

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Данка М. Костадиновић

**УТИЦАЈ ЗЕЛЕНОГ КРОВА НА ЕНЕРГЕТСКЕ  
КАРАКТЕРИСТИКЕ И ЕНЕРГЕТСКУ  
ЕФИКАСНОСТ ШКОЛСКЕ ЗГРАДЕ КАО  
САВРЕМЕНИ ПРИСТУП У ПРОНАЛАЖЕЊУ  
ОДРЖИВИХ РЕШЕЊА**

докторска дисертација

Београд, 2023

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Danka M. Kostadinović

**THE INFLUENCE OF THE GREEN ROOF ON THE  
ENERGY CHARACTERISTICS AND ENERGY  
EFFICIENCY OF SCHOOL BUILDING AS A  
MODERN APPROACH TO FINDING  
SUSTAINABLE SOLUTIONS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023

## **Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације**

### **Ментор:**

проф. др Маја Тодоровић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

### **Чланови комисије:**

проф. др Милош Бањац редовни професор,  
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Тамара Бајц, ванредни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Марина Јовановић, научни саветник  
Универзитет у Београду, "Винча" Институт за нуклеарне науке-  
-Институт од националног значаја за Републику Србију

др Вукман Бакић, научни саветник  
Универзитет у Београду, "Винча" Институт за нуклеарне науке-  
-Институт од националног значаја за Републику Србију

Датум одбране: \_\_.\_\_.2023.

*Ова докторска дисертација је настала као резултат рада на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја под називом "Развој и валидација нових технологија у зградарству са циљем повећања енергетске ефикасности зграда и побољшања квалитета урбаних средина", реализованог у оквиру Лабораторије за термотехнику и енергетику, Института за нуклеарне науке "Винча".*

*Хвала Господу и Мајци Божијој који су ми дали снаге да истрајем у труду и раду на дисертацији и да одолим искушењима која су ме на том путу пратила.*

*Велику захвалност дугујем ментору др Маји Тодоровић, редовном професору Машиноског Факултета, Универзитета у Београду, на квалитетном вођењу процеса израде дисертације и на вредним саветима. Посебну захвалност дугујем ментору из Института за нуклеарне науке "Винча" др Марини Јовановић на бројним саветима и подршци коју ми је пружила током рада на дисертацији и у досадашњем научном и стручном усавршавању. Велико хвала др Вукману Бакићу на залагању, помоћи и несебичној подршци током израде дисертације.*

*Захваљујем се осталим члановима комисије на корисним сугестијама које су унапредиле ову докторску дисертацију. Захваљујем се колеги др Ненаду Степанићу и дипл. инж.ел. Александру Коњикушићу, из фирме ELP Inženjering, на помоћи и техничкој подршци током спровођења експерименталних истраживања. Захвална сам управи и запосленима у Техничкој школи "Нови Београд" и Техничкој школи "Змај", на уступљеном простору за обављање експерименталних истраживања, сарадњи и поверењу које су ми указали.*

*Захваљујем се својој дивној породици, без чије љубави и безусловне подршке не бих истрајала на овом путу.*

*Хвала мојим верним пријатељима на подршци и разумевању.*

*Докторску дисертацију посвећујем мом покојном оцу Милутину Костадиновићу.*

*Данка Костадиновић*

# УТИЦАЈ ЗЕЛЕНОГ КРОВА НА ЕНЕРГЕТСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ И ЕНЕРГЕТСКУ ЕФИКАСНОСТ ШКОЛСКЕ ЗГРАДЕ КАО САВРЕМЕНИ ПРИСТУП У ПРОНАЛАЖЕЊУ ОДРЖИВИХ РЕШЕЊА

## Сажетак

Сектор зградарства чини велики проценат укупне глобалне потрошње финалне енергије и емисије угљен-диоксида. Потражња за енергијом у грађевинском сектору представља велики изазов за Србију. Главни град Београд са највише становника, највећим стамбеним фондом и највећом концентрацијом јавних зграда, највише пати од ниске енергетске ефикасности зграда. Реконструкција постојећег грађевинског фонда у Србији је велики потенцијал за уштеду енергије, декарбонизацију зграда и борбу против климатских промена. Током последњих деценија, интензивна урбанизација довела је до недостатка зелених површина у урбаним срединама. Кровови зграда у густо насељеним урбаним срединама могу обезбедити додатни простор за зелене површине. Зелени кровови у урбаним срединама све више добијају на значају у контексту остваривања одрживог развоја градова, очувања животне средине и борбе против климатских промена.

Предмет ове докторске дисертације је истраживање утицаја лаког зеленог крова са подлогом од хидрофилне минералне вуне, најновије генерације, на топлотне добитке и губитке кроз кровну конструкцију, а самим тим и потребну енергију за грејање и хлађење. Поред тога у оквиру дисертације истражен је утицај овог типа зеленог крова на температуру локалног спољашњег ваздуха и загађење ваздуха, а самим тим и допринос зелених кровова прилагођавању градова на климатске промене. У дисертацији су приказани резултати и анализа експерименталног истраживања спроведеног током летњег и зимског периода на репрезентативном школском објекту који се налази у градској средини Београда. У оквиру дисертације извршена је компаративна анализа резултата динамичких симулација топлотног понашања модела школског објекта у постојећем стању и унапређеног модела применом зеленог крова, који су добијени коришћењем програма *DesignBuilder*.

Истраживање представљено у дисертацији доприноси промоцији концепта зелених кровова, као важног елемента зелене инфраструктуре и указује на значај примене зелених кровова у градским срединама у циљу унапређења квалитета животне средине. Ова дисертација доприноси разумевању употребе зелених кровова на постојећим и планираним објектима у климатским условима Србије и чини добру научну основу за даља истраживања у овој области.

**Кључне речи:** зелени кров, зелена инфраструктура, енергетска ефикасност, уштеда енергије, квалитет ваздуха, климатске промене, одрживи развој

**Научна област:** Техничке науке

**Ужа научна област:** Машинство

**УДК број:** 620.9:628.81/.83(043.3)

# **THE INFLUENCE OF GREEN ROOF ON ENERGY PERFORMANCE OF SCHOOL BUILDING AS A MODERN APPROACH IN FINDING SUSTAINABLE SOLUTIONS**

## **Abstract**

The buildings are responsible for large percent of total global final energy consumption and carbon dioxide emission. Energy demand in the building sector represents a big challenge for Serbia. The capital city Belgrade with most inhabitants, the biggest housing stock and the highest concentration of public buildings, suffers the most from low energy efficiency performance of the buildings. Refurbishment of the existing building stock in Serbia is a great potential for energy savings, decarbonisation of the buildings and long-term climate neutrality. Over the last decades, the increased urbanization and economic growth have resulted in less urban green spaces. Dense urban areas with a large number of high-rise buildings can provide green space on roofs. Green roof systems have become an important part in creating sustainable cities.

The primary objective of this dissertation was to investigate the effect of a lightweight green roof with mineral wool substrate on the energy performance of existing school buildings. Furthermore, the influence of green roofs on local outdoor air temperature and urban air quality was investigated. The dissertation presents the results and analysis of experimental research conducted during the summer and winter periods at a representative school building located in the urban area of Belgrade. The energy performance of school buildings with conventional roof and green roof were obtained using the software DesignBuilder. An analysis and comparison of the results obtained from baseline model and the proposed retrofitting model simulations were conducted.

This dissertation provides a scientific basis for understanding the use of green roofs on existing and planned buildings in the Serbia climatic zone and forms the good basis for further research in this field. The research presented in the dissertation contributes to the promotion of the green roofs concept, as an important element of green infrastructure, and indicates the importance of applying the green roofs in urban areas to improve the quality of the urban environment.

**Key words:** green roof, green infrastructure, energy efficiency, energy savings, air quality, climate change, sustainable cities.

**Scientific field:** Technical sciences

**Scientific subfield:** Mechanical engineering

**UDC number:** 620.9:628.81/.83(043.3)

## Садржај

<b>1. Уводна разматрања</b> .....	1
<b>2. Зелени кровови</b> .....	3
2.1 Слојеви зелених кровова.....	3
2.2 Подела и карактеристике зелених кровова.....	7
2.3 Предности и ограничења примене зелених кровова.....	10
2.4 Примена зелених кровова у Србији.....	12
<b>3. Квалитет ваздуха</b> .....	13
3.1 Суспендован честице.....	15
3.2 Угљен-моноксид.....	16
3.3 Угљен-диоксид.....	17
3.4 Озон.....	17
3.5 Оксиди азота.....	18
3.6 Улога вегетације у смањењу загађења ваздуха.....	18
<b>4. Преглед литературе</b> .....	19
4.1 Утицај зелених кровова на енергетску ефикасност објекта.....	19
4.2 Утицај зелених кровова на ефекат урбаног топлотног острва.....	23
4.3 Утицај зелених кровова на квалитет ваздуха.....	25
4.4 Истраживања зелених кровова у Србији.....	27
<b>5. Предмет истраживања</b> .....	29
5.1 Циљеви истраживања.....	30
5.2 Полазне хипотезе истраживања.....	31
5.3 Научне методе истраживања.....	31
5.4 Научна оправданост и допринос истраживања.....	32
5.5 Структура докторске дисертације.....	33
<b>6. Поставка експеримента</b> .....	34
6.1 Опис изабраног школског објекта.....	34
6.2 Опис експеримента и мерених величина.....	36
6.3 Опрема коришћена приликом експерименталног истраживања.....	39
<b>7. Физичко-математички модел</b> .....	40
7.1 Преглед модела и програмских пакета у истраживањима утицаја зелених кровова.....	40
7.2 Математички модел зеленог крова.....	42
7.3 ВМ модел објекта Техничке школе "Нови Београд".....	43
7.4 ВЕМ модел објекта Техничке школе "Нови Београд".....	47
<b>8. Валидација модела</b> .....	50

<b>9. Резултати истраживања.....</b>	<b>52</b>
9.1 Анализа експерименталних истраживања.....	52
9.1.1 Резултати мерења метеоролошких услова.....	53
9.1.2 Резултати истраживања утицаја зеленог крова на пренос топлоте кроз кровну конструкцију.....	56
9.1.2.1 Летњи период.....	57
9.1.2.2 Зимски период.....	63
9.1.3 Резултати мерења квалитета ваздуха .....	69
9.1.3.1 Летњи период.....	69
9.1.3.2 Зимски период.....	77
9.2 Анализа резултата динамичких симулација .....	84
9.2.1 Потребна енергија за грејање школског објекта.....	84
9.2.2 Потребна енергија за хлађење школског објекта.....	85
9.3 Емисија угљен-диоксида.....	87
<b>10. Закључак.....</b>	<b>90</b>
Литература.....	94
Прилог А	
Списак коришћених мерних инструмената и сензора.....	109
Биографија аутора	
Изјава о ауторству	
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	
Изјава о коришћењу	



## Списак слика

- Слика 2.1. Компоненте типичног зеленог кровног система
- Слика 2.2. Зелени кров са супстратом од минералне вуне
- Слика 2.3. а) Насипање земље за зелени кров, б) зелени кровни систем у ролнама
- Слика 2.4. а) Модуларни зелени кров, б) модуларни систем зеленог крова
- Слика 2.5. а) Екстензивни зелени кров на Универзитету *Nanyang* у Сингапуру,  
б) полуинтензивни зелени кров на конвенционалном центру у *Балтимору*,  
в) интензивни зелени кров на згради *Park Royal Tower* у Сингапуру
- Слика 2.6. Зелени кров са соларним панелима на згради у Сиднеју
- Слика 2.7. Приказ плаво зеленог крова
- Слика 2.8. Зелени кров са поврћем
- Слика 3.1. Техничка школа "Нови Београд", Београд
- Слика 6.1. Географска локација објекта Техничке школе "Нови Београд"
- Слика 6.2. Врсте коришћених седумских биљака на зеленом крову
- Слика 6.3. а) Кров школске зграде са позицијама зеленог и конвенционалног крова,  
б) позиције мерних инструмената на зеленом крову и конвенционалном крову
- Слика 6.4. Шематски приказ пресека зеленог крова и конвенционалног крова са позицијама мерних инструмената
- Слика 6.5. а) Зелени кров са мерним инструментима,  
б) конвенционални кров са мерним инструментима
- Слика 7.1. Топлотни биланс модела зеленог крова
- Слика 7.2. Модел објекта Техничке школе "Нови Београд" са конвенционалним кровом у програмском окружењу *Revit*
- Слика 7.3. Основа приземља и спратова објекта Техничке школе "Нови Београд" са дефинисаним просторијама у програмском окружењу *Revit*
- Слика 7.4. Процедура извоза *Revit* (БИМ) модела и података у *DesignBuilder* (БЕС)
- Слика 7.5. Модел објекта Техничке школе "Нови Београд" са конвенционалним кровом у програмском окружењу *DesignBuilder*
- Слика 7.6. Модел објекта Техничке школе "Нови Београд" са зеленим кровом у програмском окружењу *DesignBuilder*
- Слика 8.1. Укупна потребна енергија за грејање добијена из модела и укупна испоручена енергија за грејање школе током грејне сезоне 2020/21
- Слика 9.1. Температура и релативна влажност спољашњег ваздуха и интензитет сунчевог зрачења током Августа
- Слика 9.2. Брзина струјања ветра током Августа
- Слика 9.3. Распоред кишних дана и количина падавина током Августа

- Слика 9.4. Температура и релативна влажност спољашњег ваздуха током Јануара
- Слика 9.5. Брзина струјања ветра током Јануара
- Слика 9.6. Распоред кишних дана и количина падавина током Јануара
- Слика 9.7. Распоред дана са присуством снежног покривача и висина укупног и новог снежног покривача током Јануара
- Слика 9.8. Температура спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова током Августа
- Слика 9.9. Температуре слојева зеленог крова и спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог крова током Августа
- Слика 9.10. Топлотни флуks кроз кровну конструкцију на позицији конвенционалног и зеленог крова и интензитет соларног зрачења током Августа
- Слика 9.11. Температура спољашњег ваздуха на 10 cm од површине конвенционалног и зеленог крова током Августа
- Слика 9.12. Температура спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова током Јануара
- Слика 9.13. Температуре слојева зеленог крова и спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог крова током Јануара
- Слика 9.14. Топлотни флуks кроз кровну конструкцију на позицији конвенционалног и зеленог крова током Јануара
- Слика 9.15. Температура спољашњег ваздуха на 10 cm од површине конвенционалног и зеленог крова током Јануара
- Слика 9.16. Топлотни флуks, температура унутрашњег и спољашњег ваздуха на позицији конвенционалног крова
- Слика 9.17. Топлотни флуks, температура унутрашњег и спољашњег ваздуха на позицији зеленог крова
- Слика 9.18. Концентрација PM1 изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода
- Слика 9.19. Концентрације PM2,5 изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода
- Слика 9.20. Концентрација PM10 изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода
- Слика 9.21. Концентрација CO изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода
- Слика 9.22. Концентрација CO<sub>2</sub> изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода
- Слика 9.23. Концентрација O<sub>3</sub> изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода
- Слика 9.24. Концентрација NO<sub>2</sub> изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода
- Слика 9.25. Концентрација PM1 изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода

- Слика 9.26. Концентрација  $PM_{2,5}$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода
- Слика 9.27. Концентрација  $PM_{10}$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода
- Слика 9.28. Концентрација  $CO$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода
- Слика 9.29. Концентрација  $CO_2$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода
- Слика 9.30. Концентрација  $O_3$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода
- Слика 9.31. Концентрација  $NO_2$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода
- Слика 9.32. Укупна потребна финална енергија за грејање школе са конвенционалним и зеленим кровом
- Слика 9.33. Укупна потребна финална енергија за хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом
- Слика 9.34. Укупна потребна примарна енергија за грејање и хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом
- Слика 9.35. Количина годишње емисије  $CO_2$  услед грејања и хлађења школе са конвенционалним и зеленим кровом

## Списак табела

- Табела 2.1. Врсте зелених кровова и главне карактеристике
- Табела 7.1. Састав термичког омотача школског објекта
- Табела 7.2. Улазни параметри за слој вегетације и слој супстрата зеленог кров
- Табела 8.1. Препоручене максималне вредности статистичких индикатора
- Табела 9.1. Средње, минималне и максималне дневне вредности метеоролошких величина мерених током летњег и зимског периода
- Табела 9.2. Средње вредности, стандардна девијација и минималне и максималне дневне вредности мерених величина током Августа
- Табела 9.3. Средње вредности, стандардна девијација и минималне и максималне дневне вредности мерених величина током Јануара
- Табела 9.4. Коефицијент пролаза топлоте кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова
- Табела 9.5. Средње месечне вредности, стандардна девијација, минималне и масималне вредности концентрације PM1, PM2,5, PM10, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова током летњег периода
- Табела 9.6. Средње месечне вредности, стандардна девијација, минималне и масималне вредности концентрације PM1, PM2,5, PM10, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад зеленог крова током летњег периода
- Табела 9.7. Однос масене концентрације PM2,5/PM10 у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода
- Табела 9.8. Средње месечне вредности, стандардна девијација, минималне и масималне вредности концентрације PM1, PM2,5, PM10, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад зеленог крова током зимског периода
- Табела 9.9. Средње месечне вредности, стандардна девијација, минималне и масималне вредности концентрације PM1, PM2,5, PM10, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова током зимског периода
- Табела 9.10. Однос масене концентрације PM2,5/PM10 у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода
- Табела 9.11. Укупна потребна финална енергија за грејање школе са конвенционалним и зеленим кровом
- Табела 9.12. Укупна потребна финална енергија за хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом
- Табела 9.13. Укупна потребна примарна енергија за грејање и хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом

## Списак коришћених ознака

### Ознаке које започињу латиничним словима

$T_a$ [°C]	температура спољашњег ваздуха.
$T_{sp}$ [°C]	температура спољашње површине кровне конструкције,
$T_d$ [°C]	температура површине дренажног слоја,
$T_{mv}$ [°C]	температура површине слоја минералне вуне,
$T_v$ [°C]	температура површине слоја вегетације,
$T_{10}$ [°C]	температура ваздуха на 10 cm изнад крова,
$U$ [W/m <sup>2</sup> K]	коэффициент пролаза топлоте,
$R$ [m <sup>2</sup> K/W]	отпор пролазу топлоте,
$T_{i,i}$ [°C]	температура унутрашњег ваздуха,
$T_{e,i}$ [°C]	температура спољашњег ваздуха,
$m$	број регистрованих мерења,
$PM1$ [µg/m <sup>3</sup> ]	концентрација суспендованих честица пречника мањег од 1 µm,
$PM2.5$ [µg/m <sup>3</sup> ]	концентрација суспендованих честица пречника мањег од 2.5 µm,
$PM10$ [µg/m <sup>3</sup> ]	концентрација суспендованих честица пречника мањег од 10 µm,
$CO$ [µg/m <sup>3</sup> ]	концентрација угљен-монооксида,
$CO_2$ [µg/m <sup>3</sup> ]	концентрација угљен-диоксида,
$O_3$ [µg/m <sup>3</sup> ]	концентрација озона,
$NO_2$ [µg/m <sup>3</sup> ]	концентрација азот-диоксида,
$RH$ [%]	релативна влажност спољашњег ваздуха,
$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	интензитет сунчевог зрачења,
$I_s$ [W/m <sup>2</sup> ]	укупно долазно краткоталасно зрачење,
$I_{ir}$ [W/m <sup>2</sup> ]	укупно долазно дуготаласно зрачење,
$T_f$ [K]	температура вегетације,
$T_g$ [K]	температура супстрата,
$T_{af}$ [K]	температура ваздуха у вегетацији,
$H_f$ [W/m <sup>2</sup> ]	флукс осетне топлоте вегетације,
$H_g$ [W/m <sup>2</sup> ]	флукс осетне топлоте супстрата,
$LAI$ [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	индекс покривености вегетацијом,
$F_f$ [W/m <sup>2</sup> ]	топлотни биланс слоја вегетације,
$F_g$ [W/m <sup>2</sup> ]	топлотни биланс слоја супстрата,
$c_{p,a}$ [J/kgK]	специфични топлотни капацитет ваздуха при константном притиску,
$c_f$	коэффициент преноса масе,
$c_h^g$	коэффициент преноса флукса осетне топлоте на површини супстрата,
$W_{af}$ [m/s]	брзина струјања ваздуха у слоју вегетације,
$L_f$ [m/s]	флукс латентне топлоте вегетације,
$L_g$ [m/s]	флукс латентне топлоте супстрата,
$l_f$ [J/kg]	латентна топлота испаравања на температури вегетације,
$l_g$ [J/kg]	латентна топлота испаравања на температури супстрата,

$r''$	фактор влажности површине
$q$ [W/m <sup>2</sup> ]	топлотни флуks,
$q_{af}$	однос мешања за ваздух унутар вегетације,
$q_g$	однос мешања на површини супстрата,
$q_{f,sat}$	однос мешања на температури засићења вегетације,
$q_{g,sat}$	однос мешања на температури засићења супстрата,
$F_f$ [W/m <sup>2</sup> ]	топлотни биланс вегетације,
$F_g$ [W/m <sup>2</sup> ]	топлотни биланс супстрата,
$k$	вон-Карманова константа,
$z$ [m]	висина или дубина,
$U_{max}$ [W/m <sup>2</sup> K]	највећи дозвољени коефицијент пролаза топлоте,
$d$ [cm]	дебљина,
$c$ [J/kgK]	специфични топлотни капацитет,
$NMBE$	нормализована средња квадратна грешка,
$CV(RMSE)$	коефицијент варијације корена средње квадратне грешке,
$\overline{m}_i$	средња измерена вредност,
$m_i$	стварна вредност,
$s_i$	вредност добијена симулацијом,
$n$	број упоређених вредности,
$p$	број подесивих параметара модела,
$Q_H$ [kWh]	потребна финална енергија за грејање објекта,
$Q_C$ [kWh]	потребна финална енергија за хлађење објекта.

### Ознаке које почињу грчким словима

$\alpha_f$	албедо вегетације,
$\alpha_g$	албедо супстрата,
$\varepsilon$	емисивност,
$\varepsilon_f$	емисивност вегетације,
$\varepsilon_g$	емисивност супстрата,
$\sigma$ [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]	Штефан-Болцманова константа,
$\sigma_f$	фракциона покривеност вегетацијом,
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	густина,
$\rho_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]	густина ваздуха на висини инструмента,
$\rho_{af}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	густина ваздуха на температури вегетације,
$\rho_{ag}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	густина ваздуха на температури супстрата,
$\lambda$ [W/mK]	топлотна проводљивост.

### Индекси

$a$	ваздух,
$af$	ваздух унутар слоја вегетације,
$f$	површина вегетације,

<i>g</i>	површина супстрата,
<i>h</i>	флукс осетне топлоте,
<i>ir</i>	инфрацрвено (или дуготаласно),
<i>sat</i>	засићење,
<i>H</i>	грејање,
<i>C</i>	хлађење.

## Списак скраћеница

Скраћеница	Пун назив
ЕПДМ	етилен-пропилен-диенмономера
ТПО	термопластични полиолефин
СЗО	Светске здравствене организације
WHO	World Health Organization
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
HEAL	Health and Environment Alliance
SEPA	Serbian Environmental Protection Agency
PM	Particulate Matter
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IGRA	International Green Roof Association
EFB	European Federation of Green Roof and Green Wall Associations
УТО	урбано топлотно острво
UFORE	Urban Forest Effects
LCC	Life Cycle Costing
BEM	Buiding Energy Modeling
BIM	Buiding Information Modeling
MIT	Massachusetts Institute of Technology
TEB	Town Energy Balance
FASST	Fast All-season Soil Strength
BATS	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme
SiB	Simple Biosphere Model
LAI	Leaf Area Index
EAM	Energy Analytical Model
gbXML	green building Extensible Markup Language
NMBE	Normalized Mean Bias Error
CV(RMSE)	Coefficient of Variation of the Root Mean Squared Error
ЗК	зелени кров
КК	конвенционални кров
CAM	Crassulacean Acid Metabolism



## 1. Уводна разматрања

Данас се питање енергетског снабдевања односно енергетске сигурности налази на високој лествици приоритета сваке земље. У свету је енергетска ефикасност препозната као најекономичнији и најбржи начин постизања циљева одрживог развоја. Сектор зградарства је посебно важан јер према подацима за 2021. годину на светском нивоу чини 30% глобалне финалне употребе енергије и 27% директних и индиректних емисија угљен-диоксида [1]. Грејање и хлађење стамбених и јавних зграда чини највећи удео у укупној потрошњи енергије у зградарству. Сектор зградарства је одговоран за 55% глобалне употребе електричне енергије [2], што указује на потенцијал овог сектора у даљим корацима ка декарбонизацији. Собзиром да је сектор зградарства најзначајнији потрошач енергије, постоји значајан потенцијал за уштеду енергије у овом сектору и смањење емисије штетних гасова.

На глобалном и локалном нивоу усвојен је низ стратегија и регулатива [3-5] у којима се дефинишу минимални захтеви за енергетске карактеристике зграда приликом изградње нових или реконструкције постојећих зграда, које имају за циљ повећање енергетске ефикасности у зградама и уштеду енергије у сектору зградарства. Велики број стамбених зграда у земљама Европске Уније је изграђен пре увођења прописа о термичким карактеристикама односно пре 1970. године и има лошу енергетску ефикасност. Побољшање енергетских карактеристика зграда један је од приоритетних области политике енергетске ефикасности у ЕУ. У складу са претходно наведеним у постојећем грађевинском фонду ЕУ се налази највећи потенцијал за смањење потрошње примарне енергије и емисије угљен-диоксида. Обнова постојећег грађевинског фонда у ЕУ је кључно за постизање постављених нових циљева декарбонизације сектора зградарства од најмање 60% до 2030. у поређењу са 2015. и постизање климатске неутралности до 2050. године.

Слична ситуација је и у Републици Србији, где је сектор зградарства енергетски најзахтевнији сектор и представља око 32% укупне потрошње финалне енергије у 2021. години [6]. Србија је међу последњим земљама у Европи по критеријумима енергетске ефикасности. Просечна потрошња енергије у стамбеним зградама у Србији је три пута већа него у развијеним европским земљама. Примера ради, просечна специфична потрошња енергије у зградама у Србији износи преко 200 kWh/m<sup>2</sup>, док рецимо у Шведској која има много хладнију климу, специфична потрошња енергије износи 60-120 kWh/m<sup>2</sup> [7].

У нашој земљи већина зграда, посебно стамбених, карактерише прекомерна потрошња финалне енергије, јер највећи део постојећих зграда потиче из периода интензивне градње од 60-тих до 80-тих година двадесетог века када нису постојали прописи о термичким карактеристикама грађевинских елемената и потребној енергетској ефикасности [8]. С обзиром да се у Србији први конкретан Правилник о топлотној заштити објеката појавио након 1980. године, већина објеката је изграђена без топлотне изолације или са недовољном дебљином топлотне изолације, па представљају највећи проблем у потрошњи енергије у Србији. Приоритет је усмерити напоре ка побољшању енергетске ефикасности постојећих објеката у нашој земљи, посебно оних изграђених пре 1980. године, због значајног неискоришћеног потенцијала за унапређење енергетске ефикасности и са тим у вези уштеде енергије и смањења емисије CO<sub>2</sub>. Србија се суочава са проблемом недостатка енергије и несигурности у снабдевању енергијом с једне стране и загађења животне средине са друге стране.

Унапређење енергетске ефикасности у сектору зградарства представља значајан потенцијал за смањење укупне потрошње енергије у Србији. Обнова постојећег грађевинског фонда са циљем унапређења енергетске ефикасности у зградама у Србији поред уштеде енергије може донети читав низ позитивних утицаја на економију и смањење незапослености [9-10].

Нестамбене зграде у којима борави више људи, попут образовних установа, имају већу специфичну потрошњу енергије, у односу на стамбене зграде. Образовне установе због своје величине и доприноса потрошњи енергије представљају велики потенцијал за уштеду енергије. Већина великих школских објеката у Србији је изграђена у периоду од 1971. до 1990. године, када је дошло до великог пораста броја становништва у градовима [11]. Оне чине 32,65% од укупног броја школских зграда и троше 74,10% енергије која се упореби у школама у Србији, тако да представљају велики потенцијал за уштеду енергије [11]. Само 18% школа изграђених у овом периоду има топлотну изолацију [12]. Узимајући у обзир да су први термотехнички прописи у Србији настали седамдесетих година 20. века, око 60% школских објеката који и данас постоје је било већ изграђено и самим тим није подлегао никаквим обавезама у погледу топлотне заштите [12]. Већина школских објеката у Републици Србији није у складу са захтевима савремене терморегулације зграда. Познато је да се у школским објектима због њихове површине и намене троши велика количина енергије. Просечна годишња потрошња топлотне енергије од 192 kWh/m<sup>2</sup> у школама у Србији већа је у односу на школе у Аустрији и Немачкој (90-154 kWh/m<sup>2</sup>) [13]. Просечна специфична потрошња електричне енергије у школама у Србији је 19 kWh/m<sup>2</sup> што је 2,7 пута више него у Немачкој [13]. Према проценама Немачке организација за техничку сарадњу-GIZ, истраживање спроведено у 169 градова и општина у Србији показује да више од 16000 јавних зграда попут школа и вртића има огроман потенцијал за енергетске уштеде [14]. Слично истраживање и закључке дала је и Светска банка, према којој у образовним установама у Србији постоји потенцијал уштеде енергије од 86 ктое [15]. Упркос томе, утицај зеленог крова на енергетску ефикасност школских зграда, упркос њиховој величини и доприносу потрошњи енергије није довољно истражен.

Кровови су компонента термичког омотача зграде, која лети има велике топлотне добитке и зими значајне топлотне губитке. Према томе побољшање термичких карактеристика кровне конструкције је веома ефикасна мера за побољшање енергетске ефикасности, која се може применити како код нових објеката тако и на постојећим. Београд има велики број објеката са равним крововима грађених током шездесетих и седамдесетих година прошлог века. Равни кровови представљају велики проблем за кориснике простора испод њих, како због прокишњавања тако и због лоше термоизолације.

Приликом енергетске санације постојећих објеката, уштеда енергије применом савремених технологија и материјала, представља сигуран пут ка очувању енергетске безбедности сваке земље, а уједно и побољшању квалитета животне средине. Зелени кровови у урбаним срединама све више добијају на значају у контексту остваривања одрживог развоја градова, очувања животне средине и прилагођавања климатским променама. Последњих деценија сведоци смо интензивне урбанизације услед које долази до смањења зелених површина у градским срединама и негативног утицаја на животну средину. Све већи утицај који савремени начин живота у градовима има на животну средину захтева промене, а један од начина да природи вратимо оно што смо јој узели јесте изградња зелених кровова.

Последњих година у свету, индустрија и инфраструктура зелених кровова представљају важне компоненте за развој зелених зграда и одрживих градова. Бројни су примери примене зелених кровова који имају за циљ уштеду енергије, стварање бољих микроклиматских услова, заштиту биодиверзитета и повећање укупне површине под зеленилом. Европске земље имају неколико деценија искуства са технологијом зелених кровова и имају добро успостављен сет стандарда и регулатива за зелене кровове. У многим земљама зелени кровови су обавезни на новим зградама, док се у многим градовима широм света примењују политике и подстицајни програми који подржавају озелењавање кровова.

## **2. Зелени кровови**

Зелени кровови представљају кровне конструкције делимично или потпуно прекривене вегетацијом и супстратом за раст биљака, који се налази изнад хидроизолационог слоја. У литератури се називају и кровни вртови, кровне баште, живи кровови и еко кровови, а последњих година често је у употреби израз вегетациони кров. Озелењавање кровова је присутно у историји од египатских кровних вртова, преко вртова из Ниниве (познати под називом вавилонски висећи вртови), античких, средњовековних и ренесансних до модерних зелених кровова који су настали у Немачкој осамдесетих година.

Последњих година зелени кровови због бројних користи које пружају све више добијају на значају. Препознати су као важан елемент одрживог развоја посебно у контексту ублажавања негативних последица урбанизације и прилагођавања градова на климатске промене. Зелени кровови су веома важан део зелене инфраструктуре, који омогућавају враћање природе у градове, што је посебно значајно у густо изграђеним и насељеним градским срединама где постоји недостатак зелених површина. Постављање зелених кровова на постојеће објекте би конвенционалне кровне површине претворило у зелене оазе и значајно би повећало проценат зелених површина у градовима.

### **2.1 Слојеви зелених кровова**

Зелени кровови се могу поставити на нове зграде или додати на кровове постојећих зграда. Типичне зелене кровне системе чине следећи слојеви почевши од кровне конструкције: водонепропусни слој, топлотна изолација, противкоренски слој, заштитни слој, дренажни слој, филтер слој, супстрат (садни слој, растући медиј или подлога) и вегетација. Врста зеленог крова, локација, клима и захтеви диктирају састав зелених кровова, па стога нису сви поменути слојеви обавезни. У неким случајевима, у зависности од климатских услова, потребно је поставити систем за наводњавање унутар или изнад супстрата. Код кровова са већим нагибом додаје се слој против клизања да би се спречило клизање супстрата и испирање земље током обилних падавина. Компоненте типичног зеленог кровног система приказане су на Слици 2.1. Сваки од слојева зеленог крова има одређену функцију.

Хидроизолациони слој: Први слој зелених кровова који се поставља директно на кровну конструкцију је слој хидроизолације. Овај слој штити објекат од продора воде, која је присутна у зеленим крововима током свих годишњих доба. Код постојећих кровова, користе се углавном битумен, шљунак, полиуретански премази, фолије, итд. Код нове изградње,

најчешће се користе једнослојне мембране, као што су ЕПДМ (етилен-пропилен-диенмономера) гума или ТПО (термопластични полиолефин).

**Топлотна изолација:** Зелени кровови некада имају и слој топлотне изолације. Овај слој није обавезан, јер углавном кровна конструкција већ има топлотну изолацију, а и сам зелени кров има улогу термоизолатора.

**Противкоренски слој:** Треба да заштити хидроизолацију и кровну конструкцију од могућег продора корења и ђубрива, као и механичких оштећења до којих може доћи приликом постављања зеленог крова. У зависности од конструкције и врсте зеленог крова користе се различите врсте материјала, а најчешће су то полиетиленске фолије, гума или неки други вештачки материјал.

**Заштитни слој:** Кровне конструкције некада захтевају заштиту од оштећења која могу настати током постављања зелених кровова, али и од дејства ђубрива и могућег продора корења биљака. За овај слој у зависности од специфичности конструкције и врсте крова користе се различити материјали.



Слика 2.1. Компоненте типичног зеленог кровног система [16]

**Дренажни слој:** Његова функција је да омогући одвођење вишка воде до кровних одвода. У зависности од врсте и оптерећења кровне конструкције и да ли је систем дренажни или дренажно-акумулациони користе се различити типови дренажних система без или са резервоарима за задржавање воде. Дренажни слој може бити од вештачког материјала или у виду гранулисаног слоја експандиране глине или шљунка. Уколико дренажни и хидроизолациони слој нису добро постављени, може доћи до низа нежељених ефеката и негативног утицаја на кровну конструкцију.

**Филтер слој:** Поставља се између дренажног слоја и слоја супстрата. Његова функција је да спречи пролазак супстрата, како се не би угрозила функционалност дренажног система, а да у исто време омогући отицање воде до дренажног слоја. Дренажни и филтер слој такође делују као коренске баријере. За филтер слој се углавном користи геотекстил.

**Супстрат:** Треба да задовољи потребе биљака за хранљивим материјама и водом. Дебљина супстрата зависи од врсте вегетације, врсте зеленог крова и услова у којима се користи. Треба да омогући правилан развој вегетације, а да истовремено не врши велико додатно оптерећење на носећу конструкцију објекта. Најчешће се овај слој састоји од 80% природних или вештачких минералних састојака (камен, цигла, перлит, глина, шкриљац) и 20% органских материја (тресет и компост).

Вегетација: Врста вегетације зависи од климатских услова, нагиба крова, дебљине и састава супстрата. Избор вегетације је веома важан, јер она треба да обезбеди добру покривеност, да има способност самообнављања и да преживи температурна колебања.

Традиционални зелени кровни системи имају супстрат који се састоји од природних или вештачких минералних састојака и органских материја. Хидрофилна минерална вуна се може користити као замена за традиционалне супстрате за зелени кров. Минерална вуна у зеленим крововима има функцију слоја за задржавање воде и супстрата за биљке, незапаљива је, лагана и једноставна за постављање. Овај неоргански материјал задржава више воде у односу на своју запремину у поређењу са другим материјалима, због тога су овакви зелени кровови погодни за сушна подручја. Минерална вуна има изузетно добар капиларни ефекат, упија воду попут сунђера, која се у врло кратком времену равномерно расподељује преко читавог зеленог крова.

Слој минералне вуне се поставља између дренажног слоја и супстрата земље, како би се побољшао капацитет задржавања воде зеленог крова смањила дебљина земље и самим тим тежине зеленог кровног система. Зелени кровови са минералном вуном имају много мању тежину у односу на конвенционалне зелене кровне системе и могу се користити на постојећим зградама, не угрожавајући стабилност конструкције. Капацитет задржавања воде оваквих зелених кровова је до  $45 \text{ l/m}^2$  [7], а тежина у засићеном стању може бити до  $65 \text{ kg/m}^2$  [18-19] и могу се постављати на кровове са нагибом до  $45^\circ$ . Минерална вуна има добру способност аерације, јер је високо порозан материјал (80%). Због одличне апсорпције воде и добре аерације [20], хидрофилна минерална вуна се користи и за зелене зидове, вртове и као медијум за раст биљака у хидропоници.

Супстрати од традиционалне камене минералне вуне су прављени повезивањем силикатних влакана вуне са хемикалијама на бази нафте (фенол, формалдехид). С обзиром да ова везива чине вуну хидрофобном, оваквим супстратима се морају додавати премази са способношћу упијања воде, како би могла да се користи за узгој вегетације. Развојем иновативних технологија, дошло се до последње генерације супстрата за зелени кров од камене минералне вуне, код које се супстрат формира механичком повезивањем чистих минералних влакана без додавања формалдехида, фенола, вештачких боја и пигмената. Користи се ново везиво у чијој се основи налази биљни скроб, који се током процеса производње минералне вуне претвара у инертни полимер. Овако произведена минерална влакна су хидрофилна и није потребно додавање адитива за апсорбовање воде. Овакав поступак производње минералне вуне смањује негативан утицај на животну средину, јер троши до 70% мање енергије у односу на традиционални начин. На Слици 2.2 приказан је супстрат зеленог крова од минералне вуне са слојем вегетације.



Слика 2.2. Зелени кров са супстратом од минералне вуне [21]

У супстрат минералне вуне се биљке добро укоренењују, што их штити од дејства ветра. Минерална вуна не садржи хранљиве материје, па је овом типу зелених кровова потребно чешће ђубрење у односу на традиционалне зелене кровове са дебљим слојем земље. Постоји више начина за озелењавање кровова. Након насипања земље на кров, приказано на Слици 2.3 а), сађење биљака се може одвијати на самом крову. У том случају садном материјалу је потребан одређени временски период да се привикне на нову средину. Постоје и слојеви вегетације за зелени кров, који се испоручују у ролнама и постављају као "теписони", а погодни су за веће кровне површине. Код овог система зеленог крова, приказаног на Слици 2.3 б) вегетација се претходно узгаја у расадницима и не захтева период прилагођавања.

а)



б)



Слика 2.3. а) Насипање земље за зелени кров [22], б) зелени кровни систем у ролнама [23]

У употреби су и модуларни зелени кровни системи, код којих су углавном сви слојеви изузев противкоренске мембране испоручују наслагани у модулима и слажу на кров, као што је приказано на Слици 2.4 а). Код ових система зелених кровова се вегетација најчешће претходно узгаја у расадницима, који се када су биљке довољно развијене постављају на кров. Модули за зелени кров могу бити различитог изгледа. Изглед једног модуларног система зеленог крова је приказан на Слици 2.4 б). Овај систем зеленог крова се примењује на равним крововима, не захтева период прилагођавања и најједноставнији је за постављање и одржавање, јер се по потреби модули могу заменити.

а)



б)



Слика 2.4. а) Модуларни зелени кров [24], б) модуларни систем зеленог крова [25]

## 2.2 Подела и карактеристике зелених кровова

У зависности од дебљине супстрата, врсте вегетације, тежине, потреба за наводњавањем и одржавањем разликујемо екстензивне, полуинтензивне и интензивне зелене кровове. Подела зелених кровова са прегледом основних карактеристика дата је у Табели 2.1. Екстензивни зелени кровни системи су лакши од интензивних и једноставнији за одржавање, па су погоднији за постављање на постојеће објекте и веће кровне површине. Њихова монтажа је технички једноставна и могуће их је постављати на кровове са нагибом. При постављању зелених кровова, највећи проблем представља клизање код кровних конструкција са нагибом. Претходних деценија граница је била 15°, док се развојем технологије екстензивни зелени кровови данас могу постављати и на кровове са нагибом до 45°. Код екстензивних зелених кровова користе се биљне врсте попут седума или ливадске траве које имају плитак коренов систем и мање захтеве за наводњавањем. Екстензивни зелени кровови имају широку примену у пракси због мање тежине и захтева за наводњавањем и одржавањем.

Табела 2.1. Врсте зелених кровова и главне карактеристике

Карактеристике	Екстензивни	Полуинтензивни	Интензивни
Дебљина супстрата	< 200 mm	200-300 mm	> 300 mm
Висина вегетације	50-300 mm	300-600 mm	> 600 mm
Тежина	50–150 kg/m <sup>2</sup>	150–250 kg/m <sup>2</sup>	> 250 kg/m <sup>2</sup>
Нагиб крова	до 45°	раван кров	раван кров
Тип вегетације	ниска вегетација (трава, седум, зачинско биље, маховина)	ниска вегетација и жбунасте врсте	ниска и висока вегетација (дрвенасте врсте)
Постављање и одржавање	једноставно	релативно једноставно	технички захтевно
Наводњавање	повремено	периодично	редовно
Проходност	неприступачни	делимично	приступачни
Цена	ниска	средња	висока

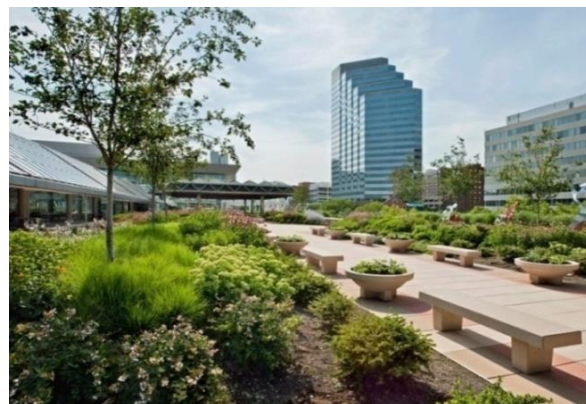
Полуинтензивни зелени кровови представљају комбинацију екстензивних и интензивних зелених кровова. На овим крововима се углавном саде сукуленти и средње високе жбунасте врсте биљака. Ова врста кровова захтева више одржавања у поређењу са екстензивним крововима, али пружа могућност коришћења за одмор, рекреацију или узгајање поврћа. Интензивни зелени кровови имају већу дебљину супстрата, па се на њима могу користити готово све биљке (декоративно дрвеће, жбунасте врсте), као и постављати пешачке стазе и клупе. Међутим, овај тип зелених кровова има већу цену почетних трошкова

и захтева редовно наводњавање и одржавање. Интензивни зелени кровови представљају изазов како за пројектовање тако и за постављање и одржавање. Изглед екстензивног, полуинтензивног и интензивног зеленог крова приказан је на Слици 2.5.

а)



б)



в)



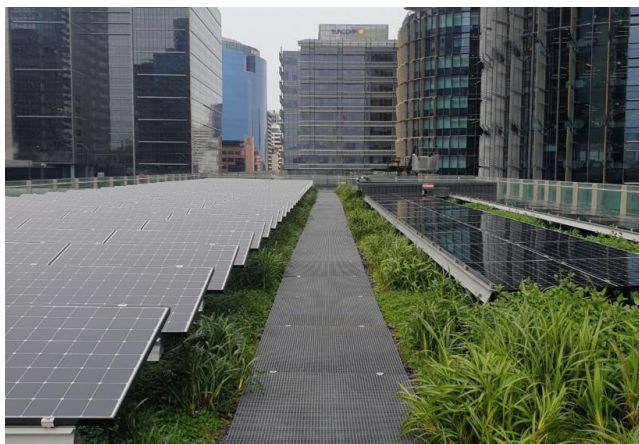
Слика 2.5. а) Екстензивни зелени кров на Универзитету *Nanyang* у Сингапуру [26]  
б) полуинтензивни зелени кров на Конвенционалном центру у *Балтимору* [27]  
в) интензивни зелени кров на згради *Park Royal Tower* у Сингапуру [28]

Ограничавајући фактор у случају примене зелених кровова на постојеће објекте је оптерећење конструкције. Избор врсте зеленог крова и његових слојева највише зависи од носивости кровне конструкције. Укупној тежини зеленог крова највише доприноси слој супстрата за раст биљака у засићеном стању, што може представљати значајно додатно оптерећење и ограничити примену на старијим објектима. Екстензивни зелени кровови се успешно могу применити на постојећим старим објектима због релативно мале тежине која не угрожава носивост и стабилност конструкције. Интензивни зелени кровови врше веће оптерећење на кровну конструкцију, па се због тога најчешће постављају на нове објекте. Могу се постављати и на постојеће објекте, али је у том случају углавном потребно поставити ојачање кровне конструкције.



Избор врсте и слојева зеленог крова зависи од много фактора које треба размотрити као што су намена зеленог крова, географска локација, климатски услови, тип кровне конструкције, итд. Локације које се суочавају са дужим сушним периодима захтевају да вегетација зеленог крова има мале захтеве за водом. Са друге стране локације у којима су падавине обилне захтевају зелене кровове који могу да задрже веће количине воде. Сматра се да зелени кровови не захтевају редовно одржавање, међутим, како би зелени кров постигао свој пуни потенцијал потребно је периодично ђубрење и оптимално наводњавање.

Последњих година, у свету је све више зелених кровова који су делимично или у потпуности покривени соларним панелима. Зелени кров са соларним панелима се још назива биосоларни кров, PV-зелени кров или хибридни кров. На Слици 2.6 приказан је зелени кров са соларним панелима постављен на згради у Сиднеју. Истраживања су показала да соларни панели на зеленом крову имају већу ефикасност, због ефекта евапотранспирације зеленог крова што за последицу има смањење температуре ваздуха и хлађење површине соларног панела [29-30]. Поред тога, соларни панели штите зелени кров од соларног зрачења, чиме смањују ниво испаравања воде, што је посебно значајно у сушним подручјима.



Слика 2.6. Зелени кров са соларним панелима на згради у Сиднеју [31]

Примену у пракси налазе и плаво зелени кровови, који комбинују технологију и предности тзв. плавог крова и зеленог крова. У поређењу са стандардним зеленим крововима, плаво зелени кровови имају дренажни систем типичан за плави кров, који служи као резервоар за воду и омогућава сакупљање и складиштење веће количине воде, контролу протока воде и спречавање поплава у градским срединама. На Слици 2.7 дат је приказ плаво зеленог крова. Због своје велике тежине, односно додатног оптерећења носеће конструкције, овакви зелени кровови су предвиђени за постављање на нове објекте. Многи градови у свету покушавају да унапреде одрживост повећањем зелених површина и промовисањем урбане пољопривреде. Зелени кровови пружају простор за производњу поврћа, што омогућава интеграцију пољопривреде у урбане средине и доприноси економској и еколошкој одрживости зграда у градовима. На Слици 2.8 је приказан полуинтензивни зелени кров на згради Универзитета *Ryerson* у Торонту на коме се узгајају различите врсте поврћа.



Слика 2.7. Приказ плаво зеленог крова [32]



Слика 2.8. Зелени кров са поврћем [33]

### 2.3 Предности и ограничења примене зелених кровова

Последњих година зелени кровови све више добијају на значају и све се више примењују у градским срединама. Поред естетске функције зелени кровови имају низ еколошких, економских и друштвених користи које се могу остварити како на нивоу објекта тако и на нивоу града [34]:

Еколошке предности:

- апсорбују загађење из ваздуха,
- ублажавају ефекат урбаног топлотног острва,
- пречишћавају атмосферске воде,
- продужавају време отицања атмосферских вода и смањују оптерећања одводног система за кишницу,
- унапређују биодиверзитет у градским срединама кроз стварање нових станишта за биљни и животињски свет,
- пружају заштиту од пожара,
- апсорбују звук и смањују ниво буке,
- смањују ниво прашине у окружењу.

Економске предности:

- пружају додатну топлотну изолацију,
- штите кров од УВ-зрачења, температурних промена и механичких оштећења чиме се продужава век трајања крова,
- смањују трошкове за одвођење атмосферских вода,
- повећавају естетску и економску вредност објекта,
- стварају нова тржишта за постојеће производе и услуге.

Друштвене предности:

- обезбеђују додатни зелени простор у градским срединама,
- имају позитиван ефекат на ментално здравље и смањење стреса,
- доприносе остваривању чвршћих веза станара и креирању осећаја заједништва.

Може се приметити да зелени кровови на много различитих начина доприносе побољшању квалитета живота у градским срединама. То су препознале многе државе широм света и увеле су обавезу постављања зелених кровова, као и различите подстицаје за њихову примену [35].

Позитивни ефекти зелених кровова на нивоу града посебно долазе до изражаја у густо изграђеним градским срединама. Неке од предности које се могу остварити применом зелених кровова могу се исказати квалитативним вредностима. Међутим предности зелених кровова попут ублажавања ефекта урбаних топлотних острва, смањења буке, побољшања квалитета ваздуха, унапређења биодиверзитета, итд. није могуће квантификовати и с тим у вези проценити финансијске користи које би имали станари. Упркос бројним предностима зелених кровова постоји неколико ограничења у њиховој примени као што су:

- економска ограничења,
- техничка ограничења,
- социјална ограничења.

Када су у питању економска ограничења примене зелених кровова, инвеститори и власници станова се тешко одлучују за постављање истих због већих инвестиционих трошкова у поређењу са конвенционалним крововима, као и додатних трошкова због потребе зелених кровова за наводњавањем и одржавањем. Трошкови постављања и одржавања зеленог крова зависе од врсте крова и избора вегетације и углавном су ови трошкови већи код интензивних него код екстензивних зелених кровова.

Техничка ограничења се првенствено односе на додатно оптерећење које конструкција објекта трпи. То је главно ограничење примене зелених кровова на постојећим објектима. Процена допуштеног оптерећења конструкције од стране стручњака и у складу са тим правилно пројектован зелени кров и избор одговарајућих слојева обезбеђују да не дође до оштећења конструкције. Сложеност инсталације и тежа поправка крова такође може представљати техничко ограничење у примени зелених кровова. Честа забринутост у вези са зеленим крововима је могућност пропуштања воде и оштећења кровне конструкције. Последње генерације зелених кровова које користе савремене материјале за спречавање продора воде, корења биљака и ђубрива, као и механичког оштећења кровне конструкције која могу настати током постављања зелених кровова су решили ове проблеме.

Социјална ограничења се односе на недостатак свести и знања људи о значају концепта зелених кровова, као и недостатак финансијских и других подстицаја за примену зелених кровова. Наведене препреке за примену зелених кровова су највише изражене у земљама у развоју и неразвијеним земљама, где јавност није упућена у предности зелених кровова и где не постоје прописи и подршка владе за подстицај њихове примене.

С обзиром да свака земља има различите климатске услове и начин градње, локална истраживања су од велике важности за успех зелених кровова. Недостатак локалних истраживања и експерименталних података у вези са понашањем и карактеристикама зелених кровова у одређеним климатских условима представљају препреку за ширу примену концепта зелених крова. У последњој деценији већина научних истраживања зелених кровова је спроведена у Европи и Северној Америци. Ова истраживања су омогућила разумевање и увид у предности зелених кровова, као и касније креирање законских регулатива и политика за финансијске подстицаје њихове примене [36]. Концепт зелених кровова се може промовисати озелењавањем кровова јавних зграда [37-38], који би представљали пример добре праксе како би се подигла свест људи о њиховом значају и заинтересовали инвеститори за њихову примену.

## 2.4 Примена zelenih кровова у Србији

Зелени кровови су привилегија становништва земаља са развијеном еколошком свешћу. Увидом у стање везано за зелене кровове у Србији установљено је да је фонд zelenih кровова у нашој земљи мали. Највећи број објеката са зеленим крововима се налази у Београду и то су претежно комерцијални објекти. Упркос бројним користима, зелени кровови нису део грађевинске праксе у нашој земљи и не постоје прецизне регулативе којима се прописује њихово пројектовање и постављање. У нашој земљи примена zelenih кровова представља неиспитан потенцијал за унапређење енергетске ефикасности грађевинског фонда и побољшање квалитета животне средине. Како би могло да се прецизније сагледа тренутно стање у овој области и управља будућим развојем неопходно је формирати базу података изведених објеката са зеленим крововима у Србији.

Масовна и углавном непланска изградња у Београду протеклих двадесет година значајно је смањила проценат zelenih површина у граду, тако да оне данас чине 30% укупне површине града [39], што је мање од европског просека. Поређења ради, у Мадриду и Берлину зелена инфраструктура је заступљена на 50% територије града [39]. Удео zelenih површина у урбаним деловима Београда тренутно износи свега 12,4% [40]. Према подацима објављеним у Плану генералне регулације система zelenih површина [41], на територији Београда има 7 ha zelenih површина под дрвећем, које дневно производе кисеоник за око 311800 становника, иако према последњем попису [42] град има 1685563 становника. Последњих година, људи све више цене присуство zelenih површина у градовима. За 84,8% грађана, више zelenih површина у Београду је други приоритет у побољшању квалитета животне средине, док 74,2% њих сматра да град има премало zelenih површина [43].

Процент zelenih површина у директном контакту са тлом је једини еколошки урбанистички параметер који се користи у Београду од 2019. године [43]. Овај параметар у центру града углавном износи свега 10%, што је мање од европског просека. Београд има огроман недостатак zelenih површина, а потенцијално решење овог проблема може бити озелењавање кровова постојећих зграда. Акциони план за зелени град [40], који је усвојен 2021. године, поменуо је стратешки циљ "употребе постојећих зграда за стварање елемената зелене инфраструктуре" и постављање у граду 30000 m<sup>2</sup> зеленог простора (зелени кровови или зелени зидови) у будућности. У Србији, постоји политичка воља да се подржи проширење програма развоја zelenih кровова, али недостају законски и плански оквири у просторном и урбанистичком планирању, одговарајући правилници и техничке смернице у овој области, како би се у пракси подстакла њихова шира примена.

У Београду 40% постојећег грађевинског фонда има равне кровове, док бројке по општинама износе: Нови Београд 70%, Земун 50%, Савски Венац, Стари Град и Врачар по 40% [44]. Станари углавном имају велике проблеме са постојећим равним крововима, као што су пропуштање воде и превелико загревање просторија испод крова, због лошег одржавања, старости зграда и непостојања термичке изолације крова. Постојећи грађевински фонд има велики потенцијал за адаптацију равних кровова постављањем zelenih кровних система и претварање ових сивих оронулих површина у мале зелене оазе. У Генералном урбанистичком плану Београда до 2021. године [45] зелени кровови се помињу као корективно зеленило, а свака површина са слојем супстрата дебљине 60 cm третира се као зелена површина. На овај начин су потпуно занемарени екстензивни зелени кровови, који имају мању дебљину, а који су погодни за санацију кровова постојећих зграда.

Према садашњем правном оквиру, врсте зелених површина као што су зелени кровови и зелени зидови, нису укључени у укупну количину зеленила на парцелама. Овакав приступ није подстицајан за инвеститоре и станаре у примени зелених кровова. Постоје тежње да се реши проблем недостатка зелених површина у главном граду. Акциони план адаптације на климатске промене [46], предвиђа повећање зелених површина у оквиру првенствено објеката јавне намене и других намена, као и пројектовање и изградњу кровова који су у потпуности или делимично покривени вегетацијом, као могуће мере адаптације на климатске промене у Београду. У овом плану су зелени кровови препознати као једна од могућих мера за повећање енергетске ефикасности у многим зградама у Београду, која доприноси прилагођавању климатским променама у градским срединама. Општина Нови Београд се у поменутом документу спомиње као релевантна локација за спровођење поменутих мера, због великог удела осетљиве популације односно старог становништва.

У Србији не постоји законска обавеза постављања система зелених кровова, као ни научна истраживања која би омогућила процену потенцијалних бенефита у локалним климатским условима. На нашим просторима, постоји огроман мањак информација и знања из ове области и јавност није упозната са улогом и значајем концепта зелених кровова у градским срединама. С обзиром да као држава немамо довољно искуства у тој области и да су велика почетна финансијска улагања због увоза материјала и недостатка институционалне подршке, инвеститори се тешко одлучују за изградњу система зелених кровова. Поред тога на домаћем тржишту постоји мали број фирми које нуде услугу увоза и постављања зелених кровова. Тренутно, за инвеститоре и власнике имовине зелени кровови представљају додатно финансијско оптерећење и потенцијално место за непредвиђене проблеме. Да би ова пракса заживела код нас, по угледу на друге светске градове, потребно је увођење финансијских и других подстицаја, како би се подржала већа примена зелених кровова посебно у приватном сектору.

Имајућу и виду да јавност у Србији није свесна предности концепта зелених кровова, неопходно је повећати свест људи и спровести промотивне активности у вези са тим. У Београду постоји много објеката јавне намене са равним крововима и крововима са малим нагибом, који су идеални за изградњу зеленог крова. Озелењавање јавних објеката, који би били доступни за посетиоце би могао бити добар почетни корак за упознавање већег броја људи са предностима коју зелени кровови пружају како на нивоу објекта тако и на нивоу града. Такви напори могу подржати формирање позитивног става према овим системима у будућности, успостављање законских и планских оквира за примену зелених кровова као саставног дела зелене инфраструктуре у Србији и на крају усвајање ове технологије у домаћој градитељској пракси.

### **3. Квалитет ваздуха**

Савремени начин живота је довео до појаве повећања загађености ваздуха. Више од две трећине становника у Европи живи у градовима и све је већа изложеност популације штетном дејству загађеног ваздуха. Према извештају Светске здравствене организације-СЗО (енгл. *World Health Organization-WHO*) чак 91% светске популације живи на местима где квалитет ваздуха прелази дозвољене границе према смерницама ове организације [47]. Загађење ваздуха је један од десет главних глобалних фактора ризика по здравље у Европи и широм света [48]. Организација за економску сарадњу и развој (енгл. *Organization for*

*Economic Cooperation and Development-OECD*) предвиђа да ће 2050. године на глобалном нивоу загађење спољашњег ваздуха бити највећи узрок смрти повезаних са еколошким условима [49]. Према предвиђањима ове организације, загађење ваздуха ће проузроковати чак девет милиона превремених смрти широм света у наредне четири деценије. Према подацима Светске здравствене организације, на светском нивоу годишње се бележи 4,2 милиона превремених смрти као последица загађења спољашњег ваздуха [47]. Због тога су неопходни стандарди и прописи за контролу загађења ваздуха у градовима. Измерене концентрације одређених загађивача могу се упоредити са дозвољеним вредностима према националним и међународним правилницима [47]. У градским срединама концентрације загађивача у ваздуху су неравномерно расподељене. Долази до стварања зона са значајно већом концентрацијом загађујућих супстанци (енгл. *hot spots*) углавном у ужем центру града, на саобраћајним раскрсницама и путевима. Поред тога, топографске и метеоролошке разлике у урбаним подручјима доводе до сложених просторних и временских промена концентрације загађивача.

Загађен ваздух из спољашње средине може доспети унутар зграда путем природне и механичке вентилације. Истраживање Алијансе за здравље и животну средину (енгл. *Health and Environment Alliance-HEAL*) у вези са загађењем ваздуха у спољашњој средини и у затвореном простору, на локацијама 50 школских установа у шест престоница Европске уније (Берлин, Лондон, Париз, Мадрид, Софија и Варшава), јасно указује да спољашњи загађен ваздух доспева у учионице и проузрокује лош квалитет унутрашњег ваздуха [50]. Због тога су установе намењене образовању посебно угрожене, јер загађен ваздух може негативно утицати на здравље и радни учинак деце. Квалитет ваздуха у затвореном простору у образовним установама је од великог значаја, јер ученици велики део времена проводе у учионицама, а и посебно су осетљива на присуство загађивача у ваздуху. Изложеност прекомерном загађењу може повећати ризик од развоја астме код деце, такође може утицати на развој срца, мозга и нервног система детета чак и пре рођења [51].

У Републици Србији лош квалитет спољашњег ваздуха један је од узрока смртности, скраћења животног века и повећаних здравствених трошкова. Према проценама Светске здравствене организације у Србији преко 6500 људи сваке године умре услед загађења спољашњег ваздуха [47]. Према годишњим извештајима о квалитету ваздуха, Агенције за заштиту животне средине (енгл. *Serbian Environmental Protection Agency-SEPA*), током последњих година суспендоване честице (енгл. *Particulate Matter-PM*) су биле доминантан загађивач у Републици Србији [10]. Поред тога, извештаји наводе да су индивидуална ложишта грађана и мале топлане одговорне за 77% загађења PM<sub>2,5</sub> честицама. Последњих година, званични подаци о квалитету ваздуха у Београду често су оцењени најгором трећом категоријом због прекорачења граничне вредности суспендованих честица, што указује да је ваздух који се удише веома загађен [52]. Током последњих деценија због интензивне урбанизације, у Београду је присутан смог током јесени и зиме када се појачавају извори емисије загађења ваздуха, али и у топлијем делу године када настаје као последица фотохемијских реакција.

Загађивачи ваздуха могу бити у течном и чврстом стању, као органска једињења (бензен, толуен, диклорметан, формалдехид, полихлорисани бифенили, тетрачлоретилен) или неорганска једињења (азбест, кадмијум, олово, манган, жива). У примарне загађиваче, који се директно емитују у ваздух спадају следећи гасови: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, PM<sub>10</sub> и Pb.

У секундарне загађиваче, који настају у хемијским реакцијама у атмосфери, спада приземни  $O_3$  и  $PM_{2,5}$ . Интензивна урбанизација је највише довела до повећања концентрације  $PM$  и  $NO_2$ . Параметри који су обавезни да се мере у амбијенталном ваздуху по националној регулативи су:  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ ,  $Pb$ , бензен,  $CO$ ,  $O_3$ ,  $As$ ,  $Cd$ ,  $Hg$ ,  $Ni$  и бензо(а)пирен [53-54]. Многи од ових загађивача директно или индиректно доприносе глобалном загревању и климатским променама.

### 3.1 Суспендоване честице

Чврсте суспендоване честице ( $PM$ ) или аеросоли су озбиљан загађивач ваздуха у развијеним земљама и земљама у развоју. Представљају мешавину тешких метала, полицикличних ароматичних угљоводоника, угљеника и других супстанци суспендованих у атмосфери. Примарне честице су оне које се емитују из широког спектра извора: возила, електране, индустрије, градилишта, рударство, неасфалтирани путеви, итд. Реаговањем оксида сумпора и азота и претварања у сумпорну и азотну киселину настају секундарне честице. Када су антропогеног порекла, извори ових честица су: процеси сагоревања фосилних горива при производњи топлотне и електричне енергије, у моторним возилима и локалним ложиштима, фотохемијске реакције (настајање градског смога у комплексним ланчаним реакцијама гасовитих загађивача под утицајем соларног зрачења), ресуспендована прашина, индустријски процеси, спаљивање ђубрета, итд. Услед чињенице да су преко зиме чести периоди стабилне стратификације атмосфере праћене високим притиском, ниским температурама и временом без ветра и падавина долази до вишедневног повећања концентрације емитованих загађивача, посебно  $PM$  честица у приземном слоју ваздуха.

$PM$  честице су пречника од  $0,001 \mu m$  до  $100 \mu m$ , могу остати у атмосфери дужи временски период и бити транспортоване на велику удаљеност. У зависности од аеродинамичког пречника, честице можемо поделити на грубе, fine и ултраfine честице. Грубе честице ( $PM_{10}$ ) имају аеродинамички пречник између  $2,5 \mu m$  и  $10 \mu m$ , а чини их прашина, летећи пепео, морске соли, полен, споре плесни, итд. Fine честице ( $PM_{2,5}$ ) имају аеродинамички пречник мањи од  $2,5 \mu m$ , а укључују честице сагоревања и секундарно формиране аеросоле. Настају у хетерогеним хемијским реакцијама, које се одвијају у атмосфери или настају сагоревањем фосилних горива у моторним возилима, термоелектранама, индустријским постројењима и индивидуалним ложиштима. Могу настати и распадањем крупнијих честица на мање делове. Ове честице су врло покретљиве и доспевају у дубље делове плућа у поређењу са grubим честицама, тако да изложеност високим концентрацијама  $PM_{2,5}$  представља озбиљну бригу за јавно здравље. Ултраfine честице су пречника мањег од  $0,1 \mu m$  и настају као последица сагоревања (ултраfine чађ). Ове честице су најштетније по људско здравље, јер доспевају у најдубље делове плућа, а одатле у кровоток.

Хемијске и физичке особине честица зависе од географске локације, годишњег доба и метеоролошких услова у времену формирања честица [55-56].  $PM$  честице се из атмосфере уклањају кроз процесе суве и влажне депозиције и таложења у интервалу од само неколико часова од тренутка њихове емисије у ваздуху. У Србији у оквиру државне мреже станица за квалитет ваздуха, Агенција за заштиту животне средине врши свакодневна мерења односно узорковање ваздуха ради одређивања масених концентрација  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  референтном гравиметријском методом. После гравиметријске анализе суспендованих честица врши се

даља анализа хемијског састава. Према подацима из извештаја СЗО о утицају загађења ваздуха на здравље становника Србије, средња вредност концентрације  $PM_{2,5}$  на годишњем нивоу је  $19,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  где је измерена нешто виша вредност у урбаним подручјима него у руралним  $21,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  односно  $19,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [57].

За период од 2010. до 2015. године, просечне вредности честица  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  у Београду у наведеном периоду износиле су  $44,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $29,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [58]. Према подацима Агенције за заштиту животне средине, на мерној станици Нови Београд током 2019. и 2020. године, забележене су средње годишње вредности  $PM_{10}$  од  $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Број дана са прекорачењем граничне вредности  $PM_{10}$  у Новом Београду у 2019. и 2020. години је био 169 и 74. У периоду 2017-2021. године Београд је имао прекомерно загађен ваздух, углавном због повећаних концентрација  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ , али и због повећаних концентрација  $NO_2$  што је био случај у 2017. и 2021. години [58].

Суспендоване честице су 2021. године, као и претходних година, биле доминанти загађивач на територији Србије. У агломерацији Београда ваздух је био треће категорије односно прекомерно загађен, услед прекорачења граничних вредности суспендованих честица  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  и  $NO_2$ . Према Националном еколошком удружењу, на основу анализе резултата мерења са државних и локалних мрежа за мониторинг квалитета ваздуха, Београд је у 2021. Години био најзагађенији град у Европи са више од милион становника. Највећи извор загађења ваздуха у Београду су саобраћај, индивидуална ложишта и индустријска постројења [59].

Према [58], изложеност честицама  $PM_{2,5}$  изазвала је 3585 превремених смрти у Србији сваке године у периоду од 2010-2015. године, укључујући и 1796 у Београду. Ако се ништа не промени, током следећих десет година очекује се да грађани Србије годишње изгубе 150865 живота услед загађења ваздуха. Од овог броја 75261 се односи на Београд. Ови огромни бројеви захтевају интервенције политике на глобалном, регионалном и националном нивоу.

Да би се решио проблем загађења ваздуха у нашој земљи, више локалних заједница и градова су припремили или започели припрему локалних планова заштите ваздуха. Како решавање овог проблема изискује интензивније активности на локалном и националном нивоу, крајем прошле године је усвојен Програм заштите ваздуха у Републици Србији за период од 2022. до 2030. године са акционим планом [60]. Између осталог, у њему се предлаже и национална обавезе смањења емисија за  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$ ,  $PM_{2,5}$  и  $VOC$ . Програм предвиђа и спровођење активности које се односе на едукацију и подизање свести, у циљу давања доприноса у овој области од стране чланова друштвене заједнице.

### 3.2 Угљен-моноксид

Угљен-моноксид ( $CO$ ) је гас без боје, мириса и укуса, лакши је од ваздуха и спада у групу неутралних оксида (не реагују са водом, киселинама и базама). Угљен-моноксид је производ непотпуног сагоревања горива, укључујући гас, нафту и угљ. Индустријска постројења која производе угљен моноксид укључују: производњу метала, рударство, производњу хране, хемијску производњу, производњу гипса и бетона, итд. Други извори атмосферског угљен моноксида су спаљивање отпада, шума, пожари и вулкани. Главни извор угљен-моноксида у затвореном простору је дувански дим. Има јаку токсичност, јер спада у групу хемијских загађивача. У спољашњем ваздуху концентрације  $CO$  налазе се у



опсегу 10-200 ppb. Нивои концентрације CO у урбаним срединама су веома променљиви у зависности од временских услова и густине саобраћаја. Средње 8-часовне вредности су углавном мање од 10 ppb, али могу да буду и до 500 ppb.

### 3.3 Угљен-диоксид

Угљен диоксид (CO<sub>2</sub>) је природно присутан у Земљиној атмосфери као важан гас стаклене баште. Од индустријске револуције дошло је до повећања нивоа угљен-диоксида и глобалног загревања. Пораст концентрације CO<sub>2</sub>, као једног од гасова који утиче на ефекат стаклене баште, у односу на преиндустријски период износи 30%. Његов ниво у атмосфери је значајно порастао са 280 ppb у преиндустријској ери на тренутних 380 ppb. Поред природних, други извори атмосферског угљен-диоксида су сагоревање фосилних горива, чврсти отпад, сеча шума и производња цемента. Крчење шума смањује количину угљен-диоксида који се уклања из атмосфере. Угљен-диоксид је такође присутан у налазиштима нафте и природног гаса. Од многих гасова стаклене баште, угљен-диоксид има главни допринос глобалном порасту температуре [61]. Раствара се у води и ствара угљену киселину која доприноси загревању и закисељавању океана. Према проценама Међувладиног панела о климатским променама (енгл. *Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC*), повећање концентрације угљен-диоксида у атмосфери доводи до климатских промена и глобалног загревања планете.

Истраживања су показала да је његова концентрација у градским срединама већа него у руралним срединама и зависи од метеоролошких параметара и урбане агломерације. Максимална вредност концентрације CO<sub>2</sub> региструје се током зимске сезоне, док су минималне вредности присутне током лета. Емисија угљен-диоксида антропогеног порекла је примарни извор повишених концентрација CO<sub>2</sub> над урбаним подручјима које узрокују локално повећање температуре. Повишена концентрација угљен-диоксида је интензивнија у ужем градском језгру током зимског периода, а посебно радним данима и у ноћном периоду, у условима великог саобраћаја, близу тла, када нема ветра и великих температурних инверзија.

### 3.4 Озон

Високе концентрације озона (O<sub>3</sub>) су присутне у стратосфери (тзв. озонски омотач), где је његова улога да апсорбује ултраљубичасто зрачење Сунца. Међутим, високе концентрације приземног озона су штетне за живи свет. У тропосфери, близу нивоа земље, озон је секундарни загађивач атмосфере и главна компонента смога. Концентрације озона су углавном веће у руралним срединама, па је посебно штетан за шуме и пољопривредне усеве. Озон смањује продуктивност усева и способност вегетације да апсорбује угљеник [62]. У тропосфери, близу нивоа земље, озон је секундарни загађивач атмосфере и главна компонента смога. Озон се не емитује директно у ваздух као већина других загађивача. Део се преноси из стратосфере у тропосферу, док се већина приземног озона формира индиректно реакцијом соларног зрачења, посебно ултраљубичастог, са другим гасовима као што су оксиди азота, угљен-моноксид и испарљива органска једињења односно волатили. Због тога загађење озоном утиче на урбана подручја у којима се због великог интензитета саобраћаја емитује NO<sub>2</sub> и VOC.

Највеће концентрације приземног загађења озоним јављају се током топлих летњих периода када нема ветра, због повећане концентрације  $\text{NO}_2$  и  $\text{VOC}$ . У урбаним регионима, приземни озон има атмосферски животни век од неколико сати до неколико недеља. Приземни озон у комбинацији са осталим гасовитим загађивачима ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) и финим честицама ( $\text{PM}_{2,5}$ ) доводи до формирања загађења ваздуха познатог под називом смог.

### 3.6 Оксиди азота

Групе једињења познатог под називом  $\text{NO}_x$  представљају азот-оксид ( $\text{NO}$ ), азот-диоксид ( $\text{NO}_2$ ) и азот-субоксид ( $\text{N}_2\text{O}$ ) који је присутан у веома малим количинама. Азот-диоксид је главни извор нитратних аеросола, који учествују у формирању важних фракција  $\text{PM}_{2,5}$  у присуству ултраљубичастог зрачења и озона. Азот-оксид доприноси стварању тзв. киселих кише, које имају веома негативан утцај на животну средину. Глобално гледано, количине азотних оксида који настају природним путем (шумски пожари, вулкани и муње) далеко превазилазе антропогене емисије. Антропогене емисије углавном настају сагоревањем фосилних горива из стационарних извора (у процесима производње енергије) и мобилних извора (саобраћај), док мањи део потиче из процеса производње азотне киселине, процеса заваривања и употребе експлозива. У европским урбаним срединама, доминантни извор високе концентрације азот-диоксида је саобраћај [63]. Средње годишње концентрације  $\text{NO}_x$  у урбаним срединама углавном су у опсегу 10-45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Нивои се током дана значајно разликују, а максималне вредности концентрација се углавном бележе два пута дневно као последица саобраћајних гужви. Ваздух може прећи одређено растојање пре него што примарни загађивачи реагују и произведу секундарне загађиваче. Азот-диоксид је индикатор других загађивача који се емитују због саобраћаја.

### 3.6 Улога вегетације у смањењу загађења ваздуха

Обезбеђивање одговарајућег квалитета животне средине у урбаним срединама представља значајан изазов, а зелени кровови су један од начина да се на тај изазов одговори [64]. Зелена инфраструктура, која обухвата дрвеће у парковима и поред путева, зелени кровови, зелени зидови и различите вегетацијске баријере могу смањити концентрације различитих загађивача у ваздуху кроз механизам фитофилтрације [65].

Листови вегетације уклањају атмосферске честице депозицијом односно таложењем на својој површини и апсорбовањем гасовитих загађивача. Депозиција и апсорпција загађујућих супстанци на лишћу биљака зависи од њихове концентрације, падавина и тубуленције ваздуха изнад површине тла [66-67]. Облик и величина лишћа знатно утиче на могућност смањења концентрације загађујућих супстанци у ваздуху. Лишће прекривено длачицама је ефикасније у задржавању загађујућих супстанци у поређењу са глатким листовима, док храпавост и изглед кутикуле утиче на адхезију супстанци на површини листа [68].

Биљке уклањају значајне количине  $\text{PM}$  честице, посебно у урбаним срединама и близу путева, сувим и влажним таложењем честица на листовима или задржавањем честица у воску [69]. Суво таложење крупнијих честица се сматра мање битним, у поређењу са влажним таложењем веома финих честица. Ситније честице могу лакше продрети у унутрашњост листа, док крупније бивају задржане на воску који се налази на површини епидермиса листа

[70]. Део депонованих или акумулираних РМ честица може бити поново ресуспендован под дејством ветра, док други део остаје везан за биљку. Честице пречника мањег од 0,2  $\mu\text{m}$  могу се трајно задржати у биљци након проласка кроз стомате [71-72]. Са друге стране, падавине спирају честице, које онда ступају у контакт са кореном биљака, где долази до процеса депурације [73]. Када су питању гасовити загађивачи, они након апсорпције унутар биљака формирају киселине и друга хемијска једињења.

Биљке имају значајну улогу у смањењу концентрације угљен-диоксида и ослобађању кисеоника у процесу фотосинтезе. Зелени кровови уз остале зелене површине у граду утичу на смањење загађења ваздуха и ефекат стаклене баште кроз биолошке процесе као што су суво депновање, апсорпција и складиштење угљеника. На зеленим крововима угљеник се абсорбује од стране биљака и медијума за раст вегетације. Поред тога зелени кровови могу индиректно да допринесу смањењу концентрације угљен-диоксида, тако што смањују потребну енергију за грејање и хлађење зграда и на тај начин производњу енергије и емисију загађујућих продуката из термоелектрана и индивидуалних ложишта. Поред тога, како се приземни озон много лакше формира са порастом температуре, зелени кровови утичу на спорије формирање приземног озона смањујући температуру ваздуха.

#### 4. Преглед литературе

Одређивању предмета истраживања докторске дисертације, претходила је анализа доступне литературе, која се базира на прегледу великог броја радова објављених у међународним и домаћим часописима, на скуповима у земљи и иностранству и стручних књига. Током протеклих година у свету су објављене многе студије везане за истраживање зелених кровова. Установљене су и јавно доступне базе података [74-76] које садрже податаке о изведеним објектима са зеленим крововима.

Последњих деценија широм света су се формирала удружења за промоцију концепта зелених кровова, као што су: Међународно удружење за зелене кровове (енгл. *International Green Roof Association-IGRA*), Европска федерација асоцијација зелених кровова и зидова (енгл. *European Federation of Green Roof and Green Wall Associations- EFB*), Светска мрежа зелене инфраструктуре (енгл. *World Green Infrastructure Network*), Скандинавско удружење за зелене кровове (енгл. *Scandinavian Green Infrastructure Association*) и различите националне организације за зелене кровове (енгл. *US Green Building Council, UK Green Building Council, Canada Green Building Council*). У Србији од 2020. године постоји Национална асоцијација зелених кровова, која ради на упознавању јавности са предностима елемената зелене инфраструктуре, подстицању њене примене у нашој земљи и промовисању постојећих примера добре праксе из других земаља.

##### 4.1 Утицај зелених кровова на енергетску ефикасност објекта

Вегетација, а пре свега листови биљака, апсорбују, рефлектују или пропуштају соларно зрачење. Биљке за своје метаболичке процесе као што су фотосинтеза, дисање, транспирација и испаравање воде, користе апсорбовано соларно зрачење [77]. Зелени кровови штите кров од екстремних температура и великих температурних осцилација. Експериментално истраживање спроведено у медитеранској клими у Италији [37], показало је да је током лета температура површине зеленог крова за 12 °C мања у поређењу са црним

битуминозним кровом, а током зиме за 4 °C већа. Поред тога, применом зеленог крова смањили су се топлотни губици током зиме за 30-37%. Друга експериментална студија спроведена у медитеранској клими [78] анализираше понашање различитих зелених кровова током лета и зиме. Показано је да су разлике температуре површине зелених кровова и конвенционалног крова много веће током лета него током зиме. Поред тога средња месечна температура унутрашњег ваздуха испод зеленог крова била је већа за 0,2-4,6 °C током зиме и нижа за 5-11,3 °C током лета. У хладној зими у Естонији [79], измерена температура испод слоја вегетације зеленог крова није падала испод -10 °C током зиме, док је температура лименог крова достигала -20 °C. У току лета мерења су показала да је зелени кров смањив флукуацију температуре за 20 °C.

Утицај зеленог крова на температуру кровне конструкције има ефекат на топлотни флукс кроз кров. Експериментом спроведеним у лабораторијским условима показано је да су биљке смањиле топлотни флукс кроз узорак са зеленим кровом за 40-50%, у поређењу са узорком крова без биљака [80]. Експериментална мерења током зиме у Канади [81], показала су да је зелени кров имао мањи губитак топлоте у поређењу са конвенционалним кровом, али да није било разлике у губицима топлоте између зеленог и конвенционалног крова када је супстрат за раст биљака био замрзнут и прекривен снегом. Топлотни флукс кроз кров има директан утицај на унутрашњи топлотни комфор и енергетске потребе за грејањем и хлађењем. У климатским условима који постоје у Француској током топлих летњих дана зелени кров може снизити температуру ваздуха унутар објекта за 2 °C [82]. Утицај зелених кровова на температуру унутрашњег ваздуха је значајнији у топлијим климама.

Истраживање спроведено у Хонг Конгу [83], открило је да у неким случајевима зелени кров може апсорбовати топлоту и повећати топлотне добитке кроз кровну конструкцију, као и температуру унутрашњег ваздуха за 1-2 °C. Зелени кров може током летњих ноћи довести до повећања температуре унутрашњег ваздуха, посебно у суптропским регионима [84].

Истраживање спроведено у Грчкој [85], показало је да је зелени кров на двоспратној згради супермаркета смањив потребну енергију за хлађење и грејање за 18,7% и 11,4%, стим што је зелени кров имао највећи утицај на последњи спрат, док је уштеда потребне енергије за хлађење и грејање за први спрат незнатна. Поред тога, зелени кров је допринео повећању унутрашње температуре ваздуха за 0,1-0,7 °C током хладног периода и смањењу температуре унутрашњег ваздуха за 0,1-1,1 °C током летњег периода, доприносећи побољшању топлотног комфора, посебно на последњем спрату зграде, који је у директном контакту са зеленим кровом.

Студија [86], која је истраживала утицај зеленог крова на потребну енергију за грејање и хлађење зграде хотела у Грчкој, показала је да је уштеда потребне енергије за грејање за изолован зелени кров 9%, док је за неизолован зелени кров 45%. Уштеда потребне енергије за хлађење за изолован зелени кров је 0%, док је за неизолован зелени кров 45%. Највеће уштеде постигнуте су у зимском периоду, а не у летњем, иако се сматра да зелени кровови углавном служе као пасивна техника хлађења. Међутим друго истраживање [38], у Грчкој показало је да је утицај зеленог крова на потребну енергију за грејање школске зграде занемарљив, док су отворене уштеде потребне енергије за хлађење зависно од месеца од 15% до 49% за неизоловану зграду и од 6% до 33% за изоловану зграду. Утицај зеленог крова на енергетску ефикасност објекта у великој мери зависи од локације и климатских услова, У студији [82], динамичким симулацијама је одређен утицај зеленог крова на кућу смештену у

топлој Медитеранској клими, умереној клими Француске и хладној клими Шведске. Побољшање унутрашњег топлотног комфора и смањење потребне енергије за хлађење је израженије у топлој клими, док је у хладној клими изражено смањење потребне енергије за грејање. У топлим климама под утицајем зеленог крова може доћи до повећања енергетских потреба за грејањем, али је ово повећање незнатно у поређењу са смањењем енергетских потреба за хлађењем. У влажној суптропској клими Хонг Конга [87], зелени кров може током кишних летњих дана незнатно повећати топлотни флуks кроз кровну конструкцију, док је током сунчаних и облачних дана топлотни флуks кроз зелени кров мањи у поређењу са конвенционалним кровом. Укупна потребна енергија за грејање и хлађење се смањује применом зеленог крова у топлим, умереним и хладним климама, што зелене кровове чини погодним решењем за побољшање енергетске ефикасности у већини Европских земаља са различитом климом.

Студија [88], је проценила енергетску и економску одрживост постављања зеленог крова на стамбеној згради у топлој влажној клими Саудијске Арабије. Анализирана су три случаја, када је цео објекат покривен зеленим кровом и када су само поједини делови под зеленим кровом. Добијена уштеда енергије се налази у распону од 24% до 35%. Резултати економске анализе показују да се због ниске цене струје у Саудијској Арабији, зелени кров у потпуности исплати тек на крају животног циклуса зграде и није економски одржива опција.

Неке студије су показале да је утицај зелених кровова на потребну енергију за грејање и хлађење зграде за одређене климатске услове занемарљив, а у неким случајевима постављање зеленог крова може чак да доведе до повећања потребне енергије за грејање [89-90]. Док неки аутори тврде да зелени кров може допринети значајној уштеди енергије за грејање и хлађење када кровна конструкција нема термичку изолацију [86], други тврде да ова врста конструкције не може да замени термоизолациони слој [91].

Повећање дебљине супстрата може довести до смањења протока топлоте кроз кровну конструкцију [92-93]. Показано је да повећање дебљине супстрата може довести до смањења топлотног оптерећења током лета, без обзира на промене нивоа покривености крова вегетацијом [94]. Већа покривеност вегетацијом снижава температуру површине крова и смањује топлотно оптерећење током лета. До тога долази због ефекта сенке и веће транспирације, који има гушћа вегетација, без обзира на дебљину супстрата. Међутим, у једној студији повећање дебљине супстрата са 7,5 cm на 15 cm није имало утицаја на смањење топлотних губитка кроз кровну конструкцију [82]. Резултати студије у Кини [95], показују да већи садржај воде у супстрату може допринети побољшању термичких карактеристика зеленог крова, док је студија изведена у Италији, открила да је велики садржај воде имао негативни утицај на термичке карактеристике зеленог крова [96].

Претходна истраживања зелених кровова се углавном фокусирају на зелене кровове постављене на стамбеним објектима. Нестамбени објекти у којима борави више људи, имају већу специфичну потрошњу енергије у односу на стамбене. Такви објекти су образовне и здравствене установе, пословни и угоститељски објекти. У литератури постоје истраживања примене зелених кровова на пословној згради [97], продавници [98], супермаркету [99], хотелу [86], чак и железничкој станици [87]. Међутим, утицај зеленог крова на енергетске карактеристике школских зграда, упркос њиховој величини и доприносу потрошњи енергије, није у литератури довољно узет у обзир. Познато је да се у оваквим објектима због њихове површине и намене троши велика количина енергије, као и новца из државног буџета, а интересантни су и са аспекта коришћења простора.

Резултати студије [100] показали су да уколико се зелени кров постави на 1400 јавних објеката у Хонг Конгу могу се током лета смањити добици топлоте за 43,9 ТЈ, а самим тим и смањити потребна енергија за хлађење. Објекти у власништву јавног сектора су идеални за озелењавање у циљу промоције концепта зелених кровова и пружања примера добре праксе, а што је најважније постизања веће енергетске ефикасности и смањења трошкова за грејање и хлађење који се издвајају из државног буџета. Више пажње треба посветити истраживању потенцијала побољшања енергетске ефикасности јавних објеката.

Истраживања лаких зелених кровова су посебно важна, са аспекта санације крова и побољшања енергетске ефикасности постојећег грађевинског фонда. Упркос томе, у литератури постоји недостатак истраживања топлотних карактеристика и изолационог ефекта ове врсте зелених кровних система. С обзиром на распрострањеност објеката старе градње, важно је спровести експериментална испитивања на реалним објектима топлотног понашања зелених кровова са супстратом од минералне вуне.

Истраживан је утицај смрзавања воде на термичко понашање лаког екстензивног зеленог крова са супстратом од минералне вуне, постављеног на тест кућици димензија 3x3 m [101]. Резултати формираног нумеричког модела, који је потврђен са експерименталним резултатима, показали су да је при температури спољашњег ваздуха мањој од 0 °C због акумулације латентне топлоте максимални топлотни флуks зеленог крова до 30% мањи него код конвенционалног крова.

У другој студији [102], истражен је изолациони ефекат комбинације супстрата земље, камене вуне и дренажног слоја у влажно-тропској клими и упоређен је са изолационим ефектом супстрата земље и дренажног слоја и само супстрата земље, применом једнодимензионог теоријског модела и експерименталних мерења. Развијен је теоријски модел за процену процеса дифузије топлоте кроз земљу, камену вуну и дренажни слој од пластике, који се користе у зеленим кровним системима. Најниже температуре и најмање температурне осцилације се јављају у структурно најсложенијем систему тј. комбинацији супстрата земље, камене вуне и дренажног слоја. Разлог за то је што слој камене вуне задржава значајну количину воде, која испарава током сунчаних дана (губитак латентне топлоте), а поред тога влажна камена вуна има већи специфични топлотни капацитет. Поред тога дренажни слој који је испуњен ваздухом служи као одличан топлотни изолатор.

Преглед литературе указује да зелени кров може повећати или смањити потребну енергију за грејање и хлађење зграде зависно од локације, климатских услова и карактеристика зграде и зеленог крова. Поменуте студије о зеленим крововима дају веома различите резултате, које је немогуће поредити, због различитих географских локација и климатских услова, избора биљака и супстрата, различите структуре зелених кровова и објеката на којима су вршена истраживања [103].

Метеоролошки услови значајно утичу на топлотно понашање зеленог крова. Непредвидивост метеоролошких услова (соларно зрачење, температура, влажност, брзина ветра итд.) указује да је анализа понашања зелених кровних система изузетно сложена и да је немогуће искључити било који од наведених параметара [104]. Експериментална мерења у Шангају [105] и корелациона анализа су показали да је соларно зрачење фактор који највише утиче на топлотни флуks кроз зелени и конвенционални кров у неклиматизованим условима, док у климатизованим условима корелација између соларног зрачења и топлотног флуksа кроз зелени кров није значајна. Највише корелација са метеоролошким параметрима имала је температура спољашње површине зеленог крова, али је ова температура имала најмањи

корелациони фактор са ефектом хлађења зеленог крова. Друга студија из Кине [106], открила је да соларно зрачење и релативна влажност имају највећи број коефицијената корелације са индикаторима топлотног ефекта екстензивног и интензивног зеленог крова. Интензивни зелени кров је био мање осетљив на метеоролошке параметре током лета и зиме у односу на екстензивни зелени кров.

Постоји велики јаз између неразвијених и развијених земаља у којима је већ урађено много истраживања о зеленим крововима. Да би се подстакла шира примена зелених кровова потребно је спровести више истраживања, како би се могло боље сагледати термичко понашање зелених кровова у различитим климатским условима. За разумевање процеса преноса топлоте кроз различите кровне конструкције са зеленим кровом, потребно је спровести експериментална истраживања у климатским условима централне и источне Европе, јер на овим просторима није било много истраживања на ову тему. Поред тога је неопходно проучити утицај влаге у слоју супстрата на ефекат топлотне изолације зеленог крова [107].

На основу прегледа литературе може се закључити да није могуће применити резултате истраживања утицаја зелених кровова спроведених у другим државама. Стога није могуће дати генералне смернице за пројектовање нових и санацију постојећих зграда применом зелених кровова у циљу могуће пасивне уштеде енергије и побољшања енергетске ефикасности грађевинског фонда у нашој земљи.

#### **4.2 Утицај зелених кровова на ефекат урбаног топлотног острва**

У градским срединама је температура ваздуха виша у односу на предграђа и околне руралне средине. Појава ове температурне разлике се назива "урбано топлотно острво" (УТО). У градовима се због интензивне урбанизације, повећавају површине под бетоном, асфалтом и другим вештачким материјалима, а смањују се зелене површине. Ови конвенционални материјали због мале вредности албеда апсорбују и акумулирају топлоту током дана. После заласка Сунца, ускладиштена топлотна енергија се емитује и долази до загревања спољашњег ваздуха. Кровне површине у граду чине 20-25% од укупних површина у урбаним подручјима [108]. Смањење температуре површине кровова у градским срединама може играти кључну улогу у смањењу ефекта УТО [109]. Загревање зграда и околног ваздуха за последицу има повећано коришћење системе климатизације и већу потрошњу енергије, што опет доводи до додатног повећања температуре ваздуха. Високе температуре у урбаним срединама узрокују повећање потрошње енергије за системе климатизације скоро три пута, док се истовремено њихова ефикасност смањује [110]. У градовима је повећана индустријска и људска активност, услед чега долази до антропогене емисије топлоте и емисије гасова са ефектом "стаклене баште", који доприносе загревању ваздуха.

Зелени кровови, као и друге зелене површине у градовима, могу имати позитиван утицај на УТО. Конвенционални кровни материјали имају малу вредност албеда (око 0,06), због чега апсорбују велики део соларног зрачења. Зелени кровови имају много већи албеда (0,7-0,8), па рефлектују више соларног зрачења, што помаже да се смањи загревање околног ваздуха. Вегетација на зеленом крову спречава продирање 6-30% соларног зрачења лети и 10-80% зими, као и загревање супстрата на зеленом крову [111]. Поред тога, транспирацијом биљака и испаравањем воде из супстрата земље, снижава се температура околног ваздуха и смањује потребна енергија за хлађење.

Студија утицаја зеленог крова на урбано топлотно острво у тропској клими Сингапура [112], указује на смањење добитака топлоте на зеленом крову за 31%, као и да наводњавани зелени кровови имају већи потенцијал за ублажавање УТО него зелени кровови који се не наводњавају. Експериментално истраживање утицаја зеленог крова на температуру спољашњег ваздуха у влажној суптропској клими Хонг Конга [87], показало је да зелени кров може смањити дневну максималну температуру површине крова за 5,2 °C и температуру ваздуха на висини од 10 cm изнад зеленог крова за 0,7 °C, док на температуру ваздуха на висини од 160 cm није било значајног утицаја. Још две студије [104], [113] су потврдиле да се ефекат хлађења смањује са порастом растојања од зеленог крова.

Мерењем температуре ваздуха на различитим висинама изнад зеленог крова и конвенционалног крова [114], уочене су током дана више температуре ваздуха ближе површинама крова. Након заласка Сунца температура околног ваздуха изнад вегетације је била значајно мања и зелени кров је настављао да "хлади" околни ваздух током ноћи. Ефект "хлађења" вегетације је био најизраженији од поподнева до изласка сунца наредног дана и опадао је са порастом растојања од зеленог крова. Конвенционални кров је током дана акумулирао топлоту и током ноћи је емитовао више топлоте, повећавајући температуру околног ваздуха. Максималне разлике глобалне температуре ваздуха и средње радијантне температуре ваздуха изнад конвенционалног и зеленог крова од 4,05 °C и 4,5 °C, забележене су непосредно после заласка сунца, и указују да је дуготаласно зрачења које се емитује са зеленог крова мање у поређењу са конвенционалним кровом, што показује да зелени кровови могу да ублаже ефекат УТО. Зелени кров који је сув не само да губи свој ноћни ефекат хлађења током ноћи, већ може имати и благи ефекат загревања током дана [115]. Међутим више студија је показало да зелени кровови могу имати благи ефекат загревања током ноћи, јер супстрат земље акумулира топлоту током дана и емитује је током ноћи [116-118].

Истраживање спроведено у Техерану [119], показало је да је температура ваздуха изнад зеленог крова у поређењу са битуменским кровом била за 3,6-3,7 °C мања, релативна влажност на позицији зеленог крова је била већа за 8,46-11,94%, док је концентрација CO<sub>2</sub> изнад зеленог крова била мања за 20,71-27,98 ppm у поређењу са битуменским кровом. Максимална разлика температуре површине зеленог крова и битуменског крова била је 17,5 °C. Ефекат топлотног острва може се ублажити озелењавањем кровова у градским срединама. У литератури има само мало студија, које имају за циљ процену потенцијала зелених кровова за ублажавања ефекта топлотног острва на нивоу читавог града. Већина студија разматра кровове екстензивног типа и користи симулације засноване углавном на мезоразмерним моделима. Уколико би се 50% кровних површина у Њујорку покрило зеленим крововима, температурна разлика између града и околине могла би се смањити за 0,8 °C [120].

Резултати климатског модела су показали да у Чикагу зелени кровови могу смањити температуру спољашњег ваздуха близу површине крова за 1,2 °C [121]. Смањење индекса урбаног топлотног острва је релативно мало због повећања релативне влажности ваздуха изнад зелених кровова услед евапотранспирације. На утицај зеленог крова на УТО значајно утиче врста зеленог крова, избор биљака, степен покривености вегетацијом, врста и влажност супстрата зеленог крова [122-123].



### 4.3 Утицај зелених кровова на квалитет ваздуха

Већина претходних истраживања везана за зелене кровове се углавном бавила испитивањем њиховог утицаја на енергетску ефикасност зграда и микроклиму. У последњих 30 година, само 5% објављених радова се бавило утицајем зелених кровова на квалитет ваздуха у централним градским зонама [124]. Спроведено је много истраживања способности биљака да пречишћавају ваздух, али се мало њих фокусирало посебно на зелене кровове.

Квантификована је способност сувог таложења PM10 и PM2,5 честица пет врста биљака које се најчешће користе на зеленим крововима и четири врсте које се најчешће користе на зеленим зидовима у семиаридној клими [125]. Резултати показују да се значајна количина PM честица таложи на биљкама и да постоји велика разлика у резултатима између врста биљака, због површине и анатомских особина лишћа. Утврђено је да су врсте биљака са мањим листовима (*S. album*, *L. spectabilis*, *S. reflexum*) најефикасније у уклањању PM10 и PM2,5 честица.

Вегетациони слој и супстрат од земље на зеленом крову могу апсорбовати угљеник из атмосфере. Како би се одредила способност зеленог крова да апсорбује угљеник, у Америци [126] су спроведена два сета мерења. Анализирани су узорци са дванаест екстензивних зелених кровова, са седумским биљкама, различите дебљине и старости. Први скуп података показао је висок степен променљивости количине апсорбованог угљеника од 73 до 276 g/m<sup>2</sup> између дванаест зелених кровова, вероватно под утицајем старости, дебљине супстрата, примене ђубрива и наводњавања. Такође су анализирани узорци биомасе изнад земље, испод земље (корене) и садржај угљеника у супстрату зеленог крова током две вегетационе сезоне. Други скуп података показао је да је надземна биомаса акумулирала 168 g/m<sup>2</sup>, корене 107 g/m<sup>2</sup>, а подлога 100 g/m<sup>2</sup>.

Ниво уклањања загађивача из спољашњег ваздуха применом зелених кровова у Чикагу је квантификован коришћењем модела сувог таложења [127]. Резултати су показали да за годину дана 19,8 ha под зеленим крововима може апсорбовати 1675 kg загађујућих компоненти из спољашњег ваздуха, при чему O<sub>3</sub> чини 52%, NO<sub>2</sub> 27%, PM10 14% и SO<sub>2</sub> 7%. Највећа апсорпција загађења из ваздуха је у мају када је и највећа концентрација загађења и када вегетација има добро развијено лишће, док је најмања апсорпција загађења у фебруару када је вегетација прекривена снегом.

Друга студија [128], базирана на симулационом моделу указује да зелени кров зависно од врсте биљака, путем смањења енергетских потреба за грејање и хлађење зграда, може годишње индиректно да спречи испуштање од 23,44 до 28,16 kg/m<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> у атмосферу. Зелени кровови површине 1000 m<sup>2</sup> могу да ухвате 160-220 kg прашине годишње, смањујући концентрацију прашине у атмосфери за око 25% [129]. Уколико би се сви равни кровови у централном Манчестеру покрили екстензивним зеленим кровом са седумским биљкама, могло би се из атмосфере уклонити 0,21 t PM10 годишње [130].

Студија у Торонту [131], је на основу резултата симулационог модела UFORE (енгл. *Urban Forest Effects*), открила да би 58 t различитих загађивача ваздуха (PM10, CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub>) могло бити уклоњено, уколико би сви кровови у граду били претворени у зелене кровове, при чему интензивни зелени кровови имају већи утицај од екстензивних. Интензивни зелени кровови имају дебљи супстрат земље од екстензивних кровова, што омогућава избор већег спектра биљака и узгој веће надземне биомасе. С обзиром да је модел UFORE дизајниран за симулацију утицаја жбуња и дрвећа и да је за избор вегетације на

зеленом крову могућа само трава, резултати симулације за зелене кровове могу у великој мери одступати од стварног стања. Зелени кров може и индиректно допринети побољшању квалитета ваздуха кроз смањење потребне енергије за грејање и хлађење и ублажавање ефекта урбаног топлотног острва. У Португалу је [132] коришћењем нумеричких модела процењен директан и индиректан утицај зеленог крова на концентрацију PM10, NO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub>. Резултати су показали да постоји повећање годишњих просечних концентрација примарних загађивача PM10 и NO<sub>2</sub>, што указује на укупан негативан ефекат зелених кровова, док је годишња концентрације секундарног загађивача O<sub>3</sub> смањена, што одговара позитивном ефекту зелених кровова. Међутим, директан утицај зелених кровова на квалитет ваздуха је минималан, са максималним месечним разликама у распону од -5 µg/m<sup>3</sup> до 5 µg/m<sup>3</sup>. Индиректни утицај зелених кровова на квалитет ваздуха био је занемарљив, разлике су биле -/+1 µg/m<sup>3</sup>.

Зграда површине 2000 m<sup>2</sup> са зеленим кровом, могла би годишње да уштеди од 27,2 GJ до 30,7 GJ електричне енергије и од 9,5 GJ до 38,6 GJ природног гаса, у зависности од климе и дизајна зеленог крова, што би довело до смањења емисије CO<sub>2</sub> (у случају електричне енергије 2,3-2,6 kg/m<sup>2</sup>, у случају гаса 0,24-0,97 kg/m<sup>2</sup> годишње). У случају озелењавања 1,1 km<sup>2</sup> кровне површине зграде Универзитета у Мичигену, могло би да се годишње избегне испуштање 3640263 kg CO<sub>2</sub> у атмосферу, који се емитује услед коришћења електричне енергије и природног гаса. Ово је еквивалентно уклањању 661 возила са пута сваке године [133].

У претходним студијама коришћена су три приступа за процену утицаја вегетације зелених кровова на загађење: гравиметријска метода [134-135], експерименти у контролисаним лабораторијским условима [136-137] и симулациони и математички модели [128], [133]. Тачност симулационих и математичких модела у великој мери зависи од различитих коефицијената који се усвајају из литературе, а који су карактеристични за конкретну климу, састав супстрата или врсту вегетације на зеленом крову [138], па тако ови модели могу послужити само за процену способности зеленог крова да уклони загађење.

У литератури су објављена само два истраживања базирана на експерименталном мерењу концентрације загађујућих компоненти у спољашњем ваздуху изнад зеленог крова на реалном објекту. Резултати мерења концентрације PM2,5 и PM10 честица, сумпор диоксида и азотних једињења, на крову површине 4000 m<sup>2</sup> у Сингапуру пре и после постављања зеленог крова открили су да су након постављања зеленог крова концентрације SO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub> изнад зеленог крова смањене за 37% и 21%, док су концентрације PM2,5 и PM10 веће за 16% и 42% [139]. Друго експериментално истраживање, спроведено у Ирану, је показало да је измерена концентрација CO<sub>2</sub> на висини од 1 m изнад зеленог крова мања за 20,71 ppm у поређењу са конвенционалним кровом [140].

Претходна истраживања утицаја зелених кровова указују да зелени кровови у већини случајева могу да смање концентрацију одређених загађивача у спољашњем ваздуху, али то није увек случај. Није могуће применити резултате истраживања претходних студија спроведених у другим државама, због различитих амбијенталних концентрација загађујућих супстанци, удаљености зеленог крова од извора емисије, различитих географских и метеоролошких услова, врсте зеленог крова, састава супстрата и врсте и висине биљака [125]. Стога није могуће дати генералне смернице за пројектовање зелених кровних система и избор вегетације, у циљу могућег побољшања квалитета ваздуха у нашој земљи.

Преглед литературе указује да разумевање и квантификовање утицаја зелених кровова на побољшање животне средине захтева даља испитивања, а посебно за наше климатско подручје. Потребно је спровести експериментална истраживања утицаја вегетације на концентрацију више врста различитих загађујућих супстанци, како би се прецизно квантификовао утицај зелених кровова на квалитет ваздуха на локалном и регионалном нивоу.

С обзиром на тренутно стање животне средине у урбаним подручјима Европе, потребно је више пажње посветити утицају зелених кровова на параметре квалитета животне средине у градовима и популаризацији ове врсте кровних решења како за стамбене тако и за јавне објекте. Истраживање зелених кровова је ограничено само на неколико земаља као што су САД, Аустралија, неколико европских и азијских земаља. Већина истраживања је урађена у САД и европским земљама [141]. Метеоролошки услови значајно утичу на дифузију загађивача у спољашњем ваздуху [142-143]. Разумевање утицаја метеоролошких параметара, као што су температура, релативна влажност, брзина ветра, падавина, итд. омогућило би боље идентификовање региона, где би зелени кровови пружили већу корист.

Резултати до којих су дошли истраживачи који спровode лабораторијска или теренска истраживања о утицају зелених кровова на квалитет животне средине у урбаним срединама показују да постоји уверење да поред позитивног утицаја на сам објекат, ова врста решења може да смањи и загађење амбијенталног ваздуха.

#### 4.4 Истраживања зелених кровова у Србији

У Србији је спроведено неколико истраживања везаних за санацију постојећих објеката применом зеленог крова, који су базирани искључиво на динамичким симулацијама. Истражен је утицај примене зелених кровова на снижење температуре спољашњег ваздуха за четири типичне урбане целине Београда и смањење емисије  $\text{CO}_2$  у густо изграђеној централној зони Београда, применом програма *ENVI-met* [44]. Резултати показују да се применом екстензивних зелених кровова може постићи смањење температуре спољашњег ваздуха до  $0,47\text{ }^\circ\text{C}$  на нивоу пешака и  $0,53\text{ }^\circ\text{C}$  на нивоу крова, као и смањење концентрације  $\text{CO}_2$  до  $1,68\%$  у зависности од доба дана и висине од тла. Применом интензивних зелених кровова смањење температуре спољашњег ваздуха на нивоу пешака и крова је  $1,5\text{ }^\circ\text{C}$  и  $1,45\text{ }^\circ\text{C}$ , а концентрације  $\text{CO}_2$  до  $11,47\%$ .

Применом програма за динамичку симулацију топлотног понашања зграда *EnergyPlus* одређен је утицај зеленог крова и топлотне изолације, засебно и у комбинацији, на енергетске потребе за грејање и хлађење зграде основне школе у Нишу [144]. Примена екстензивног зеленог крова и/или топлотне изолације дебљине (25 cm и 35 cm) доводи до смањења потребне енергије за грејање од  $12,43\%$  до  $18,62\%$  у односу на постојеће стање. Применом топлотне изолације и зеленог крова постиже се највећа уштеда потребне енергије за грејање. Код модела школе са топлотном изолацијом потребно је мање енергије за хлађење, док је код модела са само зеленим кровом, као и са зеленим кровом и топлотном изолацијом дебљине 25 cm потребно више енергије за хлађење, у односу на модел школе у постојећем стању. Показано је и да је допринос зеленог крова смањењу потребне енергије за хлађење мањи у поређењу са доприносом топлотне изолације. Код школске зграде са добром топлотном изолацијом допринос зеленог крова смањењу укупне потребне енергије за грејање и хлађење био је мањи у поређењу са неизолованом зградом.

Друга студија [145], је истраживала утицај екстензивног, полуинтензивног и интензивног зеленог крова на енергетска својства стамбеног објекта, са стакленом верандом, у климатским условима на подручју града Ниша. Резултати добијени динамичким симулацијама у програму *EnergyPlus* су показали да код посматраног објекта екстензивни зелени кров нема значајан утицај на потребну енергију за грејање и хлађење. У случају полуинтензивног зеленог крова може се постићи смањење потребне енергије за грејање од 0,12% и потребне енергије за хлађење од 0,83%. Применом интензивног зеленог крова, може се остварити највећа уштеда годишње потребне енергије за грејање од 0,34% и хлађење од 2,32%. Посматрани стамбени објекат је добро термички изолован, па су због тога добијене мале уштеде потребне енергије за грејање и хлађење.

У програму *DesignBuilder* симулирано је термичко понашање шестоспратног објекта на коме је постављен екстензивни и полуинтензивни зелени кров са различитим дебљинама термичке изолације крова [146]. Резултати су показали да је зелени кров довео до смањења потребне енергије за грејање до 57% и енергије за хлађење до 96%. Примена екстензивног зеленог крова без термичке изолације нема позитиван ефекат током грејне сезоне. Применом термичке изолације дебљине 10 cm може се постићи уштеда енергије за грејање од 27,3% у поређењу са термичком изолацијом дебљине 5 cm, и уштеда од 55,2% у поређењу са неизолованим екстензивним зеленим кровом.

За стамбену зграда у ужем центру Београда, коришћењем прорачуна према стандарду ISO 13790 одређен је утицај полуинтензивног зеленог крова и фасадног термоизолационог малтера на потребну енергију за грејање [147]. Резултати прорачуна су показали да ове мере доприносе смањењу годишње потребне енергије за грејање са 193,74 kWh/m<sup>2</sup> на 169,64 kWh/m<sup>2</sup>, као и смањењу емисије CO<sub>2</sub> за 10%.

Студија [148], је истраживала утицај три врсте зеленог крова без вегетације и са различитим супстратима земље, на кровну конструкцију са топлотном изолацијом, симулацијама пролаза топлоте кроз кровну конструкцију у програму *SolidWorks*. Одсуство вегетације на зеленом крову може се јавити у зимском периоду, неповољним климатским условима или може бити последица биљних болести. Резултати симулација су показали да је температура површине супстрата од земље скоро једнака температури површине конвенционалног крова. Температура површине кровне конструкције испод зеленог крова је мања од температуре конвенционалног крова за око 20 °C, у случају све три врсте супстрата од земље. Дневне осцилације температуре кровне конструкције испод зеленог крова, у случају све три врсте супстрата, су дупло мање у поређењу са конвенционалним кровом. Поред тога зелени кров је смањио топлотни флуks и одложио пролаз топлоте кроз кровну конструкцију.

Предмет другог истраживања [149] у области зелених кровова је примена интегративног модела за конструкцијско унапређење постојећих равних кровова постављањем зелених кровних система на примеру објекта Дома Здравља у Нишу. Разматрана је примена непроходног екстензивног зеленог крова, екстензивног зеленог крова са проходним терасама, комбинације интензивног и екстензивног зеленог кровова са проходним терасама. Коришћењем програма за динамичку симулацију топлотног понашања зграда *DesignBuilder* одређена је потребна енергија за грејање и хлађење објекта у постојећем стању и након санације применом зелених кровова. Резултати показују да се може постићи од 1,54% до 1,58% уштеда енергије за хлађење и од 0,32% до 1,78% уштеда енергије за грејање објекта, као и смањење концентрације CO<sub>2</sub> од 1,79% до 10,15%.

У истраживању [150], испитивано је да ли зелени кров може допринети побољшању термичких својстава две врсте кровних конструкција карактеристичне за два блока зграда у Београду, а самим тим и утицати на смањење потребне енергије за грејање и емисије CO<sub>2</sub>. Коришћењем калкулатора *Knauf TERM 2 PRO* израчунати су коефицијенти пролаза топлоте кроз кровне конструкције, потребна енергија за грејање и количина CO<sub>2</sub> испуштеног у атмосферу на годишњем нивоу. Израчунато је да зелени кров може да уштеди од 7668,96 MWh до 7999,39 MWh и спречи емисију од 4369,34 t до 4679,61 t CO<sub>2</sub> годишње.

У раду [151], је одређен утицај постављања екстензивног и интензивног зеленог крова на носивост конструкције и енергетске потребе четири постојећа објеката у Београду, као и оправданост постављања зелених кровова применом LCC анализе (енгл. *Life Cycle Costing*). У случају постављања екстензивног зеленог крова може доћи до повећања оптерећења четири постојећа објеката за 8-21%, док у случају интензивног зеленог крова може доћи до повећања оптерећења четири постојећа објеката за 112-140%. Будући да равне кровне конструкције посматраних објеката имају добра термичка својства, нема значајне разлике потребне енергије за грејање и хлађење објекта са и без зеленог крова. Услед смањена потребне енергије за хлађење могу се остварити уштеде у распону од 0,04-0,20 €/m<sup>2</sup> кровне површине за све објекте. Смањење потребне енергије за грејање може довести до уштеде од 0,1-0,4 €/m<sup>2</sup> кровне површине. На основу прегледа литературе и увида у стање везано за зелене кровове у Србији установљени су следећи проблеми:

- врло мали број истраживања зелених кровова,
- постојећа истраживања су базирана на коришћену симулационих модела и прорачуна,
- непостојање експерименталних истраживања утицаја зелених кровова на енергетске карактеристике и енергетску ефикасност реалних објеката у градској средини,
- непостојање експерименталних истраживања утицаја зелених кровова на квалитет ваздуха у градској средини,
- непостојање експерименталних истраживања утицаја зелених кровова на ублажавање ефекта урбаног топлотног острва.

Биљке су живи организми и њихов раст и развој зависи од метеоролошких услова и услова који владају у земљишту. Важно је знати какво је понашање различитих биљних врста у одређеним микроклиматских условима. Знање о клими и животној средини на којој ће се налазити зелени кров је пресудно за изградњу високо ефикасног зеленог крова. У Србији, постоји велики потенцијал за санацију постојећег грађевинског фонда применом зелених кровова, због великих губитака енергије, који су последица не постојања термичке изолације или врло ниског нивоа топлотне изолације. Многи објекти у власништву државе имају низак ниво енергетске ефикасности, па су зато идеални за примену зелених кровних система. Примена зелених кровних система представља недовољно испитан потенцијал за унапређење енергетске ефикасности постојећег грађевинског фонда и квалитета ваздуха у Србији.

## 5 Предмет истраживања

На основу прегледа литературе установљено је да за градове у Србији не постоје експериментална истраживања у вези са утицајем зелених кровова на енергетску ефикасност зграда, микроклиму и квалитет ваздуха у градским срединама. Чињеница да у овом тренутку Србија има мали број зелених кровова и одсуство научних истраживања на ову тему, указује на потребу за локалним експерименталним истраживањима, која би омогућила

квантификовање позитивних утицаја примене зелених кровова за наше климатско подручје, допринела унапређењу стандарда зелене градње и утицала на будућа законска решења на локалном и националном нивоу. Лаки зелени кровови са супстратом од минеране вуне су добро решење за санацију кровова постојећих зграда, које имају ограничен капацитет носивости. Упркос томе, у литератури недостају експериментални подаци о топлотно-изолационом ефекту ове врсте зелених кровова и њиховом утицају на микроклиму. Већина претходних истраживања подразумева коришћење комерцијалних програма за предвиђање понашања зелених кровова, док су експериментална истраживања ретка, временски захтевна и скупа.

Због свега наведеног је предмет истраживања у предложеној докторској дисертацији потенцијално побољшање енергетских карактеристика и енергетске ефикасности постојећег објекта Техничке школе "Нови Београд", применом екстензивног лаког зеленог крова, са супстратом од хидрофилне минералне вуне најновије генерације, као могућег повољног решења са еколошког и техничког аспекта. У програму *DesignBuilder* развијен је модел постојећег стања школске зграде и модел реконструкције школске зграде применом зеленог крова, како би се сагледао утицај зеленог крова на потребну енергију за грејање и хлађење зграде. Истраживања у области техничко-технолошких наука треба да буду усмерена ка остваривању циљева одрживог развоја и прилагођавању климатским променама. Ова докторска дисертација се бави и квантификовањем утицаја овог типа зеленог крова на температуру локалног спољашњег ваздуха и концентрацију PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, CO, CO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху, а самим тим и допринос зелених кровова прилагођавању градова на климатске промене.

## 5.1 Циљеви истраживања

Докторска дисертација се односи на зелене кровне системе као један од сегмената зелене инфраструктуре у градским срединама који представљају савремени приступ у проналажењу одрживих решења за побољшање енергетске ефикасности зграда и заштите животне средине. У складу са тим општи циљ ове дисертације је да се применом савремених експерименталних метода истраживања сагледа и допринесе разумевању термичког понашања лаких зелених кровних система са минералном вуном у климатским условима југоисточне Европе. Главни циљеви докторске дисертације су да се на основу првих експерименталних података за Србију и кроз примену динамичких симулација термичког понашања зграда објасни и квантификује:

- утицај лаког зеленог крова на вертикални температурни профил и проток топлоте кроз кровну конструкцију,
- утицај зеленог крова на коефицијент пролаза топлоте кроз кровну конструкцију,
- утицај зеленог крова на температуру локалног спољашњег ваздуха,
- утицај зеленог крова на квалитет спољашњег ваздуха у градској средини,
- утицај лаког зеленог крова на потребну енергију за грејање и хлађење школског објекта.

Један од циљева дисертације је и указивање на значај примене концепта зелених кровова на постојећим и планираним грађевинским објектима у градским срединама, доношење препорука за пројектовање оваквих објеката и неопходних регулатива у овој области.

Резултати анализе спроведених експерименталних истраживања на школском објекту где је извршено постављање зеленог крова, треба да покажу какав и колики је утицај лаког зеленог крова, са супстратом минералне вуне, на енергетске карактеристике школске зграде и смањење суспендованих честица и гасовитих загађивача.

## **5.2 Полазне хипотезе истраживања**

У складу са изнетим предметом истраживања у изради докторске дисертације пошло се од следећих хипотеза:

Хипотеза 1: Примена зелених кровних система при санацији објекта омогућава да се оствари смањење топлотног флукса кроз кровну конструкцију (топлотних добитака лети и топлотних губитака зими). Ова претпоставка се доказује квантитативном и упоредном анализом резултата добијених експерименталним мерењима на реалном објекту и симулацијом топлотног понашања тог објекта са постојећим конвенционалним кровом и након санације применом зеленог крова.

Хипотеза 2: Примена зелених кровних система омогућава да се побољшају енергетске карактеристике кровне конструкције (да се смањи коефицијент пролаза топлоте кроз кровну конструкцију). Ова претпоставка се доказује квантитативном и упоредном анализом резултата добијених експерименталним мерењима на реалном објекту.

Хипотеза 3: Примена зелених кровних система омогућава да се остваре уштеде потребне енергије за грејање и хлађење објекта. Ова претпоставка се доказује квантитативном и упоредном анализом резултата добијених динамичком симулацијом топлотног понашања изабраног репрезентативног школског објекта са постојећим конвенционалним кровом и након санације применом зеленог крова.

Хипотеза 4: Примена зелених кровних система доприноси снижењу температуре спољашњег ваздуха непосредно изнад крова. Ова претпоставка се доказује квантитативном и упоредном анализом резултата добијених експерименталним мерењима на реалном објекту.

Хипотеза 5: Примена зелених кровних система доприноси побољшању квалитета ваздуха у градској средини. Ова претпоставка се доказује квантитативном и упоредном анализом резултата добијених експерименталним мерењима на реалном објекту.

## **5.3 Научне методе истраживања**

Узимајући у обзир сложеност предмета истраживања и постављене циљеве истраживања у докторској дисертацији су коришћене следеће научне методе:

- систематизован преглед и класификација доступне научне и стручне литературе у области зелених кровова и преглед стања везаних за концепт зелених кровова у нашој земљи;
- експерименталне методе: на изабраном репрезентативном школском објекту, на позицији постојећег конвенционалног крова и постављеног експерименталног зеленог крова, током летњег и зимског периода спроведено је мерење вертикалног температурног профила, топлотног флукса кроз кровну конструкцију, концентрацију загађујућих супстанци у спољашњем ваздуху, температуру спољашњег ваздуха непосредно изнад кровова и метеоролошких услова;

- формиран је модел школског објекта у постојећем стању и унапређеном стању применом зеленог крова. Спроведена је упоредна анализа података добијених динамичким симулацијама за оба модела и квантификован утицај зеленог крова на потребну енергију за грејање и хлађење школске зграде;
- статистичка обрада експерименталних резултата и упоредна анализа резултата за зелени кров и конвенционални кров, као и анализа резултат добијених из модела школске зграде са постојећим конвенционалним кровом и модела школске зграде на коме је извршена санација применом зеленог кровног система.

Применом наведених научних метода добијени су резултати који су омогућили да се овом дисертацијом оствари квалитетан научни допринос у изучавању понашања зелених кровова у условима умерено континенталне климе, као и утицаја зеленог крова на енергетску ефикасност школског објекта и квалитет спољашњег ваздуха у градској средини.

#### **5.4 Научна оправданост и допринос истраживања**

Докторска дисертација приказује резултате првог експерименталног истраживања за Републику Србију, везано за термичко понашање зелених кровова у нашим климатским условима и њиховог утицаја на пренос топлоте кроз кровну конструкцију, топлотно-изолациони ефекат кровне конструкције, температуру локалног спољашњег ваздуха и квалитет ваздуха у градској средини. Поред тога ово је једна од ретких експерименталних студија у свету у вези са лаким зеленим крововима са хидрофилном минералном вуном и вегетацијом коју чини мешавина више врста седумских биљака.

Лаки зелени кровови су погодни за ретрофит постојећег грађевинског фонда, где се мора водити рачуна о носивости постојеће кровне конструкције. С обзиром на распрострањеност старих објеката са ниски степеном енергетске ефикасности, важно је спровести испитивања овог типа зелених кровова и њихов потенцијални допринос уштеди енергије. Резултати ове дисертације ће помоћи у разумевању механизма преноса топлоте унутар лаким зелених кровова са супстратом од минералне вуне.

У Србији тренутно постоји недостатак законске основе, правилника и препорука који би подржали примену концепта зелених кровова, као мере пасивне технике у остваривању енергетске ефикасности. Недостатак конкретних података о потенцијалним бенефитима зелених кровова у нашим климатским условима, може бити препрека за државу и инвеститоре у имплементацији ових кровних система. Бенефити резултата истраживања приказаних у дисертацији су многоструки, јер омогућавају евалуацију енергетских и еколошких предности примене зелених кровова за наше климатско поднебље. Сазнања и закључци приказани у докторској дисертацији могу служити:

- као научна основа за разумевање употребе концепта зелених кровова за санацију постојећег грађевинског фонда и пројектовање нових објеката у Србији и свету;
- за развој стратегија, законске регулативе и политика које засупају примену зелених кровова на локалном и регионалном нивоу;
- за подизање нивоа свести о улози зелених кровова у одрживом развоју урбаних средина;
- као научна аргументација за промоцију и подстицање примене зелених кровова пред грађанима и инвеститорима у Србији.



Важно је нагласити да Београд као и већина великих градова у Србији, има недостатак зелених површина и у складу са тим проблеме са загађењем ваздуха. Поред тога што су биљне врсте из породице сукулената тзв. седуми врло отпорне врсте, које се прилагођавају и успевају у различитим климатским областима, ипак нису довољно испитани за коришћење на зеленим крововима у веома загађеним градским срединама са циљем побољшања квалитета ваздуха. Експериментални резултати ове дисертације дају одговор на питање да ли и у коликој мери овакви зелени кровови могу допринети ублажавању загађења у градским срединама.

Поред тога развијен је модел школског објекта за одређивање потенцијалних уштеда потребне енергије за грејање и хлађење школске зграде применом зеленог крова, који има практичну примену. Коришћењем формираног модела може се приликом пројектовања новог објекта или санације постојећег објекта других намена, довољно тачно одредити уштеда енергије за грејање и хлађење у случају постављања зеленог крова и у складу са тим дати смернице за пројектовање оваквих зграда.

Истраживање представљено у дисертацији доприноси промоцији концепта зелених кровова, као важног елемента зелене инфраструктуре и указује на значај примене концепта зелених кровова у градским срединама у циљу унапређења квалитета животне средине. Добијени резултати могу се применити за подстицање постављања система зелених кровова на другим јавним објектима са циљем унапређења енергетске ефикасности, који треба да представљају пример добре праксе за грађане и да подстакну ширу примену овог концепта. Докторска дисертација пружа добру научну основу и указује на могуће правце будућих истраживања у области зелене инфраструктуре.

## 5.5 Структура докторске дисертације

У складу са постављеним предметом и циљевима истраживања, а ради стицања општег увида у ову проблематику, у уводном поглављу дата су уводна разматрања, стање у области енергетске ефикасности зграда у Србији са посебним освртом на школске објекте, стање квалитета ваздуха у Србији, објашњени су потенцијал и улога постојећег грађевинског фонда у области примене зелених кровова, као и основни проблеми истраживања.

У другом поглављу објашњени су основни појмови у вези са зеленим крововима, подела и структура зелених кровова, предности и ограничења примене концепта зелених кровова, као и постојеће стање везано за зелене кровове у Србији. У трећем поглављу објашњени су основни појмови у вези са загађујућим супстанцама, приказано је постојеће стање у вези са загађењем спољашњег ваздуха у свету и Србији и објашњена улога вегетације у смањењу загађења.

У четвртном поглављу дат је преглед досадашњих истраживања из области зелених кровова, њиховог утицаја на енергетску ефикасност зграда, микроклиму и квалитет ваздуха на нивоу света и Србије, која су послужила као полазна основа за постављање правца истраживачког рада на докторској дисертацији. У петом поглављу објашњени су предмет и циљеви истраживања, дефинисане су хипотезе и изложене су научне методе као и научни допринос докторске дисертације. Поред тога дата је и структура докторске дисертације. У шестом поглављу дат је опис одабране локације и одабраног репрезентативног школског објекта у градској средини на ком су вршена експериментална мерења, поставка експеримента и опис мерених величина и мерних инструмената који су коришћени.

У седмом поглављу дат је преглед постојећих модела зеленог крова, опис постојећег модела зеленог крова који је коришћен у дисертацији са једначинама које описују процес преноса топлоте унутар зеленог крова. Након тога, детаљно је објашњен поступак формирања БИМ (енгл. *Building Information Modeling*) и БЕМ (енгл. *Building Energy Modeling*) модела изабраног репрезентативног школског објекта у постојећем стању и модела школског објекта након санације применом зеленог крова и сви унети улазни параметри.

Поглавље осам посвећено је валидацији формираног модела школског објекта и одређивању нивоа тачности резултата добијених динамичким симулацијама. Висок степен подударности вредности добијених из модела и стварних вредности указује да формиран модел може бити коришћен за процену утицаја зеленог крова на друге објекте.

Резултати истраживања су приказани у поглављу девет. Дата је детаљна анализа експерименталних резултата у вези са термичким понашањем зеленог кровног система и поређење са постојећим конвенционалним кровом. Сагледан је допринос абиотских слојева зеленог крова (минералне вуне, дренажно акумулационог система и хидроизолације) топлотно изолационом ефекту и ефекту хлађења зеленог крова. Поред тога приказана је упоредна анализа резултата мерења концентрације загађујућих сусптанци у спољашњем ваздуху изнад зеленог и конвенционалног крова. У овом поглављу приказани су и резултати добијени динамичким симулацијама у програму *DesignBuilder*, који се односе на енергетске потребе за грејање и хлађење одабраног школског објекта са постојећим конвенционалним кровом и након санације применом зеленог крова. Одређено је потенцијално смањење емисије угљен-диоксида, које се може постићу у случају постављања зеленог крова на посматрани школски објекат. На основу добијених резултата детаљно је објашњено топлотно понашање зеленог крова у нашим климатским условима, сагледан утицај зеленог крова на коефицијент пролаза топлоте кроз кровну конструкцију и допринос зеленог крова побољшању квалитета ваздуха у градској средини.

Десето поглавље садржи 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 у овој области.

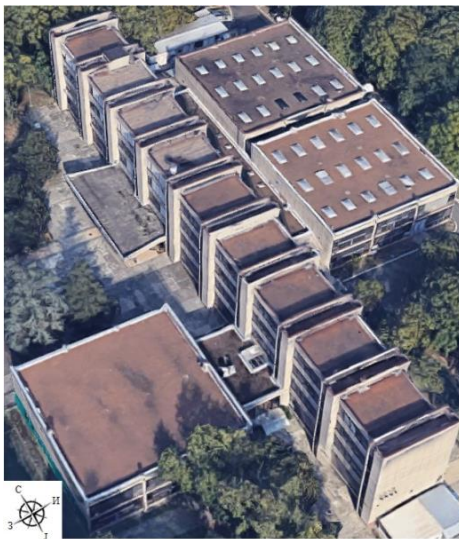
## **6. Поставка експеримента**

Како би се истражио утицај зеленог крова на енергетске карактеристике и енергетску ефикасност школске зграде и квалитет спољашњег ваздуха извршена су опсежна експериментална мерења на постојећем конвенционалном крову и зеленом крову постављеном на изабраном репрезентативном школском објекту у градској средини.

### **6.1 Опис изабраног школског објекта**

Експериментална мерења спроведена су на објекту Техничке школе "Нови Београд", приказаног на Слици 6.1. Ова школска зграда изграђена је 1975. године и представља типичан вишеспратни школски објекат грађен у периоду масовне изградње (70 година прошлог века) у Србији, када су конструкције равних кровова примењиване у највећој мери и када се о енергетској ефикасности зграда није водило рачуна. Због тога је изабрани објекат погодан за испитивање утицаја зелених кровова на енергетске карактеристике и енергетску

ефикасност школске зграде. Школски објекат са армиранобетонском конструкцијом и укупном бруто грађевинском површином од 6600 m<sup>2</sup> састоји се из више делова различите спратности (П, П+1 и П+3) чије све кровне конструкције чине равни кровови.



Слика 6.1. Техничка школа "Нови Београд", Београд [извор: Google Maps]

Оријентација објекта је подужно у правцу север-југ. Објекат је изграђен за капацитет 1500 ђака, а тренутно школу похађа 1100 ђака, који су подељени у две смене. Анализом оријентације школског објекта, увиђа се изложеност објекта ка западној и источној страни. Централни део зграде где су смештене учионице је највише изложен утицајима са ове две доминантне стране. Све стране објекта немају додира са другим објектима и умерено су изложене ветровима. Извршен је детаљан енергетски преглед школског објекта пре почетка експерименталних мерења.

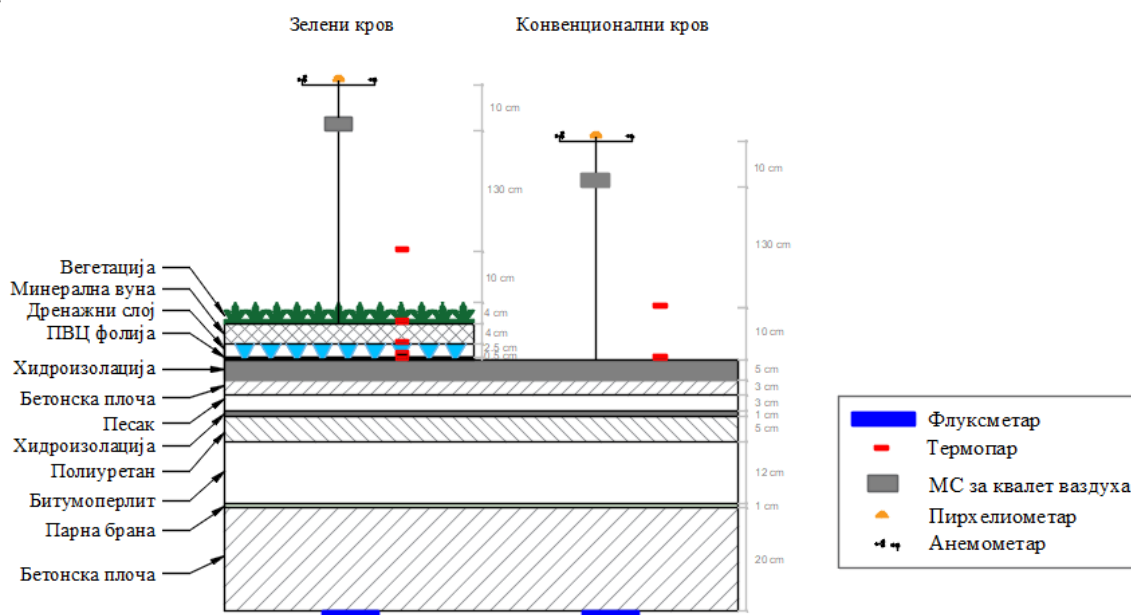
Овај јавни објекат се налази, у градској средини Београда у улици Омладинских Бригада 25 (44°48'31.7"N, 20°24'03.3"E) на подручју општине Нови Београд, коју карактерише доминантан урбани развој. Локација Техничке школе "Нови Београд" приказана је на Слици 6.2. Последњих година Нови Београд је постао главни пословни центар града Београда са најбржим развојем и један од највећих у југоисточној Европи, као и друга општина по броју становника у Србији. Нови Београд је високоурбана општина са великим бројем стамбених објеката, великих стамбено-пословних комплекса и објеката намењених образовању. Најмногољуднија београдска општина је Нови Београд, која према последњем попису из 2022. године има 209812 становника [152]. У односу на густину насељености, Нови Београд и генерално Београд, има врло мало преосталих зелених површина, које су кључна мере прилагођавања градова на климатске промене. Није предвиђено повећање зелених површина, а постојеће површине се смањују због изградње нових стамбених и пословних објеката. Школски објекат је окружен са више стамбено-пословних комплекса, удаљен је 1,2 km од топлане и аутопута и у близини је значајне саобраћајнице са повећаним обимом саобраћаја, којом пролази 8 аутобуских линија. Према годишњим извештајима Агенција за заштиту животне средине о стању квалитета ваздуха у Републици Србији [153], на општини Нови Београд ваздух је прекомерно загађен. Због свега наведеног локација изабраног школског објекта је погодна за испитивање утицаја зеленог крова на концентрацију загађујућих супстанци у спољашњем ваздуху.



Слика 6.2. Локација Техничке школе "Нови Београд" [извор: Google Maps]

## 6.2 Опис експеримента и мерених величина

У новембру 2018. године на део постојећег равног крова школске зграде на висини првог спрата, око 4 m од нивоа тла, постављен је непроходни екстензивни лаки зелени кров површине 25 m<sup>2</sup>. Овај зелени кровни систем је одабран због мале тежине, малих захтева за одржавањем и лаког и брзог постављања. На Слици 6.3 приказан је пресек конвенционалног крова и екстензивног зеленог крова који су коришћени у експерименталним испитивањима. Одабран је зелени кров новије генерације који је постављен у складу са препорукама за извођење оваквог типа зеленог крова, што је подразумевало постављање алуминијумских профила и шљунка у ширини од 20 cm по ободу зеленог крова. Постојећа конвенционална кровна конструкција се састоји од следећих елемената одоздо према нагоре: бетонска плоча, парна брана, битумоперлит, полиуретан, хидроизолација и бетонска плоча (30x30x3 cm) укупне дебљине 45 cm. Кров има нагиб од 5% за управљање и боље отицање падавина. На постојећи кров је 2017. године додата нова хидроизолација укупне дебљине 5 cm која се састоји од премаза битумена, полиетиленске мрежице, PVC фолије и слоја шљунка. Слој шљунка је уклоњен са једног дела кровне конструкције на коме је постављен лаки зелени кров.



Слика 6.3. Пресек зеленог крова и конвенционалног крова са позицијама мерних инструмената

Зелени кров гледано од слоја хидроизолације према горе чине: противкоренски слој (PVC фолија), дренажно акумулациони слој, хидрофилна минерална вуна и слој вегетације (мешавина седумских биљака са органским слојем земље максималне дебљине од 1 cm). Слој хидрофилне камене минералне вуне унутар зеленог крова је последње генерације и нема додатака формалдехида и сличних хемијских супстанци, већ је ова минерална вуна формирана механичким повезивањем чистих влакана вуне. Слој вегетације се састоји од следећих осам врста седумских биљака: *Sedum acre*, *Album coral carpet sedum*, *Sedum wall album*, *Sedum hybridum*, *Sedum sexangulare*, *Sedum hispanicum*, *Sedum floriferum*, and *Sedum Kamtschaticum*. Седумске биљке су одабране због тога што су отпорне на високе температуре и сушу, мраз и јаке ветрове, могу да расту на подлогама мале дебљине и не захтевају посебно одржавање, па се често примењују на зеленим крововима широм света. Седумске биљке карактерише мала подземна биомаса и велика надземна биомаса.

На слици 6.4 дат је приказ осам врста седумских биљака које чине слој вегетације на зеленом крову. У време експерименталних мерења, зелени кров је био стар више од годину дана, па је кров био у потпуности прекривен вегетацијом, а биљке су биле добро развијене и прилагођене окружењу. *Sedum acre*, *Sedum wall album* и *Album coral carpet sedum* врсте седума су биле доминатне у погледу покривености, док су остале врсте биле заступљене у мањој мери.



Слика 6.4. Врсте коришћених седумских биљака на зеленом крову

Експериментална истраживања су спроведена током летњег периода 2020. године и зимског периода 2020/2021. године. У циљу истраживања утицаја екстензивног зеленог крова на енергетске карактеристике и енергетску ефикасност зграде, као и квалитет ваздуха и поређења резултата добијених на зеленом и конвенционалном крову, идентична мерења су спроведена на обе кровне парцеле и у просторијама испод њих. Експериментална парцела зеленог крова и конвенционалног крова са мерним инструментима и сензорима приказана је на Слици 6.5 а) и 6.5 б).

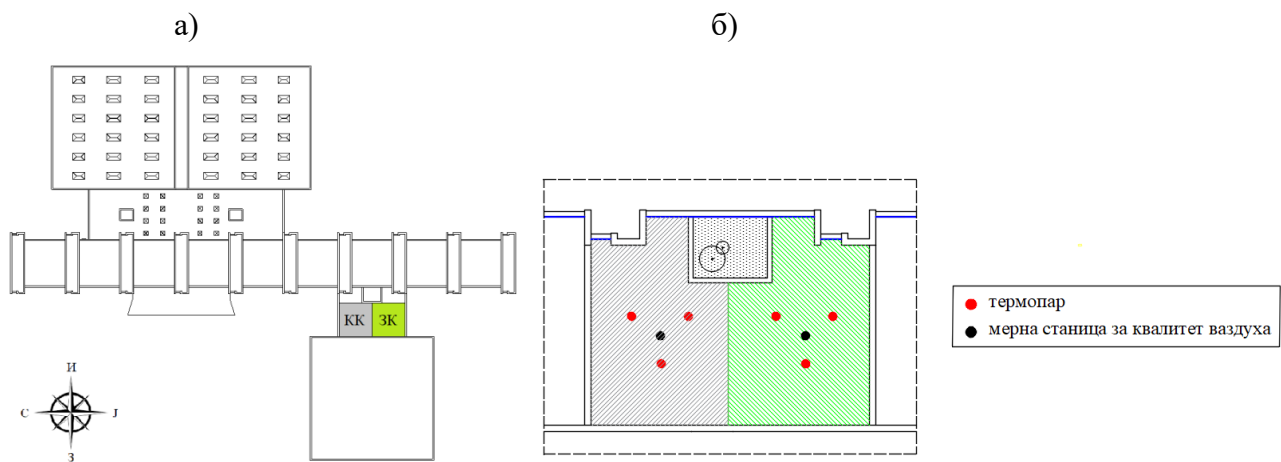
а)

б)



Слика 6.5. а) Зелени кров са мерним инструментима и сензорима,  
 б) конвенционални кров са мерним инструментима и сензорима

Основа крова школске зграде са позицијама зеленог и конвенционалног крова на којима су вршена експериментална мерења приказана је на Слици 6.6 а). Позиције мерних инструмената и сензора на зеленом крову и конвенционалном крову приказане су на Слици 6.6 б). На обе кровне парцеле, вертикални профил температуре кровне конструкције је мерен на три позиције, док је мерење концентрације загађујућих супстанци и метеоролошких услова вршено на једној позицији.



Слика 6.6. а) Кров школске зграде са позицијама зеленог и конвенционалног крова,  
 б) позиције мерних инструмената и сензора на зеленом крову и конвенционалном крову

На плафону просторија испод зеленог и конвенционалног крова постављени су сензори за мерење топлотног флукса кроз кровну конструкцију на позицији зеленог крова ( $q_{ZK}$ ) и конвенционалног крова ( $q_{KK}$ ). Како би се измерио вертикални профил температуре кровне конструкције, постављени су термопарови на три позиције на зеленом и конвенционалном крову.

На зеленом крову постављено је осамнаест термопарова за мерење температуре: спољашње површине кровне конструкције ( $T_{sp, ZK}$ ), горње површине дренажног слоја ( $T_d$ ),

горње површине слоја минералне вуне ( $T_{mv}$ ), горње површине слоја вегетације ( $T_v$ ) и ваздуха на 10 cm изнад вегетације ( $T_{10 ZK}$ ). Није мерена температура противкоренског слоја, јер има малу дебљину од 0,5 cm, па се сматра да нема значајне промене температуре у овом слоју. На конвенционалном крову је постављено девет термопарова за мерење температуре: спољашње површине кровне плоче ( $T_{sp KK}$ ) и ваздуха на 10 cm изнад конвенционалног крова ( $T_{10 KK}$ ). Како би се добили реални резултати мерења, термопарови који су директно изложени спољашњем окружењу били су заштићени од соларног зрачења.

Масене концентрације загађујућих материја у амбијенталном вазуу (PM1, PM2.5, PM10, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, и NO<sub>2</sub>) су мерене на висини од 140 cm изнад зеленог и конвенционалног крова. Како би се при анализи узели у обзир климатски услови мерено је пет метеоролошких параметара, укључујући температуру ( $T_a$ ) и релативну влажност спољашњег ваздуха (RH) на 140 cm изнад конвенционалног крова, интензитет соларног зрачења ( $G$ ), брзину и правац ветра на висини од 150 cm изнад зеленог и конвенционалног крова. Све величине су мерене у временским интервалима од 10 минута, а подаци су чувани у аквизиционом систему за прикупљање података. Сви мерни инструмент и сензори су постављени у средиште кровних парцела како би се избегли ефекти ивица и сенке од суседних виших делова школског објекта.

### 6.3 Мерна опрема коришћена приликом експерименталног истраживања

Коришћена је савремена мерна опрема приликом експерименталног мерења и испоштовани су међународни стандарди о поступцима мерења и обраде измерних вредности. Пре експерименталних мерења извршена је калибрација свих мерних инструмената. Сензори за мерење концентрације загађујућих супстанци у спољашњем ваздуху, температуру и релативну влажност спољашњег ваздуха су претходно фабрички калибрисани и уграђени у мерне станице за квалитет ваздуха. У мерне станице за праћење квалитета ваздуха изнад зеленог и конвенционалног крова су уграђени сензори за: суспендоване честице (PM1, PM2,5, PM10), угљен-моноксид (CO), угљен-диоксид (CO<sub>2</sub>), озон (O<sub>3</sub>), азот-диоксид (NO<sub>2</sub>), температуру и релативну влажност ваздуха. Мерне станице за квалитет ваздуха су биле повезане са посебним аквизиционим системом, на ком су се снимали и чували прикупљени подаци. Снимљени подаци су се затим били пребацивани на рачунар, где су се могли по потреби прочитати.

За потребе истраживања квалитета ваздуха коришћени су јефтинији (енгл. *lowcost*) сензори. Ови сензори не могу бити замена за референтне и скупље инструменте познатијих произвођача, али су за потребе истраживања у овој дисертацији довољно прецизни и поуздани. Тренутно постоји ограничена примена ових сензора, али уколико су у стању да испуне захтеве о квалитету података који су постављени као циљеви у оквиру индикативних мерења о амбијенталном ваздуху ЕУ Директиве (2008/50/ЕУ), могућа је примена оваквих сензора. Пре почетка експеримента и постављања мерних станица за квалитет ваздуха, извршена је рекалибрација сензора на терену у различитим метеоролошким условима, заснована на коришћењу релеватних инструмената више класе. У експерименталном истраживању су коришћени следећи инструменти:

1. Аквизициони систем Keithley DAQ 6510

Са аквизиционим системом је повезано 18 термопарова типа К постављених на зеленом крову за мерење вертикалног температурног профила кровне конструкције и сензор за мерење топлотног флукса кроз зелени кров.

## 2. Аквизициони систем Keithley DAQ 6510

Са аквизиционим системом је повезано 9 термопарова типа К постављених на референтном крову за мерење вертикалног температурног профила кровне конструкције и сензор за мерење топлотног флукса кроз конвенционални кров.

## 3. Пирхелиометар за мерење интензитета соларног зрачења

## 4. Анемометар за мерење брзине струјања и правца ветра

## 5. Мерна станица за квалитет ваздуха

Пирхелиометар, анемометар и мерна станица за квалитет ваздуха били су повезани са рачунаром на ком су читавани измерени подаци. Листа мерних инструмената и сензора, који су коришћени, са мерним величинама и дефинисаним опсезима и грешкама мерења приказана је у Прилогу А.

## 7. Физичко-математички модел

Последњих деценија динамички модели термичког понашања објекта (енгл. *Building Energy Modeling-BEM*), налазе широку примену при пројектовању нових енергетски ефикасних објеката и при санацији постојећих објеката. Употребом одређених програмских пакета могуће је симулирати топлотно понашање објеката са прецизношћу скоро идентичној стварном стању. Предност симулација јесте утврђивање најоптималнијег сценарија унапређења енергетске ефикасности објекта. Употреба информационог моделирања зграда (енгл. *Building Information Modeling-BIM*) је одавно присутна у грађевинарству. Интеграција информационог моделирања зграда (BIM) и енергетског моделирања зграда (BEM) је нови концепт, који се све више користи код моделовања енергетски ефикасних зграда. BIM процес пројектовања грађевинских објеката подразумева параметарску израду интелигентног тродимензионалног модела објекта, који омогућава коришћење података доступних из архитектонског модела дељењем и извозом информација потребних за креирање BEM модела. У наставаку истраживања, било је потребно формирати модел школског објекта у постојећем стању и унапређени модел школског објекта са зеленим кровом. Формиран је архитектонски модел објекта Техничке школе "Нови Београд" у BIM програму *Autodesk Revit*, док су у BEM програму *DesignBuilder* извршене динамичке симулације топлотног понашања посматраног школског објекта са постојећим конвенционалним кровом и зеленим кровом.

### 7.1 Преглед модела и програмских пакета у истраживањима утицаја зелених кровова

У оквиру овог поглавља дат је преглед програмских пакета за моделирање зелених кровова и њиховог утицаја на термичко понашање зграда, микроклиму и отицање кишнице. У научним истраживањима зелених кровова у употреби су разни математички модели и програмски пакети за моделирање зелених кровова. Универзитет Ла Рошел у Француској развио је модел преноса топлоте и влаге за зелене кровове и зелене зидове под називом *VegEnvelope* [154], који је интегрисан у комерцијални програм *TRNSYS* [155] развијен на Универзитету Висконсин (САД), а који између осталог служи и за симулацију топлотног



понашања зграда. Модел је развијен у програмском језику *Python* и интегрисан је у компоненту модела зграде са више термичких зона (*Type 56*). Извршена је валидација модела са експерименталним резултатима добијеног са зеленог крова на Универзитету Ла Рошел. Међутим, овај модел није доступан јавности за коришћење.

Модел зеленог крова под називом "еко кров" (енг. *ecorooft*) [156], је интегрисан у програм *EnergyPlus* [157], који служи за симулацију топлотног понашања зграда. *EnergyPlus* је развијен у програмском језику *Fortran* од стране националне лабораторије *Lawrence Berkeley* у САД и прошао је кроз међународну упоредну проверу кроз стандардни метод BESTEST/ASHRAE Standard 140 [158]. Програм *EnergyPlus* нема визуелни графички интерфејс прилагођен кориснику, па није могуће корисницима да виде и концептуализују зграду. У основи представља симулационо језгро, док су програмски улази и излази текстуални фајлови. *EnergyPlus* је имплементиран у више симулационих програма, између осталог и у *DesignBuilder* [159], који је један од најсавременији и најсвеобухватнијих програмских пакета који омогућава динамичку симулацију топлотног понашања зграда у свим фазама пројектовања, а који има графички интерфејс прилагођен кориснику.

Програм за симулацију топлотног понашања зграда *ESP-r* такође има интегрисан модел преноса топлоте и влаге за зелени кров [160]. Универзитет *MIT* (енгл. *Massachusetts Institute of Technology*) у САД је развио програм за пројектовање зграда у раној фази *MIT Design Advisor*, који има једнодимензиони модел преноса топлоте код зеленог крова [161]. За валидацију овог модела коришћени су експериментални подаци са две различите локације. За симулацију утицаја зелених кровова на микроклиму и спољашњи топлотни комфор користи се комерцијални програм *ENVI-met* [162-163], који може да симулира климатске интеракције између површина, биљака и атмосфере. У случајевима када се истражује утицај зеленог крова на потребну енергију за грејање или хлађење и утицај на спољашњу микроклиму користи се комбинација програма, на пример *ENVI-met* и *EnergyPlus* [164-165], *ENVI-met* и *TRNSYS* [166-167] или *ENVI-met* и *DesignBuilder* [168-169]. За симулацију хидролошког и термичког понашања зелених кровова користи се *TEBGREENROOF* модул [170] са ТЕВ моделом (енгл. *Town Energy Balance*) [171], који је развио Национални центар за метеоролошка истраживања у Француској. Модел је у стању да симулира интеракцију између унутрашњости зграде и система зеленог крова и да симулира утицај зеленог крова на локалну климу. За процену хидролошког биланса зеленог крова развијен је још један модел [172], који одређује биланс воде упоредно за два крова. Последњих деценија, развијени су бројни модели који симулирају топлотно понашање зелених кровова [173-181], што указује на велико интересовање за истраживање утицаја зелених кровова на енергетску ефикасност зграда. Међутим, многи модели нису јавно доступни и нису практични за употребу због њихове сложености или сложености програма у који су интегрисани.

Након прегледа литературе и анализе доступних модела зеленог крова и доступних програма у који су интегрисани, у овој докторској дисертацији за потребе истраживања утицаја зеленог крова на енергетске потребе школске зграде одабран је модел зеленог крова под називом "еко кров", и комбинација симулационог језгра *EnergyPlus* и програма *DesignBuilder* због тога што имају могућност увоза ВМ података и што се сматрају поузданим и ефикасним алатима за симулацију топлотног понашања зграда и санације зграда коришћењем зелених кровова [156], [182-188]. Коришћен је програм *DesignBuilder* верзија 6.1.7.007 у који је имплементиран *EnergyPlus* верзија 8.9.

Коришћењем *DesignBuilder* програма може се између осталог квантификовати примена мера за побољшање енергетске ефикасности зграда. Његовом употребом може се прорачунати топлотно оптерећење објекта и сагледавати утицај зелених кровова на објекте за специфичну локацију и климу.

## 7.2 Математички модел зеленог крова

Модел зеленог крова "еко кров" је проистекао из једнодимензионалног динамичког модела за пренос топлоте и влаге кроз тло са вегетацијом *FASST* (енгл. *Fast All-season Soil Strength*) [189], развијеног од стране Инжењерског корпуса америчке војске, за утврђивање способности тла да подржи кретање људи и возила. *FASST* модел се у великој мери ослања на раније развијен модел за пренос импулса, топлоте и влаге између површине тла и атмосферских слојева *BATS* (енгл. *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme*) [190] и модел за пренос енергије, масе и импулса између атмосфере и тла под вегетацијом *SiB* (енгл. *Simple Biosphere Model*) [191].

У оквиру овог "еко кров" модела, зелени кров се моделира као слој вегетације на површини земље и не узимају се у обзир ефекти дренажног слоја, противкоренског слоја и других слојева уколико постоје. Остали слојеви се додају засебно на кровну конструкцију. Овај модел зеленог крова узима у обзир:

- размену дуготаласног и краткоталасног зрачења унутар вегетације,
- пренос топлоте конвекцијом између вегетације и ваздуха,
- пренос топлоте евапотраспирацијом из вегетације и земље (латентну топлоту),
- пренос топлоте кондукцијом (осетну топлоту) и акумулацију топлоте у земљи.

Модел зеленог крова је једнодимензионални модел који садржи топлотни биланс за слој вегетације (једначина 7.5) и топлотни биланс за слој земље (једначина 7.11). Једначине топлотног биланса се решавају истовремено, како би се добила температура површине вегетације ( $T_f$ ) и температура површине земље ( $T_g$ ). Коришћена конвенција о знаку претпоставља да су сви топлотни токови позитивни када слој зеленог крова апсорбује енергију. Главни процеси преноса топлоте који чине топлотни биланс слоја вегетације су следећи:

- апсорпција краткоталасног и дуготаласног зрачења и радијација дуготаласног зрачења које емитује вегетација

$$\sigma_f [I_s (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] \quad (7.1)$$

- размена дуготаласног зрачења између вегетације и површине земље

$$\frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) \quad (7.2)$$

- флуks осетне топлоте између вегетације и спољашњег ваздуха

$$H_f = (1,1 \cdot LAI \rho_{af} c_{p,a} c_f W_{af}) \cdot (T_{af} - T_f) \quad (7.3)$$

- флуks латентне топлоте услед евапотранспирације вегетације

$$L_f = l_f \cdot LAI \rho_{af} c_f W_{af} r'' \cdot (q_{af} - q_{f,sat}) \quad (7.4)$$

Топлотни биланс слоја вегетације одређује се помоћу следеће једначине:

$$F_f = \sigma_f [I_s (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (7.5)$$

Главни процеси преноса топлоте који чине топлотни биланс слоја земље су следећи:

- апсорпција краткоталасног и дуготаласног зрачења и радијација дуготаласног зрачења које емитује слој земље

$$(1 - \sigma_f)[I_s(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir} - \varepsilon_g T_g^4] \quad (7.6)$$

- размена дуготаласног зрачења између вегетације и површине земље

$$\frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) \quad (7.7)$$

- флуks осетне топлоте између земље и спољашњег ваздуха

$$H_g = \rho_{ag} c_{p,a} c_h^g W_{af} \cdot (T_{af} - T_g) \quad (7.8)$$

- флуks латентне топлоте услед евапотранспирације из земље

$$L_g = c_h^g l_g W_{af} \rho_{ag} \cdot (q_{af} - q_g) \quad (7.9)$$

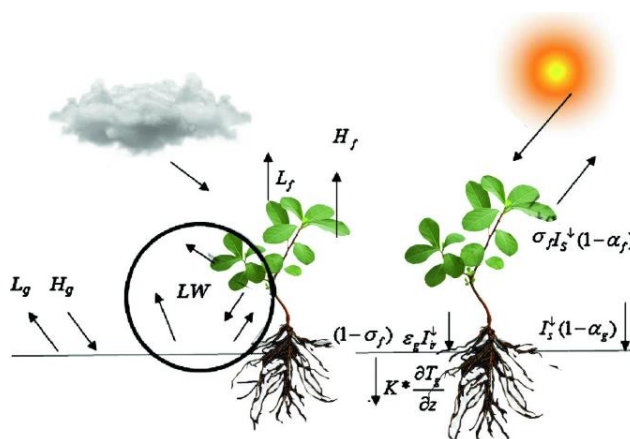
- топлотни флуks који се кондукцијом преноси кроз слој земље

$$k \cdot \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (7.10)$$

Топлотни биланс слоја земље одређује се помоћу следеће једначине:

$$F_g = (1 - \sigma_f)[I_s(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir} - \varepsilon_g \sigma T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + k \cdot \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (7.11)$$

Детаљније објашњење чинилаца у наведеним једначинама може се наћи у литератури [3]. Модел зеленог крова разматра међусобно повезане процесе преноса топлоте и влаге између атмосфере, вегетације и земље. На Слици 7.1 приказан је топлотни биланс модела зеленог крова. Програм *DesignBuilder* омогућава постављање "еко крова" као спољашњег слоја кровне конструкције и подешавање термичких карактеристикама и дебљине зеленог крова, карактеристика вегетације као што су висина биљака, индекс лисне површине (енгл. *Leaf Area Index-LAI*), итд.

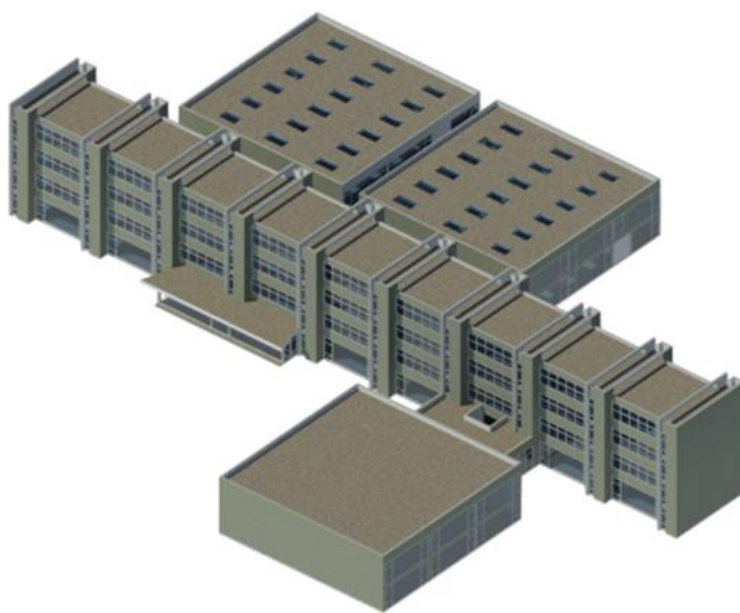


Слика 7.1. Топлотни биланс модела зеленог крова [192]

### 7.3 BIM модел објекта Техничке школе "Нови Београд"

Архитектонски модел објекта Техничке школе "Нови Београд" креиран је у програму *Autodesk Revit* верзија 2019 [193]. *Revit* је тренутно најпознатији програм за *BIM* процес пројектовања грађевинских објеката. Програм *Revit* је изабран због своје широке примене у грађевинској индустрији и због тога што се добро показао као репозиторијум информација о

објекту, које се могу извести у *BEM* [194], [195]. Модел Техничке школе "Нови Београд" је креиран на основу доступне постојеће пројектно-техничке документације добијене од управе школе и информација прикупљених приликом визуалног прегледа школске зграде. Након креирања архитектонског модела школског објекта дефинисане су структуре термичког омотача (зидови, под, кров, прозори и врата), унутрашњих зидова и међуспратних конструкција. На Слици 7.2 приказан је модел објекта Техничке школе "Нови Београд" са постојећим конвенционалним кровом у *Revit* окружењу. Формирани модел у потпуности одговара стварним конструктивним димензијама објекта и термичким карактеристикама коришћених материјала постојећег објекта. Конструкција је армиранобетонска, са масивним носећим зидовима. Спољашњи зидови имају топлотну изолацију од порофена. Школска зграда има раван кров од бетона са топлотном изолацијом од полиуретана и хидроизолацијом и изведен је са нагибом од 5% за одвођење падавинских вода. Прозори на учионицама и ходницима су у виду континуалних прозорских трака. Прозори имају алуминијумски оквир, без термо прекида, застакљени у двоструким стаклом и поприлично су девастирали током времена. Школа зграда има велику површину под прозорима. Поред тога, зграда има и значајну површину под кровним прозорима. Овај начин градње је уобичајена пракса градње школских установа у градовима у периоду од 1971. до 1990. године [196].



Слика 7.2. Модел објекта Техничке школе "Нови Београд" са конвенционалним кровом у програмском окружењу *Revit*

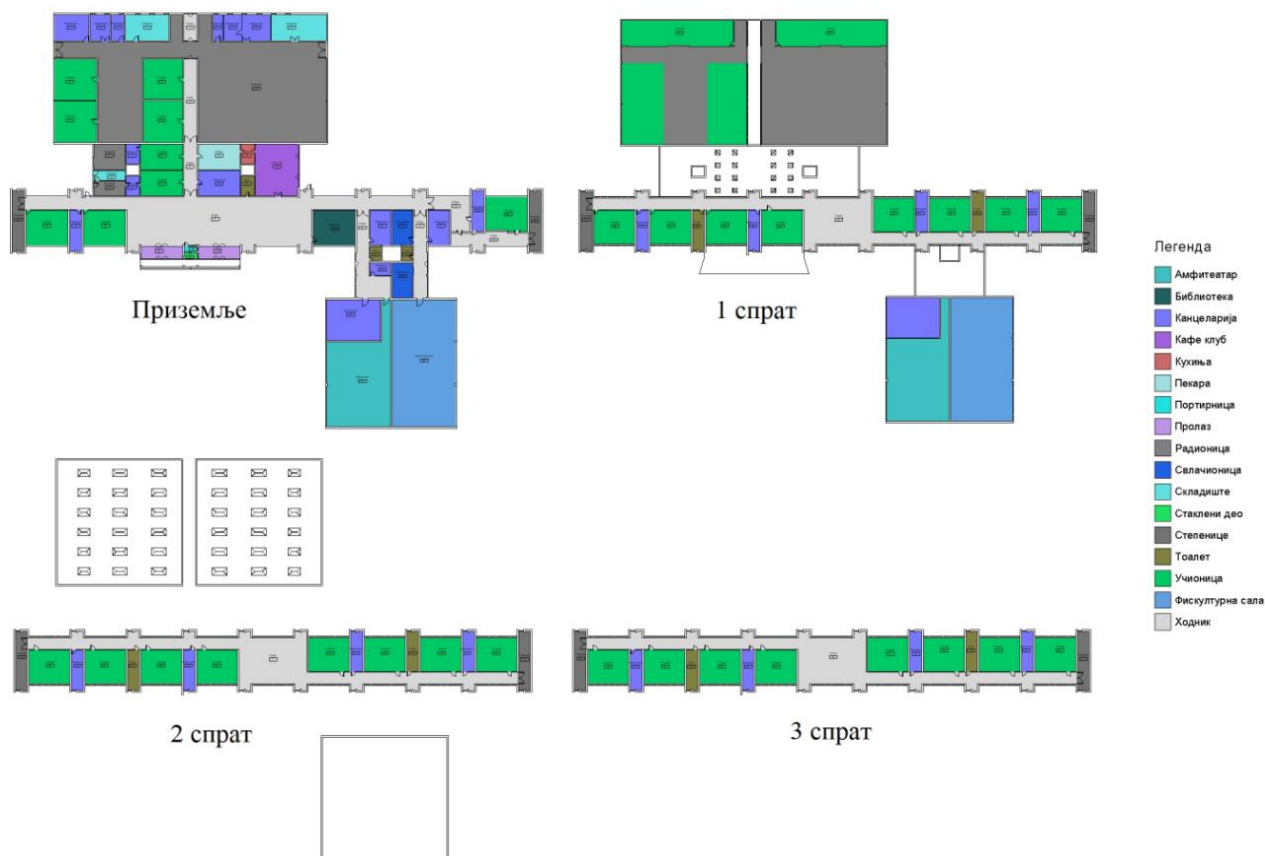
Израђени *BIM* модел школске зграде садржи информације о саставу термичког омотача зграде (зидовима, поду, крову, прозорима и вратима), спратности и висини, запремини и површинама сваког појединачног простора зграде. Направљена је библиотека одговарајућих материјала који се налазе у саставу грађевинских елемената зграде. Спољашњи зидови су од бетона и имају термоизолацију од порофена, али мале дебљине. Подови на тлу немају термичку изолацију. Унети подаци о саставу термичког омотача школског објекта и коефицијентима пролаза топлоте приказани су у Табели 7.1. Унети подаци о саставу термичког омотача посматраног школског објекта потичу из постојећег архитектонско-грађевинског пројекта.

Школски објекат поседује грађевинско-техничку документацију, али у њој је наведен само састав, а не и термичке карактеристике топлотног омотача зграде. Приказане вредности коефицијента пролаза топлоте конструктивних елемента термичког омотача школског објекта су одређене експерименталним мерењима према стандарду ISO 9869 [197]. Према Правилнику о енергетској ефикасности у зградарству [198] највећа дозвољена вредност коефицијента пролаза топлоте за раван кров изнад грејаног простора постојеће зграде износи  $U_{\max}=0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Вредност коефицијента пролаза топлоте равног кров посматране школске зграде је дупло већа од дозвољене вредности. Имајући у виду да је посматрани школски објекат изграђен 1975. године и тада важеће прописе о топлотној заштити (Правилник о техничким мерама и условима за топлотну заштиту зграда, 1970), вредности коефицијента пролаза топлоте термичког омотача зграде не задовољавају захтеве према тренутно важећем Правилнику о енергетској ефикасности у зградарству, што показује да је неопходно спровести енергетску санацију овог школског објекта.

Табела 7.1. Састав термичког омотача школског објекта

Део термичког омотача	Структура (од унутра ка споља)	Коефицијент пролаза топлоте $U$ [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]	Највећи дозвољени коефицијент пролаза топлоте $U_{\max}$ [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
Спољашњи зид	продужни кречни малтер 2 cm, опека 7 cm, порофен 4 cm, бетон 20 cm, цементни малтер 3 cm	0,72	0,4
Под на тлу	керамичке плочице 5 cm, термит плоче 4 cm, вандекс 1 cm, армирана бетонска плоча 15 cm, бетонска плоча 5 cm	2,12	0,4
Кров	малтер 2 cm, бетонска плоча 20 cm, парна брана 1 cm, битумоперлит 12 cm, полиуретан 5 cm, хидроизолација 1 cm, песак 3 cm, бетонска плоча (30x30x3 cm), битумен +полиетиленска мрежица+PVC фолија 1 cm, шљунак 4 cm	0,41	0,2
Прозори	Алуминијумски рам без термо прекида, застакљени двоструким стаклом испуњеним ваздухом (4-12-4 mm)	3,16	1,5
Врата	Алуминијумски рам без термо прекида, застакљени двоструким стаклом испуњеним ваздухом (4-12-4 mm)	3,16	1,6
	Метална	2,5	

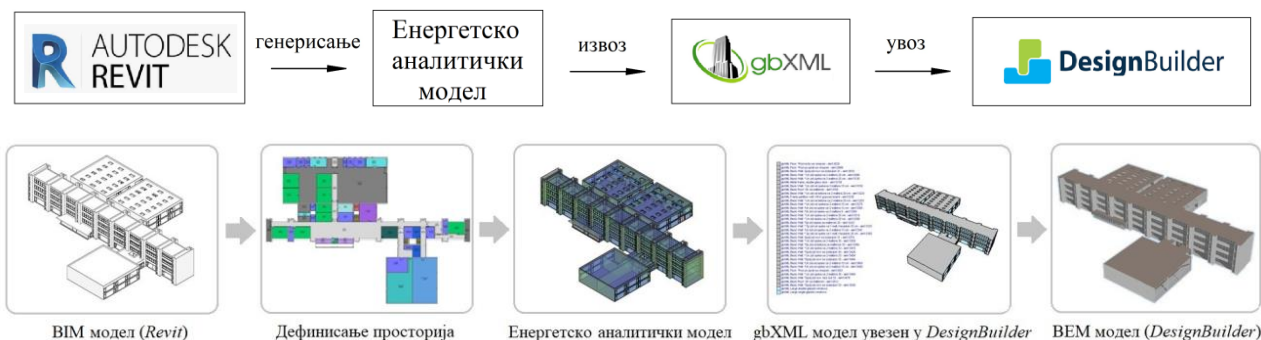
Када је формиран архитектонски модел објекта Техничке школе "Нови Београд", дефинисане су све просторије у објекту према својој стварној геометрији и намени, на основу техничке документације и визуелног прегледа објекта. У школском објекту постоји неколико функционалних целина у којима се налази укупно 112 просторија различитих намена, између осталог 20 учионица за наставу, 16 специјализованих учионица, 5 рачунарских кабинета, школска радионица опремљена већим бројем машина, техничке просторије, фискултурна сала са свлачионицама, велики амфитеатар, библиотека, итд. Унутрашњи простор школске зграде је организован по принципу двотракта, са централним вишеетажним холмом у склопу зграде. Централни део зграде у коме су смештене учионице и канцеларије је спратности П+3. Карактеристичне архитектонске целине спратности П+1 чини први засебан део у коме је смештена радионица и техничке просторије и други засебан део где је смештена фискултурна сала и амфитеатар. На Слици 7.3 приказане су основе приземља и свих спратова објекта Техничке школе "Нови Београд" са прегледом просторија у програмском окружењу *Revit*.



Слика 7.3. Основа приземља и спратова објекта Техничке школе "Нови Београд" са дефинисаним просторијама у програмском окружењу *Revit*

Поред састава термичког омотача зграде у *Revit*-у је подешена локација зграде, укључујући географску дужину, ширину и оријентацију зграде. Да би се извршио извоз података из *BIM* модела у *BEM* потребно је креирати што потпунији и тачнији енергетско аналитички модел (енгл. *Energy Analytical Model-EAM*). Енергетско аналитички модел се аутоматски креира и користи све архитектонске елементе у моделу који ограничавају просторије. За размену података од *BIM* до *BEM* коришћен је *gbXML* (енгл. *green building Extensible Markup*

*Language*) формат података који је најчешће коришћен формат за пренос података и који омогућава *BEM* програмима да увезу и учитају датотеку са свим подацима из *BIM* модела. Овај корак је од посебне важности. На првом месту, да би се извршило креирање *gbXML* фајла, претходно је морао бити генерисан енергетско аналитички модел са прецизно дефинисаним простором и геометријом. На другом месту, све припадајуће просторијаме и аналитичке површине школске зграде морале су бити исправно дефинисане, како не би недостајале информације, везане за геометрију и материјале термичког омотача зграде, које су потребне за креирање *BEM* модела. Процедура извоза *BIM* модела и података из програма *Revit* у програм *DesignBuilder*, где је формиран *BEM* модел, приказана је на Слици 7.4.

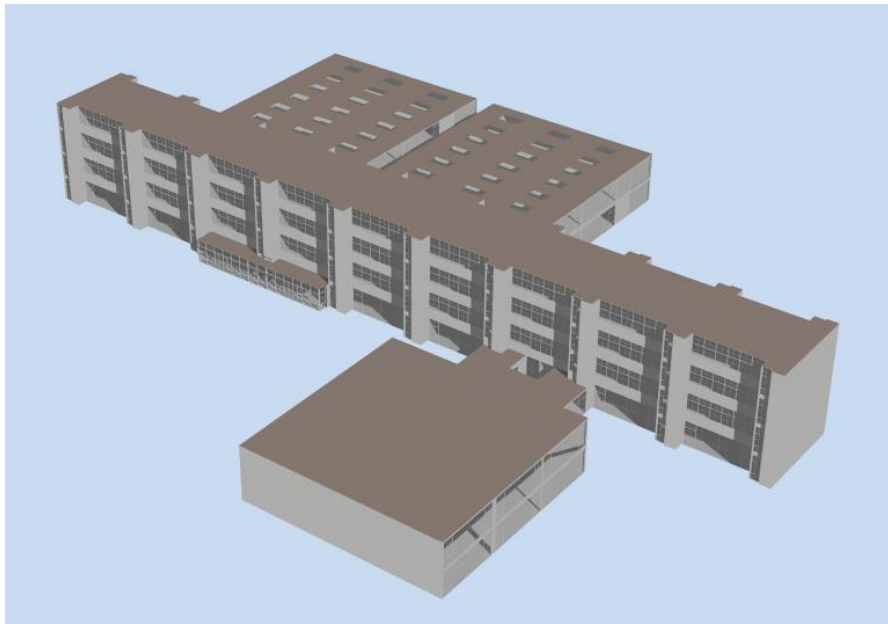


Слика 7.4. Процедура извоза *Revit* (*BIM*) модела и података у *DesignBuilder* (*BEM*)

Тренутно не постоје стандарди, методе или смернице за проверу увезеног *BIM* модела, осим обавештења која укључује број блокова и зона идентификованих након увоза модела. Тако да је визуелно прегледана геометрија и проверене су димензије зграде и висина сваког спрата. Локација и тип зграде, геометрија зграде, библиотека материјала, слојеви грађевинских елемената зграде и њихова вредност коефицијента пролаза топлоте, број и намена креираних просторија и остали подаци из *BIM* модела су успешно увезени у *BEM*.

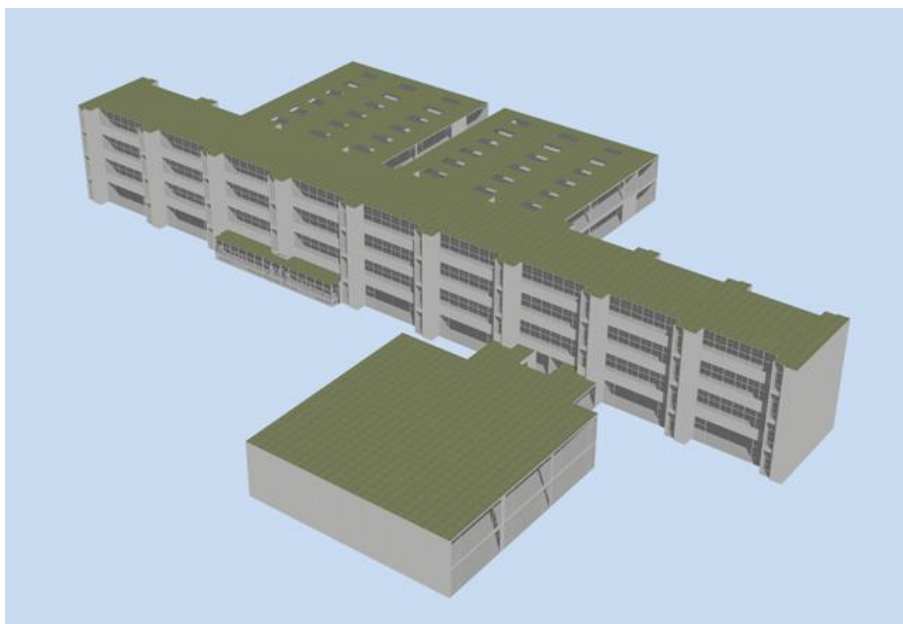
#### 7.4 BEM модел објекта Техничке школе "Нови Београд"

Како би се проценио утицај зеленог крова на енергетске карактеристике и енергетску ефикасност школског објекта, у условима умерено континенталне климе на подручју Београда, извршене су динамичке симулације термичког понашања посматраног школског објекта са постојећим конвенционалним кровом и са додатим екстензивним зеленим кровом. За динамичку симулацију термичког понашања одабраног школског објекта коришћен је програм *DesignBuilder* верзија 6.1.7.007. Увезен 3Д модел објекта Техничке школе "Нови Београд" са конвенционалним кровом из програма *Revit* у програмском окружењу *DesignBuilder* приказан је на Слици 7.5. Као што се може приметити на Слици 7.5, модел школског објекта у програмском окружењу *DesignBuilder* је незнатно поједностављен у односу на модел формиран у *Revit* програмском окружењу. Кровна стреха изнад главног улаза у школску зграду и парапети на крову објекта нису узети у обзир, јер се налазе изван самог објекта и имају занемарљив утицај на симулацију топлотног понашања објекта. Елементи који су такође занемарени због занемарљивог утицаја су степенице и стубови. Поред тога, ови елементи компликују облик и број површина, што би довело до повећања времена трајања симулација.



Слика 7.5. Модел објекта Техничке школе "Нови Београд" са конвенционалним кровом у програмском окружењу *DesignBuilder*

Како би се квантификовао утицај зеленог крова на потребну енергију за грејање и хлађење школе, на модел школског објекта у постојећем стању додат је лаки екстензивни зелени кров у програму *DesignBuilder*. Модел објекта Техничке школе "Нови Београд" са зеленим кровом, приказан је на Слици 7.6. У моделу је зелени кров постављен у складу са препорукама за извођење зелених кровова, које подразумевају постављање алуминијумских профила и шљунка у ширини од 20 cm по ободу крова. Значајно је напоменути да су сви параметри, изузев структуре кровне конструкције, идентични код оба формирана модела школске зграде, односно да су разлике у резултатима динамичких симулација последица искључиво примене зеленог кровног система.



Слика 7.6. Модел објекта Техничке школе "Нови Београд" са зеленим кровом у програмском окружењу *DesignBuilder*



Зелени кров који је постављен на делу кровне конструкције Техничке школе "Нови Београд" и на коме су вршена експериментална мерења је екстензивни лаки зелени кров са супстратом од минералне вуне и слојем вегетације који чини више врста седумских биљака. Из тог разлога је исти тип зеленог крова постављен у формираном моделу Техничке школе "Нови Београд". При формирању модела зеленог крова у програму *DesignBuilder* унети су подаци о саставу, дебљини и коефицијенту пролаза топлоте кровне конструкције са додатим зеленим кровом, који је одређен на основу експерименталних мерења и износи  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Поред састава, дебљине и коефицијента пролаза топлоте зеленог крова, потребно је дефинисати додатне карактеристике вегетације и супстрата као што су висина биљака, индекс лисне површине, запремински садржај влаге, коефицијент апсорпције соларног зрачења, итд. Улазни параметри за слој вегетације и слој супстрата зеленог крова, који су унети у модел, су изабрани на основу раније спроведених истраживања везаних за моделе објеката са зеленим кровом [199-203] и дати су у Табели 7.2.

Табела 7.2. Улазни параметри за слој вегетације и слој супстрата зеленог кров

Величина	Вредност
Висина вегетације [m]	0,2
Индекс лисне површине (LAI)	4
Рефлексивност листа	0,22
Емисивност листа	0,95
Минимални стоматални отпор [s/m]	180
Максимални запремински садржај влаге (при засићењу)	0,5
Минимални (преостали) запремински садржај влаге	0,01
Почетни запремински садржај влаге	0,15
Коефицијент апсорпције упадног дуготаласног зрачења дужине	0,9
Коефицијент апсорпције соларног зрачења	0,7
Коефицијент апсорпције зрачења видљиве таласне дужине	0,6
Храпавост површине	Средње храпава

На потребну енергију за грејање и хлађење зграда утичу:

- климатски услови (одређени локацијом зграде),
- термички омотач зграде (геометрија зграде, дебљина и састав грађевинских елемената, термичке карактеристике, величина прозора и врата, инфилтрација, итд.),
- режим коришћења зграде (број корисника, ниво активности, итд.),
- врста и карактеристике система грејања и хлађења,
- потрошња енергије за рад електричних уређаја.

Динамичке симулације изведене су за моделе школског објекта са конвенционалним и зеленим кровом, на основу дефинисане локације, оријентације и геометрије објекта, термичких карактеристика омотача објекта, техничких карактеристика и начина рада система грејања и хлађења, података о електричним уређајима, броја и распореда присуства корисника. Како би формиран *ВЕМ* модели школског објекта били што ближи реалности, и како би резултати динамичких симулација били што прецизнији, подаци о школском објекту су прикупљени из техничке документације, од управе школе и визуелним прегледом зграде.

Дефиниција намене просторије подразумева информације о броју и распореду присуства корисника у школи, активности корисника и начину рада осветљења и других електричних уређаја. Школа у свим просторијама има флуоресцентне сијалице, које се углавном користе од октобра до марта током радног времена школе, док је од априла до септембра природно осветљење довољно. Школски објекат се користи радним данима од 8 до 20 часова. У истим терминима предвиђена је употреба осветљења и електронских уређаја. У школи у једној смени углавном борави око 500 ђака и 40 запослених. На основу прикупљених података било је могуће формирати модел школског објекта који одговара реалном стању.

Метеоролошки услови имају веома важну улогу код симулација топлотног понашања зграда. Програми за симулацију топлотог понашања зграда користе просечне спољне временске податке добијене статистичком анализом, који не узимају у обзир локалне промене спољашње микроклиме [204]. Тако да је пожељно користити метеоролошке податке за локацију на којој се налази посматрани објекат. Како би се добили што прецизнији резултати динамичких симулација, формиран је метеоролошки фајл са свим неопходним подацима, који су измерени са метеоролошком станицом постављеном на школском објекту. Овај метеоролошки фајл, који је коришћен у моделу садржи часовне метеоролошке податке, о вредностима температуре, релативне влажности, брзине ветра, итд.

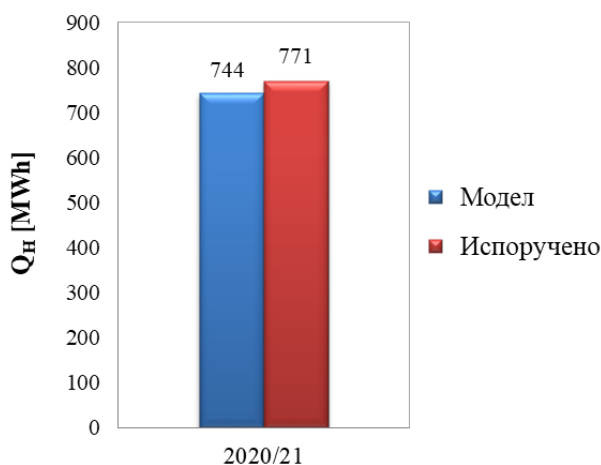
Систем грејања у школи чине топоводни радијатори, а топлота се школи током грејне сезоне испоручује од Топлане "Нови Београд", од понедељка и суботе од 6 до 20 часова и недељом од 7 до 20 часова. Све просторије у школи изузев застакљеног улаза су сматране заузетим просторима опремљеним системима за грејање и хлађење. Исти топлотни режим је дефинисан у свим просторијама школског објекта, тако да се цео објекат посматра као једна топлотна зона. Према Правилнику о енергетској ефикасности зграда [198], за зграде намењене образовању унутрашња пројектна температура ваздуха требало би да износи 20 °C за зимски период и 26 °C за летњи период. Из тог разлога је код оба модела школе температура унутрашњег ваздуха која се одржава током периода грејања 20 °C, док се током летњег периода одржава температура унутрашњег ваздуха од 26 °C. Енергенти који се користе су природни гас за грејање и електрична енергија за хлађење зграде. Услед недостатка тачних података, претпостављена је потрошња енергије електричних уређаја.

Симулације у моделу су извршене за период грејне сезоне, која почиње 15 октобра и завршава се 15 априла и за период хлађења од 15 јуна до 15 септембра. Школа нема систем за хлађење, изузев неколико клима уређаја постављених у канцеларијама, али је извршена и симулација за летњи период, како би се квантификовао утицај зеленог крова на потребну енергију за хлађење школског објекта.

## 8. Валидација модела

Формирана су два модела школског објекта, са постојећим конвенционалним кровом и зеленим кровом, како би се помоћу динамичких симулација квантификовао утицај зеленог крова на потребну енергију за грејање и хлађење школског објекта и проценио могући допринос уштеди енергије, што физички није могло да се спроведе током експерименталних истраживања. Валидација модела је неопходан корак који следи након формирања и подешавања модела, а подразумева одређивање нивоа тачности резултата добијених из модела.

У овој дисертацији, извршена је валидација модела школске зграде са постојећим конвенционалним кровом. Модел школског објекта са зеленим кровом је формиран тако што је на валидираном моделу школског објекта са постојећим конвенционалним кровом додат екстензивни зелени кров са супстратом од минералне вуне. Валидација модела школског објекта са постојећим конвенционалним кровом извршена је поређењем вредности добијених динамичким симулацијама са стварним вредностима. Вредности потребне енергије за грејање школе добијене динамичким симулацијама упоређене су са вредностима енергије за грејање која је испоручена школи током грејне сезоне 2020/21, прибављених од ЈКП Београдске Топлане. У Београду грејна сезона обично почиње 15 октобра и завршава се 15 априла. Укупна испоручена енергија за грејање школе и укупна потребна енергија за грејање школе добијена динамичким симулацијама из модела током грејне сезоне 2020/21 приказане су на Слици 8.1. Школи је током грејне сезоне испоручено укупно 771 MWh (771110 kWh) енергије за грејање. Динамичком симулацијом термичког понашања школског објекта у постојећем стању, са конвенционалним кровом, добијена је укупна потребна енергија за грејање од 744 MWh (744381 kWh).



Укупна потребна енергија за грејање добијена из модела [MWh]	744
Укупна испоручена енергија за грејање [MWh]	771

Слика 8.1. Укупна потребна енергија за грејање добијена из модела и укупна испоручена енергија за грејање школе током грејне сезоне 2020/21

За процену тачности формираног модела односно резултата добијених симулацијама, коришћени су следећи статистички индикатори, погодни за енергетску анализу на нивоу целог објекта, који су препоручени у међународним правилницима [205-207]:

- нормализована средња квадратна грешка (енгл. *Normalized Mean Bias Error*)

$$NMBE = \frac{1}{\bar{m}_i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{(n - p)} \cdot 100\% \quad (8.1)$$

- коефицијент варијације корена средње квадратне грешке (енгл. *Coefficient of Variation of the Root Mean Squared Error*)

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n - p}} \cdot 100\% \quad (8.2)$$

У Табели 8.1 дате су препоручене максималне вредности статистичких индикатора према међународним правилницама. У овој докторској дисертацији као критеријум за процену тачности модела коришћене су препоручене максималне вредности статистичких индикатора из *ASHRAE* правилника [205].

Табела 8.1. Препоручене максималне вредности статистичких индикатора

	На месечном нивоу		На часовном нивоу	
	NMBE	CV(RMSE)	NMBE	CV(RMSE)
<i>ASHRAE Guideline 14</i> [205]	±5%	15%	±10%	30%
<i>IPMVP</i> [206]	±20%	-	±5%	20%
<i>M&amp;V Guidelines</i> [207]	±5%	15%	±10%	30%

Вредности потрошње енергије за грејање школске зграде добијене динамичким симулацијама показују да су вредности статистичких индикатора *NMBE* и *CV(RMSE)* мање од 5%, што показује да је формиран модел школског објекта довољно прецизан и да су одступања вредности добијених динамичким симулацијама од стварних испоручених вредности у прихватљивим границама. На овај начин је остварена валидација модела на нивоу читавог школског објекта. Позитивна вредност *NMBE* указује на то да модел односно резултати симулације предвиђају мање вредности од стварних вредности. Вредност *CV(RMSE)* је мала и позитивна што указује да су резултати симулације блиски стварним вредностима.

Мала разлика између вредности потребне енергије за грејање школе добијене из модела и вредности количине енергије за грејање која је испоручена школи током грејне сезоне 2020/21 је повезана са променљивим бројем људи у школи и њиховим понашањем [208-211]. Зграда нема систем за хлађење и није могуће извршити валидацију модела када је у питању потребна енергија за хлађење школе. Међутим, валидација модела школског објекта када је у питању потрошња енергије за грејање нам показују да формиран модел објекта одговара реалном објекту и да је довољно прецизан. На основу тога можемо са сигурношћу сматрати да су подаци о потребној енергији за хлађење добијени динамичким симулацијама из тог истог модела тачни и довољно прецизни.

## 9. Резултати истраживања

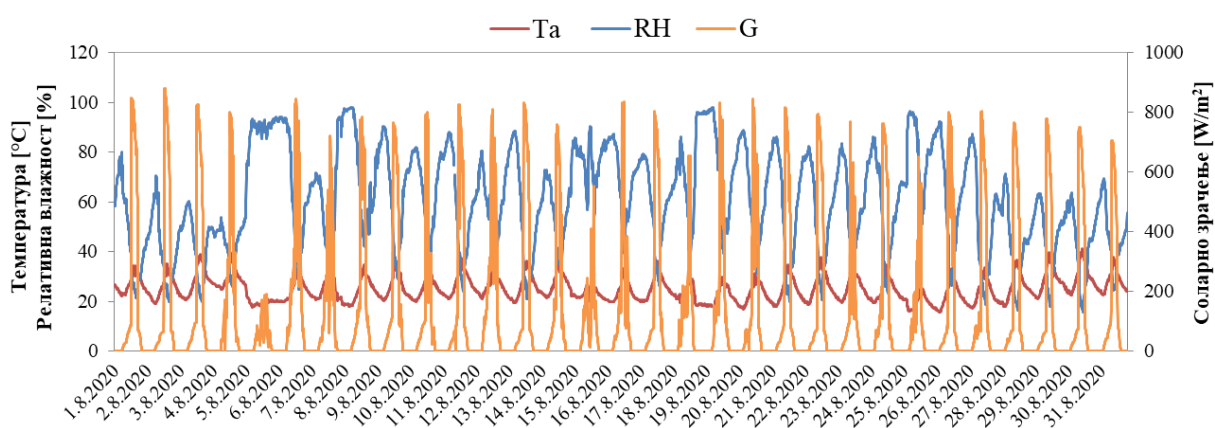
### 9.1 Анализа експерименталних резултата

У овом поглављу је приказана анализа експерименталних резултата у вези са утицајем зеленог крова на проток топлоте кроз кровну конструкцију школског објекта током летњег периода (август 2020. године) и зимског периода (јануар 2021. године). Дата је анализа термичког понашања зеленог крова и ефекат хлађења околног ваздуха у климатским условима Београда. Како би се сагледало термичко понашање зеленог и конвенционалног крова у контексту са метеоролошким условима приказани су и резултати метеоролошких мерења током летњег и зимског периода. Поред тога извршена је компаративна анализа резултата мерења квалитета ваздуха изнад конвенционалног крова и зеленог крова.

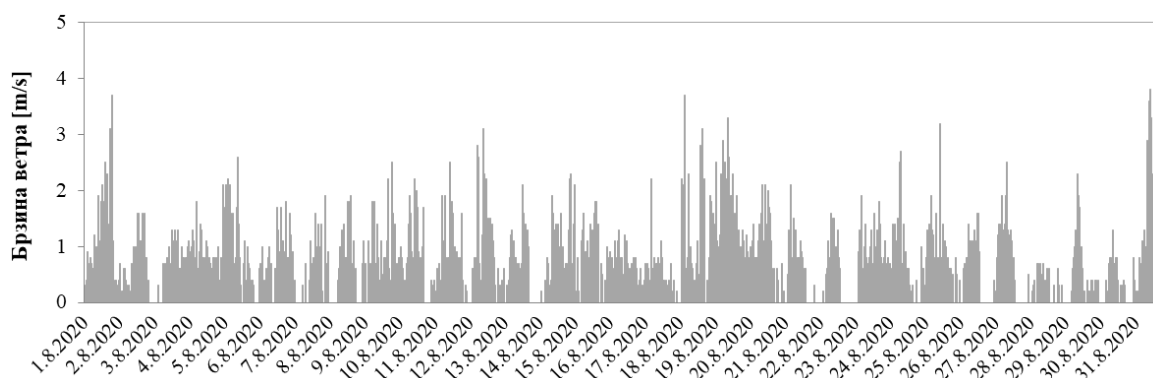
### 9.1.1 Резултати мерења метеоролошких услова

Географски положај Београда дефинисан је следећим координатама: 44°49'14" северне географске ширине и 20°27'44" источне географске дужине. Београд се налази на просечној надморској висини од 132 m. Град Београд се налази на ободу Панонске низије, на граници континенталног и умерено-континенталног климатског појаса. Према Кепен-Гајгеровој класификацији климе [212], већ део наше земље и Београд припадају типу Сфа, који карактерише умерено топла кишна клима. На подручју Београда карактеристичне су умерено хладне зиме, кишовита пролећа, дуга изразито топла лета, и јесени са дужим периодима топлог времена. Најтоплији месец је јул, а најхладнији је јануар. Највише кише падне у јуну и мају, а највећи број дана са снежним покривачем је у јануару. У Београду је просечно трајање сунчевог сјаја око 2100 сати годишње.

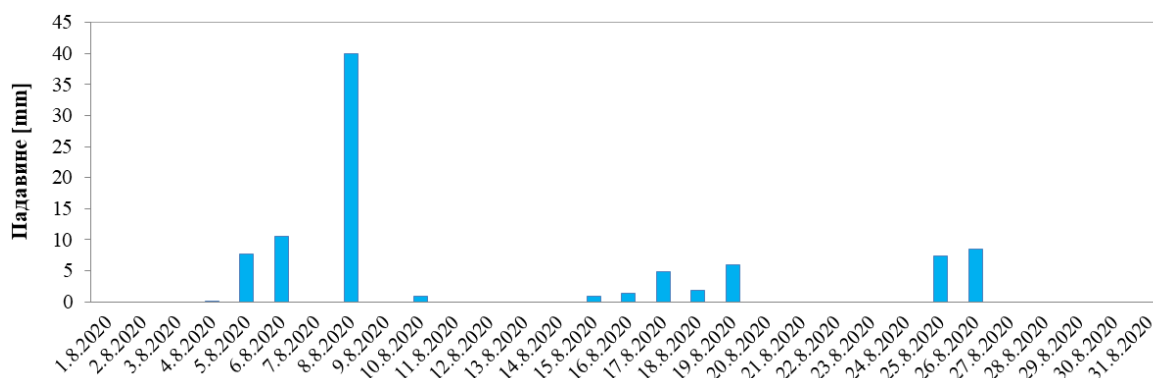
Иако је извршено мерење метеоролошких параметара на позицији конвенционалног и зеленог крова, приказани су само резултати мерења са зеленог крова, јер су разлике у измереним вредностима на две поменуте позиције занемарљиве. На Слици 9.1 приказана је измерена температура и релативна влажност спољашњег ваздуха и интензитет соларног зрачења током августа 2020. године изнад конвенционалног крова. Брзина струјања ветра је приказана на Слици 9.2. Распоред кишних дана и количина падавина током августа за подручје Београда, преузети од Републичког хидрометеоролошког завода Србије [213], приказани су на Слици 9.3. Током експерименталних мерења у летњем периоду, временски услови су били репрезентативни за летње климатске услове у Београду и Србији, са високим интензитетом соларног зрачења и високим вредностима температуре ваздуха. Температура ваздуха је била од 15,6 °C до 41,2 °C, а релативна влажност ваздуха између 16% и 96%. Током најтоплијег дела дана, интензитет соларног зрачења је био између 750 W/m<sup>2</sup> и 800 W/m<sup>2</sup>. Брзина струјања ветра током августа је била од 0,2 m/s до 3,8 m/s. Током августа било је 11 кишних дана, а укупне месечне падавине износиле су 89,6 mm.



Слика 9.1. Температура и релативна влажност спољашњег ваздуха и интензитет соларног зрачења током августа



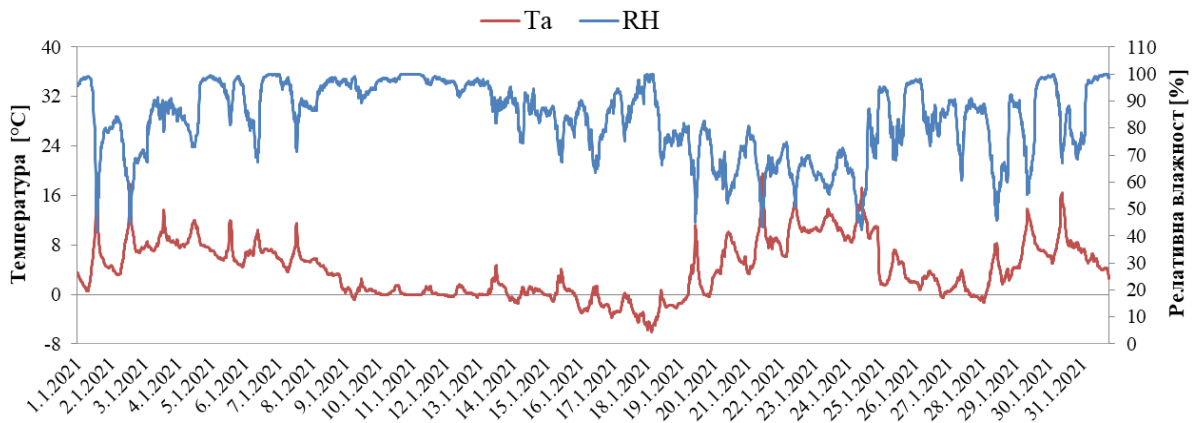
Слика 9.2. Брзина струјања ветра током августа



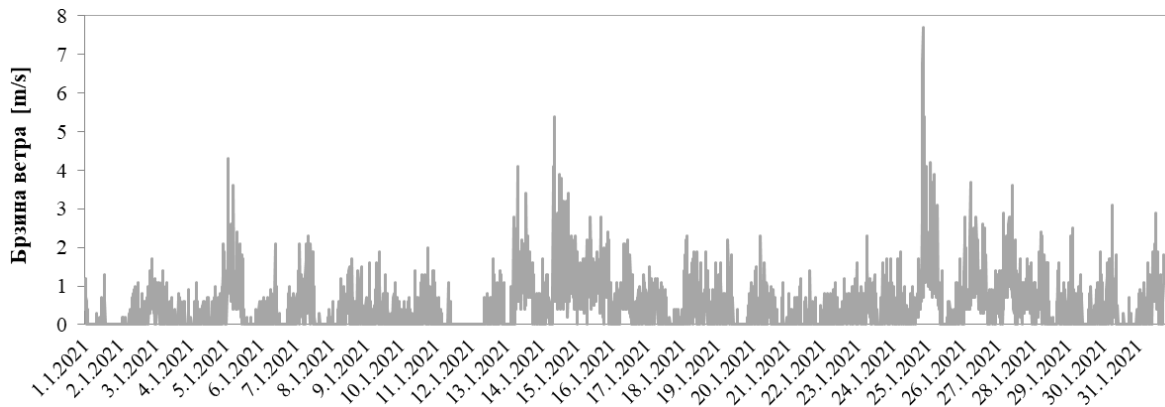
Слика 9.3. Распоред кишних дана и количина падавина током августа

На Слици 9.4 приказана је измерена температура и релативна влажност спољашњег ваздуха током јануара 2021. године изнад конвенционалног крова. Током овог периода сензор за мерење интензитета соларног зрачења није био у функцији. Брзина струјања ветра је приказана на Слици 9.5. Распоред кишних дана и количина падавина током јануара за подручје Београда, преузети од Републичког хидрометеоролошког завода Србије [213], приказани су на Слици 9.6. На Слици 9.7 приказан је распоред дана са присуством снежног покривача, као и подаци о висини укупног и новог снежног покривача током јануара за подручје Београда, преузети од Републичког хидрометеоролошког завода Србије [213]. На територији Србије је најхладнији месец јануар.

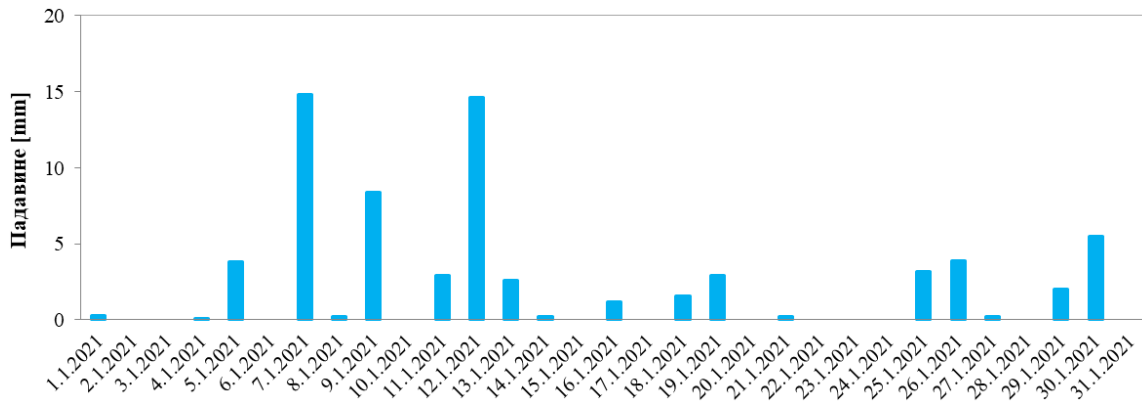
Међутим, током експерименталних мерења у јануару 2021. године је на почетку и на крају месеца забележена знатно виша температура ваздуха у поређењу са вредностима типичним за зимске климатске услове у Београду и Србији. Температура ваздуха је била од -6,1 °C до чак 19,6 °C, а релативна влажност ваздуха између 42% и 98%. Брзина струјања ветра је била од 0,2 m/s до 7,7 m/s. Током јануара било је 19 кишних дана, а укупне месечне падавине износиле су 68,6 mm. На територији Београда је од 10 до 20 јануара био присутан снежни покривач, чија је просечна висина током овог месеца износила 3 cm.



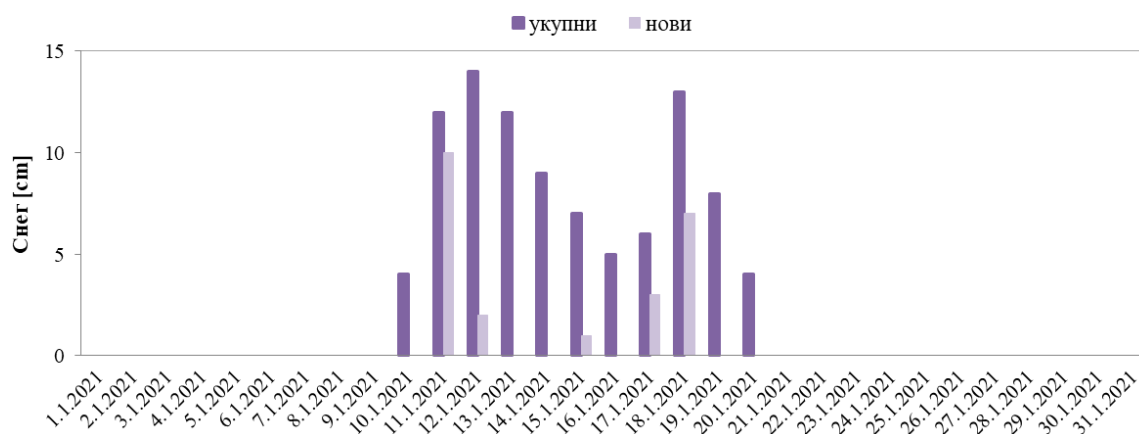
Слика 9.4. Температура и релативна влажност спољашњег ваздуха током јануара



Слика 9.5. Брзина струјања ветра током јануара



Слика 9.6. Распоред кишних дана и количина падавина током током јануара



Слика 9.7. Распоред дана са присуством снежног покривача и висина укупног и новог снежног покривача током јануара

Дескриптивна статистика измерених метеоролошких параметара је приказана у Табели 9.1. Дате су средње, минималне и максималне вредности измерених величина током летњег и зимског периода.

Табела 9.1. Средње, минималне и максималне вредности метеоролошких величина мерених током летњег и зимског периода

	Та [°C]	RH [%]	G [W/m <sup>2</sup> ]	Брзина ветра [m/s]	Количина падавина [mm]	Снежни покривач [cm]
Средња вредност						
Август	25,2	60	131,5	0,4	2,9	-
Јануар	4,1	83,4	-	0,5	2,2	3
Минимална вредност						
Август	15,6	15,9	1	0,2	0,1	-
Јануар	-6,1	41,6	-	0,2	0,1	1
Максимална вредност						
Август	41,2	98,1	880	3,8	39,9	-
Јануар	19,6	99	-	7,7	14,8	14

### 9.1.2 Резултати истраживања утицаја зеленог крова на пренос топлоте кроз кровну конструкцију

Извршено је поређење следећих величина измерених на зеленом и конвенционалном крову: температура спољашње површине кровне конструкције, температура спољашњег ваздуха мерена на 10 cm од површине зеленог и конвенционалног крова и топлотни флуks кроз кровну конструкцију на позицији зеленог и конвенционалног крова. Како би се детаљније сагледало термичко понашање зеленог крова, приказане су температура спољашње површине кровне конструкције, температура површине дренажног слоја, температура површине слоја супстрата од камене минералне вуне и температура површине

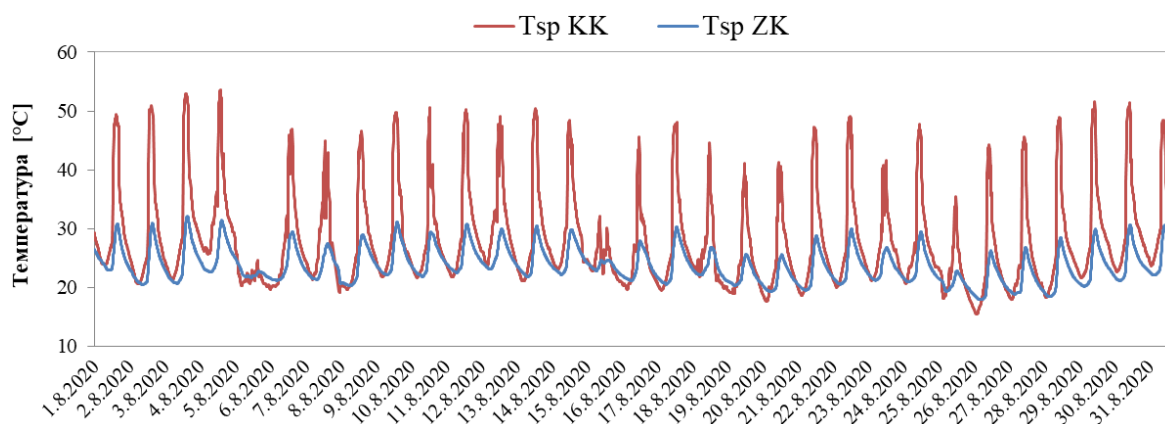


слоја вегетације. Приказане вредности свих температура представљају средњу вредност измерених вредности на три позиције на конвенционалном крову и зеленом крову. На основу измерених података са 10-минутним интервалом, одређене су средње часovне вредности, па затим средње дневне вредности. На крају су на основу средњих дневних вредности одређене средње месечне вредности посматраних величина. Како би се упоредио топлотно изолациони ефекат конвенционалног и зеленог крова, одређени су коефицијенти пролаза топлоте кроз кровну конструкцију на позицији оба крова.

### 9.1.2.1 Летњи период

Температура спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног ( $T_{sp\text{ KK}}$ ) и зеленог ( $T_{sp\text{ ZK}}$ ) крова током августа приказана је на Слици 9.8. Током целог месеца, температура спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог крова има значајно мање вредности од температуре на позицији конвенционалног крова и температуре спољашњег ваздуха. Температура кровне конструкције на позицији конвенционалног крова је од  $15,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $53,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , док је на позицији зеленог крова температура кровне конструкције од  $17,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $32,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Током летњег периода максималне дневне температура кровне конструкције на позицији зеленог крова нису прелазиле  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ , док су максималне дневне температуре на позицији конвенционалног крова скоро стално биле веће од  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (28 дана током месеца), а неким данима су достигале чак  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (8 дана током месеца).

Средње месечне температуре спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова износе  $27,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $23,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Просечна разлика између температура спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова износи  $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , док је максимална разлика  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , што одговара смањењу температуре од  $11,3\%$  и  $48,7\%$ . Највеће температурне разлике су у периоду од 13:30 до 14:30 часова. Конвенционални кров због своје тамне боје и ниске вредности албеда рефлектује малу количину соларног зрачења, док се велики део апсорбује и доводи до високе температуре површине крова. Високе температуре површине крова изазивају топлотна напрезања у материјалу и негативно утичу на трајност кровне конструкције.



Слика 9.8. Температура спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова током августа

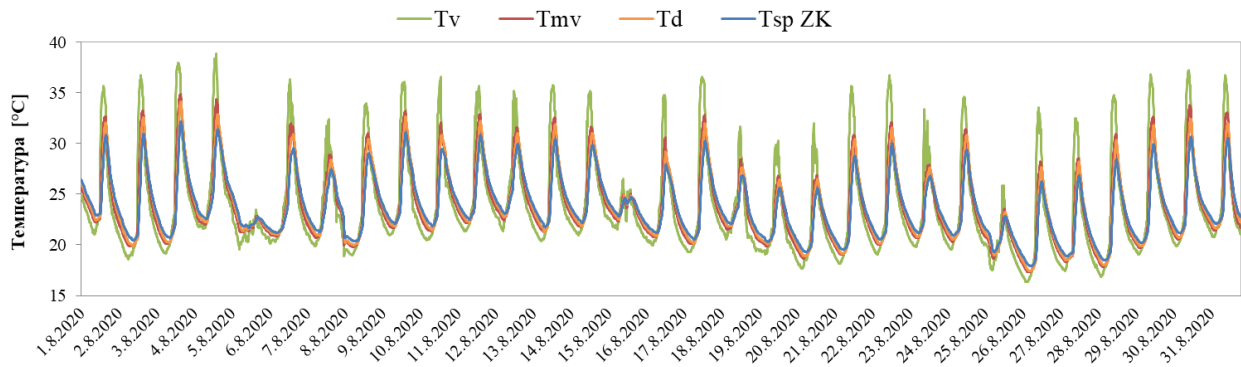
Температура конвенционалног крова нагло расте од 12:30 часова, достиже максимум око 14:30 часова, два сата након што је соларно зрачење најинтензивније (12:30 часова), а затим од 17:00 до 18:00 часова нагло опада, након чега постепено опада. Температура кровне конструкције на позицији зеленог крова постепено расте од 13:00 часова, достиже максимум око 16:00 часова, а затим се постепено смањује. Спољна површина кровне конструкције на позицији конвенционалног крова је директно изложена соларном зрачењу и брже се загрева. Са друге стране, спољна површина кровне конструкције на позицији зеленог крова је заштићена од директног соларног зрачења и спорије се загрева због веће вредности албеда зеленог крова, ефекта сенке коју ствара вегетација и апсорбовања топлоте од стране вегетације и осталих слојева зеленог крова. Због тога постоји временско кашњење од 1 сат и 30 минута између максимума температуре кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова. Током неких ноћи, температура кровне конструкције на позицији конвенционалног крова је мања него на позицији зеленог крова са просечном температурном разликом од  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Разлог је директна изложеност површине конвенционалног крова атмосферском окружењу и размена топлоте са окружењем, која омогућава брже хлађење површине конвенционалног крова током ноћи. Са друге стране зелени кров има више слојева и прекривен је вегетацијом, која задржава дуготаласно зрачење испод лисне површине биљака.

На температуру конвенционалног крова више утиче соларно зрачење у смислу дневних промена температуре у поређењу са температуром на позицији зеленог крова. Дневне амплитуде температуре спољне површине кровне конструкције на позицији зеленог крова су много мање у поређењу са конвенционалним кровом. За месец август, средња вредност дневних амплитуда температуре на позицији конвенционалног крова је  $25,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , док је на позицији зеленог крова  $7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , што одговара смањењу амплитуде температуре кровне конструкције за 70%. Слојеви зеленог крова штите кровну конструкцију од директног соларног зрачења, апсорбују топлоту и одлажу провођење топлоте, чиме се постиже смањење амплитуде температуре крова и продужава се животни век крова.

Током топлијих дана утицај зеленог крова на смањење температуре кровне конструкције је израженији. Током 5,15 и 25 августа било је облачно и кишно време, па су и температуре кровне конструкције на оба крова биле мање, као и њихова разлика, посебно током 5 и 15 у месецу. Температуре слојева зеленог крова и спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог крова, током августа, приказане су на Слици 9.9. Приказане су температура спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог крова ( $T_{sp}\text{ ZK}$ ), температура површине дренажног слоја ( $T_d$ ), температура површине слоја минералне вуне ( $T_{mv}$ ) и температура површине слоја вегетације ( $T_v$ ).

У термичком понашању зеленог крова током 24 часа могу се уочити три периода. Први период од 00:00 до 10:00 часова и трећи период од 18:30 до 00:00 часова са истим вертикалним распоредом температура: спољна површина кровне конструкције>дренажни слој>слој минералне вуне>слој вегетације, који указује на губитке топлоте. Други период од 10:00 до 18:30 часова током којег постоји следећи вертикални распоред температура: слој вегетације>слој минералне вуне>дренажни слој>спољна површина кровне конструкције, што указује на добитке топлоте. Температура слоја вегетације је од  $16,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $38,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , док је температура слоја минералне вуне од  $17,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $34,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура дренажног слоја је у распону од  $18,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $34,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Слика 9.9. Температуре слојева зеленог крова и спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог крова током августа

У току дана загревање зеленог крова почиње од површине слоја вегетације, док у току ноћи хлађење зеленог крова такође почиње од површине слоја вегетације. Због тога је у току дана слој вегетације најтоплији, а у току ноћи најхладнији. У време интензивног соларног зрачења биљке апсорбују више топлоте и тада је температура слоја вегетације за неколико степени виша од температуре околног ваздуха. Температура слоја вегетације је била и до 3 °C виша од температуре спољашњег ваздуха током дана од 12 до 14 h, што показује да вегетациони слој ефикасно апсорбује соларно зрачење, задржава топлоту и одлаже провођење топлоте ка дубљим слојевима зеленог крова. Овоме може допринети и успорено струјање ваздуха у слоју најближем површини зеленог крова и задржавање топлотог ваздуха у крошњама биљака, због храпавост површине вегетације. Након 18 h, када се смањи соларно зрачење и опадне температура спољашњег ваздуха, акумулирана топлота унутра зеленог крова се ослобађа у атмосферу уместо да се преноси у унутрашњост зграде. Слој вегетације се најбрже хлади и има минималну температуру све до јутарњих часова наредног дана. Ткива седумских биљака због свог високог топлотног капацитета, достижу високе температуре током дана и ниске температуре током ноћи [214].

Вегетациони покривач значајно утиче на профил температуре у слојевима зеленог крова. Слој вегетације током дана највише апсорбује краткоталасно зрачење, а током ноћи највише емитује дуготаласно зрачење. Резултат тога је слабије загревање, али и слабије хлађење других слојева испод вегетације. Због тога слој вегетације има највеће просечне дневне амплитуде температуре од 14,7 °C, па затим следи слој минералне вуне са 10,2 °C и дренажни слој са амплитудом температуре од 9,4 °C. Током дана температура минералне вуне била је мања од температуре спољашњег ваздуха у просеку за 1,5 °C, јер вегетација апсорбује највећи део соларног зрачења и штити слој минералне вуне од директног соларног зрачења.

Температуре слојева зеленог крова показују да се зелени кров понаша као термичка маса, која успорава односно одлаже провођење топлоте од споља ка унутрашњости зграде. Температуре минералне вуне и дренажног слоја касније достижу максималне вредности у поређењу са температуром спољашњег ваздуха. Кашњење максимума температуре слоја минералне вуне у односу на температуру спољашњег ваздуха је 40 минута, односно 1 час и 20 минута за дренажни слој. Абиотичке компоненте зеленог крова са супстратом од минералне вуне значајно доприносе апсорбовању и задржавању топлоте унутар зеленог крова. Током летњег периода "резервоари" за воду дренажног слоја су већину времена били испуњени ваздухом, који има мали коефицијент топлотне проводљивости.

Температура спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог крова је значајно смањена због тога што слојеви зеленог крова апсорбују топлоту и одлажу пренос топлоте од споља ка унутра. На Сликама 9.8 и 9.9 може се уочити да је температура слоја вегетације зеленог крова мања од температуре спољашње површине конвенционалног крова и током дана и током ноћи. Ово је важна предност зелених кровова, јер се на тај начин смањује флуks осетне топлоте од површине крова ка атмосфери, односно смањује се температура околног спољашњег ваздуха и ублажава ефекат урбаног топлотног острва. Просечна разлика ове две температуре износи 4,1 °C. Разлика у температури површине конвенционалног и зеленог крова настаје због различите вредности албеда зеленог крова (0,7-0,85) и конвенционалног крова са завршним слојем шљунка (0,1-0,2). Зелени кров доприноси смањењу провођења топлоте кроз кровну конструкцију на следеће начине:

- ефекат сенке: вегетација штити дубље слојеве зеленог крова и саму кровну конструкцију од соларног зрачења;
- термичка маса: слојеви зеленог крова повећавају термичку масу крова, која апсорбује топлоту и одлаже провођење топлоте кроз кров;
- евапотранспирација: кроз транспирацију биљака и испаравање воде из земље долази до губитка латентне топлоте и смањења протока топлоте кроз кровну конструкцију, као и хлађења спољашњег ваздуха непосредно изнад крова;

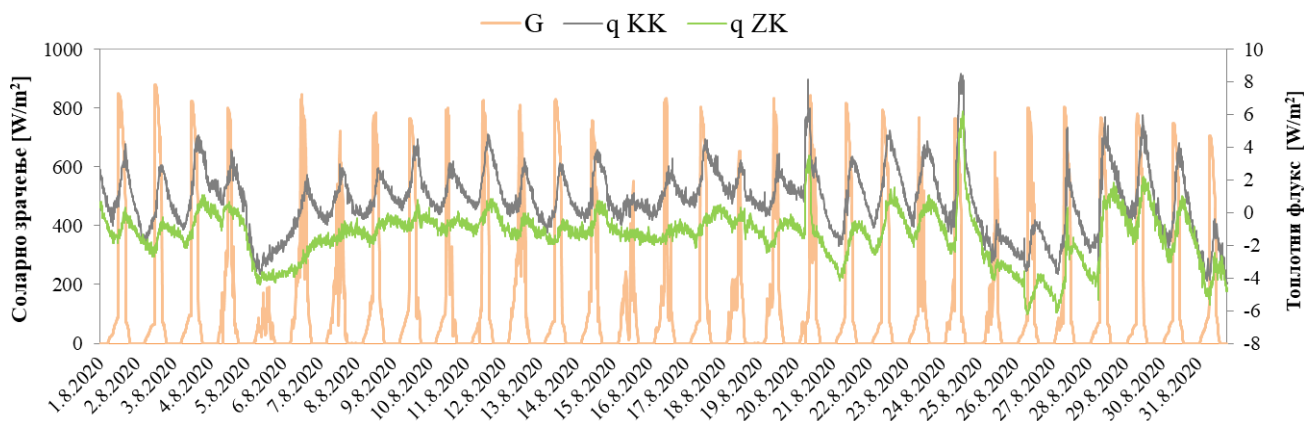
Зелени кров има улогу пасивног хлађења, кроз горе наведене начине, који доприносе смањењу топлотних добитака током летњег периода. Ефикасност зеленог крова уочена у овом истраживању је у већој мери последица ефекта сенке од вегетације и повећања термичке масе крова, а у мањој мери евапотранспирације.

Температура површине кровне конструкције и температуре слојева зеленог крова утичу на кондукцију топлоте односно добитке топлоте кроз кровну конструкцију током летњег периода. На Сlici 9.10 приказан је топлотни флуks кроз кровну конструкцију на позицији конвенционалног крова ( $q_{KK}$ ) и зеленог крова ( $q_{ZK}$ ) и интензитет соларног зрачења ( $G$ ) током августа. Сензори за мерење топлотног флуksа кроз кровну конструкцију на позицији зеленог и конвенционалног крова су били постављени тако да позитивна читавања топлотног флуksа представљају добитке топлоте (проток топлоте од споља ка унутра), а негативна читавања топлотног флуksа представљају губитке топлоте (проток топлоте од унутра ка споља).

Добијени резултати показују мањи топлотни флуks кроз зелени кров и током дана и током ноћи у поређењу са конвенционалним кровом. Топлотни флуks на конвенционалном крову је био између  $-4,3 \text{ W/m}^2$  и  $8,5 \text{ W/m}^2$ . На зеленом крову топлотни флуks је био између  $-6,2 \text{ W/m}^2$  и  $6,2 \text{ W/m}^2$ . Током летњег периода, топлотни флуks на конвенционалном крову је углавном био од споља ка унутрашњости зграде (добити топлоте), због интензивног соларног зрачења и великих вредности температуре спољашње површине конвенционалног крова. На позицији зеленог крова топлотни флуks је углавном био од унутрашњости зграде ка споља (губити топлоте). Добити топлоте чине 70% укупног топлотног тока кроз конвенционални кров. Током ноћи, када температура спољашње површине конвенционалног крова достиже минималну вредност, долази до губитака топлоте кроз конвенционални кров. На позицији зеленог крова губити топлоте чине 90% укупног топлотног тока.

Максимална вредност интензитета соларног зрачења је  $880 \text{ W/m}^2$ . Постоји евидентна корелација између топлотног флуksа кроз конвенционални кров и соларног зрачења са временским кашњењем максимума топлотног флуksа у односу на максимум интензитета

соларног зрачења од 3 h, што указује на релативно добру топлотну инерцију конвенционалног крова, који има велику дебљину од 50 cm и изолацију од полиуретана од 5 cm. Зелени кров је смањιο провођење топлоте кроз кров за 65% и одложио провођење топлоте за 2 h у односу на конвенционални кров, због топлотне масе зеленог крова, ефекта сенке коју ствара вегетација и евапотранспирације. Средња дневна амплитуда топлотног флукса за конвенционални кров је  $5 \text{ W/m}^2$ , док је за зелени кров  $3,2 \text{ W/m}^2$ . Зелени кров је смањιο дневне амплитуде температуре кроз кровну конструкцију и сходно томе смањιο амплитуду топлотног флукса кроз кровну конструкцију за 36%. Смађење температуре површине кровне конструкције и топлотног флукса кроз кров је било највеће током најтоплијег дела дана, због највећег загревања конвенционалног крова у том периоду.

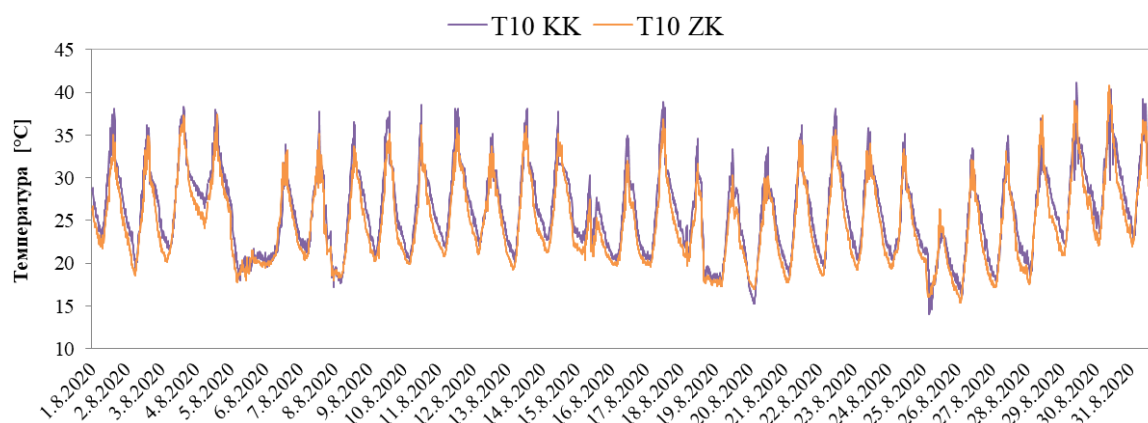


Слика 9.10. Топлотни флукс кроз кровну конструкцију на позицији конвенционалног и зеленог крова и интензитет соларног зрачења током августа

Температура спољашњег ваздуха на 10 cm од површине конвенционалног крова ( $T_{10} \text{ KK}$ ) и зеленог крова ( $T_{10} \text{ ZK}$ ), током августа, приказана је на Слици 9.11. Изнад конвенционалног крова температура ваздуха је била од  $15,4 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $41,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , док је на позицији зеленог крова температура ваздуха била од  $14 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $40,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Средња месечна вредност температуре спољашњег ваздуха изнад конвенционалног и зеленог крова је  $26,1 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $24,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Просечна разлика између температуре спољашњег ваздуха на позицији конвенционалног и зеленог крова износи  $1,3 \text{ }^\circ\text{C}$ , док је максимална разлика  $7,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , што одговара смађењу температуре од 4,8% и 23,5%. Просечна дневна амплитуда температуре ваздуха изнад конвенционалног крова је  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ , док је на изнад зеленог крова просечна дневна амплитуда температуре ваздуха  $14,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура спољашњег ваздуха изнад конвенционалног крова постепено расте после 8:00, достиже максимум у 14:30 часова, а затим опада после 17:00 часова. Код зеленог крова температура спољашњег ваздуха достиже максимум 30 минута касније у односу на конвенционални кров и брже опада поподне и посебно током ноћи. Ефекат хлађења околног спољашњег ваздуха који је зелени кров показао је најизраженији током ноћи и то у периоду од 19:00 до 06:00 часова следећег дана. Разлог за изражен ефекат хлађења зеленог крова током ноћи је метаболизам седумских биљака, које чине слој вегетације.

Седумске биљке представљају врсту из фамилије сукулентних биљака (лат. *Crassulaceae*), које карактерише тзв. сукулентни метаболизам киселина (енг. *Crassulacean Acid Metabolism-CAM*). Познато је да велика већина биљних врста апсорбује и фиксира угљен-диоксид ( $\text{CO}_2$ ) током дана. Међутим, седумске биљке, захваљујући *CAM* метаболизму, имају могућност да уместо дању апсорбују  $\text{CO}_2$  током ноћи и складиште га у вакуолама

(затворени одељци присутни у ћелијама биљака), док се током следећег дана приликом фотосинтезе ослобађа  $\text{CO}_2$  [215]. Овај метаболизам заправо омогућава седумским биљкама да преживе у сушним условима, јер се током летњег периода у случају недостатка воде, отварање стома (мале поре на површини листа) и дифузија гасова одвија ноћу, када су на станишту ниже температуре и влажност при чему је транспирација минимална [216]. У том случају, стоме у листовима остају затворене током дана да би се смањила транспирација односно губитак воде, али су отворене током ноћи ради апсорбовања угљен-диоксида [217]. Током кишних дана је мањи ефекат хлађења или га уопште нема, због високе релативне влажности спољашњег ваздуха [218]. Највећи ефекат хлађења је присутан током ноћи када је релативна влажност ваздуха била до 60%, а којима су претходили дани са високом температуром ваздуха, као што је 3 и 4 август.



Слика 9.11. Температура спољашњег ваздуха на 10 cm од површине конвенционалног и зеленог крова током августа

Резултати показују да зелени кров може смањити високе температуре спољашњег ваздуха непосредно изнад крова. Овај ефекат хлађења који зелени кров има је посебно значајан, јер доприноси смањењу ефекта урбаног топлотног острва и индиректно смањењу потребне енергије за хлађење зграда. Избор вегетације игра кључну улогу у ефекту хлађења зелених кровова. Седуми су биљна врста која се најчешће користи за екстензивне зелене кровове, због велике отпорности на промене температуре, малих захтева за наводњавањем и одржавањем. Међутим, треба имати и виду да зелени кровови са овим биљкама имају слаб ефекат хлађења током дана, а бољи ефекат хлађења током ноћи. Ови резултати могу бити од помоћи за разумевање механизма хлађења зелених кровова и избор одговарајуће вегетације.

Зелени кровови стварају специфичне микроклиматске услове, који се разликују од услова непосредног окружења у градским срединама (већа температура ваздуха и мања влажност ваздуха). Већи проценат кровова под зеленилом, осим позитивног утицаја на сам објекат, може да утиче и на смањење урбаних топлотних острва која су чест случај у гушће изграђеним насељима. На овај начин зелени кровови поред осталих зелених површина у граду доприносе побољшању микроклиматских услова. Deskriptivna статистика измерених величина на позицији конвенционалног крова и зеленог крова је приказана у Табели 9.2. Дате су средње, минималне и максималне месечне вредности и стандардна девијација измерених величина током летњег периода.

Табела 9.2. Средње вредности, стандардна девијација и минималне и максималне вредности мерених величина током августа

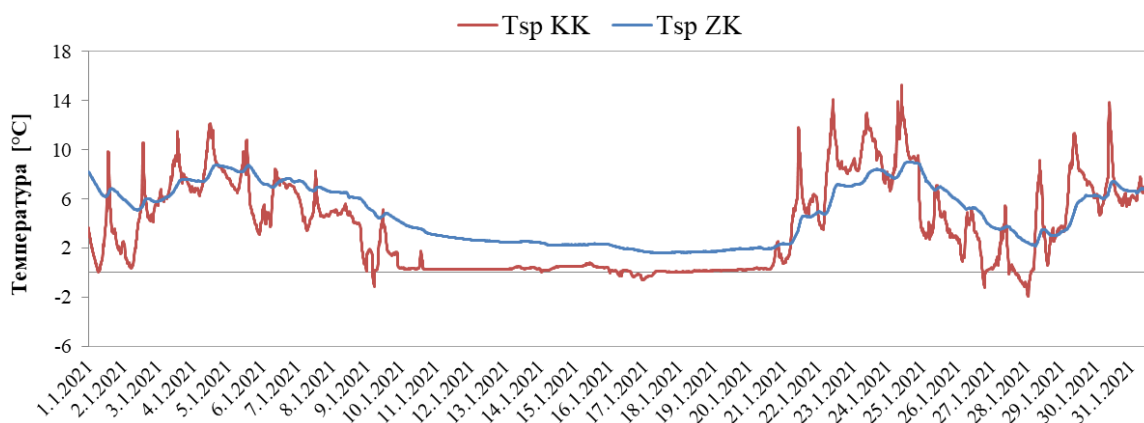
	$T_{sp}$ [°C]	$T_v$ [°C]	$T_{mv}$ [°C]	$T_d$ [°C]	$T_{10}$ [°C]	$q$ [W/m <sup>2</sup> ]
Средња вредност (стандардна девијација)						
КК	27,9 (2,7)	-	-	-	26,1 (2,4)	0,7 (1,3)
ЗК	23,7 (1,3)	23,7 (1,5)	23,7 (1,4)	23,8 (1,4)	24,8 (2,3)	-1,4 (1,2)
Минимална вредност						
КК	15,4	-	-	-	27,1	-4,3
ЗК	17,9	16,3	17,3	17,4	25,4	-6,2
Максимална вредност						
КК	53,7	-	-	-	41,1	8,5
ЗК	32,2	38,9	34,9	34,1	40,8	6,2

### 9.1.2.2 Зимски период

Температуре спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног крова ( $T_{sp}$  КК) и зеленог крова ( $T_{sp}$  ЗК), током јануара, приказане су на Слици 9.12. Током јануара, температура спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног крова има мање вредности у поређењу са температуром на позицији зеленог крова. Изузетак су топлији зимски дани, када је у најтоплијем периоду дана од 13:30 до 15:00 часова температура спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног крова максимална и виша од температуре на позицији зеленог крова. Конвенционални кров због своје тамне боје и мале вредности албеда апсорбује велики део соларног зрачења, што доводи до веће температуре површине конвенционалног крова у току топлијих зимских дана. Температура кровне конструкције на позицији конвенционалног крова је од -2 °C до 15,3 °C, док је на позицији зеленог крова температура кровне конструкције од 1,6 °C до 9 °C.

Температура на позицији конвенционалног крова прати промену температуре спољашњег ваздуха. Температура конвенционалног крова током топлијих зимских дана (почетком и крајем месеца) расте од 8:00 часова, достиже максимум око 14:00 часова и затим нагло опада до 15:30 часова, након чега је опадање температуре постепено. Температура на зеленом крову постепено расте од 13 h, а максималну вредност достиже око 15 h. Од 10 до 20 јануара, вредности температуре површине оба крова се током дана и ноћи незнатно мењају, због присуства снежног покривача. Снежни покривач има велику вредност албеда и малу топлотну дифузивност, због чега спречава загревање површине оба крова током дана, али и хлађење током ноћи. Средње месечне температуре спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова износе 3,6 °C и 4,8 °C. Просечна разлика температуре спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог и конвенционалног крова износи 1,2 °C, што одговара повећању температуре на позицији зеленог крова од 40,4%. Највеће температурне разлике су у периоду од 13:30 до 15:00 часова.

Максимална разлика температуре спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог и конвенционалног крова је била 8,2 °С. Дневне амплитуде температуре спољне површине кровне конструкције на позицији зеленог крова су значајно мање у поређењу са конвенционалним кровом. За месец јануар, средња вредност дневних амплитуда температуре на позицији конвенционалног крова је 5 °С, док је на позицији зеленог крова 1,2 °С, што одговара смањењу амплитуде температуре спољне површине кровне конструкције за 76%. Зелени кров је током зимског периода смањивао амплитуду температуре спољне површине кровне конструкције, доприносећи продужавању животног века крова.



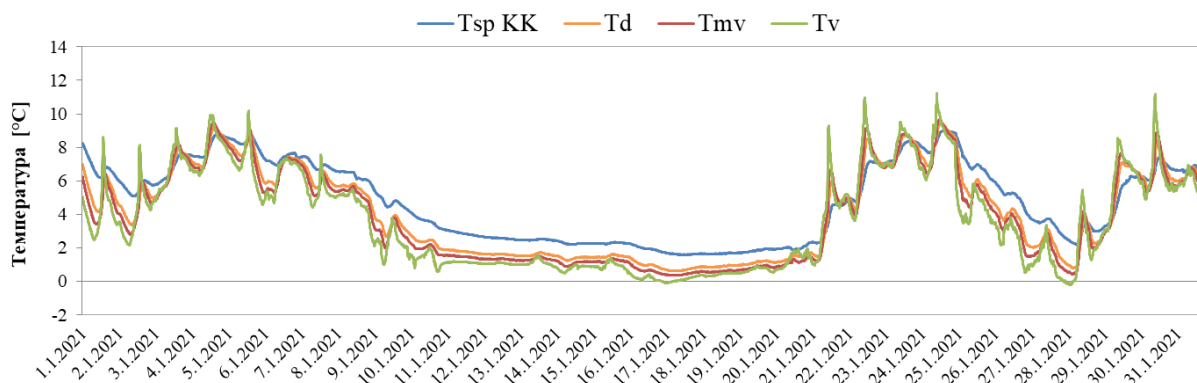
Слика 9.12. Температура спољашње површине кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова током јануара

Температуре слојева зеленог крова и спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог крова, током јануара, приказане су на Сlici 9.13. Приказане су температура спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог крова ( $T_{sp} ZK$ ), температура површине дренажног слоја ( $T_d$ ), температура површине слоја минералне вуне ( $T_{mv}$ ) и температура површине слоја вегетације ( $T_v$ ). У термичком понашању зеленог крова током 24 h могу се уочити три периода. Први период од 00:00 до 11:30 часова и трећи период од 15:00 до 00:00 часова са истим вертикалним распоредом температура: спољна површина кровне конструкције>дренажни слој>слој минералне вуне>слој вегетације, који указује на губитке топлоте. Други период од 11:30 до 15:00 часова током којег постоји следећи вертикални распоред температура: слој вегетације>спољна површина кровне конструкције>слој минералне вуне>дренажни слој. С обзиром да у овом случају дренажни слој има најмању температуру присутни су добици топлоте од споља ка дренажном слоју и губици топлоте од унутрашњости зграде ка овом слоју.

У току дана загревање зеленог крова почиње од површине слоја вегетације, а у току ноћи хлађење зеленог крова почиње од површине слоја вегетације. Због тога је у току дана слој вегетације најтоплији, а у току ноћи најхладнији. После 15:30 часова и током ноћи, слој вегетације се најбрже хлади и има минималну температуру све до 11:00 часова наредног дана. Током дана слој вегетације је директно изложен соларном зрачењу и најбрже се загрева, достижући просечну максималну дневну температуру од 5,5 °С, док је максимална температура слоја минералне вуне 5 °С, а дренажног слоја 5,1 °С. Од 10 до 20 јануара, температуре слојева зеленог крова се мало мењају, због присуства снежног покривача, који има велику вредност албеда и малу топлотну дифузивност. У овом периоду температура слоја вегетације је углавном била за 1,3 °С виша од температуре спољашњег ваздуха, због



присуства снежног покривача. Максимална разлика температуре слоја вегетације и температуре спољашњег ваздуха током оваквих хладних зимских дана је била 6,4°C. У том периоду су и температура слоја минералне вуне и дренажног слоја биле више од температуре спољашњег ваздуха за 1,6 °C и 1,9 °C. Разлог тога је слој вегетације и снега, који успорава провођење топлоте од крова ка спољашњем окружењу.



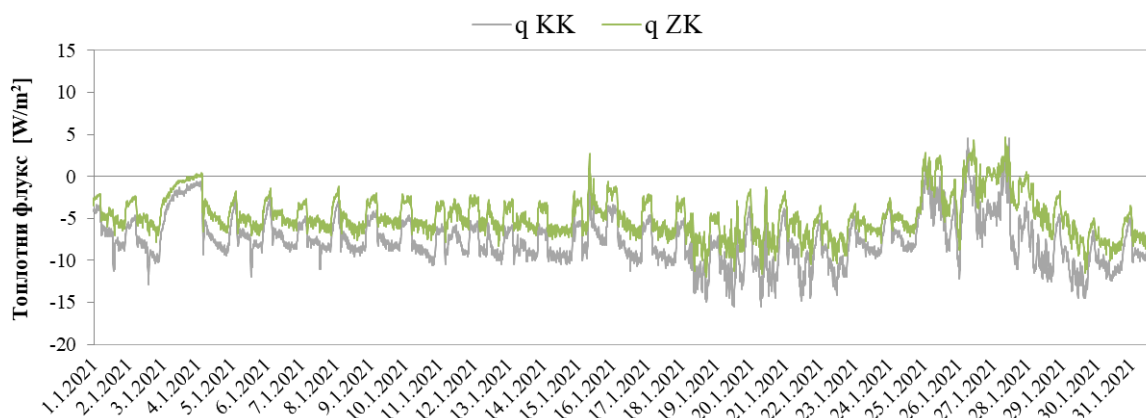
Слика 9.13. Температуре слојева зеленог крова и спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог крова током јануара

Током топлијих дана, на почетку и на крају месеца, температура спољашњег ваздуха је била виша од температуре слоја вегетације у просеку за 2,4 °C. Максимална разлика температуре спољашњег ваздуха и температуре слоја вегетације током оваквих топлијих зимских дана је била чак до 10 °C. Током топлих зимских дана, температура минералне вуне је била нижа од температуре спољашњег ваздуха за просечно 2,8 °C. Температура слоја минералне вуне је константно била изнад 0 °C. У том периоду је температура дренажног слоја била нижа од температуре спољашњег ваздуха за просечно 2,9 °C.

Температура минералне вуне и дренажног слоја касније достижу максималне вредности у поређењу са температуром спољашњег ваздуха. Током зимског периода, кашњење максимума температуре слоја минералне вуне и дренажног слоја у односу на температуру спољашњег ваздуха износи 1 час и 20 минута, односно 1 час и 50 минута. Лаки зелени кров се и током топлог зимског периода понаша као термичка маса, која пригушује амплитуде температуре кроз кров. Током зимског периода зелени кров успорава односно одлаже провођење топлоте кроз кров и смањује дневне амплитуде температуре слојева зеленог крова. Током зиме, дневне амплитуде температура слојева зеленог крова биле су ниже у односу на амплитуду температуре конвенционалног крова и температуру спољашњег ваздуха. Слој вегетације је имао највеће дневне амплитуде температуре од 3,2 °C, па затим следи слој минералне вуне 2,2 °C и дренажни слој 1,8 °C.

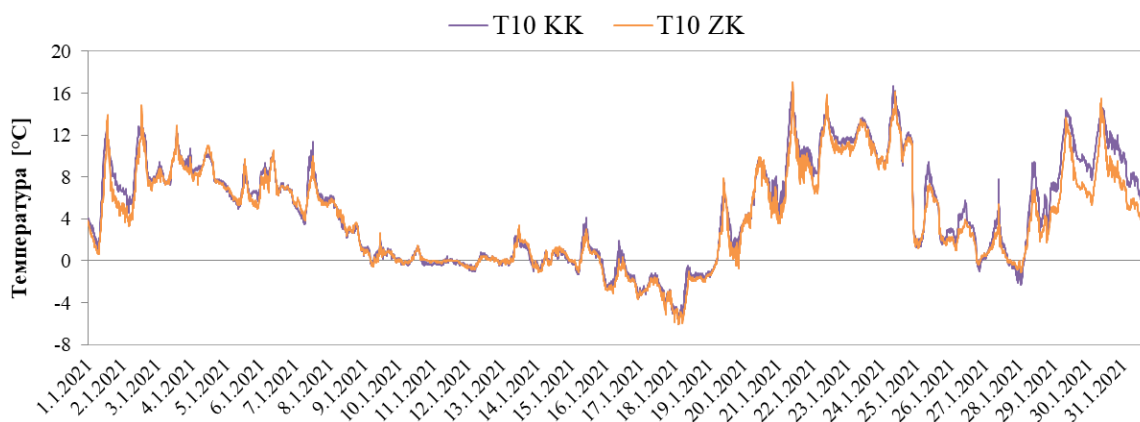
Топлотни флуks кроз кровну конструкцију на позицији конвенционалног крова ( $q_{KK}$ ) и зеленог крова ( $q_{ZK}$ ), током јануара, приказан је на Слици 9.14. Сензори за мерење топлотног флуksа кроз кровну конструкцију на позицији зеленог и конвенционалног крова су били постављени тако да позитивна читавања топлотног флуksа представљају добитке топлоте (проток топлоте од споља ка унутра), а негативна читавања топлотног флуksа представљају губитке топлоте (проток топлоте од унутра ка споља). Пошто је унутрашња температура зими била виша од спољашње, топлотни флуks на конвенционалном крову и зеленом крову скоро стално има негативне вредности односно проток топлоте је од унутра ка споља (губитке топлоте).

Добијени резултати показују да је топлотни флуks кроз зелени кров мањи у поређењу са конвенционалним кровом, осим током пар дана када су присутни добици топлоте. Топлотни флуks на позицији конвенционалног крова је од  $-15,5$  до  $4,5 \text{ W/m}^2$ , док је топлотни флуks на позицији зеленог крова од  $-12$  до  $4,7 \text{ W/m}^2$ . Зелени кров је током зимског периода смањио губитке топлоте кроз кров за 38% и одложио провођење топлоте за 30 минута у односу на конвенционални кров. Зелени кров је смањио дневне амплитуде температуре кроз кровну конструкцију и сходно томе смањио амплитуду топлотног флуksа кроз кровну конструкцију. Средња дневна амплитуда топлотног флуksа на позицији конвенционалног крова је  $8,2 \text{ W/m}^2$ , док је на позицији зеленог крова  $6,7 \text{ W/m}^2$ .



Слика 9.14. Топлотни флуks кроз кровну конструкцију на позицији конвенционалног и зеленог крова током јануара

Температура спољашњег ваздуха на 10 cm од површине конвенционалног крова ( $T_{10 \text{ KK}}$ ) и зеленог крова ( $T_{10 \text{ ZK}}$ ), током јануара, приказана је на Слици 9.15. Изнад конвенционалног крова температура спољашњег ваздуха је била од  $-6,1 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $16,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , док је на позицији зеленог крова температура ваздуха била од  $-6 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $17,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Средња месечна вредност температуре спољашњег ваздуха изнад конвенционалног и зеленог крова је  $4,7 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $4,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Просечна дневна амплитуда температуре ваздуха изнад конвенционалног крова је  $6,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , док је изнад зеленог крова просечна дневна амплитуда температуре ваздуха  $6,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Слика 9.15. Температура спољашњег ваздуха на 10 cm од површине конвенционалног и зеленог крова током јануара

Температура ваздуха изнад конвенционалног крова постепено расте после 8 h ујутру, достиже максимум у 14 h, а затим постепено опада. Температура ваздуха изнад зеленог крова достиже максималну вредност 30 минута касније. Просечна разлика температуре ваздуха изнад конвенционалног и зеленог крова је 0,5 °С, док је максимална разлика била 3,8 °С. Од 10 до 13 јануара се температуре ваздуха изнад конвенционалног и зеленог крова мало разликују и крећу се око 0 °С. Током најхладнијих дана, од 16 до 18 јануара, температуре ваздуха изнад оба крова су мање од 0 °С, с тим што је температура ваздуха изнад зеленог крова за 0,1 до 0,6 °С већа.

Зелени кров представља додатну термичку масу која омогућава складиштење топлоте током дана, која се током ноћи предаје спољној околини. Дескриптивна статистика измерених величина на позицији конвенционалног крова и зеленог крова је приказана у Табели 9.3. Дате су средње, минималне и максималне месечне вредности и стандардна девијација измерених величина током зимског периода.

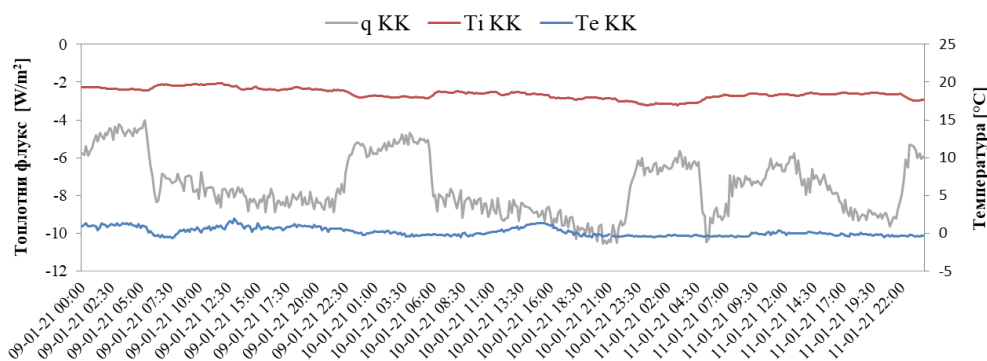
Табела 9.3. Средње вредности, стандардна девијација и минималне и максималне вредности мерених величина током јануара

	T <sub>sp</sub> [°C]	T <sub>v</sub> [°C]	T <sub>mv</sub> [°C]	T <sub>d</sub> [°C]	T <sub>10</sub> [°C]	q [W/m <sup>2</sup> ]
Средња вредност (стандардна девијација)						
КК	3,6 (3,3)	-	-	-	4,7 (0,7)	-7,6 (2)
ЗК	4,8 (2,3)	3,6 (2,7)	3,9 (2,6)	4,1 (2,5)	4,1 (0,5)	-4,7 (1,8)
Минимална вредност						
КК	-2	-	-	-	-6,1	-15,5
ЗК	1,6	-0,2	0,3	0,6	-6	-12
Максимална вредност						
КК	15,3	-	-	-	16,7	4,5
ЗК	9	11,2	9,7	9,5	17,1	4,7

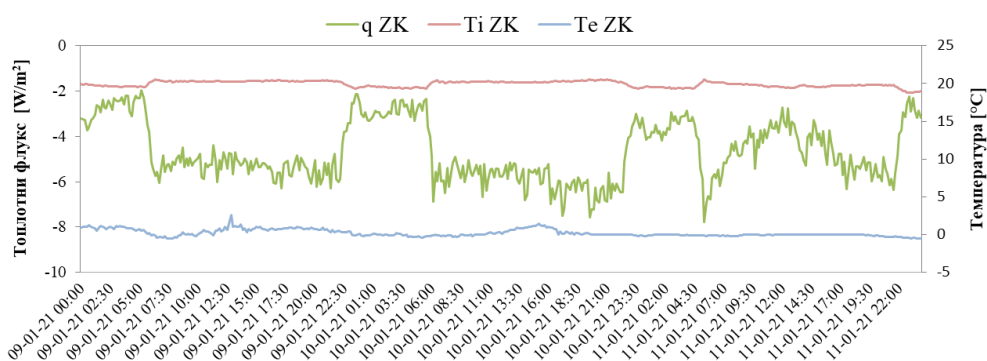
Како би се одредио топлотно изолациони ефекат зеленог крова и упоредио са конвенционалним кровом, одређени су коефицијенти пролаза топлоте кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова према стандарду ISO 9869 [197]. Коефицијент пролаза топлоте кровне конструкције је одређен на основу измереног топлотног флука кроз кровну конструкцију, температуре унутрашњег и спољашњег ваздуха према следећем изразу:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^m q_i}{\sum_{i=1}^m (T_{i,i} - T_{e,i})} \quad (9.1)$$

На Сликама 9.16 и 9.17 приказани су резултати мерења топлотног флука, унутрашње и спољашње температуре на позицији конвенционалног и зеленог крова у периоду од 9 до 11 јануара, а који су коришћени за одређивање коефицијента пролаза топлоте кровне конструкције на позицији конвенционалног крова и зеленог крова. Овај период је одабран због тога што је разлика температуре унутрашњег и спољашњег ваздуха на обе позиције била већа од 15 °С, како се и захтева према поменутом стандарду.



Слика 9.16. Топлотни флуks, унутрашња и спољашња температура на позицији конвенционалног крова



Слика 9.17. Топлотни флуks, унутрашња и спољашња температура на позицији зеленог крова

Изрaчунати коефицијент пролаза топлоте кровне конструкције и отпор пролазу топлоте кроз кровну конструкцију на позицији конвенционалног и зеленог крова су дати у Табели 9.4. Процентуална разлика коефицијента пролаза топлоте кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова је 41%.

Табела 9.4. Коефицијент пролаза топлоте кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова

	U [W/m <sup>2</sup> K]	R [m <sup>2</sup> K/W]
KK	0,41	2,4
ZK	0,24	4,2

Услови унутар школске зграде и енергетске потребе за грејање и хлађење директно зависе од промене топлотног флуksа односно од топлотних губитака и добитака кроз кров. Анализа експерименталних резултата са конвенционалног крова и зеленог крова је показала да је зелени кров смањио добитке топлоте кроз кровну конструкцију током летњег периода и губитке топлоте током зимског периода. Ово указује на потенцијално смањење енергетских потреба за грејање и хлађење просторија директно испод крова, али не мора нужно да указује на велику уштеду енергије за читаву зграду. Како би се предности зеленог крова у смислу уштеде енергије могле боље проценити потребно је сагледати резултате динамичких симулација.

### 9.1.3 Резултати мерења квалитета ваздуха

Како би се критички и квантитативно одредио утицај зеленог крова на квалитет ваздуха, у овом поглављу је приказана анализа резултата мерења, у реалном времену, концентрације загађујућих супстанци у спољашњем ваздуху изнад зеленог и конвенционалног крова школског објекта током летњег (јун-септембар 2020) и зимског периода (децембар 2020-март 2021). Извршено је поређење измерених масених концентрација PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> изнад зеленог и конвенционалног крова.

#### 9.1.3.1 Летњи период

У Табели 9.5 и 9.6 приказана је дескриптивна статистика измерених масених концентрација PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода. Дате су средње месечне вредности, стандардна девијација, минималне и масималне вредности измерених масених концентрација загађујућих супстанци у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова и зеленог крова за период од јуна до септембра 2020. године. На основу измерених података са 10-минутним интервалом, одређене су средње часовне вредности, па затим средње дневне и месечне вредности.

Табела 9.5. Средње месечне вредности, стандардна девијација, минималне и масималне вредности концентрације PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова током летњег периода

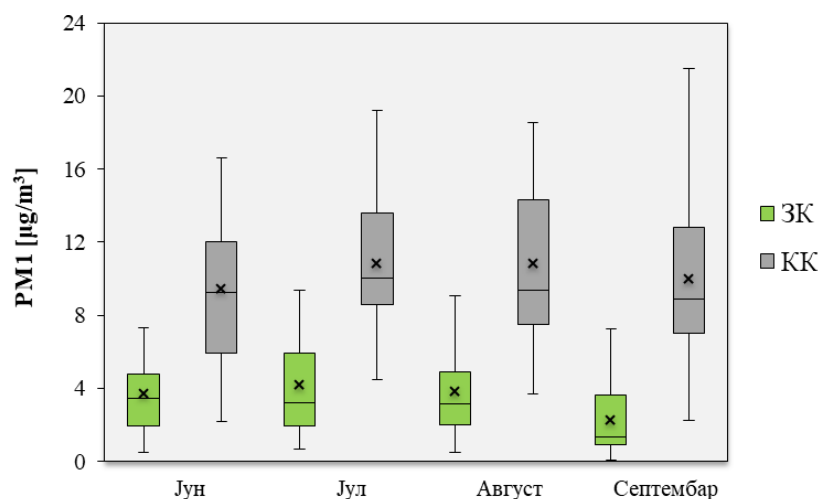
КК	PM <sub>1</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>2,5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	CO [µg/m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]
<b>Средња вредност (стандардна девијација)</b>							
Јун	9,4 (4,1)	13,4 (5,9)	14,7 (6,4)	0,42 (0,01)	827,4 (84,7)	27,1 (2,2)	89,3 (19,8)
Јул	10,8 (4,1)	14,8 (5,6)	16,2 (6,3)	0,42 (0,01)	788,1 (62,6)	28,5 (2)	80,6 (17,8)
Август	10,8 (4,5)	15,3 (6,4)	17,1 (7,3)	0,43 (0,01)	781,7 (43,4)	26,3 (2,5)	50,2 (10,3)
Септембар	10 (4,5)	14,3 (6,3)	16,2 (7,2)	0,42 (0,01)	787,6 (38,4)	30,2 (2)	69,7 (26,8)
<b>Минимална вредност</b>							
Јун	2,2	3,5	3,9	0,40	698,6	22,1	55,5
Јул	4,5	6,2	6,8	0,41	711	25,7	54,9
Август	3,7	5,5	6,5	0,41	709,6	21	37,7
Септембар	2,3	3,7	4,3	0,41	733,5	27,1	42,8
<b>Максимална вредност</b>							
Јун	16,6	23,1	26,3	0,44	1058,7	31,7	155,3
Јул	17,4	24,2	27,3	0,44	887,4	32,4	112,5
Август	18,1	25,1	28,7	0,44	858,5	31,4	69,1
Септембар	21,2	30,5	35,4	0,43	868,8	35,7	150,9

Табела 9.6. Средње месечне вредности, стандардна девијација, минималне и масималне вредности концентрације PM1, PM2,5, PM10, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад зеленог крова током летњег периода

ЗК	PM1 [µg/m <sup>3</sup> ]	PM2,5 [µg/m <sup>3</sup> ]	PM10 [µg/m <sup>3</sup> ]	CO [µg/m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]
<b>Средња вредност (стандардна девијација)</b>							
Јун	3,7 (2)	6 (3,1)	7,2 (3,6)	0,2 (0,02)	1103,8 (213,4)	27,4 (2,8)	62,3 (30)
Јул	4,2 (2,7)	6,5 (3,9)	7,7 (4,5)	0,16 (0,03)	1206,1 (158,2)	28,8 (3,1)	47,7 (24,7)
Август	3,8 (2,4)	6,2 (3,5)	7,7 (4,2)	0,17 (0,02)	1214,6 (144,9)	26,5 (2,6)	32,2 (7,6)
Септембар	2,2 (2)	3,8 (2,9)	4,9 (3,5)	0,18 (0,02)	1162,9 (160,5)	29,7 (2,6)	51 (20,6)
<b>Минимална вредност</b>							
Јун	0,5	1,2	1,7	0,14	724,6	20,6	23
Јул	0,7	1,5	1,9	0,11	1025,5	23,1	20,9
Август	0,5	1,2	1,8	0,12	1009	21,2	22,5
Септембар	0,1	0,5	0,8	0,14	773,5	24,7	25,9
<b>Максимална вредност</b>							
Јун	7,3	11,2	13,8	0,23	1505,5	33,2	127,9
Јул	9,1	13,4	16,1	0,20	1679	34,3	108,7
Август	9,1	14,2	17,6	0,20	1671	16,6	56,6
Септембар	7,3	11,2	13,8	0,20	1409,3	35,5	90,8

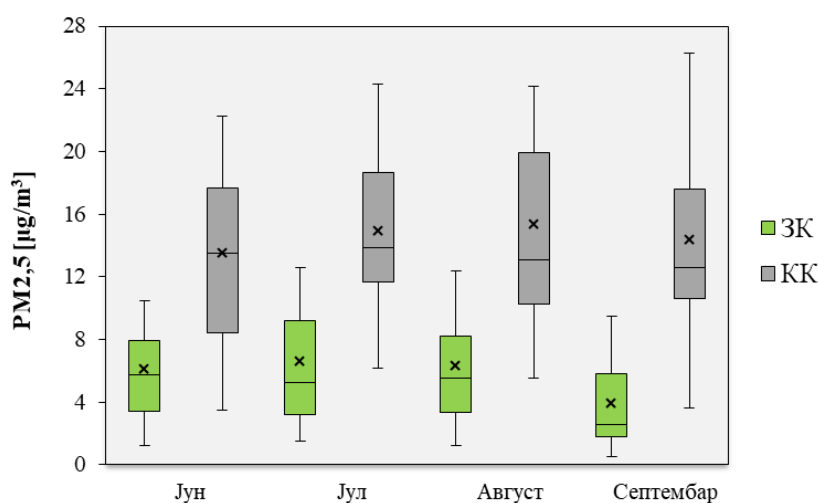
Дескриптивна статистика измерених масених концентрација PM1, PM2,5, PM10, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода је приказана на Сликама 9.18-9.24. На дијаграмима су приказане вредности минимума и максимума, доњег и горњег квантила и медијане измерених масених концентрација загађујућих супстанци у спољашњем ваздуху.

Масена концентрација PM1 изнад зеленог крова је била знатно мања у поређењу са конвенционалним кровом током сва четири месеца. Средње месечне концентрације PM1 изнад зеленог крова у летњем периоду су од 2,2 µg/m<sup>3</sup> до 4,2 µg/m<sup>3</sup>. Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације PM1 између 9,4 µg/m<sup>3</sup> и 10,8 µg/m<sup>3</sup>. Распон месечних концентрација PM1 изнад конвенционалног крова је много већи него код зеленог крова. Вредности месечних концентрација PM1 изнад конвенционалног крова су дупло веће у поређењу са зеленим кровом. Током свих месеци, максималне месечне концентрације PM1 изнад зеленог крова су биле мање од средњих месечних вредности концентрације PM1 изнад конвенционалног крова. Максимална месечна концентрација PM1 изнад зеленог крова је забележена у јулу и августу, док је на конвенционалном крову максимална месечна концентрација PM1 примећена у септембру.



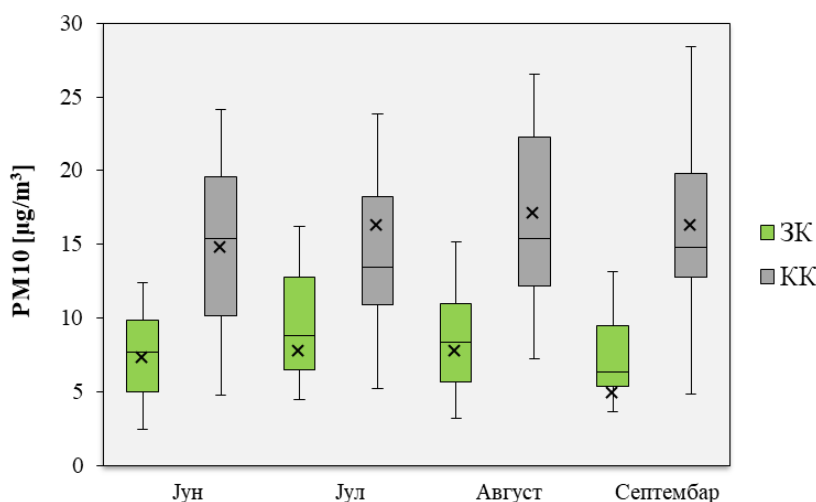
Слика 9.18. Концентрација PM1 изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода

Масена концентрација PM2,5 изнад зеленог крова је била знатно мања у поређењу са конвенционалним кровом летњег периода. Средње месечне концентрације PM2,5 изнад зеленог крова у летњем периоду су од 3,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  до 6,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације PM2,5 између 13,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  и 15,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Распон месечних концентрација PM2,5 изнад конвенционалног крова је много већи у поређењу са зеленим кровом. Вредности месечних концентрација PM2,5 изнад конвенционалног крова су дупло веће у поређењу са зеленим кровом. Вредности максималне месечне концентрације PM2,5 изнад зеленог крова су биле мање од средњих месечних вредности изнад конвенционалног крова. Максимална месечна концентрација PM2,5 изнад зеленог крова је забележена у јулу и августу, док је на конвенционалном крову максимална месечна концентрација PM2,5 примећена у септембру. Средње дневне концентрације PM2,5 не би требало да буду веће од 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , према последњим смерницама за квалитет ваздуха Светске здравствене организације [219]. Током посматраног периода, средње дневне концентрације PM2,5 изнад конвенционалног и зеленог крова су биле мање од ове вредности.



Слика 9.19. Концентрација PM2,5 изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода

Масена концентрација PM10 изнад зеленог крова је била знатно мања у поређењу са конвенционалним кровом током сва четири месеца. Средње месечне концентрације PM10 изнад зеленог крова у летњем периоду су од  $4,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  до  $7,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације PM10 између  $14,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $17,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Распон месечних концентрација PM10 изнад конвенционалног крова је већи у поређењу са зеленим кровом. Током јуна и септембра, максималне месечне концентрације PM10 изнад зеленог крова су биле мање од средњих месечних вредности концентрације PM10 изнад конвенционалног крова. Максимална месечна концентрација PM10 изнад зеленог крова је забележена у јулу, док је на конвенционалном крову максимална месечна концентрација PM10 забележена у септембру. Средње дневне концентрације PM10 не би требало да буду веће од  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , према последњим смерницама за квалитет ваздуха Светске здравствене организације [219]. Током посматраног периода, средње дневне концентрације PM10 изнад конвенционалног и зеленог крова су биле мање од ове вредности. Из Табела 9.5 и 9.6 се може видети да су изнад оба крова током јула и августа највеће средње месечне концентрације суспендованих честица све три фракције. Током ова два најтоплија месеца су повећани захтеви за електричном енергијом због потреба за хлађењем, што доводи до високог нивоа емисије честица из термоелектрана. Средње месечне концентрације честица свих фракција имају исти тренд током летњег периода.

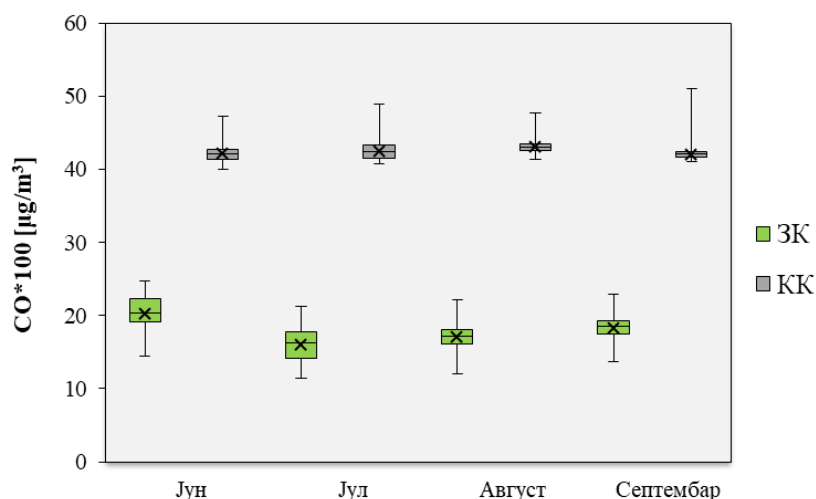


Слика 9.20. Концентрација PM10 изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода

На Слици 9.21 су приказане вредности концентрације угљен-моноксида изнад конвенционалног и зеленог крова помножене са 100, како би се расподела концентрација боље видела. Током летњег периода, масена концентрација CO изнад зеленог крова је била много мања него изнад конвенционалног крова. Средње месечне концентрације CO изнад зеленог крова су од  $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  до  $0,18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације CO између  $0,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $0,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Распон месечних концентрација CO изнад зеленог и конвенционалног крова је мали током свих месеци. Вредности месечних концентрација CO изнад конвенционалног крова су дупло веће у поређењу са зеленим кровом. Вредности максималне месечне концентрације CO изнад зеленог крова су биле много мање и од минималних месечних вредности изнад конвенционалног крова.



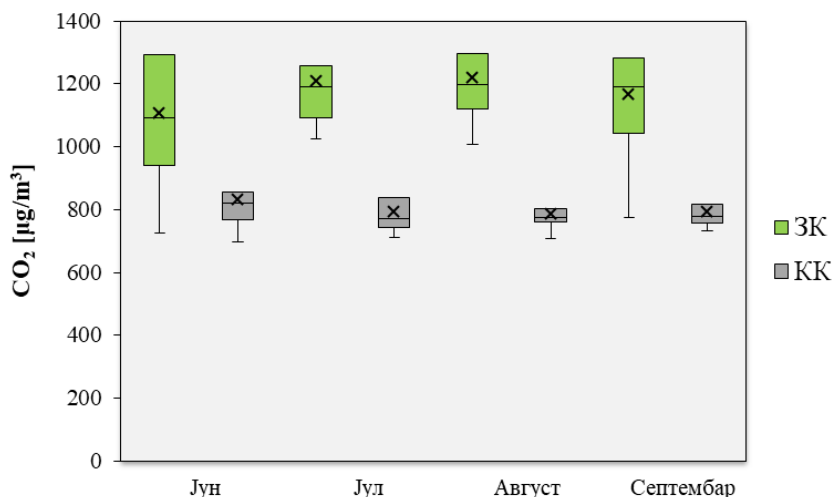
Максимална месечна концентрација CO изнад зеленог крова је забележена у јуну, док је на конвенционалном крову максимална месечна концентрација CO примећена у септембру. Апсорпција угљен-моноксида од стране земље достиже своју максималну вредност при температури од 20-30 °C и смањеном садржају воде [220]. То би могао бити разлог што су минималне месечне концентрације CO изнад зеленог крова забележене у јулу и августу, који су најтоплији месеци у години. Средње дневне концентрације CO не би требало да су веће од 5 mg/m<sup>3</sup>, према последњим смерницама за квалитет ваздуха Светске здравствене организације [219]. Током посматраног периода, средње дневне концентрације CO изнад конвенционалног и зеленог крова су биле много мање од ове вредности.



Слика 9.21. Концентрација CO изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода

Током летњег периода, масена концентрација угљен-диоксида изнад зеленог крова је била већа у поређењу са конвенционалним кровом. Средње месечне концентрације CO<sub>2</sub> изнад конвенционалног крова су од 781,7 µg/m<sup>3</sup> до 827,4 µg/m<sup>3</sup>, док су изнад зеленог крова између 1103,8 µg/m<sup>3</sup> и 1214,6 µg/m<sup>3</sup>. Током свих месеци је распон месечних концентрација CO<sub>2</sub> изнад зеленог крова већи него изнад конвенционалног крова. Минималне месечне вредности концентрације CO<sub>2</sub> изнад зеленог крова су биле веће чак и од максималних месечних концентрација изнад конвенционалног крова. Максимална месечна концентрација CO<sub>2</sub> изнад зеленог крова је забележена у августу, док је на конвенционалном крову максимална месечна концентрација CO<sub>2</sub> у јуну. Како биљке апсорбују CO<sub>2</sub> кроз стоме, преко којих такође губе воду, усклађеност између фотосинтезе и транспирације има велики значај током летњег периода. Седумске биљке, захваљујући САМ метаболизму, могу да апсорбују CO<sub>2</sub> током ноћи, док током следећег дана приликом фотосинтезе ослобађају CO<sub>2</sub>. Седумске биљке могу да мењају ток фотосинтезе у САМ као одговор на високе температуре и сушу. Овај метаболизам омогућава седумским биљкама да преживе у сушним условима, јер се отварање стома и дифузија гасова одвија ноћу, када су на станишту ниже температуре и влажност при чему је транспирација минимална [221]. Собзиром да је у овим условима транспирација смањена ограничено је и усвајање CO<sub>2</sub> само на ноћни период. Због овог мање ефикасног облика фотосинтезе (САМ) ове биљке расту веома споро, апсорбују мање CO<sub>2</sub> и стварају мање O<sub>2</sub>, јер је за процес фотосинтезе потребна светлост, угљен-диоксид и вода.

Очекује се да ће зелени кровови апсорбовати и складиштити угљеник у биљкама и земљишту и на тај начин смањити висок ниво концентрације  $\text{CO}_2$  у градској средини. Средином дана, када је иначе концентрација угљен-диоксида у градовима највећа, овај зелени кров емитује  $\text{CO}_2$  и доприноси још већој концентрацији  $\text{CO}_2$  у околини. Резултати показују да апсорбовање угљен-диоксида током ноћног периода није у потпуности компензовало високе дневне емисије, што су још нека истраживања показала [222], [223].

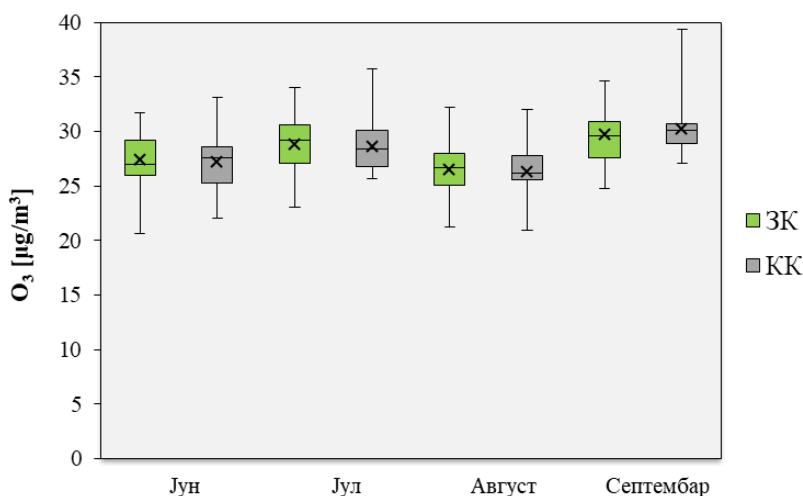


Слика 9.22. Концентрација  $\text{CO}_2$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода

Током летњег периода, масена концентрација озона изнад зеленог крова је била незнатно већа него изнад конвенционалног крова, изузев у септембру. Средње месечне концентрације  $\text{O}_3$  изнад зеленог крова су од  $27,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  до  $29,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације  $\text{O}_3$  између  $26,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $30,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Распон месечних концентрација  $\text{O}_3$  изнад зеленог и конвенционалног крова је мали током свих месеци. Вредности максималних месечних концентрација  $\text{O}_3$  су веће изнад конвенционалног крова. Максимална месечна концентрација  $\text{O}_3$  изнад зеленог крова је забележена у јулу и септембру, док је на конвенционалном крову максимална месечна концентрација  $\text{O}_3$  забележена у септембру. Смањење концентрације озона у августу може бити последица повећања релативне влажности ваздуха, што доводи до слабљења смањења фотохемијских реакција и формирања озона. Реакције између  $\text{NO}_x$  и TVOC током дана када је интензивно соларно зрачење могу довести до стварања  $\text{O}_3$ . Количина произведеног  $\text{O}_3$  у великој мери зависи од односа између TVOC и  $\text{NO}_x$ , као и од састава TVOC [224]. На апсорпцију озона негативно утиче повећана концентрација  $\text{CO}_2$ , јер се смањује стоматална проводљивост биљака [225].

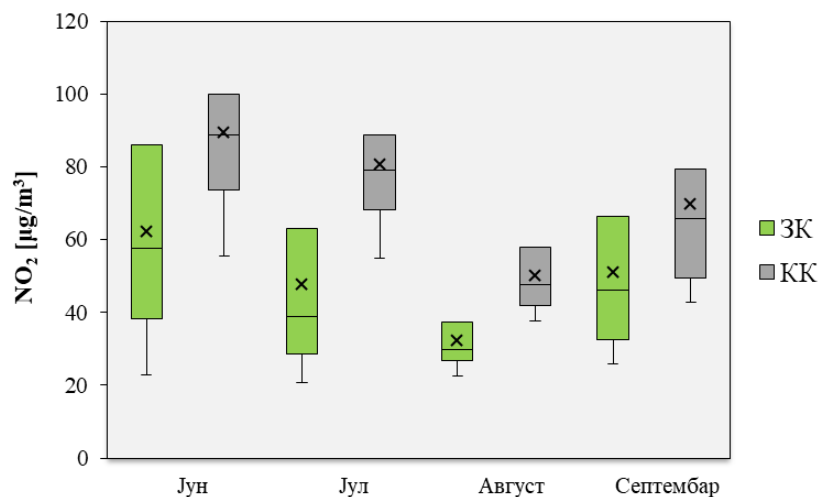
На Слици 9.22 се може видети да су концентрације угљен-диоксида изнад зеленог крова биле веће него изнад конвенционалног крова. Ово такође може бити разлог што није дошло до значајнијег смањења концентрација озона изнад зеленог крова. Поред тога висока температура и сушни летњи период могу довести до затварања стома биљака ради смањења евапотранспирације, што даље доводи до смањења апсорпције озона. Смањење концентрације  $\text{NO}_2$  утиче на повећање концентрације  $\text{O}_3$  [226]. На Слици 9.24 може се видети да су концентрације  $\text{NO}_2$  изнад зеленог крова биле мање у односу на конвенционални кров. Ово може бити још један разлог што зелени кров није смањив концентрацију озона.

Средње 8-часовне концентрације  $O_3$  не би требало да буду веће од  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , према последњим смерницама за квалитет ваздуха Светске здравствене организације [219]. Концентрација  $O_3$  изнад конвенционалног и зеленог крова је била много мања од дозвољене вредности.



Слика 9.23. Концентрација  $O_3$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода

Током летњег периода, масена концентрација азот-диоксида изнад зеленог крова је била мања него изнад конвенционалног крова. Средње месечне концентрације  $NO_2$  изнад зеленог крова су од  $32,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  до  $62,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације  $NO_2$  између  $50,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $89,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Распон месечних концентрација  $NO_2$  изнад зеленог крова је већи него код конвенционалног крова. Максимална месечна концентрација  $NO_2$  изнад оба крова је забележена у јуну. Према последњим смерницама за квалитет ваздуха Светске здравствене организације [219], средње дневне концентрације  $NO_2$  морају бити мање од  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Током летњег периода, средње дневне концентрације  $NO_2$  изнад зеленог крова су биле веће од ове вредности током 93%, 86%, 73% и 100% времена током јуна, јула, августа и септембра. Изнад конвенционалног крова средње дневне концентрације  $NO_2$  су константно биле изнад дозвољене вредности, изузев у јуну када је забележено прекорачење дозвољене вредности током 90% времена. Средње дневне концентрације  $NO_2$  изнад конвенционалног крова су биле и до три пута веће од дозвољене вредности. Одмах поред школског објекта на коме су вршена мерења је улица Омладинских бригада, која је значајна саобраћајница са повећаним обимом саобраћаја и којом пролази чак осам аутобуских линија. У недалекој близини школе на удаљености од 1,2 km је и аутопут. Повишене концентрације  $NO_2$  су последица саобраћајних гужви, типичних за овај део града у коме се налази много пословних комплекса и у који због тога долази велики број људи из других делова града.



Слика 9.24. Концентрација NO<sub>2</sub> изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода

Веће вредности PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> (>0,6) указују на веће присуство финијих честица, које се углавном ослобађају из примарних извора (процеси сагоревања и саобраћај) или се могу формирати кроз различите секундарне процесе. Мање вредности PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> (<0,6) указују на већи допринос крупнијих честица, које воде порекло из природних извора (транспорт прашине са велике удаљености, рударска и прерађивачка индустрија угља и друге механичке активности). Однос PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњих месеци приказан је у Табели 9.7. Током летњег периода, изнад конвенционалног и зеленог крова однос PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> има веће вредности, што указује на већи допринос финијих честица у честицама грубе фракције, које потичу из антропогених извора. Претпоставља се да финије честице током летњих месеци потичу из саобраћаја и процеса сагоревања угља у термоелектранама, због већих захтева за електричном енергијом услед потреба за хлађењем током топлих месеци. Вредности концентрације PM<sub>10</sub> су у доброј корелацији са вредностима концентрације PM<sub>2,5</sub>, при чему коефицијент корелације (R<sup>2</sup>) износи од 0,88 до 0,92 за конвенционални кров и од 0,75 до 0,83 за зелени кров. Велика вредност фактора корелације указује да PM<sub>10</sub> и PM<sub>2,5</sub> потичу из сличних извора емисије [226].

Табела 9.7. Однос масене концентрације PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода

	Конвенционални кров	Зелени кров
Јун	0,91	0,83
Јул	0,92	0,83
Август	0,90	0,80
Септембар	0,88	0,75

### 9.1.3.2 Зимски период

У Табели 9.8 и 9.9 приказана је дескриптивна статистика измерених масених концентрација PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода. Дате су средње месечне вредности, стандардна девијација, минималне и масималне вредности измерених масених концентрација загађујућих супстанци у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова и зеленог крова за период од Децембра 2020. до Марта 2021. године. На основу измерених података са 10-минутним интервалом, одређене су средње часовне вредности, па затим средње дневне вредности. На крају су на основу средњих дневних вредности одређене средње месечне вредности концентрација загађујућих супстанци у току зимског периода.

Табела 9.8. Средње месечне вредности, стандардна девијација, минималне и масималне вредности концентрације PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова током зимског периода

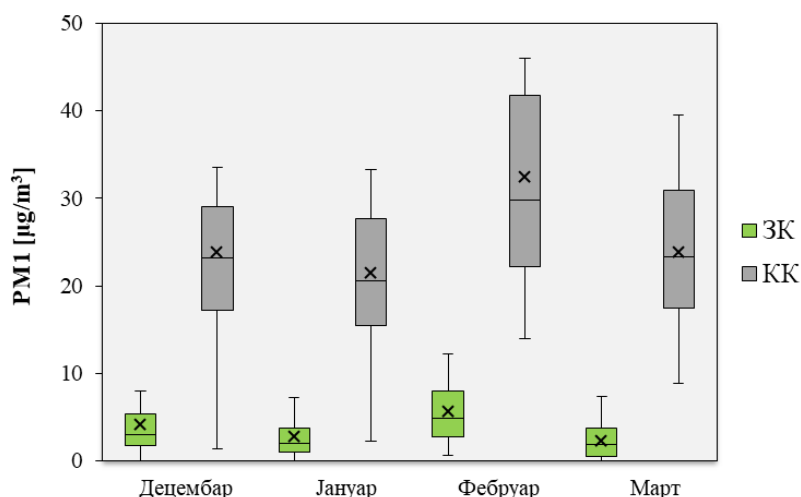
КК	PM <sub>1</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>2,5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	CO [µg/m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]
<b>Средња вредност (стандардна девијација)</b>							
Децембар	23,7 (11,5)	38,1 (19)	48,8 (25,1)	0,40 (0,01)	1102,9 (34,2)	28,5 (3,2)	95,2 (38,3)
Јануар	21,3 (9,4)	33,7 (16,1)	42,9 (22)	0,39 (0,01)	1057,8 (46,1)	30,7 (2,2)	99,1 (31,6)
Фебруар	32,3 (13)	50,6 (21,2)	63,1 (26,2)	0,40 (0,01)	1064,5 (50,4)	28,7 (6)	78 (28,9)
Март	23,7 (8,8)	37 (13,9)	46,1 (17,7)	0,41 (0,05)	1055,9 (41,9)	32,7 (3)	83,2 (33,7)
<b>Минимална вредност</b>							
Децембар	1,4	2,2	2,9	0,38	1019,3	16,7	26
Јануар	2,3	4,1	5,1	0,38	949,7	27,4	35,9
Фебруар	14	21,1	25,8	0,37	933,1	15,2	13,8
Март	8,9	13,4	15,5	0,39	941,2	27	15,8
<b>Максимална вредност</b>							
Децембар	48,6	23,1	103,5	0,41	1167	33,3	167,3
Јануар	37,7	24,2	85,8	0,40	1136,8	34,4	154
Фебруар	57,7	25,1	114,6	0,41	1138,8	38,8	133,5
Март	37,5	30,5	74,2	0,58	1120,6	37,9	162,7

Табела 9.9. Средње месечне вредности, стандардна девијација, минималне и масималне вредности концентрације PM1, PM2,5, PM10, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад зеленог крова током зимског периода

ЗК	PM1 [µg/m <sup>3</sup> ]	PM2,5 [µg/m <sup>3</sup> ]	PM10 [µg/m <sup>3</sup> ]	CO [µg/m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]
<b>Средња вредност (стандардна девијација)</b>							
Децембар	4 (3,3)	7,2 (5,4)	9,4 (6,8)	0,21 (0,02)	781,3 (37,1)	30,8 (1,8)	81,7 (29,2)
Јануар	2,7 (2,1)	5,1 (3,8)	6,8 (4,9)	0,19 (0,03)	870,7 (162,9)	32,6 (2,2)	58,7 (33,2)
Фебруар	5,5 (3,4)	9,5 (5,4)	12,4 (6,8)	0,16 (0,04)	904,8 (166,2)	33,4 (3,7)	59,3 (25,2)
Март	2,2 (1,8)	4,2 (2,9)	5,7 (3,7)	0,14 (0,02)	872,3 (26,9)	35,6 (3,2)	40,1 (25,1)
<b>Минимална вредност</b>							
Децембар	0	0,1	0,3	0,16	732,1	27,6	48,8
Јануар	0	0	0,2	0,12	729,8	28,9	10,4
Фебруар	0,7	1,8	2,6	0,11	751,3	29,2	5,4
Март	0	0,2	0,4	0,11	731,8	28,1	0
<b>Максимална вредност</b>							
Децембар	12,4	19,7	25,5	0,23	861,9	34,1	136
Јануар	7,3	12,8	17	0,23	1402	36,9	119,5
Фебруар	12,8	20,2	25,8	0,23	1436,8	41,4	114,2
Март	5,6	9,7	12,6	0,21	1057,4	40,4	103,8

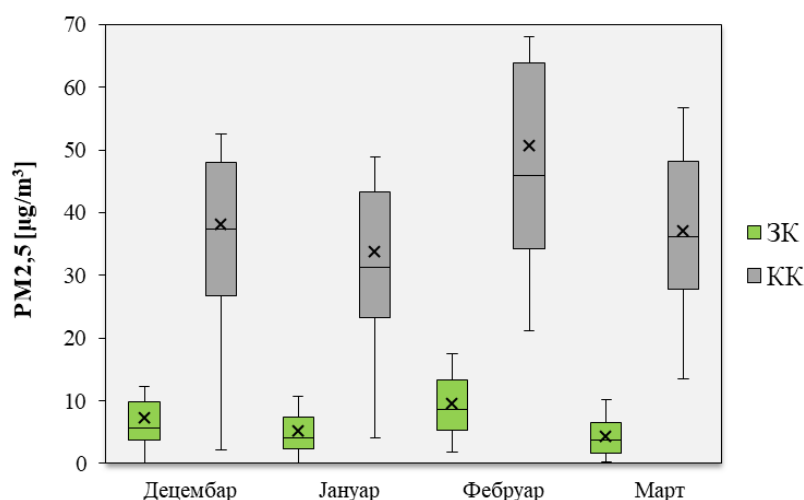
Дескриптивна статистика измерених масених концентрација PM1, PM2,5, PM10, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода је приказана на Сликама 9.25-9.31. На дијаграмима су приказане вредности минимума и максимума, доњег и горњег квантила и медијане измерених масених концентрација загађујућих супстанци у спољашњем ваздуху.

Масена концентрација PM1 изнад зеленог крова је била много мања у поређењу са конвенционалним кровом током зимског периода. Средње месечне концентрације PM1 изнад зеленог крова су од 2,2 µg/m<sup>3</sup> до 5,5 µg/m<sup>3</sup>. Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације PM1 између 21,3 µg/m<sup>3</sup> и 32,3 µg/m<sup>3</sup>. Током свих месеци, максималне месечне концентрације PM1 изнад зеленог крова су биле мање од средњих месечних вредности концентрације PM1 изнад конвенционалног крова.



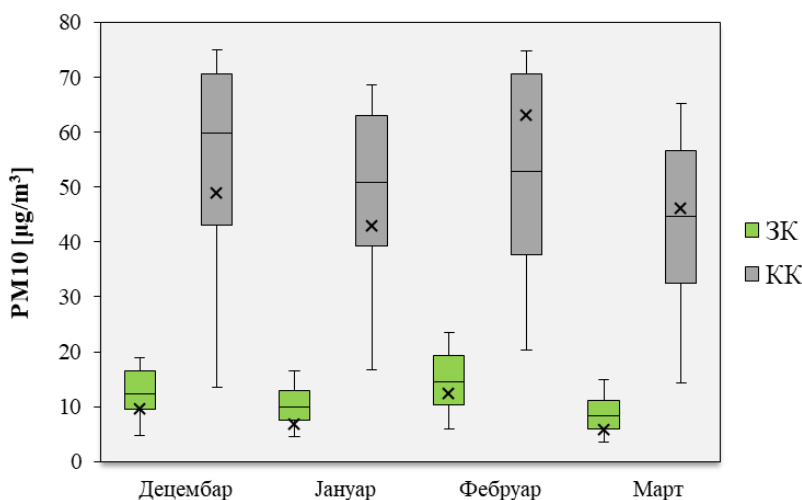
Слика 9.25. Концентрација PM1 изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода

Масена концентрација PM<sub>2,5</sub> изнад зеленог крова је такође била знатно мања у поређењу са конвенционалним кровом. Средње месечне концентрације PM<sub>2,5</sub> изнад зеленог крова у летњем периоду су од 4,2 µg/m<sup>3</sup> до 9,5 µg/m<sup>3</sup>. Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације PM<sub>2,5</sub> између 33,7 µg/m<sup>3</sup> и 50,6 µg/m<sup>3</sup>. Распон месечних концентрација PM<sub>2,5</sub> изнад конвенционалног крова је много већи него код зеленог крова. Вредности максималне месечне концентрације PM<sub>2,5</sub> изнад зеленог крова су биле мање од средњих месечних вредности изнад конвенционалног крова. Средње дневне концентрације PM<sub>2,5</sub> не би требало да буду веће од 15 µg/m<sup>3</sup>, према последњим смерницама за квалитет ваздуха Светске здравствене организације [219]. Током зимског периода, средње дневне концентрације PM<sub>2,5</sub> изнад конвенционалног су биле веће од ове вредности 93%, 87%, 100%, и 90% времена током децембра, јануара, фебруара и марта. Изнад зеленог крова средње дневне концентрације PM<sub>2,5</sub> су биле веће од дозвољене вредности током само 2 дана (9% времена) у децембру и 6 дана (7% времена) у фебруару.



Слика 9.26. Концентрација PM<sub>2,5</sub> изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода

Масена концентрација PM10 изнад зеленог крова је знатно мања у поређењу са конвенционалним кровом током зимског периода. Средње месечне концентрације PM10 изнад зеленог крова у летњем периоду су од  $5,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  до  $12,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације PM10 између  $42,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $63,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Распон месечних концентрација PM10 изнад конвенционалног крова је већи у него код зеленог крова. Вредности максималне месечне концентрације PM10 изнад зеленог крова су биле мање од средњих месечних вредности изнад конвенционалног крова. Средње дневне концентрације PM10 не би требало да буду веће од  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , према последњим смерницама за квалитет ваздуха Светске здравствене организације [219]. Током зимског периода, средње дневне концентрације PM10 изнад конвенционалног су биле веће од ове вредности 57%, 42%, 68% и 52% времена током децембра, јануара, фебруара и марта. Изнад зеленог крова средње дневне концентрације PM10 нису прелазиле дозвољену вредност. Може се видети у Табели 9.7 и 9.8 да су изнад оба крова током фебруара и децембра највеће средње месечне концентрације суспендованих честица све три фракције.



Слика 9.27. Концентрација PM10 изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода

Средње месечне концентрације честица свих фракција имају исти тренд током зимског периода. PM10 је била примарна фракција када је у питању загађење суспендованим честицама, због рада система грејања у ово доба године уз већ присутни утицај саобраћаја. У фебруару и децембру су изнад оба крова забележене највеће концентрације PM10, PM2,5 и PM1 због хладног времена и већих захтева за грејањем. Минималне концентрације суспендованих честица забележене су у марту због топлијег времена и мањих захтева за грејањем. Током јануара 2021. године су концентрације PM честица свих фракција биле мање од очекиваних изнад оба крова, због тога што је током овог месеца, било 10 дана са знатно вишим температурама нетипичним за то доба године, које су достигале чак  $19,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вероватно су током овог месеца били мањи захтеви за грејањем, па је самим тим мања емисија суспендованих честица из индивидуалних ложишта у којима се углавном сагоревају чврста горива лошег квалитета, као што је угаљ лигнит. Када је у питању сезонска промена концентрација суспендованих честица, веће концентрације честица свих фракција су забележене током зимског периода изнад оба крова, стим што су сезонске разлике веће изнад конвенционалног крова.

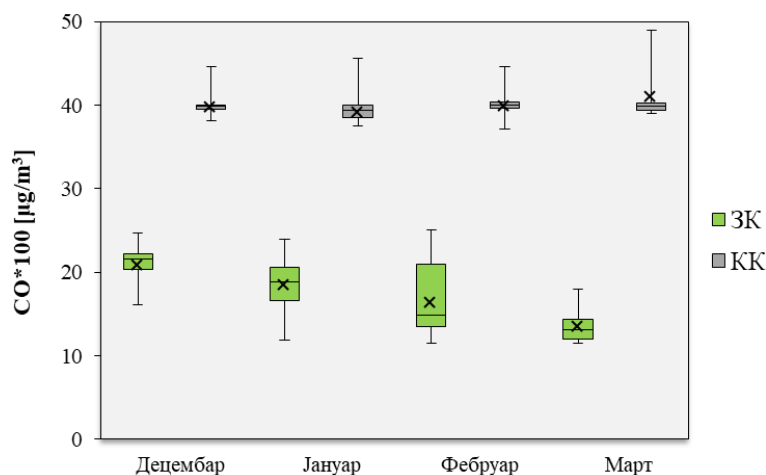


Повећане концентрације РМ честица током зиме су углавном последица грејања у домаћинствима и повећане потражње за електричном и топлотном енергијом. Поред тога повећању концентрације РМ честицама током зимског периода могу допринети одређени метеоролошки услови, при којима долази до температурне инверзије (порастан температурне са висином), услед које се загађење задржава у нижим слојевима атмосфере.

На Слици 9.28 су приказане вредности концентрације угљен-монооксида изнад конвенционалног и зеленог крова помножене са 100, како би се расподела концентрација боље видела. Током зимског периода, концентрација СО изнад зеленог крова је била мања него изнад конвенционалног крова. Средње месечне концентрације СО изнад зеленог крова су од  $0,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  до  $0,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације СО између  $0,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $0,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Распон месечних концентрација СО изнад зеленог и конвенционалног крова је мали током свих месеци. Вредности месечних концентрација СО изнад конвенционалног крова су дупло веће у поређењу са зеленим кровом. Вредности максималне месечне концентрације СО изнад зеленог крова су биле много мање и од минималних месечних вредности изнад конвенционалног крова. Максимална месечна концентрација СО изнад зеленог крова је забележена у децембру, док је на конвенционалном крову максимална месечна концентрација СО примећена у марту.

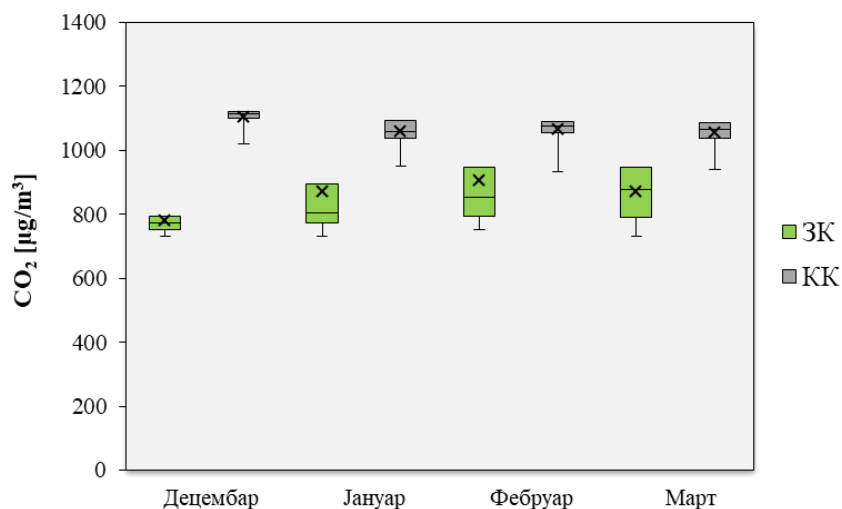
Средње дневне концентрације СО не би требало буду веће од  $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ , према последњим смерницама за квалитет ваздуха Светске здравствене организације [219]. Током зимског периода, средње дневне концентрације СО изнад конвенционалног и зеленог крова су биле много мање од ове вредности.



Слика 9.28. Концентрација СО изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода

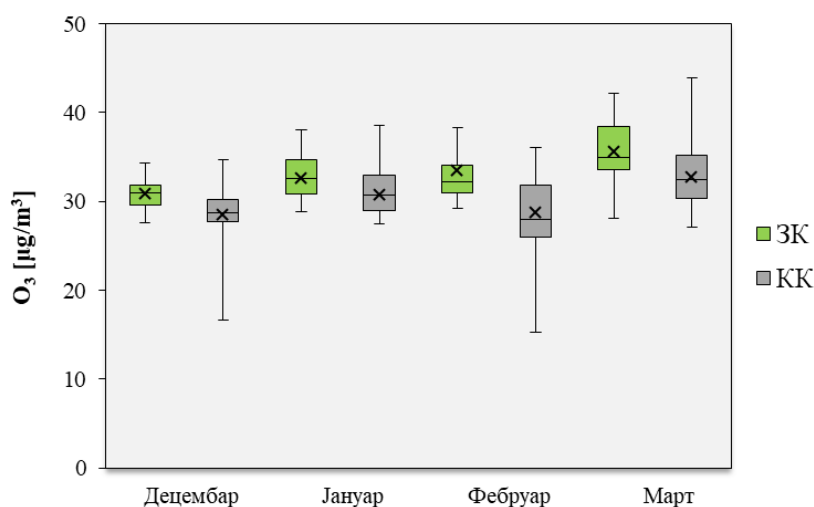
Масена концентрација угљен-диоксида изнад зеленог крова је током зимског периода била мања у поређењу са конвенционалним кровом. Средње месечне концентрације  $\text{CO}_2$  изнад конвенционалног крова су од  $1055,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  до  $1102,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , док су изнад зеленог крова између  $781,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $904,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Током свих зимских месеци је распон месечних концентрација  $\text{CO}_2$  изнад зеленог крова мало већи него изнад конвенционалног крова. Минималне месечне вредности концентрације  $\text{CO}_2$  изнад зеленог крова су биле мање од средњих месечних концентрација изнад конвенционалног крова.

Максимална месечна концентрација  $\text{CO}_2$  изнад зеленог крова је забележена у фебруару, док је на конвенционалном крову максимална месечна концентрација  $\text{CO}_2$  примећена у децембру. Изнад зеленог крова концентрације угљен-диоксида су биле веће током лета него током зиме, што није случај са конвенционалним кровом.



Слика 9.29. Концентрација  $\text{CO}_2$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода

Током зимског периода, масена концентрација озона изнад зеленог крова је била незнатно већа него изнад конвенционалног крова. Средње месечне концентрације  $\text{O}_3$  изнад зеленог крова су од  $30,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  до  $35,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације  $\text{O}_3$  између  $28,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $38,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Распон месечних концентрација  $\text{O}_3$  изнад зеленог и конвенционалног крова је мали током свих месеци. У марту, који је био најтоплији месец је забележена максимална месечна концентрација  $\text{O}_3$  изнад оба крова. Најмање средње месечне концентрације  $\text{O}_3$  изнад оба крова су забележене у децембру, који је био најхладнији месец.

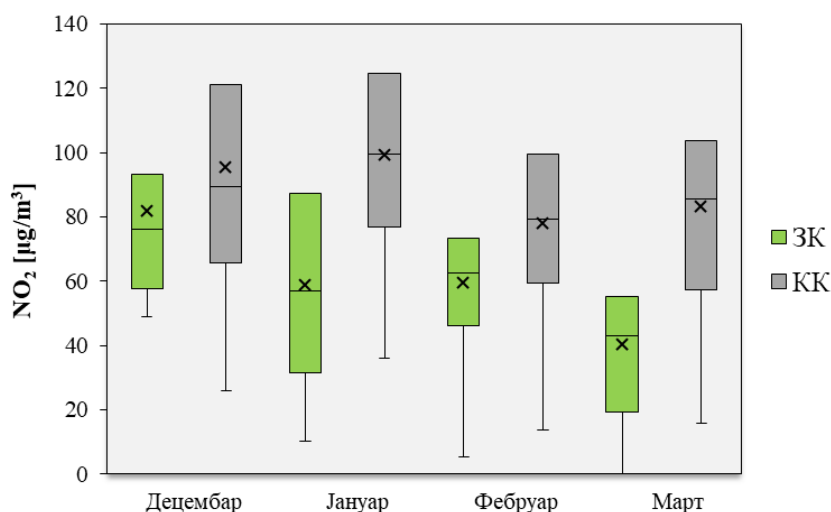


Слика 9.30. Концентрација  $\text{O}_3$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода

На Слици 9.31 се може видети да изнад зеленог крова постоји смањење концентрације  $\text{NO}_2$ . Смањење концентрације  $\text{NO}_2$  могло је да узрокује благо повећање концентрације  $\text{O}_3$  изнад зеленог крова [227]. Средње 8-часовне концентрације  $\text{O}_3$  не би требало да буду веће од  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , према последњим смерницама за квалитет ваздуха Светске здравствене организације [219]. Концентрације  $\text{O}_3$  изнад конвенционалног и зеленог крова су биле много мање од дозвољене вредности.

Током зимских месеци, масена концентрација азот-диоксида изнад зеленог крова је била мања него изнад конвенционалног крова. Средње месечне концентрације  $\text{NO}_2$  изнад зеленог крова су од  $58,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  до  $81,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Изнад конвенционалног крова су средње месечне концентрације  $\text{NO}_2$  између  $78 \mu\text{g}/\text{m}^3$  и  $99,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Распон месечних концентрација  $\text{NO}_2$  изнад зеленог крова је већи него код конвенционалног крова, изузев у јануару. Максимална месечна концентрација  $\text{NO}_2$  изнад зеленог крова је забележена у јануару, а изнад конвенционалног крова у децембру. Према последњим смерницама за квалитет ваздуха Светске здравствене организације [219], средње дневне концентрације  $\text{NO}_2$  не би требало да буду веће од  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Током зимског периода, средње дневне концентрације  $\text{NO}_2$  изнад зеленог су биле веће од ове вредности 45%, 84%, 73% и 100% времена током децембра, јула, августа и септембра. Изнад конвенционалног крова средње дневне концентрације  $\text{NO}_2$  су константно биле изнад дозвољене вредности, изузев у децембру када су дозвољене концентрације биле прекорачене током 90% времена. Код конвенционалног крова средње дневне концентрације  $\text{NO}_2$  су константно биле и до четири пута веће од дозвољене вредности.



Слика 9.31. Концентрација  $\text{NO}_2$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода

Како би се проценило порекло суспендованих честица, одређен је однос масених концентрација  $\text{PM}_{2,5}$  и  $\text{PM}_{10}$  изнад конвенционалног крова и зеленог крова током зимског периода, приказан у Табели 9.10. Веће вредности односа  $\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{10}$  изнад конвенционалног и зеленог крова током зимског периода, указују на већу заступљеност  $\text{PM}_{2,5}$  у  $\text{PM}_{10}$  фракцији честица, које су антропогеног порекла. Финије честице током зимских месеци највише потичу из процеса сагоревања због већих захтева за грејањем, уз иначе присутан саобраћај. Коefицијент корелације ( $R^2$ ) концентрације  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$  изнад

конвенционалног крова износи од 0,98 до 0,99, а за зелени кров од 0,97 до 0,98, показујући да PM10 и PM2,5 потичу из сличних извора емисије [226].

Табела 9.10. Однос масене концентрације PM2,5/PM10 у спољашњем ваздуху изнад конвенционалног крова и зеленог крова током летњег периода

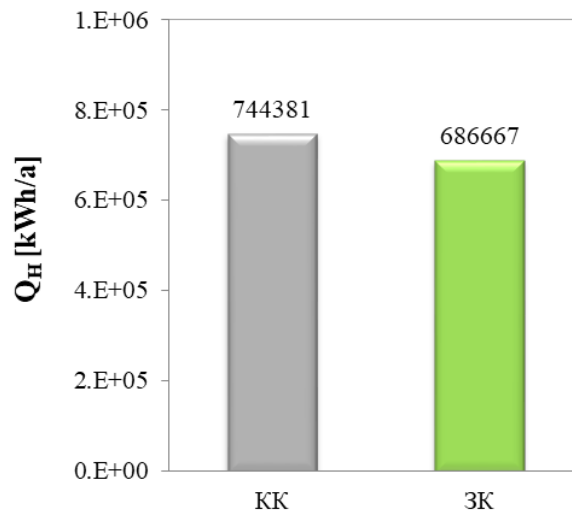
	Конвенционални кров	Зелени кров
Децембар	0,98	0,98
Јануар	0,99	0,97
Фебруар	0,99	0,98
Март	0,99	0,98

### 9.1.2.1 Анализа резултата динамичких симулација

Експериментална истраживања су указала на кључне предности примене зелених кровова. У овом поглављу је испитан утицај зеленог крова на енергетске потребе за грејање и хлађење, како би се проценио допринос зеленог крова као елемента пасивног дизајна енергетској ефикасности зграда у условима умерено континенталне климе. Приказани су резултати анализе потребне енергије за грејање и хлађење посматраног школског објекта са конвенционалним и зеленим кровом у зимском и летњем периоду добијени динамичким симулацијама у програму *DesignBuilder*. Симулације у моделу су извршене за период грејне сезоне, која почиње 15 октобра и завршава се 15 априла и за период хлађења од 15 јуна до 15 септембра. Дате су вредности потребне финалне и примарне енергија за грејање  $Q_H$  [kWh/a] и за хлађење школског објекта  $Q_C$  [kWh/a].

### 9.2.1 Потребна енергија за грејање школског објекта

Потребна годишња финална енергија за грејање школе са постојећим конвенционалним и са додатим зеленим кровом добијена динамичким симулацијама приказана је на Слици 9.32. Применом зеленог крова може се остварити смањење укупне потребне финалне енергије за грејање школе током грејне сезоне са 744381 kWh/a на 686667 kWh/a. Резултати симулација показују да се применом лаког екстензивног зеленог крова код посматраног школског објекта може остварити уштеда потребне финалне енергије за грејање од 57714 kWh/a односно од 7,7%. Специфична потребна финална енергија за грејање школе са конвенционалним кровом износи 112,7 kWh/m<sup>2</sup>a. У случају примене зеленог крова специфична потребна финална енергија за грејање школе износи 104 kWh/m<sup>2</sup>a.



Слика 9.32. Укупна потребна финална енергија за грејање школе са конвенционалним и зеленим кровом

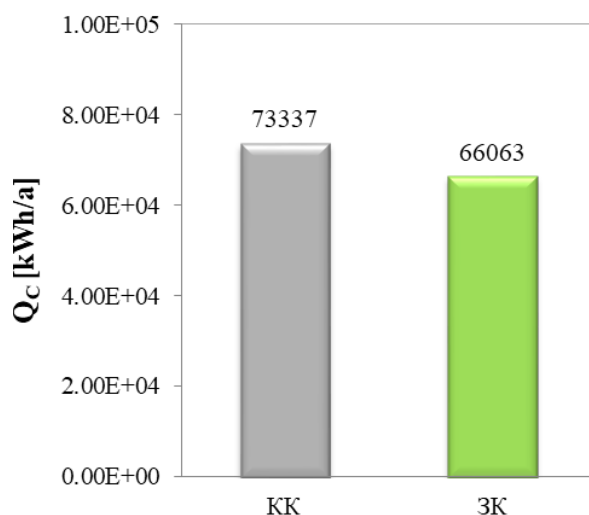
У Табели 9.11 дате су вредности потребне финалне енергије за грејање школе са конвенционалним и зеленим кровом.

Табела 9.11. Укупна потребна финална енергија за грејање школе са конвенционалним и зеленим кровом

Потребна финална енергија за грејање школе са конвенционалним кровом $Q_H$ КК [kWh/a]	744381
Потребна финална енергија за грејање школе са зеленим кровом $Q_H$ ЗК [kWh/a]	686667

### 9.2.2 Потребна енергија за хлађење школског објекта

Потребна годишња финална енергија за хлађење школе са постојећим конвенционалним и са додатим зеленим кровом добијена динамичким симулацијама приказана је на Слици 9.33. Јасно је уочљиво да се применом зеленог крова може остварити значајно смањење потребне финалне енергије за хлађење школе са 73337 kWh/a на 66063 kWh/a. Резултати симулација показују да се применом лаког екстензивног зеленог крова код посматраног школског објекта може остварити уштеда потребне финалне енергије за хлађење од 7274 kWh/a односно од 10%. Специфична потребна финална енергија за хлађење школског објекта са конвенционалним кровом износи 11,1 kWh/m<sup>2</sup>a. У случају примене зеленог крова специфична потребна финална енергија за хлађење школског објекта износи 10 kWh/m<sup>2</sup>a.



Слика 9.33. Укупна потребна финална енергија за хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом

У Табели 9.12 дате су вредности потребне финалне енергије за хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом.

Табела 9.12. Укупна потребна финална енергија за хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом

Потребна финална енергија за хлађење школе са конвенционалним кровом $Q_c$ КК [kWh/a]	73337
Потребна финална енергија за хлађење школе са зеленим кровом $Q_c$ ЗК [kWh/a]	66063

У случају Техничке школе "Нови Београд" у постојећем стању (са конвенционалним кровом) за грејање и хлађење потребно је укупно 817718 kWh/a. У случају постављања лаког екстензивног зеленог крова на читавој кровној површини Техничке школе "Нови Београд" за грејање и хлађење би било потребно укупно 752730 kWh/a. Резултати симулација показују да се применом екстензивног зеленог крова са супстратом од минералне вуне може постићи уштеда укупне потребне енергије за грејање и хлађење посматраног школског објекта од 64988 kWh/a односно од 7,9%. За грејање и хлађење школског објекта у постојећем стању потребно је укупно 124 kWh/m<sup>2</sup>a, док је за грејање и хлађење школског објекта покривеног зеленим кровом потребно 114 kWh/m<sup>2</sup>a.

Посматрани школски објекат има велику површину под прозорима. Кров школе има значајну површину под кровним прозорима. Треба имати у виду да су велике стаклене површине које доминирају изгледом фасаде старе из времена изградње школе, и да повећавају губитке топлоте зими и добитке топлоте лети. Претпоставља се да би у случају замене старих прозора, уштеда финалне енергије за грејање и хлађење школског објекта била већа. Треба напоменути да је удео крова школе мали у односу на укупну површину термичког омотача, па су добијени проценти уштеде енергије оправдани.

Када је у питању удео површине крова у укупној површини термичког омотача зграда, укупне уштеде енергије за грејање и хлађење зграда са зеленим кровом у односу на зграде са конвенционалним кровом су далеко веће за приземне конструкције [228]. Будући да општина Нови Београд има много високих зграда са ограниченим кровним површинама, очекује се да допринос зеленог крова уштеди енергије ових високих зграда у целини не би био велики.

Упркос томе што зелени кров може значајно да смањи топлотно оптерећење крова, утицај на укупну потребну енергију за грејање и хлађење читаве зграде (директни ефекат) није велики за високе зграде. Међутим, треба имати у виду да би ефекат на микроклиму тј. на смањење температуре околног ваздуха и урбано топлотно острво, а самим тим и индиректан утицај на енергетске потребе за грејањем и хлађењем био од већег значаја, уколико би се озелениле веће површине кровова. Ипак, иако допринос зелених кровова уштеди енергије у зградама може бити мали, они су ипак прихватљиви како са енергетског тако и са еколошког аспекта.

На температуру унутрашњег ваздуха односно енергетске потребе за грејање и хлађење директно утиче промена протока топлоте кроз кровну конструкцију. Резултати експерименталних истраживања приказаних у Поглављу 9.1 су показали да се постављањем екстензивног зеленог крова смањују губици топлоте током грејне сезоне и добици топлоте током сезоне хлађења у односу на постојеће стање објекта. Смањење протока топлоте кроз кровну конструкцију има за последицу смањење потребне енергије за одржавање унутрашњих пројектних температура у зимског и летњем периоду односно смањење потребне енергије за грејање и хлађење школског објекта. Важно је напоменути да кров школе има топлотну изолацију од полиуретана дебљине 5 cm, спољашњи зидови имају топлотну изолацију од порофена дебљине 4 cm, као и да школа има велику површину под прозорима, па је из тог разлога добијен мањи проценат уштеде потребне енергије за грејање и хлађење школског објекта. Применом зеленог крова код зграда које немају топлотну изолацију могла би се постићи значајнија уштеда енергије за грејање и хлађење.

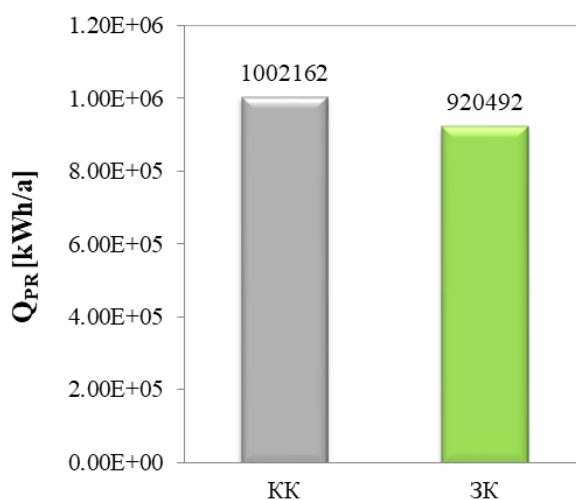
### **9.3 Емисија угљен-диоксида**

Уштеда потребне енергије за грејање и хлађење зграда је значајна како са економског тако и са еколошког аспекта. Емисија угљен-диоксида приликом сагоревања горива у процесима производње електричне и топлотне енергије доприноси загађењу животне средине. Потребна годишња примарна енергија за грејање и хлађење директно је пропорционална потребној финалној енергији за грејање и хлађење школског објекта. Годишња примарна енергија потребна за рад система грејања и хлађења школског објекта одређена је према Правилнику о енергетској ефикасности у зградарству [198], тако што је годишња финална енергија помножена са фактором претварања за одређени енергент. Када је у питању грејање школе, користи се природни гас (фактор 1,1), док се за хлађење користи електрична енергија (фактор 2,5). Потребна годишња примарна енергија за грејање и хлађење школског објекта у постојећем стању са конвенционалним кровом и унапређеном стању са зеленим кровом приказана је у Табели 9.13.

Табела 9.13. Укупна потребна примарна енергија за грејање и хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом

Потребна примарна енергија за грејање школе са конвенционалним кровом $Q_{PR,H}$ КК [kWh/a]	818819
Потребна примарна енергија за грејање школе са зеленим кровом $Q_{PR,H}$ ЗК [kWh/a]	755334
Потребна примарна енергија за хлађење школе са конвенционалним кровом $Q_{PR,C}$ КК [kWh/a]	183343
Потребна примарна енергија за хлађење школе са зеленим кровом $Q_{PR,C}$ ЗК [kWh/a]	165158

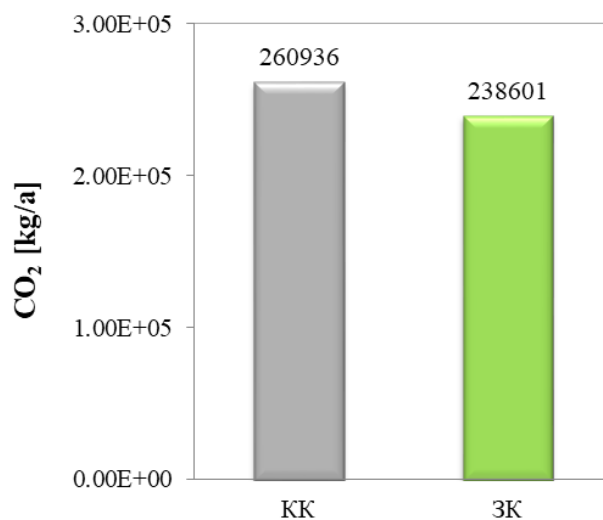
Постављањем зеленог крова на школски објект могу се остварити значајне уштеде потребне годишње примарне енергије за грејање и хлађење. Након санације школе постављањем екстензивног зеленог крова са супстратом минералне вуне било би потребно 8% мање примарне енергије за грејање и хлађење. На Слици 9.34 приказана је потребна примарна енергија за грејање и хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом. Због високог коефицијента конверзије за електричну енергију, примарна енергија за хлађење има већи допринос уштеди енергији код оба модела школског објекта.



Слика 9.34. Укупна потребна примарна енергија за грејање и хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом

Према поменутом правилнику годишња емисија угљен-диоксида је за природни гас 0,20 kg/kWh и 0,53 kg/kWh за електричну енергију. Количина годишње емисије  $CO_2$  услед грејања и хлађења школе са конвенционалним и зеленим кровом приказана је на Слици 9.35. Санацијом кровне конструкције Техничке школе "Нови Београд" постављањем екстензивног зеленог крова са подлогом од минералне вуне може се остварити смањење емисије  $CO_2$  од 22335 kg/a односно 8,6%. Смањење емисије угљен-диоксида директно је пропорционално смањењу потребне финалне енергије за грејање и хлађење школског објекта.





Слика 9.35. Количина годишње емисије CO<sub>2</sub> за грејање и хлађење школе са конвенционалним и зеленим кровом

У еколошком смислу, код посматраног школског објекта већи проблем представља енергија за хлађење него енергија за грејање, због тога што електрична енергија чија је употреба предвиђена за хлађење има већи фактор конверзије из финалне у примарну енергију. Због наведеног разлога смањење потребе енергије за хлађење школског објекта је на првом месту.

## 10. Закључак

Реконструкција постојећег грађевинског фонда у Србији и свету је кључна за постизање постављених циљева декарбонизације сектора зградарства и прилагођавања климатским променама. Зелени кровови су препознати као један од начина за превазилажење ових проблема са којим се бори савремено друштво. Чињеница да Србија има веома мали број зелених кровова и одсуство научних истраживања на ову тему, указује на потребу за локалним експерименталним истраживањима, која би омогућила квантификовање позитивних утицаја примене зелених кровова за наше климатско подручје, допринела унапређењу стандарда зелене градње и утицала на будућа законска решења на локалном и националном нивоу.

Лаки зелени кровови са супстратом од минеране вуне су добро решење за санацију кровова постојећих зграда, које имају ограничен капацитет носивости. Упркос томе, у литератури недостају експериментални подаци о топлотно-изолационом ефекту ове врсте зелених кровова, њиховом утицају на микроклиму и квалитет ваздуха. Већина аутора користи комерцијалне програме за предвиђање понашања зелених кровова, док су експериментална истраживања ретка, временски захтевна и скупа.

Предмет истраживања ове докторске дисертације је утицај зеленог крова са подлогом од минералне вуне најновије генерације, као елемента пасивног дизајна, на енергетску ефикасност школског објекта и квалитет спољашњег ваздуха у градској средини. Поред тога истражен је утицај зеленог крова на температуру локалног спољашњег ваздуха и ефекат хлађења зеленог крова у нашим климатским условима.

Главни циљеви докторске дисертације су да се на основу првих експерименталних података за Србију и кроз примену динамичких симулација термичког понашања зграда квантификује и објасни:

- утицај лаког зеленог крова на вертикални температурни профил и проток топлоте кроз кровну конструкцију,
- потенцијал побољшања топлотно-изолационог ефекта кровних конструкција применом лаког зеленог крова,
- ефекат хлађења зеленог крова са супстратом од минералне вуне у условима умерено континенталне климе,
- утицај лаког зеленог крова на потребну енергију за грејање и хлађење школског објекта,
- утицај зеленог крова на квалитет спољашњег ваздуха у градској средини.

Експериментална истраживања су обухватила мерење вертикалног профила температуре кровне конструкције, топлотног флука кроз кровну конструкцију, температуре спољашњег ваздуха и концентрације PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> на позицији конвенционалног и зеленог крова и метеоролошких параметара, током летњег и зимског периода на локацији Техничке школе "Нови Београд".

У овој докторској дисертацији је представљен један део резултата трогодишњих експерименталних мерења у вези са истраживањем лаког зеленог крова, са циљем да се укаже на главне енергетске и еколошке предности нове генерације зелених кровних система са аспекта уштеде енергије и побољшања квалитета ваздуха. Анализа добијених резултата, указује на вишеструке предности зелених кровова у односу на конвенционалне кровове у погледу повећања енергетске ефикасности зграда и смањења загађења у градским срединама.

Током летњег периода максималне дневне температура кровне конструкције на позицији зеленог крова нису прелазиле 33 °C, док су максималне дневне температуре на позицији конвенционалног крова достигале 50 °C. Зелени кров је током летњег периода смањио просечну дневну температуру спољашње површине кровне конструкције за 11,3%, као и амплитуду температуре спољне површине кровне конструкције за 70%. Слој вегетације има највеће просечне дневне амплитуде температуре од 14,7 °C, па затим следи слој минералне вуне са 10,2 °C и дренажни слој са амплитудом температуре од 9,4 °C.

Зелени кров је смањио провођење топлоте кроз кров за 65% и одложио пренос топлоте за 2 h. Просечна разлика између температуре спољашњег ваздуха на позицији конвенционалног и зеленог крова износи 1,3 °C, док је максимална разлика 7,4 °C, што одговара смањењу температуре од 4,8% и 23,5%. Зелени кров штити кровну конструкцију од директног соларног зрачења, апсорбује топлоту и одлаже провођење топлоте. Кроз евапотранспирацију на зеленом крову долази до губитка латентне топлоте и снижавања температуре околног ваздуха.

Током зимског периода просечна разлика температуре спољашње површине кровне конструкције на позицији зеленог и конвенционалног крова износи 1,2 °C. За месец јануар, средња вредност дневних амплитуда температуре на позицији конвенционалног крова је 5 °C, док је на позицији зеленог крова 1,2 °C, што одговара смањењу амплитуде температуре спољне површине кровне конструкције за 76%. Током зиме, дневне амплитуде температура слојева зеленог крова биле су ниже у односу на амплитуду температуре конвенционалног крова и температуру спољашњег ваздуха.

Слој вегетације је имао највеће дневне амплитуде температуре од 3,2 °C, па затим следи слоја минералне вуне 2,2 °C и дренажни слој 1,8 °C. Зелени кров је током зимског периода смањено губитке топлоте кроз кров за 38% и одложио провођење топлоте за 30 минута у односу на конвенционални кров. Током зиме је просечна разлика температуре ваздуха изнад конвенционалног и зеленог крова је 0,5 °C, док је максимална разлика била 3,8°C.

Вегетација и и други слојеви зеленог крова прекривају површину постојеће кровне конструкције и штите је од директног соларног зрачења. Температуре слојева испод вегетационог слоја су смањене због сенке коју стварају биљке. Кроз процес транспирације биљака и испаравања воде из супстрата, постиже се хлађење околног ваздуха изнад зеленог крова. Ова два механизма смањују температуру површине крова и околног ваздуха. Зелени кровови стварају специфичне микроклиматске услове, који се разликују од услова непосредног окружења у градским срединама.

Већи проценат кровова под зеленилом, осим позитивног утицаја на сам објекат, може да утиче и на смањење урбаног топлотног острва посебно у гушће изграђеним градским срединама. На овај начин зелени кровови поред осталих зелених површина у граду доприносе побољшању микроклиматских услова.

Како би се одредио топлотно-изолациони ефекат зеленог крова и упоредио са конвенционалним кровом израчунати су коефицијенти пролаза топлоте кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова. Процентуална разлика коефицијента пролаза топлоте кровне конструкције на позицији конвенционалног и зеленог крова је 41%, што указује на побољшање топлотно-изолационог ефекта кровне конструкције након додавања зеленог крова.

Зелени кровови са подлогом од минералне вуне и мешавином седума могу значајно допринети ублажавању загађења у градским срединама. Ови резултати могу послужити приликом пројектовања зелених кровова и избора одговарајуће вегетације са циљем смањења загађења ваздуха. Повећање површине под зеленим крововима у густо насељеним градовима може дати значајан допринос побољшању квалитета ваздуха и олакшати прилагођавање урбаног окружења климатским променама.

Прикупљени и обрађени резултати експерименталних мерења представљају обимну базу података за наставак истраживања у области зелених кровова. Експериментални резултати са зеленог и конвенционалног крова и резултати динамичких симулација показују да је зелени кров побољшао топлотне карактеристике крова, смањено добитке топлоте током летњег периода и губитке топлоте током зимског периода. Оправдано је разматрати примену овог типа зелених кровова у урбаним срединама, јер доприносе топлотној изолацији зграде, побољшању квалитета ваздуха и имају ефекат пасивног хлађења током лета доприносећи смањењу негативног утицаја урбаног топлотног острва.

Истраживање утицаја зеленог крова на енергетску ефикасност школског објекта спроведено је коришћењем динамичких симулација на моделу школског објекта у постојећем стању и унапређеном моделу школског објекта применом зеленог крова, уз помоћ програма *DesignBuilder*. За валидацију формираног модела школског објекта у постојећем стању, коришћени су подаци о топлотној енергији, која је испоручена школи током грејне сезоне 2020/2021. године. Остварена је задовољавајућа подударност вредности потребне енергије за грејање добијене из модела и стварне вредности.

Резултати симулација су показали да би се постављањем екстензивног зеленог крова са супстратом од минералне вуне на објекту Техничке школе "Нови Београд" остварила уштеда потребне финалне енергије за грејање од 7,7% и потребне енергије за хлађење од 10%, у односу на постојеће стање објекта. Поред тога санацијом кровне конструкције би се постигло смањење примарне енергије за грејање и хлађење од 8% и у складу са тим смањење емисије CO<sub>2</sub> за 8,6%.

На основу спроведених истраживања можемо закључити да примена лаких зелених кровова са супстратом од минералне вуне може побољшати енергетске карактеристике и енергетску ефикасност зграда. Модел школског објекта, који је формиран у оквиру рада на докторској дисертацији поседује практичну применљивост, с обзиром да може бити примењен приликом пројектовања нових зграда са зеленим кровом и санације постојећих зграда применом зеленог крова, на различитим локацијама како у нашој земљи тако и у свету.

Генерално, резултати ове дисертације сугеришу да је употреба овог типа зелених кровова препоручљива за реновирање постојећих зграда у нашој земљи и као мера смањења загађења и ублажавања климатских промена у пренасељеним градским срединама, у којима постоји недостатак простора за примену других елемената зелене инфраструктуре. Важно је нагласити да је ово прво истраживање овог типа у Србији и региону, које је обухватило поређење два типа кровне конструкције посматране у истом временском периоду, са циљем испитивања утицаја зеленог крова на топлотно-изолациони ефекат кровне конструкције, микроклиму и квалитет спољашњег ваздуха. Поред тога ово је једна од ретких експерименталних студија у свету у вези са лаким зеленим крововима са хидрофилном минералном вуном и вегетацијом коју чини мешавина од чак осам врста седумских биљака.

Бенефити истраживања приказаног у дисертацији су вишеструки, јер оно омогућава евалуацију енергетских и еколошких предности примене зелених кровова за наше климатско поднебље. Сазнања и закључци приказани у докторској дисертацији могу служити:

- као научна основа за разумевање употребе концепта зелених кровова за санацију постојећег грађевинског фонда и пројектовање нових објеката у Србији и свету;
- за доношење одлука од стране градских власти у вези са унапређењем стања постојећег грађевинског фонда применом зелених кровних система, а у циљу прилагођавања Београда на климатске промене и решавања проблема загађења ваздуха;
- за развој стратегија, законске регулативе и политика које заступају примену зелених кровова на локалном и регионалном нивоу;
- за подизање нивоа свести о улози зелених кровова у одрживом развоју урбаних средина;
- као научна аргументација за промоцију и подстицање примене зелених кровова пред грађанима и инвеститорима у Србији,
- као добра научна основа за даља истраживања у области зелене инфраструктуре.

Истраживања у области техничко-технолошких наука треба да буду усмерена ка остваривању циљева одрживог развоја и прилагођавању климатским променама. Правци будућих истраживања у области зелених кровова су разноврсни. Потребно је спровести експериментална истраживања интензивних зелених кровова и традиционалних система екстензивних зелених кровова са супстратом од земље у климатским условима нашег понебља. Могуће уштеде енергије применом зелених кровова различите структуре, дебљине

и састава супстрата, врсте вегетације, итд. могу се одредити и за објекте друге намене и са другачијом структуром кровне конструкције. Правац даљег истраживања може се односити и на испитивање утицаја зелених кровова на проток топлоте кроз кровну конструкцију у прелазним годишњим добима. Када је у питању квалитет ваздуха, потребно је, на различитим локацијама, спровести експериментална истраживања зелених кровова са другим врстама биљака које не припадају породици сукулентата, као и проширити истраживање на друге загађујуће супстанце које нису у овој дисертацији узете у обзир.

Резултати ове докторске дисертације, са посебним нагласком на приказане прве експерименталне резултате зелених кровова за нашу земљу, представљају полазиште за даља истраживања зелених кровова и добру подлогу за успостављање законске регулативе у области њихове примене.

## Литература

- [1] IEA-International Energy Agency, <https://www.iea.org/reports/buildings>
- [2] United Nations Environment Programme, Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector (2020)
- [3] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency
- [4] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC
- [5] Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives
- [6] Републички завод за статистику Србије, Република Србија, <https://www.stat.gov.rs/>
- [7] М. Мухић, Д. Петровић, А. Вучковић, Могућности примене кост-бенефит анализе у пројектима енергетске ефикасности у зградарству, Економске теме 49(2011) 355-378
- [8] N. Cuković Ignjatović, Optimisation of Refurbishment Measures for Residential Buildings in Order to Improve Energy Efficiency, University of Belgrade, Faculty of Architecture, 2016
- [9] Н. Станишић, Макроекономске користи од унапређења енергетске ефикасности у стамбеним зградама у пет локалних самоуправа у Србији, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Септембар 2017
- [10] Дугорочна стратегија за подстицање улагања у обнову националног фонда зграда Републике Србије до 2050. године, Службени гласник РС, бр 27/2022
- [11] М. Jovanović Popović, et al., National Typology of School Buildings in Serbia; University of Belgrade, GIZ: Belgrade, Serbia, 2018
- [12] Lj. Đukanović, D. Ignjatović, N. Ćuković Ignjatović, A. Rajčić, N. Lukić, B. Zeković, Energy Refurbishment of Serbian School Building Stock-A Typology Tool Methodology Development, Sustainability 14(2022) 4074
- [13] Упутство за израду енергетског биланса у општинама, Министарство рударства и енергетике Републике Србије, Београд, 2007
- [14] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit-GIZ, Енергетска ефикасност у зградарству, 2016
- [15] Студија енергетске ефикасности зграда у Србији, Коначни извештај, Светска банка, 2012
- [16] K. Vijayaraghavan, Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends, Renewable and Sustainable Energy Reviews 57(2016) 740-752

- [17] [https://pim.knaufinsulation.com/files/download/04-urbanscape-green-roll-datasheet\\_5c05a25e4df5a.pdf](https://pim.knaufinsulation.com/files/download/04-urbanscape-green-roll-datasheet_5c05a25e4df5a.pdf)
- [18] <https://www.sempergreen.com/en/about-us/news/traditional-versus-lightweight-sedum-roof>
- [19] <https://www.purple-roof.com/post/why-use-mineral-wool-on-green-roofs>
- [20] G.D. Rijck, E. Schrevens, Distribution of nutrients and water in rockwool slabs, *Scientia Horticulturae* 72(1998) 277-285
- [21] <https://land8.com/mineral-wool-is-a-proven-green-roof-technology-for-high-efficiency-stormwater-management/>
- [22] <https://www.coregravel.ca/core-foundations/core-roof/install-guide/>
- [23] <https://www.bmigroup.com/uk/p/canopia-sedum-mat-1817275540/?pathname=%2Fuk%2Ficopal-flat-roofing%2Factive-roofs%2Fgreen-roof%2Fextensive-systems%2F>
- [24] E. Korol, N. Shushunova, Benefits of a Modular Green Roof Technology, *Procedia Engineering* 161(2016) 1820-1826
- [25] <https://rubbersealshop.co.uk/product/green-roof-sedum-tray/>
- [26] <https://designdautore.blogspot.com/2015/02/green-roof-art-school-in-singapore.html#.YXkgGxpBxPY>
- [27] <https://www.greenroofs.com/projects/baltimore-convention-center>
- [28] <http://2030palette.org/green-roof>
- [29] P. Irga, et al., Green Roof & Solar Array-Comparative Research Project Final Report 2020/037855 / EPI R3 201920005, University of technology Sydney, July 2021
- [30] M. Shafique, X. Luo, J. Zuo, Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends, *Solar Energy* 202(2020) 485-497
- [31] <https://www.uts.edu.au/news/tech-design/green-roof-or-solar-both-best>
- [32] <https://www.icbprojects.co.uk/solutions/green-roof-systems/blue-roof-systems>
- [33] <http://www.greenroofs.com/projects/ryerson-urban-farm-formerly-ryes-homegrown/>
- [34] M. Shafique, R. Kim, M. Rafiq, Green roof benefits, opportunities and challenges - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90(2018) 757-773
- [35] D. Dimitrijević Jovanović, D. Kostadinović, P. Živković, D. Randelović, Green living roofs as a part of green infrastructure, *Proceedings of 3rd International Conference on Urban Planning - ICUP*, 12-13.11.2020, Niš, 171-178
- [36] S. Chen, Z. Gou, An Investigation of Green Roof Spatial Distribution and Incentive Policies Using Green Buildings as a Benchmark, *Land* 11(2022) 2067
- [37] P. Bevilacqua, D. Mazzeo, R. Bruno, N. Arcuri, Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area, *Energy and Buildings* 122(2016) 63-79

- [38] M. Santamouris, C. Pavlou, P. Doukas, G. Mihalakakou, A. Synnefa, A. Hatzibiros, P. Patargias, Investigating and analyzing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece, *Energy* 32(2007) 1781-1788
- [39] Percentage of total green infrastructure, green urban areas and tree cover of EEA-38 capital cities, [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/percentage-of-total-green-infrastructure#tab-googlechartid\\_chart\\_11\\_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%7D%3B%22sortFilter%22%3A%5B%22\\_\\_default\\_\\_%22%5D%7D](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/percentage-of-total-green-infrastructure#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%7D%3B%22sortFilter%22%3A%5B%22__default__%22%5D%7D)
- [40] Акциони план за зелени град, Град Београд, Март 2021
- [41] План генералне регулације система зелених површина Београда, Урбанистички завод Београда, 2019
- [42] Попис становништва, домаћинства и станова 2022. године, Национална припадност, Подаци по општинама и градовима, Републички завод за статистику, Београд, 2023
- [43] A. Mitić-Radulović, A. Simić, S. Ljubić, Possibilities to implement ecological index in Belgrade Urban Planning, Center for Experiments and Urban Studies-CEUS, Belgrade, March 2022
- [44] М. Лалошевић, Снижавање температуре ваздуха и концентрације CO<sub>2</sub> у урбаним срединама применом вегетационих кровова, Универзитет у Београду, Машински факултет, 2019
- [45] Генерални урбанистички план Београда, Урбанистички завод Београда, 2021
- [46] Н. Ђокић, М. Грујић, Акциони план адаптације на климатске промене са проценом рањивости, Градска управа града Београда, Секретаријат за заштиту животне средине, Београд, 2015
- [47] World Health Organization-WHO, [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [48] Global Burden of Disease, <http://www.thelancet.com/themed/global-burden-of-disease>
- [49] OECD Environmental Outlook to 2050. The consequences of inaction, Report, 2012
- [50] HEAL Report, Healthy Air Healthier Children, 50 Schools Across the EU Monitor Air Quality, 2009
- [51] World Health Organization, Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution-REVIHAAP, Project Technical Report, 2019
- [52] Air quality plan in the Belgrade agglomeration. The air quality management document on locally level. City Assembly of Belgrade, 2021
- [53] Закон о заштити животне средине, Службени гласник РС, бр. 135/2004, 36/2009, 36/2009 - др. закон, 72/2009 - др. закон, 43/2011 - одлука УС и 14/2016
- [54] Закон о заштити ваздуха, Службени гласник РС, бр. 36/2009 и 10/2013



- [55] И. Грети, Суспендоване и респирабилне честице у урбаним срединама-предавања, Основи хемије атмосфере и загаживачи ваздуха, Универзитет у Београду, Хемијски факултет, 2014, <https://dokumen.tips/documents/suspendovane-i-respirabilne-cestice-u-urbanim-.html?page=1>
- [56] М.В. Јовановић, Хемијски састав и оксидативни потенцијал респирабилних честица у урбаној средини и у индустријском окружењу, Универзитет у Београду, Хемијски факултет, 2020
- [57] Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease. World Health Organization. Report, 2016
- [58] Health impact of ambient air pollution in Serbia: A call to action. WHO Regional Office for Europe, World Health Organization. Report, 2019
- [59] Chapter 4: Baseline Emissions & Air Quality, <https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/ria/riach-04.pdf>
- [60] Програм заштите ваздуха у Републици Србији за период од 2022. до 2030. године са акционим планом, Службени гласник РС, бр. 140/2022
- [61] IPCC, Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2014
- [62] European Environment Agency, Air Quality in Europe- report 2018
- [63] A. Guenther, C. Geron, T. Pierce, B. Lamb, P. Harley, R. Fall, Natural Emissions of Non-Methane Volatile Organic Compounds, Carbon Monoxide, and Oxides of Nitrogen from North America, Atmospheric Environment 34(2000) 2205-2230
- [64] Y. Li, R. Babcock, Green roofs against pollution and climate change-A review, Agronomy for Sustainable Development 34(2014) 695-70
- [65] N. Weyens, S. Thijs, R. Popek, N. Witters, A. Przybysz, J. Espenshade, H. Gawronska, J. Vangronsveld, S.W. Gawronski, The Role of Plant-Microbe Interactions and Their Exploitation for Phytoremediation of Air Pollutants, International Journal of Molecular Sciences 16(2015) 25576-25604
- [66] M. Shahid, C. Dumat, S. Khalid, E. Schreck, T. Xiong, N.K. Niazi, Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake, Journal of Hazardous Materials 325(2017) 36-58
- [67] J. Neil Cape, Plants as Accumulators of Atmospheric Emissions, Developments in Environmental Science 9(2009) 61-98
- [68] S. Petrova, L. Yurukova, I. Velcheva, Possibilities of using deciduous tree species in trace element biomonitoring in an urban area (Plovdiv, Bulgaria), Atmospheric Pollution Research 5(2014) 196-202

- [69] N. Weyens, et al., The Role of Plant–Microbe Interactions and Their Exploitation for Phytoremediation of Air Pollutants, *International Journal of Molecular Sciences* 16(2015) 25576-25604
- [70] E. Schreck, et al., Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: Mechanisms involved for lead, *Science of the Total Environment* 427-428(2012) 253-262
- [71] Y. Song, B.A. Maher, F.Li, X. Wang, X. Sun, H. Zhang, Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution, *Atmospheric Environment* 105(2015) 53-60
- [72] M. Ottel , H.D. van Bohemen, A.L.A. Fraaij, Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls, *Ecological Engineering* 36(2010) 154-162
- [73] N. Weyens, et al., The Role of Plant-Microbe Interactions and Their Exploitation for Phytoremediation of Air Pollutants, *International Journal of Molecular Sciences* 16(2015) 25576-25604
- [74] <http://www.greenroofs.com/projects/>
- [75] <https://www.gsa.gov/governmentwide-initiatives/federal-highperformance-green-buildings/resource-library/integrative-strategies/green-roofs/green-roof-tracker>
- [76] <https://data.sfgov.org/Housing-and-Buildings/Green-Roofs-in-San-Francisco/x83m-rafs>
- [77] P. Kruche, D. Althaus, I. Gabriel, B. Okologisches, Herausgegeben vom Umweltbundesamt, Wiesbaden und Berlin Bauverlag, 1982
- [78] M. Maiolo, B. Pirouz, R. Bruno, S.A. Palermo, N. Arcuri, P. Piro, The role of the extensive green roofs on decreasing building energy consumption in the mediterranean climate, *Sustainability*, 12(2020) 359
- [79] A. Teemusk,  . Mander, Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems, *Ecological Engineering* 36(2010) 91-95
- [80] P. Cesar Tabares-Velasco, J. Srebric, The Role of Plants in the Reduction of Heat Flux through Green Roofs: Laboratory Experiments, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Transactions 115(2009)
- [81] J.T. Lundholm, B.M. Weddle, J.S. MacIvor, Snow depth and vegetation type affect green roof thermal performance in winter, *Energy and Buildings* 84(2014) 299-307
- [82] I. Jaffal, S.-E. Ouldboukhitine, R. Belarbi, A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance, *Renewable Energy* 43(2012) 157-164
- [83] C.Y. Jim, Heat-sink effect and indoor warming imposed by tropical extensive green roof, *Ecological Engineering* 62(2014) 1-12
- [84] Y-Y. Huang, T-J. Maa, Y-S. Wang, C-K. Wang, The application of non-Crassulacean acid metabolism edible plant and lightweight expanded clay aggregate to achieve joint benefits of thermal insulation mitigation and passive cooling strengthening of extensive green roofs in subtropical regions, *Solar Energy* 201(2020) 944-964

- [85] M. Foustalieraki, M.N. Assimakopoulos, M. Santamouris, H. Pangalou, Energy performance of a medium scale green roof system installed on a commercial building using numerical and experimental data recorded during the cold period of the year, *Energy and Buildings* 135(2017) 33-38
- [86] A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, *Energy and Buildings* 33(2001) 719-729
- [87] C.Y. Jim, Lilliana L.H. Peng, Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof, *Urban Forestry and Urban Greening* 11(2012) 73-85
- [88] A.S. Mahmoud, M. Asif., M.A. Hassanain, M.O. Babsail, M.O. Sanni-Anibire, Energy and Economic Evaluation of Green Roofs for Residential Buildings in Hot-Humid Climates, *Buildings* 7(2017) 30
- [89] L.F.M. Francis, M.B. Jensen, Benefits of green roofs: a systematic review of the evidence for three ecosystem services, *Urban For. Urban Forestry and Urban Greening* 28(2017) 167-176
- [90] C. Jim, S. Tsang. Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof *Building and Environment* 46(2011) 1263-1274
- [91] E. Eumorfopoulou, D. Aravantinos, The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece, *Energy and Buildings* 27(1998) 29-36
- [92] T.G. Theodosiou, Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique, *Energy and Buildings* 35(2003) 909-917
- [93] N.H. Wong, D.K.W. Cheong, H. Yan, J. Soh, C.L. Ong, A. Sia, The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore, *Energy and Buildings* 35(2003) 353-364
- [94] H.J. Moon, K.A. An, S.W. Han, Energy Saving Effects of Green Roof in Existing Buildings with Low Insulation Levels, *IBPSA Asia Conference in, Nagoya, Japan, 28-29 November 2014*
- [95] C. Feng, Q. Meng, Y. Zhang, Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs, *Energy and Buildings* 42(2010) 959-965
- [96] A. Nardini, S. Andri, M. Crasso, Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: shrubs versus herbaceous plants, *Urban Ecosystems* 15(2012) 697-708
- [97] L. L.H. Peng, X. Yang, Y. He, Z. Hu, T. Xu, Z. Jiang, L. Yao, Thermal and energy performance of two distinct green roofs: Temporal pattern and underlying factors in a subtropical climate, *Energy and Buildings* 185(2019) 247-258
- [98] S. Vera, C. Pinto, P. C. Tabares-Velasco, W. Bustamante, F. Victorero, J. Gironás, C.A. Bonilla, Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates, *Energy and Buildings* 146(2017) 312-321

- [99] S. Vera, C. Pinto, F. Victorero, W. Bustamante, C. Bonilla, J. Gironás, V. Rojas, Influence of plant and substrate characteristics of vegetated roofs on a supermarket energy performance located in a semiarid climate, *Energy Procedia* 78(2015) 1171-1176
- [100] S.W. Tsang, C.Y. Jim, Theoretical evaluation of thermal and energy performance of tropical green roofs, *Energy* 36 (2011) 3590-3598
- [101] Ciril Arkar, Suzana Domjan, Sašo Medved, Heat transfer in a lightweight extensive green roof under water-freezing conditions, *Energy and Buildings* 167(2018) 187-199
- [102] Y. Jim, S.W. Tsang, Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs, *Energy and Buildings* 43(2011) 1341-1350
- [103] T.G. Theodosiou, Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique, *Energy and Buildings* 35(2003) 909-917
- [104] L. H. Peng, C. Y. Jim, Seasonal and Diurnal Thermal Performance of a Subtropical Extensive Green Roof: The Impacts of Background Weather Parameters, *Sustainability* 7(2015) 11098-11113
- [105] Y. He, H. Yu, N. Dong, H. Ye, Thermal and energy performance assessment of extensive green roof in summer: A case study of a lightweight building in Shanghai, *Energy and Buildings* 12(2016) 762-773
- [106] L.L.H. Peng, X. Yang, Y. He, Z. Hu, T. Xu, Z. Jiang, L. Yao, Thermal and energy performance of two distinct green roofs: Temporal pattern and underlying factors in a subtropical climate, *Energy and Buildings* 185(2019) 247-258
- [107] D. Suszanowicz, A. Kolasa Więcek, The Impact of Green Roofs on the Parameters of the Environment in Urban Areas-Review, *Atmosphere* 10(2019) 792
- [108] Тијана Црнчевић, Мирјана Секулић, Зелени кровови у контексту климатских промена - преглед нових искустава, *Архитектура и урбанизам* 36(2012) 56-67
- [109] R. Arabi, M. F. Shahidan, M.S.M. Kamal, M.F.Z.B Jaafar, M. Rakhshandehroo, Mitigating Urban Heat Island through Green Roofs, *Special Issue of Current World Environment* 10(2015)
- [110] M. Santamouris, Cooling the cities-A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments, *Solar Energy* 103(2014) 682-703
- [111] M. F. Shahidan, P. J. Jones, J. Gwilliam, E. Salleh, An evaluation of outdoor and building environment cooling achieved through combination modification of trees with ground materials, *Building and Environment* 58(2012) 245-257
- [112] J. Yanga, et.al., Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate, *Solar Energy* 173(2018) 597-609
- [113] N.H. Wong, Y. Chen, C.L. Ong, A. Sia, Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment, *Building and Environment* 38(2003) 261-270
- [114] A. Solcerova, F. Ven, M. Wang, M. Rijdsdijk, N. Giesen, Do green roofs cool the air?, *Building and Environment* 111(2017) 249-255

- [115] M. Moghbel, R. Erfanian Salim, Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO<sub>2</sub> content, *Urban Climate* 20(2017) 46-58
- [116] H.Tan, R.Kotamarthi, J. Wang, Y. Qian, T.C. Chakraborty, Impact of different roofing mitigation strategies on near-surface temperature and energy consumption over the Chicago metropolitan area during a heatwave event, *Science of The Total Environment* 860(2023) 160508
- [117] A. Sharma, P. Conry, H.J.S. Fernando, F.H. Alan, J.J. Hellmann, F. Chen, Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: evaluation with a regional climate model, *Environmental Research Letters* 11(2016) 064004
- [118] M. Georgescu, P.E. Morefield, B.G. Bierwagen, C.P. Weaver, Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111(2014) 2909-2914
- [119] X. Zheng, F. Kong, H. Yin, A. Middel, H. Liu, D. Wang, T.Sun, I. Lensky, Outdoor thermal performance of green roofs across multiple time scales: A case study in subtropical China, *Sustainable Cities and Society* 70(2021) 102909
- [120] C. Rosenzweig, G. Stuart, P. Lily, Green roofs in the New York Metropolitan Region Report to Columbia University Center for climate systems research. New York: NASA Goddard Institute for Space Studies, 2006
- [121] J. Park, Y. Shin, S. Kim, S-W. Lee, K. An, Efficient Plant Types and Coverage Rates for Optimal Green Roof to Reduce Urban Heat Island Effect, *Sustainability* 14(2022) 2146
- [122] E. Jamei, H. W. Chau, M. Seyedmahmoudian, A. Stojcevski, Review on the cooling potential of green roofs in different climates, *Science of The Total Environment* 91(2021) 148407
- [123] C.Y. Jim, Lilliana L.H. Peng, Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof, *Ecological Engineering* 47(2012) 9-23
- [124] D. Suszanowicz, AK. Wiecek, The Impact of Green Roofs on the Parameters of the Environment in Urban Areas-A review, *Atmosphere* 10(2019) 1-17
- [125] M. Viecco, S. Vera, H. Jorquera, W. Bustamante, J. Gironás, C. Dobbs and E. Leiva, Potential of Particle Matter Dry Deposition on Green Roofs and Living Walls Vegetation for Mitigating Urban Atmospheric Pollution in Semiarid Climates, *Sustainability* 10(2018) 2431
- [126] K. Getter, D Rowe, G. Robertson, B. Cregg , J. Andresen, Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science Technology* 43(2009) 7564-7570
- [127] J. Yang, Q. Yu, P. Gong, Quantifying Air Pollution Removal by Green Roofs in Chicago, *Atmospheric Environment* 42(2008) 7266-7273
- [128] M.R. Seyedabadi, U. Eicker, S. Karimi, Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint, *Environmental Challenges* 4(2021) 100119
- [129] X. Zhang, et al., Effect of Dust Capturing of Residential Greenland in Beijing, *Journal of Beijing University of Agriculture* 19(1997) 12-7

- [130] A.F. Speak, J.J. Rothwell, S.J. Lindley, C.L. Smith, Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city, *Atmospheric Environment* 61(2012) 283-293
- [131] B.A. Currie, B. Bass, Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model, *Urban Ecosystems* 11(2008) 409-422
- [132] S. Rafee, L.P. Correia, A. Ascenso, B. Augusto, D. Lopes, A.I. Miranda, Are green roofs the path to clean air and low carbon cities?, *Science of the Total Environment* 798(2021) 149313
- [133] D. Bradley Rowe, Green roofs as a means of pollution abatement, *Environmental Pollution* 159(2011) 2100-2110
- [134] L. Chen, C. Liu, R. Zou, M. Yang, Z. Zhang, Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment, *Environmental Pollution* 208(2016) 198-208
- [135] A.F. Speak, J.J. Rothwell, S.J. Lindley, C.L. Smith, Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city, *Atmospheric Environment* 61(2012) 283-293
- [136] I. Papaioannou, *Vegetated Facades as Environmental Control Systems Filtering Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) for Improving Indoor Air Quality*, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA, 2013
- [137] E. Stapleton, P. Ruiz-Rudolph, The potential for indoor ultrafine particle reduction using vegetation under laboratory conditions, *Indoor and Built Environment* 27(2016) 70-83
- [138] Y. Arbid, Impact of green roof plants on the removal of air pollutants (NO<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) and on the photochemical fate of Pesticides, *Analytical chemistry*, Université Clermont Auvergne, 2021
- [139] P.Y. Tan, A. Sia, A Pilot Green Roof Research Project in Singapore, *Proceedings of 3rd North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Washington, May 4-6, 2005
- [140] M. Moghbel, R. Erfanian Salim, Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO<sub>2</sub> content, *Urban Climate* 20(2017) 46-58
- [141] L. Blank, A. Vasl, S. Levy, G. Grant, G. Kadas, A. Dafni, L. Blaustein, Directions in green roof research: a bibliometric study, *Building and Environment* 66(2013) 23-28
- [142] L. Qiu, F. Liu, X. Zhang, T. Gao, The Reducing Effect of Green Spaces with Different Vegetation Structure on Atmospheric Particulate Matter Concentration in BaoJi City, China, *Atmosphere* 9(2018) 332
- [143] Z. Zhu, Y. Qiao, Q. Liu, C. Lin, E. Dang, W. Fu, G. Wang, J. Dong, The impact of meteorological conditions on Air Quality Index under different urbanization gradients: a case from Taipei, *Environment, Development and Sustainability* 23(2021) 3994-4010
- [144] D. Randelović, M. Vasov, S. Jelena, A. Ćurčić, Application of green roof as a model for improving the energy performance of elementary schools, *V International Symposium for Students of Doctoral Studies in the Fields of Civil Engineering, Architecture and Environmental Protection PHIDAC*, October 2019, Niš, Serbia

[145] А. Вукадиновић, Ј. Радосављевић, А. Ђорђевић, Н. Петровић, Утицај примене зеленог крова на енергетска својства индивидуалног стамбеног објекта са стакленом верандом, Техника 76(2021) 281-287

[146] Snežana Dragičević, Milan Marjanović, Brankica Šutić, Dynamic simulations of thermal behavior of conventional and green roofs, 10th International Scientific Conference Science and Higher Education in Function of Sustainable Development, 6-7 October 2017, Serbia

[147] С. Исаковић, Унапређење енергетске ефикасности применом зеленог крова на стамбеној згради у Улици краља Милана бр. 29 у Београду, специјалистички рад, Грађевински факултет, Универзитет у Београду, 2018

[148] D. G. Dimitrijević, P. M. Živković, M. M. Stoiljković, M. N. Todorović, S. Ž. Spasić-Đorđević, Green living roof implementation and influences of the soil layer on its properties, Thermal Science 20(2016) 1511-1520

[149] М. Стаменић, Развој интегративног модела конструкцијског унапређења постојећих објеката за примену концепта зелених кровова, докторска дисертација, Грађевинско архитектонски факултет, Универзитет у Нишу, 2019

[150] К. Т. Ђорђевић, О. Д. Јоксимовић, М. Ђ. Јовановић Поповић, Energy Consumption and CO<sub>2</sub> emission reduction through refurbishment of residential buildings roofs by applying the green roof system- Case Study, Thermal Science 22(2018) 1217-1229

[151] З. Петровић, С. Ђорић, С. Исаковић, С. Стошић, Предности уградње зелених кровова на зградама са равним крововима, Конгрес Друштва грађевинских конструктера Србије 46(2022) 600-607

[152] Први резултати пописа становништва, домаћинства и станова у Републици Србији, Републички завод за статистику, Београд 2022

[153] Годишњи извештај о стању квалитета ваздуха у Републици Србији за 2021. годину, Агенција за заштиту животне средине, <http://www.sepa.gov.rs/index.php?menu=5000&id=1304&akcija=showDocuments&tema=Vazduh>

[154] R. Djedjiga, E. Bozonnet, R. Belarbi, Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program, Energy and Buildings 86(2015) 93-103

[155] TRNSYS, a Transient Sistem Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 1975

[156] D.J. Sailor, A green roof model for building energy simulation programs, Energy and Buildings 40(2008) 1466-1478

[157] EnergyPlus, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Berkeley, CA (United States), U.S. Department of Energy

[158] R.H. Henninger, M.J. Witte, EnergyPlus Testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST), Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, California, June 2004

- [159] DesignBuilder. DesignBuilder Software Ltd., <http://www.designbuilder.co.uk>
- [160] A. Decruz. Development and integration of a green roof model within whole building energy simulation, University of Nottingham, UK, 2016
- [161] S. Ray, L. Glicksman, Potential energy savings of various roof technologies, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference, Clearwater Beach, FL, ASHRAE, 2010
- [162] M. Bruse, Assessing thermal comfort in urban environments using an integrated dynamic microscale biometeorological model system, Third Symposium on the Urban Environment, August 2000, 159-160
- [163] M. Baković, O. Gocer, ENVI met modeling of green roof effects on microclimate and outdoor thermal comfort, The 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems-SDEWES, Croatia, 2017
- [164] T.E. Morakinyo, K.W.D. Kalani. C. Dahanayake, E. Ng, C.L. Chow, Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study, *Energy and Buildings* 145(2017) 226-237
- [165] L.F.Krebs, E. Johansson, Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil-A study coupling outdoor and indoor thermal simulations, *Energy and Buildings* 241(2021) 110963
- [166] J. Li, B. Zheng, K.B. Bedra, Z. Li, X. Chen, Evaluating the Effect of Window-to-Wall Ratios on Cooling-Energy Demand on a Typical Summer Day, *International Journal of Environment Research and Public Health* 18(2021) 8411
- [167] G.Battista, E. M.Pastore, L. Mauri, C. Basilicata, Green Roof Effects in a Case Study of Rome (Italy), *Energy Procedia* 101(2016) 1058-1063
- [168] A. Aboelata, Assessment of green roof benefits on buildings' energy-saving by cooling outdoor spaces in different urban densities in arid cities, *Energy* 219(2021) 119514
- [169] M. Fahmy, S. Sharples, Urban form, thermal comfort and building CO<sub>2</sub> emissions-A numerical analysis in Cairo, *Building Services Engineering Research and Technology* 32(2011) 73-84
- [170] C. S. de Munck, A. Lemonsu, R. Bouzouidja, V. Masson, R. Claverie, The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB, *Geoscientific Model Development* 6(2013) 1941-1960
- [171] V. Masson, A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Boundarylayer meteorology* 94(2000) 357-397
- [172] D. Raes, A. Timmerman, M. Hermy, J. Mentens, GreenRoof-water balance model. K.U.Leuven University, Faculty of Bioscience Engineering, Division of Soil and Water Management, Leuven, Belgium, 2006



- [173] S.R. Gaffin, et al. Energy balance modeling applied to a comparison of green and white roof cooling efficiency, Third annual international greening rooftops for sustainable communities, Research report (Health Effects Institute), 2005
- [174] S. Ouldboukhitine, R. Belarbi, Impact of green roof in building energy performance: Experimental and numerical study, First International Conference on Bio-based Building Materials, June 22nd - 24th 2015, Clermont-Ferrand, France, AJCE - Special Issue, 33 (2015) 654-660
- [175] M.A. Polo-Labarrios, Comparison of thermal performance between green roofs and conventional roofs, Case Studies in Thermal Engineering 21(2020) 100697
- [176] R. Djedjig, S.-E.Ouldboukhitine, R. Belarbi, E. Bozonnet, Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs, International Communications in Heat and Mass Transfer 39(2012) 752-761
- [177] R.M. Lazzarin, F. Castellotti, F. Busato, Experimental measurements and numerical modelling of a green roof, Energy and Buildings 37(2005) 1260-1267
- [178] E. Alexandri, P. Jones, Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results, Building and Environment 42(2007) 2835-2949
- [179] P.C.Tabares-Velasco, Predictive heat and mass transfer model of plant-based roofing materials for assessment of energy savings, The Pennsylvania State University, The Graduate School Department of Architectural Engineering, December 2009
- [180] S-E. Ouldboukhitine, B. Rafik, D.J. Sailor, Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings, Applied Energy 114(2014) 273-282
- [181] M. Mungur, et al., A numerical and experimental investigation of the effectiveness of green roofs in tropical environments: The case study of Mauritius in mid and late winter, Energy 202(2020) 117608
- [182] X. Zhou, T. Hong, D. Yan, Comparison of Building Energy Modeling Programs: HVAC Systems, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-6432E, August 2013
- [183] D. Zhu, T. Hong, D. Yan, C. Wang, Comparison of Building Energy Modeling Programs: Building Loads, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-6034E, June 2012
- [184] A. Ávila-Hernández, E. SimáaJ.Xamán, I. Hernández-Pérez, E. Téllez-Velázquez, M.A. Chagolla-Aranda, Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico, Energy and Buildings 209(2020) 109709
- [185] ANSI/ASHRAE Standard 140-2004 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests DesignBuilder Version 1.2.0 (incorporating EnergyPlus version 1.3.0), June 2006
- [186] A. Ragab, A. Abdelrady, Impact of green roofs on energy demand for cooling in Egyptian buildings, Sustainability 12(2020) 5729









- [187] Dž. Kadrić, A. Aganovic, E. Kadrić, B. Delalić-Gurda, S. Jackson, Applying the response surface methodology to predict the energy retrofit performance of the TABULA residential building stock, *Journal of Building Engineering* 61(2022) 105307
- [188] B. Li, Use of Building Energy Simulation Software in Early-Stage of Design Process  
Användning av energisimuleringsprogram i tidiga skeden av byggprocessen, EXAMENSARBETE INOM SAMHÄLLSBYGGNAD, AVANCERAD NIVÅ, 30 HP STOCKHOLM, SVERIGE, 2017
- [189] S. Frankenstein, G. Koenig, FASST Vegetation Models; US Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA, 2004
- [190] R.E. Dickinson, A. Henderson-Sellers, P.J. Kennedy, and M.F. Wilson, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR community climate model. NCAR Technical Note, TN-275+STR, 1986
- [191] P.J. Sellers, Y. Mintz, Y.C. Sud, A. Dalcher, A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Science* 43(1986) 505-532
- [192] R.M., Varghese, S. Amalan Sigmund Kaushik, Thermal Performance of Green Roof and Conventional Roof in the Warm Humid Climate of India, *Ergonomics for Design and Innovation, Humanizing Work and Work Environment: Proceedings of HWWE 2021*, 689-703
- [193] Autodesk Revit. Autodesk, Inc., <https://www.autodesk.com/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- [194] H. M. Elnabawi, Building Information Modeling-Based Building Energy Modeling: Investigation of Interoperability and Simulation Results, *Frontiers in Built Environment* 6(2020)
- [195] S. Kota, J. S. Haberl, M. J. Clayton, W. Yan, Building Information Modeling (BIM)-based daylighting simulation and analysis, *Energy and Buildings* 81(2014) 391-403
- [196] М. Јовановић Поповић, Д. Игњатовић, А. Рајчић, Љ. Ђукановић, Н. Ђуковић Игњатовић, М. Недић, Б. Зековић, Б. Живковић, А. Сретеновић, Д. Котур, Ж. Ђуришић, Национална типологија школских зграда Србије, GIZ - Deutsche Gesellschaft fur internationale Zusammenarbeit, Београд, 2018
- [197] ISO 9869-1:2014, Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method
- [198] Правилник о енергетској ефикасности зграда, Службени гласник РС, бр. 61/2011
- [199] E.M. Khotbehsara, A.B. Daemei, F.A. Malekjahan, Simulation study of the eco green roof in order to reduce heat transfer in four different climatic zones, *Results in Engineering* 2(2019) 100010
- [200] F. Bazzocchi, C. Ciacci, V.Di Naso, A. Rocchetti, NZEB schools: global sensitivity analysis to optimize design features of school buildings, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 296(1), 012043, July 2019
- [201] S. Mukherjee, A parametric study of the thermal performance of green roofs in different climates through energy modeling, University of Southern California, 2013




- [202] S. Cascone, F. Catania, A. Gagliano, G. Sciuto, A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings, *Building and Environment* 136(2018) 227-239
- [203] A. Gagliano, M. Detommaso, F. Nocera, F. Patania, S. Aneli, 6th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-14 The retrofit of existing buildings through the exploitation of the green roofs - a simulation study, *Energy Procedia* 62(2014) 52-61
- [204] K. Gobakis, D. Kolokotsa, Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality, *Energy and Buildings* 157(2017) 101-115
- [205] American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Guideline 14-2014, Measurement of Energy and Demand Savings; Technical Report; American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA, 2014
- [206] Efficiency Valuation Organization. International Performance Measurement and Verification Protocol: Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings, Volume I; Technical Report; Efficiency Valuation Organization: Washington, DC, USA, 2012
- [207] M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts; Version 4.0, Technical Report; U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program: Washington, DC, USA, November 2015
- [208] S. D'Oca, T. Hong, Data-Mining Approach to Discover Patterns of Window Opening and Closing Behavior in Offices, *Building and Environment* 82(2014) 726-739
- [209] R. Andersen, V. Fabi, J. Toftum, S.P. Corgnati, B.W. Olesen, Window opening behaviour modelled from measurements in Danish dwellings, *Building and Environment* 69 (2013) 101-113
- [210] G.Y. Yun, H. Kim, J.T. Kim, Effects of occupancy and lighting use patterns on lighting energy consumption, *Energy and Buildings* 46(2012) 152-158
- [211] A.L. Pisello, V.L. Castaldo, J.E. Taylor, F. Cotana, The impact of natural ventilation on building energy requirement at inter-building scale, *Energy and Buildings* 127(2016) 870-883
- [212] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel, World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift* 15(2006) 259-263
- [213] Републички хидрометеоролошки завод Србије, <https://www.hidmet.gov.rs/>
- [214] H. Griffiths, J. Males, Succulent plants, *Current Biology* 27 (2017) 890-896
- [215] F.J. Castillo, Antioxidative protection in the inducible CAM plant *Sedum album* L. following the imposition of severe water stress and recovery, *Oecologia* 107(1996) 469-477
- [216] Б. М. Стевановић, М. М. Јанковић, Екологија биљака са основима физиолошке екологије биљака, NNK international, Београд, 2014
- [217] J.J. Cao, S. Hu, Q. Dong, L.J. Liu, Z.L. Wang, Green roof cooling contributed by plant species with different photosynthetic strategies, *Energy and Buildings* 195(2019) 45-50
- [218] S. Cascone, J. Coma, A. Gagliano, G. Pérez, The evapotranspiration process in green roofs: A review, *Building and Environment* 147(2019) 337-355

- [219] WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide (2021) World Health Organization
- [220] K. Sobieraj, S. Stegenta-Dąbrowska, G. Luo, J.A. Kozielm, A. Białowiec, Carbon Monoxide Fate in the Environment as an Inspiration For Biorefinery Industry: A Review, *Frontiers in Environment Science* 10(2022)
- [221] M. Kluge, A. Crassulacean Acid Metabolism (CAM): CO<sub>2</sub> and Water Economy, *Water and Plant Life, Ecological Studies* 19(1976) 313-322
- [222] H.Agra, T. Klein, A. Vasl, H. Shalom, G. Kadas, L. Blaustein, Short Communication Sedum-dominated green-roofs in a semi-arid region increase CO<sub>2</sub> concentrations during the dry season, *Science of The Total Environment* 584-585(2017) 1147-1151
- [223] M. Schuber, M. Kluge, In situ studies on crassulacean acid metabolism in *Sedum acre* L. and *Sedum mite* Gil. *Oecologia* 50(1981) 82-87
- [224] S. Gourdjji, Review of plants to mitigate particulate matter, ozone as well as nitrogen dioxide air pollutants and applicable recommendations for green roofs in Montreal, Quebec, *Environmental Pollution* 241(2018) 378-387
- [225] A.C. Fitzky, H. Sandén, T. Karl, S. Fares, C. Calfapietra, R. Grote, A. Saunier, B. Rewald, The Interplay Between Ozone and Urban Vegetation-BVOC Emissions, Ozone Deposition, and Tree Ecophysiology, *Frontiers in Forests and Global Change* 2(2019)
- [226] E.I. Tolis, et al., Chemical characterization of particulate matter (PM) and source apportionment study during winter and summer period for the city of Kozani, Greece, *Central European Journal of Chemistry* 12(2014) 643-651
- [227] Упуство за израду енергетског биланса у општинама, Министарство рударства и енергетике Републике Србије, Београд 2007, <http://arhiva.mre.gov.rs/doc/efikasnost-izvori/03%20Uputstvo%20za%20izradu%20energetskih%20bilansa%20u%20opstinama.pdf>
- [228] R. Martens, B. Bass, S. Saiz Alcazar, Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance, *Urban Ecosystems* 11(2008) 399-408

## Прилог А

### Списак коришћених мерних инструмената и сензора

Слика инструмента	Назив	Мерни параметри	Опсег мерења	Грешка мерења
	Флуксметар Testo	Топлотни флукс	-2000 до +2000 W/m <sup>2</sup>	± 3%
	Термопар типа К	Температура	-200 °C до +1300 °C	±1 °C
	PMS3003	Концентрација PM1, PM2.5, PM10	0,3 до 1 μm 1 до 2,5 μm 2,5 до 10 μm	±10%
	TGS5042	Концентрација CO	0 до 10000 ppm	+5%
	MH-Z19B	Концентрација CO <sub>2</sub>	0 до 5000 ppm	± 50 ppm
	MQ131	Концентрација O <sub>3</sub>	10 до 1000 ppb	–
	MICS4514	Концентрација NO <sub>2</sub>	0 до 1000 ppb	–
	Sincere Company Store AM2322	Температура и релативна влажност	-40 °C до 80 °C 0 до 100% RH	±0,3 °C ±2% RH

	Пирхелиометар Hukseflux LP02	Интензитет соларног зрачења	0 до 2000 W/m <sup>2</sup>	±10 W/m <sup>2</sup>
	Анемометар Smarty planet SPR100-01	Брзина ветра	0 до 30 m/s	±0,5 m/s
	Аквизициони систем Keithley DAQ 6510	–	–	–

## БИОГРАФИЈА АУТОРА

Данка М. Костадиновић рођена је 18. маја 1988. године у Београду, Србија. Основну школу похађала је у Београду, након чега је завршила средњу Политехничку школу у Београду, смер машински техничар за компјутерско конструисање и програмирање. Машински факултет Универзитета у Београду уписала је школске 2007/2008. године. Основне академске студије завршила је 2011. године, а дипломске академске студије 2014. године на смеру Инжењерство биотехничких система одбраном дипломског рада под називом "Пројектовање соларне сушаре за дрво са уређајем за сагоревање биомасе" и стекла звање мастер инжењер машинства. Докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписала је школске 2015/2016. године. Од маја 2015. године запослена је у Лабораторији за термотехнику и енергетику, Института за нуклеарне науке "Винча"-Института од националног значаја за Републику Србију, где је стекла звање истраживач сарадник.

Учествовала је на националном пројекту 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 (2015-2019)". Њен истраживачки рад се фокусира на потенцијал уштеде енергије у сектору зградарства, примену обновљивих извора енергије и заштиту животне средине. Поред истраживачког рада бави се моделовањем енергетски ефикасних зграда и израдом елабората енергетске ефикасности зграда и енергетских пасоша.

Објавила је 22 рада која су публикована у међународним и домаћим часописима или су презентовани на стручним скуповима у земљи и иностранству. Добила је награду за треће место за најбољи научни рад на међународној конференцији "*South East Europe Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*" одржаној 2022. године у Албанији. Стекла је знања на додатним обукама:

- PhD курс *EnergyPLAN-Advanced Analysis of Smart Energy Systems, Aalborg* Универзитет у Данској, Април-Мај 2021. године
- *Locomotion Summer School*, Дубровник, Хрватска, Септембар 2022. године

Завршила је обуке за коришћење *REVIT Architecture* и *REVIT MEP* софтверског пакета, *DesignBuilder Detailed HVAC* и *DesignBuilder Optimisation* модула. Члан је *ASHRAE* Студентског огранка при Универзитету у Београду. Учествовала је у локалном организационом одбору прве међународне конференције "*International Conference on Buildings, Energy, Systems and Technology-BEST*", одржаној 2016. године у Београду. Говори енглески и шпански језик, а служи се немачким језиком.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Данка Костадиновић  
Број индекса Д04/15

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Утицај зеленог крова на енергетске карактеристике и енергетску ефикасност школске зграде  
као савремени приступ у проналажењу одрживих решења

- 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.

У Београду, 12.4.2023.

Потпис аутора

---



## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Данка Костадиновић

Број индекса Д04/15

Студијски програм Докторске студије

Наслов рада Утицај зеленог крова на енергетске карактеристике и енергетску ефикасност школске зграде као савремени приступ у проналажењу одрживих решења

Ментор проф др. Маја Тодоровић

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.

У Београду, 12.4.2023.

**Потпис аутора**

---

## Изјава о коришћењу

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

Утицај зеленог крова на енергетске карактеристике и енергетску ефикасност школске зграде као савремени приступ у проналажењу одрживих решења

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).

У Београду, 12.4.2023.

**Потпис аутора**

---

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.