен само уз услов да је топлотни проток кроз мерену структуру стационаран.

Један од главних разлога зашто су рађена детаљна мерења термичких карактеристика омотача зграде јесте што услед старости и временских услова (изложеност сунцу, мразу, киши...) на примеру прозора који су уграђени приликом реконструкције школске зграде и за које постоје подаци о термичким карактеристикама дошло је до малог процента деградације стакло пакета и рама у односу на сертификат произвођача. Због тога је дошло до повећања коефицијента пролаза топлоте за тај део омотача. Вредност промене у процентима у односу на сертификат који је доставио произвођач измерене вредности јесте око 6,2%. Уочено је да само ова промена утиче на укупну годишњу потребну енергију за грејање тако

што је увећава за 1,2% [114]. Све наведено нам додатно указује на битност измерених вредности који су гранични услови за симулације и прорачун укупне потребне енергије за хлађење објекта. Након детаљне анализе измерених вредности концентрација угљен-диоксида, прорачуната вредност инфилтрације је ниска и износи 0,3 1/h, што је са енергетске стране добро и указује на то да је заптивеност просторија добра, али када је реч о квалитету ваздуха унутрашњег простора може бити посматрана као негативна страна, поготово код просторија које имају само природну вентилацију.

4.4.2.1 Одређивање мерне несигурности мерења коефицијента пролаза топлоте

Стандардна девијација мерених величина се израчунава помоћу следеће једначине:

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum (f_i - \mu)^2} \quad (4.3)$$

где су:

N - број елемената скупа

f_i - i -ти члан скупа ($i=1,2\dots N$)

μ - аритметичка средина скупа

Комбинована мерна несигурност

$$\delta = \sqrt{\delta_i^2 + \delta_{S_d}^2} \quad (4.4)$$

где су:

δ_i - мерна несигурност уређаја којим је рађено мерење ($i=1,2\dots N$), што зависи од броја уређаја

δ_{S_d} - мерна несигурност резултата мерења

Проширена мерна несигурност

$$\delta_{proši.} = k \cdot \delta \quad (4.5)$$

Усвојена је вредност фактора за две стандардне девијације ($k=2$), јер је вероватноћа 95% да ће се добијени резултат наћи у овој области.

Мерна несигурност U-вредности за све случајеве мерења елемената омотача јесте

$$\delta = \sqrt{(\delta T_i)^2 + (\delta T_e)^2 + (\delta T_{si})^2 + (\delta T_{se})^2 + (\delta q)^2 + (\delta u)^2} \quad (4.6)$$

На основу израчунатих релативних мерних несигурности утицајних параметара који су мерени за прорачун коефицијента пролаза топлоте, добијене су следеће вредности мерне несигурности и проширене мерне несигурности које су приказане у Табели 4.5.

Табела 4.5 Вредности мерне и проширене мерне несигурности коефицијента пролаза топлоте за различите елементе омотача зграде

Мерена површина	Мерна несигурност	Проширена мерна несигурност
стакло	0,9121 %	1,8242%
рам	0,8781 %	1,7562 %
спољни зид дебљине 35 цм	0,8858 %	1,7716 %
спољни зид дебљине 55 цм	0,8859 %	1,7718 %
зид у тлу	0,9228 %	1,8456 %
међуконструкција	0,8910 %	1,7820 %
под на тлу	0,8892 %	1,7784 %

5. Математичко-нумерички модел

5.1. Физички модел

За физички модел одабрана је зона града Београда, која обухвата зону оивичену улицама: Булевар краља Александра од Таковске до Рузвелтове, Таковска од Булевара Краља Александра до Јаше Продановића, Јаше Продавновића, Здравка Челара до Прерадовићеве, део Прерадовићеве и Рузвелтове од Цвијићеве до Булевара Краља Александра, а која је приказана на слици 5.1. Ова зона ја изабрана за физички модел, јер су управо у овој зони рађена експериментална мерења метеоролошких величина стања, која су детаљно описана у претходном поглављу.

Ова градска зона претежно се састоји од стамбених зграда, асфалтираних улица, али и значајног броја јавних установа. Фасаде зграда су претежно сиве или тамносиве боје. У овом делу града налази се и један од највећих паркова Београда, Ташмајдански парк, који је на посматраном делу градске средине уједно и највећа површина покривена вегетацијом. Остали делови који су покривени вегетацијом у овом делу градске средине јесу мањи паркови или мање површине под вегетацијом смештене у двориштима зграда. Једина водена површина у овој зони јесте тзв. ташмајдански базен, Спортског центра „Ташмајдан“.



Слика 5.1 Приказ градске локације

5.2. Математички модел

Решавање проблема преноса топлоте, струјних и других процеса може да почне онда када закони који управљају овим процесима (физички модел процеса) буду изражени у математичком облику. У наставку су приказане основе једначине за описивање струјно-термичких процеса за посматрани случај. Пре свега су дате претпоставке на основу којих су дефинисане главне транспортне једначине коришћене за описивање тродимензионалног турбулентног струјног тока са преносом топлоте.

5.2.1. Претпоставке модела

Неопходно је увести основне претпоставке за класу струјања моделираног у овој дисертацији:

Струјање је стационарно. Ова претпоставка је оправдана с обзиром на то да су веома мале временске промене физичких параметара стања ваздуха у прорачунском домену, у току временског интервала за који је прорачун извршен. У математичком смислу, ова претпоставка имплицира да су сви парцијални изводи физичких параметара по времену једнаки нули. Неопходно је истаћи да се ова претпоставка односи на појединачне, временски ограничене нумеричке сценарије за довољно кратке временске интервале у току којих се временске промене параметара могу оправдано занемарити.

Струјање је турбулентно. Како је ова класа струјања карактерисана великим локалним вредностима Re бројева, турбулентни режим струјања је присутан. У математичком смислу, ова чињеница је условила моделирање турбуленције, а за потребе ове дисертације усвојен је стандардни двоједначински k - ε модел турбуленције.

У посматраном проблему присутна су сва три облика преноса топлоте: провођење, прелажење и зрачење. Приликом моделирања процеса преноса топлоте провођењем и прелажењем, оба механизма преноса топлоте се рачунају истовремено, како кроз основни медијум (ваздух), тако и кроз чврсто тело. При моделирању преноса топлоте зрачењем, основни медијум (ваздух) третиран је као нетранспарентна средина. Услед увођења претпоставке о нетранспарентној средини неопходно је

дефинисати функционалне релације за одређивање ефективних коефицијента емисивности ваздуха и коефицијента расипања зрачења у ваздуху у зависности од локалне концентрације угљен-диоксида и водене паре у ваздуху. У математичком смислу, при развоју модела зрачења, усвојен је концепт моделирања преноса топлоте зрачењем применом модела градијентног приступа који подразумева да топлотни флуks преноса топлоте зрачењем буде дефинисан у форми градијента (еквивалентно са класичним приступом формулације преноса топлоте провођењем).

Ваздух сматрамо идеалним гасом. Ова претпоставка обезбеђује да развијени математички модел има јединствено решење (број релација једнак броју независно променљивих).

5.2.2. Основне билансне једначине

- При моделирању турбулентног флуидног тока са преносом топлоте, струјање флуида описано је са две скаларне и једном вектрском парцијалном диференцијалном једначином, које су формиране на основу три основна закона одржања – супстанце (једначина континуитета), количине кретања (Навије-Стоксова векторска једначина) и Првог закона термодинамике (биланс енергије). Основни закони одржања представљени диференцијалним једначинама и коришћењем индексне нотације имају следећи облик: **једначина континуитета (једначина одржања материје)**

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

- **једначина одржања количине кретања (Навије-Стоксова једначина)**

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

Где је додатни члан $-\overline{u_i u_j}$ настао као последица Рејнолдсовог усредњавања Навије – Стоксове једначине. Уобичајено је да се овај члан назива тензор Рејнолдсових напона. Како ваздух припада групи Њутновских флуида, за моделирање тензора Рејнолдсових напона употребљена је Бусинескова хипотеза.

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (5.3)$$

где је ν_t турбулентна кинематска вискозност флуида, а δ_{ij} Кронекеров делта оператор ($\delta_{ij} = 1$ за $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$ за $i \neq j$).

- **једначина одржања енергије**

$$U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{\theta u_i} \right) + S_{rad} \quad (5.4)$$

где је: ρ усредњена густина флуида, U_i компонента усредњене брзине флуида у смеру i , P усредњени притисак флуида, T усредњена температура флуида, $\overline{\theta u_i}$ вектор турбулентних топлотних флуксева који се јавља као последица поступка Рејнолдсовог усредњавања.

Вектор турбулентних топлотних флуксева дефинисан је изразом:

$$\overline{\theta u_i} = \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5.5)$$

где је ν_t турбулентна кинематска вискозност, σ_t турбулентни Шмитов број.

- **једначина одржања концентрације CO₂**

$$U_j \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{CO_2,air} + \frac{\nu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x_i} + S_{CO_2} \quad (5.6)$$

где је C_{CO_2} усредњена концентрација CO₂ у ваздуху, U_j компонента усредњене брзине флуида у смеру j , $D_{CO_2,air}$ коефицијент масене дифузије CO₂ у ваздуху и S_{CO_2} изворни члан за CO₂.

5.2.3. Моделирање турбулентног струјања коришћењем k - ϵ модела

За моделирање кинематске турбулентне вискозности (ν_t) коришћен је стандардни двоједначински k - ϵ модел. Двоједначински k - ϵ модел припада групи модела

Рејнолдсових усредњених Навије-Стоксових једначина (енг. *Reynolds*-avaraged Navier-Stokes** equations*) – у даљем тексту RANS [115].

RANS једначине описују понашање усредњених транспортних величина, док се турбулентне величине (тензор Рејнолдсових напона и вектор турбулентних топлотних флукса) моделирају применом турбулентне кинематске вискозности. Тиме значајно бива смањено потребно време за израчунавање, као и потребан ниво рачунарских ресурса, што двоједначински k - ϵ модел чини применљивим на широк опсег инжењерских проблема [116].

Транспортна једначина кинетичке енергије турбуленције има облик:

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} = P_k + G_k - \epsilon \quad (5.7)$$

где је продукција турбуленције услед усредњених градијената брзина (P_k) дефинисана егзактно, изразом

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_k}. \quad (5.8)$$

Продукција турбуленције услед сила потиска, које су резултат постојања усредњених градијената температуре (G_k), дата је изразом,

$$G_k = \nu_t \beta g_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5.9)$$

У претходној једначини $\beta = 1/T_{ref}$ јесте коефицијент температурне експанзије ваздуха.

Транспортна једначина за брзину дисипације кинетичке енергије турбуленције има облик:

$$U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right\} = \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k + C_{\epsilon 3} G_k - C_{\epsilon 2} \epsilon) \quad (5.10)$$

Утицај силе потиска на брзину дисипације турбулентне кинетичке енергије није јасно дефинисан као у случају турбулентне кинетичке енергије. Вредност изворног

* Осборн Рејнолдс, енглески физичар - *Osborne Reynolds* (1842-1912)

** Клод Луј Навје, француски физичар - *Claude-Louis Navier* (1785-1836) и Џорџ Габријел Стокс, енглески математичар - *George Stokes* (1819-1903)

члана G_k је моделирана коефицијентом $C_{\varepsilon 3}$. Коефицијент $C_{\varepsilon 3}$ није дат нумеричком вредношћу него може бити израчунат помоћу израза

$$C_{\varepsilon 3} = \tanh\left(\frac{U_{\perp}}{U_1}\right) \quad (5.11)$$

Када је компонента брзине струјања у правцу вектора гравитације $U_{\perp} = U_3$ занемарљиво мала у односу на компоненту брзине струјања у равни нормалној на вектор гравитације $U_1 = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$, вредности коефицијента је $C_{\varepsilon 3} = 0$. Када је компонента брзине струјања колинеарна са вектором гравитације доминантна, односно када је компонента брзине струјања у равни нормалној на вектор гравитације занемарљиво мала, вредност коефицијента је $C_{\varepsilon 3} = 1.0$. Најчешћи случајеви струјања са израженом природном конвекцијом налазе се између ова два екстрема, па је неопходно увести одговарајућу релацију која ће узети у обзир ове ефекте.

Код стандардног k - ε модела, непозната величина (ν_t) бива одређена применом Бусинескове хипотезе о турбулентној вискозности. Ова хипотеза претпоставља да количина кретања узрокована турбулентним вртлозима може бити моделирана увођењем додатне величине – турбулентне вискозности. Наведена претпоставка настала је на основу аналогије са начином на који се количина кретања узрокована молекуларним кретањем честица гаса описује молекуларном вискозношћу. Преко брзине дисипације турбулентне кинетичке енергије, лако може бити изражена карактеристична дужинска размера ($\ell = k^{3/2}/\varepsilon$) и карактеристична временска размера ($\tau = k/\varepsilon$) турбуленције, тако да турбулентна кинематска вискозност (ν_t) буде добијена коришћењем следећег израза:

$$\nu_t = C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.12)$$

где је C_{μ} емпиријска константа турбулентног модела, $C_{\mu} = 0.09$.

Парцијалне диференцијалне једначине за кинетичку енергију турбуленције, k , и брзину дисипације кинетичке енергије турбуленције, ε , добијају се полуемпиријском техником моделирања [117]. Вредности коефицијената који се појављују у тим диференцијалним једначинама одређене су експерименталним путем [118].

У изразу 5.12 и једначинама 5.7 и 5.10 уведене су емпиријске константе турбулентног модела. Њихове вредности су приказане у табели 5.1:

Табела 5.1 Стандардне вредности константи k - ϵ модела

Константа	σ_k	σ_ϵ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 3}$	C_μ
Вредност	1,0	1,314	1,44	1,92	1	0,09

5.2.4. Модел преноса топлоте зрачењем

За модел преноса топлоте зрачењем у овој дисертацији усвојен је градијентни модел. Основни недостатак наведеног модела је неопходност прорачуна ефективног коефицијента зрачења, али је у математичком и нумеричком смислу најприкладнији за третирање феномена преноса топлоте зрачењем у простору где постоје чврста тела, као што су у разматраном случају, стамбене зграде, јавни објекти и др.

Ако са S_{rad} означимо укупан топлотни флуks преноса топлоте зрачењем, то јест суму свих флуksева топлотног зрачења који пролазе кроз посматрану прорачунску запремину, независно од правца и таласне дужине, онда овај члан може бити изражен на следећи начин:

$$S_{rad} = \sigma T_{rad}^4 \quad (5.13)$$

Јасно је да је уведена потпуно нова физичка величина – радијантна температура која је последица само ефеката зрачења. Поставља се питање како одредити вредност радијантне температуре. За одређивање ове температуре послужиће нам једначина (5.3) која сада може бити прецизније написана у следећем облику:

$$U_j \frac{\partial T_a}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T_a}{\partial x_i} \right] + S_{air-rad} \quad (5.14)$$

где је са T_a означена средња температура амбијенталног флуида, у овом случају ваздуха, како би била разликована од радијантне температуре T_{rad} . Имајући у виду усвојени градијентни концепт модела зрачења, радијантна температура може бити одређена из своје сопствене диференцијалне једначине одржања изједначавањем леве стране претходне једначине са нулом, јер конвективни допринос радијантне температуре не постоји:

$$0 = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{rad} \frac{\partial T_{rad}}{\partial x_i} \right) + S_{a-rad} \quad (5.15)$$

где је λ_{rad} радијациони коефицијент провођења. Изворни чланови S_{a-rad} и $S_{rad-air}$ бивају одређени на следећи начин:

$$S_{rad} = S_{a-rad} = -S_{rad-a} = \varepsilon' \sigma (T_{rad}^4 - T_a^4) \quad (5.16)$$

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

Радијациони коефицијент провођења одређен је као функција радијантне температуре, коефицијента емисивности (ε') и коефицијента расипања (s') по јединици дужине и растојања између два суседна зида чврстог тела (X_{GAP}), коришћењем следећег израза:

$$\lambda_{rad} = \frac{4\sigma T_{rad}^3}{0.75 \left(\varepsilon' + s' + \frac{1}{X_{GAP}} \right)} \quad (5.17)$$

На зидовима чврстог тела, као и унутар чврстог тела, 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.

Доста је груба претпоставка да је укупни флуks зрачења независан од таласне дужине, али увођењем претпоставке о такозваном сивом медијуму овај недостатак се ублажава.

Израз за радијациони коефицијент провођења топлоте за случај сивог медијума може се извести на основу следеће процедуре - коришћењем два екстремна случаја: ограничења за оптички танки и оптички дебели медијум. При томе се „танки“ и „дебели“ реферишу у односу на растојање између два посматрана зида које се може сматрати средњом дужином зрачења, једнакој реципрочној вредности збира ε' и s' .

За оптички дебео медијум, топлотни флуks зрачења може бити изражен на следећи начин:

$$q_i = -\frac{4}{3} \frac{1}{\varepsilon' + s'} \sigma \frac{\partial (T_a^4)}{\partial x_i} \quad (5.18)$$

где је уместо T_{rad} искоришћена температура медија T_a .

Ако се градијент температуре уместо на четврти степен односи на први степен температуре, онда ефективна топлотна проводљивост може бити изражена на следећи начин:

$$\lambda_{eff} = \frac{16}{3} \frac{\sigma T_a^3}{(\varepsilon' + s')} \quad (5.19)$$

За случај оптички дебелог медијума, топлотни флуks зрачења може бити изражен на следећи начин:

$$q_i = -\frac{4}{3} \frac{1}{\varepsilon' + s'} \sigma \frac{\partial(T_a^4)}{\partial x_i} \quad (5.20)$$

У случају другог екстрема, сматра се да је медијум довољно танак да може бити усвојена претпоставка да је медијум потпуно транспарентан. У наведеном случају топлотни флуks зрачења је функција само температуре зидова (топлог и хладног), тако да је израз за флуks зрачења у овом случају:

$$q = \left(1 + \frac{1 - \varepsilon_{topli}}{\varepsilon_{topli}} + \frac{1 - \varepsilon_{hladni}}{\varepsilon_{hladni}}\right) \sigma (T_{topli}^4 - T_{hladni}^4) \quad (5.21)$$

У поређењу са једначином (5.20) где је флуks зрачења изражен градијентом температуре, тј. у облику који одговара решавању једначине применом методе коначних запремина, једначина (5.21) нема ту математичку форму. Да би и ова једначина била написана у градијентној форми, неопходно је учинити разлику температура $T_{topli} - T_{hladni}$ довољно малом. Увођењем јединичних вредности коефицијената емисивности површина зидова, једначина (5.21) постаје:

$$q = 4X_{GAP} \sigma T_a^3 \quad (5.22)$$

Како је градијент температуре између ова два зида једнак $(T_{topli} - T_{hladni})/X_{GAP}$, где је X_{GAP} растојање између зидова, ефективна топлотна проводљивост добија следећи облик:

$$\lambda_{eff} = 4X_{GAP} \sigma T_a^3 \quad (5.23)$$

Како је укупни флуks зрачења константан за константне температуре зидова на основу једначине (5.22) може бити закључено да се ефективна топлотна проводљивост повећава са повећањем растојања између зидова. На основу израза за

ефективну топлотну проводљивост (5.18) и (5.22) у екстремним случајевима (за оптички дебео зид и оптички танак зид), могуће је извести израз за ефективну топлотну проводљивост сивог медијума.

Коришћењем израза за реципрочне вредности ефективних еквивалената провођења, односно израза за топлотни отпор зрачења (Km/W) бива добијено:

$$\lambda_{eff}^{-1} = \frac{3}{16} \frac{(\varepsilon' + s')}{\sigma T_a^3} \quad (5.24)$$

$$\lambda_{eff}^{-1} = \frac{1}{4X_{GAP}\sigma T_a^3} \quad (5.25)$$

Увођењем претпоставке да се на основу димензионалне једнозначности чланови уз $4\sigma T_a^3$ могу сабрати, добија се коначан облик израза за реципрочну вредност ефективне топлотне проводљивост за сиви медијум:

$$\lambda_{eff}^{-1} = \frac{3}{4} \frac{\left(\varepsilon' + s' + \frac{1}{X_{GAP}}\right)}{4\sigma T_a^3} \quad (5.26)$$

Реципрочна вредност израза (5.26) даје већ написани израз (5.17) за радијантни коефицијент провођења топлоте, у коме уместо радијантне температуре као променљива конфигурише температуре ваздуха.

Како би модел преношења топлоте зрачењем у потпуности био дефинисан неопходно је одредити вредности коефицијента емисивности атмосфере и коефицијента расипања по јединици дужине. Поступак одређивања коефицијента ефективне емисивности атмосфере и коефицијента расипања веома је комплексан с обзиром на чињеницу да на њихове вредности утиче низ различитих атмосферских параметара: $\varepsilon(u(P/P_0)^n)$, P_0 , и T . У претходном изразу u је оптичка дебљина која је функција вредности притиска P , вредности атмосферског притиска P_0 , и средње температуре ваздуха T . Вредност експонента (n) је у распону од минималне – приближно 0,7 [1/m] за случај мале атмосферске оптичке дебљине до приближно 1,0 [1/m] за случајеве велике атмосферске оптичке дебљине. За потребе одређивања коефицијента атмосферске емисивности у овој дисертацији усвојен је следећи израз [117]:

$$\varepsilon'_a = \varepsilon'_a(H_2O) + \varepsilon'_a(O_3) + \varepsilon'_a(\text{preklapanje}) + \varepsilon'_a(CO_2) \quad (5.27)$$

Имајући у виду атмосферске услове у току мерне кампање (ведро време без облачности), усвојене су константне вредности релативне влажности ваздуха и концентрације озона, док је концентрација угљен-диоксида (CO_2) у директној вези са интензитетом саобраћаја у посматраном домену (делу града). На основу горе наведеног, бива усвојена претпоставка да су прва три члана у једначини (5.26) константна, да су коефицијент ефективне атмосферске емисивности и коефицијент расипања дефинисани функцијом чија вредност зависи само од локалне концентрације угљен-диоксида (CO_2) [117]:

$$\varepsilon'_a = 0.31 + 422.2 C_{\text{CO}_2} \quad (5.28)$$

$$s'_a = 0.2\varepsilon'_a \quad (5.29)$$

5.3. Испитивање мреже

Тачност резултата прорачунских симулација зависи од много параметара, као и од квалитета прорачунске мреже (густине нумеричке мреже). Један од параметара за оцену густине нумеричке мреже је сама величина ћелије прорачунске мреже, која прати опште прихваћену логику да се дискретизована грешка униформно смањује са смањењем дискретизационог елемента (прорачунске ћелије). Са смањењем величине, односно повећањем броја дискретизационих елемената расте и време потребно за нумерички прорачун. Развојем нумеричких симулација јавила се и потреба за валидацијом и верификацијом добијених резултата. Једна од основних идеја верификације тачности модела је упоређивање измерених и симулираних вредности на предходно одређеним локацијама градског подручја. За такав верификовани модел можемо са великом сигурношћу да, за различите улазне податке, утврдимо вредности интензитета термичког острва у одабраној градској средини.

5.4. Домен интеграције и гранични услови

Доменом интеграције обухваћен је нумерички модел одабране градске средине. За координатни систем усвојен је Декартов правоугли координатни систем десне оријентације, слика 5.2.



Слика 5.2 Домен интеграције и положај координатног система

Проблем који се јавља приликом симулација комплексних урбаних струјања јесте дефинисање граница домена. Значајан захтев за постављање нумеричких граничних услова јесте довољна удаљеност препрека од граница домена, како би било спречено повратно струјање у домен. Тај захтев је сукобљен са реалном чињеницом да може бити симулиран само један сегмент урбане површине који најчешће није просторно изолован од осталих објеката урбаног простора.

Удаљеност граница домена од објеката који су предмет истраживања у овом раду није строго дефинисана, већ је тражено задовољење следећих услова:

1. горња граница треба да обезбеди услов хомогености за градијент притиска дуж правца нормале на површ границе,
2. пројекција улазне брзине ветра треба да буде довољно далеко од објеката како би било осигурано да су други утицаји на поље притиска занемарљиви,
3. бочне границе и граница супротна од уласка струјања треба да омогуће потпуно развијање струјања и онемогуће повратна струјања.

За урбано подручје са више зграда, препоруке из литературе сугеришу да висина горње границе треба да буде на висини $5 \cdot H_{\max}$ (H_{\max} – висина највише зграде у посматраном домену)[118, 119]. Велика растојања од горњих (кровних) површина објеката су неопходна да би била спречена појава вештачког убрзања струјања над објектима. Бочне границе треба да буду на удаљености од $5 \cdot H_{\max}$ од посматраних објеката. Исти услов је захтеван и за удаљеност између улазне границе и прве зграде како би било омогућило потпуно развијено струјање у тој зони. Излазна граница треба да буде постављена најмање $(10-15) \cdot H_{\max}$ иза последње зграде. Са друге стране у појединим референцама је препоручено растојање од најмање $4 \cdot H_{\max}$. Након анализе струјања на моделу са грубом нумеричком мрежом, усвојен је домен за који су ова растојања једнака $5 \cdot H_{sr}$ (H_{sr} – средња висина свих зграда у посматраном прорачунском домену).

За потпуно дефинисање математичког модела потребно је одабрати тип и вредност граничних услова за сваку од прорачунских величина, то јест за сваку транспортну једначину модела. У табели 5.4 дати су гранични услови коришћеног нумеричког модела.

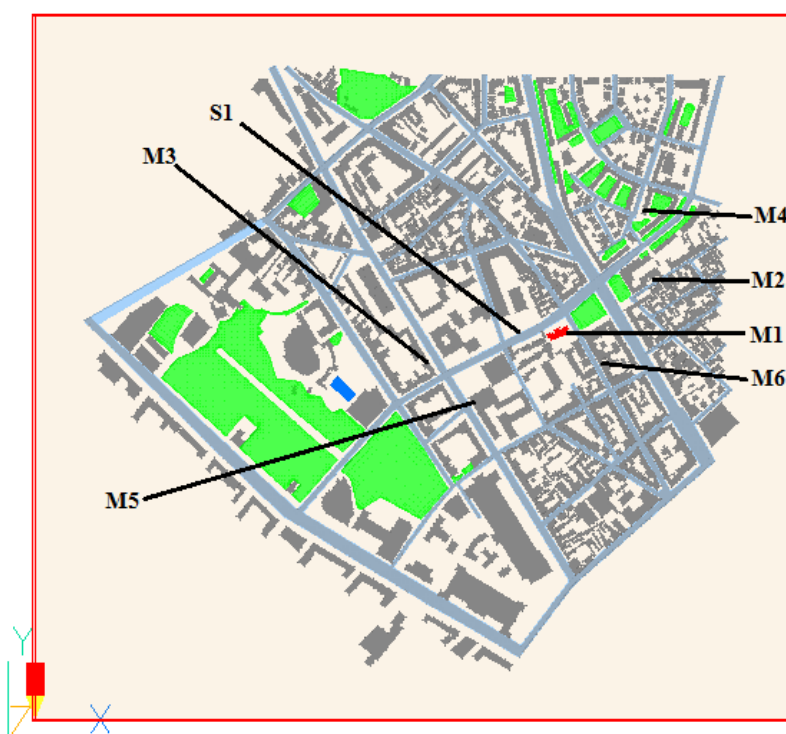
Улазни подаци атмосферских параметара, коришћени за дефинисање граничних услова, узети су са метеоролошког стуба и приказани су у табели 5.2. У табели 5.3. су дате температуре фасада и асфалта у посматраном подручју који су коришћени као улазни подаци, односно гранични услови, за одабране случајеве, док су на Слици 5.3 приказане локације где су урађена мерења. Величина прорачунског домена износи $1536 \times 1425 \times 200$ метара.

Табела 5.2 Средње вредности измерених метеоролошких параметара

Датум	05.07.2015.		
Време	8:00-9:00	14:00-15:00	18:00-19:00
Температура ваздуха T_a [°C]	35,9	40,8	37,6
Температура црне кугле [°C]	37,88	39,92	38,59
Релативна влажност RH [%]	33,1	21,4	25,4
Атмосферски притисак p [hPa]	1000,1	1000,3	999,8
Брзина ветра [m/s]	1,1	2,8	3,1
Правац ветра [degree]	300	330	322
Директно сунчево зрачење [W/m ²]	410	794	217
Дифузионо сунчево зрачење [W/m ²]	380	400	0

Табела 5.3 Температуре фасада и асфалта измерене у посматраном подручју

Датум: 05.07.2015.		Време			
		8:00-9:00	14:00-15:00	18:00-19:00	
Зграда	Материјал фасаде	Темп. граничне површине, T_s [°C]			
M1 - Улица Старине Новака	Бетон	39,0	50,5	44,0	
M2 - Љубе Динића	Термоизолација	33,8	45,3	40,7	
M3 - 27. марта	Бетон	38,5	49,8	44,4	
M4 - Улица Браће Грим	Цигла	34,1	48,2	44,2	
M5 - Поштанска штедионица	Стакло	31,5	47,5	38,8	
M6 - Далматинска	Цигла	33,1	45,3	41,2	
Средња вредност		35,0	47,8	42,2	
Улица		Материјал			
S1	Старине Новака	Асфалт	41,8	52,5	45,3

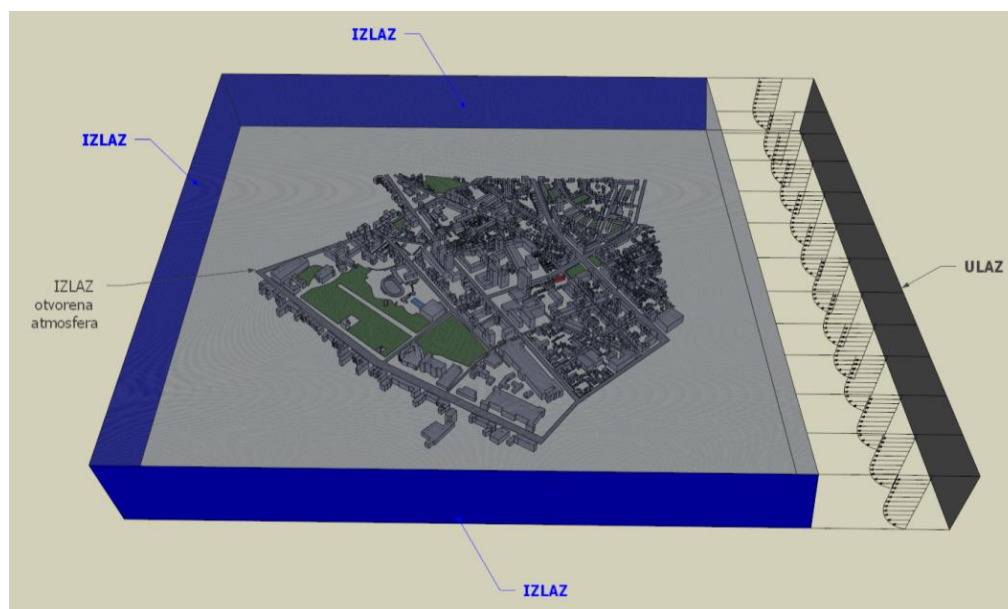


Слика 5.3 Локација мерних места

Табела 5.4 Сумарни гранични услови

Прорачунска величина, тј. њена транспортна једначина	ГРАНИЧНИ УСЛОВИ		
	УЛАЗ	ИЗЛАЗ	ЗИД
U_i	$U_i _{ulaz}$	$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} _{izlaz}$	$U_i _{zid} = 0$
T_a	$T_a _{ulaz}$	$\frac{\partial T_a}{\partial x_i} _{izlaz} = 0$	$T_a _{zid}$
C_{CO_2}	$C_{CO_2} _{ulaz}$	$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x_i} _{izlaz} = 0$	0
k	$(0.1 \cdot U_i)^2$	$\frac{\partial k}{\partial x_i} _{izlaz} = 0$	k_{zid}
ε	$0.1643k^{1.5}/\ell$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} _{izlaz} = 0$	ε_{zid}

Следећи гранични услови дефинисани су за прорачунски домен приказан на Слици 5.4 - један улаз, четири излаза и зидови.



Слика 5.4 Улазне и излазне граничне површине прорачунског домена

Струјне величине на улазу у прорачунски домен дефинисане су тако да репрезентују реално струјање у атмосферском граничном слоју. Гранични услов за

брзину на улазу у прорачунски домен дефинисан је вредношћу брзине (Табела 5.4) са вертикалном логаритамском расподелом, према следећој једначини:

$$U(z) = U \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\kappa} \quad (5.30)$$

где је U (ms^{-1}) средња вредност брзина ветра измерена на најближој метеоролошкој станици на референтној висини z (m), z_0 (m) јесте средња вредност храпавости површине на улазу у домен, и $\kappa = 0,4$ је *von Karman*-ова константа. За средње вредности брзине ветра одређених на основу резултата мерења брзине ветра на метеоролошком стубу који је постављен на згради Високе текстилне струковне школе за дизајн, технологију и менаџмент, (Слика 4.3) која се налази унутар прорачунског домена, приказане су у Табели 5.2.

Вертикална дистрибуција турбулентне кинетичке енергије $k(z)$ ($m^2 s^{-2}$) може бити израчуната коришћењем следећег израза:

$$k(z) = \frac{U^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (5.31)$$

У једначини 5.31 $C_\mu = 0,09$ јесте константни коефицијент.

Вертикална дисипација турбулентне кинетичке енергије, $\varepsilon(z)$ ($m^2 s^{-3}$), може бити израчуната помоћу следеће релације:

$$\varepsilon(z) = \frac{U^3}{\kappa(z+z_0)} \quad (5.32)$$

Као гранични услов за брзину за све излазе прорачунског домена постављен је услов да је вредност градијента брзине једнака нули у правцу нормалном на раван граничне површине. Аналогно, као гранични услови турбулентне кинетичке енергије и њене дисипације на излазним границама прорачунског домена, постављени су услови да су њихови градијенти једнаки нули, (Табела 5.4.).

„*No-slip*“ гранични услов коришћен је као гранични услов за зидове прорачунског домена (подлога и површине урбаних објеката). Овај услов одговара вредности компоненти вектора брзине ветра једнакој нули у свим смеровима, Табела 5.4. Вредности за турбулентну кинетичку енергију и дисипација турбулентне кинетичке енергије на зидовима прорачунског домена добијене су коришћењем стандардних зидних функција, Табела 5.4.

Средња вредност експериментално мерене температуре ваздуха (Табела 5.2) коришћена је као гранични услов за температуру на улазу у прорачунски домен, као што је приказано у Табели 5.4. Као гранични услов на свим излазима из прорачунског домена, коришћен је услов да је вредност градијента температуре једнака нули у правцу нормале на површину (Табела 5.4.). Вредности температуре на зидовима зграда утврђене су мерењима и приказане су у Табели 5.3 за различите материјале фасада и подлоге. Добијене средње вредности коришћене су као гранични услови за зидове објеката прорачунског домена (Табела 5.4).

Као гранични услов за концентрацију CO_2 на улазу у прорачунски домен узета је средња вредност измерене концентрације CO_2 . Као гранични услов на свим излазима из прорачунског домена, постављено је да је вредност градијента концентрације CO_2 једнака нули у правцу нормале на површину, Табела 5.4. Претпостављено је да су вредности концентрације CO_2 једнака нули на зидовима прорачунског домена. Вредности изворних чланова S_{CO_2} за концентрацију CO_2 , одређене су на основу мерења загађивача (транспорт путничких и јавних возила) на различитим локацијама у урбаној средини, Слика 5.3. Добијене тренутне вредности у свакој мерној тачки су временски усредњене и инкорпориране у једначину одржања концентрације CO_2 (5.8).

5.5. Нумерички модел

5.5.1 Метода коначних запремина

У овој дисертацији математички модел је апроксимативно решен нумеричком методом коначних запремина (*finite volume method* – FVM, енг.). Једначине написане у облику методе коначних запремина по дефиницији представљају законе одржања.

5.5.2 Избор мреже

Креирање нумеричке мреже је урађено методом исечених ћелија (Прилог 5) која је доступна у програму *CHAM Phoenix* под називом PARSOL. Ова опција омогућава веома лако и ефикасно креирање мреже код комплексних геометрија.

5.5.3 Избор итеративног поступка

Систем диферентних једначина решаван је применом методе итерације линија-по-линију. Метода итерације линија-по-линију састоји се у решавању диферентних једначина коначних запремина дуж једне линије методом *Томасовог* алгоритма или тридијагоналног матричног алгоритма (ТДМА), при чему се вредности променљиве Φ у суседним чворовима који не припадају тој линији сматрају познатим.

5.5.4 Диферентна шема

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, енг.); узводна диферентна шема (*Up-wind Difference Scheme* – UDS, енг.), и хибридна диферентна шема (*Hybrid Difference Scheme* – HDS, енг.).

Вредност зависне променљиве у датој ћелији може бити одређена на основу низводне и једне или две узводне вредности. Први приступ интерполацији је да је вредност зависно променљиве на страници једнака аритметичкој средњој вредности у суседним чворовима, што представља приступ централне диферентне шеме, CDS:

$$\Phi_{cf} = \frac{1}{2}(\Phi_c + \Phi_n) \quad (5.33)$$

Ова шема је погодна за ниске вредности Пеклетових бројева, али у регионима високих вредности Пеклетових бројева даје нереалне (неограничене) вредности. Из

тих разлога је развијена узводна диферентна шема, UDS. За њу је претпостављено да је вредност зависне променљиве на страници ћелије иста као у узводном чвору:

$$\Phi_{cf} = \Phi_u \quad (5.34)$$

Ова шема је безусловно ограничена и веома стабилна, али има велику нумеричку дифузивност када је струјање под углом у односу на мрежу. Из тих разлога се најчешће користи хибридна диферентна шема HDS, која узима добре особине CDS и UDS, у односу на вредност Пекелтовог броја у датој ћелији.

Хибридна диферентна шема усвојена је за све симулације у овој дисертацији. Коришћена је варијанта хибридне диферентне шеме која при ниским вредностима Пекелтових бројева функционише у моду централне диферентне шеме, а при високим вредностима Пекелтових бројева функционише са доприносом узводне диферентне шеме до 75%. Тачан допринос узводне диферентне шеме зависи од локалне вредности Пекелтовог броја у свакој ћелији прорачунског домена, али због стабилности решења при итеративном поступку, не прелази горе поменуто вредност од 75%.

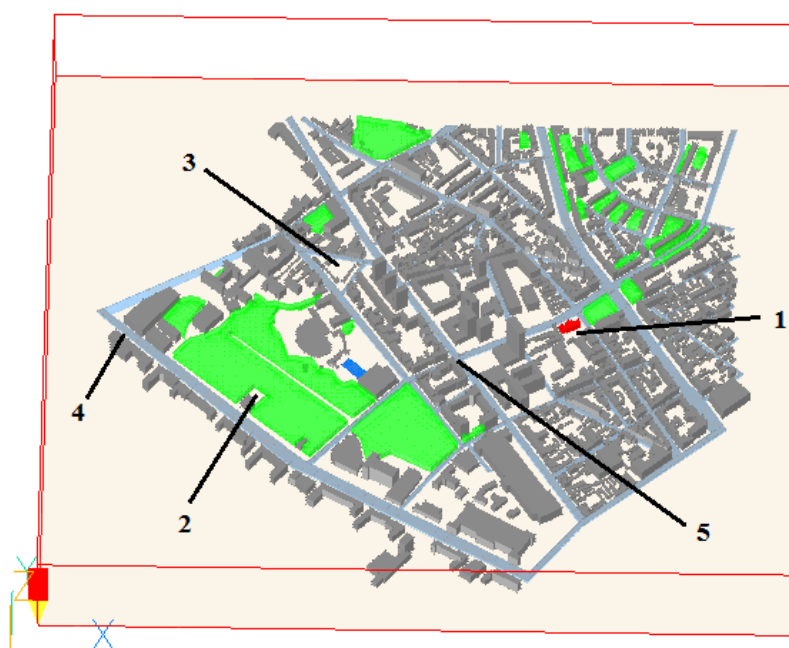
5.5.5 Софтвер PHOENICS CHAM

За нумерички прорачун применом методе коначних запремина коришћен је комерцијални софтвер CHAM *Phoenix*, што представља акроним пуног назива софтвера *Parabolic, Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series* [120]. Диферентне једначине коначних запремина формирају систем алгебарских линеарних једначина, са непознатим вредностима зависно променљиве величине ϕ . Систем има онолико једначина колико има чворова, међутим, задавањем граничних услова, систем бива редукован на број унутрашњих чворова. Као што је већ напоменуто, граничне вредности ϕ_B могу бити елиминисане из система, коришћењем наведених начина задавања граничних услова који су описани у овој дисертацији. Овај софтвер користи методу итерације линија-по-линију.

Одабране градске локације 1-5 (1. Репрезентативни школски објекат -44°48'37.4"N 20°28'42.3"E, 2. Ташмајдански парк - 44°48'30.9"N 20°28'12.4"E, 3. Палилулска пијаца - 44°48'41.7"N 20°28'20.8"E, 4 Улица Булевар краља Александра у близини парка - 44°48'36.5"N 20°27'58.9"E, 5. Раскрсница улица Старине Новака и Краљице Марије -

44°48'34.1"N 20°28'31.2"E) на којима су рађена детаљна мерења означени су на тродимензионалном моделу приказаном на слици 5.5. На бази резулата добијених нумеричком симулацијом биће анализиран утицај ефеката термичког острва на потрошњу енергије у зградама и спољашњи топлотни комфор.

Зелена инфраструктура (паркови) означена је зеленом бојом, тамносивом су означени објекти, путеви су означени светлосивом бојом, базен плавом бојом, а зграда Високе текстилне школе за дизајн, технологију и менаџмент, где су рађена мерења током целог периода истраживања обележена је црвеном бојом.



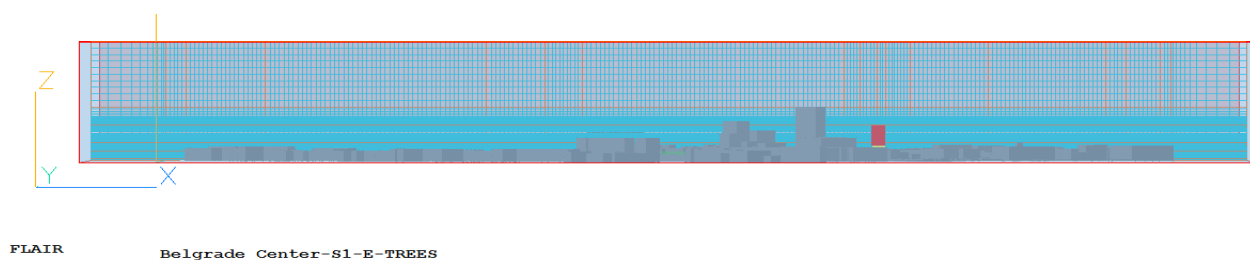
Belgrade Center

Слика 5.5 Тродимензионални нумерички модел

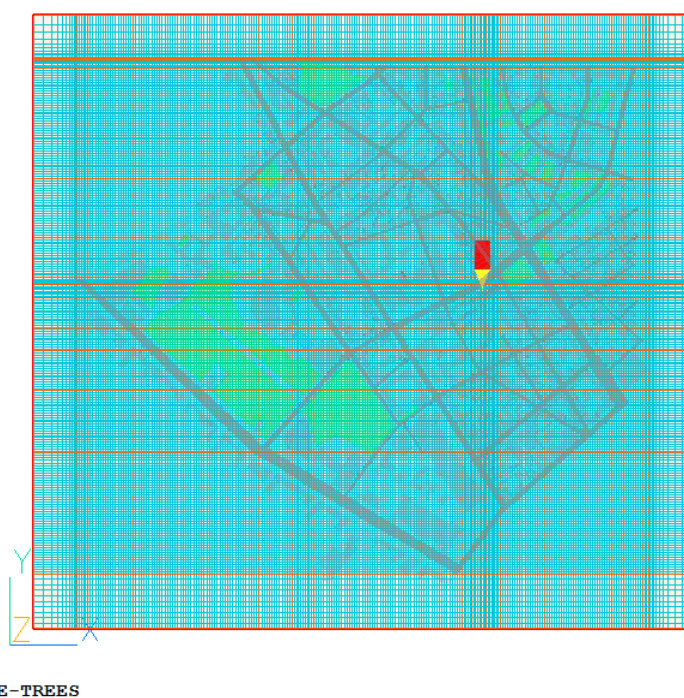
Након креирања геометрије модела, потребно је дефинисати термофизичка својства материјала, граничне услове и нумеричку мрежу прорачунског домена. Број ћелија прорачунске мреже се подешава тако да мрежа буде гушћа око површина (зграда, улица, паркова) који су предмет истраживања у овом раду, како би струјање у непосредној близини око зграда било одређено са задовољавајућом тачношћу. Прорачунска мрежа је приказана на сликама 5.6 и 5.7.

Графички приказ тока конвергенције је приказан на Слици 5.8. Променљиве (Variable) за унапред одабрану ћелију приказане су различитим бојама. На левој

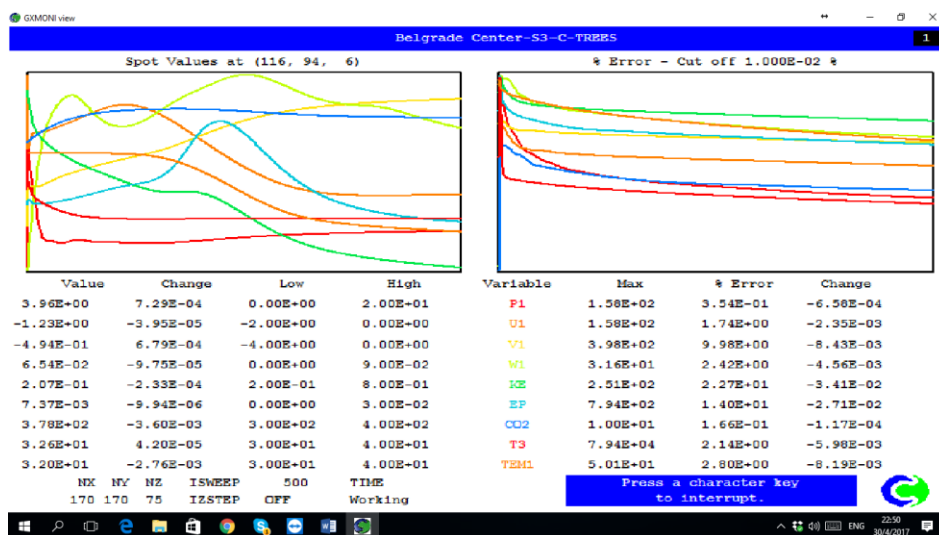
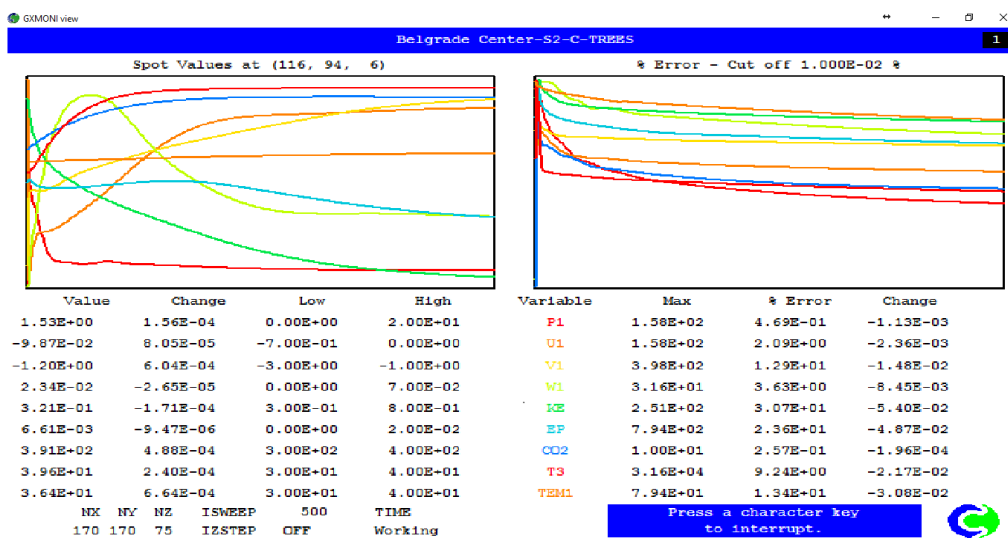
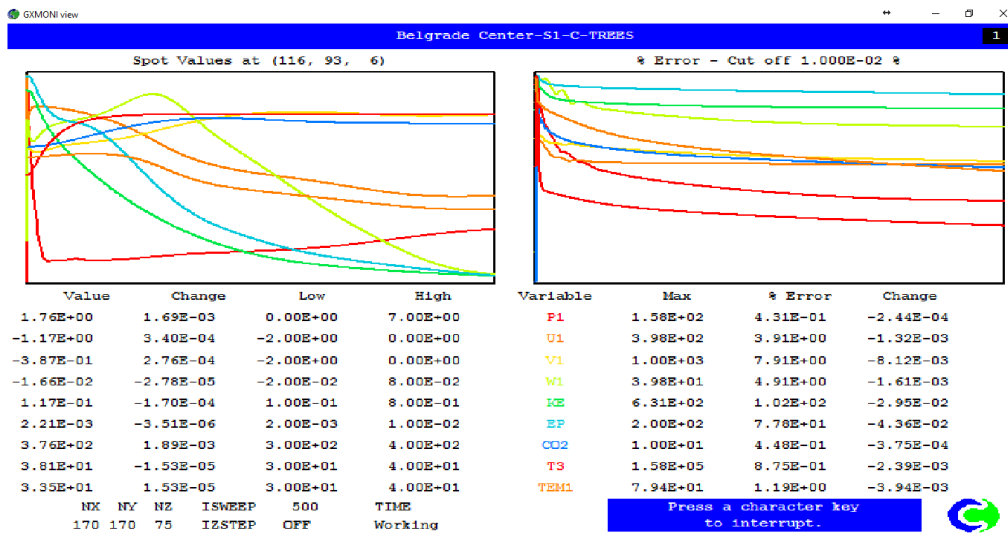
страни слике (*Spot Value*) приказане су тренутне вредности (*Value*) и промене између две узастопне итерације (*Change*) сваког параметра, као и њихове минималне и максималне вредности (*Low, High*). На десној страни слике приказан је ток конвергенције сваког параметра у комплетном интеграционом домену са дефинисаном максималном грешком (*Max*), грешком у датој итерацији (*%Error*) и промена грешке између две узастопне итерације (*Change*). Основна визуелна контрола конвергенције решења током нумеричког прорачуна је да се на левом екрану криве за све параметре стабилизују, а да криве на десном екрану имају опадајући карактер. Оба критеријума имају велику важност приликом прорачуна.



Слика 5.6 Нумеричка мрежа у $x - z$ равни



Слика 5.7 Нумеричка мрежа у $x - y$ равни, 1,85 метара изнад нивоа тла



Слика 5.8 Графички приказ тока конвергенције за случајеве S1-C, S2-C и S3-C

6. Резултати нумеричких симулација

Нумеричке симулације су урађене 5. јула 2015. године, један од два најтоплија дана за три различита периода дана:

1. Случај S1 који обухвата период од 8 до 9 сати,
2. Случај S2 који обухвата поподневни период од 14 до 15 сати,
3. Случај S3 који обухвата предвечерњи део дана, то јест период од 18 до 19 часова.

На основу нумеричких симулација добијени су подаци о просторном распореду амбијенталне температуре ваздуха, радијантне температуре ваздуха, брзине струјања ваздуха, просторном распореду парцијалног притиска водене паре и концентрацији угљен-диоксида за посматрану градску област. На основу ових података, за све локације израчунате вредности интензитета термичког острва и универзалног термичког климатског индекса – и на онима на којима су рађена и на онима на којима нису рађена експериментална метеоролошка мерења.

6.1. Анализа утицаја финоће мреже

Анализа утицаја финоће мреже (grid independence study, енг.) урађена је за случај 1, за пет нумеричких мрежа које су по финоћи (броју коначних запремина) сврстане у следеће случајеве:

- S1-A који се састоји од 430.000 коначних запремина
- S1-B који се састоји од 1.232.622 коначних запремина
- S1-C који се састоји од 2.167.500 коначних запремина
- S1-D који се састоји од 3.244.032 коначних запремина
- S1-E који се састоји од 7.161.165 коначних запремина

У табелама 6.1-6.5. приказане су вредности амбијенталне температуре ваздуха, радијантне температуре ваздуха, брзине струјања ваздуха, парцијалног притиска водене паре и концентрација угљен-диоксида на пет контролних места, добијени нумеричким симулацијама након 500 итерација. Контролна места су се подударала са местима на којим су рађена експериментална мерења неведених метеоролошких величина. Графички приказ резултата добијених нумеричким симулацијама за пет, по густини нумеричке мреже различитих случајева приказан је на Слици 6.1. С обзиром на то да је просечна висина на којој су рађена експериментална мерења метеоролошких величина била 1,85 метара, резултати нумеричких симулација приказани су баш за хоризонтну раван на овој висини.

Табела 6.1 Вредности посматраних параметара за случај S1-A

No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]
1	Околина школске зграде	31,35	38,55	1,41	1,8	374
2	Ташмајдански парк	30,60	31,75	0,45	4,73	365
3	Палилулска пијаца	35,68	35,54	0,80	0,86	366
4	Булевар краља Александра	32,27	40,04	1,61	1,45	418
5	Угао 27. марта и Старине Новака	36,45	42,80	0,86	-1,22	478
Средња вредност (целог подручја)		34,98	34,86	0,91	0,93	370

Табела 6.2 Вредности посматраних параметара за случај S1-B

No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]
1	Околина школске зграде	32,25	38,12	1,42	1,42	372
2	Ташмајдански парк	30,42	32,13	0,76	0,76	365
3	Палилулска пијаца	35,36	35,45	1,21	1,21	369
4	Булевар краља Александра	33,78	39,47	1,25	1,81	407
5	Угао 27. марта и Старине Новака	36,99	44,64	0,40	-1,59	512
Средња вредност (целог подручја)		35,35	35,79	0,98	1,18	369

Табела 6.3 Вредности посматраних параметара за случај S1-C

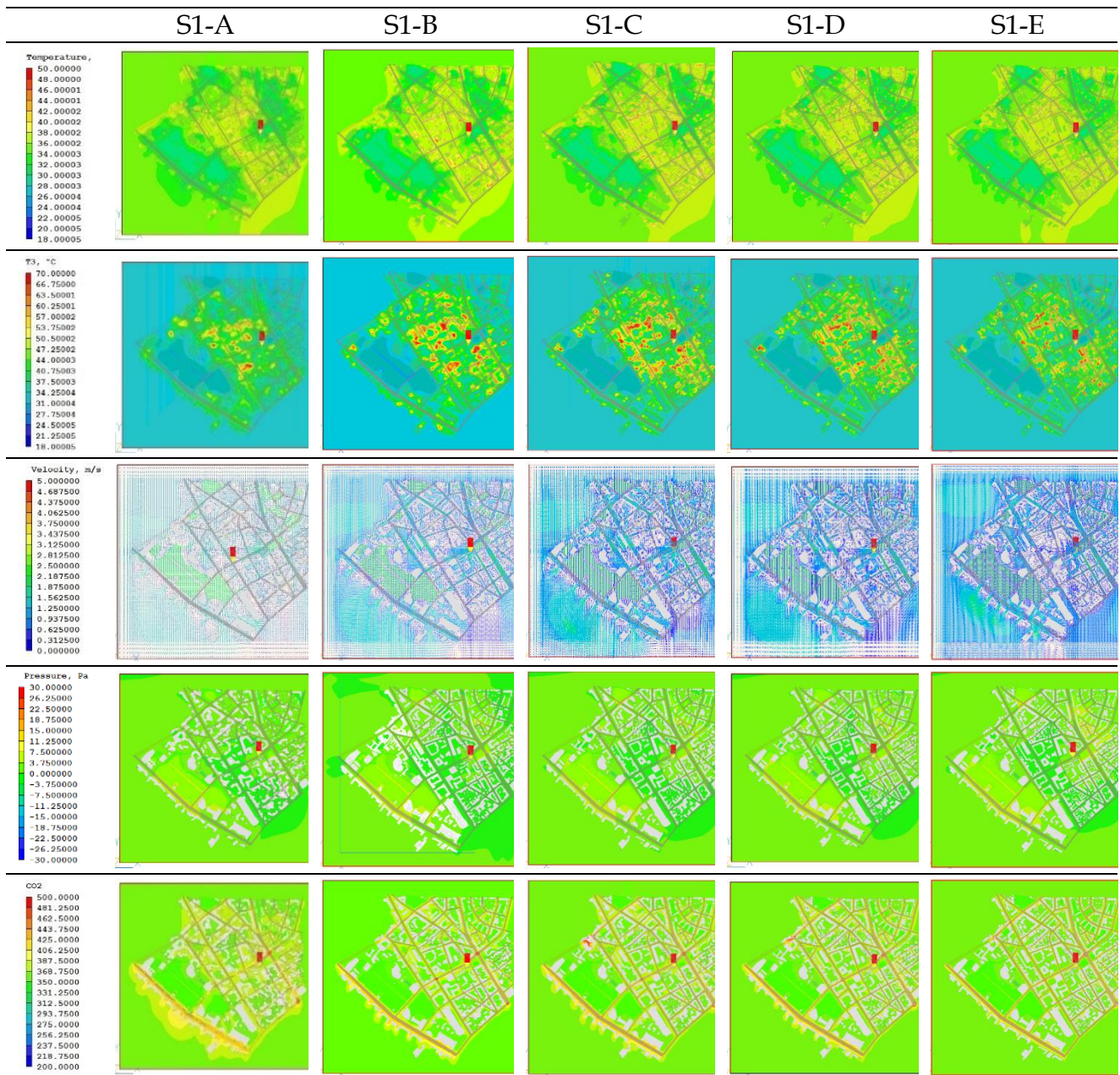
No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]
1	Околина школске зграде	32,00	38,07	1,40	2,33	371
2	Ташмајдански парк	30,29	32,04	0,73	5,86	365
3	Палилулска пијаца	35,20	35,08	1,14	1,44	367
4	Булевар краља Александра	33,62	39,18	1,14	1,75	403
5	Угао 27. марта и Старине Новака	36,90	44,50	0,38	-1,53	505
Средња вредност (целог подручја)		35,22	35,73	0,91	1,12	369

Табела 6.4 Вредности посматраних параметара за случај S1-D

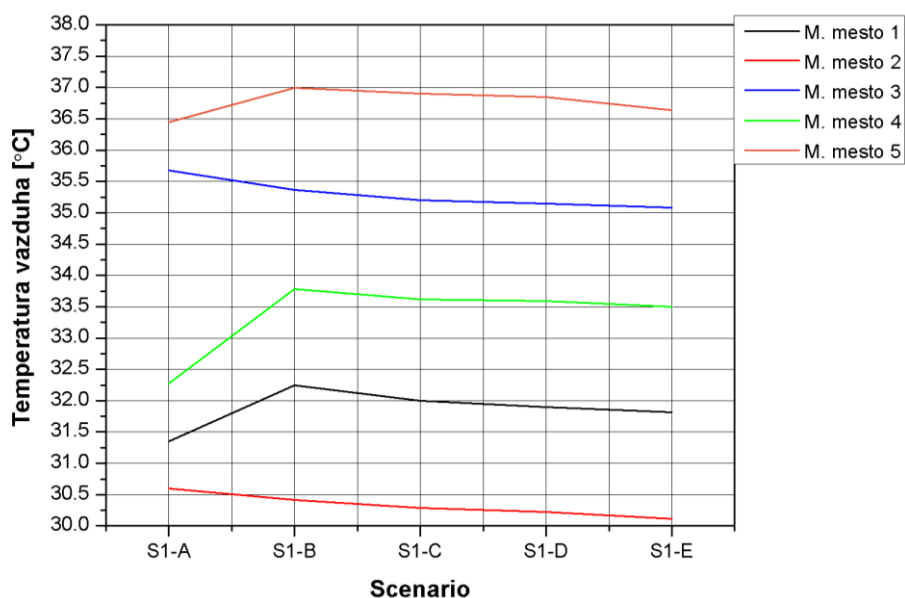
No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]
1	Околина школске зграде	31,90	37,60	1,38	3,00	371
2	Ташмајдански парк	30,22	31,97	0,70	6,15	365
3	Палилулска пијаца	35,15	34,82	1,09	1,51	367
4	Булевар краља Александра	33,59	38,74	1,08	1,46	402
5	Угао 27. марта и Старине Новака	36,85	44,30	0,32	-1,32	501
Средња вредност (целог подручја)		35,16	35,69	0,90	1,08	369

Табела 6.5 Вредности посматраних параметара за случај S1-E

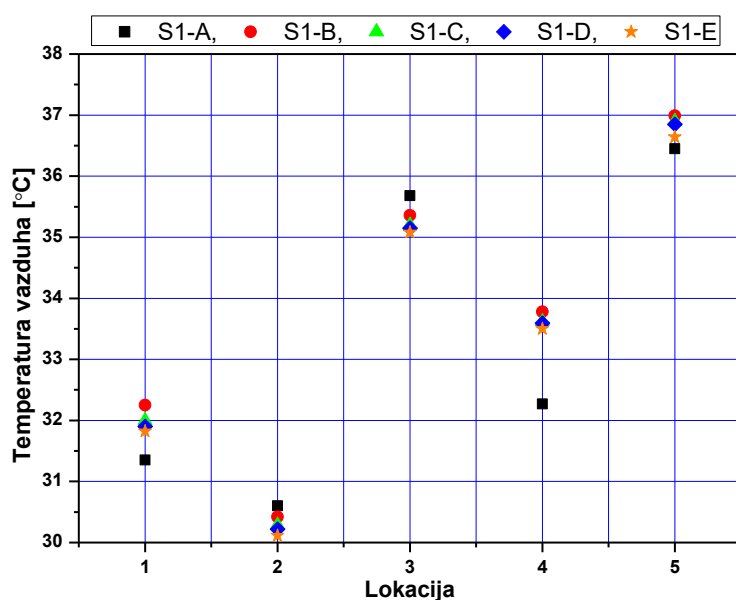
No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]
1	Околина школске зграде	31,82	36,92	1,39	2,61	370
2	Ташмајдански парк	30,11	31,88	0,67	6,76	365
3	Палилулска пијаца	35,08	34,41	1,04	1,41	366
4	Булевар краља Александра	33,50	38,12	1,04	1,39	401
5	Угао 27. марта и Старине Новака	36,64	44,16	0,32	-1,31	499
Средња вредност (целог подручја)		35,1	35,52	0,87	1,02	368



Слика 6.1 Поређење добијених резултата за случај 1



Слика 6.2 Вредности прорачунатих температура ваздуха за различите густине мреже



Слика 6.3 Испитивање утицаја мреже на резултат

На основу анализе свих добијених резултата за даљи прорачун и истраживање усвојена је мрежа S1-C. Основни разлог за одабир ове мреже је што се у односу на мреже S1-D и S1-E резултати разликују мање од 1%, а време потребно за конвергенцију решења је знатно краће, док су разлике у резултатима занемарљиво мале, као што је истакнуто.

6.2 Преглед и анализа резултата

У табелама 6.6-6.8 приказани су резултати који су добијени нумеричким симулацијама за различите временске периоде ујутру (S1), поподне (S2) и увече (S3), користећи мрежу са 2 167 500 коначних запремина. Поред ових вредности, у табелама су приказане и вредности индекса UTCI и вредност топлотног оптерећења за различите категорије људи о којима је детаљно објашњено у поглављу 3.

Табела 6.6 Вредности параметара за случај S1-C на висини 1,85 метара.

No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]	UTCI [°C]	Топлотно оптер. [a/b]*
1	Околина школске зграде	32,00	38,07	1,4	2,33	371	32,9	3/3
2	Ташмајдански парк	30,29	32,04	0,73	5,86	365	29,9	4/4
3	Палилулска пијаца	35,20	35,08	1,14	1,44	367	35,1	3/2
4	Булевар краља Александра	33,62	39,18	1,14	1,75	403	34,6	3/3
5	Угао 27. марта и Старине Новака	36,90	44,5	0,38	-1,53	505	39,0	2/2

*a/b – категорија људи објашњена у поглављу 3

Табела 6.7 Вредности параметара за случај S2-C на висини 1,85 метара

No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]	UTCI [°C]	Топлотно оптер. [a/b]
1	Околина школске зграде	34,93	37,97	0,50	1,24	372	34,5	3/3
2	Ташмајдански парк	33,45	34,09	0,64	3,08	365	32,3	3/3
3	Палилулска пијаца	36,19	34,71	2,23	1,93	372	34,9	3/3
4	Булевар краља Александра	36,31	39,17	1,75	0,96	389	36,2	3/2
5	Угао 27. марта и Старине Новака	36,83	44,91	0,99	-0,42	512	38,1	2/2

Табела 6.8 Вредности параметара за случај S3-C на висини 1,85 метара

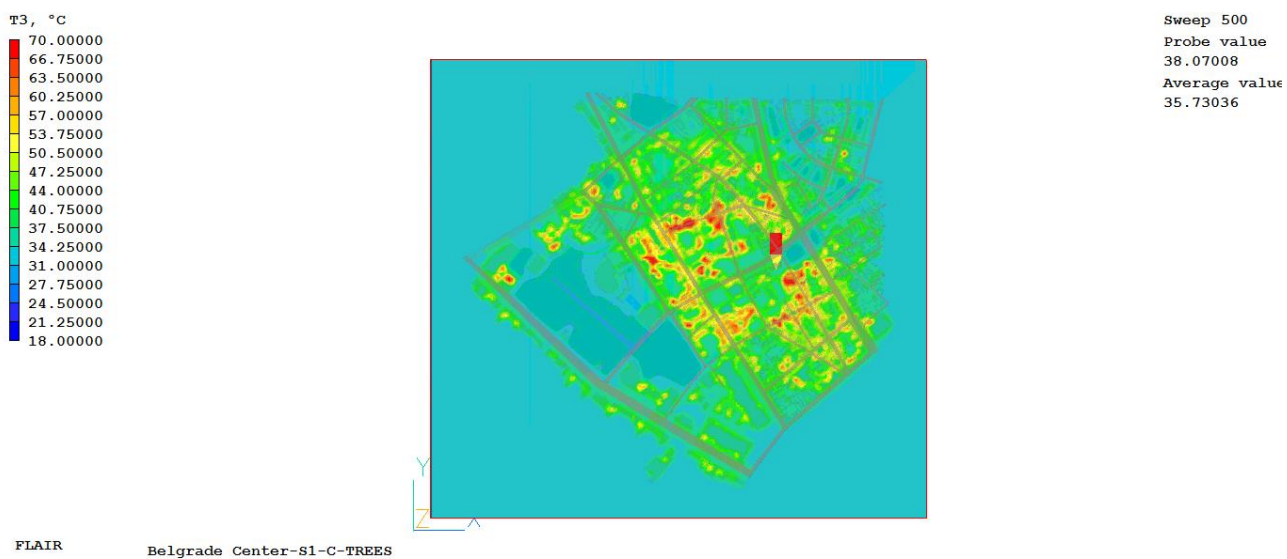
No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]	UTCI [°C]	Топлотно оптер. [a/b]
1	Околина школске зграде	29,17	32,03	1,79	4,67	368	28,0	4/4
2	Ташмајдански парк	28,38	29,84	1,00	8,19	365	27,2	4/4
3	Палилулска пијаца	33,91	32,06	1,72	3,84	372	32,4	3/3
4	Булевар краља Александра	30,63	32,17	1,06	2,71	395	29,73	4/4
5	Угао 27. марта и Старине Новака	35,04	33,40	1,36	2,16	489	33,9	3/3

На сликама 6.4-6.18 приказане су вредности добијене нумеричким симулацијама за креиран нумерички модел на висини од 1,85 метара за поље температуре ваздуха, брзине струјања ваздуха, радијантне температуре ваздуха, концентрације угљен-диоксида и парцијалног притиска водене паре, када је рађено и експериментално

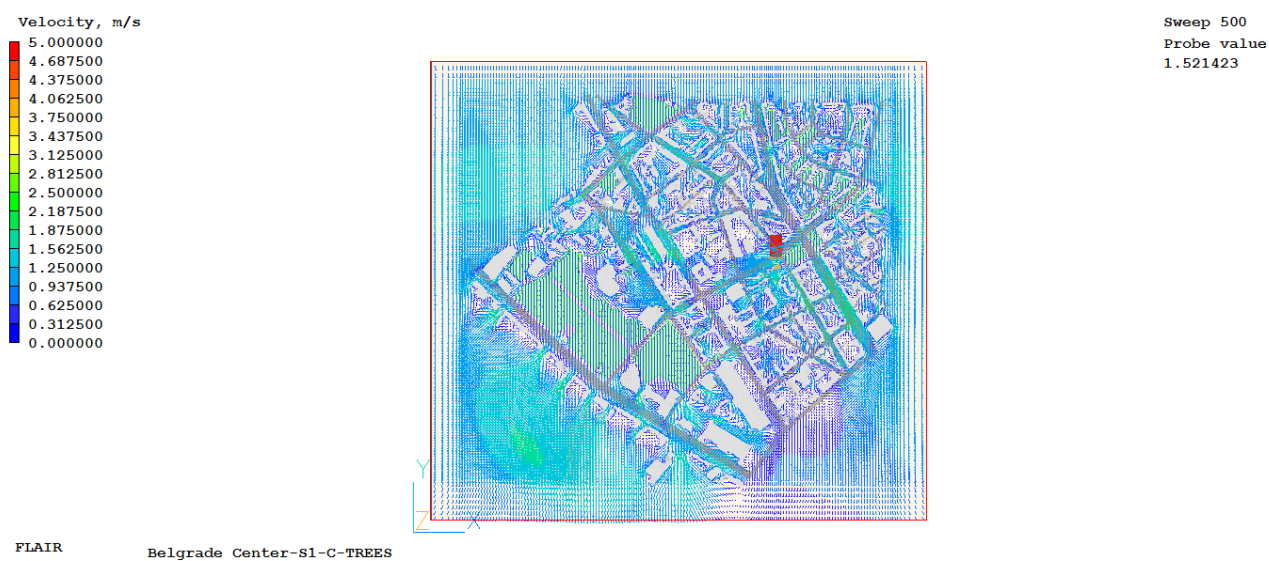
мерење на свим локацијама како би се вредности нумеричких симулација валидизовале. Приказани су резултати на примеру једног дана за три различита случаја. На сликама 6.4-6.8 приказане су вредности резултата које се односе за случај 1 (S1), ујутру од 08 до 09 часова и чије су вредности за 5 одабраних градских локација приказане у табели 6.6. На сликама 6.9-6.13 приказани су вредности резултата које су у вези са случајем 2 (S2), поподне од 14 до 15 часова и чије су вредности за 5 одабраних градских локација приказане у табели 6.7. На сликама 6.14-6.18 приказане су вредности резултата које су у вези са случајем 3 (S3), увече од 18 до 19 часова и чије су вредности за 5 одабраних градских локација приказане у табели 6.8.



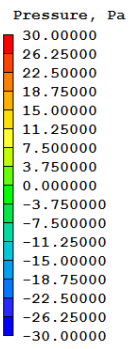
Слика 6.4 Поље температуре ваздуха на висини 1,85 метара за случај S1-C



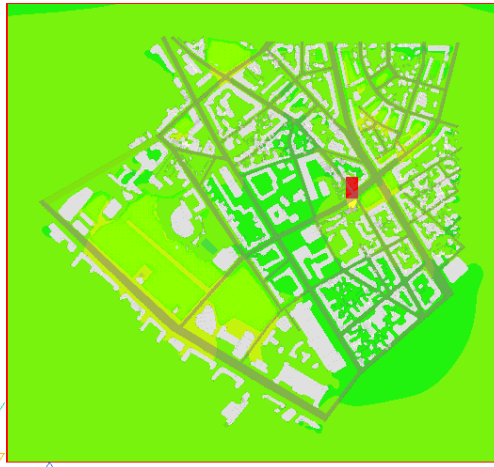
Слика 6.5 Поље радијантне температуре ваздуха на висини 1,85 метара за случај S1-C



Слика 6.6 Брзинско поље ваздуха на висини 1,85 метара за случај S1-C

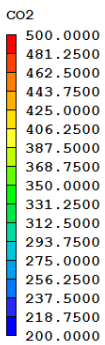


Sweep 500
 Probe value
 2.335015
 Average value
 1.129885



FLAIR Belgrade Center-S1-C-TREES

Слика 6.7 Поље парцијалног притиска водене паре на висини 1,85 метара за случај S1-C



Sweep 500
 Probe value
 371.4924
 Average value
 369.6520

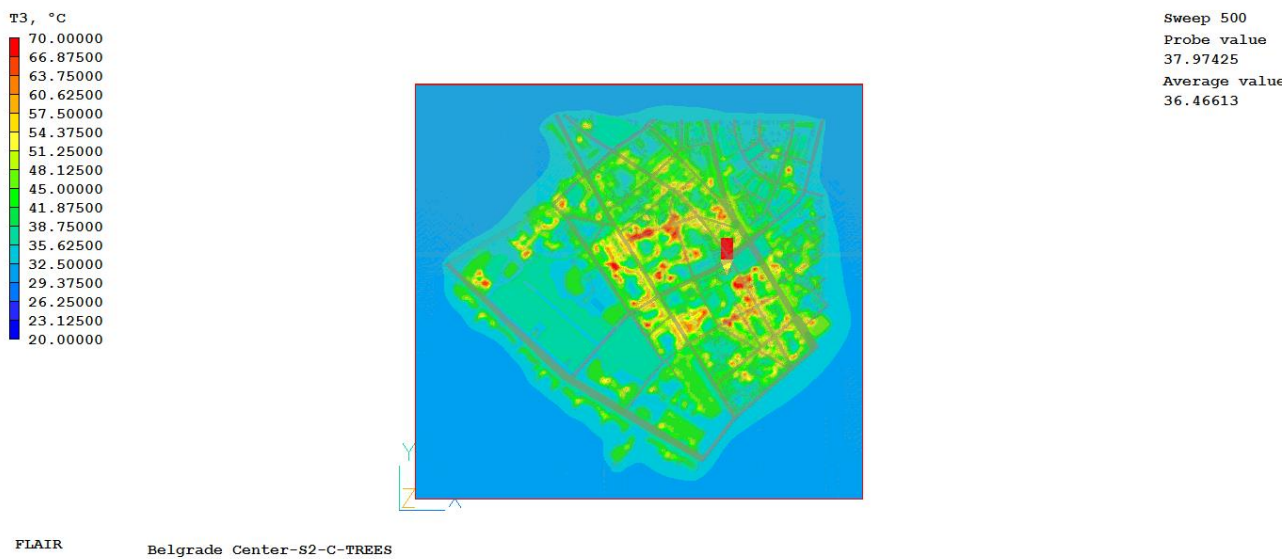


FLAIR Belgrade Center-S1-C-TREES

Слика 6.8 Поље концентрације угљен-диоксида у ваздуху на висини 1,85 метара за случај S1-C



Слика 6.9 Поље температуре ваздуха на висини 1,85 метара за случај S2-C

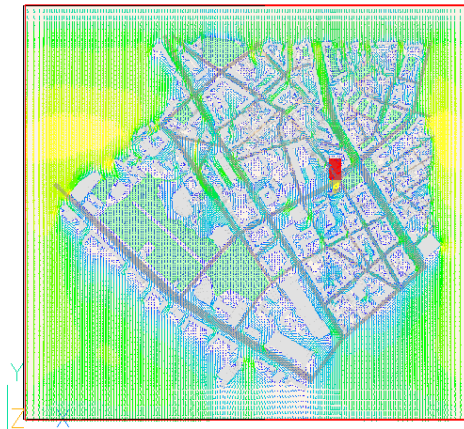


Слика 6.10 Поље радијантне температуре ваздуха на висини 1,85 метара за случај S2-C

Velocity, m/s

5.000000
4.687500
4.375000
4.062500
3.750000
3.437500
3.125000
2.812500
2.500000
2.187500
1.875000
1.562500
1.250000
0.937500
0.625000
0.312500
0.000000

Sweep 500
 Probe value
 1.244257



FLAIR Belgrade Center-S2-C-TREES

Слика 6.11 Брзинско поље ваздуха на висини 1,85 метара за случај S2-C

Pressure, Pa

30.00000
26.25000
22.50000
18.75000
15.00000
11.25000
7.500000
3.750000
0.000000
-3.750000
-7.500000
-11.25000
-15.00000
-18.75000
-22.50000
-26.25000
-30.00000

Sweep 500
 Probe value
 0.500419
 Average value
 1.057597



FLAIR Belgrade Center-S2-C-TREES

Слика 6.12 Поље парцијалног притиска водене паре на висини 1,85 метара за случај S2-C

CO2

500.0000
481.2500
462.5000
443.7500
425.0000
406.2500
387.5000
368.7500
350.0000
331.2500
312.5000
293.7500
275.0000
256.2500
237.5000
218.7500
200.0000

Sweep 500
 Probe value
 371.6214
 Average value
 368.9136



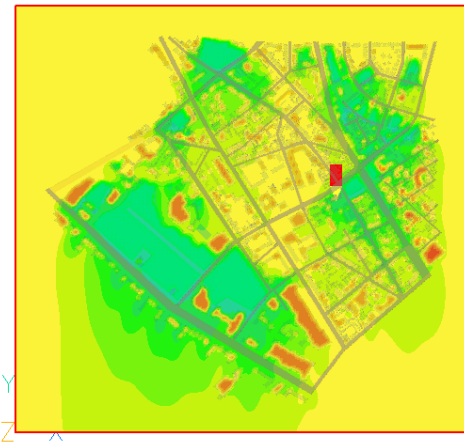
FLAIR Belgrade Center-S2-C-TREES

Слика 6.13 Поље концентрације угљен-диоксида у ваздуху на висини 1,85 метара за случај S2-C

Temperature, °C

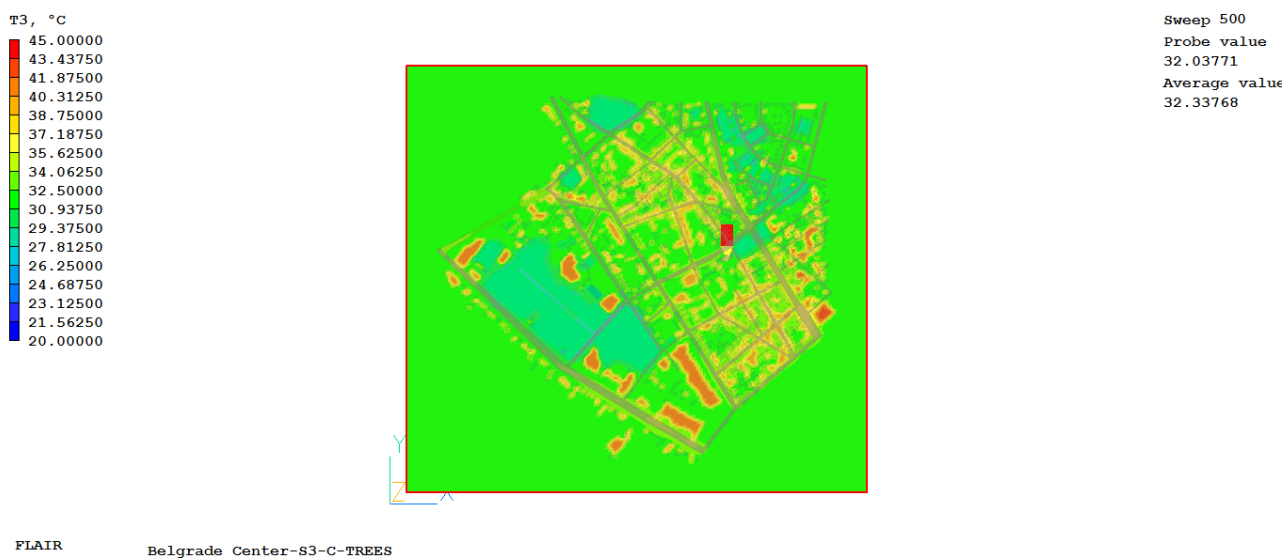
45.29996
43.59371
41.88747
40.18122
38.47497
36.76872
35.06248
33.35623
31.64998
29.94373
28.23749
26.53124
24.82499
23.11874
21.41249
19.70625
18.00000

Sweep 500
 Probe value
 29.11789
 Average value
 34.12555

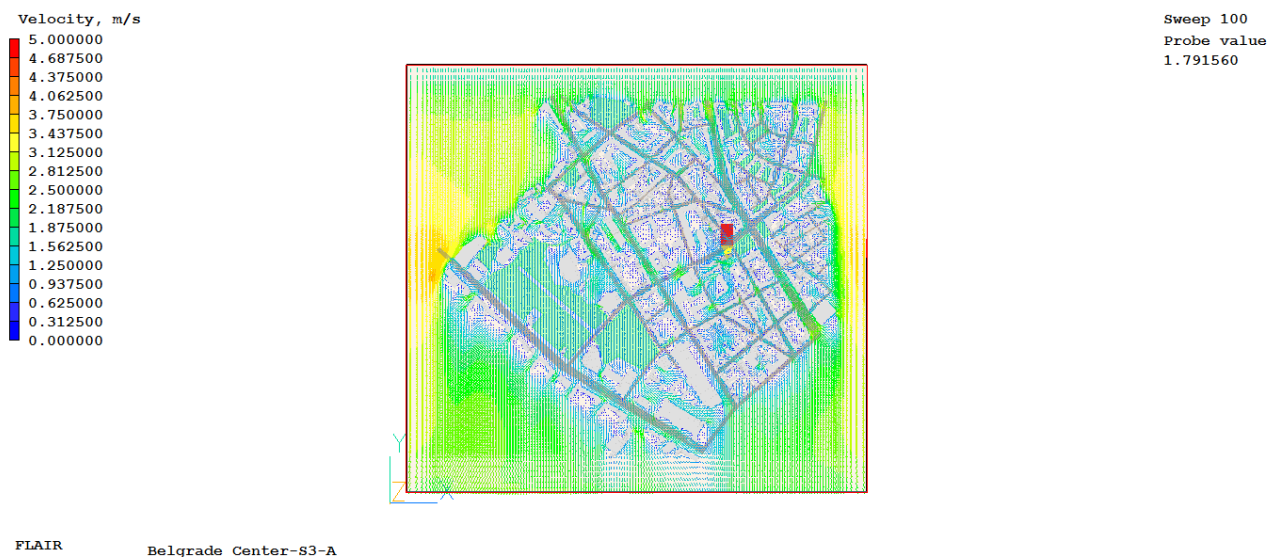


FLAIR Belgrade Center-S3-C-TREES

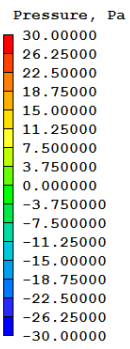
Слика 6.14 Поље температуре ваздуха на висини 1,85 метара за случај S3-C



Слика 6.15 Поље радијантне температуре ваздуха на висини 1,85 метара за случај S3-
C



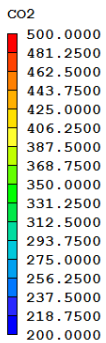
Слика 6.16 Брзинско поље ваздуха на висини 1,85 метара за случај S3-С



Sweep 500
 Probe value
 4.675974
 Average value
 2.732873

FLAIR Belgrade Center-S3-C-TREES

Слика 6.17 Поље парцијалног притиска водене паре на висини 1,85 метара за случај S3-C



Sweep 500
 Probe value
 368.1607
 Average value
 368.1332

FLAIR Belgrade Center-S3-C-TREES

Слика 6.18 Поље концентрације угљен-диоксида у ваздуху на висини 1,85 метара за случај S3-C

6.2.1 Валидација модела

Валидација тачности резултата бива рађена на основу релативне грешке која се одређује према изразу:

$$Error = \left| \frac{\Phi_{exp} - \Phi_{cfd}}{\Phi_{exp}} \right| \cdot 100 \quad (6.1)$$

где је:

Φ_{exp} - вредност физичког параметра на мерном месту добијена експерименталним путем,

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

У табели 6.9 дате су сумарне вредности релативне грешке нумеричких модела у поређењу са експерименталним подацима за температуру ваздуха, угљен-диоксид, као и прорачуната радијантна температура, у околини школске зграде. Критеријуми валидног модела су усвојени тако да релативна грешка за физичке параметре буде мања од 5%. Док је за радијантну температуру усвојено да релативна грешка буде мања од 10% из разлога што је та вредност добијена на основу мерења више параметара. У табелама су поља са мерним местима на којима вредности параметара не задовољавају задату вредност релативне грешке обојена црвеном бојом.

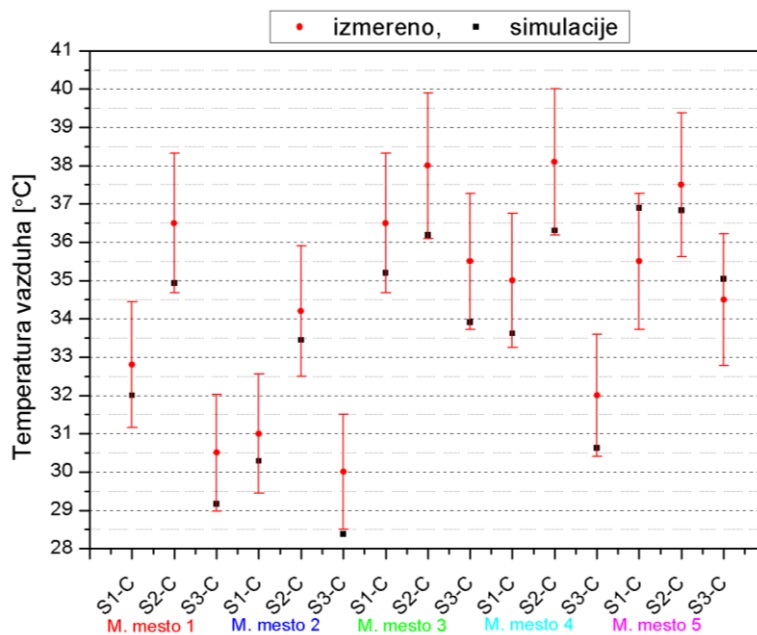
Табела 6.9 Сумарна табела релативних грешке модела за температуру ваздуха, концентрацију угљен-диоксида и радијантне температуре

Параметар	М. место	Симулирано			Измерено			Грешка		
		S1-C	S2-C	S3-C	S1-C	S2-C	S3-C	S1-C	S2-C	S3-C
T_a [°C]	1	32,00	34,93	29,17	32,8	36,5	30,5	2,4	4,3	4,4
	2	30,29	33,45	28,38	31,0	34,2	30,0	2,3	2,2	5,4
	3	35,20	36,19	33,91	36,5	38,0	35,5	3,6	4,8	4,5
	4	33,62	36,31	30,63	35,0	38,1	32,0	3,9	4,7	4,3
	5	36,90	36,83	35,04	35,5	37,5	34,5	-3,9	1,8	-1,6
CO_2 [ppm]	1	371	372	368	368	369	370	-0,8	-0,8	0,5
	2	365	365	365	368	369	368	0,8	1,1	0,8
	3	367	372	372	382	375	390	3,9	0,8	4,6
	4	403	389	395	412	400	400	2,2	2,7	1,3
	5	405	512	489	421	480	475	3,8	-6,7	-3,0
T_{mrt} [°C]	1	38,07	37,97	32,03	42,5	37,8	32,8	10,4	-0,5	2,4

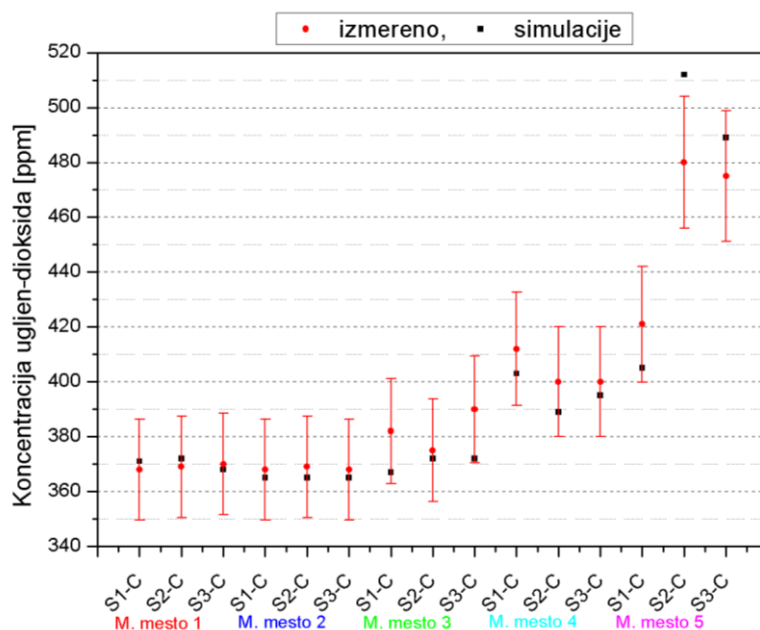
У овој дисертацији главни критеријум добијених нумеричких симулација јесте да вредности поља зависно променљивих у мониторинг тачкама буду стабилизоване и да провера тачности модела поређења са измереним вредностима одговарајућих величина на задатим мерним местима испуњава услов да релативна грешка буде мања од 5%.

На сликама 6.19 и 6.20 приказане су измерене и симулиране вредности спољашње температуре ваздуха и концентрације угљен-диоксида за одабране градске локације, као и опсег дозвољене релативне грешке, $\pm 5\%$. Верификација нумеричких резултата рађена је за сваку серију прорачуна и за све одабране локације. На сликама се види да је само по једна вредност и за једну локацију симулиране температуре и концентрације угљен-диоксида изван наведеног задатог опсега.

Закључује се да резултати нумеричких симулација, у поређењу са измереним резултатима, имају прихватљива одступања што је један од услова да овај модел буде коришћен за даљу анализу и прорачуне.



Слика 6.19 Валидација амбијенталне температуре ваздуха



Слика 6.20 Валидација вредности амбијенталне концентрације угљен-диоксида

Радијантна температура је мерена само у околини школске зграде. Детаљан начин прорачуна и вредности које је потребно измерити за прорачун радијантне температуре дати су у поглављу 4.5.

6.2.2 Анализа резултата

Анализом резултата добијених симулацијом и резултата мерених у руралној области произилазе следећи закључци: добијене вредности интензитета термичких острва за одабрану градску средину и за одабрани временски период највише су у вечерњим сатима, након заласка сунца где је његова средња вредност $9,5^{\circ}\text{C}$, у јутарњим сатима та вредност је $8,1^{\circ}\text{C}$, док је најнижа у поподневним када опадне до $4,8^{\circ}\text{C}$, за посматран дан; може бити јасно уочено да у пределима где има зелених површина, паркова, вредност интензитета термичких острва, тј. температуре ваздуха у тим деловима у којима нема зеленила, јесте нижа у односу на делове где су само зграде; на основу добијених резултата видљиво је да је амбијентална и радијантна температура у близини улица где је саобраћај фреквентнији, али и на местима где је већа густина зграда значајно виша него у осталим деловима града, што значи да у овим деловима интензитет термичких острва има највећу вредност.

На сликама 6.8, 6.13 и 6.18 може бити уочено да је концентрација угљен-диоксида значајно виша у непосредној близини путева. С обзиром на то да је познато да је

угљен-диоксид тежи од ваздуха (молекулална маса угљен-диоксида је 44 kg kmol^{-1} док је ваздуха 28 kg kmol^{-1}) он се сматра као један од главних узрока повишене температуре, јер не допушта да вишак топлоте оде са Земље назад у атмосферу. То је још један од разлога зашто је температура ваздуха, али и радијантна температура у близини путева, виша за неколико степени у односу на друге делове града.

Анализом добијених резултата потврђена је потреба али и предност коришћења детаљне методологије компјутерских симулација за одређивање поља температуре, радијантне температуре, брзине струјања и концентрације угљен-диоксида у комплексној градској средини. Поред тога, лако можемо да утврдимо индекс удобности или квалитета градске средине за живот и рад људи. Исто тако, може бити закључено да је потребан шири приступ анализе UTCI индекса за шта су потребна даља истраживања као и укључивање више различитих улазних параметара: метаболизам, одевеност, време проведено у спољашњој средини. Овакве симулације у значајној мери могу да нам дају прецизније метеоролошке податке које можемо користити за прорачун потребне енергије за хлађење у зградама. Предност коришћења компјутерских симулација за одређивање интензитета термичког острва и анализу могућности за смањење потребне енергије за хлађење у зависности од урбане форме града, јасна је и она ће бити посебно обрађена у поглављу 7 овог рада.

6.3 Утицај вегетације на интензитет термичких острва

Како бисмо показали утицај дрвећа на интензитет термичких острва урађена су три додатне симулације за већ дефинисане случајеве са истим граничним условима које смо урадили у предходној анализи, само што, у деловима где се налазило дрвеће, сада се налази само травната површина (без дрвећа–NO TREES). У табелама 6.10-6.12 зеленом бојом су приказане вредности симулација у случају када је било дрвећа.

Табела 6.10 Вредности посматраних параметара за случај S1-C-NO TREES

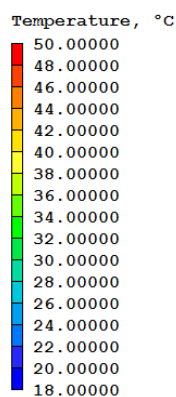
No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]	UTCI [°C]	Топлотно оптер. [a/b]
1	Околина школске зграде	35,78	39,15	0,74	-0,38	373	36,7	3/2
		32,00	38,07	1,4	2,33	371	32,9	3/3
2	Ташмајдански парк	32,14	32,75	0,34	1,81	365	31,6	4/3
		30,29	32,04	0,73	5,86	365	29,9	4/4
3	Палилулска пијаца	36,25	35,00	0,92	0,64	368	36,1	3/2
		35,20	35,08	1,14	1,44	367	35,1	3/2
4	Булевар краља Александра	36,54	39,05	0,65	0,17	404	37,3	3/2
		33,62	39,18	1,14	1,75	403	34,6	3/3
5	Угао 27. марта и Старине Новака	36,65	46,14	0,34	-0,97	497	39,1	2/2
		36,90	44,5	0,38	-1,53	505	39,0	2/2

Табела 6.11 Вредности посматраних параметара за случај S2-C-NO TREES

No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]	UTCI [°C]	Топлотно оптер. [a/b]
1	Околина школске зграде	35,86	38,58	1,35	-0,20	368	35,7	3/2
		34,93	37,97	0,50	1,24	372	34,5	3/3
2	Ташмајдански парк	33,95	34,29	1,19	2,17	365	32,9	3/3
		33,45	34,09	0,64	3,08	365	32,3	3/3
3	Палилулска пијаца	36,29	34,90	2,36	1,24	372	35,0	3/3
		36,19	34,71	2,23	1,93	372	34,9	3/3
4	Булевар краља Александра	36,30	38,98	1,91	0,79	383	36,1	3/2
		36,31	39,17	1,75	0,96	389	36,2	3/2
5	Угао 27. марта и Старине Новака	36,33	45,89	1,49	0,23	512	38,0	2/2
		36,83	44,91	0,99	-0,42	512	38,1	2/2

Табела 6.12 Вредности посматраних параметара за случај S3-C-NO TREES

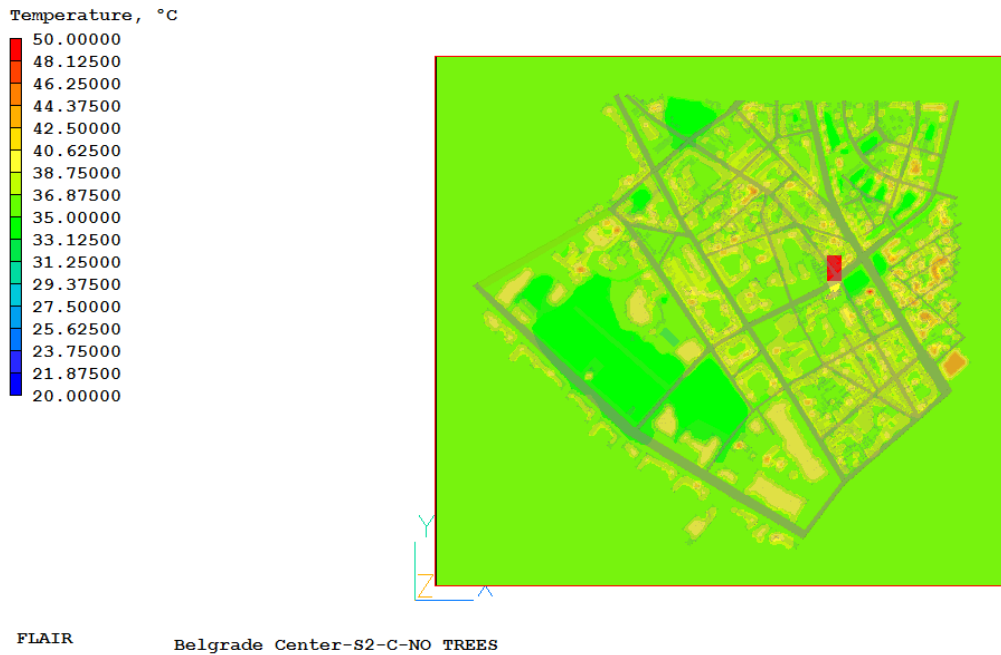
No	Локација	T_a [°C]	T_{mrt} [°C]	v_a [m/s]	p_v [hPa]	CO_2 [ppm]	UTCI [°C]	Густина оптер. [a/b]
1	Околина школске зграде	34,39	32,26	1,21	1,26	371	33,1	3/3
		29,17	32,03	1,79	4,67	368	28,0	4/4
2	Ташмајдански парк	33,05	30,40	1,29	2,30	365	31,3	4/3
		28,38	29,84	1,00	8,19	365	27,2	4/4
3	Палилулска пијаца	35,30	32,20	1,09	1,53	372	33,9	3/3
		33,91	32,06	1,72	3,84	372	32,4	3/3
4	Булевар краља Александра	35,76	32,46	2,27	1,15	390	34,2	3/3
		30,63	32,17	1,06	2,71	395	29,73	4/4
5	Угао 27. марта и Старине Новака	35,46	33,64	0,82	1,09	496	34,4	3/3
		35,04	33,40	1,36	2,16	489	33,9	3/3



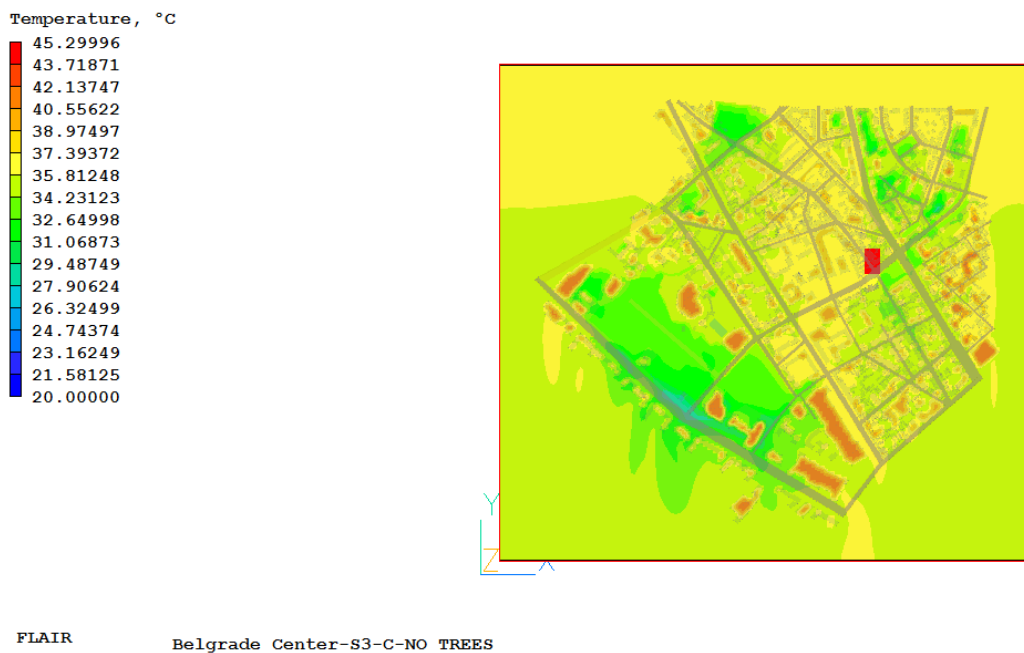
FLAIR

Belgrade Center-S1-C-NO TREES

Слика 6.21 Поље температуре ваздуха на висини 1,85 метара за случај без дрвећа S1-C-NO TREES



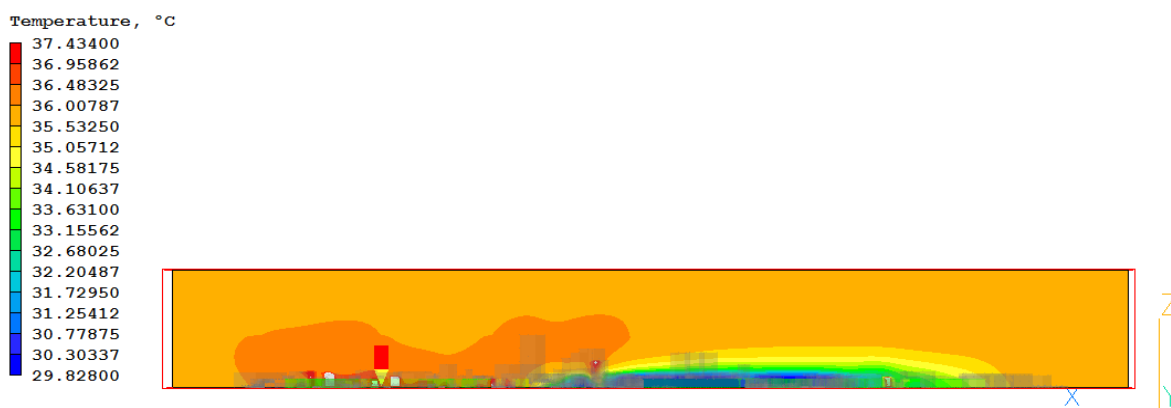
Слика 6.22 Поље температуре ваздуха на висини 1,85 метара за случај без дрвећа S2-C-NO TREES



Слика 6.23 Поље температуре ваздуха на висини 1,85 метара за случај без дрвећа S3-C-NO TREES

На основу свега наведеног може бити закључено да дрвеће у великој мери утиче на температуру ваздуха у градској средини, а самим тим и на интензитет термичких острва и енергетске потребе зграда који се у том делу налазе. На основу нумеричких симулација, са и без дрвећа у градској средини, може бити закључено да присуство дрвећа у урбаној средини значајно утиче на температуру у околини паркова и већих површина на којима се налази дрвеће. На основу слика 6.21-6.23 детаљном анализом можемо закључити да је средња температура ваздуха за посматрану градску област виша у интервалу од 1,5°C до 3°C у зависности од посматраног доба дана. Поред повишене температуре коефицијент топлотног комфора за већину посматраних локација се повећао за један, што је приказано у табелама 6.10-6.12. Значај великих површина под вегетацијом може бити виђен и на слици 6.24, вертикални пресек ($y = const.$) у делу града где се налази Ташмајдански парк.

На слици 6.24 јасно је приказана разлика између две структуре градске средине коју чине зграде и други слични објекти који имају велику топлотну апсорпцију и велику површину која је под вегетацијом. У делу града где се налазе само објекти, температура ваздуха је виша и ствара се термичко острво на нивоу града. То директно има за последицу повећање температуре у тим деловима града, што даље негативно утиче на спољашњи топлотни комфор, али и на већу потрошњу енергије за хлађење унутрашњости тих зграда. На посматраном домену градске области површина под вегетацијом заузима 8,5% укупне површине. У случају да немамо вегетацију, средња спољашња амбијентална температура посматраног домена повећава се од 2% ујутру до 4% у вечерњим сатима.

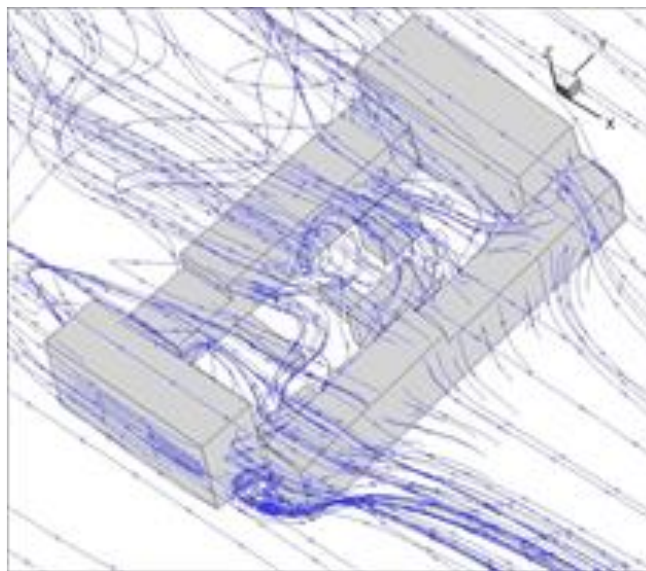


Слика 6.24 Расподела температуре ваздуха у вертикалном попречном пресеку ($y = const.$)

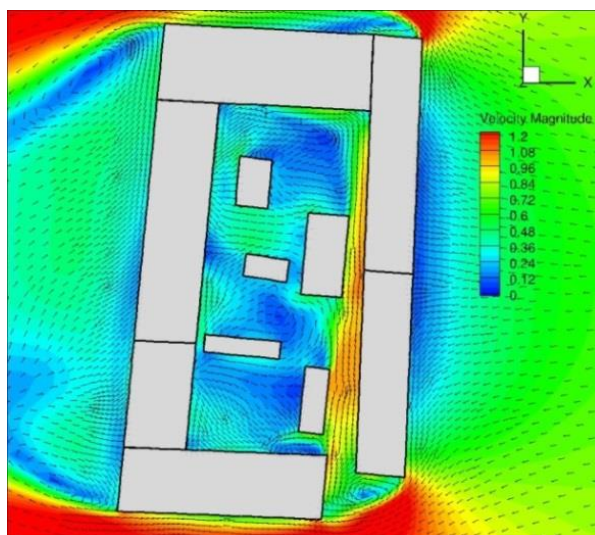
6.4 Утицај ветра на интензитет термичких острва

Имајући у виду добро подударање експерименталних и нумеричких резултата, на примеру затвореног блока зграда из посматране градске средине, који се налази у непосредној близини метеоролошког стуба који је постављен на школској згради, анализиран је утицај ветра на локалну вредност спољашње температуре ваздуха. Детаљном анализом резултата поља струјања унутар затвореног блока зграда, показано је да је негативни ефекат који доводи до повећања температуре у самим блоковима појава квазистационарних вртложних структура. Такође, показано је да је развој хоризонталних вртложних зона, узрокован присуством нижих објеката који се налазе у саставу затвореног блока зграда, што може бити виђено на слици 6.25. Њихово присуство интензивира пренос топлоте у близини нивоа земље, на тај начин што се при додиру ваздуха са омотачем зграде обавља конвективни пренос топлоте са зида на ваздух. Након тога, топлота добијена преносом са зида на ваздух бива даље преношена на површину отвора кавитета где се меша са долазећом хладном ваздушном струјом.

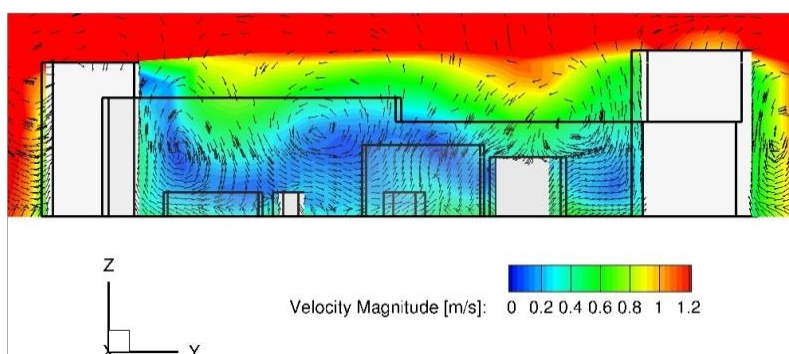
На сликама 6.25-6.27 приказане су појаве квазистационарних вртложних структура за случај S2-C.



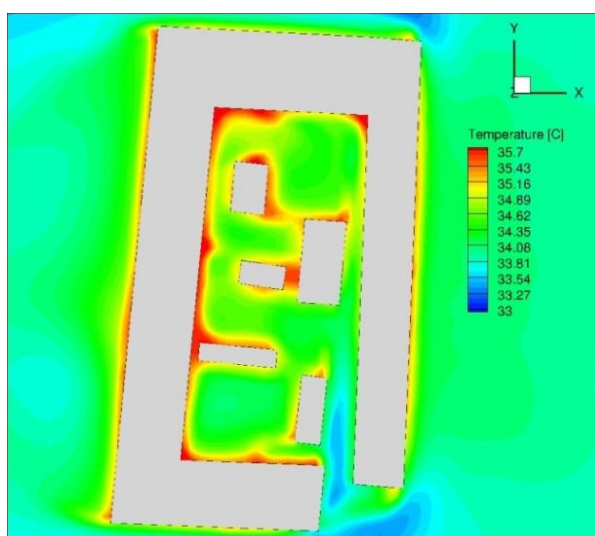
Слика 6.25 Струјнице брзине у близини блока зграде



Слика 6.26 Расподела брзине са векторима брзине у хоризонталном попречном пресеку блока зграде на висини од 1,8 метара ($z = \text{const.}$)



Слика 6.27 Расподела брзине са векторима брзине у средњем вертикалном попречном пресеку блока зграде ($x = \text{const.}$)



Слика 6.28 Расподела температуре у хоризонталном попречном пресеку на 1,8 метара у блоку зграда

7. Прорачун и анализа потрошње енергије репрезентативног објекта

Прорачун и анализа потрошње енергије репрезентативног објекта, односно одређивање корелације између повећања интензитета термичког острва и повећања потребе за хлађењем објекта који се налазе унутар термичког острва, урађена је спровођењем прорачуна потребе за хлађењем одабраног модела објекта – Високе текстилне школе за дизајн, технологију и менаџмент. Прорачуни су спроведени помоћу методологије прописане стандардом SRPS EN ISO 13790 и помоћу комерцијалног софтвера *Design Builder* [121]. У сврху одређивања ове корелације спроведене су три врсте прорачуна.

- 1) прорачуни потребе енергије за хлађење и грејање за модел објекта који се налази у зони термичког острва, на својој стварној локацији – општини Палилула, Старине Новака бр. 24. Прорачуни су спроведени применом софтвера *Design Builder*. Предходно је модел валидован поређењем података добијених нумеричким симулацијама помоћу софтвера *Design Builder*, са вредностима које су добијене аналитичким прорачуном на основу стандарда SRPS EN ISO 13790.
- 2) прорачун потребе енергије за хлађењем модела објекта, уколико би се исти објекат налазио на локацији у општини Гроцка, Винча, Мике Аласа 12-14, која се не налази у зони термичког острва. На овој локацији се налазио метеоролошки стуб. У овом случају урађен је прорачун помоћу софтвера *Design Builder*.
- 3) прорачуни потребе енергије за хлађење модела објекта, који се не налази на својој стварној, него на одабраним локацијама унутар термичког острва. Ови прорачуни вршени су аналитичким прорачуном на основу смерница стандарда SRPS EN ISO 13790, а као улазни, тзв. метео-подаци коришћени су резултати нумеричких симулација спроведених коришћењем софтвера *CHAM Phenics*.

Овим прорачунима установљен је утицај параметара спољног ваздуха, од којег зависи интензитет термичког острва, на укупну потрошњу енергије за хлађење објекта. Наведеним поступком успостављена је корелација између повећања интензитета термичког острва и повећања потребе за хлађењем објекта.

7.1 Примена детаљне методологије одређивања потребне енергије за хлађење

Свака зграда представља сложен термодинамички систем са различитим термичким зонама, које су у сталној интеракцији са њеним корисницима и променљивим условима спољашње средине. Потреба за ефикаснијом и прецизнијом проценом енергетских потреба зграде и једноставнијом анализом ефеката различитих предлога мера за побољшања њених енергетских својстава, те сама комплексност термодинамичких порачуна, наметнута су потребу примене компјутерских симулација. За динамичку симулацију термичких својстава одабраног објекта коришћен је програм *Design Builder*. Сам код програма *Design Builder* заснован је на постојећем коду *Energy Plus* [122] програма који је интегрисан унутар софтверске платформе *Design Builder* чиме је омогућен нумерички прорачун без коришћења додатних помоћних програма. Програм *Energy Plus* је прошао кроз међународну упоредну проверу и валидацију према стандардима *ANSI/ASHRAE Standard 140-2011* и *BESTEST (IEA SHC Task 34/Annex 43)*, који прописују стандардне методе евалуације рачунарских програма за анализу енергетског понашања зграда.

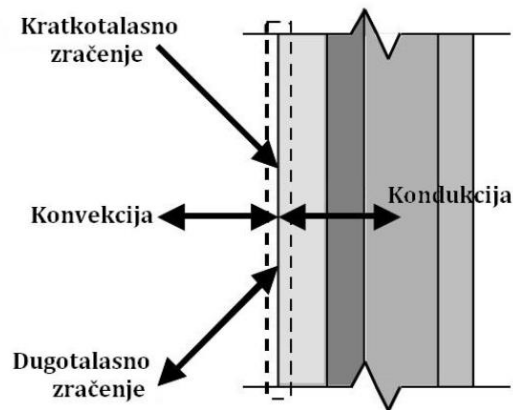
У овим прорачунима тоplotно оптерећење се рачуна у дефинисаном временском кораку, применом модела тоplotне равнотеже (*Heat Balance* модел). Овај модел представља тренутно најпотпунији и најтачнији начин за прорачун расхладног оптерећења. Заснован је на коришћењу Првог закона термодинамике и матричне алгебре. Он омогућава прорачун тренутног осетног тоplotног оптерећења (грејног и расхладног), на посматрани ваздушни простор. Једначине тоplotног биланса су написане за сваку припадајућу површину, плус једна једначина за ваздух у просторији. Примењена метода обухвата четири основна процеса, на основу којих се формирају одговарајуће једначине тоplotног биланса: спољашњи биланс топлоте, кондукција у зидовима, унутрашњи биланс топлоте и биланс топлоте са стране унутрашњег ваздуха. На основу ових једначина успостављених за сваки од наведених процеса могуће је одредити вредност температуре површина омотача зграде и температуре ваздуха у просторијама. Када се одреди вредност непознате температуре, она се користи за прорачун конвективног преноса топлоте. Основне претпоставке овог модела су:

- температура посматране површине је униформна,

- дуготаласно и краткоталасно зрачење је униформно,
- зрачење површина је радијално и
- кондукција је једнодимензионална.

Модел је заснован на постављању и решавању система једначина енергетских биланса за сваку површину у одређеној зони са унутрашње и спољашње стране, као и температуру ваздуха са унутрашње стране. За спољашњу површину зида, четири топлотна протока (Слика 7.1) морају бити у равнотежи како би био испуњен услов одржања енергије [123]. Овде се претпоставља да гранична површина нема масу, те да нема могућност складиштења енергије.

Топлотни биланс за спољашњу граничну површину:



Слика 7.1 Топлотни биланс за спољашње граничне површине

$$\dot{Q}_{KTzračenje} + \dot{Q}_{DTzračenje} + \dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_{kond} = 0 \quad (7.1)$$

где је

$\dot{Q}_{KTzračenje}$ - топлотни проток дозрачен сунчевим зрачењем на спољашњу граничну површину, коју површина апсорбује,

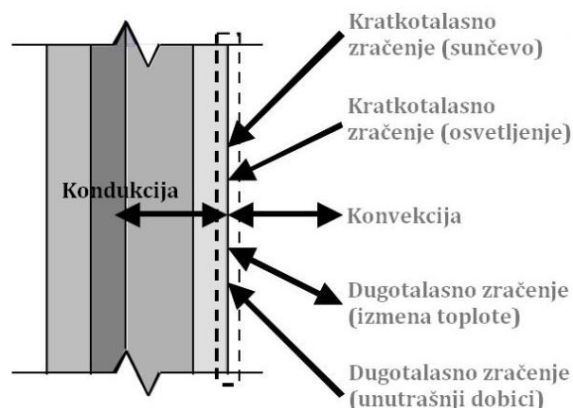
$\dot{Q}_{DTzračenje}$ - топлотни проток који зрачењем топлоте размени гранична површина са ОКОЛИНОМ;

\dot{Q}_{konv} - топлотни проток који се размени конвекцијом између граничне површине и околног спољашњег ваздуха;

\dot{Q}_{kond} - топлотни проток који се кондукцијом спроводи кроз зид.

Топлотни биланс за унутрашњу граничну површину:

За површину унутрашње стране зида, доле наведених шест топлотних протока (Слика 7.2) морају да буду у равнотежи како би био испуњен услов одржања енергије [124]. Овде је такође претпостављено да ова гранична површина нема масу, нити могућност складиштења енергије.



Слика 7.2 Топлотни биланс за унутрашње граничне површине

$$\dot{Q}_{solar} + \dot{Q}_{KTsvetla} + \dot{Q}_{DTizmena} + \dot{Q}_{DTdobici} + \dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_{kond} = 0 \quad (7.2)$$

где је

\dot{Q}_{solar} - топлотни проток дозрачен сунчевим зрачењем на унутрашњу граничну површину, а коју површина апсорбује;

$\dot{Q}_{KTsvetla}$ - топлотни проток дозрачен краткоталасним зрачењем вештачког осветљења на унутрашњу граничну површину, а коју површина апсорбује;

$\dot{Q}_{DTizmena}$ - топлотни проток дуготаласног зрачења који површина размени са другим површинама у зони;

$\dot{Q}_{DTdobici}$ - топлотни проток дуготаласног зрачења из унутрашњих извора топлоте на унутрашњу граничну површину коју апсорбује површина;

\dot{Q}_{konv} - топлотни проток који се размени конвекцијом између унутрашње граничне површине и ваздуха унутар зоне;

\dot{Q}_{kond} - топлотни проток који се кондукцијом спроводи кроз зид.

Топлотни биланс за ваздух унутр зоне:

Топлотна равнотежа ваздуха унутар зоне може бити формулисана на два начина, у зависности од тога да ли се узима или не узима у обзир акумулација енергије у самом ваздуху. Уколико се занемари акумулација енергије у ваздуху унутар зоне следи једначина

$$\dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_{dobici} + \dot{Q}_{infilt} + \dot{Q}_{sistem} = 0 \quad (7.3)$$

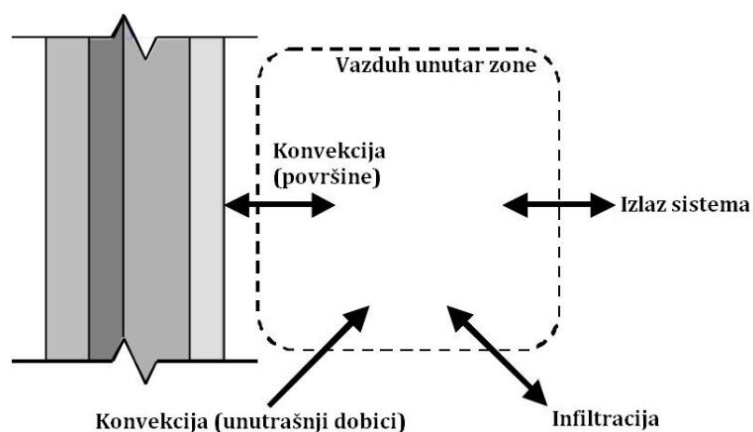
где је

\dot{Q}_{konv} - топлотни проток који се конвекцијом преда са свих површина у зони на ваздух унутар зоне;

\dot{Q}_{dobici} - топлотни проток конвекцијом од унутрашњих извора топлоте;

\dot{Q}_{infilt} - топлотни проток остварен инфилтрацијом;

\dot{Q}_{sistem} - топлотни проток са система за грејање или на систем за хлађење.



Слика 7.3 Топлотни биланс за зону

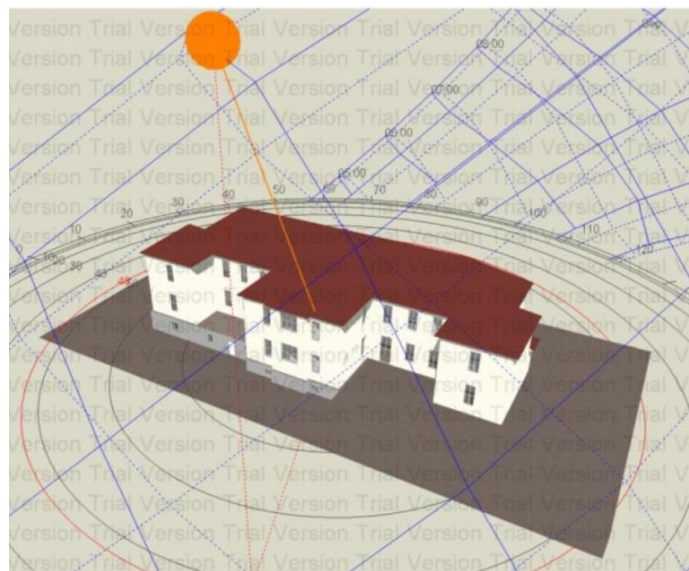
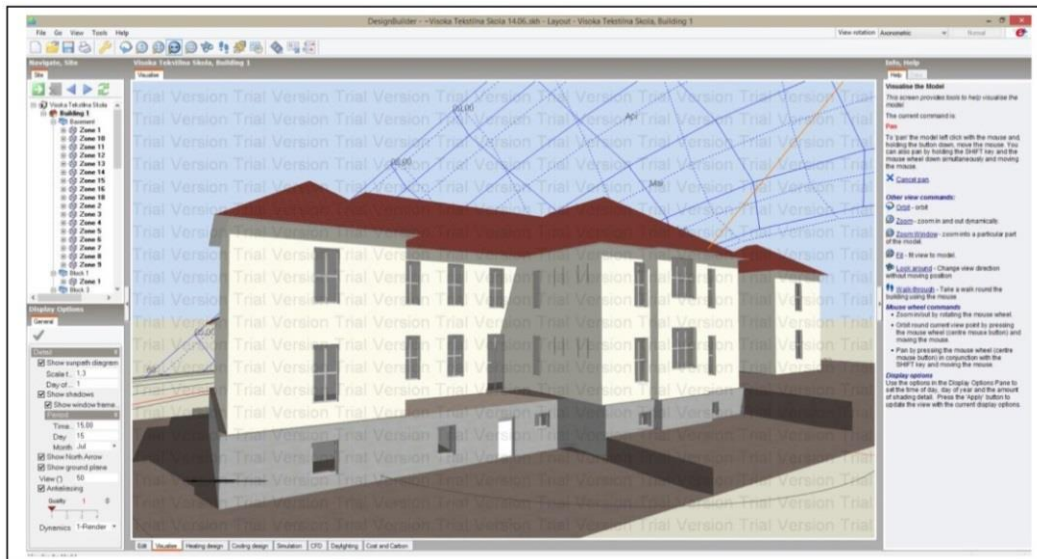
Ова једначина довољна је за прорачун топлотне равнотеже ваздуха унутар зоне у већини случајева. Међутим, када треба добити повратне информације из симулације система зграде, користи се измењена једначина којом се у обзир узима и капацитет складиштења енергије у ваздуху унутар зоне [125].

7.2 Калибрација модела

Калибрација нумеричког модела обично представља поступак провере и кориговања појединих параметара нумеричког модела, поређењем са експериментално добијеним резултатима или резултатима добијеним применом валидованих метода дефинисаним стандардима или са релевантном научном и стручном литературом. Основни циљ калибрације модела је добијање што реалније процене потрошње енергије. У посматраном случају калибрација нумеричког модела представља процес провере слагања резултата добијених моделом са одговарајућим вредностима резултата добијених прорачуном према одговарајућим стандардима и прописима.

Коришћењем софтвера *Design Builder*, формиран је нумерички модел за прорачун енергетских потреба постојеће зграде који би били упоредиви са резултатима добијеним аналитичким прорачуном дефинисаним стандардом SRPS EN ISO 13790 [126] и Правилником о енергетској ефикасности зграда [127]. Сам нумерички модел захтева што прецизније дефинисање облика и димензије зграде, термичких карактеристика материјала зграде, КГХ система, понашања корисника и других параметара. Крајњи циљ калибрације модела је да се резултати добијени нумеричком симулацијом и резултати добијени аналитичким прорачуном разликују за мање од 5%.

Модел репрезентативне зграде формиран је за зграду која се састоји од сутерена, приземља и првог спрата, укупне површине 1259 m². Режим хлађења у свим просторијама зграде је тако подешен да цела зграда може бити посматрана као јединствена топлотна зона. Карактеристике омотача зграде и вредности протока ваздуха из спољашње у унутрашњу средину (инфилтрација) детаљно су приказане у поглављу 4. На Слици 7.4 приказан је формиран калибрациони модел зграде Високе текстилне школе за дизајн, технологију и менаџмент.



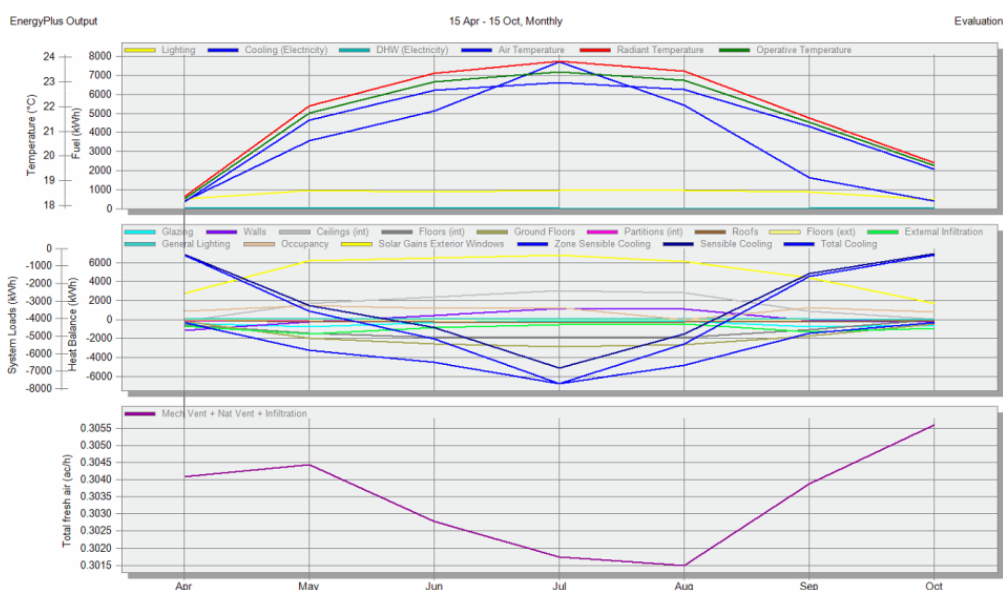
Слика 7.4 Модел зграде Високе текстилне школе за дизајн, технологију и менаџмент креиран у програму *Design Builder*

7.3 Резултати симулација потрошње енергије

7.3.1 Резултати калибрације модела

На примеру калибрације модела школске зграде креираног помоћу софтвера *Design Builder*, уочено је да се вредности финалне потрошње енергије за грејање које су добијене аналитичким прорачуном, разликују за око 2% од вредности које су добијене нумеричком симулацијом [128]. С обзиром на то да је прорачун потрошње енергије за грејање спроведен према поменутом стандарду SRPS EN ISO 13790 и Правилнику о енергетској ефикасности зграда, то нам додатно указује на поузданост софтвера *Design Builder*.

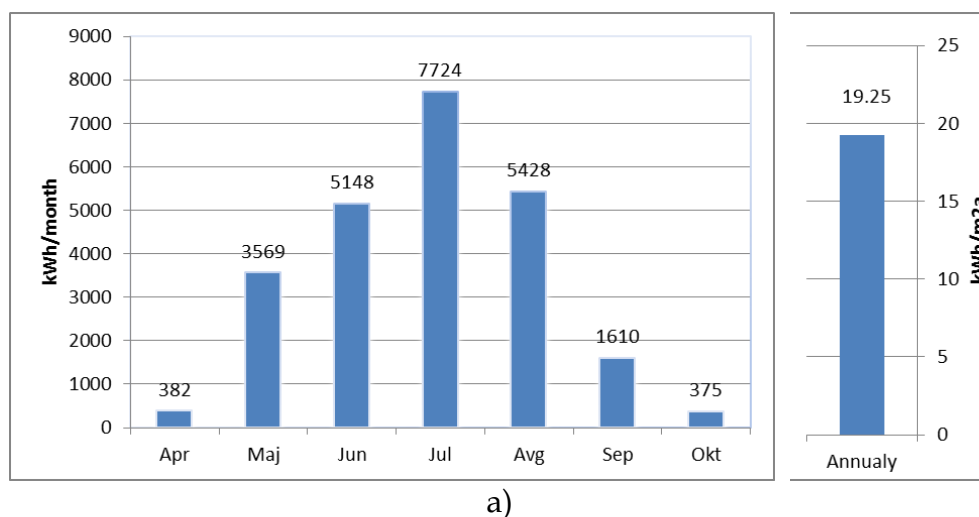
На слици 7.5 су дијаграмима и табеларно приказане вредности промене температуре унутрашњег ваздуха, радијантне температуре, оперативне температуре, укупна потребна енергија за хлађење објекта, топлотни добици од осветљења, добици топлоте кроз одређене транспарентне (прозоре и врата) и нетранспарентне делове омотача (зидови, подови, кров), унутрашњи добици топлоте (који потичу од светла, људи, електричних уређаја) и инфилтрациони добици топлоте, добијени нумеричком симулацијом коришћењем софтвера *Design Builder* у посматраном периоду године. Вредности су приказане за период од 15. априла до 15. октобра, за школску зграду, на локацији у Београду, улица Старине Новака 24, за случај свакодневног коришћења зграде у трајању од 16 сати.

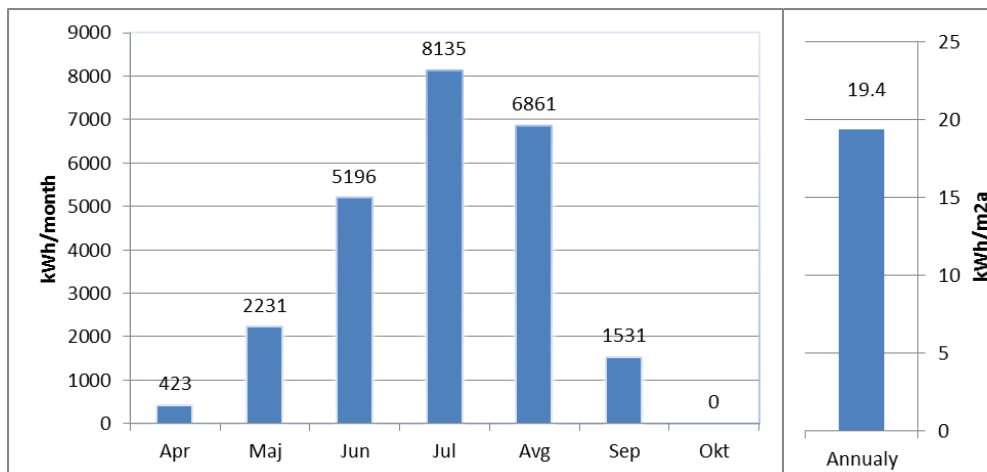


Month							
Lighting (kWh)	496.40	957.33	886.42	957.33	957.33	886.42	460.94
Cooling (Electricity) (kWh)	381.85	3569.25	5148.23	7723.80	5428.39	1610.04	375.36
DHW (Electricity) (kWh)	7.10	12.42	10.05	10.65	10.65	10.65	6.51
Air Temperature (°C)	18.15	21.44	22.66	22.97	22.69	21.20	19.46
Radiant Temperature (°C)	18.36	22.02	23.33	23.82	23.42	21.54	19.73
Operative Temperature (°C)	18.25	21.73	23.00	23.40	23.06	21.37	19.59
Glazing (kWh)	-368.29	-745.49	-335.02	-66.70	-134.82	-760.96	-588.42
Walls (kWh)	-1105.43	-261.33	435.28	1193.07	1126.00	-120.50	-237.91
Ceilings (int) (kWh)	-146.80	1712.71	2348.87	3061.48	2835.77	902.43	28.17
Floors (int) (kWh)	-553.15	-1416.45	-1883.75	-1892.86	-1899.25	-1035.16	-48.75
Ground Floors (kWh)	-170.20	-1990.06	-2542.18	-2843.28	-2620.97	-1714.87	-436.05
Partitions (int) (kWh)	-181.58	6.76	-33.68	72.87	47.60	8.93	59.32
Roofs (kWh)	-11.07	-215.17	-263.65	-287.59	-271.39	-214.34	-69.54
Floors (ext) (kWh)	-1.72	0.84	10.16	17.13	17.76	-5.30	-8.76
External Infiltration (kWh)	-715.63	-1492.55	-861.01	-519.23	-435.17	-1264.30	-926.84
General Lighting (kWh)	20.86	40.23	37.25	40.23	40.23	37.25	19.37
Occupancy (kWh)	901.08	1478.02	1152.47	1229.04	0.00	1265.17	811.52
Solar Gains Exterior Windows (kWh)	2759.50	6175.67	6468.60	6836.72	6112.28	4394.60	1714.85
Zone Sensible Cooling (kWh)	-355.38	-3241.52	-4489.79	-6797.76	-4847.66	-1452.97	-292.29
Sensible Cooling (kWh)	-356.12	-3248.59	-4500.98	-6817.30	-4860.87	-1455.90	-292.92
Total Cooling (kWh)	-381.85	-3569.25	-5148.23	-7723.80	-5428.39	-1610.04	-375.36
Mech Vent + Nat Vent + Infiltration (ac/h)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31

Слика 7.5. Вредности потреба за хлађењем, добитак топлоте кроз одређене транспарантне делове омотача, и инфилтрације у посматраном периоду године добијене као резултат нумеричке симулације

Валидација нумеричког модела је урађена поређењем резултата добијених нумеричким симулацијама помоћу софтвера *Design Builder* са вредностима потребне енергије по месецима, добијених аналитичким прорачуном у складу са стандардом SRPS EN ISO 13790, при чему су за улазне податке спољашње температуре коришћени подаци који се налазе у метео фајлу самог софтвера *Design Builder*-а, док је вредност унутрашње пројектне температуре била 26°C. На слици 7.6 приказане су вредности количине енергије потребне за хлађење објекта на месечном и годишњем нивоу, добијене нумеричком симулацијом помоћу софтвера *Design Builder* и прорачуном дефинисаним стандардом SRPS EN ISO 13790.





б)

Слика 7.6 Потребна за хлађењем објекта израчуната (а) помоћу софтвера *Design Builder* и (б) на основу прорачуна према стандарду SRPS EN ISO 13790

Поређењем резултата добијених нумеричком симулацијом у софтверу *Design Builder* и резултата добијених аналитичким прорачуном, утврђено је да је вредност специфичне потребе за хлађењем школске зграде добијена аналитичким прорачуном према стандарду SRPS EN ISO 13790 нижа него вредност добијена нумеричким прорачуном. Поређењем резултата потребе за хлађењем објекта по месецима, уочено је да су одступања између нумеричког и аналитичког прорачуна, израженија у прелазним периодима године. Метеролошки подаци у бази софтвера *Design Builder* представљају типичну метеролошку годину за одређену локацију, која је креирана на основу статистичке обраде измерених метеоролошких података (*weather file*, енг.) током дужег временског периода. Разлика између симулираних и прорачунатих вредности годишње потребне енергије за хлађење репрезентативне школске зграде је 0,7%, на основу података са слике 7.6.

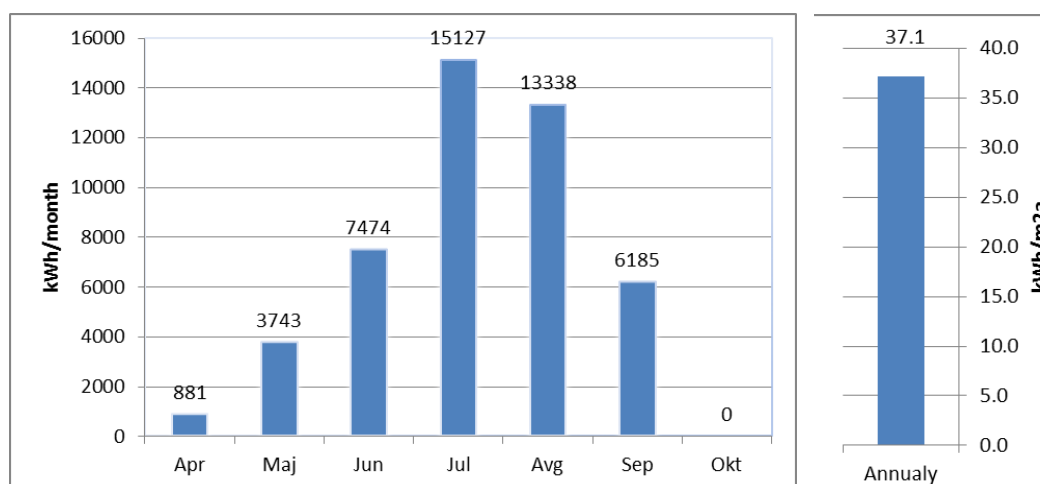
Приликом прорачуна потребне енергије за хлађење, зграду најчешће посматрамо као јединствену зону у којој се на целокупној корисној површини и запремини одвијају исте активности и процеси који утичу на термичко понашање зграде и њену енергетску потрошњу. У зградама образовних установа то веома често није случај, јер се у просторијама унутар објекта не одвијају исте активност и процеси. У учионицама, ти процеси се најчешће одвијају током наставе, у трајању од 45 минута, док су у осталим и помоћним просторијама, због много мање концентрације особа, ове активности и процеси знатно нижег интензитета. Услед повећане концентрације ученика у неким деловима зграде (учионицама) јавља се повећано одавање топлоте

што директно утиче на температуру ваздуха унутар просторије али и садржаја влаге (rH) и угљен-диоксида (CO₂), па је из здравствених разлога препоручљиво чешће вентилирање просторија [129]. Све ово нам указује на потребу за детаљнијом анализом и приступом приликом прорачуна потребне енергије како за хлађење тако и за грејање оваквих установа у чему је јасна предност нумеричких симулација у односу на аналитичке прорачуне.

7.3.2 Резултати прорачуна потребе за хлађењем модела објекта за случај да се налази на својој стварној локацији

Прорачун потрошње потребне енергије за хлађење модела објекта у случају да се он налази на својој стварној локацији, приказан у претходном поглављу, поновљен је помоћу софтвера *Design Builder*. Прорачун је поновљен са новим метео фајлом који је креиран на основу измерених вредности спољашње амбијенталне температуре, коришћењем метеоролошког стуба који се налазио на објекту у градској средини.

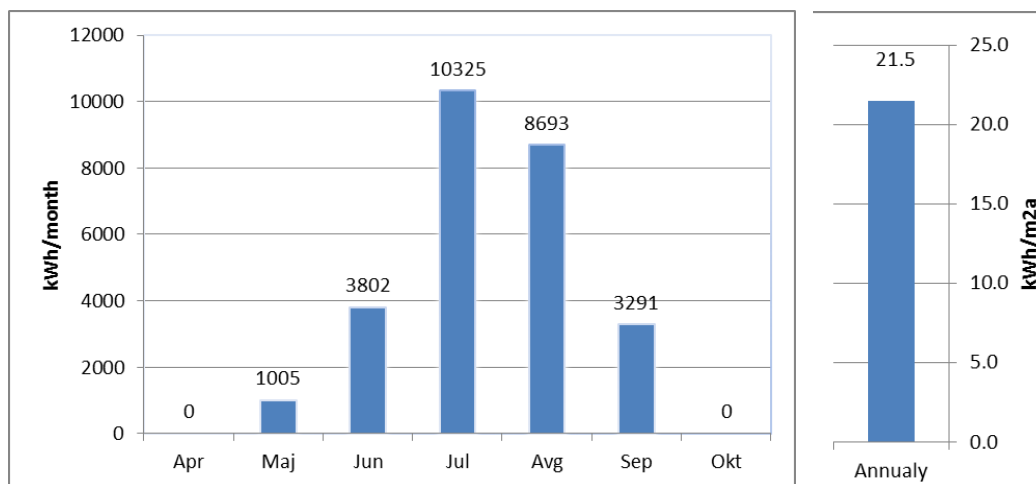
На слици 7.7 приказане су вредности потребне енергије за хлађење добијене коришћењем новог метео фајла са измереним вредностима спољашње температуре симулацијама урађених применом софтвера *Design Builder*.



Слика 7.7 Енергија потребна за хлађење зграде помоћу софтвера *Design Builder* :(лево) потрошња по месецима [kWh]; (десно) специфична годишња потрошња [kWh/m²a]

7.3.3 Прорачун потреба за хлађењем модела објекта за случај да се налази на локацији која се не налази у зони термичког острва (рурална локација)

У руралној средини, Институту „Винча“ налазио се метеоролошки стуб који је континуално прикупљао податке. На основу прикупљених мерних података креиран је нови метео фајл и поновљене су нумеричке симулације потребне енергије за хлађење истог модела објекта уколико би се он налазио у руралној средини. Добијени резултати нумеричких симулација помоћу софтвера *Design Builder* приказани су на слици 7.8.



Слика 7.8 Енергија потребна за хлађење зграде у руралној области помоћу софтвера *Design Builder*: (лево) потрошња по месецима [kWh]; (десно) специфична годишња потрошња [kWh/m²a]

7.3.4 Прорачун потреба за хлађењем модела објекта за случај да се налази на различитим локацијама унутар термичког острва

Градску средину, зону термичког острва карактерише струјно-термичко поље које није униформно, што је и приказано у претходном поглављу. Ово за последицу има и различите енергетске потребе објеката који се налазе у тој градској средини. Циљ овог поглавља је да се провери утицај спољашње температуре ваздуха за три локације градске средине на потрошњу енергије за хлађење модела објекта уколико би се он налазио на тим локацијама. Одабране локације поред различитих вредности спољашње температуре карактерише и следеће:

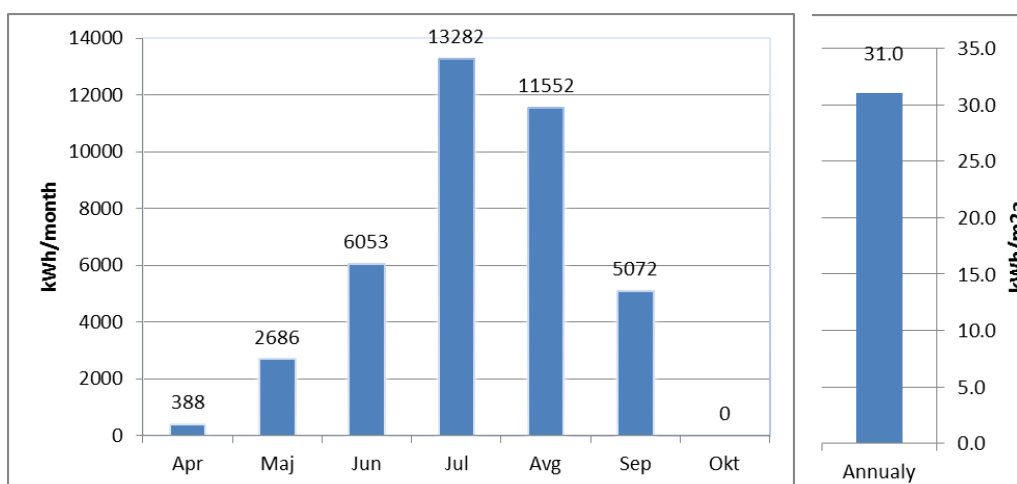
- Локација 1, Ташмајдански парк је највећа зелена површина која се простира на 11 хектара у посматраној градској средини. На овој површини нема објеката и кроз овај део градске средине не пролазе возила.
- Локација 2, улица Булевар краља Александра у близини парка. Ову локацију карактерише то што је са једне стране окружена зградама, а са друге зеленом инфраструктуром, Ташмајданским парком. Поред наведеног, ову локацију карактерише велика фреквенција возила у периоду од 6 до 22 часа, око 5.150 возила на сат.
- Локација 3, раскрсница улица Старине Новака и Краљице Марије, јесте локација која је са свих страна окружена зградама, у близини се не налазе зелене површине и ову локацију такође карактерише велика фреквенција возила у периоду од 6 до 22 часа, око 5.050 возила на сат.

Прорачун потрошње енергије за хлађење објекта, за случајеве да се не налази на својој стварној локацији, него на свакој од три горенаведене репрезентативне локације унутар термичког острва урађен је само коришћењем аналитичког прорачуна према стандарду SRPS EN ISO 13790. Локације за које је урађен аналитички прорачун приказане су на Слици 5.5, позиција 2, 4 и 5. На поменутих градским локацијама није рађено континуално мерење метеоролошких података, самим тим услед недостатка релевантних података за амбијенталну температуру није урађен нумерички прорачун помоћу софтвера *Design Builder*. Као улазне вредности спољашње температуре, за аналитички прорачун, коришћени су подаци који су добијени помоћу предходно урађених нумеричких симулација струјно-термичког поља коришћењем софтвера *CHAM Phoenix*. На основу сета нумеричких симулација где су као улазни подаци коришћене средње вредности метеоролошких параметара за сваки месец понаособ, добијене су вредности спољашње температуре неопходне за аналитички прорачун потрошње енергије за хлађење за све одабране локације унутар термичког острва. Средње месечне вредности амбијенталне температуре приказане су у Табели. 7.1.

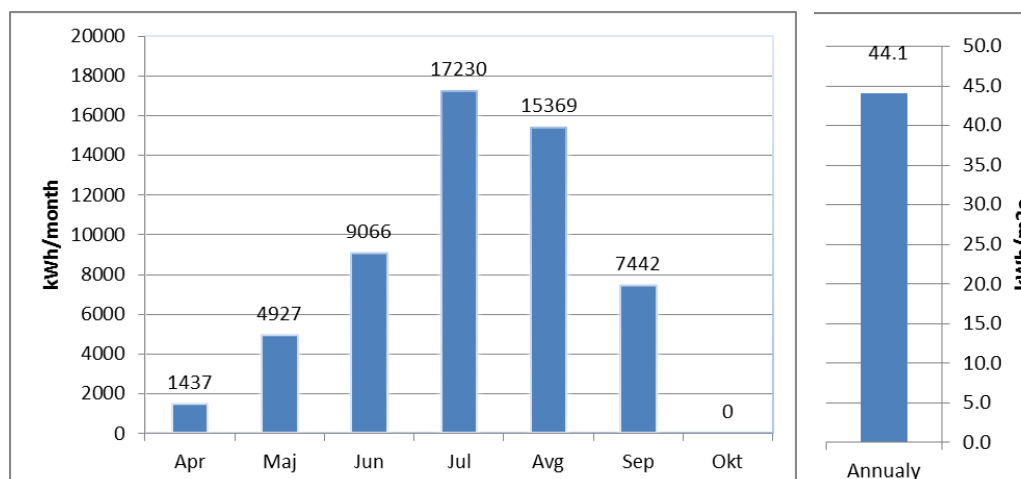
Табела. 7.1. Средње месечне вредности спољашних температура за одабране градске локације.

Локација	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt
Околина школске зграде	13,0	18,7	22,1	26,4	25,9	21,4	14,2
Ташмајдански парк	12,5	17,9	21,2	25,4	24,8	20,5	13,6
Палилулска пијаца	14,3	20,6	24,3	29,1	28,5	23,5	15,7
Бул. краља Александра	13,6	19,6	23,1	27,7	27,1	22,4	14,9
27. марта. и С. Новака	14,8	21,3	25,1	30,1	29,4	24,3	16,2

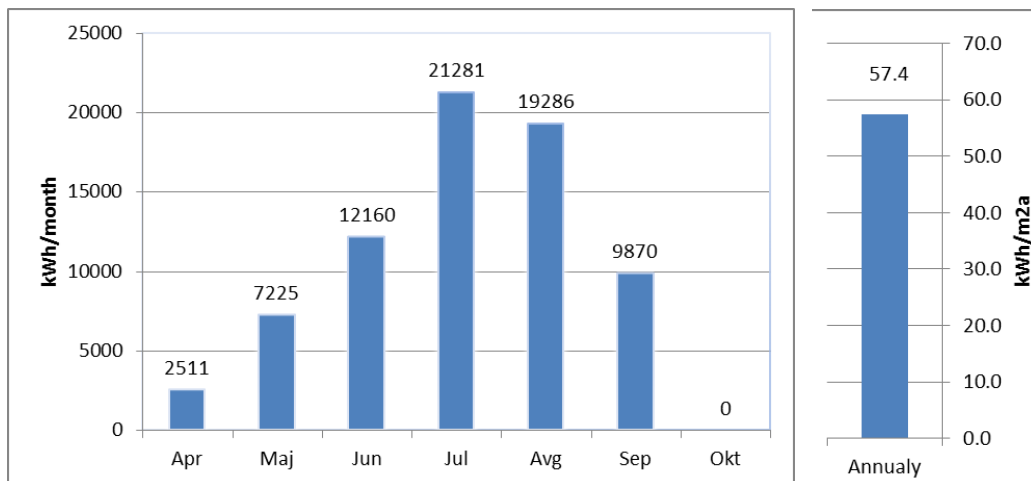
На сликама 7.9-7.11 приказани су резултати потребне енергије за хлађење добијене аналитичким прорачуном према стандарду SRPS EN ISO 13790.



Слика 7.9 Енергија потребна за хлађење зграде за локацију - Ташмајдански парк према стандарду SRPS EN ISO 13790: (лево) потрошња по месецима [kWh]; (десно) специфична годишња потрошња [kWh/m²a]



Слика 7.10 Енергија потребна за хлађење зграде за локацију - Булевар краља Александра према стандарду SRPS EN ISO 13790: (лево) потрошња по месецима [kWh]; (десно) специфична годишња потрошња [kWh/m²a]



Слика 7.11 Енергија потребна за хлађење зграде за локацију - угао 27. марта и Старине Новака према страндарду SRPS EN ISO 13790: (лево) потрошња по месецима [kWh]; (десно) специфична годишња потрошња [kWh/m²a]

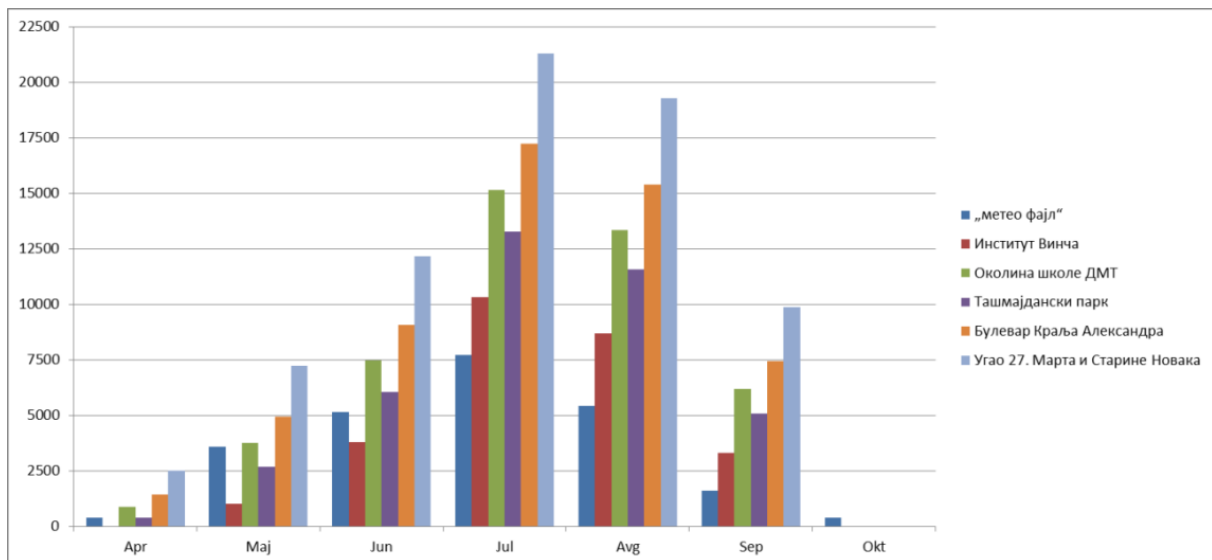
7.4 Преглед и анализа добијених резултата

На основу нумеричких симулација, помоћу софтвера *Design Builder* и аналитичког прорачуна у складу са стандардом SRPS EN ISO 13790 потребне енергије за хлађење уколико би се исти модел објекта налазио на различитим локацијама сумиран је приказ годишње потребне енергије за хлађење, приказан у табели 7.2 и на слици 7.12. Из табеле се јасно види да је потребна енергија за хлађење зграде значајно већа за локације у градској средини у односу на руралну средину. Такође, могу бити уочене значајне разлике потребне енергије за хлађење у самој градској средини. Ово нам јасно указује на потребу да веће урбане средине треба поделити на више температурних зона и урадити прорачун за сваку од усвојених зона.

Такође, на основу ових резултата, може бити закључено да коришћењем софтвера за прорачун потрошње енергије, како за хлађење тако и за грејање, могу настати значајне грешке уколико користимо улазне параметре температуре ваздуха доступне у самом софтверу уместо улазних параметара одећених на основу континуалних мерења.

Табела 7.2 Годишња потребна енергије за хлађење репрезентативне зграде за различите локације

Р. бр.	Локација спољашње темп.	Прорачун	Годишња потребна енергија	
			[kWh/a]	[kWh/m2a]
1	„метео фајл“	<i>Design Builder</i>	24425	19,4
2	Институт „Винча“	<i>Design Builder</i>	27116	21,5
3	Околина школе ДМГ	<i>Design Builder</i>	46748	37,1
4	Ташмајдански парк	SRPS 13790	39033	31,0
5	Булевар краља Александра	SRPS 13790	55472	44,1
6	Угао 27. марта и Старине Новака	SRPS 13790	72334	57,4



Слика 7.12 Приказ годишње потребне енергије по m^2 за хлађење зграде за различите локације

Вредности потреба за хлађењем добијене нумеричком симулацијом помоћу софтвера *Design Builder*, када су коришћени подаци из метео фајл-а доступном у самом софтверу, ниже су у односу на све остале сценарије. Вредности спољашње температуре у доступном метео фајлу, јесу вредности температуре за период од 1982. до 1999. године. Ове вредности су значајно ниже од вредности спољашњих температура које су коришћене приликом нумеричких симулација у софтверу *Design Builder* или аналитичког прорачуна за све одабране случајеве. Потреба за хлађењем уколико би се модел објекта налазио у руралној средини јесте вредност која је најприближнија потребама за хлађењем са метео фајлом доступним у софтверу и ове вредности се разликују 10,6%. Потребна енергија за хлађење репрезентативне зграде на стварној локацији је 48% виша у односу на вредности добијене нумеричким симулацијама са подацима из метео фајла који је доступан у софтверу.

За остале одабране градске локације потребна енергија за хлађење објекта добијена аналитичким прорачунима значајно је виша (38–66%) у односу на вредности добијене нумеричким симулацијама са подацима из метео фајла који је доступан у софтверу *Design Builder*, .

Прорачуната вредност потреба за хлађењем модела објекта уколико би се налазио на локацији 1 коју карактерише зелена инфраструктура у градској средини је 38%

већа у односу на вредност добијену нумеричким симулацијам под редним бројем 1, табела 7.2.

Уколико би се модел објекта налазио на локацији 2, која се може окарактерисати као локација урбане средине са мешовитом инфраструктуром, у околини постоје зграде, зеленило и велики интензитет саобраћаја, потребна енергија за хлађење одређена аналитичким прорачуном била би 56% већа у односу на вредност добијену нумеричком симулацијом коришћењем података из метео фајла који је доступан у софтверу.

Локацију 3 у градској средини карактерише велики број стамбено-пословних објеката и висок интензитет саобраћаја, без зелених површина у близини. Резултати аналитичког прорачуна за случај да се модел објекта налази на овој локацији показује да би потреба енергије за хлађењем била 66% виша у односу на вредност добијену нумеричком симулацијом са подацима из метео фајла који је доступан у софтверу.

8. Закључак

У овом раду су приказани резултати истраживања утицаја термичких острва на потрошњу енергије за хлађење у зградама у већим градским срединама, као и резултати анализе параметара потребних за њихово квантификовање. Истраживање је засновано на резултатима експерименталног одређивања потребних величина и резултатима добијених применом савремених нумеричких метода и алата.

Прикупљени су и обрађени подаци о вредности температуре ваздуха забележене на четири метеоролошке станице у различитим деловима града Београда (Мостар, Нови Београд, Стари Град и Врачар) током 2015. године.

На две претходно изабране локације на територији града Београда измерене су температуре амбијенталног ваздуха, радијантне температуре, релативне влажности ваздуха, интензитета сунчевог и дифузионог зрачења, мерење брзине и одређивање правца ветра. Једна од изабраних локација се налази у урбаној средини у непосредној околини зграде Високе текстилне струковне школе за дизајн, технологију и менаџмент. Друга локација је изабрана у руралној средини и смештена је у парку Института за нуклеарне науке „Винча“ у насељу Винча. Мерене вредности су коришћене за процену вредности интензитета термичких острва и као улазни подаци за формиране математичко-нумеричке моделе.

У циљу процене енергетске ефикасности и енергетских својстава репрезентативног објекта и дефинисања улазних параметара за математичко-нумеричке моделе, у згради Високе текстилне струковне школе за дизајн, технологију и менаџмент обављено је мерење параметара потребних за прорачун коефицијента пролаза топлоте (U вредности) елемената омотача зграде, температуре ваздуха у учионицама, протока ваздуха у учионицама природном инфилтрацијом, температуре објекта термовизијском камером, температуре омотача објекта и околиних површина.

На градској локацији обављено је мерење саобраћајног протока на седам изабраних раскрсница. За утврђени број возила, претходно разврстаних у седам категорија према нивоу емисије полутаната, урађен је прорачун емисије услед саобраћаја.

Резултати мерења температуре ваздуха, концентрације угљен-диоксида и радијантне температуре у непосредној близини школске зграде коришћени су за валидацију математичко-нумеричког модела.

Детаљно је описана мерна опрема и дати су стандарди и процедуре мерења, начин прикупљања и обраде података. Мерењима на терену, утврђени су просторни и временски параметри сложеног оперативног режима коришћења зграде. Прикупљени и обрађени резултати приказаних мерења представљају обимну и комплексну базу података за наставак истраживања у овој области, али и за нека друга научна истраживања.

Након дефинисања проблема и детаљног прегледа литературе, формиран су и детаљно описани различити нумеричко-математички модели и упоређени су резултати добијени применом сваког од формираних модела. За даља нумеричка истраживања изабран је модел чији су се резултати најбоље слагали са вредностима добијеним мерењима. Детаљно су описане нумеричке процедуре за решавање датог система једначина у генерализованом облику, који је најпогоднији за једнако третирање свих променљивих величина. Приказани су основи дискретизације методом коначних запремина, третман комплексне геометрије методом исечених ћелија и детаљно су описане карактеристике коришћеног софтвера *CHAM Phoenix*. Као улазни подаци за нумеричке симулације коришћени су резултати добијени мерењем и дирекним прикупљањем на терену. Детаљна тродимензионална симулација турбулентног струјања ветра са преносом топлоте у реалној комплексној градској средини града Београда обављена је како би били утврђени могући узроци повећањане температуре и негативног учинка термичких острва на топлотни комфор људи у спољашњој средини.

Предност нумеричких симулација коришћених у овом истраживању се огледа у томе што нам овакве симулације омогућавају да променом улазних података и геометрије добијамо различита поља температуре, брзине ветра и концентрације угљен-диоксида која одговарају различитим урбаним конфигурацијама. Захваљујући овим резултатима можемо да унапредимо урбано планирање и побољшамо спољашњи термички комфор, а све у функцији значајно већег

коришћења урбаних простора током летњих периода при екстремним температурама.

Резултати нумеричких симулација приказани у овој дисертацији изабрани су за референтни дан, упоређени и верификовани са измереним подацима, на пет различитих, одабраних локација у одабраној градској средини. Сви резултати су приказани за висински ниво на којем постоје највећи утицаји на људе, као и у појединим карактеристичним пресецима, битним за транспорт полутаната и струјање ветра. Резултати су приказани у виду поља притиска, температуре, радијантне температуре, брзине струјања ветра и концентрације угљен-диоксида за три случаја, ујутру (S1), поподне (S2) и увече (S3), након заласка Сунца.

На основу измерених и добијених података нумеричким симулацијама урађен је прорачун потребне енергије за хлађење репрезентативне зграде. Модел одабране репрезентативне зграде је креиран помоћу компјутерског софтвера *Design Builder* након чега је симулирано термичко понашање и прорачуната потребна енергија за хлађење зграде. Након тога, добијени резултати су поређени са аналитичким прорачуном дефинисаном у стандарду SRPS EN ISO 13790. Остварено је велико слагање. Разлика годишње потребне енергије за хлађење јесте 0,7%, чиме је потврђена и верификована коректност формираног компјутерског модела, а све са циљем симулирања потрошње енергије зграде за хлађење при другим спољашњим метеоролошким параметрима.

За разлику од стандардне методологије према Правилнику о енергетској ефикасности зграда, где је унутрашњост зграде најчешће посматрана као једна зона у којој се равномерно одвијају исте активности, компјутерске симулације могу много реалније да симулирају стварне активности у згради. Потребна енергија за хлађење, није нимало занемарљива поготово у градским срединама, што је и показано у овој дисертацији. Предност коришћења компјутерске симулације за одређивање и анализу могућности за смањење потребне енергије у зградама је значајна.

Поред саме структуре града, вегетација и саобраћај, који утиче на повећано својство топлотне акомулације услед емисије продуката сагоревања из возила, у великој мери утичу на амбијенталну температуру у градској средини. Температура ваздуха је до 6°C виша у близини улица где је саобраћај фреквентнији него у деловима града где

је он минималан, или у парковима. Интензитет термичког острва за одабрану градску средину се кретао у интервалу од 4,8°C до 9,5°C. Потрошња енергије на примеру репрезентативног објекта у зависности од локације на којој се налази кретала се од 19,4 kWh/m²а до 57,4 kWh/m²а. Једино су вредности годишње потребне енергије за хлађење објекта, које су добијене уколико би се објекат налазио у руралној средини, приближне вредностима добијених симулацијом, када су као улазни параметри коришћени подаци из „метео фајл-а“ доступног у софтверу *Design Builder*. Оваквим истраживања можемо да утичемо на почетне фазе планирања и пројектовања како градских средина тако и мањих комплекса унутар неке градске средине. Такође, можемо предвидети мере побољшања спољашњег комфора у постојећим срединама, али исто тако и умањити акумулацију топлоте у градској средини.

У овом раду показана је предност коришћења нумеричких софтвера, као што је програмски пакет *CHAM Phoenix* за детаљну карактеризацију струјно-термичких величина и дисперзије нереагујућег загађивача (угљен-диоксида). Како је модел за изабрану комплексну градску средину, града Београда показао велику тачност, слагање симулираних и измерених података, за процену струјних поља и поља концентрације угљен-диоксида, може бити сматрано да је овакав модел користан алат за процену утицаја и других загађивача на урбану средину. Такође, овај нумеричко-математички модел може бити лако примењен и на друге градске средине.

С обзиром на то да се у овој дисертацији ради о веома комплексној урбаној геометрији, као и да је величина изабраног и прорачунатог домена велика, а разлика добијених симулираних и мерених вредности у нивоу испод 5%, може бити сматрано да је модел испунио циљ и дао реалистичну процену посматраних параметара.

У овој дисертацији је, на основу нумеричких истраживања, показана могућност узимања у обзир утицаја термичких острва приликом прорачуна енергије потребне за хлађење зграде, путем корекционих фактора спољашње пројектне температуре.

У даљем раду је могућа примена модела на велики број других локација и његово проширење на услове стабилне и нестабилне, а не само неутралне, атмосфере која је разматрана у датом раду.

Тренутно су веома актуелна истраживања која се баве карактеризацијом урбаног партера и фасада објеката. Изналажење архитектонских, као и техничко-технолошких решења која би омогућила смањење температуре ових површина, планирано је да буде једна од тема будућих истраживања.

Осим тога, у будућем раду је планирана израда нумеричк анализе која ће узети у обзир резултате нумеричких симулација брзинског поља ваздуха услед утицаја облика грађевинских објеката и целих градских средина. Тим приступом може доћи до побољшања услова урбане микроклиме и спољашњег термичког комфора у отвореним просторима. Овакве анализе, у раној фази пројектовања, могу да допринесу пројектовању угоднијих урбанистичких целина што ће узроковати коришћења тих простора у већој мери.

У наредном периоду такође је могуће наставити истраживања на примерима других великих јавних зграда специфичних намена и режима коришћења, али водећи рачуна о стварним потребама самих корисника зграде.

Литература

- [1] N.B. Grimm, S.H. Faeth, N.E. Golubiewski, C. L. Redman, J. G. Wu, X. M. Bai and J. M. Briggs, Global change and the ecology of cities, *Science* 319 (2008) 756-760.
- [2] G. K. Heilig,. World urbanization prospects: the 2011 revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs (DESA), Population Division, Population Estimates and Projections Section, New York, 2012.
- [3] Републички завод за статистику, <http://popis2011.stat.rs/>
- [4] Д. Миличић, Осврт на демографске токове урбанизације код нас и у свету, *Демографија*, вол. I, (2004) 165-172,.
- [5] L. Howards., The climate of London, deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis, London 1818.
- [6] G. Manley, On the frequency of snowfall in metropolitan England." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 84 (1958): 70-72.
- [7] I.D. Stewart and T. R. Oke, Local climate zones for urban temperature studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (2012) 1879-1900.
- [8] H. Taha, Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, *Energy and buildings*, 25(2) (1997) 99-103.
- [9] S. D. Arifwidodo and T. Tanaka, The Characteristics of Urban Heat Island in Bangkok, Thailand. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 195, (2015) 423-428.
- [10] T.R.Karl, H.F. Diaz and G. Kukla, Urbanization: Its Detection and Effect in the United States Climate Record, *Journal of Climate*, 1 (1988) 1099-1123.
- [11] T.R.Oke, The Energetic Basis of the Urban Heat-Island. *Q J Roy Meteor Soc*, 108, (1982) 1-24.

- [12] B. Holmer, S. Thorsson and I. Eliasson, Cooling rates, sky view factors and the development of intra-urban air temperature differences, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 89 (2007) 237-248.
- [13] H. S. Park, Features of the Heat-Island in Seoul and Its Surrounding Cities. *Atmospheric Environment* (1967), 20 (1986) 1859-1866.
- [14] H.E.Landsberg, *The urban climate*, Academic press, 1981.
- [15] C. Souch and S. Grimmond, *Applied climatology: urban climate*, *Progress in physical geography*, 30 (2006) 270-279.
- [16] A.J. Arnfield, Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island, *International journal of climatology*, 23 (2003) 1-26.
- [17] C.J.G. Morris and I. Simmonds, Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia, *International Journal of Climatology*, 20 (2000) 1931-1954.
- [18] T.R. Oke, *Boundary layer climates*, Routledge, London, 1987.
- [19] F.C Curriero, K. S. Heiner, J. M. Samet, S. L. Zeger, L. Strug and J. A. Patz, emperature and mortality in 11 cities of the eastern United States, *American journal of epidemiology* 155 (2002) 80-87.
- [20] A. Fouillet, G. Rey, F. Laurent, G. Pavillon, S. Bellec, C. Guihenneuc-Jouyaux, and D. Hémon, Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France., *International archives of occupational and environmental health* 80 (2006) 16-24.
- [21] S. Whitman, G. Good, E. R. Donoghue, N. Benbow, W. Shou, and S. Mou, Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave, *American Journal of public health*, 87 (1997) 1515-1518.

- [22] K. Laaidi, A. Zeghnoun, B. Dousset, P. Bretin, S. Vandentorren, E. Giraudet, and P. Beaudeau,: The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave, *Environmental health perspectives* 120 (2012) 254-259.
- [23] H. Taha, S. Konopacki, and S. Gabersek, 1999: Impacts of large-scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: A 10-region modeling study, *Theoretical and Applied Climatology* 62 (1999) 175-185.
- [24] Y. Hirano and T. Fujita, Evaluation of the impact of the urban heat island on residential and commercial energy consumption in Tokyo. *Energy* 37 (2012) 371-383.
- [25] F. Salamanca, M. Georgescu, A. Mahalov, M. Moustou, and M. Wang,: Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119 (2014) 5949-5965.
- [26] B. Tremeac, P. Bousquet, C. de Munck, G. Pigeon, V. Masson, C. Marchadier and F. Meunier, Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. *Applied Energy* 95 (2012) 102-110.
- [27] Б. Вучићевић, *Анализа и оцена одрживог развоја енергетског система у зградарству. Докторска дисертација, Ниш 2014.*
- [28] *Нацрт Стратегије развоја енергетике републике Србије до 2025. године са пројекцијама до 2030. године, МРЕ 2015.*
- [29] M. Santamouris, The Athens urban climate experiment. *In PLEA '98 June 1998* (2014) 147-152
- [30] E. Jauregui, Heat island development in Mexico City, *Atmospheric Environment* 31 (1997) 3821-3831
- [31] R. Giridharan and M.Kolokotroni, Urban heat island characteristics in London during winter, *Solar Energy* 83 (2009) 1668-1682.

- [32] V. Bonacquisti, G.R. Casale, S. Palmieri, A.M. Siani, A canopy layer model and its application to Rome, *Science of the Total Environment* 364 (2006) 1-13.
- [33] A. Brazel, P. Gober, S.J. Lee, S. Grossman-Clarke, J. Zehnder, B. Hedquist and E. Comparri, Determinants of changes in the regional urban heat island in metropolitan Phoenix (Arizona, USA) between 1990 and 2004, *Climate Research* 33.2 (2007) 171-182.
- [34] M.G.L.C Loomans, M. W. van Houdt, A.D. Lemaire, and J.L.M. Hensen, Performance assessment of an operating theatre design using CFD simulation and tracer gas measurements. *Indoor and Built Environment* 17 (2008) 299-312.
- [35] B. Blocken, and J. Persoon, Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(5), (2009) 255-270.
- [36] S.R. Hanna, M. J. Brown, F.E. Camelli, S.T. Chan, W.J. Coirier, S. Kim, R.M. Reynolds, Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan: An application of five computational fluid dynamics models, *Bulletin of the American Meteorological Society* 87(12) (2006) 1713-1726.
- [37] B. Blocken, T. Defraeye, D. Derome, J. Carmeliet, High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building, *Building and Environment*, 44(12) (2009) 2396-2412.
- [38] M.J. Cook, Y. Ji, G.R. Hunt, CFD modelling of natural ventilation: combined wind and buoyancy forces, *International Journal of Ventilation*, 1(3) (2003) 169-179.
- [39] D.E. Claridge, Building simulation for practical operational optimization. In *Building Performance Simulation for Design and Operation*, 1st ed.; Hensen, J.L.M., Lamberts, R., Eds.; Spon Press:Oxfordshire, UK, 2011.

- [40] M. Emily, E.M. Ryan, T.F. Sanquist, Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions, *Energy Build.* 47 (2012) 375–382.
- [41] G. Dall’O’, L. Sarto, N. Sanna, A. Martucci, Comparison between predicted and actual energy performance for summer cooling in high-performance residential buildings in the Lombardy region (Italy). *Energy Build.* 54 (2012) 234–242.
- [42] R.A. Memon, D.Y. Leung, C.H. Liu, An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research*, 94(3) (2009) 491-500.
- [43] N. Khalid, Urban heat island in Erbil City. Student thesis series INES 2014.
- [44] T.Hung, D. Uchihama, S. Ochi, Y.Yasuoka, Assessment with satellite data of the urban heat island effects in asian mega cities, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8 (1) (2005) 34–48.
- [45] Y. Kim, J. Baik, Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul, *Journal of Applied Meteorology* 44 (2005) 591–605.
- [46] S.D. Gedzelman, S. Austin, R. Cermak, N. Stefano, S. Partridge, S. Quesenberry, D.A. Robinson, Mesoscale aspects of the urban heat island around New York City, *Theoretical and Applied Climatology* 75 (2003) 29–42
- [47] F.L. Ludwig, J.H.S. Kealoha, Urban Climatological Studies, Final Rep., Contr. OCD-DAHC-20-67-C-0136, Stanford Res. Inst, Menlo Park, CA (1968) p. 191.
- [48] F.L. Ludwig, Urban air temperatures and their relation to extraurban meteorological measurements, *Amer. Soc. Heat. Refrig. Air-Cond. Eng. Publ. SF 70* (1970) 9-40.
- [49] T. Oke, Overview of interactions between settlements and their environments, WMO experts meeting on Urban and building climatology, WCP-37, WMO, Geneva, Switzerland, 1982.

- [50] H.G. Taha, H. Akbari, D. Sailor, and R. Ritshard, Causes and effect of heat islands: The sensitivity of urban microclimates to surface parameters and anthropogenic heat, Lawrence Berkeley Laboratory Report No. 29864, Lawrence Berkeley, Davis California, USA, 1990.
- [51] V.T. Ca, T. Asaeda and E. Abu, Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park, *Energy and Buildings*, 29 (1998) 83–92.
- [52] C. Yu and W.N. Hien, Thermal benefits of city parks, *Energy and Buildings*, 38 (2006) 105–120.
- [53] I. Zouila, M. Santamouris and A. Diomoudi, Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens, *Environmental Monitoring and Assessment*, 156 (2009) 275–292.
- [54] H.G. Taha, H. Akbari and A. Rosenfield, Vegetation canopy micro-climate: A field project in Davis, California. Lawrence Berkeley Laboratory Report No. 24593, Lawrence Berkeley, Davis, California, USA 1988.
- [55] M. Har, and D.J. Sailor, Assessing causes in spatial variability in urban heat island magnitude, *Proceedings of the Seventh Symposium on the Urban Environment*, San Diego, California, USA, September, 2007.
- [56] R.N. Colvile, E.J. Hutchinson, J.S. Mindell, R.F. Warren, The transport OStor as a source of air, *Atmospheric Environment* 35 (2001) 1537–1565.
- [57] L.H. Watkins, Urban transport and environmental pollution, report TRRL LR455. 1972.
- [58] D.M. Colwill and A.J. Hickman, Measurement of particulate lead on the M4 Motorway at Harlington, Middlesex, Crowthorne 972Middlesex 3rd report, 1981.

- [59] ISF, Određivanje količine emitovanih gasovitih zagađujućih materija poreklom od drumskog saobraćaja primenom COPERT IV modela evropske agencije za životnu sredinu, Institut Saobraćajnog fakulteta, Beograd, 2010.
- [60] R., Ziegler, E.N., Encyclopedia of environmental science and engineering-Volume 1, 2, CRC Press taylor & Francis group, New York, 2006.
- [61] Shere, E., Handbook of air pollution from internal combustion-Pollutant Formation and Control, Academic Press USA, 1998, ISBN: 0-12-639855-0.
- [62] K. Van Weverberg, K. De Ridder, A. Van Rompaey, Modelling the contribution of the Brussels heat island to a long temperature time series, Journal of Applied Meteorology and Climatology 47, (2008) 976-990.
- [63] M.C. Moreno-Garcia, Intensity and form of the urban heat island in Barcelona, International Journal of Climatology 14 (1994) 705-710
- [64] J.P., Montacez, A. Rodriguez and J. I. Jimenez, A study of the urban heat island of Granad, International Journal of Climatology 20 (2000) 899-911
- [65] S.D. Gedzeman, S. Austin, R. Cermak, N. Stefano, S. Partridge, S. Quesenberry, and D.A. Robinson, Mesoscale aspects of the urban heat island around New York City. Theoretical and Applied Climatology 75 (2003) 29-42.
- [66] S.R. Gaffin, C. Rosenzweig, R. Khanbilvardi, L. Parshall, S. Mahani, H. Glickman and D. Hillel, Variations in New York city's urban heat island strength over time and space, Theoretical and applied climatology 94 (2008) 1-11.
- [67] S. Yamashita, Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in metropolitan Tokyo, Atmospheric Environment 30(3) (1996) 429-435

- [68] C. Morris and I. Simmonds, Quantification of the Influences of Wind and Cloud on the Nocturnal urban heat island of a large city, *Journal of applied meteorology* 40(2) (2001) 169-182.
- [69] K. Steinecke, Urban climatological studies in the Reykjavik subarctic environment, Iceland, *Atmospheric Environment* 33 (1999) 4157-4162
- [70] A. Brazel, P. Gober, S.J. Lee, S. Grossman-Clarke, J. Zehnder, B. Hedquist and E. Comparri, Determinants of changes in the regional urban heat island in metropolitan Phoenix (Arizona, USA) between 1990 and 2004, *Climate Research* 33 (2007) 171-182.
- [71] G.D. Jenerette, S.L. Harlan, A. Brazel, N. Jones, L. Larsen and W.L. Stefanov, Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem, *Landscape Ecol* 22 (2007) 353-365.
- [72] M. Kolokotroni and R. Giridharan, Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer, *Solar Energy* 82 (2008) 986-998.
- [73] R. Watkins, Phd Thesis *Mechanical Engineering Brunel University*, UK 2002.
- [74] CIBSE Guide A., *Environmental Design*. UK, 2006.
- [75] W. Nubler, *Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg*, Freiburger. Geographische Hefte, 1979.
- [76]] H. Wanner and J. Hertig, *Temperature and ventilation of small cities in complex terrain (Switzerland)*, Study supported by Swiss National Science Foundation, 1983.
- [77] I. Eliasson, Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use, *Atmospheric Environment*, 30 (3) (1996) 379 - 392.
- [78] K. Klysik and K. Fortuniak, Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment* 33(24) (1999) 3885-3895.

- [79] M. Santamouris, N. Papanikolaou, I. Livada, I. Koronakis, C. Georgakis, A. Argiriou and D. Assimakopoulos, On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings, *Solar Energy* 70 (3) (2001) 201–216.
- [80] J. Unger, Z. Sumeghy, J. Zoboki, Temperature cross-section features in an urban area, *Atmospheric Research* 58 (2001) 117–127.
- [81] A. Lemonsu and V. Masson, Simulation of a summer urban breeze over Paris, *Boundary-Layer Meteorology* 104 (2002) 463–490.
- [82] R. Watkins, J. Palmer, M. Kolokotroni, and P. Littlefair, The London heat island: results from summertime monitoring, *Building Services Engineering Research and Technology* 23(2) (2003) 97–106.
- [83] R. Pongracz, J. Bartholy and Z. Dezso, Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis, *Advances in Space Research* 37(12) (2006) 2191 – 2196.
- [84] П. Катић, Н. Марић, С. Хаџивуковић, Анализа просечних месечних температура ваздуха у Новом Саду у периоду 1881-1981 године, Зборник метеоролошких и хидролошких радова бр.13 Београд, 1986.
- [85] В. Дуцић, Г. Анђелковић, Прилог проучавању постанка и развоја острва топлоте у Београду, Зборник радова научно-стручног скупа Планска и нормативна заштита простора и животне средине, Асоцијација просторних планера Србије, Београд, 2001.
- [86] Ž. Stevanović, I. Lazović, M. Đurović-Petrović, Numerical Simulation of Heat Island Phenomena Related to Traffic Pollution of Urban Atmospheric Layer, (ENRIC2014) The 1st Environment and Natural Resources International Conference 6 – 7 November, 2014.

- [87] D.N. Asimakopoulos, V.D. Assimakopoulos, N. Chrisomallidou, N. Klitsikas, D. Mangold, P. Michel, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, *Energy and Climate in the Urban Built Environment*, James and James Publication, London 2001.
- [88] M. Santamouris, On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings, *Energy and Buildings* 82 (2014) 100-113.
- [89] A. Fanchiotti, M. Zinzi, Impact of cool materials on urban heat islands and on buildings comfort and energy consumption, *ASES Conference* 2012.
- [90] M. Kolokotroni, Y. Zhang, R. Watkins, The London heat island and building cooling design, *Solar Energy* 81 (2007) 102-110.
- [91] M. Street, C. Reinhart, L. Norford, J. Ochsendorf, Urban heat island in Boston –an evaluation of urban air-temperature models for predicting building energy use, *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, France August 26-28, 2013.
- [92] D. Chen, Z. Ren, C.H. Wang, M. Thatcher, X. Wang, Urban Heat Island on Australian Housing Energy Consumption, *Healthy Buildings*, Brisbane, Queensland 2012.
- [93] M. Christenson, H. Manz, D. Gyalistras, Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland, *Energy Conversion and Management* 47 (2006) 671-686.
- [94] J. Kapsomenakis, D. Kolokotsa, T. Nikolaou, M. Santamouris, S.C. Zerefos, Forty years increase of the air ambient temperature in Greece: the impact on buildings, *Energy Conversion and Management* 74 (2013) 353-365.
- [95] ASHRAE Standard 55-2010, Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta 2010.

- [96] P.O. Fanger, Thermal comfort-analysis and applications in environmental engineering, Danish technical press, Copenhagen, Denmark 1970.
- [97] G. Havenith, An individual model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response, *Journal of Applied Physiology* 90 (2001) 1943–1954.
- [98] P. Hoppe, Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort, *Energy and Buildings* 34(6), (2002) 661–665.
- [99] J. Spagnolo and R.D. Dear, A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia, *Building and environment* 38(5) (2003) 721-738.
- [100] P. Hoppe, The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, *International Journal of Biometeorology* 43(2) (1999) 71–75.
- [101] R. De Dear and J. Pickup, An outdoor thermal environment index (OUT_SET*)–part II–applications, *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millennium, Selected Papers from the Conference ICB-ICUC Vol. 99. 2000.*
- [102] D. Fiala, G. Havenith, P. Bröde, B. Kampmann and G. Jendritzky, UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation, *International Journal of Biometeorology*, 56(3) (2012) 429–441.
- [103] P. Brode, E.L. Kruger, F.A. Rossi, D. Fiala, Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI—a case study in Southern Brazil, *International Journal of Biometeorology*, 56(3), (2012). 471–480.
- [104] G. Jendritzky, R. de Dear, G. Havenith, UTCI-Why another thermal index, *International Journal of Biometeorology*, 56(3) (2012) 421–428.











- [105] A. Matzarakis, F. Rutz, H. Mayer, Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model, *International Journal of Biometeorology* 54(2) (2010) 131–139
- [106] W. Yang, N.H. Wong, S.K. Jusuf, Thermal comfort in outdoor urban spaces in Singapore, *Building and Environment* 59 (2013) 426–435.
- [107] K. Pantavou, G. Theoharatos, M. Santamouris, D. Asimakopoulos, Outdoor thermal sensation of pedestrians in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI, *Building and Environment*, 66 (2013) 82-95.
- [108] R.S. Kovats and S. Hajat, Heat stress and public health: a critical review, *Annu. Rev. Public Health* 29 (2008) 41-55.
- [109] <http://www.utci.org/utcineu/utcineu.php>
- [110] International Union of Physiological Sciences - Thermal Commission, Glossary of terms for thermal physiology, *J Therm Biol* 28 (2003) 75-106.
- [111] P. Brode, K. Blazejczyk, D. Fiala, G. Havenith, I. Holmer, G. Jendritzky, K. Kuklane and B. Kampmann, The Universal Thermal Climate Index UTCI Compared to Ergonomics Standards for Assessing the Thermal Environment, *Industrial Health* 51 (2013) 16–24.
- [112] L.A. Kuehn, R.A. Stubbs, R.S. Weaver, Theory of the globe thermometer, *Journal of Applied Physiology* 29 (1970) 750–757.
- [113] ASHRAE Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2001.
- [114] D. Kostadinović, I. Lazović, M. Živković, Ž. Stevanović and S. Stefanović, Influence of Window U-value on Energy Performance of School Building, 17th Symposium on





Thermal Science and Engineering of Serbia, Sokobanja, October 20 - 23. 2015. 586-593.
ISBN: 978-86-6055-076-9.

- [115] Pope, S.B., Turbulent flows. 2000.
- [116] Ж. Стевановић, Нумерички аспекти турбулентног преноса импулса и топлоте, Универзитет у Нишу, Ниш 2008.
- [117] D.O. Staley and G.M. Jurica,. Effective emissivity under clear skies. Journal of Applied Meteorology 11(2) (1972) 349-356.
- [118] J. Franke, A. Hellsten, H. Schlünzen and B. Carissimo, Best Practice Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment: COST Action 732, Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models 2007.
- [119] Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa and T. Shirasawa, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 96 (2008) 1749-1761
- [120] <http://www.cham.co.uk/>
- [121] www.designbuilder.co.uk
- [122] Lawrence Berkeley National Laboratory, EnergyPlus input output reference: the encyclopedic reference to EnergyPlus input and output, Berkely: LBL; 2012
- [123] T.M McClellan and C.O Pedersen, "Investigation of Outside Heat Balance Models for Use in a Heat Balance Cooling Load Calculation Procedure," ASHRAE Transactions, vol. 103, pp. 469-484, 1997
- [124] R.J Liesen and C.O Pedersen, "An Evaluation of Inside Surface Heat Balance Models for Cooling Load Calculations," ASHRAE Transactions, vol. 103, pp. 485-502, 1997.

- [125] R.D Taylor, C.O Pedersen, D Fisher, R Liesen, and L Lawrie, "Impact of simultaneous simulation of building and mechanical systems in heat balance based energy analysis programs on system response and control," in Proc. of 3rd IBPSA Conference, Nice, France, August 20-22, 1991, 1991, pp. 227-234
- [126] SRPS EN ISO 13790:2010, Енергетске перформансе зграда - Прорачун енергије која се користи за грејање и хлађење простора;
- [127] Правилник о енергетској ефикасности зграда. Службени гласник РС, бр. 61/2011);
- [128] S. Stefanović, I. Lazović, Ž. Stevanović, N. Kurtović-Folić, D. Konstadinović, Comparative analysis of calculated and simulated annual energy demands for building heating – the college of textile in Belgrade case study, BEST 2016 - The 1st international conference on buildings, energy I, systems and technology, Belgrade, November 2-4, 2016.
- [129] Lazović, I., Stevanović Ž., Jovašević - Stojanović, M., Živković, M. Banjac, M., Impact of CO₂ concentration on indoor air quality and correlation with relative humidity and indoor air temperature in school buildings in Serbia, THERMAL SCIENCE, 2016, Vol. 20, Suppl. 1, pp. S297-S307.

Прилог 1 Списак опреме који је коришћен приликом мерења

Слика инструмента	Назив	Мерни параметри	Опсег	Грешка мерења
	Testo 435	мерење параметара који зависе од сонде	-	-
	Testo 635	мерење параметара који зависе од сонде	-	-
	Флуксметар	топлотни флукс	-2000 to +2000 W/m ²	± 3 %
	IAQ сонда	температура, релативна влажност, угљен-диоксида и атм. притиска	-20 – 70°C, 0-100%, 0-10000ppm, 600-1150 hPa	±0,3 °C ±2 % RH ±3% CO ₂ (0-5000 ppm) ±5% CO ₂ (5001-10000 ppm)
	Термопар типа К	температура	-200 °C to +1350 °C	
	Радио-сонда	температура, влага	-20 – 70°C, 0-100%,	±0,3 °C ±2 % RH
	Радио-сонда са термопаром	температура	-20 – 70°C	
	Контактна сонда	температура	-60 – 300 °C	± 0.5%
	Testo 445	температура, влага, угљен-диоксид	20 – 70°C, 0-100% 0 – 9999 ppm	±0.2 °C (10-40°C) ±0.4 °C (remaining range) ±2 %RH ±3% CO ₂ (0-5000 ppm) ±5% CO ₂ (5001-10000 ppm)
	Testo 174H	температура и влага	-20 – 70°C, 0-100 %	±0.5 °C ±3 %RH

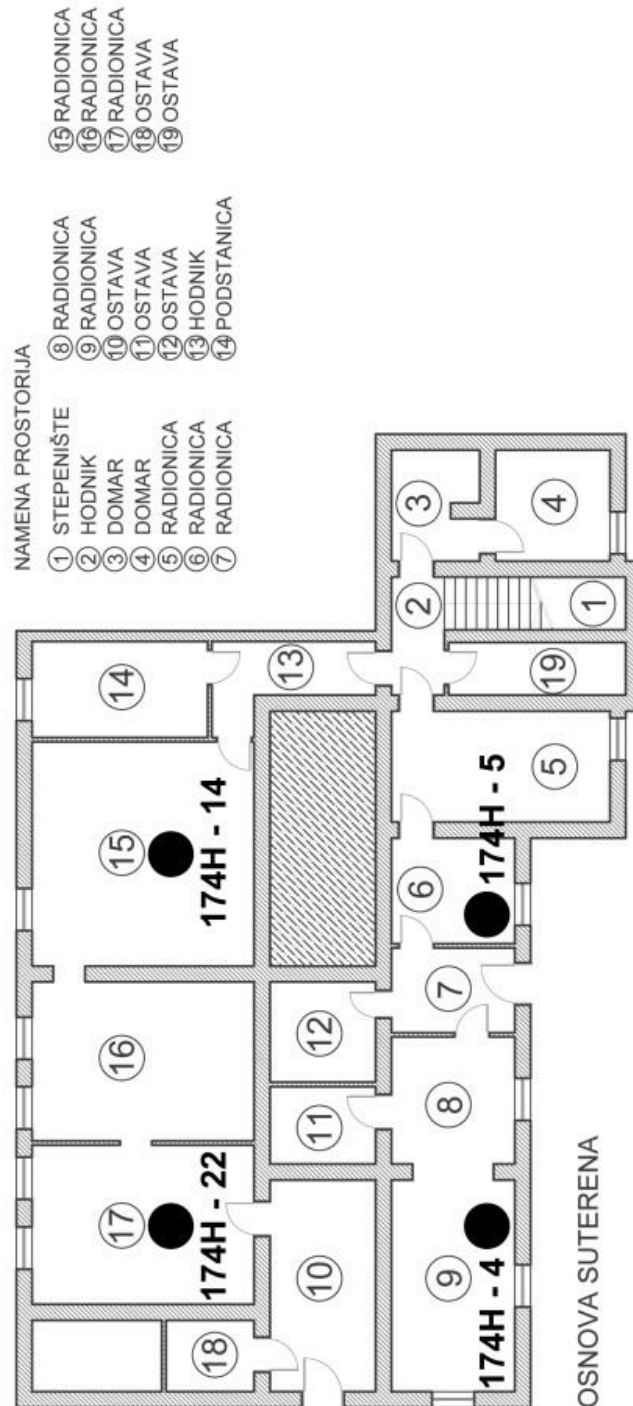
	FLIR Exx series	температура	-20 °C do +650 °C	±2°C или ±2%
	Црна кугла	Температура црне кугле	-0 - 120°C,	±0.5 °C
	Анемометар сонда	брзина струјања	0 - 20 m/s	± 0.4%
	Testo 830 T2	Бесконтактно мерење температуре чврстих површина	-30 - 400°C,	± 0.5%

Прилог 2 Стандарди коришћени за мерење и прорачун тражених параметара

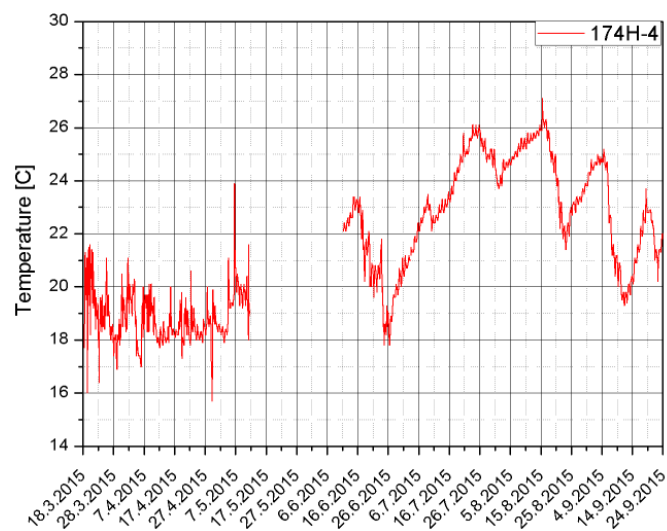
Скраћеница	Пун назив стандарда
SRPS EN ISO 13789:2008	2 nd Ed. <i>Thermal performance of buildings – Transmission and ventilation heat transfer coefficients – Calculation method</i> (Топлотне перформансе зграда – Коефицијенти преноса топлоте при пролазу и проветравању – Метода прорачуна)
SRPS EN ISO 6946:2007	2 nd Ed. <i>Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method</i> (Компоненте и елементи зграде – Топлотна отпорност и коефицијент пролаза топлоте – Метода прорачуна)
SRPS EN ISO 7345	<i>Thermal insulation – Physical quantities and definitions</i> (Топлотна изолација - Физичке величине и дефиниције)
SRPS EN ISO 10077-1:2007	1 st Ed. <i>Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 1: General</i> (Топлотне перформансе прозора, врата и капака - Прорачун коефицијента пролаза топлоте - Део 1: Опште)
SRPS EN ISO 10077-2:2003	1 st Ed., <i>Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames</i> (Топлотне перформансе прозора, врата и капака - Прорачун коефицијента пролаза топлоте - Део 2: Нумеричка метода за оквире)
SRPS EN ISO 10211:2007	1 st Ed. <i>Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations</i> (Топлотни мостови у грађевинској конструкцији – Топлотни протоци и површинске температуре – Детаљни прорачуни)
SRPS EN ISO 13370:2007	2 nd Ed. <i>Thermal performance of buildings – Heat transfer via the ground – Calculation methods</i> (Топлотне перформансе зграда – Преношење топлоте преко тла – Методе прорачуна)
SRPS EN ISO 14683	<i>Thermal bridges in building construction – Linear thermal transmittance – Simplified methods and default values</i> (Топлотни мостови у грађевинској конструкцији – Линијски коефицијент пролаза топлоте – Упростићене методе и одговарајуће вредности)
SRPS ISO 9869	<i>Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance</i> (Топлотна изолација – Елементи зграде – Мерење топлотне отпорности и коефицијента пролаза топлоте на лицу места – Део 1: Метода топлотног флуксметра)
SRPS EN ISO 12569:2014	<i>Thermal insulation in buildings – Determination of air change in buildings – Tracer gas dilution method.</i> (Топлотне перформансе зграда и материјала – Одређивање специфичног интензитета протока ваздуха у зградама – Метода разблаженог гасног маркера)
SRPS EN 12831	<i>Heating systems in buildings - Method for calculation of the design heat load</i> (Системи грејања у зградама – Метода прорачуна пројектног топлотног оптерећења)
SRPS EN ISO 7726:2008	<i>Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities</i> (Ергономија топлотне средине – Инструменти за мерење физичких величина) CIBSE, Guide A. "Environmental design." The Chartered Institution of Building Services Engineers, London (2006).
SRPS EN 13363-1:2008	<i>Solar protection devices combined with glazing - Calculation of solar and light transmittance - Part 1: Simplified method</i> (Елементи за заштиту од осунчавања комбинована са застакљењем - Прорачун соларне пропустљивости и пропустљивости светлости – Део 1: Поједностављена метода)

Прилог 3

Позиције логера, графици, минималне, максималне и средње вредности температуре по месецима свих логера којима је мерена температа ваздуха у унутрашњим просторијама објекта Високе текстилне струковне школе (ДТМ).

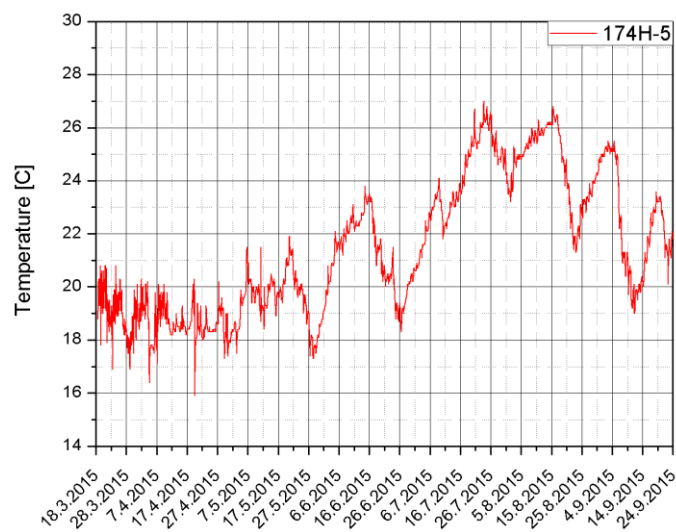


Слика ПЗ.1 Основа сутерена објекта Високе текстилне струковне школе (ДТМ) са позицијама сетованих 174Н логера



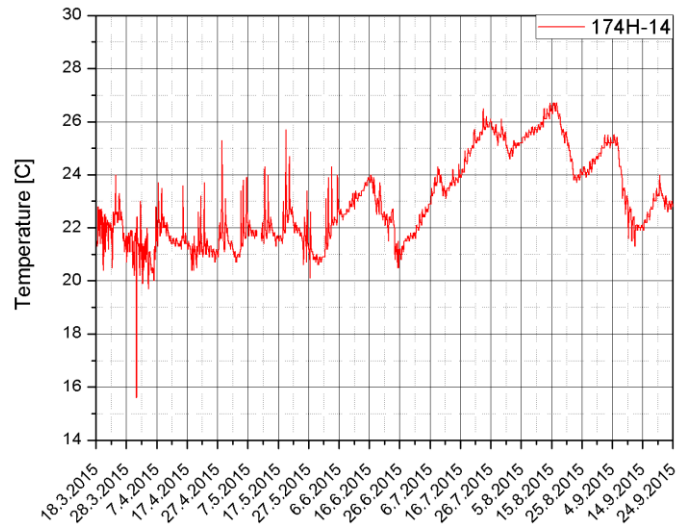
Логер	174H-4	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [C]	март	19,1	21,6	16,0
	април	18,6	21,1	15,7
	мај	19,3	23,9	17,9
	јун	20,9	23,4	17,8
	јул	23,6	26,1	20,4
	август	24,4	27,1	21,4
	септембар	22,0	25,2	19,3

Слика ПЗ.2 Вредност температуре мерене логером 174H-4



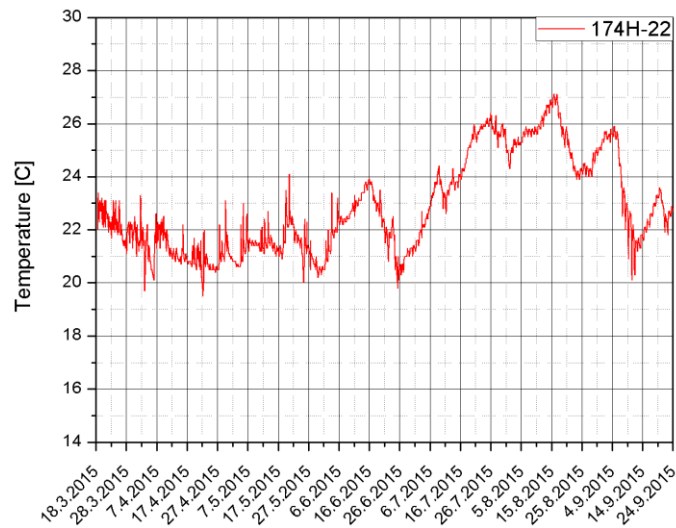
Логер	174H-5	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [C]	март	19,0	20,8	16,9
	април	18,6	20,3	15,9
	мај	19,5	21,9	17,3
	јун	21,2	23,8	18,3
	јул	23,9	27,0	20,6
	август	24,6	26,8	21,3
	септембар	22,2	25,5	19,0

Слика ПЗ.3 Вредност температуре мерене логером 174H-5



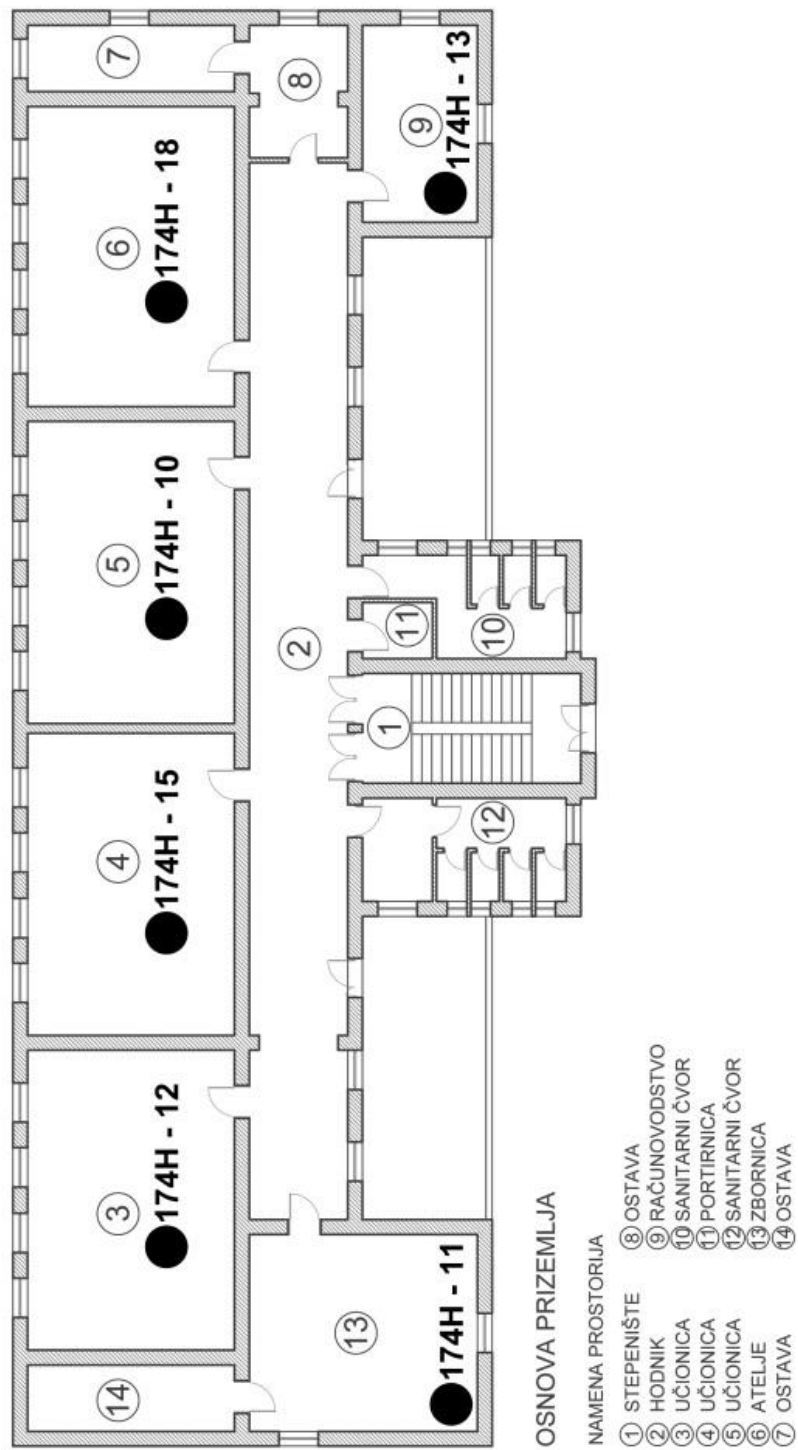
Логер	174H-14	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [°C]	март	21,8	24,0	15,6
	април	21,4	25,3	19,7
	мај	21,7	25,7	20,1
	јун	22,4	24,3	20,5
	јул	24,3	26,5	21,6
	август	25,2	26,7	23,7
	септембар	23,3	25,5	21,3

Слика ПЗ.4 Вредност температуре мерене логером 174H-14

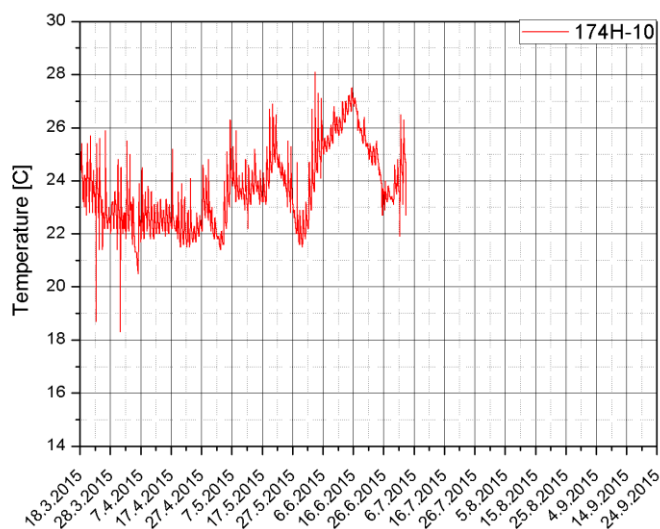


Логер	174H-22	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [°C]	март	22,2	23,4	21,0
	април	21,1	23,3	19,5
	мај	21,3	24,1	20,0
	јун	22,1	23,9	19,8
	јул	24,3	26,4	21,2
	август	25,4	27,1	23,9
	септембар	23,2	25,9	20,1

Слика ПЗ.5 Вредност температуре мерене логером 174H-22

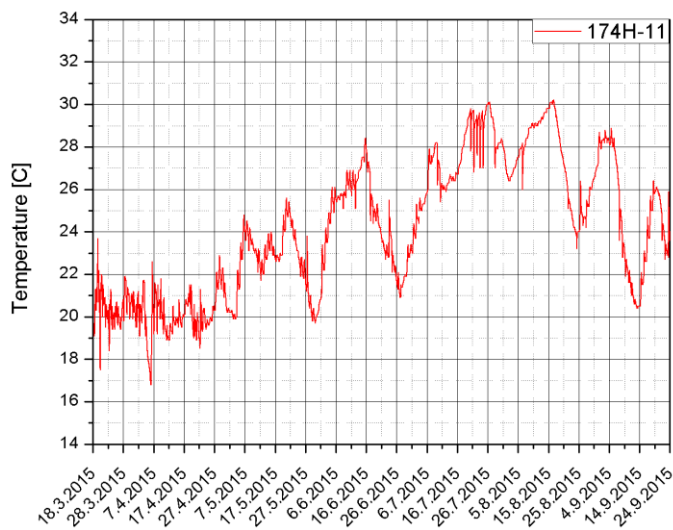


Слика ПЗ.6 Основа приземља објекта Високе текстилне струковне школе (ДТМ) са позицијама сетованих 174Н логера



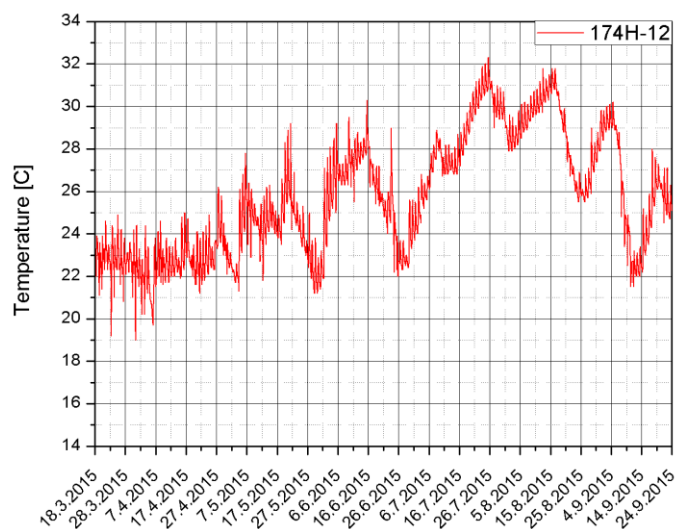
Логер	174H-10	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [°C]	март	23,3	25,9	18,3
	април	22,5	25,5	20,5
	мај	23,5	26,9	21,4
	јун	25,2	28,1	22,2
	јул	24,4	26,5	21,9
	август	-	-	-
	септембар	-	-	-

Слика ПЗ.7 Вредност температуре мерене логером 174H-10



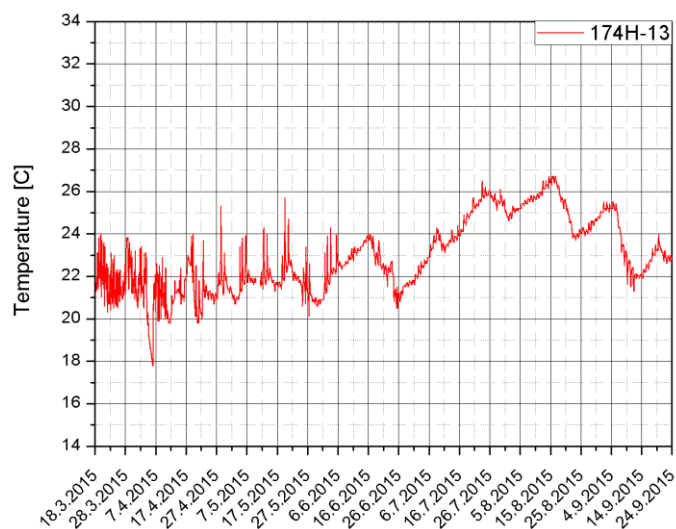
Логер	174H-11	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [°C]	март	20,5	23,7	17,5
	април	20,1	22,9	16,8
	мај	22,5	25,6	19,7
	јун	24,5	28,4	20,8
	јул	27,4	30,1	23,0
	август	27,3	30,2	23,2
	септембар	24,5	28,9	20,4

Слика ПЗ.8 Вредност температуре мерене логером 174H-11



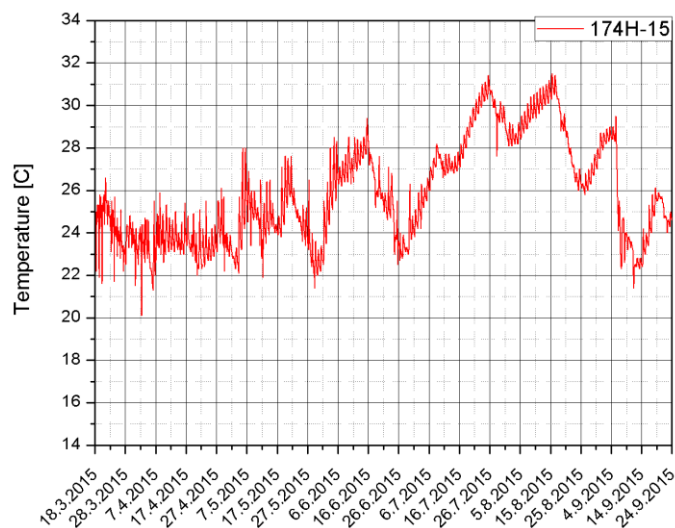
Логер	174H-12	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [°C]	март	22,8	24,9	19,0
	април	22,8	26,2	19,7
	мај	24,2	29,2	21,2
	јун	25,9	30,3	21,9
	јул	28,4	32,3	23,7
	август	28,7	31,8	25,5
	септембар	25,7	30,2	21,5

Слика ПЗ.9 Вредност температуре мерене логером 174H-12



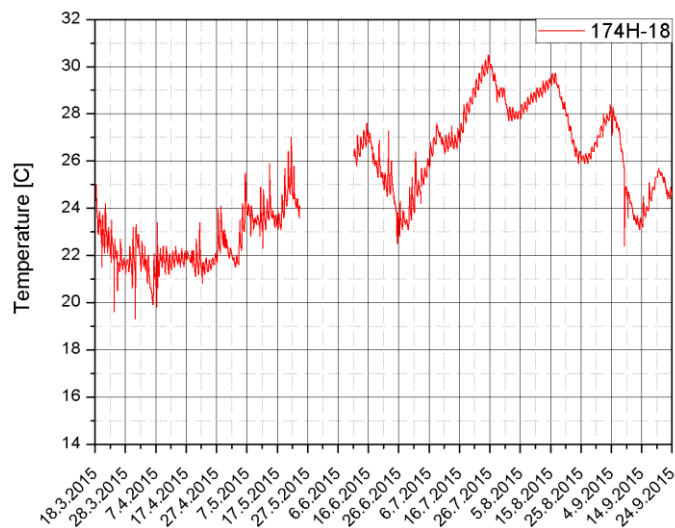
Логер	174H-13	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [°C]	март	21,9	24	20,3
	април	21,2	25,3	17,8
	мај	21,7	25,7	20,1
	јун	22,4	24,3	20,5
	јул	24,3	26,5	21,6
	август	25,2	26,7	23,7
	септембар	23,3	25,5	21,3

Слика ПЗ.10 Вредност температуре мерене логером 174H-13



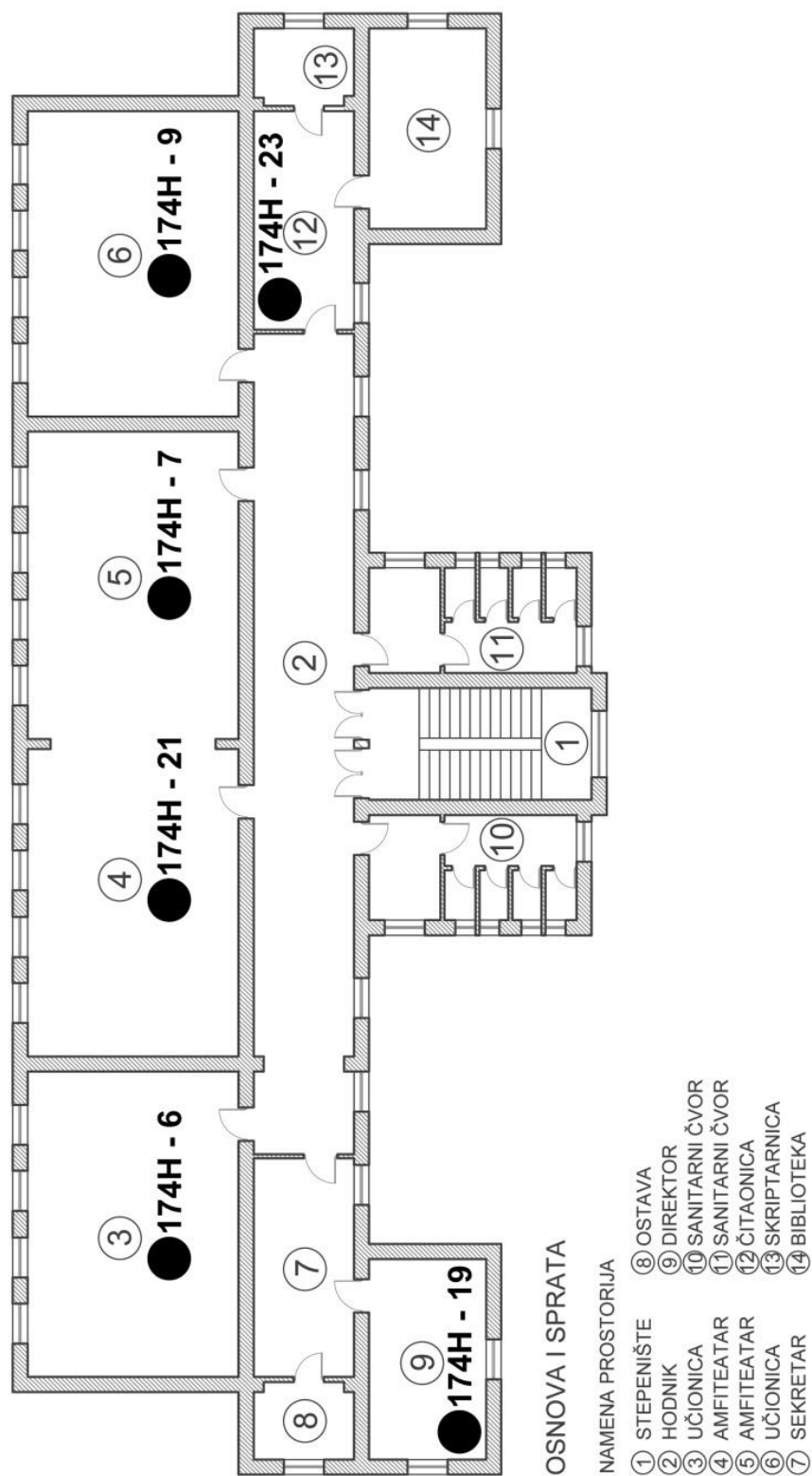
Логер	174H-15	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [°C]	март	24,2	26,6	21,5
	април	23,6	26,1	20,1
	мај	24,4	28,0	21,4
	јун	28,1	31,4	23,8
	јул	28,6	31,5	25,8
	август	28,6	31,5	25,8
	септембар	25,0	29,5	21,4

Слика ПЗ.11 Вредност температуре мерене логером 174H-15

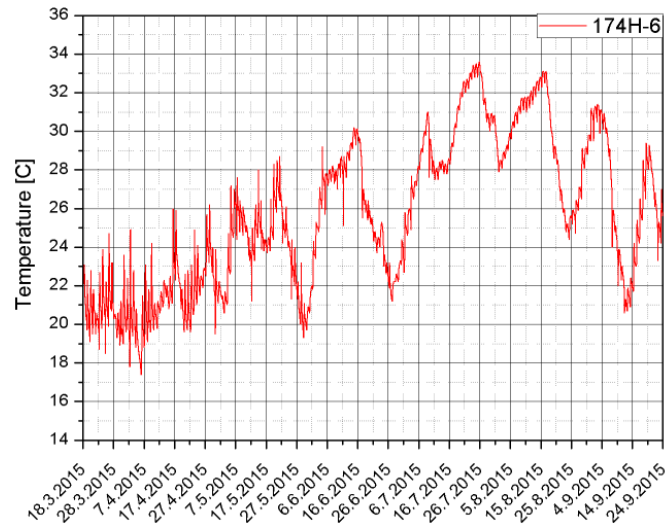


Логер	174H-18	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [°C]	март	22,3	25,0	19,3
	април	21,8	24,1	19,8
	мај	23,6	27,0	21,5
	јун	27,6	30,5	23,8
	јул	27,6	30,5	23,8
	август	27,9	29,7	25,9
	септембар	25,4	28,4	22,4

Слика ПЗ.12 Вредност температуре мерене логером 174H-18

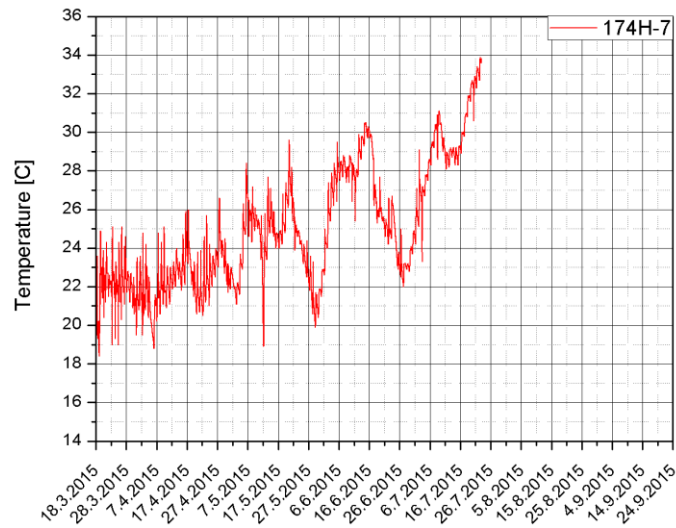


Слика ПЗ.13 Основа првог спрата објекта Високе текстилне струковне школе (ДТМ) са позицијама сетованих 174Н логера



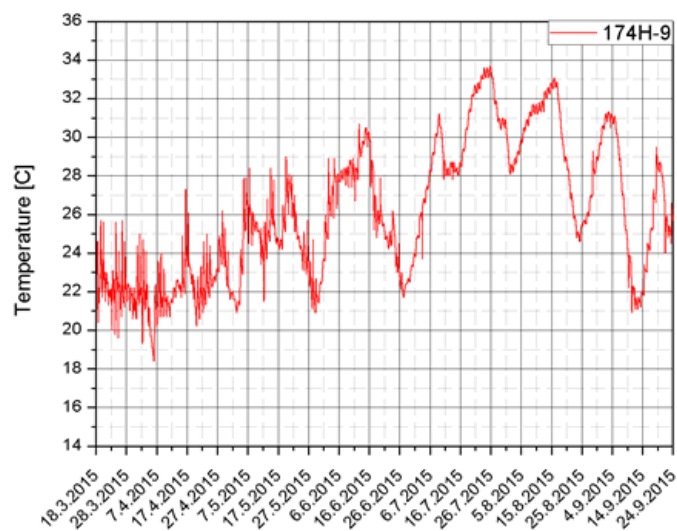
Логер	174H-6	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [C]	март	20.7	24.7	18.5
	април	21.4	26.2	17.4
	мај	23.8	28.7	19.3
	јун	26	30.2	21.2
	јул	29.7	33.6	22.7
	август	29.4	33.1	24.4
	септембар	26.3	31.4	20.6

Слика ПЗ.14 Вредност температуре мерене логером 174H-6



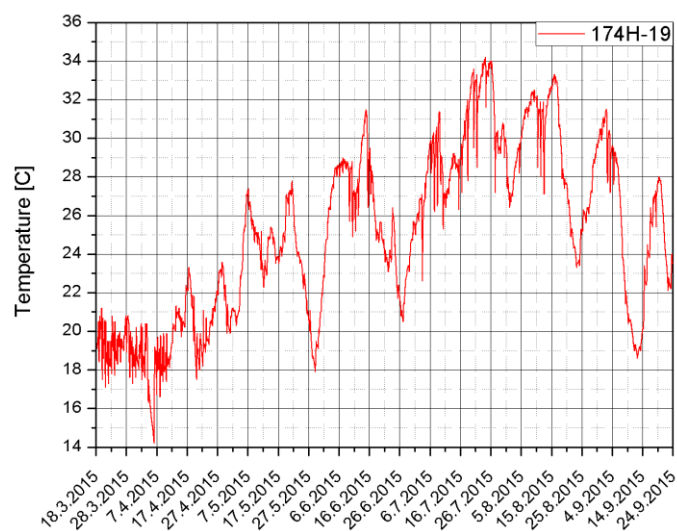
Логер	174H-7	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [C]	март	22	25.1	18.4
	април	22.4	26.6	18.8
	мај	24.1	29.6	18.9
	јун	26.4	30.5	22
	јул	29.5	33.9	23.3
	август	-	-	-
	септембар	-	-	-

Слика ПЗ.15 Вредност температуре мерене логером 174H-7



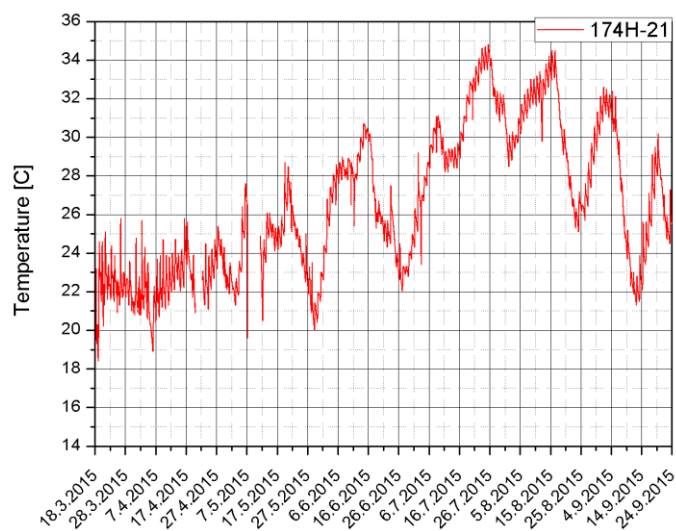
Логер	174H-9	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [C]	март	22.2	25.7	19.6
	април	22.2	27.3	18.4
	мај	24.3	29	20.9
	јун	26.3	30.7	21.7
	јул	29.9	33.7	23.7
	август	29.4	33.1	24.6
	септембар	26.3	31.3	20.9

Слика ПЗ.16 Вредност температуре мерене логером 174H-9



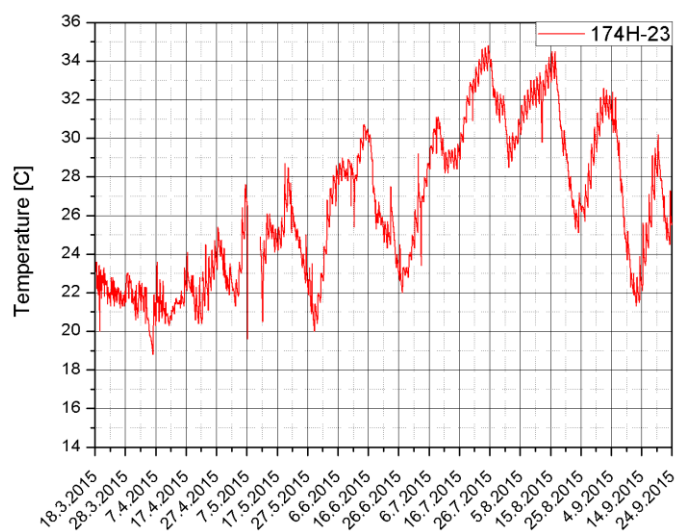
Логер	174H-19	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [C]	март	19.2	21.2	17.1
	април	19.8	23.6	14.2
	мај	23.4	27.8	17.9
	јун	26.1	31.5	20.5
	јул	29.8	34.2	22.6
	август	29.1	33.3	23.3
	септембар	24.6	31.5	18.6

Слика ПЗ.17 Вредност температуре мерене логером 174H-19



Логер	174H-21	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [°C]	март	22.2	25.8	18.4
	април	22.7	25.8	18.9
	мај	24	28.7	19.6
	јун	30.5	34.8	23.4
	јул	30.2	34.5	25.1
	август	30.2	34.5	25.1
	септембар	26.7	32.6	21.3

Слика ПЗ.18 Вредност температуре мерене логером 174H-21



Логер	174H-23	Средња вредност	Макс. вредност	Мин. Вредност
Температура [°C]	март	22.1	23.6	20
	април	21.9	25.4	18.8
	мај	24	28.7	19.6
	јун	30.5	34.8	23.4
	јул	30.5	34.8	23.4
	август	30.2	34.5	25.1
	септембар	26.7	32.6	21.3

Слика ПЗ.19 Вредност температуре мерене логером 174H-23

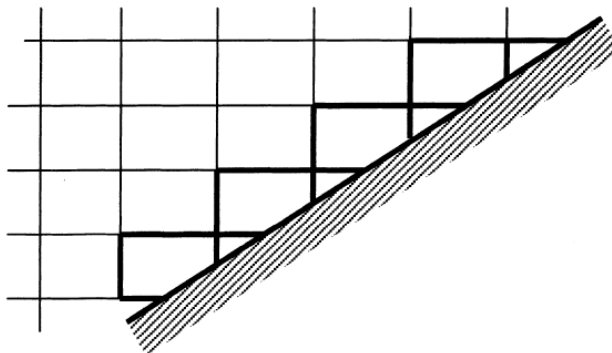
Прилог 4 Резултати нуемричких симулација одређивања вредности концентрације CO₂, CO, NO_x, PM и VOC у зависности од интензитета саобраћаја

Место мерења	Загађиваћ [g]	06:00 - 07:00	07:00 - 08:00	08:00 - 09:00	09:00 - 10:00	10:00 - 11:00	11:00 - 12:00	12:00 - 13:00	13:00 - 14:00	14:00 - 15:00	15:00 - 16:00	16:00 - 17:00	17:00 - 18:00	18:00 - 19:00	19:00 - 20:00	20:00 - 21:00	21:00 - 22:00
Раскрсницу 1-Цвијићева-Здравка Челара-Старине Новака	CO ₂	117943	229180	245339	212646	211545	230286	240369	240175	228025	245698	274836	224342	184396	159019	151491	120862
	CO	168,7	369,8	411,1	356,2	343,3	400,1	412,0	414,3	424,9	445,9	499,9	432,3	325,3	322,9	288,8	219,6
	NO _x	265,6	406,4	452,7	372,5	383,7	428,8	452,0	453,5	390,6	406,2	447,3	381,5	327,7	292,9	274,3	220,5
	PM	4,8	7,3	8,3	7,0	7,1	8,2	8,6	8,6	7,4	7,5	8,2	7,2	5,9	5,6	5,1	4,0
	VOC	26,9	66,6	87,1	77,0	66,2	93,1	99,5	99,5	102,7	111,8	119,3	109,5	71,0	84,5	78,1	52,2
Улица 1-Здравка Челара	CO ₂	43298	94691	119007	110435	106533	116204	122476	126806	116064	114700	158119	118277	91670	70250	68790	48804
	CO	61,9	152,8	199,4	185,0	172,9	201,9	209,9	218,7	216,3	208,2	287,6	227,9	161,7	142,7	131,2	88,7
	NO _x	97,5	167,9	219,6	193,5	193,2	216,4	230,3	239,4	198,8	189,6	257,3	201,1	162,9	129,4	124,6	89,1
	PM	1,8	3,0	4,0	3,6	3,6	4,1	4,4	4,5	3,8	3,5	4,7	3,8	3,0	2,5	2,3	1,6
	VOC	9,9	27,5	42,3	40,0	33,4	47,0	50,7	52,6	52,3	52,2	68,6	57,7	35,3	37,3	35,5	21,1
Улица 2-Цвијићева (од Бул. Деспота Стефана до раскрснице 1)	CO ₂	77485	148002	140705	147351	150975	167355	170114	173178	145184	158414	154333	129404	106457	119931	109373	89502
	CO	104,8	228,6	222,7	246,8	245,0	290,7	291,6	298,7	254,5	272,7	273,1	235,6	183,1	243,6	208,5	162,6
	NO _x	185,2	275,2	267,8	258,1	273,8	311,6	319,9	327,0	269,2	279,4	267,5	230,5	190,9	220,9	198,0	163,3
	PM	3,3	4,9	4,8	4,9	5,0	6,0	6,1	6,2	5,0	5,1	4,9	4,2	3,4	4,2	3,7	3,0
	VOC	15,6	37,9	41,9	53,3	47,3	67,7	70,4	71,8	60,1	59,6	63,0	53,5	39,1	63,7	56,4	38,6
Улица 3-Цвијићева (од раскрснице 2 до Рузвелтове)	CO ₂	56499	115047	117740	78871	83854	84709	93777	86506	122731	132894	135614	124390	101448	72172	69851	58210
	CO	78,4	183,1	193,7	132,1	136,1	147,2	160,7	149,2	219,3	232,6	229,2	224,4	174,9	146,6	133,2	105,8
	NO _x	132,0	221,7	229,6	138,2	152,1	157,7	176,3	163,3	230,8	245,7	239,3	227,5	189,3	132,9	126,5	106,2
	PM	2,4	4,0	4,2	2,6	2,8	3,0	3,4	3,1	4,3	4,5	4,3	4,2	3,4	2,5	2,3	1,9
	VOC	12,3	33,6	41,4	28,6	26,3	34,2	38,8	35,9	51,4	54,7	49,7	54,2	39,4	38,4	36,0	25,1
Улица 4-Старине Новака	CO ₂	52553	98544	101432	89688	79113	85857	91551	90591	100455	108683	116760	95745	80049	66971	62527	55607
	CO	67,7	156,5	167,7	146,6	126,1	151,1	158,6	152,5	186,0	194,1	210,0	182,3	144,5	123,1	115,1	105,1
	NO _x	134,0	186,9	190,3	162,6	146,4	160,0	172,2	168,2	181,0	191,7	201,4	170,9	145,2	122,8	116,7	102,3
	PM	2,4	3,3	3,4	3,0	2,6	3,0	3,2	3,1	3,4	3,5	3,7	3,2	2,6	2,2	2,1	1,9
	VOC	9,8	27,2	32,3	29,0	22,4	33,1	36,2	33,2	46,8	44,2	51,1	46,3	33,0	28,4	29,6	26,0
Раскрсницу 2-27 Марга-Старине Новака	CO ₂	98936	184355	176695	164050	154413	154527	176841	173478	219759	219190	203433	188740	171030	161180	141348	125444
	CO	120,9	289,2	287,9	261,6	241,5	275,8	310,0	284,5	405,0	386,5	360,8	355,6	314,7	274,3	253,0	243,2
	NO _x	265,9	367,2	337,3	307,1	292,0	288,0	332,7	316,1	411,5	406,0	374,3	350,7	315,5	294,7	270,1	232,1
	PM	4,8	6,5	6,0	5,5	5,1	5,3	6,1	5,6	7,7	7,4	6,9	6,6	5,7	5,2	4,9	4,3
	VOC	16,6	49,0	49,4	46,9	38,6	56,2	66,3	54,5	105,1	80,7	89,8	90,4	74,7	56,2	62,1	61,9
Улица 5-Краљице Марије	CO ₂	32468	77183	83443	76198	81135	81072	93025	90865	98119	95538	95777	92580	86187	86346	74543	63826
	CO	47,3	122,8	138,6	121,5	126,9	144,7	163,1	149,0	188,9	181,2	182,0	177,8	170,9	146,9	133,4	123,7
	NO _x	85,8	158,0	165,7	142,6	153,4	151,1	175,0	165,6	185,8	181,8	180,0	176,8	161,5	157,9	142,4	118,1
	PM	1,6	2,8	3,0	2,6	2,7	2,8	3,2	3,0	3,5	3,4	3,4	3,3	3,0	2,8	2,6	2,2
	VOC	8,2	23,3	26,5	21,8	20,3	29,5	34,9	28,6	51,2	42,6	49,8	45,9	46,0	30,1	32,8	31,5
Улица 6-Београдска	CO ₂	77046	125548	117344	103035	88937	88995	104530	104180	141862	145669	129782	122577	107948	102097	82160	76703
	CO	94,2	196,9	191,2	164,3	139,1	158,9	183,2	170,8	261,4	256,9	230,2	230,9	198,6	173,7	147,1	148,7
	NO _x	207,1	250,0	224,0	192,9	168,2	165,9	196,7	189,8	265,6	269,8	238,8	227,8	199,2	186,7	157,0	141,9
	PM	3,7	4,4	4,0	3,5	2,9	3,1	3,6	3,4	5,0	4,9	4,4	4,3	3,6	3,3	2,8	2,6
	VOC	12,9	33,4	32,8	29,5	22,2	32,4	39,2	32,7	67,8	53,6	57,3	58,7	47,1	35,6	36,1	37,8
Улица 7-27. Марга	CO ₂	17775	41000	48171	45984	47921	46783	53852	52687	60530	60261	58844	52531	47939	44549	42275	33928
	CO	22,1	62,5	75,5	72,1	74,4	80,0	89,9	84,8	106,0	103,0	102,5	94,1	87,1	74,5	74,2	61,5
	NO _x	46,0	81,8	92,0	86,4	90,5	85,5	100,2	96,6	112,1	110,0	106,7	96,2	87,4	81,2	79,3	63,6

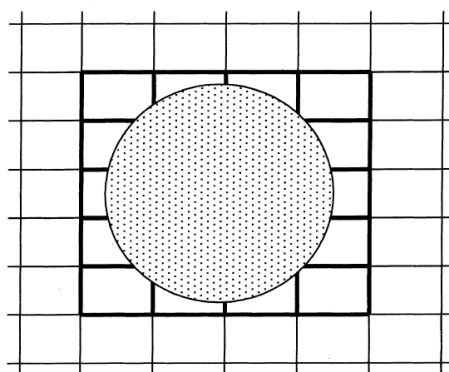
	PM	0,8	1,4	1,6	1,5	1,6	1,6	1,8	1,7	2,1	2,0	1,9	1,8	1,6	1,4	1,4	1,1
	VOC	3,0	10,0	12,3	12,2	12,2	15,6	17,6	15,8	24,6	20,5	23,1	21,1	19,6	14,3	16,6	14,2
Раскрсницу 3-27 Марта-Таковска	CO ₂	17820	33130	47817	44630	43700	44248	52408	52130	57625	58696	60817	54479	46630	42434	37382	30841
	CO	22,8	46,8	70,3	67,8	66,8	69,8	80,0	81,3	91,8	95,2	102,8	89,8	83,0	68,8	63,2	48,7
	NO _x	42,9	66,4	91,4	84,4	82,4	78,2	95,6	96,4	104,8	104,6	107,7	97,6	83,4	77,0	67,5	59,1
	PM	0,8	1,2	1,6	1,5	1,5	1,4	1,7	1,7	1,9	1,9	1,9	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0
	VOC	3,2	6,4	10,3	10,3	11,4	12,5	12,8	14,4	16,5	17,3	19,0	15,4	16,8	11,7	11,2	8,6
Улица 8-Таковска (од раскрснице 3 до Јаше Продановића)	CO ₂	86610	103318	100075	97420	91189	86034	91174	93989	107483	102773	100212	102410	97840	88607	74052	75377
	CO	113,2	147,3	152,6	142,8	136,8	133,0	136,7	144,8	163,8	161,1	161,4	159,0	157,9	135,7	116,5	112,2
	NO _x	197,0	200,5	192,3	187,3	174,9	157,9	170,9	178,4	201,6	190,5	179,6	192,2	180,7	166,3	139,4	147,2
	PM	3,5	3,5	3,5	3,4	3,2	2,8	3,1	3,2	3,6	3,4	3,1	3,3	3,1	2,8	2,4	2,5
	VOC	15,0	19,5	23,7	20,3	20,7	23,5	21,9	25,1	27,0	26,1	26,8	25,7	26,1	20,7	18,3	16,6
Улица 9-Таковска (од раскрснице 3 до Светогорске)	CO ₂	54200	63872	61684	58627	53937	50795	56500	54940	64949	61212	60866	58041	55867	50065	49499	41867
	CO	67,5	90,6	89,2	89,1	82,5	80,2	86,3	85,7	103,9	98,5	103,4	96,1	95,8	81,2	83,7	66,0
	NO _x	137,0	128,1	120,7	110,8	101,7	89,7	103,1	101,6	125,4	113,1	110,7	107,3	100,8	90,8	89,4	80,3
	PM	2,5	2,2	2,1	2,0	1,9	1,6	1,8	1,8	2,3	2,0	2,0	1,9	1,8	1,6	1,6	1,4
	VOC	9,0	12,4	12,8	13,6	14,1	14,4	13,8	15,2	21,1	17,3	21,0	17,0	19,5	13,8	14,8	11,7
Улица 10-Џорџа Вашингтона	CO ₂	35640	66259	95635	89259	87400	88495	104817	104259	115250	117393	121634	108957	93260	84867	74764	61683
	CO	45,6	93,6	140,6	135,7	133,6	139,7	160,1	162,6	183,6	190,4	205,7	179,6	166,0	137,6	126,4	97,3
	NO _x	85,8	132,7	182,7	168,8	164,9	156,3	191,2	192,8	209,6	209,2	215,4	195,2	166,8	153,9	135,0	118,3
	PM	1,5	2,3	3,3	3,0	3,0	2,8	3,4	3,5	3,7	3,7	3,8	3,4	3,0	2,7	2,3	2,1
	VOC	6,3	12,7	20,6	20,6	22,8	25,0	25,7	28,9	32,9	34,6	38,0	30,8	33,6	23,3	22,4	17,2
Раскрсницу 4- Таковска-Светогорска	CO ₂	135304	193979	197061	-	-	-	-	-	198724	193979	199242	194369	180215	-	-	-
	CO	164,4	276,6	280,7	-	-	-	-	-	319,1	310,0	340,1	323,3	297,3	-	-	-
	NO _x	356,4	389,2	394,4	-	-	-	-	-	405,9	370,6	371,8	369,6	328,0	-	-	-
	PM	6,4	6,7	6,9	-	-	-	-	-	7,4	6,5	6,7	6,5	5,8	-	-	-
	VOC	20,8	38,3	39,6	-	-	-	-	-	72,6	52,7	75,0	59,0	61,1	-	-	-
Улица 11-Мајора Илића	CO ₂	11120	24151	25632	-	-	-	-	-	30173	25694	26726	30276	27050	-	-	-
	CO	13,5	34,4	36,5	-	-	-	-	-	48,4	41,1	45,6	50,4	44,6	-	-	-
	NO _x	29,3	48,5	51,3	-	-	-	-	-	61,6	49,1	49,9	57,6	49,2	-	-	-
	PM	0,5	0,8	0,9	-	-	-	-	-	1,1	0,9	0,9	1,0	0,9	-	-	-
	VOC	1,7	4,8	5,1	-	-	-	-	-	11,0	7,0	10,1	9,2	9,2	-	-	-
Улица 12-Таковска (од раскрснице 4 до Билевара краља Александра)	CO ₂	169307	212855	211752	-	-	-	-	-	212250	209250	211794	200442	187840	-	-	-
	CO	205,8	303,5	301,7	-	-	-	-	-	340,8	334,4	361,5	333,5	309,9	-	-	-
	NO _x	446,0	427,1	423,8	-	-	-	-	-	433,5	399,8	395,2	381,1	341,8	-	-	-
	PM	8,0	7,4	7,4	-	-	-	-	-	7,9	7,1	7,1	6,7	6,0	-	-	-
	VOC	26,1	42,0	42,5	-	-	-	-	-	77,5	56,8	79,7	60,8	63,7	-	-	-
Раскрсницу 5- Рузвелтова-Џвијићева	CO ₂	144105	284959	296152	-	-	-	-	-	272975	301608	308739	282281	229387	-	-	-
	CO	192,6	449,2	481,5	-	-	-	-	-	476,5	516,3	501,2	490,8	390,2	-	-	-
	NO _x	350,7	577,9	596,9	-	-	-	-	-	537,5	592,9	566,8	535,6	439,3	-	-	-
	PM	6,3	10,4	11,0	-	-	-	-	-	10,0	10,8	10,1	9,8	7,9	-	-	-
	VOC	29,7	83,3	103,6	-	-	-	-	-	109,8	116,5	102,5	115,1	89,4	-	-	-
Улица 13-Рузвелтова	CO ₂	46994	81517	82280	-	-	-	-	-	71229	76336	77843	73699	61653	-	-	-
	CO	70,5	130,2	136,9	-	-	-	-	-	137,4	146,4	146,5	138,1	122,2	-	-	-
	NO _x	119,4	168,6	167,7	-	-	-	-	-	138,0	149,6	147,0	142,6	117,6	-	-	-
	PM	2,2	3,1	3,1	-	-	-	-	-	2,6	2,8	2,8	2,6	2,2	-	-	-
	VOC	12,6	25,9	28,9	-	-	-	-	-	36,8	36,3	39,2	34,8	33,9	-	-	-

Прилог 5. Третман комплексне геометрије методом исечених ћелија

Креирање прорачунских мрежа у овој дисертацији урађено је методом исечених ћелија (*Cut Cell Method*, енг.). На сликама П5.1 и П5.2 дати су примери употребе метода исечених ћелија за представљање косих и цилиндричних површина.



Слика П5.1 Метода исечених ћелија на косим површинама*



Слика П5.2 Метода исечених ћелија на цилиндричним површинама*

Метода исечених ћелија заснована је на генерисању правоугаоне Декартове мреже у целом прорачунском домену а затим се ћелије које пресеца граница комплексне геометрије редефинишу у полигоналне ћелије пресецањем првобитних правоугаоних ћелија. Основна предност методе исечених ћелија јесте што може лако бити примењена за креирање прорачунске мреже на случајевима комплексних геометрија. Основни

* преузето из P.G. Tucker and Z. Pan, A Cartesian cut cell method for incompressible viscous flow, *Applied Mathematical Modelling* 24(8) (2000) 591-606.

* преузето из P.G. Tucker and Z. Pan, A Cartesian cut cell method for incompressible viscous flow, *Applied Mathematical Modelling* 24(8) (2000) 591-606.

недостатак ове методе је што ћелије настале исецањем могу имати веома компликоване облике за прорачун применом методе коначних запремина. Такође, применом методе исечених ћелија, у близини издвојених тела генерише се груба мрежа којом често није могуће обухватити ефекте граничног слоја. Наиме ћелије не прате доминантни правац граничног слоја у близини зида. У овој тези дебелина граничног слоја око зграда је довољно велика, тако да метода исецања ћелија може бити успешно примењена.

Модификација основног потупка дискретизације методом коначних запремина за методу исечених ћелија може бити изведена на начин који је описан у наставку. Општа транспортна диференцијална једначина:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \Phi) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) = S_\Phi \quad \text{П5.1}$$

има следећи интегрални облик за прорачунску ћелију:

$$\oint_A \frac{\partial \Phi}{\partial \tau} A + \oint_A \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \Phi) A - \oint_A \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) A = \oint_A S_\Phi A \quad \text{П5.2}$$

При чему интеграција бива рађена по странама посматране прорачунске ћелије.

Дискретизацијом нестационарног члана у једначини (П5.2) добија се:

$$\oint_A \frac{\partial \Phi}{\partial \tau} A = \frac{(\Phi)_p^n - (\Phi)_p^o}{\Delta t} A_p \quad \text{П5.3}$$

Изложиоци n и o означавају почетну и крајњу вредност у временском кораку Δt . A_p површина граничне ћелије p приказане на Слици П5.3 која бива израчуната за сваку исечену ћелију, док је за стандардну ћелију $A_p = dx dy$.

Конвективни члан из једначине П5.1 одређујемо на следећи начин:

$$\oint_A \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \Phi) A = c_n \phi_n - c_s \phi_s + c_e \phi_e - c_w \phi_w \pm c_{ab} \phi_{ab} \quad \text{П5.4}$$

Где су $\phi_n, \phi_s, \phi_e, \phi_w$ и ϕ_{ab} вредности променљиве Φ на северној, јужној, источној и западној и ab страни исечене прорачунске ћелије за коју бива

рађена интеграција. c_n, c_s, c_e, c_w и c_{ab} јесу флуксеви кроз сваку од страна посматране исечене прорачунске ћелије дефинисани следећим релацијама:

$$c_n = q_n v_n \Delta x_p \quad \text{П5.5}$$

$$c_s = q_s v_s \Delta x_p \quad \text{П5.6}$$

$$c_e = q_e u_e \Delta y_p \quad \text{П5.7}$$

$$c_w = q_w u_w \Delta y_p \quad \text{П5.8}$$

$$c_{ab} = q u_{ab} \Delta S_{ab} \quad \text{П5.9}$$

Флуксеви кроз стране исечене ћелије, једначине П5.5- П5.9, прорачунавају се линеарном интерполацијом компоненти вектора брзине у чворовима првих суседних ћелија. u_{ab} јесте нормална компонента вектора брзине на исеченој страни а-в прорачунске ћелије, ΔS_{ab} јесте површина исечене стране а-в прорачунске ћелије, Слика П5.3.

Како би у обзир била узета величина површине исечене ћелије у једначинама (П5.5- П5.9), бивају дефинисани коефицијенти:

$$q_n = \frac{\Delta x_n}{\Delta x_p}, q_s = \frac{\Delta x_s}{\Delta x_p}, q_e = \frac{\Delta y_e}{\Delta y_p}, q_w = \frac{\Delta y_w}{\Delta y_p} \quad \text{П5.10}$$

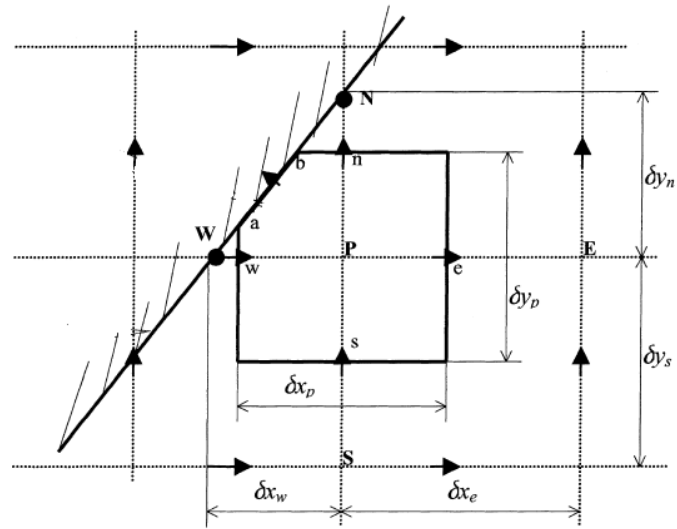
Где су: $\Delta x_n, \Delta x_s, \Delta y_e$ и Δy_w вредности површина северне, јужне, источне и западне стране посматране прорачунске ћелије. Вредност овог коефицијента за исечену страну прорачунске ћелије је у опсегу 0-1.

Дифузиони члан из једначине (П5.1) интегрише се на следећи начин

$$\oint_A \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) A = \left[q_n \Delta x_p \Gamma_{\phi_n} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - q_s \Delta x_p \Gamma_{\phi_s} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] + \left[q_e \Delta y_p \Gamma_{\phi_e} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - q_w \Delta y_p \Gamma_{\phi_w} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] - (1 - q_w) \Delta y_p \Gamma_{\phi_{ab}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{ab} + (1 - q_n) \Delta x_p \Gamma_{\phi_{ab}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{ab} \quad \text{П5.11}$$

Изворни члан у једначини (П5.1) има следећи интегрални облик

$$\iint S_\phi dx dy = S_\phi A_p \quad \text{П5.12}$$



Слика П5.3 Модификација правоугаоне ћелије у близини опструјаване
површине методом исечених ћелија*

Биографија аутора

Иван М. Лазовић рођен је 03. јуна 1986. године у Панчеву, Србија. Основну школу похађао је у Ковину, након чега је завршио средњу Техничку школу у Смедереву, смер електротехничар рачунара. Машински факултет Универзитета у Београду уписао је школске 2005./2006. године. На истом Факултету дипломирао је у јануару 2011. године на смеру Термотехника одбраном дипломског рада под називом „Техничко решење инсталације за грејање и хлађење стамбене куће помоћу топлотне пумпе“. Школске 2012./2013. године уписао је докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду, од када се интензивно и систематично бави научно-истраживачким радом у области енергетске ефикасности и заштите животне средине. Објавио је већи број радова који су публиковани у научним и стручним часописима или су презентовани на стручним скуповима у земљи и иностранству, као и на међународним конференцијама. Током докторских студија учествовао је на следећим пројектима:

Национални пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја:

- Унапређење енергетских карактеристика и квалитета унутрашњег простора у зградама образованих установа у Србији са утицајем на здравље, евидентиран под бројем III42008

Међународни FP7 пројекат:

- CITI-SENSE, „Development of sensor-based Citizens’ Observatory Community for improving quality of life in cities“, SME-targeted collaborative project. (EU FP7-ENV-2012 GA n. 308524)
www.citi-sense.eu
- EU DG Sanco contract „SINPHONIE“ School Indoor Environment and Health: Observatory Network in Europe
www.sinphonie.eu

Билатерални пројекти:

- Comparison of air pollution levels and exposure assessment in selected public buildings and spaces in China and Serbia, 2013.-2015.– 600-00-00557/2013-09/07;
- Директан утицај бродова и других пловила на ниво и расподелу величина респирабилних честица у зони морског и речног приобаља - SHIPMPOLL, 2016-2018;
- Мониторинг, мапирање и алати за процену експозиције на изабране загађиваче ваздуха у Словенији и Србији, 2016.-2018.

Од марта 2012. године запослен је у Институту за нуклеарне науке „Винча“, где је стекао звање истраживач сарадник. Такође, ангажован је и као испитивач у акредитованим лабораторијама Института за нуклеарне науке „Винча“

Говори енглески језик. Поседује искуство у програмирању и коришћењу инжењерских софтверских пакета.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Иван Лазовић

Број индекса D23/12

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Утивај ефеката термичких острва у градским срединама на повећано

коришћење енергије у зградама

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 13.12.2019.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Иван Лазовић

Број индекса D23/12

Студијски програм Докторске студије

Наслов рада Утицај ефеката термичких острва у градским срединама на повећано коришћење енергије у зградама

Ментор проф др. Милош Бањац

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 13.12.2019.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Утицај ефеката термичких острва у градским срединама на повећано
коришћење енергије у зградама

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе 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 прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 13.12.2019.

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.