

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Душан М. Игњатовић

ОЦЕНА ЕНЕРГЕТСКИХ
ПЕРФОРМАНСИ ОМОТАЧА
СТАМБЕНИХ ЗГРАДА МЕТОДОМ
ТЕРМОВИЗИЈСКОГ СНИМАЊА

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Београд 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ARCHITECTURE

Dušan Ignjatović

ESTIMATION OF RESIDENTIAL
BUILDING ENVELOPES' ENERGY
PERFORMANCE USING THE INFRARED
THERMOGRAPHY METHOD

DOCTORAL DISSERTATION

Belgrade 2015.

МЕНТОР:

Проф. др Милица Јовановић Поповић, редовни професор
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

Проф др Бранислав Живковић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Проф. др Ана Радивојевић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

Доц. др Александар Рајчић, доцент
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

Датум одбране докторске дисертације:

ОЦЕНА ЕНЕРГЕТСКИХ ПЕРФОРМАНСИ ОМОТАЧА СТАМБЕНИХ ЗГРАДА МЕТОДОМ ТЕРМОВИЗИЈСКОГ СНИМАЊА

Резиме:

Енергетске перформансе зграда представљају резултат утицаја више различитих фактора током њиховог животног века: од закона и прописа према којима су пројектоване и грађене, преко квалитета извођења и употребљених материјала па све до одржавања, односно евентуалних унапређења. У циљу формирања стратегија газдовања грађевинским фондом базираних на постулатима одрживог развоја и енергетске ефикасности неопходно је испитати стање и, нарочито, утврдити реалне енергетске карактеристике зграда.

Предмет докторске дисертације представља истраживање структуре и енергетских перформанси омотача вишепородичних стамбених зграда Србије изграђених у периоду после Другог светског рата. Полазиште рада представља анализа материјално конструктивних карактеристика зграда као и регулативе релевантне за ову област уз установљење одговарајуће периодизације. За сваки дефинисани период утврђени су карактеристични фасадни склопови који су детаљно истраживани проучавањем техничке документације, прорачунавањем енергетских перформанси и истраживањем на терену применом методе термовизијског снимања.

Специфичности коришћене методе су детаљно истражене и описане како на теоретском тако и на практичном плану. Идентификовани су релевантни утицајни фактори, могућности примене у архитектури и назначена ограничења са објашњењима најчешћих грешака и неодговарајућих тумачења. У циљу правилне примене методе дефинисане су процедуре и дате одговарајуће препоруке.

Истраживање енергетских перформанси је остварено прорачуном релевантних параметара на основу важеће законске регулативе, применом симулационих метода и термовизијским снимањем. Извршена је компарација добијених резултата уз одговарајући коментар и формиран је каталог карактеристичних случајева.

Кључне речи: Енергетска ефикасност, термовизијско снимање, омотач, оцена перформанси

Научна област: архитектура и урбанизам

Ужа научна област: архитектонске конструкције, материјали и физика зграда

УДК број: 728:621.391.6:620.9(043.3)

ESTIMATION OF RESIDENTIAL BUILDING ENVELOPES` ENERGY PERFORMANCE USING THE INFRARED THERMOGRAPHY METHOD

Abstract:

Energy performance of a building is a result of various impact factors throughout its whole lifecycle: from laws and codes regulating its design and construction, build quality and materials application all the way to the occupant behaviour, maintenance and potential upgrades and adaptations. Establishing the current condition and real energy performance of buildings is necessary in the process of creating strategies for building fond management based on the postulates of sustainable development and energy efficiency of buildings.

The subject of this dissertation is research of structure and energy performance of Serbian multifamily housing built after the World War II. The starting point of the research is the analysis of material characteristics of these buildings as well as relevant codes and regulations with establishing appropriate periodization. Typical façade assemblies are determined for each period, to be explored in detail by studying the technical documentation, calculating and simulating energy performance and on-site explorations using the infrared thermography method.

The specifics of infrared thermography method are thoroughly researched and described both through theoretical and practical aspects. All relevant input factors are identified and explained, the possibilities for application in architecture are determined and explored, including the constraints and the most common mistakes and misinterpretations. The adequate procedures are determined and a set of recommendations is defined in order to provide proper application of the method.

Energy performance of buildings is explored by calculating relevant parameters based upon current regulations, by computer simulations and by infrared thermography. The results are cross-compared and thoroughly interpreted, and a catalogue of typical cases is provided.

Key words: Energy Efficiency, Infrared Thermography, Building Envelope, Performance Assessment

САДРЖАЈ:

- Резиме са кључним речима (на српском језику)

- Резиме са кључним речима (на енглеском језику)

Садржај

Списак скраћеница, ознака и симбола

Списак и порекло илустрација и прилога (слика, дијаграма, табела и сл.)

I. УВОД..... 1

I.1. Претходна анализа информација о предмету и проблему истраживања	1
I.1.1.Анализа постојећег грађевинског фонда	1
I.1.2.Анализа топлотних губитака фасадних омотача стамбених зграда, нарочито употребом термовизијског снимања	2
I.1.3.Оптимизација енергетских перформанси стамбених зграда ...	4
I.2.Проблем и предмет истраживања	5
I.2.1.Полазни ставови о проблему истраживања.....	6
I.2.2.Предмет истраживања	8
I.2.3.Значај предмета истраживања	9
I.2.4.Операционо одређење предмета истраживања	11
I.3.Научни циљ истраживања	12
I.4.Задаци истраживања	12
I.5.Основне хипотезе	13
I.6.Методе истраживања	14
I.7.Очекивани резултати и њихова практична примена	14

II. ГРАЂЕВИНСКИ ФОНД СРБИЈЕ У ПЕРИОДУ 1945-2011..... 16

II.1.Појам и систематизација	16
II.1.1.Национална типологија стамбених зграда	17
II.2.Прописи из области термичке заштите	23
II.3.Примењени техничко-технолошки системи, материјализација.....	28
II.4.Структура склопова – појавни облици, карактеристике, периодизација	32

II.4.1.Период 1946-1970	34
II.4.2.Период 1970-1987	37
II.4.3.Период 1987-2011	39
II.5.Трајност, одржавање и утицај на перформансе	41

III.МЕТОДА ТЕРМОВИЗИЈСКОГ СНИМАЊА..... 46

III.1.Дефиниција и историјат.....	46
III.2.Основни принципи и теоретске поставке	49
III.2.1.Електромагнетни спектар	49
III.2.2.Црно тело	54
III.2.2.1.Зрачење црног тела	55
III.2.2.2.Планков закон.....	56
III.2.2.3.Винов закон	57
III.2.2.4.Штефан-Болцманов закон	59
III.2.3.Реална тела	59
III.2.3.1.Емисивност	39
III.2.3.2.Топлотни сјај, рефлексија, апсорпција, пропуштање	63
III.3. Детекција долазног зрачења – мерења	66
III.3.1.Шема мерења	66
III.3.2. Опрема.....	69
III.3.2.1.Камера	69
III.3.2.2.Детектор	71
III.3.2.3.Матрични равански склоп детектора (Focal Plane Array - FPA).....	73
III.3.2.4.Видно поље (FOW), тренутно видно поље камере (IFOV).....	75
III.4.Термограм	78
III.4.1.Графички приказ термограма - палета термограма	80
III.4.2.Температурни опсег	81
III.5.Могућности примене у архитектури	85
III.6. Начини коришћења методе термовизијског снимања	89

IV. ДЕФИНИСАЊЕ МЕТОДА ОЦЕНЕ ПЕРФОРМАНСИ

ОМОТАЧА СТАМБЕНИХ ЗГРАДА 91

IV.1. Енергетска ефикасност и термичке перформансе омотача –

принципи прорачуна..... 93

IV.1.1. Прорачун површинских трансмисионих губитака омотача . 96

IV.1.1.1. Коефицијент пролаза топлоте U 96

IV.1.1.2. Коефицијент трансмисионог губитка топлоте H_T 100

IV.1.2. Топлотни мостови 101

IV.1.3. Процена утицаја топлотних мостова на

перформансе омотача 110

IV.1.3.1. Метода нумеричке процене утицаја топлотних
мостова 110

IV.1.3.2. Поједностављена метода процене утицаја линијских
мостова и других недостатака применом термовизијског
снимања 112

IV.2. Одређивање параметара енергетских перформанси омотача

применом симулационих софтвера 115

IV.3. Одређивање параметара енергетских перформанси омотача

применом термовизијског снимања 118

IV.3.1. Параметри од утицаја за примену методе термовизисјког

Снимања..... 119

IV.3.1.1. Утицај емисивности..... 121

IV.3.1.2. Утицај рефлектоване температуре окружења..... 122

IV.3.1.3. Утицај температуре атмосфере 125

IV.3.2. Обрада термограма 126

IV.3.2.1. Извештајни софтвери 127

IV.3.2.2. Истраживачки софтвери..... 127

IV.3.2.3. Алати за анализу термограма 128

IV.3.3. Могућности квантификације перформанси омотача

применом термовизијског снимања 130

IV.4. Метод утврђивања перформанси компаративном анализом

моделованих и измерених температурних вредности.....	133
IV.4.1.Симулација одабраног склопа	135
IV.4.2.Термовизијско снимање одабраног склопа	136
IV.4.3.Усаглашавање измерених и симулираних резултата	138
IV.4.4.Компарација измерених и симулираних вредности	141
IV.4.5.Тумачење одступања перформанси	143
IV.4.5.1.Одступање амплитуда интензитета	144
IV.4.5.2.Различитост у шаблону расподеле температуре.....	145
IV.4.6.Квантификација уочених одступања	146

V.КАРАКТЕРИСТИЧНИ СКЛОПОВИ ФАСАДНИХ ОМОТАЧА

И ЊИХОВЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ПЕРФОРМАНСЕ 148

V.1.Идентификација карактеристичних склопова	148
V.1.1.Период 1946-1970	149
V.1.2.Период 1970-1987	151
V.1.3.Период 1987-2011	153
V.2.Прорачунске вредности параметара енергетских перформанси1	156
V.3.Симулационе вредности параметара енергетских перформанси	161
V.4.Измерене вредности параметара енергетских перформанси	173
V.5.Компаративна анализа моделираних и дијагностикованих вредности.....	186
V.6.Дискусија резултата	204

VI.ЗАКЉУЧАК..... 208

Литература	215
------------------	-----

Биографија

СПИСАК СКРАЋЕНИЦА, ОЗНАКА И СИМБОЛА

TABULA - Typology Approach for Building Stock Energy Assessment

NIR – блиско инфрацрвено зрачење, $0.75\text{-}1\ \mu\text{m}$

SWIR - краткоталасно инфрацрвено зрачење, $1\text{-}3\ \mu\text{m}$

MWIR - средњеталасно инфрацрвено зрачење, $3\text{-}5\ \mu\text{m}$

LWIR - дуготаласно инфрацрвено зрачење $8\text{-}14\ \mu\text{m}$

VLWIR - далеко дуготаласно инфрацрвено зрачење $14\text{-}1000\ \mu\text{m}$

FPA - матрични равански склоп детектора (енг. *Focal Plane Array*)

NUC - неуниформна корекција сигнала (енг. *Nonuniformity Correction*)

ROIC - штампано коло које читава настале промене (енг. *Readout Integrated Circuit*)

FOV - видно поље (енг. *Field of View*)

HFOV – хоризонтални правац видног поља (енг. *Horizontal Field of View*)

VFOV – вертикални правац видног поља (енг. *Vertical Field of View*)

IFOV - тренутно видно поље камере (енг. *Instantaneous Field of View*)

c брзина светлости ($3 \times 10^8\ \text{m/s}$)

λ таласна дужина [m]

ν фреквенција [$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$]

W енергија зрачења [J]

h Планкова константа ($6.626 \times 10^{-34}\ \text{Js}$)

C_1 Прва Планкова константа ($3,742 \times 10^{-16}\ \text{W/m}^2$)

C_2 Друга Планкова константа ($4.435 \times 10^{-2}\ \text{mK}$)

k Болцманова константа ($1,38 \times 10^{-23}\ \text{J/K}$)

σ Штефан Болцманова константа ($5,67 \times 10^{-8}\ \text{W/m}^2\ \text{K}^4$),

M егзитација [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$]

E ирадијација (озраченост) [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$]

H топлотни сјај (некада излазно зрачење, енгл. *exitant radiation*) [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$]

A површина [m^2]

Φ проток енергије зрачења [W]

ϕ_λ спектрална густина [$\frac{J}{s}$]

ϕ_{ir} количина зрачења која долази до сочива термовизијске камере

Q енергија зрачења [J]

t време [s]

λ_{max} таласна дужина на којој се јавља максимум израчене енергије [μm]

T апсолутна температура [K]

ε емисивност

$d\Omega$ елемент просторног угла (енг. *Solid angle element*)

ρ рефлексивност, $0 \leq \rho \leq 1$

α апсорптивност, $0 \leq \alpha \leq 1$

τ пропустљивост, $0 \leq \tau \leq 1$

QH, nd енергија потребна за грејање [$kWh/(m^2 \times a)$]

H_T коефицијент трансмисионог губитка топлоте [W/K]

H_V коефицијент вентилационог губитка топлоте [W/K]

H'_T специфични трансмисиони топлотни губитак [$W/(m^2 \times K)$]

q_V укупни запремински губици топлоте [W/m^3]

C ефективна топлотна акумулативност зграде, [Wh/K]

n број измена ваздуха зграде, или дела зграде [1/h]

U коефицијент пролаза топлоте [$\frac{W}{m^2 K}$]

R отпор пролазу топлоте [$\frac{m^2 K}{W}$]

R_{si} унутрашњи отпор прелазу топлоте [$\frac{m^2 K}{W}$]

R_{se} спољашњи отпор прелазу топлоте [$\frac{m^2 K}{W}$]

λ топлотна проводљивост [$\frac{W}{m K}$]

h коефицијент прелазу топлоте [$\frac{W}{m^2 K}$]

h_r коефицијент прелазу топлоте зрачењем [$\frac{W}{m^2 K}$]

h_c коефицијент прелазу конвекције [$\frac{W}{m^2 K}$]

h_{r0} коефицијент прелазу топлоте зрачењем за црно тело [$\frac{W}{m^2 K}$]

Списак и порекло слика и табела

Списак слика:

- Слика II-1 Матрица „Националне типологије стамбених зграда Србије“ са назначеним предметом истраживања. Извор: Јовановић Поповић М. и др. 2013.б, стр 14.
- Слика II-2 Заступљеност типова зграда, укупно 3231931 станова (према подацима из Пописа становништва, домаћинства и станова 2011, књига бр.27)
- Слика II-3 Станови према години изградње – укупан број станова и процентуално учешће у грађевинском фонду (према подацима из Пописа становништва, домаћинства и станова 2011, књига бр.20)
- Слика II-4 Станови према години изградње – период 1946-2011, са приказом усвојене периодизације (назначено плавим линијама) и годинама доношења прописа из области термичке заштите (назначено црвеним линијама). (према подацима из Пописа становништва, домаћинства и станова 2011, књига бр.20, за станове познатог годишта)
- Слика III-1 Приказ електромагнетног спектра (Ibarra Castanedo 2005, стр. 149)
- Слика III-2 Пропусност атмосфере на 2000m, са назначеним зонама најчешће коришћеним за термовизијско снимање (на основу Rogalski, Chrzanowski 2002, стр. 113)
- Слика III-3 Шематски приказ црног тела – ошупљена сфера са неравном унутрашњошћу која упадни зрак светлости „заробљава“ помоћу великог броја рефлексија (<http://latexcms.math.bme.hu> приступљено 20.8.2015.) б) различити облици изотермних шупљина (Vollmer, Moellmann, стр. 49)
- Слика III-4 Спектрално зрачење црног тела за различите температуре (Wagner, 2011, стр.13)
- Слика III-5 Планкове криве на основу Виновог закона померања (Fouad, Richter, 2012 стр 12.)
- Слика III-6 Приказ емисивности и одговарајућег термалног зрачења за црна тела, сива тела и селективне емитере (Fouad, Richter, 2012, стр. 17-18)
- Слика III-7 Углови у простору; просторни угао (*Solid angle*) као геометријска представа углова у односу на дефинисану раван (α) преко

површне управне на одређени правац (б) (Vollmer, Moellmann 2010, стр. 17)

Слика III-8 Зависност емисивности у односу на угао посматрања, приказ за црна, сива и нека од реалних тела (адаптирано на основу Wagner, 2011, стр.17)

Слика III-9 Шема општег случаја расподеле зрачења у односу на долазно и сопствено зрачење

Слика III-10 Шема мерења зрачења у процесу снимања (на основу FLIR 2004)

Слика III-11 Процентуално учешће зрачења објекта у детектованој количини зрачења у зависности од емисивности и температуре (Vollmer, Moellmann 2010, стр. 100)

Слика III-12 Принципи формирања слике за камере различитих типова: а) линијски скенери б)матрични детектори (Vollmer, Moellmann 2010, стр.102)

Слика III-13 Шематски приказ микроболометра, димензија појединачног микроболометра је у најновијим системима $17 \times 17 \mu\text{m}$ (на основу Rogalski, 2002, стр. 123.)

Слика III-14 Приказ видног поља камере (Vollmer, Moellmann 2010, стр.120)

Слика III-15 Прецизност мерења температуре објекта исказана кроз зависност угла *IFOV* и величине предмета (Fouad, Richter, 2012 стр 57.)

Слика III-16 Изглед термограма сегмента стамбеног објекта: а) графички приказ површинске дистрибуције температуре, са назначеном тачком 1 и њеним координатама ($x=159$ и $y=151$), као и приказом других алата за анализу слике: линијско (дуж правца) и површинско (у оквиру сегмента) читавање температура; б) промена температуре дуж правца 1; ц) просторни приказ дистрибуције температуре у назначеном сегменту 1

Слика III-17 Различити графички прикази истоветног термограма помоћу алата „палета“ у оквиру софтвера камере: а) сива палета (монохроматски приказ); б) жута палета (црно жуте боје); ц) сивоцрвена палета); д) инверзна жута палета; е) „метална“ палета (одговара промени боја загревања метала); ф) „кишна“ (енг. *rain hi contrast*) палета великог контраста

Слика III-18 Приказ истог термограма са различито усвојеним вредностима температурног опсега.

Слика III-19 Графичка илустрација *Quali Thermo* метода за нормализацију термограма (Tanner, Lehmann, Frank, 2011. стр. 26)

- Слика III-20 Могућа примена инфрацрвене термографије у зградарству
(адаптирано на основу Flir 2011)
- Слика III-21 Генеришући елементи одабира одговарајућег типа
термовизијског снимања (адаптирано на основу Ibarra-Castanedo,
С и др. 2013, стр. 92)
- Слика IV-1 Шема положаја карактеристичних линијских мостова у структури
зграде (SRPS EN ISO 14683, стр. 6)
- Слика IV-2 Сегментирање омотача зграде у зависности од принципа на основу
којих се врши прорачун перформанси тј. примене одговарајућих
рачунских модела (SRPS EN ISO 10211, стр. 21)
- Слика IV-3 Шематски приказ карактеристичних спојева за моделирање и
величина релевантних за прорачун линијског топлотног моста: а)
детал угла (Рајчић, 2011 стр. 10), б) детаљ споја међуспратне
конструкције. Карактеристичне дужине $l_A, l_B = 1\text{m}$.
- Слика IV-4 Сегмент фасаде склопа ФС1 са назначеним карактеристичним
правцем који одговара дужини симулираног детаља
- Слика IV-5 Варијације температурних читавања дуж карактеристичног
правца насталих као последица различитих вредности
емисивности фасаде (пример за склоп ФС1)
- Слика IV-6 Варијације температурних читавања дуж карактеристичног
правца као последица различитих вредности температуре
окружења (пример за склоп ФС1)
- Слика IV-7 Приказ читавања температурних вредности дуж
карактеристичног пресека у зависности од варијација
температуре ваздуха (пример за склоп ФС1)
- Слика IV-8 Термограм са графичким приказом најчешће коришћених
аналитичких алата
- Слика IV-9 Симулиране карактеристике типичног фасадног склопа ФС4, са
графичким приказом дистрибуције температуре и нумеричким
вредностима на карактеристичним тачкама модела: крајеви
зидова, спој међуспратне конструкције и фасадног зида, средина
серклажа. Због природе анализираног склопа, у детаљу су
приказани и челични анкери на месту споја спољашњег и
унутрашњег дела панела, односно хоризонталног серклажа.
- Слика IV-10 Приказ нехомогене структуре зида фасадног склопа ФС4.
Термограм се карактерише различитим температурним
читавањима дуж неколико блиских паралелних праваца.

Слика IV-11 Приказ релације угла снимања и нехомогене структуре зида фасадног склопа ФС4 . Термограм се карактерише температурним читавањима која не пружају реалне информације о саставу склопа.

Слика IV-12 Приказ читавања температурних вредности дуж карактеристичног пресека за Фасадни склоп ФС1. Дужина симулираног сегмента на површини фасаде износи 2.42m и приказана је преко 101 карактеристичне тачке, што одговара броју тачака добијеним из термограма.

Слика IV-13 Графичка илустрација „нормализованих дијаграма“ измерених и симулираних вредности, применом принципа динамичког просека са полазним кораком од 10%. Испрекиданом линијом су приказани резултати мерења, односно симулације, пре примене принципа динамичког просека.

Слика IV-14 Приказ графикана добијених након хармонизације измерених температурних вредности према симулираним вредностима. Кориговане температурне вредности указују на перформансе зида које по типу дистрибуције одговарају моделованом тренду.

Слика IV-15 Приказ графикана добијених након хармонизације измерених температурних вредности према симулираним вредностима. Кориговане температурне вредности указују на перформансе зида које по типу дистрибуције значајно одступају у односу на моделовани тренд.

Слика IV-16 Карактеристичан детаљ удвојеног серклажа вишеслојог фасадног зида где се пројектом предвиђа постојање термоизолационог слоја, док је у пракси вероватно дошло до његовог изостављања и појаве знатно већих температурних читавања у односу на симулиране вредности.

Слика IV-17 Карактеристичан детаљ вишеслојог фасадног зида са префабрикованом завршном облогом. Пројектом се предвиђа термоизолациони слој у саставу фасадног склопа, док је у пракси вероватно дошло до његовог пропадања или оштећења у фази реализације, што за резултат има различит шаблон дистрибуције температуре у односу на симулиране вредности. Целокупан зид се одликује изразито нехомогеним саставом.

Слика V-1 Фасадни склоп ФС-1, приказ материјализације

Слика V-2 Фасадни склоп ФС-2, приказ материјализације

Слика V-3 Фасадни склоп ФС3, приказ материјализације

Слика V-4 Фасадни склоп ФС4, приказ материјализације

Слика V-5 Фасадни склоп ФС5, приказ материјализације

Слика V-6 Фасадни склоп ФС6, приказ материјализације

Слика V-6а Аксонометријски приказ удвојеног серклажа и тачкастог начина прихватања

Слика V-7 Фасадни склоп ФС7, приказ материјализације

Слика V-8 Типични фасадни склопови: спој фасадног зида и међуспратне конструкције (на основу SRPS EN ISO 14683, стр. 11)

Слика V-9 ФС1, Приказ дистрибуције температурних читавања А) и топлотног протока Б)

Слика V-10 ФС2, Приказ дистрибуције температурних читавања А) и топлотног протока Б)

Слика V-11 ФС3, Приказ дистрибуције температурних читавања А) и топлотног протока Б)

Слика V-12 ФС3, Приказ дистрибуције температурних читавања А) и топлотног протока Б)

Слика V-13 ФС5, Приказ дистрибуције температурних читавања А) и топлотног протока Б)

Слика V-14 ФС6, Приказ дистрибуције температурних читавања А) и топлотног протока Б)

Слика V-15 ФС6, Приказ дистрибуције температурних читавања А) и топлотног протока Б) на месту тачкастог топлотног моста односно везе спољашњег и унутрашњег серклажа

Слика V-16 ФС7, Приказ дистрибуције температурних читавања А) и топлотног протока Б)

Слика V-17 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС1, са назначеним контролним правцем и профилем температуре дуж њега

Слика V-18 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС2, са назначеним контролним правцима и профилима температура дуж њих

Слика V-19 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС3, са назначеним контролним правцима и профилима температура дуж њих

- Слика V-20 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС4, са назначеним контролним правцима и профилима температура дуж њих
- Слика V-21 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС5, са назначеним контролним правцима и профилима температура дуж њих
- Слика V-22 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС6, са назначеним контролним правцима и профилима температура дуж њих
- Слика V-23 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС7, са назначеним контролним правцем и профилем температуре дуж њега
- Слика V-24 ФС1 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека
- Слика V-25 ФС2 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека
- Слика V-26 ФС3 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека
- Слика V-27 ФС4 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека
- Слика V-28 ФС5 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека
- Слика V-29 ФС6а - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека на месту поља између тачкастих веза серклажа
- Слика V-30 ФС6б - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека на месту тачкастих веза серклажа
- Слика V-31 Приказ измерених температурних вредности карактеристичног површинског сегмента фасадног омотача на месту тачкасте везе серклажа.
- Слика V-32 Приказ дела фасаде зграде са приметном разликом у квалитету извођења где се јасно уочавају зоне са удвојеним серклажима и изведеним према пројекту (изнад прозора у средишњем делу) у односу на лоше изведене готово континуалне серклаже (изнад прозора на левом делу приказаног сегмента)
- Слика V-33 ФС7 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека

Списак табела

- Табела II-1 Процентуална заступљеност типова зграда према броју станова и усвојеној периодици (на основу резултата ТАБУЛА пројекта)
- Табела II-2 Преглед прописаних вредности коефицијената пролаза топлоте за другу климатску зону (Ђукановић 2015, стр. 130)
- Табела II-3 Најпримењиванији типови неизолованих фасадних зидова и међуспратних конструкција у периоду 1946-70. (На основу Јовановић Поповић и др. 2013. и Ђукановић 2015.)
- Табела II-4 Најпримењиванији типови изолованих фасадних зидова и међуспратних конструкција у периоду 1970-1987. (На основу Јовановић Поповић и др. 2013. и Ђукановић 2015.)
- Табела II-5 Најпримењиванији типови изолованих фасадних зидова и међуспратних конструкција у периоду 1987-2011. (На основу Јовановић Поповић и др. 2013. и Ђукановић 2015.)
- Табела IV 1 Вредности коефицијента прелаза топлоте зрачењем за различите средње вредности температуре (SRPS EN ISO 6946, стр. 13)
- Табела IV-2 Отпор прелазу топлоте у зависности од брзине ветра (SRPS EN ISO 6946, стр. 13)
- Табела IV-3 Класификација термичких мостова у односу на вредност линеарног коефицијента пролаза топлоте (Рајчић стр. 17, на основу Wouters, Schietecat, & Standaert,)
- Табела IV-4 Граничне вредности температурног индекса и процена нивоа ризика (Flir, 2006, стр. 27)
- Табела V-1 вредности параметара за ФС1 на основу симулације
- Табела V-2 вредности параметара за ФС2 на основу симулације
- Табела V-3 вредности параметара за ФС3 на основу симулације
- Табела V-4 вредности параметара за ФС3 на основу симулације
- Табела V-5 вредности параметара за ФС5 на основу симулације

Табела V-6 вредности параметара за ФС6 на основу симулације

Табела V-7 вредности параметара за ФС7 на основу симулације

Табела V-8 вредности параметара важећих у тренутку снимања–ФС1

Табела V-9 вредности параметара важећих у тренутку снимања–ФС2

Табела V-10 вредности параметара важећих у тренутку снимања–ФС3

Табела V-11 вредности параметара важећих у тренутку снимања–ФС4

Табела V-12 вредности параметара важећих у тренутку снимања–ФС5

Табела V-13 вредности параметара важећих у тренутку снимања–ФС6

Табела V-14 вредности параметара важећих у тренутку снимања–ФС7

Табела V-15 Преглед анализираних склопова

Табела V-16 Упоредни преглед карактеристика анализираних фасадних
склопов са квантификацијом уочених одступања и укупном
оценом перформанси

I. УВОД

I.1. Претходна анализа информација о предмету истраживања

Проучавање перформанси грађевинског фонда представља комплексно поље истраживања које укључује различите области почевши од историографских, типолошких, техничко технолошких, еколошких, па све до питања везаних за материјализацију зграда и њихових енергетских перформанси. У циљу формирања одговарајућег приступа формулисању и експликацији теме, извршено је обимно истраживање области уз проучавање расположиве грађе у виду домаће, односно иностране литературе и то пре свега публикованих резултата научних пројеката, истраживачких и теоретских радова, као и стручних студија. Истовремено је приступљено и обимном проучавању архивске грађе везане за техничке карактеристике грађевинског фонда доступне у оквиру релевантних архива.

Услед обимности приступа, истраживачка тема се може ближе размотрити проучавањем следећих области:

1. Анализа постојећег грађевинског фонда стамбених зграда на територији Београда и Републике Србије
2. Анализа топлотних губитака фасадних омотача стамбених зграда, нарочито употребом термовизијског снимања
3. Оптимизација енергетских перформанси стамбених зграда

I.1.1. Анализа постојећег грађевинског фонда

Анализа грађевинског фонда Србије је у највећој мери обрађивана са аспекта енергетских перформанси зграда, а руковођена је идејом формирања класификације карактеристичних типова, односно, на основу њих, идентификације појавних облика фасадних омотача. Током истраживања у овој области, извршено је проучавање основних извора попут пописа становништва и законских прописа из области које дефинишу минималне техничке стандарде у области термичке заштите, као и техничких прописа везаних за пројектовање објеката високоградње. Такође, у периоду 2011-2013., група истраживача са Архитектонског факултета је извршила обимно теренско истраживање у сарадњи

са агенцијом *IPSOS-Strategic marketing* којом приликом је, према унапред дефинисаним критеријумима, пописано готово 22000 зграда. Анализа добијених резултата представља такође једно од основних полазишта истраживања.

Примарним изворима у овој области се могу сматрати резултати научноистраживачког пројекта *Енергетска оптимизација зграда у контексту одрживе архитектуре (НИП 283)* спроведеног у периоду 2002-2005. на Архитектонском факултету у Београду, као и резултати у оквиру Европског научно-истраживачког пројекта *TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment)* спроведеног од стране групе истраживача са Архитектонског факултета у Београду и подржаног од стране *GIZ-a (Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit)* у периоду 2011-2013.

Као основни извори, у дисертацији су коришћени публиковани резултати наведених истраживачких пројеката, затим низ публикованих научних радова из ове области као и званични подаци Републичког завода за статистику.

1.1.2. Анализа топлотних губитака фасадних омотача стамбених зграда, нарочито употребом термовизијског снимања

Анализа топлотних губитака фасадних омотача у директној је вези са облашћу грађевинске физике и одговарајућим законским прописима који је уређују. У периоду 2010-2011. група стручњака, чији члан је био и аутор овог рада, је израдила, у складу са стандардима Европске уније, два правилника којима је уведена тема енергетске ефикасности зграда у целости, односно, дефинисан начин израчунавања потрошње енергије, представљен принцип и начин одређивања енергетских разреда као и поступак издавања „енергетских пасоша“. Пред елементе омотача зграда су постављени нови, значајно строжији, прописи а материјална остварења ових прописа, у смислу одговарајућих техничких решења, препорука и детаља, као и начина њихове верификације нису у потпуности дефинисани.

У овој области се основним изворима могу сматрати релевантни европски прописи, теоријски радови из области грађевинске физике као и европске директиве које трасирају стратегије ЕУ у области енергетске ефикасности до 2030. године.

У области перформанси омотача нарочито је важан однос прорачунских и реалних карактеристика елемената омотача зграда. Сложеност математичког модела који описује проблеме везане за пролаз топлоте кроз фасадни омотач и, нарочито, места линијских, односно тачкастих губитака, представљају поље континуалних истраживања и развоја симулационих метода како би се дошло до што тачнијих резултата. У свом истраживању у оквиру израде докторске дисертације, А. Рајчић је развио сопствени софтверски пактет *Tstudio*, који у многоме олакшава визуелизацију термичких перформанси, омогућавајући пројектантима да унапред истраже ефекте начина решавања карактеристичних детаља. Поменути софтверски пакет ће у великој мери бити коришћен у току истраживања како би се објасниле термичке карактеристике омотача.

Истовремено са симулацијама, у пракси се користи и термовизијско снимање. Примена термовизијског снимања је релативно нова дијагностичка метода која је у цивилној употреби тек од седамдесетих година прошлог века, док је њена примена у анализи топлотних губитака фасадних омотача везана за период од последњих двадесетак година. Први прописи који регулишу ову област су се на европском нивоу појавили 1983. а приближили широј употреби тек 1998. увођењем стандарда EN ISO 13187:1998 *Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method*, који је од 2008. под називом SRPS EN 13187:2008 прихваћен у Србији. Овај стандард дефинише основне принципе и услове адекватног термовизијског снимања и даје основне смернице за примену метода. Примена методе је ограничена на особе које су завршиле одговарајуће курсеве и стекле међународно признате лиценце на основу ISO 18436 сета стандарда који дефинишу принципе и начин обуке. Аутор овог рада је од 2006. године носилац лиценце *ITC infrared thermographer Level 1*, стечене након обуке у *ITC* тренинг центру у Шведској.

Примена термовизијског снимања, односно бесконтактно мерење зрачења у инфрацрвеном делу електромагнетног спектра, је теоретски адекватно истражено, и у раду је коришћена референтна литература новијег датума.

Истовремено је вршен и обиман истраживачки рад на терену у периоду 2010-2013, анализом различитих типова зграда (анализирано је више од 70 зграда) и проучавањем термичких перформанси њихових омотача. Као резултат поменутог

истраживања објављена је једна научна монографија као и већи број научних и стручних радова.

У истраживању су коришћени и специјализовани софтверски пакети искључиво намењени професионалној анализи термовизијских слика: *FLIR ThermaCam Image Builder* и *FLIR Reporter Version 9.0 Professional*.

I.1.3. Оптимизација енергетских перформанси стамбених зграда

Основна полазишта оптимизације енергетских перформанси зграда се базирају на разноврсним теоретским моделима и варијантним техничко – технолошким решењима која су адекватно обрађена у литератури.

Значај ове области се огледа у чињеници да енергетска оптимизација за полазиште има анализу постојећег стања зграда утврђеног на основу проучавања пројектне документације и истраживања на терену. Прикупљени подаци представљају основ енергетске валоризације, односно, у складу са важећим законским актима, енергетског разреда зграда и каснијег одређивања мера унапређења. Примењене мере енергетске оптимизације дефинисане су на основу техничких и енергетских карактеристика самих објеката имајући у виду техно-економске односе карактеристичне за Србију, као и претпостављени утицај на укупан енергетски биланс посматраног објекта. У овој области је вршено интензивно истраживање расположиве литературе, техничке документације и вршен прорачун предложених метода. За потребе дисертације од посебног значаја су истраживачки резултати до којих се дошло приликом утврђивања конструкционих карактеристика омотача и њихове релације са укупним енергетским карактеристикама зграда

Посебно битно истраживање у овој области је вршено на узорку грађевинског фонда Београда од 32 објекта, за које је израђена научна студија чији је руководиоца био аутор ове дисертације. У оквиру ове студије, основни метод истраживања, осим нумеричке анализе моделских опција принципа обнове, представљало је и термовизијско испитивање карактеристика термичког омотача, односно истраживање релација идентификованих перформанси и укупног енергетског биланса.

Истоветна методологија је примењена и на истраживање у оквиру пројекта ТАБУЛА које за резултат има и Националну типологију стамбених зграда Србије. Код овог истраживања, моделирање енергетских перформанси је вршено коришћењем софтверског пакета *КнауфТерм 2*, А. Рајчића.

У овој области је и сам кандидат током истраживања објавио већи број научних радова.

1.2. Проблем и предмет истраживања

У савременој архитектонској пракси, нарочито у последњих двадесет година, питања енергетске ефикасности се постављају као кључна за адекватан третман како нових, тако и постојећих зграда. Истраживање спроведено у земљама Европске уније и штампано у оквиру тзв. „Зелених папира – Према Европској стратегији за сигурност снабдевања енергијом“ (*The Green Paper “Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply”*) наводи се податак да се у зградама троши готово 40% укупне енергије на нивоу Уније, и да се без одређених активности, пре свега у домену смањења потрошње енергије, не може очекивати адекватан развој друштва. Активности Уније на овом плану се могу сагледати кроз неколико директива од којих су најпознатије:

- Европска директива 2002/91/ЕС позната и као ЕПБД (*EPBD - Energy Performance Building Directive*), која препознаје дугорочни утицај који зграде имају на потрошњу енергије и налаже стварање локалних законских и подзаконских аката прилагођених климатским условима који ће минимизирати потрошњу енергије. На основу ове директиве је Србија донела нове подзаконске акте током 2011. године.
- Европска директива 2010/31/ЕС познатија као ЕПБД 2, уводи још строжије стандарде са тежњом да све зграде по истеку 2020. буду тзв. зграде скоро нулте енергије (*nearly zero energy*) при чему се захтев односи на све нове и старе зграде у процесу реконструкције.
- Европска директива 2012/27/UE, која поставља основна опредељења и стандарде према којима би се морала повећати енергетска ефикасност зграда за 20% до 2020.

Наведене европске директиве, чији је Србија потписник, представљају изузетно сложен и тежак задатак ако се има у обзир тренутно стање у грађевинској индустрији Србије и чињеница да је степен изградње нових станова, усаглашених са постављеним циљевима, око 1% годишње, према најновијим статистичким подацима.

На основу претходног, поставља се питање како адекватно третирати постојећи грађевински фонд: доносити стратегије, техничке препоруке, а, пре свега, како утврдити реалне нивое енергетске потрошње, како на нивоу целог објекта, тако и на нивоу његових елемената, и то првенствено конструктивно материјалних а потом и инсталационих система.

Омотач зграда представља основно поље на коме се остварује вишедимензионална корелација са окружењем, почевши од културолошке, преко урбанистичке, еколошке, економске па све до материјалне.

За потребе дисертације, разматране су искључиво енергетске карактеристике омотача, односно поступак утврђивања енергетских перформанси и њихова валоризација методом термовизијског снимања.

I.2.1. Полазни ставови о проблему истраживања

Енергетске порформансе зграда у највећој мери зависе од начина формулације и материјализације форме односно, геометријски посматрано, односа површине термичког омотача и њиме обухваћене запремине и примењених материјално техничких решења. Са аспекта енергетске ефикасности, можемо уочити значајну различитост у приступу третману новопроектованих и постојећих зграда. За групацију новопроектованих развијен је сет подзаконских аката чијом применом се условљава постизање жељених перформанси у складу са наменом зграде. Методолошки и нумерички су објашњене поставке на основу којих се приступа прорачуну, док су начини постизања одговарајућих нивоа остали на нивоу препорука и препуштени искуству пројектаната. Практично, то значи да тек по окончању прорачуна можемо видети какав је утицај донетих одлука и предложених материјализација склопова што методологију одваја од тзв. пројектне и сврстава у верификациону. Истовремено, није постављен никакав захтев за утврђивање реалних перформанси изграђених објеката методама

мерења. Правилником о Енергетској ефикасности зграда је дефинисан „енергетски преглед као поступак који се спроводи ради утврђивања енергетских својстава зграда и нивоа усклађености тих својстава са прописаним захтевима“. Сам поступак прегледа није детаљније елабориран. Искуствено је познато да перформансе у великој мери зависе од квалитета извођења и стручности лица која учествују у процесу грађења, односно адекватног познавања примењених техничких решења. Практично, без обзира на добро техничко решење предвиђено пројектом, реалне перформансе и даље остају непознаница.

Податке о енергетским карактеристикама можемо добити прикупљањем одговарајућих рачуна за енергенте, што често није могуће, а где јесте, овај поступак нам само даје информацију о укупном понашању зграде али не и њеним сегментима који се могу идентификовати као „лоша места“. Штавише, ранијим истраживањима се дошло до резултата да изграђена површина стамбених објеката, у великој мери, не одговара грејаној, првенствено услед економских разлога, те се овако добијени подаци морају узети са великом резервом.

Посебан проблем представља третман постојећих зграда које престављају највећи део нашег грађевинског фонда. Наиме, стопом изградње нових зграда која је тренутно изражена у Србији, неће се значајније променити енергетска слика на нивоу државе у наредном периоду. Постојеће зграде, не само да су изграђене у различитим временским периодима према различитим прописима или, што је још чешће без поштовања икаквих прописа, него су неретко и препуштене зубу времена без адекватне стратегије одржавања и обнове. Истраживање спроведено на Архитектонском факултету указује да у домену индивидуалне изградње готово 90% зграда нема никакву термичку заштиту а готово 40% нема ни завршену фасадну што представља озбиљан проблем али истовремено и значајан потенцијал, како за повећање укупног стандарда енергетске ефикасности тако и за развој привреде.

Како утврдити структуру фасадног омотача ових зграда, и, што је још битније, њихове енергетске перформансе? Осим мерења контактним методама, односно истражним радовима узимањем узорака (бушењем или керновањем), могуће је користити и бесконтактне методе које се углавном базирају на анализи појединих, унапред одређених, тачака. Овде се првенствено мисли на употребу

такозваних „термичких пиштоља“ односно уређаја који мере количину зрачења једне, релативно мале, области.

Све ове методе су изразито локалне природе, могу анализирати само поједине тачке, односно области, и њихови резултати се више користе за утврђивање стања конкретних места проучавања а не целокупног омотача.

Наведени проблем верификације пројектантских решења кроз њихова материјална остварења нас упућује на примену термовизијског снимања као јединог адекватног метода који у реалном времену, бесконтактно, самим тиме без утицаја на објекат снимања, може пружити слику о жељеним енергетским карактеристикама. Ова метода обезбеђује непосредност, директност и свеобухватност приступа, уз извесна ограничења и специфичности која се морају адекватно третирати приликом извођења мерења како би се добили релевантни резултати.

Један од основних проблема са којим се срећемо приликом употребе термовизијског снимања као основног принципа анализе је непостојање јасне методологије процеса и конкретних поступака као и адекватне методологије тумачења добијених резултата, поготово у контексту различитости појавних облика материјализације архитектонских објеката.

I.2.2. Предмет истраживања

Предмет истраживања представља грађевински фонд Србије у другој половини двадесетог века закључно са 2011. годином. Овај период је узет у разматрање јер он у структури изграђених објеката на тлу Србије чини готово 90% укупно изграђених зграда гледано према површини. Зграде реализоване пре овог периода су, осим релативно мале заступљености, често веома специфичних структура или под одређеним режимом заштите, што питања енергетских перформанси, а која су основ истраживања, ставља у други план.

Истраживањем се, у ствари, посматра специфичан сегмент укупних карактеристика грађевинског фонда, и то енергетске перформансе зграда изражене преко перформанси елемената термичког омотача, тако да се детаљније може рећи да је предмет истраживања, у ствари, сам фасадни (термички) омотач зграда. Као што је раније речено, укупне перформансе зграда зависе од различитих

чишилаца: локационих, волуметријских, програмских и употребних које у својој међусобној корелацији одређују оквир енергетског понашања. Истовремено, енергетско поље испољавања овог понашања представља сам омотач што је, од раније, препознато и законским актима, увођењем минималних параметара које сваки сегмент мора да прорачунски испуни. Састав различитих склопова, решавање начина конструисања, детаљи веза и монтаже, односно финализација, су, у фази реализације, препуштени, у највећој мери, извођачима, односно произвођачима материјала и елемената, без јасних смерница и поступака валоризације квалитета финалних производа тј. зграда. Посебан проблем представља и решавање детаља које не само да би требало да обезбеди адекватне конструктивне и термичке карактеристике, већ и непромењене перформансе примењених решења током дужег временског периода експлоатације. Некадашњи каталози детаља који су били саставни делови прописа из области грађевинске физике се углавном не користе а нови, усклађени са актуелном праксом, нису ни дефинисани. Пројектанти, често руковођени атрактивношћу решења расположивих на тржишту, примењују она која нису проверена или у локалним условима атестирана, што касније има значајне негативне последице и захтева обимне санационе радове уз велика материјална улагања.

Постојећи грађевински фонд Србије у посматраном периоду поседује, такође, изразит варијетет појавних облика фасадних склопова који се, као последица нашег односа према питањима одржавања, налазе у веома разноврсном квалитативном стању. Обсервацијом на терену можемо приметити разноврстан третман, од објеката који су у потпуности препуштени сами себи, преко оних који су на одређени начин, у већој или мањој мери, санирани или потпуно реконструисани. Сви ови случајеви имају свој карактеристичан енергетски биланс, а његова валоризација би тек требало да се изradi.

I.2.3. Значај предмета истраживања

Савремени тренутак архитектонске праксе је у великој мери окренут питањима енергетске ефикасности, како са аспекта теоретских поставки, тако и са аспекта утврђивања перформанси објеката и њихове валоризације, базирано на процедури сертификације путем издавања „сертификата енергетских

перформанси“ (*Energy performance certificates - EPC*). У већини европских земаља процедуре су везане за прорачунске методе, док за провере квалитета извођења и функционисања постоје посебне процедуре и уредбе, односно норме. У нашој пракси, однедавно је у примени принцип сертификације зграда, док питањима валоризације изведеног стања није посвећена посебна пажња.

У контексту нашег друштва, значај предмета истраживања докторске дисертације огледа се у двоструком теоретско - практичном оквиру, а конкретно се може препознати кроз:

- утврђивање методолошког оквира испитивања енергетских карактеристика фасадног омотача употребом термовизијског снимања усаглашеног са релевантним стандардима и потребама праксе,
- утврђивање оперативних метода којима би се омогућила адекватнија примена актуелне европске и националне законске регулативе у овој области
- увођење методе термовизијског снимања у актуелну праксу верификације квалитета фасадних омотача стамбених зграда,
- утврђивање конкретних препорука и референтних услова за примену методе термовизијског испитивања енергетских карактеристика,
- дефинисање типолошких одредница фасадних омотача стамбених зграда друге половине двадесетог века са аспекта материјално конструктивних карактеристика, и
- класификацију недостатака омотача зграда посматраног периода исказаних преко њихових енергетских карактеристика.

Теоретски оквир значаја истраживања се карактерише аспектима друштвеног значаја, где се пре свега сагледава потенцијал промене актуелне праксе верификације квалитета, уз његово усаглашавање са актуелним трендовима и европском регулативом, што за импликацију има формирање нових профила стручњака и потребу за њиховим одговарајућим образовањем.

Практични оквир се односи на развој конкретних препорука и процедура које би омогућиле адекватну примену методе уз референсирање на унапред истражене случајеве, односно класификацију уочених практичних недостатака.

I.2.4. Операционо одређење предмета истраживања

Предмет истраживања се може сматрати да је одређен просторном дистрибуцијом карактеристичких типова грађевинског фонда, у складу са претходним истраживањима, што би практично значило целокупном територијом Србије. Анализирајући идентификоване појавне облике, као и њихове материјалне карактеристике, просторно одређење можемо сузити на ширу територију Београда. Простор града Београда се карактерише великом дисперзијом и изузетном разноврсношћу појавних облика стамбених зграда, а процентуална заступљеност у оквиру структуре грађевинског фонда Србије, како по броју станова, тако и према њиховој површини, гарантује адекватну репрезентативност и може се сматрати релевантном за целокупну територију Србије.

Предмет истраживања је одређен временским интервалом од после Другог светског рата, до краја прве декаде 21. века, односно доношења нових прописа у вези са енергетском ефикасношћу зграда. Посматрани период се карактерише најинтензивнијом стамбеном градњом, која данас чини више од 90% укупног грађевинског фонда. Даљим структурирањем, можемо раздвојити три карактеристична подпериода који се одликују специфичним материјално технолошким решењима а самим тиме и енергетским карактеристикама:

- Први период од 1945. до 1970. године. Он обухвата изградњу објеката традиционалним методама и техникама, у форми претежно масивних зиданих конструкција реализованих директно на локацији, без примене термоизолационих материјала.
- Други период од 1970. до друге половине осамдесетих година и закључно са 1987. годином. Овај период је везан за масовну примену префабрикованих индустријализованих система, када кроз индустријске процесе производње грађевинских материјала и компоненти долази до значајног унапређења традиционалног начина грађења уз примену термоизолационих материјала
- Трећи период покрива изградњу објеката од 1987. године до 2011. и доношења нових прописа. Основна карактеристика овог временског интервала је промена друштвено - економских односа и, нарочито, услова тржишта и карактерише се напуштањем масовне префабриковане изградње

објекта и преласка на унапређене традиционалне, као и, у мањој мери, савремене индустријализоване системе грађења.

I.3. Научни циљ истраживања

У складу са предметом истраживања, дефинисани су и циљеви истраживачког рада на дисертацији. Један од основних циљева истраживања је успостављање методолошко - практичне корелације између процене енергетских карактеристика фасадног омотача стамбених зграда и методе термовизијског снимања. У функцији овог циља, неопходно је и дефинисање процедура примене термовизијског снимања у конкретним условима градитељске праксе Србије:

- принципа фотографисања (однос целина-делови, принципи одређивања зона детаљног испитивања),
- одређивања зона уочених недостатака (метод верификације),
- одређивање прага грешке,
- нумеричке квантификације добијених резултата.

Како би се омогућила практична примена резултата истраживања, један од циљева је и формирање каталога карактеристичних склопова фасадних омотача стамбених зграда Србије са приказима референтних термограма и експликацијом уочених енергетских карактеристика у складу са препорукама дефинисаним одговарајућим стандардом, као и дефинисање нивоа ограничења и смерница примене методе.

I.4. Задаци истраживања

Основни задаци истраживања су постављени у функцији циљева и могу се сумирати следећим ставкама:

- Разматрање и формулисање односа методолошког оквира примене термовизијског испитивања енергетских карактеристика фасадних омотача и практичне примене у конкретним условима.
- Формулисање правила и процедуре процеса снимања у циљу добијања адекватних резултата:
 - начина извођења снимања,
 - одређивања према објекту снимања,

- одређивања према климатским и другим условима снимања,
 - начин формирања слике целине,
 - начин одређивања неадекватних делова у оквиру целине,
 - начин дефинисања типа недостатака,
 - начин процене утицаја уочених недостатака,
 - начин одређивања енергетских перформанси анализираног дела
- Класификација појавних облика омотача грађевинског фонда према примењеним техничко – материјалним решењима, прорачунским енергетским карактеристикама и њиховим енергетским перформансама идентификованим термовизијским снимањем.
 - Класификација референтних термограма са објашњењима уочених перформанси и њиховим нумеричким показатељима.
 - Класификација неодговарајућих услова за примену методе и објашњење потенцијалних грешака које произилазе из овакве употребе.

I.5. Основне хипотезе

Основна радна хипотеза дисертације је да се реалне карактеристике, квантитативне и квалитативне вредности енергетских перформанси термичких омотача стамбених зграда у процесу експлоатације могу изузетно ефикасно и веома тачно утврдити методом термовизијског снимања.

Осим основне, дефинисане су и посебне (секундарне) хипотезе:

- Приликом анализе енергетских перформанси постојећих објеката за које немамо одговарајуће информације о саставу фасадног омотача, примена компаративне анализе снимака са терена и карактеристичних појавних облика из типологије са референтним термограмима пружа веома прецизне податке, без захтева за обимним истражним радовима.
- Дијагностиковање зона пропадања термичког омотача зграда, нарочито у случајевима када, још увек, није дошло до настанка видних оштећења, је непосредно и ефикасно могуће идентификовати методом термовизијског снимања.

I.6. Методе истраживања

Имајући у виду претходно изложене циљеве и задатке истраживања у раду су коришћене следеће опште и посебне методе:

- Критичка анализа и систематизација доступне грађе о посматраном сегменту грађевинског фонда (архивска грађа, пројектна документација, статистички подаци, публиковани резултати претходних истраживања) као и методи термовизијског снимања и њеној примени у пољу процене енергетских перформанси зграда
- *In situ* испитивање репрезентативног узорка типолошких модела дефинисаних у току процеса истраживања, термовизијским снимањем и контролним снимањима бесконтактним и, када је то могуће, контактним методама.
- Математичко моделирање карактеристичних склопова репрезентативног узорка типолошких модела коришћењем одговарајућих 2Д симулационих софтвера.
- Компаративна анализа моделских и експерименталних резултата.
- Критичка анализа и систематизација добијених резултата.

I.7. Очекивани резултати и њихова практична примена

Са аспекта применљивости, истраживање анализира и приближава свакодневној пракси методу термовизијског снимања и процене енергетских перформанси објеката. Оно формулише процедуре и принципе коришћења термовизијског снимања у поступку процене перформанси омотача зграда и даје прегледни каталог појавних облика типологије омотача стамбених зграда са референтним термограмима и проценама перформанси омотача, чиме професионалцима пружа значајан основ за даље компаративне анализе.

Друштвени значај истраживања се огледа у третману предмета истраживања, где се остварује процена енергетских карактеристика омотача стамбених зграда а самим тиме формира и база за доношење адекватних одлука на пољу формирања стратегија и принципа управљања грађевинским фондом, нарочито у домену

побољшања енергетске ефикасности зграда. Квантификацијом резултата и њиховим транспоновањем на целокупни грађевински фонд Србије може се извршити и процена укупног потенцијала обнове што је од изузетног значаја за развој грађевинске праксе.

Истовремено се тема термовизијског снимања приближава конкретној примени у пракси и тиме пружа одговарајућа база за образовање кадрова у овој области.

II. ГРАЂЕВИНСКИ ФОНД СТАМБЕНИХ ЗГРАДА СРБИЈЕ У ПЕРИОДУ 1945-2011

II.1.Појам и систематизација

Методолошка полазишта анализе стамбеног фонда базирана на принципу типологије су релативно новијег датума и углавном се везују за истраживања која су посвећена питањима енергетских перформанси. Једно од првих истраживања које је за циљ имало класификацију дела грађевинског фонда који чини корпус стамбених зграда израђено је у оквиру научног пројекта „Енергетска оптимизација зграда у контексту одрживе архитектуре” (НИП283) који је у периоду од 2002-2005 године спровођен на архитектонском факултету у Београду (Јовановић Поповић, 2003). Разматрањем основних методолошких полазишта неопходних за формирање типологије дошло се до закључка да се целокупан процес састоји, у ствари, од две једнако битне фазе: формулације генеративних карактеристика типова зграда и прикупљања података о грађевинском фонду неопходних за извођење одговарајућих истраживања односно постизања релевантности статистичких процена. Прва активност ближе дефинише основне критеријуме односно одређује њихове тежинске факторе, са циљем класификовања зграда а имајући у виду њихове енергетске перформансе. У овом процесу се, као најбитнији, аспекти генерисања типологије издвајају:

- волуметријско - урбанистички, који ближе сагледавају „просторне“ карактеристике зграде односно њену форму и положај у односу на друге зграде,
- конструктивно материјални, који одређују врсту фасадног омотача прецизније његову структуру, примењене склопове и материјале
- Инсталациони системи грејања, припреме санитарне топле воде и осветљења. У спроведеном истраживању ови параметри су идентификовани и делимично анализирани, али нису утицали на сам процес класификације зграда. (Јовановић Поповић, Игњатовић, 2003).

По одређивању основних критеријума формулације типова потребно је на, статистички релевантан начин, одабрати и предмет конкретног истраживања,

односно, услед очигледне немогућности анализе целокупног фонда, формирати оговарајући, статистички узорак и за њега прикупити све неопходне податке. Управо је зависност од прикупљања, обраде и класификације података представљала једно од највећих ограничења за шире истраживање на националном нивоу те је фокус, у процесу рада на пројекту, усмерен на град Београд и то само на сектор колективног становања.

Основни проблем са којим се сусрећемо приликом, на овај начин, дефинисаног аналитичког третмана грађевинског фонда се огледа у непостојању обједињених база података, како на националном тако ни на локалном нивоу. Већина истраживања, у области анализе грађевинског фонда, стога полази од јединих документованих и стручно валидних података који су јавно доступни а то су резултати пописа. Поред изузетног значаја који ови подаци имају пружајући нам прецизне информације о великом броју карактеристика, а пре свега: броју станова, укупној изграђеној површини, структури станова према броју соба, опремљености инсталацијама и др, они нам, са друге стране не пружају довољно података од значаја за истраживања везана за саме зграде, типовима, односно о њиховом броју, прецизнијим материјалним карактеристикама и, нарочито, перформансама.¹

II.1.1.1. Национална типологија стамбених зграда

На основу претходног истраживања закључено је да је, у свим случајевима када доступност података представља озбиљно ограничење за даљи рад, неопходно приступити стручно дефинисаном „узорковању“ и статистичким проценама како би се приступило примени типолошког модела који даје одговарајућу релевантност и прегледност резултата. Овакав приступ је и у широј стручној јавности, означен као један од основних полазишта за адекватну анализу постојећег стања грађевинског фонда али такође и као база за формирање даљих стратегија његовог очувања и, нарочито, унапређења.

¹ Пописни формулар са пописа из 2011. Године, свега у три питања обрађује саме зграде и то: старост зграде, врста зграде и тип материјала од којга сунаправљени спољни зидови <http://media.popis2011.stat.rs/2011/obraci/Upitnik-za-domacinstvo-i-stan-cirilica.pdf>, приступљено 15.8.2015.

Европски пројекат ТАБУЛА (*TABULA - Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*)², који је окупио 13 земаља чланица ЕУ и две придружене земље је у својој основи базиран управо на формирању јединствене методологије структурирања грађевинског фонда и дефинисању модалитета његовог унапређења. Србија је, преко истраживачког тима са Архитектонског факултета, као једина земља ван ЕУ остварила учешће на пројекту у статусу придруженог члана, чиме је, у великој мери, настављен и значајно унапређен претходни рад у овој области. Као основни резултат пројекта формирана је „Национална типологија стамбених зграда Србије“ (слика II.1), која приказује сет „моделских“ зграда илуструјући појединачно статистички дефинисане генеративне карактеристике типичних зграда преко одабраних реалних примера са територије целе Србије.

Национална типологија је формирана на основу принципа постављених *TABULA* пројектом уз уважавање локалних специфичности и непосредног истраживања на терену које је обављено у периоду 2010-2012.

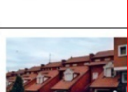
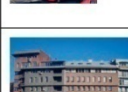
Формиране су, у ствари, две варијанте типологије од којих је једна усаглашена са европским заједничким приступом и методима прорачуна док је друга усаглашена са националном особеностима (приказана на слици II.1) и регулативом у области енергетске ефикасности која условљава принцип прорачуна, а која је у току рада на пројекту ступила на снагу.

Прикупљени подаци су, помоћу за ову потребу израђеног софтверског пакета³, накнадно контролисани и систематизовани што је резултирало формирањем базе за преко 23500 зграда пописаних на територији Србије (без Косова и Метохије).

² <http://episcopo.eu/iee-project/tabula>, приступљено 12.8.2015.

³ А. Рајчић, *Софтвер за обраду базе података грађевинског фонда*, некомерцијална верзија за интерну употребу, Архитектонски факултет у Београду, 2012,

Процес рада на формирању типологије није био једносмеран нити једноставан. Наиме, услед специфичности предмета истраживања, и непостојања ранијих искустава у овој области, било је неопходно спровести два независна пописа по различитим методологијама како би се „ухватиле“ све релевантне карактеристике и оставрила одговарајућа типолошка заступљеност. Теренски рад је обављен у два маха током, 2011. када је обрађено 6000 зграда и током 2012. обрадом 17500 зграда, према унапред дефинисаним упитницима формираним од стране истраживача са Архитектонског факултета. Овом приликом је сакупљена и

Тип	породично становање (до 4 стана) family housing (up to 4 appartments)		вишепородично становање (више од 4 стана по улазу) multifamily housing (more than 4 appartments per entrance)			
	1  слободностојећа Freestanding	2  у низу In a row	3  слободностојећа Freestanding	4  ламела Lamela	5  у низу In a row	6  солитер High-rise
А < 1919.						
Б 1919-1945						
Ц 1946-1960						
Д 1961-1970						
Е 1971-1980						
Ф 1981-1990						
Г 1991-2011						

Слика II-1 Матрица „Националне типологије стамбених зграда Србије“ са назначеним предметом истраживања (извор: Јовановић Поповић и др., стр 14. 2013б)

публикована значајна количина података⁴ који су, касније, омогућили адекватно структурирање целокупног фонда, дефинисање појединачних типова и прорачун њихових енергетских перформанси. Од посебне важности за ово истраживање су подаци о фасадним склоповима, њиховом саставу и материјалима који су прикупљани обсервацијом на терену, интервјуисањем власника објеката и проучавањем расположиве архивске документације.

На приказаној илустрацији (Слика II.1), можемо видети финално усвојену типологију зграда са класификацијом према типу становања и појавним облицима. Примарна подела је извршена на породично становање (слободностојеће куће и куће у низу) и вишепородично становање (слободностојеће зграде, ламеле, зграде у низу и солитери) уз усвојену временску класификацију, где разликујемо следеће периоде: пре 1919, 1919-1945, 1946-1960, 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 и 1991-2011. Усвајање временске периодизације је извршено на основу идентификације битних историјских догађаја (светски ратови), односно година када су спровођени национални пописи.

У контексту дефинисаног грађевинског фонда, предмет истраживања ове дисертације представља корпус зграда изграђених у периоду после Другог Светског рата (период 1946-2011) са фокусом на сектор колективног становања (означено на слици II.1).

Простим сагледавањем структуре грађевинског фонда према типу објеката, на основу података развијених према ТАБУЛА пројекту (табела II 1)⁵ исказане преко проценуталне заступљености броја станова закључује се да је, у Србији, апсолутно доминантан сектор индивидуалног становања.

⁴ Резултати истраживања су публиковани у три монографије; *Атлас породичних кућа Србије/Atlas of Family housing in Serbia* (Јовановић, Поповић М. Игњатовић, Д. (ур). 2012), *Атлас вишепородичних зграда Србије/Atlas of Family housing in Serbia* (Јовановић, Поповић М. Игњатовић, Д. (ур) 2013ц), *Национална типологија стамбених зграда Србије/National Typology of Residential Buildings in Serbia* (Јовановић Поповић, М. Игњатовић Д. (ур) (2013б) односно у виду каталога типичних зграда – *Национална типологија стамбених зграда Србије - Националне брошуре* (Јовановић Поповић, М. Игњатовић Д. (ур) (2013а)

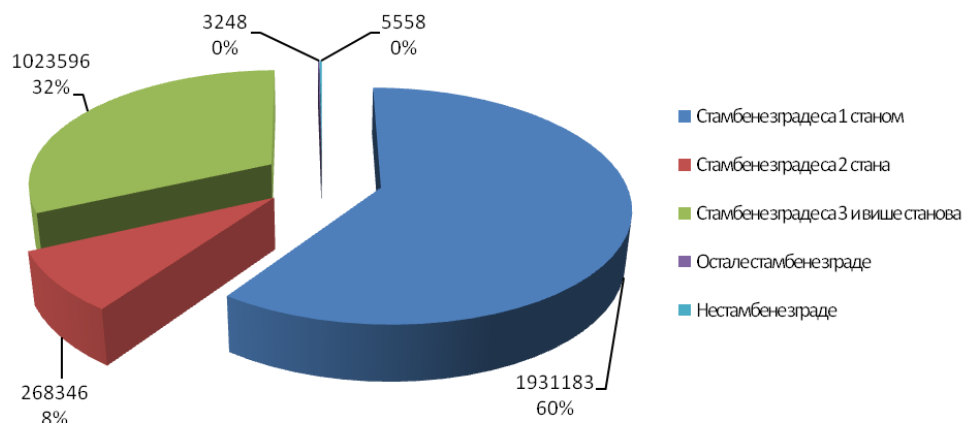
⁵ Приликом креирања националне типологије стамбених зграда израђене су две матрице: са 4 типа стамбених зграда у складу са ТАБУЛА принципима (налази се на званичном сајту пројекта www.episcorpe.eu) и са 6 типова стамбених зграда према истим принципима али уз уважавање локалних специфичности. Овде је приказана табела статистичких података друге, локално релевантније матрице.

Табела II-1 Процентуална заступљеност типова зграда према броју станова и усвојеној периодици (на основу резултата ТАБУЛА пројекта)

		п о р о д и ч н о		в и ш е п о р о д и ч н о				
		слободностојеће	у низу	слободностојеће	ламела	у градском блоку	солитер	
		1	2	3	4	5	6	
A	пре 1919	3.70%	0.55%	0.03%	0.02%	0.09%		4.40%
B	1919-1945	6.15%	0.35%	0.38%	0.08%	0.57%		7.53%
C	1946-1960	9.09%	0.38%	0.61%	0.43%	0.53%	0.06%	11.11%
D	1961-1970	11.92%	0.74%	2.19%	0.98%	0.67%	0.52%	17.02%
E	1971-1980	15.53%	0.70%	3.33%	3.18%	0.84%	0.94%	24.53%
F	1981-1990	13.67%	0.72%	3.03%	2.50%	0.81%	0.35%	21.09%
G	1991-2011	9.15%	0.43%	2.35%	1.22%	1.18%		14.34%
		69.22%	3.87%	11.94%	8.40%	4.70%	1.87%	100.00%

Уколико ове податке упоредимо са званичним резултатима пописа из 2011 (попис 2011, књига 27) (слика II 2), уз напомену да је приликом извођења пописа извршена другачија класификација зграда и то: зграде са једним станом, са два стана, са три и више станова и остале зграде, и уколико сматрамо да је већина зграда са три и више станова, по типу вишепородичног становања, можемо закључити да су трендови готово идентични, што само потврђује релевантност истраживања. У публикованим резултатима пописа не постоји веза између типа стамбене зграде и старости а која је од великог значаја за даља разматрања структуре грађевинског фонда, тако да ће се већина процена базирати на резултатима истраживања ТАБУЛА пројекта док ће званични подаци, добијени обрадом пописа из 2011. године, бити коришћени као контролни.

Иако индивидуално становање обухвата значајан сегмент укупног броја зграда Србије, оно је изостављено из предмета истраживања првенствено као последица постојања великог броја варијетета појавних облика, значајних утицаја локалних особености и, што је још битније, примењених конструктивних и материјалних решења који веома често нису изведени у складу са одговарајућом градитељском регулативом и правилима струке. Сектор индивидуалне градње је, у прошлости, остао на маргини друштвених интересовања, препуштен иницијативи и могућностима појединаца без праве стручне контроле, чак и када су за градњу коришћени тзв. типски пројекти опремљени ваљаном пројектном документацијом.



Слика II-2 Заступљеност типова зграда, укупно 3231931 станова (према подацима из Пописа становништва, домаћинства и станова 2011, књига бр.27)

Са друге стране, питања везана за сектор колективног становања се могу сматрати универзалнијим с обзиром да постоји значајнија униформност појавних облика и њихових материјалних карактеристика омогућавајући већу применљивост резултата који проистекну из истраживања а самим тиме и већи друштвени значај. Зграде колективног становања су у већини случајева пројектоване и реализоване у складу са, у том тренутку, важећом законском регулативом што гарантује одређени ниво квалитета односно обезбеђује прецизнију валоризацију постигнутих у односу на пројектоване перформансе.

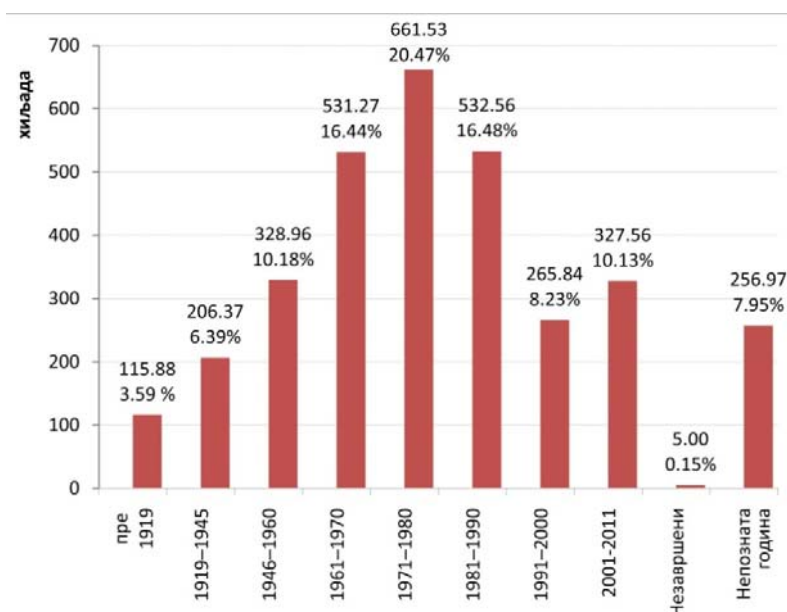
Временска одредница предмета истраживања која се везује за период после Другог Светског рата је изабрана услед изразите промене доктрине грађења, која је наступила у тадашњој Југославији. Она представља јасан заокрет у третману грађења а за последицу има значајнију симплификацију појавних облика, једноставнијег архитектонског речника без изразитих стилских елемената (Благојевић, 2007). Старије зграде, статистички гледано, чине релативно мали сегмент грађевинског фонда, око 10%, (слика II 3) и карактеришу се разноврсним појавним облицима, системима градње, примењеним материјалима а често су обухваћене режимима заштите градитељског наслеђа, што захтева другачији третман и специфичне системе валоризације. Такође ове зграде су неретко, у склопу фасадних омотача, реализоване са израженом фасадном пластиком што, у одређеној мери, чини испитивање методом термовизијског снимања неприменљивом у општем смислу захтевајући посебан третман.

Сужавајући поље интересовања на период 1946-2011. године, обухвата се 90% фонда колективних зграда од којих већина поседује велику материјалну вредност и налази се у континуираној употреби од датума изградње.

II.2. Прописи из области термичке заштите

Ради бољег разумевања перформанси, односно адекватног одабира карактеристичних појавних облика фасадних омотача морамо се и осврнути на прописе из области термичке заштите који су у великој мери утицали на структуру зидова и примењене материјале. Детаљнија историјска анализа прописа из ове области у Србији извршена је истраживањем у оквиру научног пројекта „Енергетска оптимизација зграда у контексту одрживе архитектуре“ (Радивојевић, 2003).

Непосредно по завршетку Другог светског рата основни постулати стамбене изградње су били окренути темама обнове, брзине изградње са жељом креирања нове структуре и културе становања, фаворизовањем вишепородичног (колективног) модела. Питања из области термичке заштите се јављају тек педесетих година прошлог века као последица угледања на страну регулативу и масовнију примену армираног бетона у пројектовању и материјализацији зграда. (Ђукановић, 2015)



Слика II-3 Станови према години изградње – укупан број станова и процентуално учешће у грађевинском фонду (према подацима из Пописа становништва, домаћинстава и станова 2011, књига бр.20)

Први прописи који у основи обрађују питања везана за термичке перформансе се јављају 1967. године, доношењем *Правилника о минималним техничким условима за изградњу станова* где се по први пут јавља, и то у само једном члану, тема перформанси омотача кроз дефинисање максималне вредности коефицијента пролаза топлоте за обимне зидове (према климатским зонама) и равне кровове али без детаљнијег упутства за прорачунавање.

Недуго затим доносе се први прописи искључиво посвећени проблемима топлотне заштите зграда *Правилником о техничким мерама и условима за топлотну заштиту зграда* из 1970. Он даје максималне вредности коефицијената пролаза топлоте, уводи климатске зоне са пројектним температурама и дефинише карактер конструкције (лаке или масивне) за које се ови коефицијенти односе. Правилник уводи и максималне коефицијенте пролаза топлоте за прозоре и врата као и коефицијенте пропустљивости. Такође се разматра и потреба да конструкције буду заштићене од влажења, било као последица атмосферских утицаја, било као последица процеса дифузије, али без даљих смерница за прорачун.

Значајнији помак у третману питања везаних за топлотну заштиту се десио 1980. године доношењем целог сета стандарда који на обједињени начин сагледавају проблеме ове области и истовремено детаљније дефинишу услове и методе прорачуна. Основни документ је представљао *Правилник о југословенским стандардима за топлотну технику у грађевинарству* којим је дефинисан сет пратећих, обавезујућих, стандарда. На овај начин је омогућено да се стандарди појединачно иновирају и допуњују без потребе за доношењем новог правилника чиме се значајно убрзава процедура и поједностављује процес евентуалног иновирања. Основни стандарди обухваћени правилником су:

- Топлотна техника у грађевинарству. Методе прорачуна коефицијената пролаза топлоте у зградама ЈУС.У.Ј5.510.
- Топлотна техника у грађевинарству. Методе прорачуна дифузије водене паре у зградама ЈУС. У.Ј5.520.
- Топлотна техника у грађевинарству. Методе прорачуна карактеристика топлотне стабилности спољашњих грађевинских конструкција зграда за летње раздобље ЈУС. У.Ј5.530,

- Топлотна техника у грађевинарству. Технички услови за пројектовање и грађење зграда ЈУС. У.Ј5.600.

Стандарди су донели нове, строжије, коефицијенте пролаза топлоте за све елементе омотача зграда уз дефинисање начина прорачуна дифузије водене паре. Такође по први пут се регулише питање топлотне заштите у летњем периоду увођењем провера фактора пригушења амплитуде осцилације температуре као и временског помака фазе осцилације температуре. Овим стандардима се препознаје и комплексност самих конструкција, те се по први пут јавља подела на хомогене и конструкције једноставне, односно сложене хетерогености, као и специфичности прорачуна вентилисаних конструкција.

Нове верзије прописа су донете 1987. године и настале су као последица измена концепта прорачуна термичких карактеристика зграда увођењем укупних специфичних топлотних губитака (трансмисионих и вентилационих) што је за резултат имало измене стандарда ЈУС У.Ј5.510. и ЈУС У.Ј5.600. На овај начин се, у ствари, уводи провера перформанси целокупне зграде, уз детаљнији прорачунски третман састава самих фасадних склопова, њихових спојева као и степена вентилисаности.

Мање допуне и измене стандарда су се дешавале у периоду до 1998. године корекцијама стандарда ЈУС У.Ј5.600 из 1989, ЈУС У.Ј5.530 из 1990, ЈУС У.Ј5.520 из 1997. односно поновним корекцијама ЈУС У.Ј5.600 из 1998. која вероватно представља и најкоренитију промену увођењем процедуре сагледавања топлотних губитака на нивоу карактеристичних просторија, поред сагледавања укупних губитака на нивоу зграде, што представља концепт који никада није заживео у пракси.

Тек 2011. године долази до поновног иновирања законских и подзаконских аката у овој области усвајањем *Правилника о енергетској ефикасности зграда* (Службени гласник РС 61/2011) чиме се домаћа регулатива усклађује са европским стандардима и принципима прорачуна. По први пут се уводи тема енергетске ефикасности зграда при чему се енергетски ефикасном сматра она зграда која задовољава све прописане услове комфора уз минималну, прописану, потрошњу енергије. У зависности од прорачунског нивоа потребне енергије одређује се тзв. енергетски разред зграде чије су граничне вредности дефинисане

другим подзаконским актом који је једночасовно донет, односно *Правилником о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда* (Службени гласник РС 61/2011), и оне су исказане, у зависности од типа објекта, као потребна енергија за грејање обрачуната по квадратном метру. Правилником о енергетској ефикасности зграда узимају се у обзир укупне енергетске потребе зграде; за грејање, хлађење, вентилацију, припрему санитарне топле воде и осветљење. Додуше, с обзиром на сложеност прорачуна, наглашава се да ће се до појаве одговарајућег националног софтверског пакета (у тренутку писања овог рада још увек није донет тзв. „национални софтвер“) енергетски разред исказивати преко потребне енергије за грејање. Приликом прорачуна енергије узимају се у обзир сви губици (трансмисиони и вентилациони) кроз омотач, губици у системима за снабдевање топлотном енергијом који настају у објекту али се истовремено рачунају и добици енергије који се јављају од спољашњих (сунчевог зрачења) и унутрашњих извора (људи и опреме). Правилник такође доноси и нове, знатно строжије, граничне вредности коефицијента пролаза топлоте за елементе омотача које важе за све нове али и постојеће зграде које се реконструишу, дограђују или обимније санирају, док су питања из области пародифузије и летње стабилности такође усаглашена са новим европским стандардима, уз могућност задржавања и примене претходно важећих начина прорачуна.

Историјски гледано, не могу се једнозначно поредити захтеви из области термичке заштите, првенствено због повећавања и комплексности прорачуна. Од провере коефицијената пролаза топлоте у иницијалним актима, стигло се до прорачуна укупних перформанси објекта, укључујући и све инсталиране техничке системе. Један од параметара који се историјски консеквентно може пратити је коефицијент пролаза топлоте који нам даје оквирни приказ поштравања прописа из ове области. (табела II 2)

Табела II-2 Преглед прописаних вредности коефицијената пролаза топлоте за другу климатску зону (Ђукановић 2015, стр. 130)

Елемент склопа зграде	DIN 4108 1952.	Правилник 1967.	Правилник 1970.			JUS U.J5.600 1980.			JUS U.J5.600 1987.	JUS U.J5.600 1998.	Правилник о ЕЕ зграда 2011.	
	коэф. пролаза топлоте $k[W/m^2K]$	коэф. пролаза топлоте $k[W/m^2K]$	врста грејања	коэф. пролаза топлоте $k[W/m^2K]$	примена	врста грејања	коэф. пролаза топлоте $k[W/m^2K]$	примена	коэф. пролаза топлоте $k[W/m^2K]$	коэф. пролаза топлоте $k[W/m^2K]$	постојећа зграда $U [W/m^2K]$	нова зграда $U [W/m^2K]$
Спољни зид	1,56	1,14		1,07	с		0,93	с	0,90	0,90	0,40	0,30
Преградни зидови између станова			лг	1,37	с	лг,рцг кцг	1,85 2,82	с	1,85		0,90	0,90
Преградни зидови према негрејаном степеништу			лг	1,37	с	лг,рцг кцг	1,85 2,82	с	0,90	0,8	0,55	0,40
Преградни зидови према грејаном степеништу			цг >10 °C	2,14	с	лг,рцг кцг	1,85 2,82	с	1,85	1,85	0,90	0,90
Спољни зидови у тлу									0,90	0,90	0,50	0,35
Зид на дилатацији (између зграда)										1,00		
Међуспратна конст. између станова			лг	1,03	с	лг,рцг	1,38	с	1,35		0,90	0,90
			цг	1,72		кцг	2,22					
Под на тлу				0,69	с		0,76		0,75	0,90	0,40	0,30
Међуспратна конст. према тавану (испод негрејаног простора)	0,80			0,86	св		0,69	св	0,80	0,80	0,40	0,30
				1,12	тм		0,94	тм				
Међуспратна конст. изнад подрума (изнад негрејаног простора)	1,01			0,77	св		0,63	св	0,60	0,60	0,40	0,30
				1,03	тм		0,87	тм				
Међуспратна конст. изнад отворених пролаза				0,43	св		0,46	св	0,45	0,45	0,30	0,20
				0,56	тм		0,59	тм				
Међуспратна конструкција у тлу										0,95	0,50	0,40
Раван кров изнад грејаног простора		0,96		0,69	св		0,65	св	0,65	0,45	0,20	0,15
				1,12	тм		0,83	тм				
Раван кров изнад негрејаног простора										0,60	0,40	0,30
Кос кров изнад грејаног простора	1,46			0,69	св		0,65	св		0,45	0,20	0,15
				1,12	тм		0,83	тм				
Кос кров изнад негрејаног простора										0,60	0,40	0,30

лг-локално грејање; рцг-регулисано централно грејање; кцг-континуирано централно грејање; с-свако место; св-средња вредност; тм-топлотни мост

II.3. Примењени техничко-технолошки системи, материјализација

Фасадни склопови стамбених зграда, према својој концепцији и материјализацији, представљају резултат већег броја утицајних фактора од којих су неки плански или законски дефинисани, док други представљају резултат друштвених односа и жеља, односно, економске моћи, али истовремено и закона тржишта односно расположиве технологије градње и материјала. Историјски разматрано, можемо уочити неколико фаза у развоју материјално-технолошких решења фасадних склопова у Србији у периоду после Другог светског рата.

Први карактеристични период започиње непосредно по окончању рата и траје све до шездесетих година прошлог века, са основним обележјем у виду развоја масовне стамбене изградње. Она представља одговор на захтеве за обезбеђивањем довољне количине станова, обновом разрушених делова земље⁶ и, што је значајније, тежње за коренимом друштвеном трансформацијом. Иако је индустријализација основна премиса свеукупног развоја па и сектора грађевинарства, у овом периоду се услед објективног стања послератне привреде примењују стара технолошка решења грађења и материјали који су били локално на располагању. Одсуство квалификоване радне снаге за резултат има коришћење традиционалних технологија масивне градње симплификоване завршне обраде. Просторно гледано, грађевинска иницијатива је углавном окренута ка градовима где се врши реконструкција у оквиру постојећег градског ткива изградњом појединачних објеката или нових блокова али и изградња потпуно нових насеља намењених првенствено обезбеђивању смештаја за растућу радничку класу. Ова насеља се карактеришу унифицираном градњом зграда по идентичном обликовном моделу, најчешће павиљонског типа. Изградња је конципирана у складу са важећом социјалистичком доктрином и прописима према веома скромним нормативима, сведених обликовних и материјалних решења често без икакве жеље за достизањем неког вишег архитектонског израза, што је нарочито приметно у завршној обради (Кадиевић, 2008). Једноставност израза, јефтине и локално доступни материјали и унифицираност ионако малог броја детаља,

⁶ Скоро четвртина предратног грађевинског фонда уништена је, од чега су више од половине, око 85000 зграда, чинили стамбени објекти (Добривојевић, 2013).

скромног стандарда опремања би биле основне карактеристике зграда из овог периода.

Послератни период се карактерише, између осталог, и формирањем великих грађевинских предузећа која су замишљена као носиоци процеса изградње способни да одговоре на изазове новог социјалистичког друштва а међу првима се формирају „Комграп“, „Рад“ и „Трудбеник“. Утицај који су ова предузећа имала на процес грађења се огледа у стварању потпуне државне контроле над процесом грађења без икакве тржишне конкуренције и инсистирању на обавезности примене индустријализованих система (Ђукановић, 2015).

Други, карактеристични период градње се може сматрати да обухвата период од краја 1950-их до прве половине 1970-их година, где се као основни обједињујући принцип јавља промена доктрине градње, развој технологија грађења и система материјализације а самим тиме и архитектонског израза. Основ за измене односа у станоградњи представљају законске одредбе из 1959. године које регулишу финансирање стамбене изградње увођењем доприноса чиме се ствара економска база за нову стамбену политику. У овом периоду долази до масовне изградње, највише у виду нових насеља (блокова) по јединственим - типизираним моделима уз примену индустријализованих поступака по принципу тзв. *концентрисаног грађења*⁷ са основним циљем смањења трошкова. Период до 1965. године, назван *прва стамбена реформа*, је доминантно вођен идејама рационализације, минималних стандарда док се наредна декада, која се још назива и *друга стамбена реформа* већ карактерише одређеним искорацима изван унифицираности и првим правим ауторским остварењима у корпусу преовлађујуће индустријализоване изградње. (Везилић, Стрмо и др, 2013) Ова промена се јавља услед развоја технологије, теоретско пројектантских модела али и појаве првих, тржишних односа у станоградњи, који су и даље под јаким утицајем државних монопола.

Са аспекта технологије градње и примењених материјала приметна је масовна употреба армираног бетона, развој и примена скелетних конструкција као и префабрикованих система: скелетних и панелних. Императив индустријализације

⁷ Идеја концентрисаног грађења подразумева примену индустријализованих система на минимум 1000 стамбених јединица што је утицало на формирање „социјалистичких блокова“ као функционално-просторних целина једнообразно конципираних и материјализованих.

је захтевао да све што се гради буде префабриковано или полупрефабриковано што за резултат има развој више од 20 различитих префабрикованих система, а са варијантама и више од 30 (Меџанов, 2014). Иако је већина ових система била више експериментална него што је имала примену у реалној употреби, појава јасно илуструје доминантне друштвене тенденције. Од свих система, на тржишту највише су у употреби били ИМС (скелетни преднапрегнути), Трудбеник, Неимар, Комграп и Ју-61 (панелни), (Домаћи монтажни системи стамбене изградње 1967). Фасаде зграда се најчешће изводе као префабриковане у виду хоризонталних трака у наизменичној смени са прозорима или као пуна фасадна платна. Ретки су примери префабрикованих фасадних панела са отворима у овом периоду. Такође је приметна и честа примена префабрикације у конструисању примарних склопова а потом, на лицу места, изведених класичних фасада као и других завршних радова, што у великој мери поништава саму идеју префабрикације. Жеља за постизањем новог архитектонског израза је евидентна, тако да се и на објектима где се не примењује префабрикација, она опонаша одговарајућим визуелним елементима – наглашавањем подела. Као што је већ раније речено, почиње и употреба термоизолационих материјала, најчешће постављањем плоча термоизолације са унутрашње стране бетонских зидова и парапета, односно у склопу пуних фасадних панела.

Период после 1975. године се карактерише поновном променом доктрине становања и начином уређења економских односа у стамбеној политици кроз појаву тзв. *Друштвено усмерене стамбене изградње* и *Самоуправно интересних заједница* (СИЗ-ова) у становању што донекле мења систем инвестирања и претпостављеног већег утицаја финалног корисника (купца) на конципирање, организацију и материјализацију стамбене градње (Везилић, Стрмо и др 2013). Замишљен као коренита промена у тржишним односима који је за циљ имао унапређење конкурентности уз смањење трошкова, нови систем организације стамбене градње је, у ствари, имао супротан ефекат смањујући укупан обим делатности. Овај период се може сматрати да траје све до краја осамдесетих година и обележен је као континуална рецесија у свим областима која је на крају и резултирала распадом заједничке државе. Осим унутрашњих друштвено-политичких, на пољу грађевинарства јак утицај имају и промене које су се десиле

на глобалном архитектонском плану. Напуштање концепата модерне се рефлектује на актуелне дизајнерске трендове Србије што за резултат има појаву нових обликовних решења, материјала, склопова и поступно смањење примене префабрикације. Фасадни склопови се израђују као сендвич конструкције са обавезном применом термоизолационих материјала, а у финалној обради се полако напушта употреба бетона и све више се користи фасадна опека. Од префабрикованих система се поред ИМСа (у међувремену допуњен и прилагођен различитим обликовним захтевима) користи још само Рад-Баланси који у својој концепцији представља систем крупнопанелне префабрикације са вишеслојним префабрикованим фасадним зидовима.

Трећи период градње почиње почетком деведесетих година и обележен је распадом Југославије, готово потпуним укидањем државних (друштвених) инвестиција и променама у друштвеним односима кроз напуштање социјалистичке идеологије и прелазак на квазикапиталистичке, односно касније либерално капиталистичке односе. Ове промене су се одразиле и на стамбени сектор првенствено преко укидања извора финансирања и промене власничких односа остварене кроз општу приватизацију стамбеног фонда⁸. Велика друштвена предузећа, некадашњи носиоци процеса изградње бивају приватизована и најчешће пропадају, чиме се губи њихов утицај а носиоци процеса постају мање, приватне фирме које немају нити економских нити техничких могућности за обимније грађевинске радове. Углавном се граде појединачни објекти, често у градском ткиву, једноставне технологије градње уз поновни повратак на масивне системе градње и коришћење опекарских производа односно ливење бетонских елемената. Префабриковани системи се, услед непостојања адекватног тржишта, потпуно напуштају а њихови носиоци пропадају. Производња грађевинских материјала и производа такође пропада или бива преузета од стране страних компанија што за резултат има смањени варијетет понуде, односно укидање локално развијених система и производа. Са аспекта материјализације, углавном се примењују зидане сендвич конструкције од опекарских производа, термоизолационог слоја и једноставних фасадних обрада. Напредак у

⁸ Основ за приватизацију станова представљала су два закона који су суштински променили четрдесетогодишње начине и изворе финансирања као и типове власничких односа: *Закон о стамбеним односима* (Сл Гласник СРС 12/90, 47/90), и *Закон о становању* (Сл Гласник РС 50/92)

материјализацији се јавља преко примене савремених фасадних система и материјала, али у веома малом обиму и најчешће за репрезентативне објекте.

Једна од карактеристика последњег периода је и учестала појава тзв. бесправне градње, како у сектору индивидуалног тако и, по први пут, колективног становања што често за последицу има грађење без поштовања прописа из области грађевинарства и перформансе које се не могу сматрати задовољавајућим.

II.4. Структура склопова – појавни облици, карактеристике, периодизација

Предмет истраживања у овом раду представљају енергетске перформансе карактеристичних склопова фасадних омотача као сегмента укупног термичког омотача зграде. С обзиром на примену компаративног метода испитивања перформанси прорачунским алатима и применом технике инфрацрвене термографије, потребно је извршити одговарајућу класификацију појавних облика. Сврха ове класификације није идентификација и каталогизација свих концепата и материјалних решења већ, базирано на подацима прикупљеним приликом формирања *Националне типологије стамбених зграда* као и проучавањем расположиве грађе, одабир најзаступљенијих појавних типова.

Варијетет позиција у склопу фасадног омотача објекта је веома велики и укључује неколико карактеристичних зона:

- позиције у контакту са тлом (решење сокле уколико зграда нема подрум односно подрумске конструкције које могу бити у потпуности или делимично укопане),
- фасадне позиције (односи се на типске фасадне конструкције у вишеспратним стамбеним зградама које по правилу обухватају једну спратну висину) и
- позиције у контакту са кровом (решења са равним или косим кровом).

За потребе овог рада и развоја методологије оцене квалитета омотача применом термовизијског снимања, интерес је сужен само на сегмент фасадних позиција, мада се методологија углавном може применити и на остале делове

(осим укопаних конструкција) уз пажљиво испитивање условљености и уважавање специфичности одабране методе истраживања.

Имајући у виду развој прописа из области термичке заштите који нису увек у корелацији са развојем технологије градње, не може се извршити јасна подела по одређеним временским периодима, тако да осим уобичајене појаве кашњења примене нових прописа можемо наићи и на другачије примере, нпр. поједини системи префабрикације, најчешће по угледу на страна искуства, већ у свом основном склопу садрже термоизолациони слој иако то, у тренутку њиховог развоја, није било условљено важећим прописима.

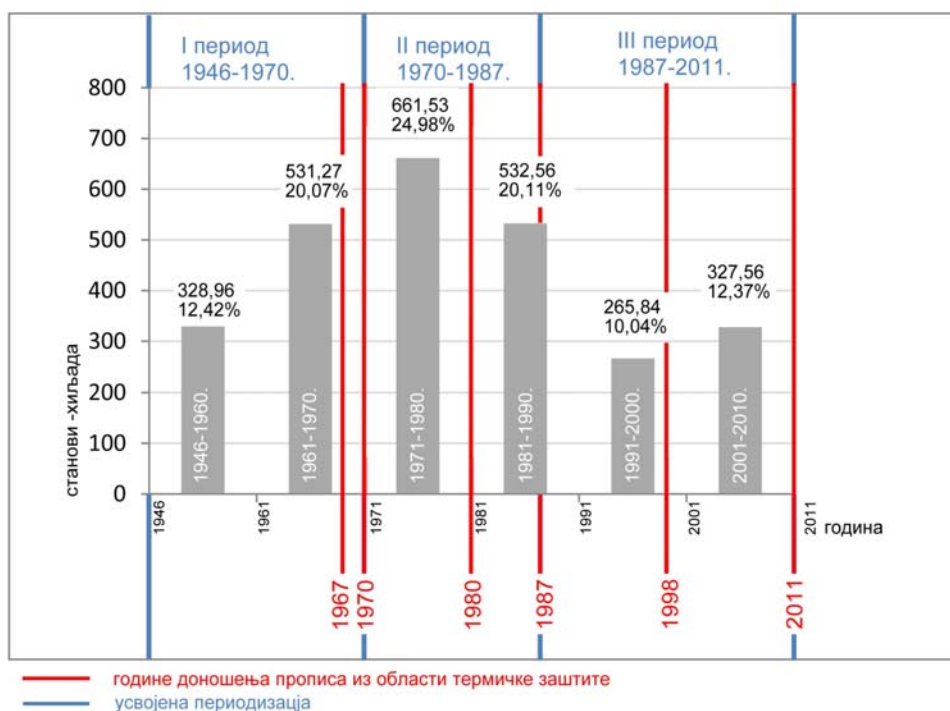
Примарна класификација, која се може поставити, је извршена на основу примене термоизолационих материјала у саставу фасадних зидова где првенствено разликујемо неизоловане и изоловане фасадне склопове. Значај улоге примењиваног термоизолационог слоја са аспекта данашњих прописа је, најчешће, занемарљив с обзиром да су захтеви који се данас постављају пред омотач вишеструко већи, али је начин решавања детаља, нарочито у слојевитим зидовима од интереса за проучавање перформанси и њихову даљу валидацију.

Приказ структуре грађевинског фонда у периоду 1946-2011. према броју станова и времену изградње са назначеним годинама доношења прописа из области термичке заштите можемо видети на слици II 4.

На основу претходне анализе и основних карактеристика грађевинског фонда, а имајући у виду термичке перформансе омотача, усвојена је следећа периодизација:

- период 1946-1970. године, који се карактерише непостојањем прописа из области термичке заштите и спорадичном применом термоизолационих материјала,
- период 1970-1987. године, који се карактерише обавезном применом термоизолационих материјала у саставу омотача, али без детаљних прорачуна и одређивања утицаја линијских топлотних мостова, и
- Период 1987-2011. године, који се карактерише детаљним прописима из области термичке заштите са прорачунима утицаја линијских и тачкастих топлотних мостова.

Усвојена периодизација је назначена и на слици II 4.



Слика II-4 Станови према години изградње – период 1946-2011, са приказом усвојене периодизације (назначено плавим линијама) и годинама доношења прописа из области термичке заштите (назначено црвеним линијама). (према подацима из Пописа становништва, домаћинстава и станова 2011, књига бр.20, за станове познатог годишта)

II.4.1. Период 1946-1970

Као што је већ раније речено, први прописи из области термичке заштите се јављају тек 1967. године, односно допуњени и обимнији 1970. године, што би значило да је целокупан период послератне обнове и велики део следећег периода до краја шездесетих година, који заједно чине 32,5% укупног фонда, осим изузетака приликом примене армиранобетонских зидова, без икакве изолације, што можемо сматрати првим типом релевантним за даља проучавања.

Посматрањем карактеристике одсуства термоизолационог слоја у саставу зидова видимо да се првобитна подела на карактеристичне грађевинске периоде изнета у претходном тексту може, за потребе овог истраживања, модификовати практично обједињавањем прва два послератна периода. На овај начин прва фаза, релевантна за даљу анализу обухвата периоде Ц (1946-1960.) све до пред крај

периода Д (1960-1970.) као и један део периода Е (1970-1980.) на основу номенклатуре дефинисане у оквиру Националне типологије стамбених зграда.⁹

Карактеристични фасадни склопови су најчешће реализовани од пуне опеке дебљина 25 и 38cm обострано малтерисане (Национална типологија: типови Ц3, Ц4, Ц5, Д5, ЕЗ¹⁰), односно дурисол блокова (шупљи блокови који су потом заливани бетоном) дебљине 20, 25 и 30cm (Ц6, Д3) и обострано малтерисани. На зградама, где је као основни материјал конструкције коришћен армирани бетон, било у форми бетонских зидова или монтажних армиранобетонских парапета, он се ради као неизолован (Ц5, Д3), односно са слојем термоизолације са унутрашње стране.

Код већине објеката за завршну обраду су коришћени цементни или кречни малтери, а код нешто вреднијих племенити малтери. Армиранобетонски зидови су рађени као „натур бетон“ или облагани слојем малтера а касније и слојем мозаик керамичких плочица (што је нарочито било заступљено у префабрикованим системима).

Због значаја за проучавање енергетских перформанси важно је поменути и типове међуспратних конструкција које се најчешће користе у овом периоду. Осим одређених изузетака, напуштају се у потпуности дрвене и сводне конструкције од опеке које су биле карактеристичне за период пре Другог светског рата и најчешће се, у овом периоду, примењују ситноребрасте ливене (Ц3), или полупрефабриковане: Хербст, Авраменко, Стандард (Ц4, Ц5, Д3) односно полупрефабриковане таванице од блокова типа Худрис (Ц6) и касније опекарских блокова типа монта – ТМЗ (Д5) а ређе пуне армирано-бетонске плоче ливене на лицу места или префабриковане ошупљене плоче типа ИМС. (Д4, Д6).

Развојем технологије и, нарочито прописа у области сеизмичке заштите, и смањењем обимних фасадних зидова, сви типови зидани у масивном склопу се

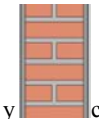
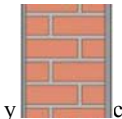
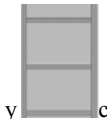
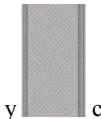
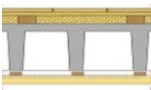
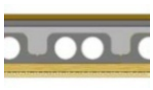
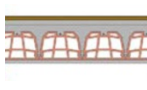
⁹ Иако су прописи донети 1970. за очекивати би било да све зграде реализоване после ове године имају термоизолацију у свом омотачу, међутим приликом прикупљања података за потребе израде Националне типологије, непосредни пописивањем на терену уочено је да то није случај. Претпоставка је да су објекти који су већ били у фази пројектовања и извођења или су пројектовани у срединама где није примењивана прецизна контрола процеса грађења, још извесно време рађени без примене термоизолације.

¹⁰ Овде су приказане шифре објеката и оне се односе на номенклатуру приказану у оквиру Националне типологије стамбених објеката, (слика II-1) и периодично дефинисану овом приликом, иако сама временска подела није од пресудног значаја за потребе овог истраживања.

изводе са хоризонталним армирано-бетонским серклажима а касније и вертикалним серклажима. Хоризонтални армирано бетонски серклажи су били предвиђени још прописима из 1932. године мада нису били обавезујући.¹¹ Њихова појава је од великог значаја за енергетске перформансе фасадних зидова јер доводи до промене материјала у саставу зида, односно појаве значајнијих линијских губитака топлоте о чему ће бити речи касније.

Сумарни преглед најчешће коришћених типова конструкција дат је у табели II-3.

Табела II-3 Најпримењиванији типови неизолованих фасадних зидова и међуспратних конструкција у периоду 1946-70. (На основу Јовановић Поповић и др. 2013.6 и Ђукановић, 2015.)

Фасадни зидови					
Масивни зидани и ливени склопови, без изолације или са изолацијом постављеном са унутрашње стране (на шеми; у-унутре, с-споља; све димензије у cm)					
Фз1 Малтер 2 Опека 25 Малтер 2	Фз2 Малтер 2 Опека 38 Малтер 2	Фз3 Малтер 2 Дурисол блок 20-25-30 Малтер 2	Фз4 Малтер 2 АБ 20 (16) Малтер 2		
					
Међуспратне конструкције					
Међуспратне конструкције: ситноребресте, од блокова и пуне плоче (све димензије у cm)					
Мк1-2 Паркет 2.2 Слепи под 2.4 Потпатошнице у песку 5 Авраменко-Хербст 30 Летве, трска 5 Малтер 2	Мк3 Паркет 2.2 Слепи под 2.4 Потпатошнице у песку 5 Ситноребра-ста ливена 35 Летве, трска 5 Малтер 2	Мк4 Паркет на асфалту 3 Блиндит 3 Худрис 22 Летве, трска 5 cm Малтер 2	Мк5 Ламел паркет 1 Кошуљица 3 Натрон папир Минерална вуна 2 ИМС 25	Мк6 Паркет на асфалту 3 Блиндит 4 АБ 14	Мк7 Паркет 2 Флорбит 3 ТМ 20 Малтер 2
					
					

¹¹ Општа упутства за израду уредбе о извођењу регулационог плана и грађевинског правилника. Службене новине бр. 166-LXXIII од 27. јула 1932. године.

II.4.2. Период 1970-1987

Наредни период релевантан за проучавање перформанси фасадних омотача се не разликује значајније по питању избора материјала од којих се конструишу зграде већ у највећој мери по обавезности коришћења термоизолације и значајном учешћу префабрикованих система, како фасадних тако и међуспратних. Једина новина је значајнија појава и употреба ошупљених опекарских елемената за грађење – блокова, који се раније и поред очигледних предности, како у брзини градње тако и са аспекта термичке заштите, нису масовније користили.

Прописима из 1970, се уводе граничне вредности коефицијента пролаза топлоте које морају бити задовољене приликом пројектовања зграда при чему се утицају линијских губитака не посвећује било каква пажња. Зидови се у овом периоду углавном изводе из више слојева а проблеми одговарајућег прихвата спољашњег слоја се издвајају не само као конструктивни, нарочито у префабрикованим системима, већ и као термички јер њихов лош третман доводи до нежељених појава на конструкцијама.

С обзиром да је у време доношења прописа технолошки најдоминантнија била префабрикована градња, у пракси су најчешће извођени пуни зидови или парпетни елементи са термоизолационим слојем постављеним са унутрашње стране (Д6, Е4, Е5) а касније и са спољашње преко које је рађен слој од лаких облога од метала (Д6) или бетона (Е6) завршне обраде у натур бетону или од мозаик плочица. Термоизолације коришћене у овом периоду су најчешће биле дурисол, таролит или стиропор релативно малих дебљина (мање од 5cm). Приметна је и употреба пенобетона управо због својих термичких карактеристика.

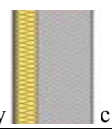
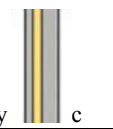
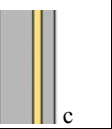
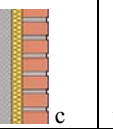
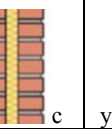
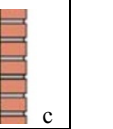
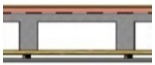
Сет прописа из 1980. године је незнатно поштрио коефицијенте пролаза топлоте за карактеристичне позиције, увео процедуре за прорачун пародифузије и летње стабилности али још увек се није обраћала велика пажња на питања линијских губитака као и правилно решавање детаља спојева конструкција. Приметна су повећања дебљине термоизолације у зидовима, која сада готово никада није мања од 5cm. У технолошком смислу развијају се системи префабрикације, прелази се на крупнопанелне елементе (Ф3, Ф6) уз нове методе и начине прихватања спољашњих слојева. У овом периоду долази и до масовније

употребе фасадне опеке било у масивном или префабрикованом примарном конструктивном склопу (Ф4, Ф5).

Код међуспратних конструкција нема значајнијег развоја нових конструктивних решења. Потпуно се напуштају старе ситноребрасте таванице, као и већина полупрефабрикованих од бетонских или дурисол блокова. У употреби је и даље ИМС (Е4) префабрикована плоча са модификацијама у смислу развоја металне оплате која оставља видне касете са доње стране, затим префабриковане и ливене пуне (Е5, Ф3, Ф4, Ф6) и префабриковане ошупљене (Е6) армирано бетонске плоче као и ТМ конструкција (Е3, Ф5) која се, додуше, све ређе изводи код вишепородичних зграда.

Сумарни преглед најчешће коришћених типова конструкција дат је у табели II-4

Табела II-4 Најпримењивији типови изолованих фасадних зидова и међуспратних конструкција у периоду 1970-1987 (На основу Јовановић Поповић и др. 2013.6 и Ђукановић, 2015.)

Фасадни зидови					
Масивни ливени и префабриковани склопови, са слојем изолације постављеном са унутрашње или у оквиру структуре зида стране (на шеми; у-унутре, с-споља; све димензије у cm)					
Фз5 Малтер 2 Таролит 5 АБ 20 (15)	Фз6 парапет Малтер 2 Таролит 3 АБ 6 (8)	Фз7 АБ16 (14) Таролит 5/ Стиропор 5 АБ 6	Фз8 АБ16 (14) Стиропор 5 Опека 12	Фз9 Малтер 2 Опека 25 Стиропор 5 Опека 12	Фз10 Малтер 2 гитер 19 Стиропор 5 Опека 12
					
Међуспратне конструкције					
Међуспратне конструкције: ситноребресте, од блокова и пуне плоче (све димензије у cm)					
Мк 8 Ламел паркет 1 Фазер плоча 3 ИМС 22 Дрвени роштиљ 5 Гипс плоче 2	МК 9 Паркет 2.2, Флорбит 3, АБ монтажна таваница 18	Мк 10 Ламел паркет 1 Цем естрих 3 ПВЦ Плутафон 1 АБ 16	Мк 11 Паркет 2 Флорбит 3 ТМ 20 Малтер 2		
					

II.4.3. Период 1987-2011

Период после 1987. се карактерише употребом најдетаљнијих термичких прописа код нас, који су, по први пут, узимали у обзир перформансе целокупне зграде односно укључивали у прорачун значајан утицај који имају линијски и тачкасти губици а самим тиме и омогућавали правилно пројектовање конструктивних веза. Истовремено овај период је обележен распадом Југославије, променом својинских односа и начина финансирања у станоградњи и „урушавањем“ постојеће грађевинске индустрије, тако да је примена прописа остала, на жалост, недоречена.

У пракси долази до приметне промене доктрине грађења. Префабриковани системи, везани за велике серије, се напуштају и примењују само спорадично почетком деведесетих. Основни технолошки приступ се враћа класичним методама градње уз масовну примену опекарских елемената. Примарни градивни елемент постаје ошупљени блок, мање опека, а у периоду после 2000. може се приметити и употреба пуних блокова од гас бетона („YTONG”)¹² или ошупљених опекарских блокова већих формата¹³.

Интересантно је напоменути да је примена блокова већих формата односно гас бетона услед њихових добрих изолационих карактеристика поново вратила у грађевинску праксу тип хомогеног зида (једноставне хетерогености), уз предности савременог начина конструисања, односно великог броја типски решених детаља за које постоје и тзв. фазонски елементи чиме се постиже пројектовани квалитет.

Фасаде се изводе у виду танкослојних завршних обрада преко слоја термоизолације (Г3, Г4) или се врши обзиђивање опеком (Г4) односно ради фасада од вештачког камена (Г5). Осим зиданих, раде се и масивне армирано бетонске конструкције, које се потом облажу термоизолацијом и завршним слојевима (Г5). Приметна је појава савремених фасада са вентилисаним слојевима и облогама од каменних, односно плоча од гранитне керамике као и различитих композитних плоча: „алукобонд“, „парклекс“, „етернит“ плоче, али у релативно

¹² Гасбетонски блокови су одраније постојали на тржишту али су се мање користили у станоградњи. Компанија „YTONG“ се значајније појављује на тржишту 2004. после куповине предузећа Колубра-Гасбетон. <http://www.ytong.rs/>

¹³ Један од ових производа доступан на тржишту је Зорка-опека у сарадњи са Ziegelwerk Pichler из Аустрије <http://www.zorka-opeka.rs/>

мањем обиму и ограничено на изградњу у централним градским зонама, првенствено због високе цене системског решења.

Једна од карактеристика овог периода је распрострањено непримењивање важећих прописа из области грађевинске физике¹⁴ на територији Србије, што је, уз значајан утицај непланске, тзв. „дивље“ градње која је захватила и сектор вишепородичног становања, довело до изградње зграда са неодговарајућим термичким перформансама омотача. Чак и када се користе изолациони системи, они се примењују у неодговарајућем облику који не испуњава стандардом прописане услове. Најбољи пример је масовна употреба тзв. „контактне“¹⁵ фасаде са изолацијом од стиропор (експандирани полистирен) плоча дебљине мање од 5cm која не задовољава ни стандарде из 1987. године.

Међуспратне конструкције се и даље, раде као полупрефабриковане типа ТМ али у значајније мањем обиму (Г4)¹⁶ односно готово искључиво се користи ЛМТ таваница (Г3) у разним варијететима или ливене међуспратне конструкције (Г5).

Сумарни преглед најчешће коришћених типова конструкција дат је у табели II-5.

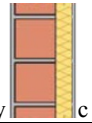
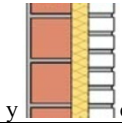
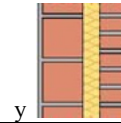
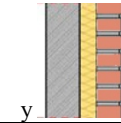
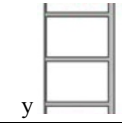
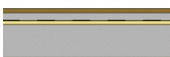
Историјским прегледом најчешће коришћених типова фасадних и међуспратних склопова можемо видети развој и основне одлике делова омотача али не и њихове конструктивне спојеве који у највећој мери утичу на перформансе а о чему ће бити речи у наредним поглављима.

¹⁴ Консултацијама на терену вршеним током спровођења пројекта „Открити енергију - Discovering Energy“, истраживање енергетских перформанси карактеристичних зграда у 30 општина Србије, носилац пројекта GIZ – Министарство урбанизма и грађевина (2012-2013) установљено је да у великом броју општина у Србији елаборат грађевинске физике није био обавезан у склопу пројектне документације и углавном је тражен у општинама где је постојао даљински систем грејања.

¹⁵ Под контактном фасадом се подразумевају системи где се термоизолациони слој лепи за носећи део зида и потом обрађује танкослојном обрадом. Раније, док је у доминантној употреби био стиропор коришћен је термин *Демит фасада*, према комерцијалном називу једног од произвођача. Термин *контактна фасада*, је правилнији јер дефинише тип, а у нашу праксу га уводи „Кнауф“ својом публикацијом „Системи контактне фасаде са каменом вуном“ (Кузмановић, Ивановић, 2008)

¹⁶ После приватизације највећег произвођача опекарских производа у Србији и, нарочито, овог типа међуспратних конструкција „Тозе Марковић“ из Кикинде по коме је таваница и носила назив ТМ, предузеће одлази у „радни стечај“ а производња готово да престаје. (<http://www.novosti.rs/vesti/naslovna/ekonomija/aktuelno.239.html:486995-Kikinda-Toza-Markovic-u-stecaju> , приступљено 5.8.2015)

Табела II-5 Најпримењиванији типови изолованих фасадних зидова и међуспратних конструкција у периоду 1987-2011 (На основу Јовановић Поповић и др. 2013.6 и Ђукановић 2015.)

Фасадни зидови				
Масивни зидови са слојем појачане изолације постављеном са спољашње стране или у оквиру структуре зида (на шеми; у-унутре, с-споља: све димензије у cm)				
Фз 11 Малтер 2 Гитер блок 19 (25) Стиропор 8 (5) Фасада 1	Фз12 Малтер 2 Гитер блок 19 (25) Стиропор 8 (5) Опека силикатна (фасадна) 12	Фз 13 Малтер 2 Гитер блок 19 (25) Стиропор 8 (5) Опека 12 Вештачки камен 5	Фз 14 АБ 16 (14) Стиропор 8 Фасадна (силикатна) опека 12	Фз 15 Малтер 2 Итонг/климаблок 30 Малтер 3
				
Међуспратне конструкције				
Међуспратне конструкције: ситноребресте, од блокова и пуне плоче (све димензије у cm)				
Мк 12 Паркет 2.2 Лепак 3 Цем кошуљица 4 Мин вуна 2 ТМ 20 Малтер 2	Мк 13 Паркет 2.2 Лепак 3 Цем кошуљица 4 Мин вуна 2 ЛМТ 20 Малтер 2	Мк 14 Паркет 2.2 Лепак 3 Цем кошуљица 4 Мин вуна 2 АБ 16 (14-20)		
				

II.5.Трајност, одржавање и утицај на перформансе

Трајност зграда представља једну од основних тема у третману градитељског наслеђа. Уколико изузмемо зграде које се, због својих специфичности, налазе у одређеном степену заштите, у већини случајева се суочавамо са потребом за развојем адекватних стратегија управљања и, шире, одражавања односно постизања одговарајућих услова комфора а самим тиме и неопходних перформанси како целих зграда тако и инсталираних система.

Век трајања зграде, у општем смислу, представља период у коме зграда може, у складу са планираним инвестиционим циклусима, испуњавати постављене захтеве. Разликујемо неколико аспеката трајности зграда:

- **Технички век трајања** где се подразумева да зграда или њени делови остварују задовољење постављених стандарда (замена услед неиспуњења),
- **Функционални век трајања** под којим се подразумева способност зграде да омогући обављање предвиђених функција (прилагођавање или рушење)
- **Економски век трајања** под којим подразумевамо да су трошкови експлоатације и одржавања у оквиру планираног буџета, узимајући у обзир и остварену добит.

Самим тиме век трајања можемо дефинисати као период у коме се остварује пројектовано коришћење зграде уз поштовање реалних економских релација. (Чаушевић, Рустемпашић 2014). Век трајања, наравно, није фиксан временски период, већ се на њега може утицати одговарајућим одржавањем (текућим и инвестиционим) као и адекватном модернизацијом у складу са променама захтева одговарајућих стандарда или корисника.

Утицајних фактора на укупан век трајања зграда има пуно а као најзначајнији се издвајају квалитет пројектовања, квалитет процеса градње и употребљених материјала, начин коришћења, утицаји средине (унутра и споља) и одржавање зграда. Од аспеката значајних за потребе истраживања перформанси нарочито су битне карактеристике везане за употребљене материјале, њихов квалитет и постојаност као и тип, начин и обим одржавања.

Према *Правилнику о минималним техничким условима за изградњу станова* из 1967. године, пројектована трајност зграда у Србији је износила 60 година а питања везана за начин коришћења и одржавања нису постављана јер је основни мотив изградње, у том периоду, било решавање акутне стамбене кризе. Режим коришћења је нормативно дефинисан преко одговарајућих стандарда и техничких препорука а теми одржавања као интегралног дела пројектовања није посвећивана посебна пажња.

Већ седамдесетих година, у јеку најинтензивније изградње и прве промене друштвених односа, постављају се питања трајности и нарочито могућности прилагођавања постојећих зграда новим потребама. Иако је интерес углавном био посвећен просторно-обликовним карактеристикама указивањем на потребе

дугорочнијег сагледавања организације и флексибилности станова пажња се, такође посвећује и материјалним карактеристикама које прате ове теме уз препознавање различитих аспеката трајности, тзв. физичке и визуелне трајности. Под првом се подразумева испуњавање пројектоване функције одређеног склопа, где се идентификују проблеми везани за квалитет и начин уградње материјала, односно могућности замене, док је питање визуелне трајности углавном везано за појавност и квалитет завршних обрада зграда. (Томић, Чанак 1974)

Непуних десет година касније, у оквиру *Улова и техничких норматива за пројектовање стамбених зграда и станова*¹⁷, питању трајности у поступку пројектовања посвећује се много већа пажња. У складу са европским тенденцијама јасно се разврстава трајност појединих елемената и склопова зграда на процењени временски период од 100 година уз дефинисање предвиђеног интервала замене. На овај начин се формира основ временског оквира и обима интервенција на зградама односно подлога за адекватно управљање.

На нови правилник из ове области¹⁸ се чекало скоро 30 година али он, за разлику од предходног, овом питању не посвећује посебну пажњу, већ се наводи да *"Конструкција стамбене зграде, као и остали елементи материјализације објекта (фасадни зидови и отвори, кровови и др.) морају бити пројектовани од погодних, атестираних материјала трајног карактера"* (члан 24.)

Без обзира на пројектовану или предвиђену трајност, сведоци смо да грађевински фонд уопште, па тако и у нашим условима, у ствари, поседује значајније дужи животни век првенствено као резултат примењених квалитетних материјално-конструктивних решења, који пружају базични основ за обављање пројектованих функција.

У овом контексту, значајна активност која има велики утицај на опште стање а самим тиме и енергетске перформансе и, посредно, на трајност зграда је њихово одржавање. Питање одржавања се, у периоду социјалистичког развоја,

¹⁷ *Услови и технички нормативи за пројектовање стамбених зграда* (1983), Београд: Службени лист бр.32/83. Иако званично овај документ био обавезујући на територији Београда, у пракси је применљиван широм земље.

¹⁸ *Правилник о условима и нормативима за пројектовање стамбених зграда и станова* (2012) Београд: Службени гласник РС, бр. 58 од 13. јуна 2012, 74 од 26. августа 2015, 82 од 28. септембра 2015.

углавном сводило на текуће оджавање којим су отклањани уочени недостаци и вршене одговарајуће поправке, без обимнијих реконструкција или суштинских унапређења. Станови и зграде су били у друштвеном власништву и одржавала су их за то одговорна друштвена предузећа без материјалног учешћа самих грађана. Променом економских односа и приватизацијом стамбеног фонда долази до корените промене по питању одржавања зграда. Законом о стамбеним односима, из 1990. дефинише се трансформација власничких односа и уводи обавезност одржавања зграда од стране њихових власника кроз склапање уговора са посебним предузећима¹⁹ која су новоформирана или трансформисана од постојећих. Законом о становању две године касније се предвиђа власничко учешће у одржавању зграда преко уговора са предузећима искључиво регистрованим за ову намену. Убрзо се доноси и одговарајућа Уредба о одржавању стамбених зграда и станова (1993)²⁰ која уводи појмове инвестиционог и текућег одржавања, као и Закон о одржавању стамбених зграда (1995) који директно именује власнике станова као једине обвезнике процеса одржавања. (Дамјановић, Д. Глигоријевић, Ж. 2010).

Закон је, са мањим изменама и допунама, и даље на снази а једна од директних последица његове примене је интензивна надградња објеката која је наступила непосредно по доношењу²¹. Усвајањем у доба непосредно после распада Југославије и хиперинфлације, у транзиционим економским односима, он није обезбедио одговарајући процес одржавања већ је послужио за масовне активности погушћавања градских матрица процесом надградње, као одговор на проблем стања равних кровова.

Новонастали економски потенцијал исказан кроз реалну тржишну вредност новодобијених станова, у тренутку када не постоје друштвене нити државне инвестиције, није искоришћен на прави начин, већ се процес одвијао

¹⁹ На овај начин су трансформисани некадашњи СИЗ-ови становања који су углавном проистекли из предузећа за одржавање станова формираних шездесетих година (Београд 1966, нови Сад 1966, Краљево 1959, Ужице 1965, Лесковац 1960...) или као ново формирана друштвена предузећа (Крагујевац, Бор 1990). (подци са званичних интернет адреса комуналних предузећа)

²⁰ Ова уредба је још увек важећи подзаконски акт

²¹ Закон је предвидео да се уз већинску сагласност власника станова омогући „извођење радова на санацији равног крова односно кровне конструкције којом се, сагласно прописима о планирању и уређењу простора може изградити односно адаптирати нови стан“ (члан 18) чиме је створена подлога за готово неконтролисану експанзију овог типа градње.

готово стихийски, са веома мало правих ограничења и без условљавања других санационих радова који би значајно побољшали укупне, па и енергетске перформансе зграда.

Посматрајући питања трајности стамбеног фонда, можемо констатовати да сектор вишепородичног становања углавном чине зграде чија је примарна конструкција изграђена од трајних материјала. Са аспекта материјализације омотача, а нарочито у контексту одржавања и енергетских перформанси, стање грађевинског фонда, услед промене друштвених односа и релативно слабе економске моћи грађана а без подстицајних средстава од стране државе, није задовољавајуће. Већина зграда не испуњава одговарајуће савремене стандарде из области термичке заштите а у значајном броју не задовољава нити стандарде важеће у доба изградње.

Питања дијагностиковања перформанси, односно процене стања омотача у контексту потенцијалне обнове стога представља једно од основних полазишних тачака у формирању стратегије третмана грађевинског фонда и биће детаљније истражено у наредним поглављима.

III. МЕТОДА ТЕРМОВИЗИЈСКОГ СНИМАЊА

III.1. Дефиниција и историјат

Термовизија је термин настао на основу енглеске речи *Thermovision* што би у дословном преводу значило гледање топлоте а користи се у пракси и јавности као синоним за инфрацрвену термографију. Као научна дисциплина, термовизија се бави прикупљањем и анализом термичких карактеристика објеката преко визуелних репрезентација – термограма добијених бесконтактним методама. (ИТС 2005). Другим речима, она се бави проучавањем особина објеката на основу забележеног (снимљеног) зрачења емитованог у инфрацрвеном делу спектра електромагнетног зрачења.

Феномен инфрацрвеног дела спектра, као и преноса топлоте која се њиме врши, је откриће које се везује за Сер Вилијама Хершела [Ser William Herschel] енглеског краљевског астронома познатог по открићу планете Уран. Он је 1800. године, сасвим случајно, покушавајући да пронађе материјал којим би могао да заштити очи приликом телескопског посматрања Сунца користио разна бојена стакла и открио да поједине боје засењују светлост и притом пропуштају веома мало топлоте док друге не пружају готово никакву топлотну заштиту приморавајући га да прекине експеримент већ после неколико секунди. Систематично анализирајући однос између феномена боја и њихових температурних карактеристика, он је поновио чувени Њутнов [Ser Isaac Newton] експеримент са стакленом призмом кроз коју је пропуштена сунчева светлост била разложена на спектар различитих боја, али је покушао и да измери њихове температуре. Мерења је вршио помоћу зацрњеног живиног термометра постављајући га наизменично у све боје спектра уз још један термометар постављен у сенци, ван домашаја светла, као контролни. На овај начин први пут је установљена веза између боје и температуре светлости. До инфрацрвеног зрачења је дошао случајно померајући термометар од љубичасте према црвеној боји установио је повишење температуре а на његово изненађење она се још више повишавала у зони где није било никакве боје светла. Он је ове зраке назвао „невидљиви” зраци, а касније је тај део спектра назван „*infrared*” (испод црвене)

јер је установљено да је његова фреквенција одмах испод фреквенције видљиве светлости.

Убрзо су експеримент потврдили и други истраживачи, али, сем феноменолошког карактера и закључка да се овај тип „невидљих“ зрака понаша исто као и видљиви, тј. може бити рефлектован или усмерен није се даље отишло. (Rogalski, 2012)

Развој проучавања инфрацрвеног зрачења је био ограничен немогућношћу пропуштања зрака кроз, у то доба расположива, стаклена сочива као и непрецизношћу мерења. Први продори у области настају двадесетих година 19. века открићем појаве да су кристали соли натријумхлорида (NaCl) када се од њих израде сочива и призме пропусни за инфрацрвено зрачење, од стране италијанског истраживача Мелонија [Macedonio Melloni]. Он је такође конструисао и први „сензор“, односно уређај који је могао да детектује зрачење топлоте. Технологија је, у том тренутку, омогућавала да се, фокусирањем зрачења на одговарајући детектор, „осети“ присуство особе на даљини од 10m. Уређај назван термогрупа (eng. *termopile*) је представљао скуп појединачних мерних уређаја тзв. термопарова (eng. *termocouple*) откривених нешто раније од стране другог италијанског истраживача Нобилија [Leopoldo Nobili] а на основу Зебековог [Thomas Johann Seebeck] рада о појави термо-електричног ефекта. Термопарови су мерни уређаји израђени од два несродна метална проводника спојена на крајевима који се карактеришу појавом електричног напона уколико се спојеви налазе на различитим температурама. Интезитет напона је пропорционалан температурној разлици. Иако се карактерише релативно једноставном конструкцијом, термопар је и данас један од основних уређаја у мерној техници.

Прву, тзв. „топлотну слику“, је створио Сер Џон Хершел [John Frederick William Herschel] син Вилијама Хершела, користећи „евапорограф“, односно уређај који је стварао слику испаравањем танког премаза са подлоге.

Највећи напредак у технологији детектовања топлотног зрачења је постигнут 1880. открићем Самјуела Ланглија [Samuel P. Langley] који је изумео болометар. Он представља уређај који се састоји од танке, обојене у црно, траке од платине повезане у електрично коло напајано помоћу батерије. Мерење зрачења се остварује посредно преко промене проводљивости склопа у

зависности од степена загревања. Унапређени болометар је могао да „осети“ топлоту краве на 400m. (Maldague, 2001)

Планкова [Max Planck] теорија зрачења из 1900. је у теоретском смислу, по први пут, пружила објашњења феномена које су различити истраживачи уочавали и примењивали и омогућила потпуно нове приступе у проучавању и разумевању појава везаних за инфрацрвено зрачење.

Први светски рат је донео прву директну примену, нове теорије и развој фотопроводног детектора 1917. године. Ранији детектори су углавном базирани на болометарском принципу, односно посредном мерењу ефекта топлотног зрачења, док је нова генерација користила директну активацију од стране долазећих фотона базирано на фотоелектричном ефекту. Технолошки значајно савршенији принцип одликовао се изузетно добрим одзивом али истовремено је био и веома комплексан тако да није имао значајнију употребу, осим за лабораторијске примене. (Maldague, 2001)

У периоду између два рата развија се идеја креирања конвертора који би могао визуелно приказати термички одраз али и поред проналаска фото-катодне цеви у Филипсовој фабрици 1934. технологија још увек није била довољно развијена да би се детектовано зрачење могло претворити у слику. Тек је Други светски рат значајније допринео развоју технологије проналаском IR катодне цеви са фосфорним екраном, која је одмах нашла војну примену, првенствено у детекцији авиона, и омогућила визуелизацију добијених мерења. (Rogalski 2012)

Даљи развој технологије је био уско везан искључиво за војну примену и тек педесетих година двадесетог века почиње први трансфер технологије према цивилном сектору, мада се и данас процењује да је више од 80% употребе војне природе.

Прве камере за цивилну употребу су се појавиле на тржишту 1965. године од стране шведске компаније АГА (*Agema of Sweden*) и нешто касније од стране америчке компаније Инфраметрикс (*Inframetrics*), данас део концерна *FLIR*, који је настао од програма компаније Тексас инструментс (*Texas instruments*)¹. Ови

¹ Тексас инструментс је покушавао да развије уређај за комерцијалну употребу намењену војној индустрији а целокупан програм је интерно назван *FLIR – Forward Looking Infrared*, што се сматра основом за касније формирање комерцијалне компаније са истоветним називом

први модели су били веома гломазни за употребу и по данашњим мерилима спори са релативно грубим визуелним приказима. (Maldague, 2001)

Развој тзв. микроболометарских система као и значајнији напредак у полупроводничкој индустрији, технологији интегралних кола, односно система претварања електричних сигнала у одговарајући графички запис, омогућио је поједностављење технологије и визуелизацију добијених резултата у реалном времену а самим тиме и ширу примену методе.

О принципима на којима су засновани савремени детектори и конструкцији камера, односно начину на који се остварују мерења, више ће бити више речи касније.

III.2. Основни принципи и теоретске поставке

Не улазећи дубље у саму природу феномена топлотног зрачења у овом поглављу ће бити приказани основни закони и принципи који омогућавају примену методе термовизијског снимања.

Питања у вези са пореклом топлотног зрачења, односно откривање законитости којима се може описати је представљао велики истраживачки изазов у прошлости а суштинско разумевање ове појаве је довело до развоја нових, радикалних, теорија о природи саме материје и, самим тиме, целокупног света око нас. Још је Пјер Превост [Pierre Prevost] доказао да сва тела зраче одређену количину топлотног зрачења да би се каснијим истраживањима формулисао познати закон који гласи: *„Сва тела топлија од апсолутне нуле зраче енергију која варира у зависности од супстанце тела, површинске хравости и температуре“* (Петела 2010, стр 37).

III.2.1. Електромагнетни спектар

Уколико, базирано на данашњим знањима, зађемо дубље у структуру материје можемо рећи да зрачење неког тела представља енергију осциловања њених градивних честица док је интезитет осцилација резултат температуре. По теорији, зрачење се карактерише дуалном природом, тј. може се схватити као

http://www.ti.com/corp/docs/company/history/timeline/defense/1960/docs/66-first_flir.htm,
приступљено 20.8.2015.

таласно по Максвелу [James Clerk Maxwell] где се интензитет зрачења исказује у зависности од таласне дужине, или као честично, односно фотонско зрачење према Планку где се интензитет дефинише као дискретна, тачно одређена, количина фотона. Посебан филозофски напредак у теорији донела је, управо, фотонска теорија увођењем концепта честица чисте енергије са нултом масом у стању мировања и тачно одређеном количином енергије названом квантом. (Maldague, 2001)

Енергија која се преноси зрачењем се, као што је речено, карактерише таласном природом са особинама које се описују таласном дужином и фреквенцијом и математички се приказују следећим изразом:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (\text{III-1})$$

где је:

c брзина светлости (3×10^8 m/s)

λ таласна дужина [m]

ν фреквенција [$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$]

За одређену таласну дужину λ ова енергија зрачења W се може исказати изразом:

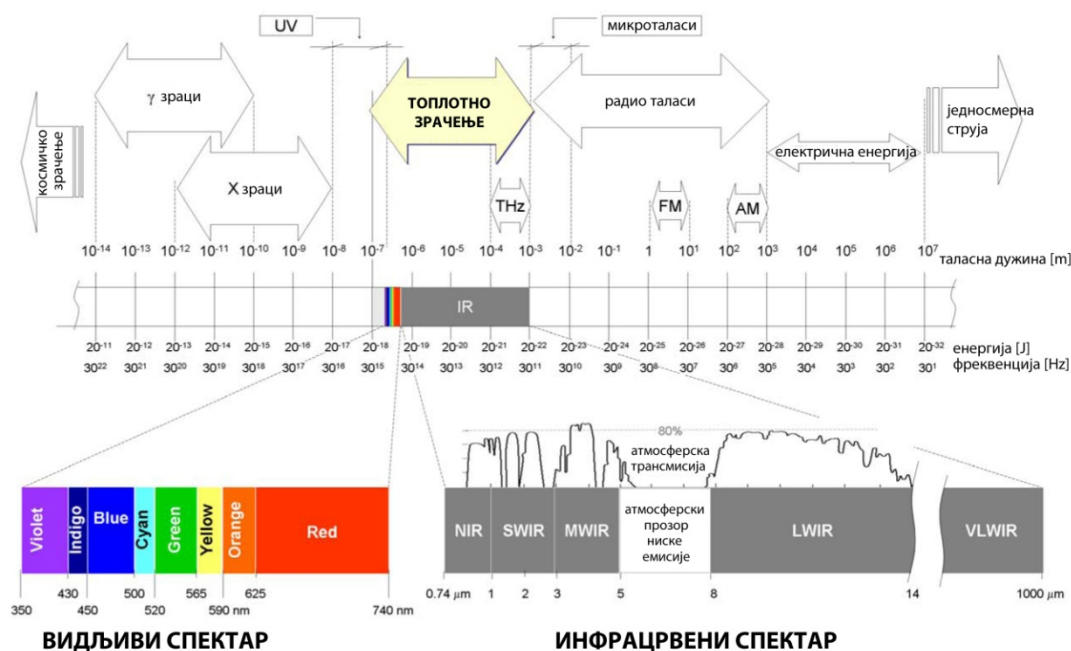
$$W = h \cdot \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{III-2})$$

где је $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Js (Планкова константа)

То практично значи да се електромагнетно зрачење простира по свим таласним дужинама односно за све фреквентне опсеге а енергетска разлика међу њима се исказује у количини енергије фотона коју носе са собом.

Сумарни приказ свих таласних дужина се још назива и електромагнетни спектар и његова графичка илустрација је дата на слици III-1.

На приказу видимо све „назване”² сегменте електромагнетног зрачења и уколико анализирамо претходни матерматички израз можемо нагласити чињеницу да највише енергије са собом носе таласи највећих фреквенција односно најкраћих таласних дужина: Гама (γ) зраци па потом X – зраци и зато се примењују у медицини, недеструктивном тестирању и многим другим применама где се користи њихова продорност кроз материју. За разлику од њих радио, ТВ таласи су знатно мањих енергија самим тиме слабије продорности и сматрају се нешкодљивим за људе. Област електромагнетног спектра у коме се јавља феномен нашег интересовања а који називамо топлотним зрачењем обухвата део ултраљубичастог, цео видљиви и инфрацрвени део.



Слика III-1 Приказ електромагнетног спектра (Ibarra Castanedo, 2005, стр. 149)

Инфрацрвени део спектра се креће у таласним дужинама од $0.74\mu\text{m}$ до $1000\mu\text{m}$ и није хомоген по структури, већ је даље подељен на подцелине. Класификација није прецизно технички установљена тако да наилазимо на различите карактеризације код различитих аутора:

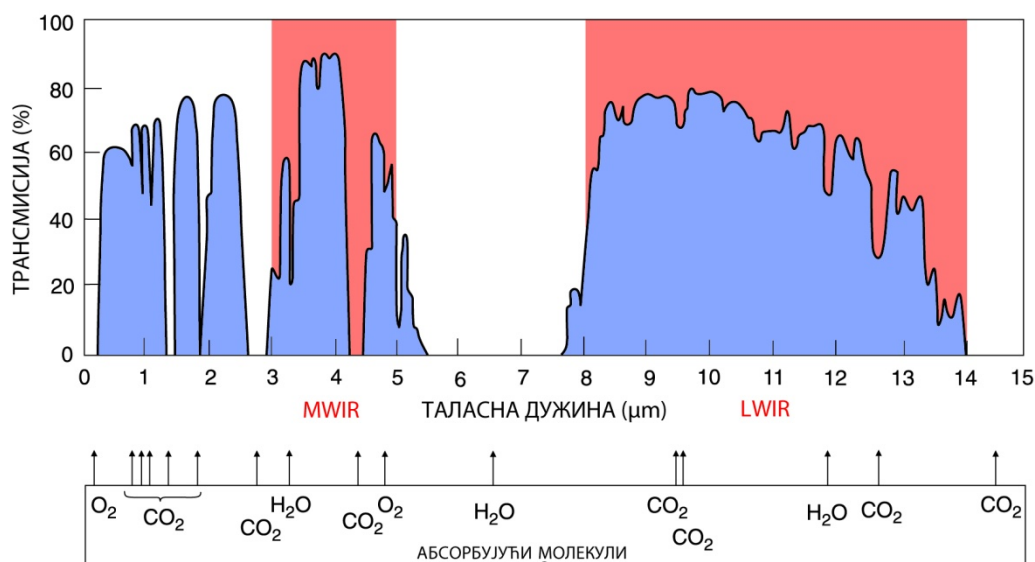
² Називи појединих делова спектра су усвајани постепено, паралелно са њиховим откривањем и употребом у разним гранама науке и технике.

- Блиско инфрацрвено зрачење $0.78\text{-}1.5\ \mu\text{m}$, Средњеталасно инфрацрвено зрачење $1.5\text{-}20\ \mu\text{m}$ и дуготаласно инфрацрвено зрачење $20\text{-}1000\ \mu\text{m}$ (Maldague 2001, стр. 17)
- Блиско инфрацрвено зрачење $0.75\text{-}3\ \mu\text{m}$, средњеталасно инфрацрвено зрачење $3\text{-}6\ \mu\text{m}$, дуготаласно инфрацрвено зрачење $6\text{-}15\ \mu\text{m}$ и далеко дуготаласно инфрацрвено зрачење $15\text{-}100\ \mu\text{m}$ (FLIR 2004, стр.136-137)
- Блиско инфрацрвено зрачење (*NIR*) $0.75\text{-}1\ \mu\text{m}$, краткоталасно инфрацрвено зрачење (*SWIR*) $1\text{-}3\ \mu\text{m}$, средњеталасно инфрацрвено зрачење (*MWIR*) $3\text{-}5\ \mu\text{m}$, дуготаласно инфрацрвено зрачење (*LWIR*) $8\text{-}14\ \mu\text{m}$ и далеко дуготаласно инфрацрвено зрачење (*VLWIR*) $14\text{-}1000\ \mu\text{m}$. Оваква подела се сматра најцеловитијом и најусаглашенијом са природним условима који утичу на простирање зрачења, стога је и приказана у доњем десном делу слике III-1. (Ibarra Castanedo 2005, стр.129), (Rogalski, Chrzanowski 2002, стр.111-112)

Непостојање јединствене номенклатуре, односно различите поделе инфрацрвеног спектра, јављају се првенствено као последица конструктивних карактеристика типова детектора који се, у пракси, користе односно конкретних примена. Прецизније, ове поделе се одређују према тзв „прозорима велике трансмисивности атмосфере“ односно таласним дужинама инфрацрвеног дела спектра у којима је минималан негативни атмосферски утицај. (слика III-2) Утицај атмосфере се огледа кроз појаву, мањег или већег, умањења интензитета пролазног зрачења као последица расипања и апсорпције. Расипање се дешава услед „погађања“ честица атмосфере од стране долазећих електромагнетних таласа, при чему се дозначена енергија „упија“ и, затим, поново излучује у окружење. За веће честице ово расипање не зависи много од таласних дужина јер, углавном, долази до делимичне или потпуне апсорпције долазног зрачења што резултира повећањем унутрашње енергије, односно појавом секундарног зрачења. Код мањих честица, процес је веома битан и често се дефинише као Рајлејево расипање [John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh] а огледа се у појави по којој честице, које се могу окарактерисати односом сопствене величине према таласној дужини долазног зрачења са приближно λ^{-4} , постају секундарни емитери зрачења. Штавише, оне зраче идентичном фреквенцијом као и долазно зрачење, а

појава се назива Рајлијев ефекат. Најпознатија илустрација ефекта се огледа у начину на који видимо небо у току дана, односно његова плава боја која настаје услед расипања плавог дела видљивог спектра чије су таласне дужине у описаном односу са величинама честица атмосфере.

Ако се упореде величине честица које чине гасове атмосфере и одговарајуће таласне дужине које су предмет нашег интересовања, можемо закључити да молекули гасова (дима) не представљају препреку инфрацрвеним зрацима, поготово дужим од 2 μm , за разлику од кише, магле, разних аеросола чији су молекули већих димензија. При интеракцији са инфрацрвеним зрачењем ове честице доводе до потпуног расипања долазног зрачења, односно тзв.



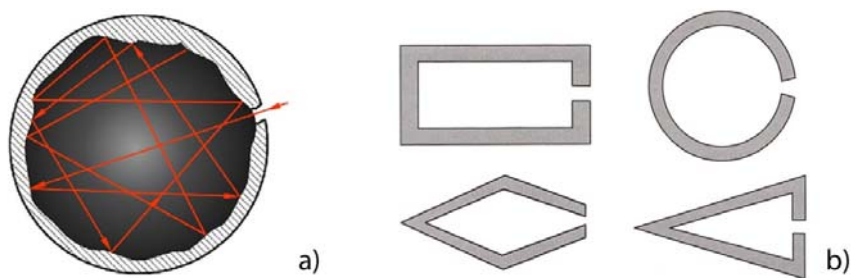
Слика III-2 Пропусност атмосфере на 2000m, са назначеним зонама најчешће коришћеним за термовизијско снимање (на основу Rogalski, Chrzanowski 2002, стр. 113)

„непрозирности“ што, јасно илуструје графички приказ на слици III-2. (Rogalski, Chrzanowski 2002)

Колики је интензитет зрачења које тело емитује и како се ово зрачење може адекватно и прецизно детектовати, а потом и квантификовати, су основна истраживачка питања за термовизију као науку. За једноставније разумевање нужно је објаснити природу самог процеса зрачења које се емитује са површине неког тела.

III.2.2. Црно тело

Као што је већ раније речено, сва тела топлија од апсолутне нуле емитују одређену количину енергије зрачењем. У теорији зрачења је дефинисано тело које нити рефлектује нити пропушта радијацију која пада на њега већ има идеалну апсорпцију без обзира на смер и таласну дужину упадног зрачења. Овакво тело се зове Црно тело и представља теоретски концепт дефинисан од стране Густава Кирхофа 1860 [Gustav Robert Kirchhoff] Он је, такође, дефинисао да су црна тела осим што се могу сматрати идеалним апсорбером истовремено дефинисана и као идеални емитери, што би значило да ниједно друго тело не може емитовати више енергије од њих. (Vollmer & Moellmann, 2010). Црно тело се користи као референтно за радиометрију³ и може се релативно лако симулирати односно направити као изотермна шупљина од непровидног апсорбујућег материјала. Особина изотермне шупљине је да свако зрачење, одређене таласне дужине, које уђе унутра бива распршено великим бројем рефлексија односно готово у потпуности заробљено (слика III-3а). Истовремено, уколико унутар шупљине поставимо одговарајући грејач, она постаје емитер (енг. *radiator*) одајући зрачење тачно одређене температуре (дефинисане грејачем) што је карактеристика која се примењује приликом калибрисања камера (слика III-3б).



Слика III-3 Шематски приказ Црног тела – ошупљена сфера са неравном унутрашњошћу која упадни зрак светлости „заробљава“ помоћу великог броја рефлексија (<http://latexcms.math.bme.hu>, приступљено 20.8.2015.) б) различити облици изотермних шупљина (Vollmer, Moellmann, стр. 49)

³ Под радиометријом се подразумевају технике мерења електромагнетног зрачења укључујући и видљиву светлост, за разлику од фотометрије где се мерења јављају у зони видљивог спектра. (Медвед, 2011)

III.2.2.1. Зрачење црног тела

Веома прецизна мерења термалног зрачења шупљина експерименталних црних тела су вршена још крајем 19. века, али без правог теоретског објашњења појаве све до 1900. када је Макс Планк успео да опише спектралну дистрибуцију зрачења црног тела.

Уколико знамо да егзитација⁴ M (раније интензитет зрачења I) представља проток енергије зрачења која се емитује са одређене површине можемо је одредити следећим изразом:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (III-3)$$

Где је:

A површина [m^2]

Φ проток енергије зрачења, [W], и дефинише се као израчена енергија у јединици времена:

$$\phi = \frac{Q}{t} \left[\frac{J}{s} \right] \quad (III-4)$$

где су:

Q – енергија зрачења,

t – време.

Уколико истоветним математичким изразом искажемо количину зрачења која пада на површину A , онда говоримо о ирадијацији E (озраченост). То практично значи да је у питању истоветна појава, чији назив зависи од смера у коме се креће енергија зрачења.

Проток енергије зрачења која се емитује са одређене површине зависи од таласне дужине и, може се исказати следећом формулом:

$$\phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda} \left[\frac{J}{s} \right] \quad (III-5)$$

Овај израз дефинише појам спектралне густине ϕ_λ као односа између протока енергије зрачења Φ и таласне дужине λ .

⁴ У литератури се користи егзитација од енглеског *Exitant radiation* – излазно зрачење,

III.2.2.2. Планков закон

Планков закон нам указује да је тотална егзитација односно укупна енергија коју црно тело израчи у околину на температури T а према таласној дужини λ дефинисан као:

$$M_{\lambda}(\lambda T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \left[\frac{W}{\mu m \cdot m^2} \right] \quad (\text{III-6})$$

односно на други начин:

$$M_{\lambda}(\lambda T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \left[\frac{W}{\mu m \cdot m^2} \right] \quad (\text{III-7})$$

Где је:

h - Планкова константа (6.626×10^{-34} Js)

k - Boltzmannova konstanta ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

C_1 Прва Планкова константа ($3,742 \times 10^{-16}$ W/m²)

C_2 Друга Планкова константа (4.435×10^{-2} mK)

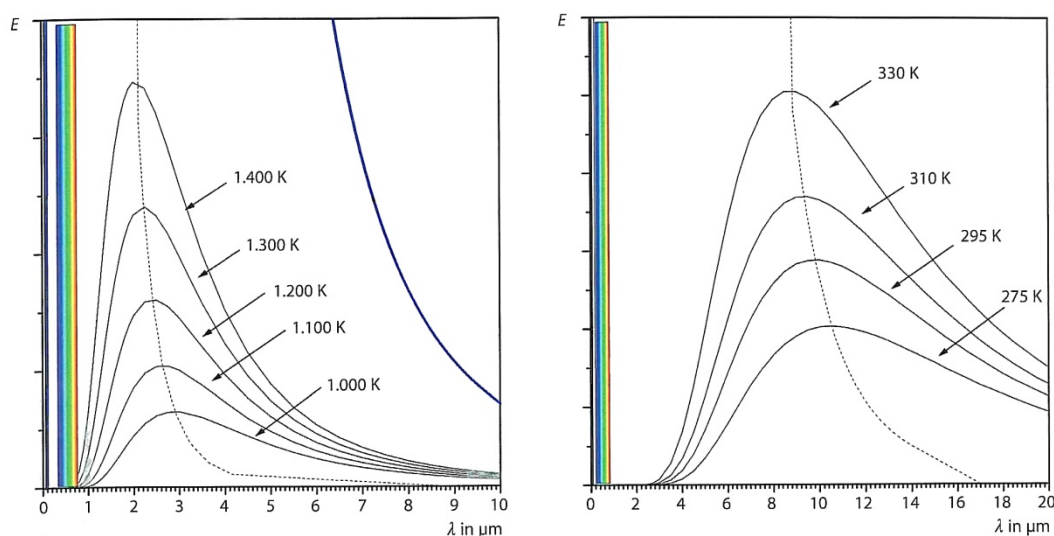
Исти израз можемо исказати и преко фреквенције као:

$$M_{\nu}(\nu T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \left[\frac{W}{\mu m \cdot m^2} \right] \quad (\text{III-8})$$

Где је:

ν – фреквенција зрачења [Hz].

Уколико нацртамо спектралне графиконе који приказују однос израчене енергије према таласним дужинама (Слика III-4) можемо видети да су линије које описују ову зависност континуиране и да се за сваку таласну дужину повећавају у складу са повишењем температуре. Дистрибуција енергије је такве природе да се за сваку температурну вредност јавља јасно дефинисан максимум који, у ствари, представља таласну дужину на којој се емитује највише енергије.



Слика III-4 Спектрално зрачење црног тела, за различите температуре (Wagner, 2011, стр.13)

III.2.2.3. Винов закон

Из графика са слике III-5 се види да се максимуми израчене енергије померају према краћим таласним дужинама за више температуре, појаву коју најбоље илуструје Винов закон померања [Wilhelm Wien]

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2.897 [\mu \text{ m K}] \quad (\text{III-9})$$

Где је:

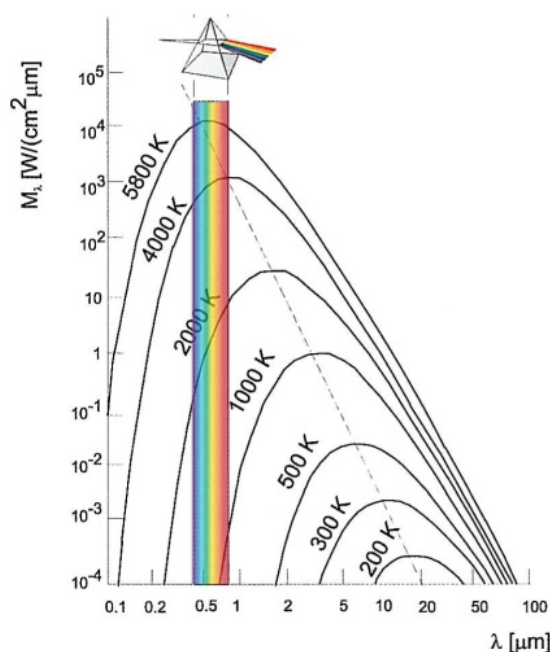
$\lambda_{\max}$ таласна дужина на којој се јавља максимум израчене енергије [$\mu \text{ m}$]

2,897 [$\mu \text{ m K}$] Винова константа померања

T апсолутна температура у [K]

Приказивањем Планкових кривих на другачији начин (слика III-5) видимо да се сви максимуми налазе на једној линији што потврђује природу функције којом је дефинисан овај закон. Овакав приказ је најпрегледнији за сагледавање енергије зрачења везане за таласне дужине према различитим температурним вредностима (Maldague, 2001).

Анализом вредности на графикону можемо видети да нпр. Сунце, које је приближне температуре 6000 K свој максимум зрачења достиже на $0,5 \mu m$ односно по средини видљивог дела спектра, док је зрачење зграда или људи чија је температура у распону од 270-330 K на максимуму при таласним дужинама од око $10 \mu m$, односно, у инфрацрвеном делу спектра, чиме се оправдава примена методе термовизијског снимања у анализи перформанси.



Слика III-5 Планкове криве на основу Виновог закона померања (Fouad, Richter, 2012 стр 12.)

То практично значи да, уколико желимо да адекватно региструјемо интезитет зрачења који је од интереса за истраживање перформанси зграда, морамо имати камере, односно детекторе које региструју таласне дужине у распону тзв. дуготаласног инфрацрвеног дела спектра *LWIR* односно $8-14 \mu m$.

III.2.2.4. Штефан-Болцманов закон

Укупну количину енергије коју црно тело израчи у свим таласним дужинама за одређену температуру можемо добити интеграљењем Планкове формуле за $\lambda_0 \rightarrow \lambda_\infty$ при чему добијемо израз који се још назива и Штефан-Болцманов закон:

$$M(T) = \int_0^{+\infty} M_\lambda(T) d\lambda = \sigma T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (\text{III-10})$$

Где је:

M егзитација (укупна енергија зрачења) црног тела

σ Штефан Болцманова константа ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$),

T апсолутна температура [K]

Закон је настао као последица рада два научника Јозефа Штефана [Josef Stefan] који је 1879. експериментално утврдио овакав однос да би га 1884, његов студент, Лудвиг Болцман [Ludwig Boltzmann] касније и теоретски потврдио. (Vollmer, Moellmann 2010)

III.2.3. Реална тела

III.2.3.1. Емисивност

У реалном свету, црна тела не постоје, већ их, за потребе мерења, замењујемо теоретским концептом тзв. сивих тела која се карактеришу приближно сличном дистрибуцијом зрачења али са мањим степеном егзитације. Основни параметар који дефинише однос зрачења сивог у односу на зрачење црног тела је исказан преко емисивности (ϵ). Емисивност представља однос количине зрачења које може да израчи сиво тело одређене температуре у односу на зрачење црног тела истоветне температуре и за исту таласну дужину. У општем случају, тј. за реална тела, емисивност, осредњена по таласној дужини и правцу, се може исказати следећом формулом (Vollmer, Moellmann 2010):

$$\epsilon(T) = \frac{M(T)}{M_{BB}(T)} = \frac{M(T)}{\sigma T^4} \quad (\text{III-11})$$

где је:

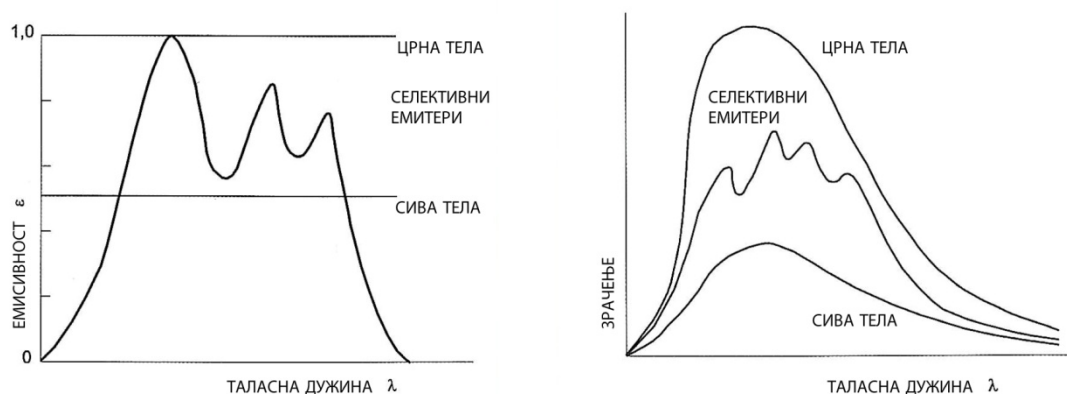
ε емисивност

M егзитација сивог тела,

M_{BB} егзитација црног тела

Ако анализирамо типове објеката који се теоретски могу дефинисати на основу емисивности разликумо: црна тела $\varepsilon = 1$, сива тела са константном вредношћу емисивности $0 < \varepsilon < 1$ која, притом не зависи од таласне дужине, бела тела или савршене рефлекторе $\varepsilon = 0$ и тзв. селективне емитере где емисивност зависи од таласне дужине⁵(Ibarra Castanedo 2005).

Већ из саме класификације је јасно да емисивност није константна величина и



Слика III-6 Приказ емисивности и одговарајућег термалног зрачења за црна тела, сива тела и селективне емитере (Fouad, Richter, 2012 стр 17-18.)

да зависи од више параметара. Однос емисивности различитих типова тела као и енергије коју она излучују се графички може видети на слици III-6.

⁵Осим приказане формуле за одређивање емисивности, користе се и друге, нарочито за реална тела променљиве емисивности а које у прорачун узимају и утицаје таласних дужина (појаса таласног зрачења), односно просторне дистрибуције зрачења: Спектрална дирекциона емисивност $\varepsilon(\lambda, \delta, \varphi, T) = \frac{L(\lambda, \delta, \varphi, T)}{L_{BB}(\lambda, T)}$ која зависи од спектралног зрачења L , Спектрална хемисферична емисивност, дирекционо осредњена $\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, \delta, \varphi, T)}{M_{BB}(\lambda, T)}$, тотална дирекциона емисивност осредњена по таласној дужини $\varepsilon(\delta, \varphi, T) = \frac{M(\delta, \varphi, T)}{M_{BB}(T)}$. У ствари, за примену у термовизији где се снимање врши у одређеном спектралном опсегу под различитим угловима снимања емисивност би било потребно изразити у функцији дирекционог интензитета према углу који је притом и сензитиван за различите таласне дужине (нпр. опсега $LWIR$). (Vollmer, Moellmann 2010, стр 33)

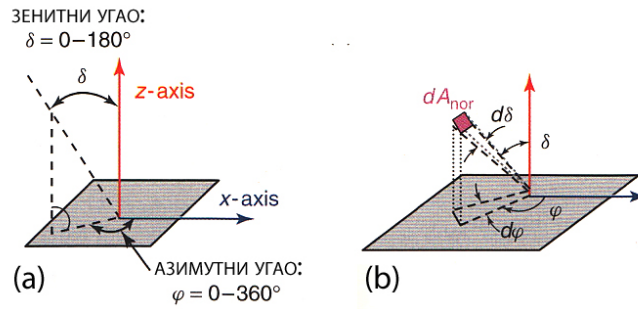
Уколико посматрамо теоретски модел сивог тела можемо усвојити да је $\varepsilon(\lambda, T)$ константна вредност која се не мења и са релативно сигурном апроксимацијом је можемо примењивати у мерењима. Основни разлог за ово поједностављење је што је примена у области зградарства таква да се, према протоколима дефинисаним у одговарајућим стандардима⁶, мерења врше углавном на константној температури уз коришћење опреме која мери у једном релативно ограниченом, најчешће *LWIR* делу спектра.

На емисивност утиче тип материјала од кога је тело направљено. У пракси се приметно разликују перформансе неметала који се карактеришу високим степеном емисивности ($\varepsilon > 0,8$) и метала чија је емисивност веома мала ($\varepsilon < 0,2$). Осим материјала, велики утицај има и начин обраде површине: да ли је она глатка – полирана (драстично смањује величину емисивности чак и до вредности од $\varepsilon < 0,02$), патинирана или храпава и сл. Велики утицај има и геометрија предмета посматрања, тј. какав је његов облик (раван, изломљен, сферичан...) као и постојање зазора, рупа и других деформитета у површини. Сам облик тела утиче на емисију и њено распрострањавање, док је утицај површинских рупа на природу читавања температуре сличан малим лабораторијским црним телима која задржавају зрачење и најчешће се у мерењима читавају као топлија места иако то није случај у реалности (ИТС, 2005).

Осим материјалних карактеристика, на вредност емисивности могу утицати, као што је то већ речено, таласна дужина, температура (њена променљивост), као и угао под којим посматрамо површину. Емисивност се може дефинисати и као однос израчености у одређеној таласној дужини и правцу који дефинишу углови δ и φ према униформној просторно хомогеној израчености које емитује црно тело исте температуре и на истој таласној дужини. Овде се говори о тзв. просторном аспект у зрачења и одређивању углова који нам помажу да математички одредимо укупан интезитет зрачења.

⁶ У Србији је прихваћен стандард *SRPS EN 13187:2008 Топлотне перформансе зграда – Квалитативна детекција топлотних ирегуларности у омотачу зграде – Инфрацрвена метода*, који дефинише услове снимања који морају бити задовољени приликом примене ове методе истраживања перформанси.

Уколико замислимо сегмент површине тела које излучава енергију и поставимо тродимензионални координатни систем са Z осом управном на површину сводимо проблем на одређивање углова азимута φ и зенита δ (слика III-7a). Међутим, за природу детекције битније је зрачење у правцу детектора који је под одређеним просторним углом. Можемо замислити диференцијално мали део сфере dA_{nor} на растојању R од посматране тачке зрачења (слика III-7б).

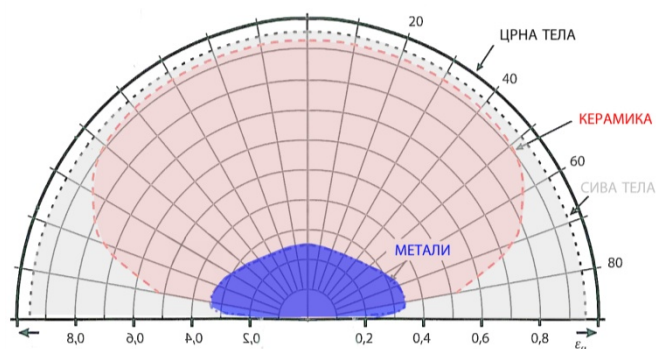


Слика III-7 Углови у простору; просторни угао (*Solid angle*) као геометријска представа углова у односу на дефинисану раван (а) преко површине управне на одређени правац (б) (Vollmer, Moellmann 2010, стр. 17)

Површина настаје диференцијалним померањима углова $d\varphi$ и $d\delta$. Посматрајући просторне релације, можемо дефинисати тзв. елемент просторног угла (енг. *Solid angle element*) $d\Omega$ на следећи начин (Vollmer, Moellmann 2010):

$$d\Omega(\delta, \varphi) = \sin \delta \, d\delta \, d\varphi = \frac{dA_{nor}}{R^2} [sr] \quad (\text{III-12})$$

Помоћу овог израза можемо одредити емисију у било ком правцу са посматране површине, што је веома важно за примену термовизије, будући да код реалних тела, за разлику од црних, која излучавају у свим правцима, савршено дифузно без промена, постоје одступања у интензитету зрачења у зависности од дистанце и угла под којим се посматра. (Слика III-8).



Слика III-8 Зависност емисивности у односу на угао посматрања, приказ за црна, сива и нека од реалних тела (адаптирано на основу Wagner, 2011, стр.17)

Ради поједностављења примене у реалној пракси, на основу резултата истраживања односа вредности параметра емисивности према промени угла под којим детектујемо зрачење, можемо закључити да, иако постоји зависност очитаних вредности емисивности од угла под којим посматрамо површине објеката, оне су за углове који су у опсегу $\pm 45^\circ$, а који представљају готово већину случајева испитивања омотача објеката у складу са лабораторијски дефинисаним вредностима, стога је неопходно и у реалној примени избегавати снимање под оштрим угловима. (Wagner, 2011).

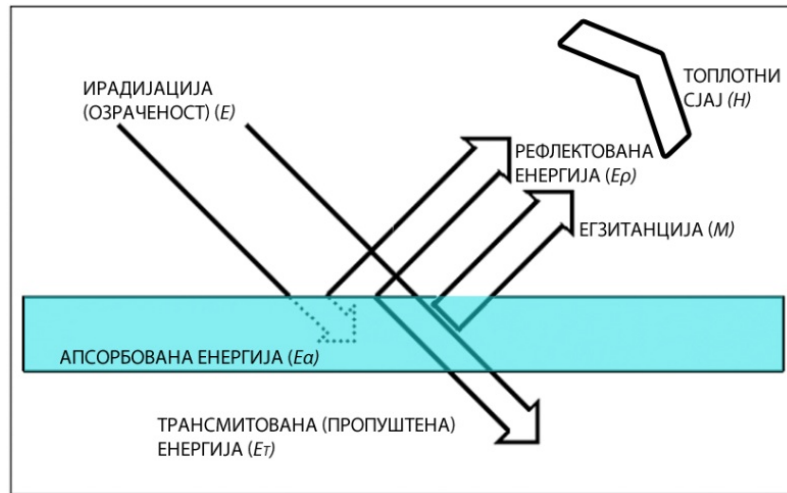
У анализи утицаја угла снимања пажња је посвећена само аспекту емисивности који утиче на читавање вредности зрачења анализираних површина а не и на друге елементе снимања о чему ће бити речи касније.

Вредност емисивности је дата табеларно у одговарајућој литератури а и велики број савремених камера их садржи у оквиру интерно уграђеног софтвера. У реалној пракси, нарочито у процесу истраживања се често не можемо ослонити у потпуности на податке који су на располагању у одговарајућим таблицама емисивности, те је неопходно извршити директно одређивање коефицијента, за шта су дефинисане релативно једноставне методе описане у одговарајућој литератури. (ITS 2005.)

III.2.3.2. Топлотни сјај, рефлексија, апсорпција, пропуштање

До сада је анализиран феномен зрачења самих тела које настаје као резултат њихове (унутрашње) енергије. У реалном простору, зрачења долазе и од других

извора и, у општем случају, у зависности од карактеристика тела које посматрамо, она се могу рефлектовати (r), апсорбовати (α) или пропустити (τ) кроз тело. (слика III-9)



Слика III-9 Шема општег случаја расподеле зрачења у односу на долазно и сопствено зрачење

Количине ових парцијалних делова долазне енергије такође зависе од таласне дужине, оријентације извора у простору, температуре тела и других фактора, по истим физичким и геометријским принципима као што је то било речи приликом анализе параметра емисивности.

Практично енергија ирадијације (озрачености) E се може изразити као збир ове три енергије:

$$E = E_{\rho} + E_{\alpha} + E_{\tau} \quad (\text{III-13})$$

Односно:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (\text{III-14})$$

Где је:

$$\rho = \frac{E_{\rho}}{E} \text{ рефлексивност, } 0 \leq \rho \leq 1$$

$$\alpha = \frac{E_{\alpha}}{E} \text{ апсорптивност, } 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$\tau = \frac{E_{\tau}}{E} \text{ пропустљивост } 0 \leq \tau \leq 1$$

Јасно је да је за црно тело $\alpha = 1$, $\rho = \tau = 0$, за бело тело $\rho = 1$, $\alpha = \tau = 0$, док су за већину сивих тела сви коефицијенти у приказаном односу $0 \leq \alpha, \rho, \tau \leq 1$.

Уколико знамо, према Кирхофовом закону, да је могућност тела да израчи енергију једнака могућности да је прими, за исти опсег таласних дужина коефицијент апсорпције се може поистоветити са коефицијентом емисије, тј. $\varepsilon = \alpha$, онда израз можемо написати на следећи начин:

$$1 = \rho + \varepsilon + \tau \quad (\text{III-15})$$

У грађевинарству најчешће анализирамо објекте који нису транспарентни тако да можемо рећи да је коефицијент транспаренције $\tau = 0$, односно да се целокупан израз своди на следећи однос:

$$1 = \rho + \varepsilon \quad (\text{III-16})$$

Значај ове релације, иако делује веома једноставно, је веома велики у примени термовизије јер нам он управо говори да су тела која су добри емитери у ствари лоши рефлектори и обрнуто, на шта се мора обратити посебна пажња приликом анализе термограма. (ИТС 2005.)

Такође је неопходно још једнапут се осврнути на питање транспаренције. Као што је већ речено, већина карактеристика је директно зависна од таласне дужине и температуре. Ова зависност је најприметнија када поредимо перформансе стакла у визуелном делу спектра $\lambda = 0.4 - 0.7 \mu m$ (где је оно претежно транспарентно) према инфрацрвеном делу спектра $\lambda = 0.7 - 400 \mu m$ (где је оно непровидно). Ова карактеристика стакла представља основ примене принципа пасивне соларне архитектуре односно директног коришћења сунчеве енергије у зградарству.

Ради бољег разумевања неопходно је дефинисати шта, у ствари, представља енергија коју ми детектором зрачења идентификујемо. На слици III-9 видимо шематски приказ укупног зрачења које напушта објект који се још назива и топлотни сјај H (некада излазно зрачење, енг. *exitant radiation*), односно збира егзитације M и дела рефлектоване ирадијације ρE .

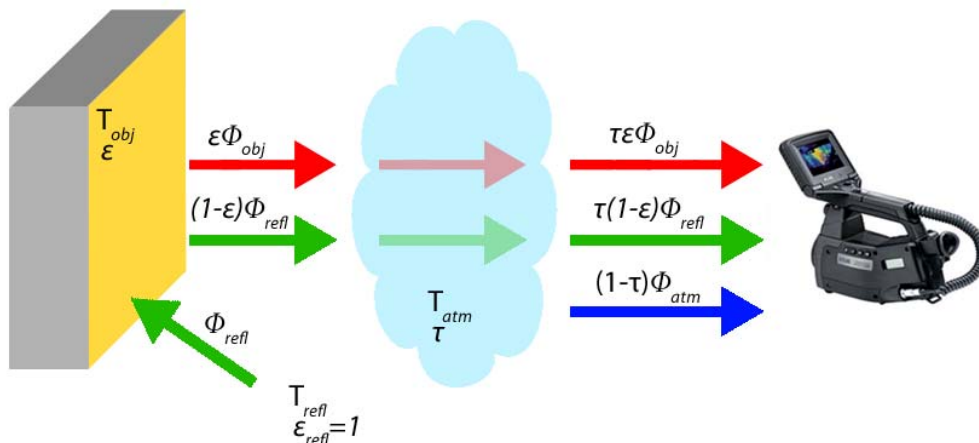
$$H = M + \rho E \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (III-17)$$

Практично, приликом снимања камером региструје се ово укупно зрачење, што би значило да камера не може да разлучи изворе појединих елемената термограма, већ је на обучености и вештини самог истраживача да адекватно протумачи налазе, што је нарочито битно код локализованих рефлексија које се испољавају на сегментима термограма.

III.3. Детекција долазног зрачења – мерења

III.3.1. Шема мерења

Шема процеса снимања термовизијском камером, осим утицаја зрачења која потичу од самог објекта, укључује, као што је већ речено, и утицај рефлексија које потичу од окружења али и утицаје који потичу од атмосфере. Укупна енергија која долази до камере је графички приказана на слици III-10.



Слика III-10 Шема мерења зрачења у процесу снимања (на основу FLIR 2004)

Са приказа се може видети да у основи ми меримо зрачење које за нетранспарентна тела потиче од природе самих тела и може се изразити преко енергије зрачења и коефицијента емисивности $\epsilon \Phi_{obj}$, рефлектоване енергије која

потиче од зрачења окружења уз одговарајући математички израз $(1 - \varepsilon)\phi_{refl}$ али и утицаја атмосфере и њеног зрачења $(1 - \tau)\phi_{atm}$,⁷ при чему се не узима у обзир расипање зрачења до кога такође долази у атмосфери. Сви сегменти укупне суме зрачења су наравно, у директној зависности од температуре а овде је потребно нагласити да T_{refl} које учествује у дефинисању ϕ_{refl} представља температуру окружења (не мора бити идентична као и температура ваздуха) која се често назива и амбијентална температура (FLIR2004).⁸

Укупна количина зрачења се, уколико се узме у обзир чињеница да све појединачне компоненте које долазе на детектор пролазе кроз атмосферу и тако бивају зависне од коефицијента трансмисивности, може бити изражена на следећи начин:

$$\begin{aligned}\phi_{ir} &= \tau(\phi_{obj} + \phi_{refl}) + (1 - \tau)\phi_{atm} \\ &= \tau[\varepsilon\phi_{obj} + (1 - \varepsilon)\phi_{refl}] + (1 - \tau)\phi_{atm}\end{aligned}\tag{III-18}$$

Где је:

ϕ_{ir} количина зрачења која долази до сочива термовизијске камере.

Приказани израз дефинише такозвано спектрално одређено зрачење јер не узима у обзир утицај таласних дужина које детектује сензор камере и за анализу добијеног електричног сигнала детектора мора се интегралити по опсегу таласних дужина. Поједностављено ми, на основу овог изрази одређујемо детектовану енергију а касније, на основу калибрацијских кривих према којима је извршено калибрање камере, посредно, и температуру површине према следећем:

$$\phi_{obj} = \frac{\phi_{ir}}{\tau\varepsilon} - \tau \frac{(1 - \varepsilon)\phi_{refl}}{\varepsilon} - \frac{(1 - \tau)\phi_{atm}}{\varepsilon\tau}\tag{III-19}$$

⁷ Атмосфера се овде узима као нерелексивна материје те се Кирхофов закон своди на следећи израз $1 = \varepsilon + \tau$, односно $\varepsilon = 1 - \tau$

⁸ Израз за измерену количину зрачења се може приказати и преко егзитације M_{obj} односно укупне снаге зрачења тела и респективно M_{refl} , односно $M\phi_{atm}$ уз раније наведени однос $M = \frac{d\phi}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ односно да је егзитанца у ствари снага зрачења исказана по површини тела.

ϕ_{ir} се израчунава на основу детектованог сигнала у софтверу камера, док се друге компоненте које утичу на једначину уносе у софтвер ручно: емисивност посматраног објекта односно површине, рефлектована (привидна) температура⁹, температура ваздуха, влажност ваздуха, односно дистанца на којој се врши мерење. (Vollmer, Moellmann 2010). Прорачун атмосферске трансмисивности се обавља аутоматски помоћу софтвера камере најчешће по *LOWTRAN* (*Low Resolution Transmittance*) *MODTRAN* (*Moderate Resolution Transmittance*) и *HITRAN* (*High Resolution Transmittance*) моделима на основу унетих вредности температуре, влажности и дистанце. Ови модели у себи садрже коефицијенте апсорпције и распршивања за све релевантне гасове атмосфере који се углавном карактеришу сталном или временски спором променом концентрације. Водена пара је једини параметар који се веома динамично може променити и стога се и дефинише мануелним уносом те је неопходно адекватно, у конкретним условима снимања, измерити њену концентрацију (Миловановић, 2013).

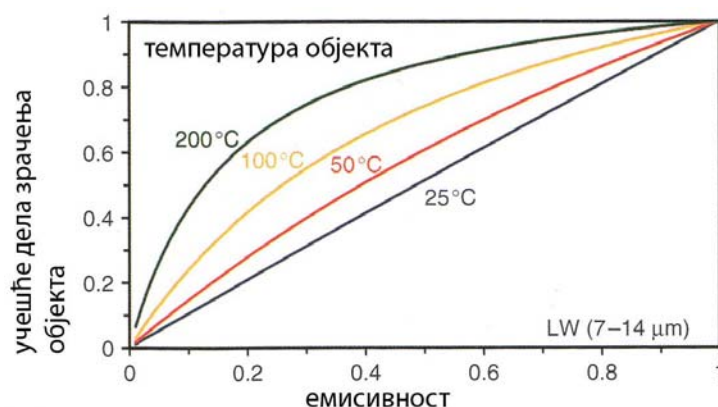
Приказана једначина је веома сензитивна према унетим вредностима те се изведена читавања могу значајно разликовати од реалних вредности. Овде је неопходно поменути да снимљени термограм физички изгледа исто, тј. графичка репрезентација добијених резултата се неће променити променом унетих параметара али се зато израчунате вредности значајније мењају. Уколико посматрамо однос очитаних резултата према задатој вредности емисивности и различитим вредностима зрачења атмосфере видимо да се, у зависности од температуре самог објекта који посматрамо, вредности могу приметно разликовати.

Зависност интензитета радијације тела у односу на укупно зрачење које детектује камера за различите вредности емисивности према температури тела и температури ваздуха од 22°C су приказани на слици III-11.

Посматрана релација је један од кључних односа у правилном тумачењу резултата и уколико унесемо неодговарајуће вредности, степен грешке очитане температуре у зависности од емисивности и зрачења атмосфере може бити и више

⁹ У термовизијском снимању, под рефлектованом температуром се подразумева квантификована количина долазног зрачења.

од 50% (Fouad, Richter, 2012). Приметно је да су одступања израженија за мале вредности емисивности тела и често се у пракси срећемо за изразом „Мала емисивност лаже“ (енг. *Low Emissivity Lies*) (ITC 2005) те се приликом анализе оваквих површина морају применити посебни методи како би се добили одговарајући, односно тачнији, резултати. Најчешћи принцип је да се анализирана површина маскира (ако је могуће и обоји) траком познате емисивности¹⁰ одређени временски период пре снимања. На овај начин се омогућава изједначавање температуре траке са температуром анализиране површине, при чему се очитане вредности на маскираном делу могу сматрати тачним те се према њима одређују и остале карактеристике.



слика III-11 Процентуално учешће зрачења објекта у детектованој количини зрачења у зависности од емисивности и температуре (Vollmer, Moellmann 2010, стр. 100).

III.3.2. Опрема

III.3.2.1. Камера

Као што је већ раније речено, приликом анализе електромагнетног спектра, термивизијско снимање се обавља мерењем зрачења, у складу са атмосферским карактеристикама, у два доминантна сектора: средњеталасном инфрацрвеном сектору (*MWIR*) 3-5 μm , и дуготаласном инфрацрвеном сектору (*LWIR*) 8-14 μm ,

¹⁰ За ову примену се најчешће користи ПВЦ изолирајућа трака емисивности $\varepsilon = 0,95$. (ITC 2006)

употребом одговарајућих термовизијских камера. Коришћење конкретног опсега снимања зависи највише од природе објекта који меримо. Тако се мерења у краћим таласним дужинама углавном користе за објекте виших температура, док се у области грађевинарства, где су температуре ниже, користе камере које имају сензоре оперативне у зони већих таласних дужина. Осим саме камере, у процесу снимања је неопходан и рачунарски систем опремљен одговарајућим софтвером помоћу кога се врши анализа и обрада слика.

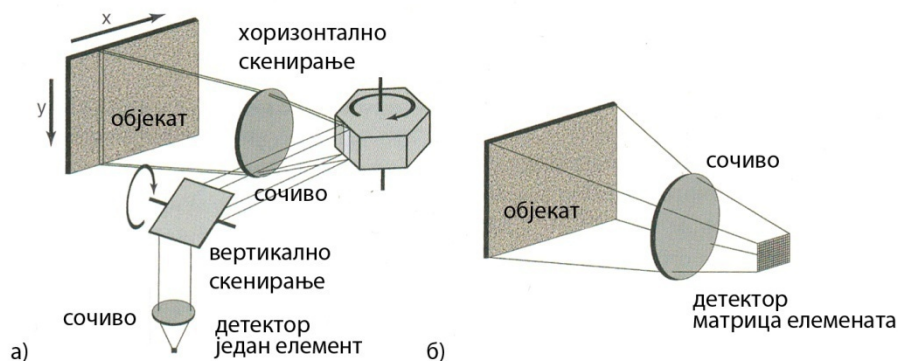
Камера представља основни уређај у процесу сваког термовизијског снимања. Можемо је дефинисати као комплексни опто-електронски систем који помоћу одговарајућег оптичког дела (сочива) фокусира долазно зрачење на детектор који генерише одговарајући електрични сигнал чијом се даљом обрадом у складу са примењеним калибрационим правилима генерише дводимензионални графички приказ (Chrzanowski 2005). Ова слика представља визуелну репрезентацију квантификованог зрачења односно поједностављено дистрибуције температуре на посматраном објекту односно сцени¹¹. Технолошки посматрано, основни делови система су: оптика, детектор зрачења, систем за хлађење односно термичку стабилизацију детектора, електронски део за обраду сигнала, кориснички интерфејс (са излазним и контролним јединицама) и екран на коме се врши приказ слике (Vollmer, Moellmann 2010).

Креирање слике започиње процесом прикупљања енергије пренете зрачењем помоћу оптичког сочива израђеног од материјала који су пропусни за одређени део инфрацрвеног спектра зрачења. Постоји велики број погодних материјала на тржишту а најчешће се у употреби германијум (Ge), силицијум (Si), силицијум диоксид (SiO_2), цинкселенид (ZnSe) цинксулфат (ZnS) и др. (Rogalski, Chrzanowski, 2002).

По начину на који врше прикупљање долазног зрачења и његову каснију детекцију разликује се већи број технолошких решења конструкција камера. Уже посматрано, уколико се ограничимо на цивилну употребу, можемо рећи да се у савременој примени користе два принципа рада који чине основ термовизијских камера: линијски скенери са једним детектором (или у комплекснијој форми

¹¹ Камера не разазнаје зрачење које потиче од објекта у односу на зрачење окружења стога је један од основних услова за примену методе постојање одговарајуће температурне разлике како би објекат посматрања уопште био видљив према окружењу.

линијом појединачних детектора) и равански матрични детектори (енг. *Focal plane array – FPA*). Шеме принципа по којима се врши прикупљање и касније детекција зрачења можемо видети на слици III-12.



слика III-12 Принципи формирања слике за камере различитих типова: а) линијски скенери б)матрични детектори (Vollmer, Moellmann 2010, стр.102)

Код линијских скенера слика се формира линију по линију и њено генерисање је у функцији времена снимања док се код матричних детекторских система слика формира тренутним пропуштањем зрачења на детектор.

III.3.2.2. Детектор

Детектор је најбитнији елемент камере и он представља уређај који врши конверзију енергије зрачења у неки други облик енергије који се може мерити, најчешће електричну. Детектори представљају комплексне технолошке склопове¹² који се базично могу сврстати у две групације према принципима на којима функционишу: термални и фотонски (квантни).

Термални детектор реагује на долазно зрачење повишавањем сопствене температуре коју је потом потребно на одређени начин претворити у употребљиви електрични сигнал. Процес креирања сигнала је, у ствари, посредан и базира се на различитим познатим температурно зависним особинама појединих технолошких склопова о чему је већ било речи у уводном делу овог поглавља. Најчешће су у употреби болометри који користе промену електричне отпорности

¹² Принципи конструисања детектора и њихове физичко хемијске особине превазилазе фокус ове дисертације а детаљније о структури и конструкцији детектора, материјалима од којих се производе и начинима функционисања у литератури Vollmer и Moellmann 2010, Chrzanowski 2005, Maldague, 2001

потом термопарови груписани у термогрупе који користе појаву генерисања електричне енергије према Зебековом ефекту и пироелектрични детектори који користе топлотну зависност електричне поларизације. Данас су у широј употреби углавном болометри и то у конфигурацији микроболометара организованих у виду матричних детекционих поља (Vollmer, Moellmann). Предности оваквих система су нижа цена и могућност рада у различитим температурним условима без потребе за хлађењем а самим тиме и мање димензије опреме. Основне карактеристике су релативно мала сензитивност, спорији одзив (12ms) али и униформност детекције која се не мења са променом таласне дужине. (Flir 2015).

Фотонски детектори се базирају на принципу директног мерења сигнала који настаје у полупроводничким материјалима по принципу тзв. унутрашњег фотоелектричног ефекта, односно појаве да улазно зрачење доводи до побуђивања електрона који из стања релативног мировања (валентно стање) прелазе у активно стање (проводно стање) (Ibarra Castanedo, 2005). Уколико овај тип детектора охладимо до веома ниских температура можемо минимизирати било какво интерно кретање електрона као последица сопствене енергије детектора и остварити да се побуђивање јавља искључиво као последица енергије упадног зрачења. На овај начин добијамо веома сензитивне детекторе, са брзим одзивом (1ms) али веома осетљиве на спољашњу температуру и комплексне за употребу, нарочито у компактним системима. Такође, код овог типа детектора се јавља изузетна остетљивост према таласним дужинама тако да се њихове перформансе значајније мењају што није случај са болометарским системима. У пракси, свака таласна дужина носи одређену количину енергије, те је детектор прилагођен специфичном, унапред дефинисаном, опсегу мерења јер постоји појава тзв. минималне енергије побуђивања електрона. Хлађење је прилагођено конкретном дизајну камере тако да је за снимање у краткоталасном опсегу оно мање и износи око -100°C док је у дуготаласном изразитије и износи -196°C (Flir 2015). Овде треба нагласити да су и болометарски системи зависни од хлађења али се оно углавном везује за нормалну (собну) температуру и не подразумева комплексна технолошка решења.

Можемо закључити да, иако фотонски детектори дају много бољи одзив и прецизнија мерења, они захтевају хлађење, технолошки су комплекснији (скупљи)

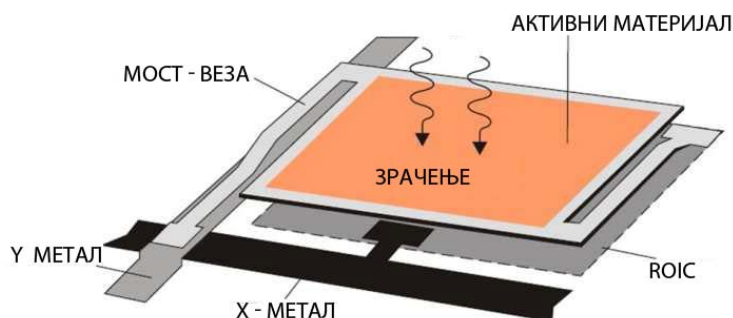
и ограничени на ужи сегмент таласних дужина. Њихова примена је за специјализоване области, док се у грађевинарству углавном користе болометарски детектори. Истраживања за потребе овог рада су рађена камером *FLIR B20*, чији је детектор болометарскиг типа и конструкцијски је израђен као матрични равански са резолуцијом 320x240 тачака.

III.3.2.3. Матрични равански склоп детектора (*Focal Plane Array - FPA*)

У циљу бољег разумевања принципа снимања неопходно је објаснити и принцип матричног раванског склопа детектора (*FPA*) односно његове корелације са прецизношћу снимања и величином објекта снимања. Технологија развијана као део војних програма у Америци, Јапану, Француској и др. постала је цивилно расположива тек крајем 1990-их година и одмах довела до значајних помака у конструкцији камера (Maldague 2001). Као што му и само име каже, матрични равански детектор се састоји од матрице појединачних микроболометара повезаних у јединствену детекциону површину. Сам микроболометар је у ствари специфичан термички активан материјал (малог капацитета и великог линијског издужења) спојен нископроводним носачима у изолованом вакуумском склопу са подлогом од силицијума на којој се налази штампано коло које читава настале промене или *ROIC (Readout Integrated Circuit)*. У циљу побољшања читавања, детекциони материјал је уздигнут од подлоге како би се самњио међусобни утицај а испод њега је постављена рефлектујућа површина са циљем појачавања апсорпције активног материјала (Слика III-13).

При озрачивању долази до промене отпора склопа који се потом мери и софтверски процесира у одговарајући сигнал. Данашње камере имају детекторе који се састоје од великог броја појединачних микроболометара са најчешћим конфигурацијама од 80x80 па све до 2048 x 2048 тачака¹³. Потребно је нагласити да је један микроболометар у ствари једна тачка на финалној слици.

¹³ Данас се за професионалне примене користе камере резолуције 320 x 320 до 1024 x 1024 тачака. Веће резолуције се углавном користе за лабораторијске примене. Величина формата FPA детектора значајно повећава цену камере и то са фактром x2 у сваком наредном кораку, мада је приметан тренд ширења индустрије и пада цена.



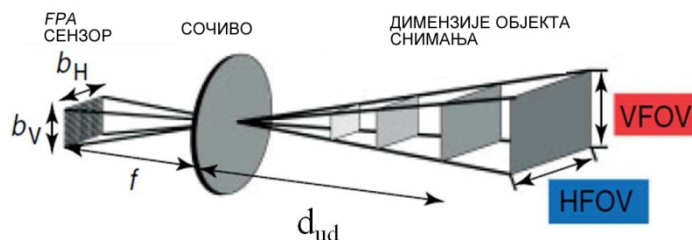
Слика III-13 Шематски приказ микроболометра, димензија појединачног микроболометра је у најновијим системима $17 \times 17 \mu\text{m}$ (на основу Rogalski, 2002, стр. 123.)

Прецизност система зависи, наравно, од квалитета јединичних детектора али и начина на који је формирана матрица односно њене попуњености (енг. *Fill factor*), с обзиром да је сваки детектор дискретна физичка целина он мора бити одвојен и термички изолован од суседних. Самим тиме, када се упореди укупна величина сензора и појединачних болометара јавља се разлика у површини која може бити значајна а у савременим камерама је сведена на мање од 20%. Производња сваке компоненте, осетљивости каква се очекује од микроболометра, је изузетно сензитивна. Стога се јављају одређене неконзистентности које доводе до различитости читавања. Камере су стога опремљене унутрашњим системом који усаглашава одступања перформанси појединачних детектора са аспекта сензитивности и померености сигнала и креира јединствену хомогенизовану слику. Овај систем аутоматски, софтверски кроз неколико корака „уједначава“ (доводи у линеарну корелацију) читавања појединих сензора а финални корак је назван неуниформна корекција сигнала (енг. *Nonuniformity correction - NUC*) и он обједињава све појединачне вредности у јединствен сигнал који се помоћу калибрацијских кривих у визуелном сегменту камере исказује као температурна вредност (Flir 2015).

Осим квалитета детектора, на квалитет снимања утиче још неколицина карактеристика камере које ће бити детаљније објашњене.

III.3.2.4. Видно поље (*FOV*), тренутно видно поље камере (*IFOV*)

Видно поље (енг. *Field of View* - *FOV*) је карактеристика камере која у ствари дефинише максималну величину слике коју можемо снимити на одређеној дистанци. Она је директно зависна од оптичких карактеристика сочива камере, тачније његове жижне даљине и удаљености предмета који се снима. Изражава се посредно преко углова који се дефинишу за хоризонтални (*HFOV*) и вертикални (*VFOV*) правац као што је то приказано на слици III-14 (Vollmer, Moellmann 2010).



Слика III-14 Приказ видног поља камере (Vollmer, Moellmann 2010, стр.120)

FOV се може одредити једноставном тригонометријском једначином уколико знамо која је димензија сензора (изказана преко угла одређеног димензијом сензора и жижном даљином):

$$FOV = 2 \tan^{-1}\left(\frac{b}{2f}\right) [m] \quad (\text{III-20})$$

Сам податак колико је видно поље и није од пресудног значаја, међутим, на основу њега и дистанце од објекта можемо одредити колика је величина слике коју камера може снимити што је веома битно код камера са променљивом жижном даљином. Код камера код којих је конструкција изведена са фиксном жижном даљином, најчешће се јасно дефинише величина хоризонталног и вертикалног угла, чиме се омогућава једноставно прерачунавање и оно се може приказати следећом формулом:

$$HFOV = 2d_{ud} \tan\left(\frac{FOV_h}{2}\right), \quad (\text{III-21})$$

Односно

$$VFOV = 2d_{ud} \tan\left(\frac{FOV_v}{2}\right) [m] \quad (\text{III-22})$$

Камера коришћена за истраживање у тези се карактерише стандардним сочивом са односом хоризонталног и вертикалног угла исказаним као $24^0 \times 18^0$ и жижном даљином од 0.3m. Простом заменом вредности добијамо да камера „види“ објекат величине 4,25x3.17m на удаљењу од 10m док је на удаљењу од 50m величина објекта 21,26x15.83m.

Величина слике сама по себи не значи пуно уколико се не повеже са величином детектора камере чиме добијамо податак о видном пољу једног детектора у оквиру матрице односно такозваној просторној резолуцији. Под појмом просторне резолуције се подразумева најмања величина детаља у оквиру видног поља који се може разлучити камером. Укупно поље се још назива и тренутно видно поље камере (енг. *Instantaneous Field of View – IFOV*). Пошто се овде говори о болометарској камери са матричним детектором, назив тренутни је сувишан, и он је уведен да би се раздвојиле моћи детекције у јединици времена различитих технолошки конципираних камера.

Јединица којом се дефинише резолуција на удаљењу од 1m се изражава преко угла исказаног у милирадијанима [mrad]¹⁴:

$$IFOV = \frac{\alpha \pi}{180 \times \text{res.}} [\text{mrad}] \quad (\text{III-23})$$

Где је

α - угао сочива камере

res - резолуција детектора

¹⁴ 1rad одговара углу којим се карактерише дужина лука једнака пречнику круга исказан у степенима он износи 57.296°

За камеру резолуције 320/240 и сочива $24^{\circ} \times 18^{\circ}$, добијамо вредност угла $1,31 \text{ mrad}$. Посматрајући геометријску зависност, можемо рећи да је величина објекта који се може разлучити:

$$D = IFOV d \quad (\text{III-24})$$

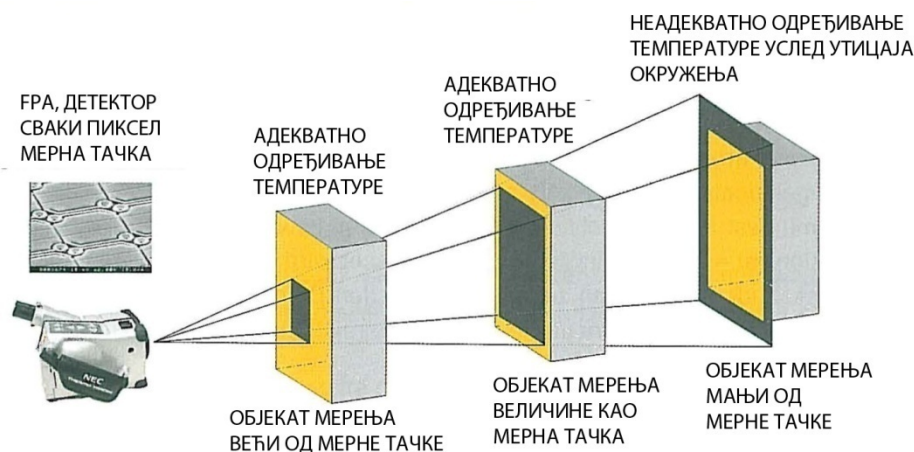
Где је

D - величина објекта

$IFOV$ - тренутно видно поље камере

d - удаљење камере од објекта снимања

Важно је још једанпут нагласити да камера снима укупно зрачење које пада на детектор тако да у зависности од удаљења од предмета и његове величине читавања зависе од односа $IFOV$ и самог предмета што је илустровано на слици III-15.



Слика III-15 Прецизност мерења температуре објекта исказана кроз зависност угла $IFOV$ и величине предмета (Fouad, Richter, 2012 стр 57.)

Уколико је површина коју је у стању да детектује један пиксел мања или једнака од објекта посматрања, његово читавање ће бити исказано у складу са реалном температуром. Међутим, уколико је објекат мањи, онда у процену његове температуре улази и непосредно окружење, без обзира да ли се овде ради о суседним елементима једног те истог тела или не. У пракси, ми морамо да будемо свесни просторне резолуције и да ускладимо њене карактеристике са минималним величинама елемената сниманог објекта, било прилагођавањем

дистанце снимања или коришћењем додатне оптике, односно широкоуглих или телеобјектива.

III.4. Термограм

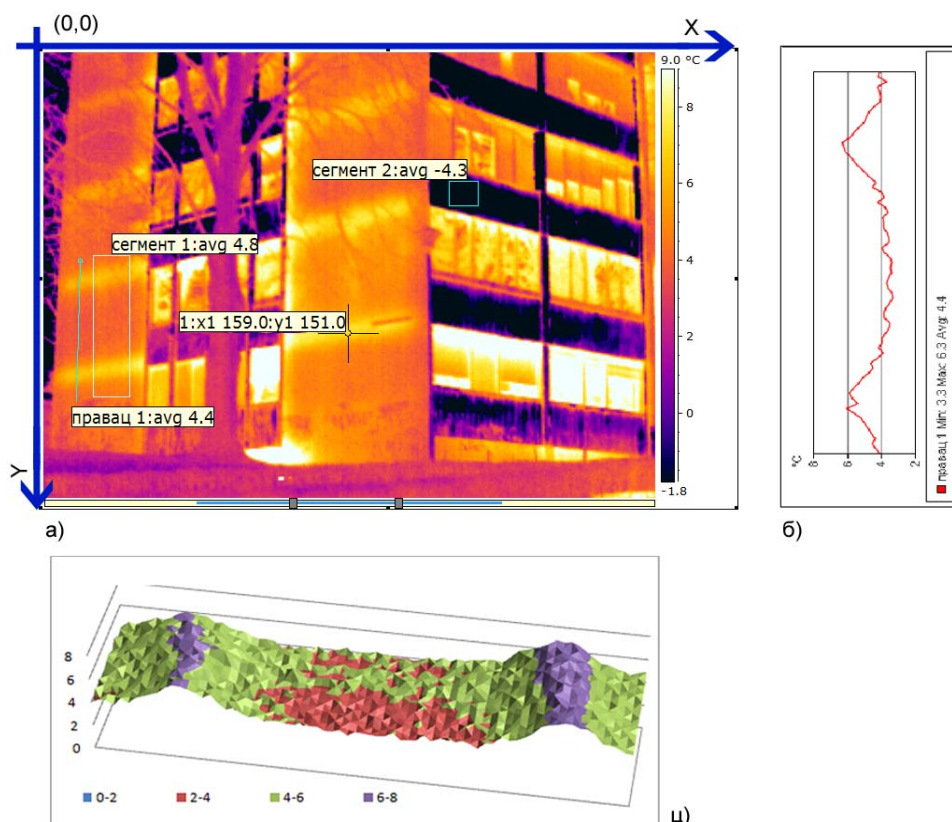
Термограм представља графички резултат процеса аквизиције долазног зрачења помоћу сочива камере, његове детекције, претварања енергије зрачења директним или посредним начинима у одговарајући сигнал и обраде сигнала у складу са предефинисаним калибрацијским вредностима. Он је финални „излаз“ процеса снимања и у себи садржи, осим визуелне репрезентације и директне (радиометријске) или изведене (температурне) информације које је потом могуће анализирати одговарајућим софтвером.

Геометријски посматрано термограм је, у ствари, скуп појединачних пиксела у резолуцији која одговара резолуцији детектора, при чему сваки пиксел одговара појединачном детектору у оквиру раванске детекторске (*FPA*) матрице. Он се карактерише одговарајућим координатама (x, y) али и температурном вредношћу посредно изведеном на основу претходно изложених принципа. (Maldaque, 2001).

Пример једног термограма сегмента фасаде зграде снимљеног у зимским условима можемо видети на слици III-16.

Осим уобичајене репрезентације зрачења преведене у графички приказ, на термограму можемо видети и примену неколико најчешће коришћених једноставних алата за анализу слике: приказ тачке са координатама које је одређују према резолуцији слике односно резолуцији детектора, правац дуж кога анализирамо измерене вредности, сегмент у оквиру кога се такође могу анализирати различите карактеристике. Приказани алати као и многи други директно доступни у оквиру самих софтвера нам омогућавају да за поједине елементе приказа који су од нашег интереса добијемо одговарајуће квантитативне податке базиране на измереној количини енергије зрачења како би могли да приступимо одговарајућој интерпретацији резултата.¹⁵ Уколико желимо да

¹⁵ За потребе анализе термограма користе се различити софтверски пакети прилагођени одређеним наменама, односно пољима испитивања, тако да су неки намењени обради термограма, док су други више усмерени ка временски зависним перформансама односно обрадама видео



Слика III-16 Изглед термограма сегмента стамбеног објекта: а) графички приказ површинске дистрибуције температуре, са назначеном тачком 1 и њеним координатама ($x=159$ и $y=151$), као и приказом других алата за анализу слике: линијско (дуж правца) и површинско (у оквиру сегмента) очитавање температура; б) промена температуре дуж правца 1; ц) просторни приказ дистрибуције температуре у назначеном сегменту 1

применимо комплексније методе анализе, које нису доступне у оквиру расположивих софтвера, могуће је користити само нумеричке вредности температурних очитавања (евентуално интензитет зрачења) и применити друге алгоритме и функције расположиве у оквиру нпр. МатЛаб (*MatLab*[®]) софтвера односно одговарајућих скрипти.¹⁶ (Maldague, 2001)

Потребно је нагласити да су на термограму маркиране две површине назване *сегмент 1* и *сегмент 2* са карактеристичним вредностима средњих температура од $+4,8^{\circ}\text{C}$ односно $-4,3^{\circ}\text{C}$ што на први поглед може изгледати веома чудно јер би практично значило да је сегмент 2 драстично бољих термичких

секвенци. Приликом израде дисертације коришћени су: *Flir Quick Report ver. 1.2* (2009.), *Flir Reporter 9 Professional* (2012.), *Flir Image Builder ver. 5.0* (2005.) сви израђени од стране компаније *Flir System*

¹⁶ Више о скриптама за МатЛаб (*MatLab*[®]) у оквиру Maldague 2001. Стр. 172-174 и Appendix F, стр. 639-671

карактеристика. То, наравно, није случај већ се овде ради о деловима фасаде који су материјализовани од алуминијума који се карактерише великим степеном рефлексије тако да су процењене вредности температуре нереалне и, у ствари, приказују рефлектовану температуру окружења (једначина мерења). Питање рефлексија је, као што је већ речено, једно од основних за разумевање примене методе инфрацрвене термографије и може довести, уколико се не анализира правилно, до неодговарајућих закључака.

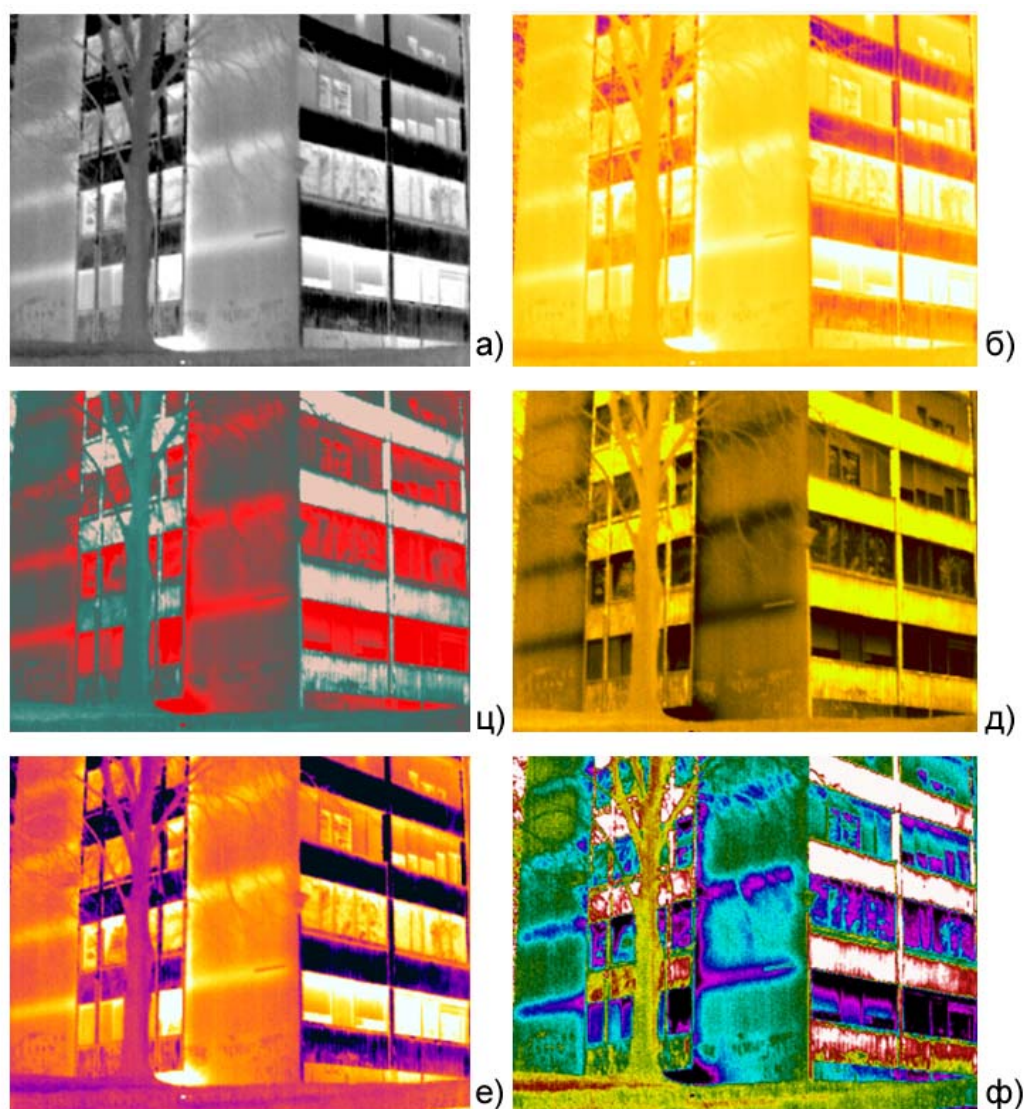
III.4.1. Графички приказ термограма - палета термограма

Графички приказ је израз конвенција и најчешће је усаглашен са конкретним потребама снимања тако да се у употреби јавља различит дијапазон такозваних палета¹⁷ приказа као што можемо видети на слици III-17.

Одабир конкретне палете зависи од тога да ли желимо да постигнемо што већи контраст између блиских температурних вредности (слика III-17ф) или пак желимо да пратимо дистрибуцију температуре са наглашавањем одређених зона било светлијим или тамнијим тоновима односно другом бојом (слика III-17а-е). Посматрањем само термограма, без додатних информација о вези између температурних читавања и тзв. графичке температурне скале, не можемо извести никакве закључке о предмету који се посматра (приказ на слици III-16а где можемо видети упоредни приказ нумеричких вредности температура и одговарајућих боја којима су графички приказане).

Уобичајено правило да се на термограмима тамнијим тоновима или уколико користимо приказе у боји онда коришћењем љубичастих, плавих, односно тамно зелених тонова приказују ниже температурне вредности не мора увек бити примењивано што нас може довести до заблуде у тумечењима. На слици III-17д приказан је тзв. инверзни термограм односно овде су тамним бојама приказане топлије зоне термограма за разлику од осталих приказа. Термограм мора бити увек праћен било температурном скалом усаглашеном са колорном шемом или нумеричким подацима о прочитаним температурним вредностима свих пиксела.

¹⁷ Под палетом се подразумева шема боја коришћених за приказ одговарајућих температура

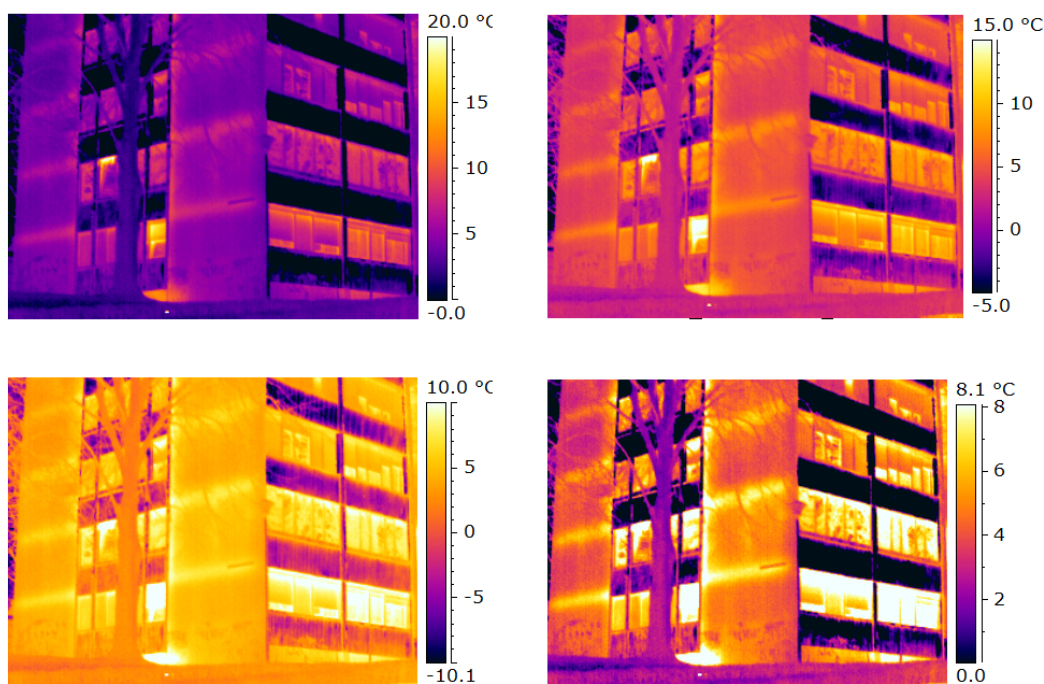


Слика III-17 Различити графички прикази истоветног термограма помоћу алата „палета“ у оквиру софтвера камере: а) сива палета (монохроматски приказ); б) жута палета (црно жуте боје); ц) сивоцрвена палета); д) инверзна жута палета; е) „метална“ палета (одговара промени боја загревања метала); ф) „кишна“ (енг. *rain hi contrast*) палета великог контраста

III.4.2. Температурни опсег

Посебан проблем у правилном тумачењу термограма представља одабир приказа температурних граница које се дефинишу тзв. нивоом и опсегом (енг. *level and span*). Ова два параметра одређују прецизност и јасноћу приказа. Опсег се дефинише као граница доњих (минималних) и горњих (максималних) температурних вредности у оквиру којих се врши приказ термограма и најчешће се може накнадно одредити и приликом обраде термограма софтверски. Ниво се

може схватити као температурна вредност у односу на коју се приликом снимања дефинише средина опсега и он се одређује у већини случајева само приликом снимања. Ми можемо варирати опсег али ниво у накнадној обради остаје дефинисан као средина новоустановљеног опсега. Најбољи пример приказа које се могу добити различитим поставкама вредности ових параметара се могу видети на слици III-18.



Слика III-18 Приказ истог термограма са различито усвојеним вредностима температурног опсега.

Можемо закључити да се дефинисањем опсега добијају визуелно другачији термограми који, без даљих објашњења или других података о самом процесу снимања односно утицајним факторима, могу бити неодговарајуће тумачени. Која од приказане четири варијанте је добра? Да ли посматрана зграда губи пуно или мало енергије кроз свој термички омотач? Ово су основна питања која се постављају у покушају да се, без даљих прорачуна или података, учини било каква квантитативна процена и на које је немогуће дати прави одговор. Визуелна информација, на исти начин као што је то био случај и код одређивања палета,

није довољна јер пружа само привидну слику о перформансама омотача и стога не може бити довољна за било какво доношење релевантних одлука.

Проблем у вези са постављањем „нормализованих“ вредности опсега се огледа у непостојању општих препорука дефинисаних стандардима. Препоруке у овом смислу су неопходне како би се одредио јединствени метод помоћу кога се врши подешавање параметара са циљем добијања усаглашених визуелних израза односно њихова хармонизација са предметом снимања.

Стандардом СРПС ЕН 13187:2008 „Топлотне перформансе зграда – Квалитативна детекција топлотних ирегуларности у омотачу зграде – Инфрацрвена метода“ који представља усвојени међународни стандард EN ISO 13187:1998, не дефинише начин приказивања термограма у смислу нормализације опсега, већ се само у делу 4. Принципи упућује на „референтне термограме“ прорачуне или друга истраживања. Детаљније о примени овог стандарда у испитивању перформанси омотача ће бити речи у наредном поглављу.

Уочавајући проблем нормализовања приказа термограма у литератури наилазимо на више различитих препорука које нису увек усаглашене и најчешће представљају искуствени резултат.

Као полазиште можемо издвојити препоруке које су навели Фуад и Рихтер (Fouad, Richter, 2012):

“Скала би требало да представља око 0,7 температурне разлике између спољашње и унутрашње температуре.

Сви термограми би требало да буду приказани у јединственој палети како би се избегла двосмисленост приказа.

Термограми који се снимају споља би требало да буду нивелисани тако да спољашња температура представља око 20% скале

Термограми који се снимају изнутра би требало да буду нивелисани тако да унутрашња температура представља 60% скале“ (Fouad, Richter, 2012 стр 59)

Такође се у пракси јављају и различите искуствено базиране експертске препоруке које се углавном односе на питања дефинисање опсега према претпостављеним губицима зграда, односно познавању конструктивних и материјалних карактеристика омотача. Тако можемо наћи и податак да би опсег требало да износи (Tanner. Lehmann, Frank, 2011.):

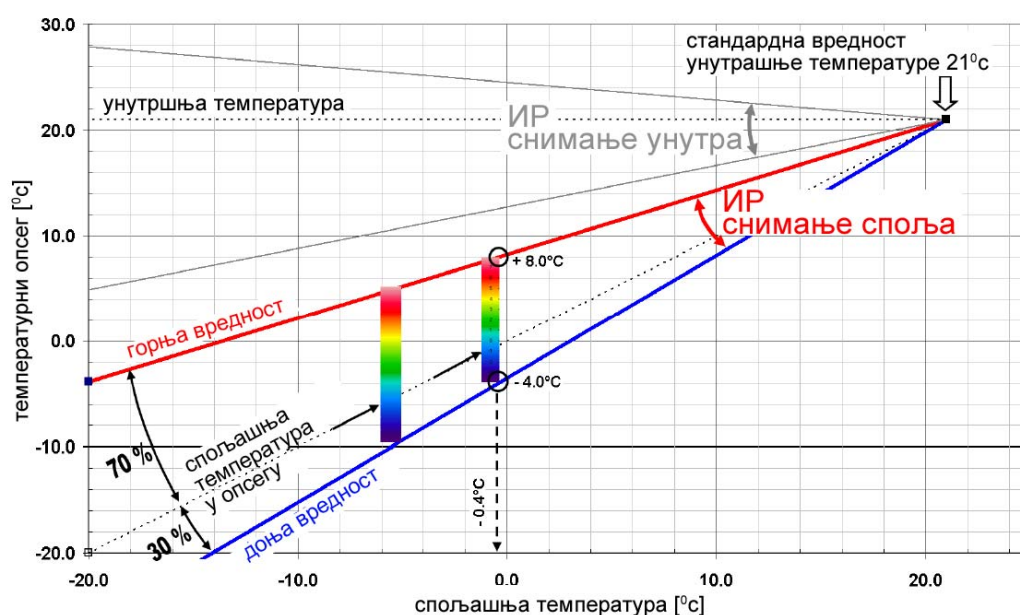
- 15°C за зграде из периода пре обавезности постојања термоизолације, тј пре 1960,

- 12°C за зграде када постоје јасно дефинисани захтеви за термичком заштитом тј. од 1980 и
- 10°C за новије зграде изграђене према савременим прописима.

Јасно је да је у питању искуствена процена која смањује опсег пропорционално са повећањем квалитета изолације омотача. Иако је овај метод усаглашен са најчешћим применама у пракси, он није базиран на научно дефинисаним принципима и самим тиме је подложен произвољностима.

Управо је потреба за научно поткованим и истовремено јасно применљивим инжењерским приступом у решавању проблема хармонизације начина представљања процеса термовизијског истраживања перформанси зграда односно приказивања резултантних термограма био предмет истраживачког пројекта у организацији Федералног завода за енергетику при Швајцарском Савезном министарству за животну средину, саобраћај, енергетику и комуникације. Током 2007-2011. група професионалаца и истраживача је развила метод *Quali Thermo*, базиран на емпиријском принципу са идејом стварања смерница за хармонизацију приказа термограма снимљених у различитим временским условима (Tanner. Lehmann, Frank, 2011.). Овим методом се дефинишу референтне вредности и базични принципи на основу којих се касније врши мануелно прилагођавање карактеристика појединачних термограма. Резултат метода је синтезно исказан помоћу графикана приказаног на слици III-19 на коме су графички приказане основне смернице *Quali Thermo* метода .

Са приказа можемо видети да је основ поступка садржан у дефинисању тзв. базног случаја на основу кога је извршено примарно градуирање скале. Усвојене су стандардне полазне температурне вредности од -0,4°C за спољашњу температуру, односно 21°C за унутрашњу температуру и на основу њих је извршено подешавање скале опсега редукцијом на 56% вредности температурне разлике између унутрашње и спољашње температуре. На тај начин је добијен базни опсег у распону од -4°C до 8°C. Спољашња температура према укупној „нормализованој“ скали је исказана у процентуалном односу од 30%, уз напомену да је неопходно прилагодити и усвојену колор шему на начин да се све температуре хладнијих зона приказују као плаве док се најтоплије зоне приказују као црвене. У горњем делу графикана је дата и препорука за нормализовање



Слика III-19 Графичка илустрација *Quali Thermo* метода за нормализацију термограма (Tanner, Lehmann, Frank, 2011. Стр. 26)

термограма снимљених у унутрашњости. *Quali Thermo* метод, осим опсега дефинише и друге елементе снимања као и односе према утицајима окружења о чему ће бити речи касније. Метод је од 2009. у фази експерименталне провере и финог подешавања у складу са добијеним резултатима и тренутно је у примени верзија 2.

III.5. Могућности примене у архитектури

Метода инфрацрвене термографије се сматра идеалном неструктивном методом за анализу перформанси великог броја елемената зграда које се карактеришу термичким променама. Она се може примењивати на раличите временски зависне начине:

- као метода идентификовања стања посматраног објекта у датом тренутку снимањем појединачних термограма,
- као техника праћења стања кроз одређени временски период снимањем низова термограма у унапред дефинисаним секвенцама и
- као техника праћења стања снимањем видео записа.

Техника праћења стања се нарочито користи код праћења процеса који се карактеришу брзим временски променљивим температурним карактеристикама односно најчешће приликом примене принципа тзв. активне термовизије о чему ће бити више речи касније.

Основна предност инфрацрвене термографије се огледа и у њеној бесконтактној примени чиме се избегава могућност да сам процес мерења утиче на одређивање вредности мереног објекта као што је то случај са нпр. методом мерења топлотног протока контактним методама. Ова карактеристика је нарочито битна за све процесе праћења стања или недеструктивног тестирања који су временски зависни јер не захтева сталност присуства особе која спроводи истраживање.

У основи примене методе се, као што је већ раније речено, налази процес снимања температура површина и њихових каснијих анализа. Уопште узев, постоји велики број могућих дијагностичких примена методе у зградарству а као најчешће се наводе:

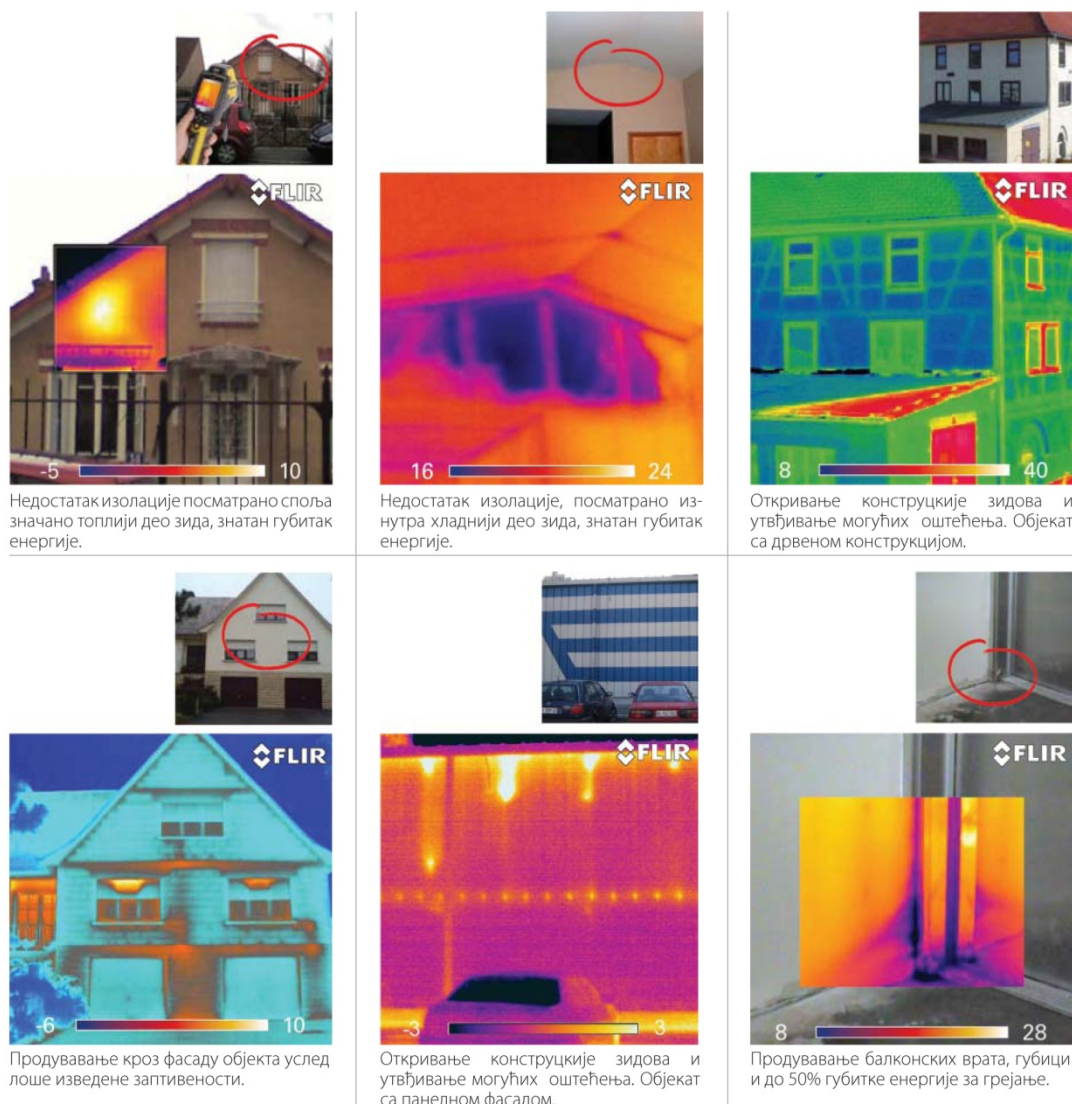
- испитивање омотача зграда у циљу утврђивања губитака односно добитака топлоте што практично значи да можемо утврдити стање термоизолационих слојева (њихове карактеристике, постојање дефеката или потпуно одсуство) у зидовима, крововима, на еркерима и свим осталим деловима термичког омотача који је у директном контакту са спољашњом средином;
- одређивање положаја термичких мостова, квантификација њихове величине, степена топлотних губитака, геометријских карактеристика;
- одређивање зона продувавања кроз термички омотач (ова примена се најчешће изводи комбиновано са техником Теста заптивености (енг. *Blower door*);
- одређивање влажних зона и евентуално извора влажења. (Fokaides, Soteris 2011).

Уколико пажњу са омотача усмеримо и на друге елементе зграда и уграђене инсталационе системе видимо да се инфрацрвеном термографијом може испитивати:

- стање електроинсталација (зоне прегревања контаката и каблова,

односно претварачких јединица, утврђивање положаја),

- одређивање положаја развода централног грејања, односно развода подног и зидног грејања,
- одређивање застоја у цевима и др. (FLIR 2011).



Слика III-20 Могућа примена инфрацрвене термографије у зградарству: а) откривање недостатака изолације посматрано споља б) откривање недостатака изолације посматрано изнутра ц) откривање конструкције зидова д) откривање места продувавања кроз фасаду е) откривање места цурења равних кровова ф) откривање подконструкције зидова и зона влажења г) откривање зона инфилтрације кроз прозоре и вата х) откривање зона влажења зидова и) откривање положаја цеви централног грејања ј) откривање зона цурења система централног грејања к) откривање лоших контаката електроинсталација л) откривање места зачепљења у цевима (адаптирано на основу Flir 2011)

Најчешће области примене метода снимања инфрацрвеном термографијом у зградарству су приказане на слици III-20. На основу приказаних илустрација,

видимо да је дијапазон употребе веома велики и да се односи како на зграду у целисти (омотач) тако и на поједине инсталационе системе. За разлику од неких других метода испитивања стања омотача (нпр. тест заптивености – енг. *Blower door*), термовизијско снимање није условљено положајем у односу на опну (термички омотач) зграде, тј. да ли се спроводи са спољашње или унутрашње стране. Једино је приметно да се већина унутрашњих примена односи на истраживање инсталационих система и њихових неодговарајућих перформанси а мање на понашање термичког омотача.

Без обзира на позицију, принципи примене методе су идентични уз чињеницу да је спољашња примена значајније комплекснија за реализацију првенствено услед неопходности постојања одговарајућих услова за снимање као и великог броја параметара који могу утицати на правилно тумачење резултата.

Од утицајних фактора као најбитнији се издвајају (Vollmer, Moellmann, 2010):

- утицај сунчевог зрачења (директни или индиректни),
- утицај ветра, нарочито уколико се карактерише већим интензитетом,
- утицаји влажности (било да она потиче од кише или неког другог извора унутар самог омотача зграде),
- карактеристике небеске сфере (степен облачности, односно количина амбијенталног зрачења),
- геометријски фактор зрачења (енг. *view factor*),
- утицаји других објеката...

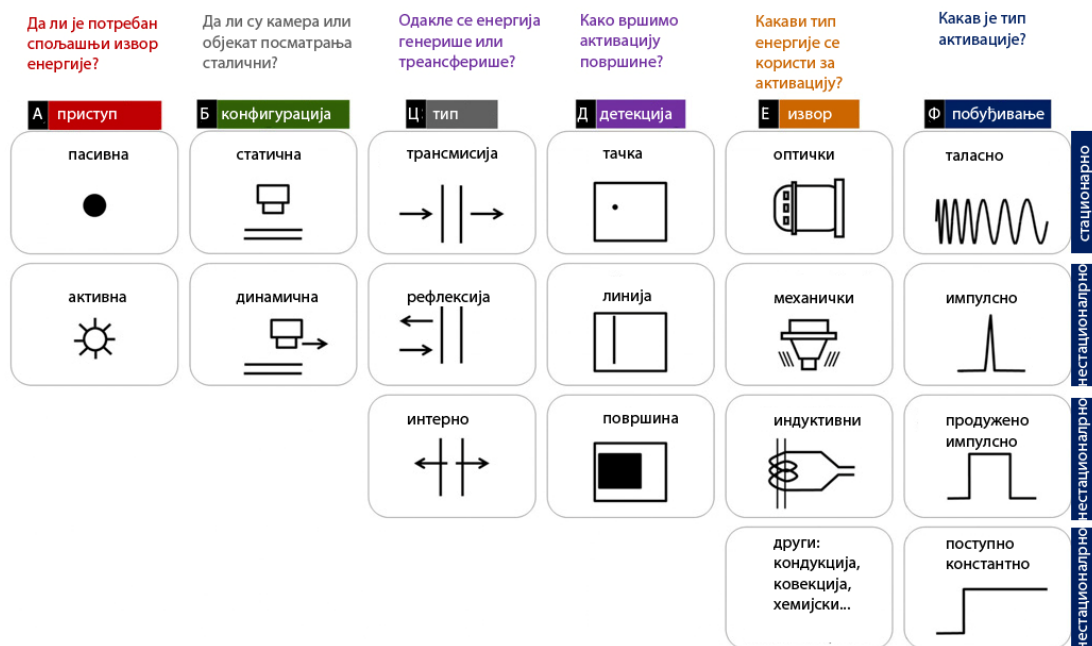
У начелу, споља можемо посматрати омотач објекта и у зависности од услова снимања забележити шему (енг. *pattern*) дистрибуције температуре која нам правилним тумачењем служи за даља испитивања, било методама инфрацрвене термографије било другим, најчешће контактним, методама: термометри, влагомери, флукс метри итд. Основни показатељ перформанси управо и јесте природа температурне дистрибуције која би требало да се карактерише релативно равномерном структуром без великих варијација. Уколико, пак, уочавамо изразите температурне промене чија је просторна позиција коресподентна са особеностима типа конструкције фасадног омотача, можемо посумњати на постојање неправилности у структури. Уочене зоне морамо детаљније испитати уз, по потреби, примену других метода.

Снимање из унутрашњости је много мање зависно од променљивости спољашњих климатских и услова зрачења мада је често условљено начином коришћења простора односно положајем намештаја, панелних облога, слика и сл. те је приликом извођења оваквих истраживања неопходно „ослободити“ све површине и омогућити неометано струјање ваздуха како би се изједначиле температуре површина, што је у неким случајевима немогуће остварити.

III.6. Начини коришћења методе термовизијског снимања

Примена метода термовизијског снимања је веома комплексна и у пракси постоји велики број специјализованих дијагностичких техника базираних на мерењу зрачења у инфрацрвеном делу спектра. Уколико се ограничимо на примену у зградарству, можемо рећи да је основна намена тзв. неструктурно тестирање и праћење стања.

У зависности какав тип детекције, побуде, типа снимања користимо разликујемо различите методе примене. Генералну шему утицајних фактора који дефинишу тип и метод примене можемо видети на слици слика III-21.



Слика III-21 Генеришући елементи одабира одговарајућег типа термовизијског снимања (адаптирано на основу Ibarra-Castanedo, С и др. 2013, стр. 92)

Основна подела коју наилазимо у литератури, а која дефинише тип примене термовизије, је настала у зависности од начина како долазимо до потребног термичког одзива посматраног објекта снимања, где, у основи, разликујемо тзв. активну и пасивну термовизију (Maldague 2001).

Под активном термовизијом, у општем смислу, подразумевамо примену методе снимања комбиновану са принципима условног побуђивања или термичке активације посматраног објекта (на сл. III-21: Е) извор, Ф) побуђивање) са циљем добијања бољег термичког одзива, односно контраста, како према окружењу тако и у оквиру сопствене структуре. Ова метода се најчешће користи за проучавање унутрашњих дефеката у материјалима или склоповима (рупе, нехомогеност, присуство страних тела, локално одвајање слојева и сл.).

Пасивна термовизија се заснива на мерењу зрачења објеката (материјала) који су природно на вишој температури од окружења..

Овако формулисана подела је настала из праксе недеструктивног тестирања где се узорци посматрају у основном „произведеном“ стању тј. најчешће у оквиру лабораторијских услова где се испитују њихове перформансе.

Уобичајено је да се примена у зградарству, у највећем броју случајева, дефинише као пасивна, мада би боље било назвати је „квази пасивна“ с обзиром да зграде саме од себе не производе топлотну енергију већ се она обезбеђује унутрашњим (системи грејања) или спољашњим (сунчево зрачење) изворима док је омотач, у ствари, медијум преношења из једне у другу средину (на сл. III-21: Ц) тип генерисања енергије).

IV. ДЕФИНИСАЊЕ МЕТОДА ОЦЕНЕ ПЕРФОРМАНСИ ОМОТАЧА СТАМБЕНИХ ЗГРАДА

У свакодневној архитектонској пракси смо сведоци да омотачи зграда, често, не задовољавају прописане нормативе што за резултат има лошије енергетске перформансе, односно неодговарајуће аспекте комфора. Неретко се дешава да су пројектована материјализација зграде као и поступак решавања архитектонских детаља спроведени у складу са важећим стандардима, а да су резултати „на терену“ приметно другачији, што за последицу има потребу за утврђивањем узрока појаве недостатака. Практично, ми смо упућени на примену „*in situ*“ метода идентификације и квантификације стварних карактеристика омотача.

Са аспекта одређивања енергетских перформанси посебан проблем представља и чињеница да неправилности нису једноставне за идентификацију и најчешће се уочавају само у екстремним случајевима који се посредно исказују кроз веома велике рачуне за грејање, односно драстично нарушавање услова комфора у смислу појаве буђи, орошавања и сл.

У процесу истраживања на терену, разликујемо два основна типа истражних поступака - неструктивне и деструктивне методе.

Недеструктивне методе испитивања перформанси омотача подразумевају мерења контактним или бесконтактним методама која не утичу на сам омотач, тј. не доводе до његовог оштећења. Наведене методе пружају прецизне мерне резултате, али су по природи самог поступка, осим у случају примене термовизијског снимања, ограничене на испитивање појединих тачака. Такође, у циљу добијања релевантних података, оне су, најчешће, засноване на мерном процесу који се одвија у дужем временском периоду.

Деструктивне методе испитивања перформанси омотача доводе до мањег или већег оштећења структуре, те се примењују само у случајевима крајње потребе, када се, на други начин, не могу одредити узроци појаве неодговарајућих перформанси. Најчешће се користе принципи ендоскопског испитивања које подразумева бушење конструкције, узимање узорака материјала као и визуелно испитивање стања унутар конструкција посебним сондама.

Формирање метода оцене перформанси омотача стамбених зграда је извршено имајући у виду потребу за применом која ће омогућити добијање релевантних података а притом неће имати утицаја на његово стање, односно на режим коришћења самих зграда. С обзиром да је фокус истраживања термички омотач, тј. површински елемент структуре зграде, метод се базира на термовизијском снимању првенствено због начина мерења, бесконтактне природе и графичке репрезентације резултата. Могућност снимања у различитим условима уз тренутни приказ мерења, која су по природи површинска, најзначајније су предности у односу на друге дијагностичке мере.

Како би метод био валидан за примену, неопходно је да резултати ни на који начин не зависе од индивидуалних интерпретација. Стога се, осим термовизијског снимања, развијени метод базира и на принципима нумеричке симулације перформанси анализираних склопова као комплементарном дијагностичком алату.

Примена метода започиње поступком термовизијског снимања карактеристичних елемената омотача, у реалним климатским условима. Снимање се мора извршити у складу са прописима дефинисаним одговарајућим међународним и домаћим стандардима, односно према препорукама и упутствима стручних удружења која се баве недеструктивним тестирањима. Добијени термограми графички илуструју перформансе омотача, а поступак квантификације је извршен одређивањем температурних вредности за сваки пиксел.

За утврђене климатске услове окружења, а према конкретним материјалним карактеристикама зграде, врши се, потом, нумеричка симулација. Она нам омогућава одређивање читавог низа параметара који описују перформансе склопа, а које се, у теоретским испитивањима, користе за проверу квалитета. Од посебног интереса за примену у дефинисаном методу су температурна читавања спољашњих и унутрашњих површина моделираних склопова.

Применом оба дијагностичка алата у могућности смо да добијемо квантификативне податке о енергетским карактеристикама анализаног склопа исказане помоћу температурних вредности. Основ за утврђивање квалитета

анализираног склопа се базира на принципу компарације измерених и симулираних вредности.

У циљу бољег сагледавања предмета истраживања, поступка самог метода, као и могућности и ограничења његове примене, неопходно је детаљније објаснити основне аспекте који теоретски и практично дефинишу метод истраживања и сам истраживачки процес.

IV.1. Енергетска ефикасност и термичке перформансе омотача – принципи прорачуна

Енергетска ефикасност представља, као што је то дефинисано и *Правилником о енергетској ефикасности зграда* (2011) чланом 5.:

„Постизање прописаних услова комфора уз потрошњу енергије за грејање, хлађење, припрему топле санитарне воде, вентилацију и осветљење зграда која не прелази дозвољене максималне вредности по m^2 “.

Услови комфора се дефинишу за: ваздушни, топлотни, светлосни и звучни комфор и поменутим правилником је дефинисано да свака новопроектована зграда мора испунити све задате услове.

Енергетска ефикасност се, према истом документу, исказује на основу прорачуна енергетског биланса односно укупне енергије која се користи у зградама, посматрано за типични годишњи циклус, према методологији дефинисаној стандардом SRPS EN ISO 13790 *Укупна потребна енергија за грејање и хлађење (узимајући у обзир губитке и добитке топлоте)*. У примени правилника, услед постојања објективних околности које се огледају у комплексној методологији прорачуна и непостојању „националног софтвера за прорачун“ енергетски биланс зграде се исказује само преко енергије потребне за грејање $Q_{H,nd}$ [$kWh/(m^2 \text{ a})$] уз прорачун енергије за припрему санитарне топле воде која не утиче на енергетски разред али се исказује у „енергетском пасошу“¹.

Процес пројектовања зграда, осим задовољења примарних функционалних захтева разрешавањем организационих, конструктивних и технолошких

¹ Сертификат о енергетским својствима зграда се дефинише и као ”енергетски пасош”, што је израз који се чешће користи у пракси. (Члан 1 Правилника о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда, "Службени гласник РС", број 69 од 20. јула 2012.)

елемената, представља и отелотворење индивидуално дефинисаног филозофско естетског концепта који финализацијом кроз процес материјализације и одговарајућом верификацијом потврђеном издавањем употребних дозвола започиње свој животни век. Перцептивни елемент који, за обичног посматрача, „представља зграду“ је свакако њен *визуелни омотач - фасада* док је са аспекта енергетских перформанси, у ствари, у питању другачија „опна“. Она се у анализи перформанси назива *термички омотач*² и дефинише се, као укупна површина која одваја кондиционирани (у овом случају грејани) од спољашњег или унутрашњег, некондиционираног, простора. Термички омотач, самим тиме, није ограничен на спољашњост зграде, он „улази“ и у сам објекат, одвајајући све негрејане од грејаних делова, односно делова са значајније различитим захтевима, првенствено топлотног комфора. Прописима је, у циљу правилног пројектовања термичког омотача, дефинисан ниво топлотних, пародифузијских и својстава непропустљивости за ваздух који је потребно испунити за сваки појединачни сегмент термичког омотача.

Фокус истраживања које је спроведено у дисертацији представља оцена перформанси термичког омотача са енергетског аспекта, прецизније његовог дела који се односи на фасаду. Издвајање фасаде као предмета проучавања је првенствено настало услед примене методе термовизијског снимања која се не може примењивати код елемената термичког омотача који су у контакту са тлом (подови на тлу, укупани зидови), док је за примену код кровних покривача метода суочена са великим бројем ограничења и значајно зависна од спољашњих услова те су резултати примене релативно сужени. Делови омотача према унутрашњим негрејаним просторима се, уз обезбеђење одговарајућих услова исказаних кроз постојање одговарајуће температурне разлике, а што није увек случај у пракси, могу адекватно истраживати применом термовизијског снимања. Они, међутим, нису укључени у истраживање првенствено услед релативно малог учешћа у укупном билансу топлотних губитака на нивоу зграде.

² Члан 2. Став 55, Правилника о енергетској ефикасности зграда: „*термички омотач зграде чине сви елементи зграде који раздвајају грејани од негрејаног дела зграде, односно, целине зграде са различитим условима комфора или делова зграде код којих долази до прекида грејања услед привременог некоришћења неког простора*“

Уколико анализирамо структуру топлотних губитака код постојећих објеката проучаваних у оквиру Националне типологије, о чему је више било речи у II поглављу, можемо видети да доминирају губици кроз фасадни омотач који чине у просеку 34% потребне енергије за грејање а комбиновано са прозорима и фасадном столаријом и целих 63%³.

Из наведених података видимо да је утицај прозора и других типова фасадне столарије и браварије значајан за укупан термички биланс зграде, али је суштински узрок њихових топлотних губитака најчешће другачије природе. Наиме, поступак уградње и правилан третман спојница уз остваривање одговарајуће заптивености има много већи утицај на реалне термичке перформансе фасадне столарије и браварије, него њен производни квалитет, што нам потврђују и разне студије случаја. (Шумарац и др. 2010). Приликом испитивања фасадне столарије, ми можемо истраживати квалитет самог елемента применом термовизијског снимања, али је много адекватнија комбинована метода где се још користи и метод провере заптивености (енг. *Blower door*).⁴

Квалитет конструкције прозора и врата, рамова, крила и испуна би требало да је назначен одговарајућим атестима које је неопходно обезбедити у процесу сертификације зграда а који потврђују њихове перформансе. Уколико ове елементе упоредимо са нетранспарентним деловима фасадног омотача, можемо констатовати да сличан тип атеста, за њих, не постоји, већ се термичке карактеристике, као и провера испуњености других прописаних услова одређују само прорачунски.

У циљу објашњења методологије прорачуна карактеристика посматраних склопова, неопходно је детаљније објаснити следеће елементе прорачуна топлотних губитака:

- прорачун коефицијента пролаза топлоте U ,
- прорачун коефицијента трансмисионог губитка топлоте H_T , и
- процену утицаја топлотних мостова.

³ Изведено на основу података из Националне типологије стамбених зграда

⁴ Овај метод је дефинисан одговарајућим стандардом, SRPS EN 13829:2008 Топлотне перформансе зграда – Одређивање ваздушне пропустљивости зграда – Метода притиска удубавањем

IV.1.1. Прорачун површинских трансмисионих губитака омотача

IV.1.1.1. Коефицијент пролаза топлоте U

Коефицијент пролаза топлоте U је један од најважнијих параметара на основу којих дефинишемо понашање одређеног елемента термичког омотача. На основу њега можемо одредити температуре спољашњих и унутрашњих површина зидова према одговарајућим температурама ваздуха, како би их процесом термовизијског снимања потврдили, односно установили степен одступања или дефеката. Процес верификације није директан и зависи од великог броја утицајних фактора, о чему ће бити речи касније.

Детаљно објашњење принципа прорачуна отпорности термичког омотача у зависности од његове структуре као и коефицијената пролаза топлоте дат је SRPS EN ISO 6946 стандардом и овде неће бити у целости анализиран, већ ће бити изложени основни принципи као и специфичности које имају утицаја на примену инфрацрвене термографије⁵.

Коефицијент пролаза топлоте се прорачунава за сваки елемент термичког омотача понаособ, а максималне дозвољене вредности су дате *Правилником о енергетској ефикасности зграда*, како за новопројектоване тако и за постојеће зграде.

Постојеће зграде не морају испуњавати одреднице правилника уколико се на њима не врше никакви радови. Уколико, међутим, приступамо процесу санације, реконструкције или енергетске обнове, нужно је ускладити све елементе омотача на којима се врше интервенције са одредницама правилника уз укупно повећање енергетског разреда за најмање један ниво.

⁵ Вредности U [$W/(m^2 \times K)$] прорачунавају се у складу са већим бројем стандарда у зависности од типа конструкције и њеног положаја у оквиру термичког омотача. Општи услови прорачуна су дати стандардом SRPS EN ISO 13789 као и посебним стандардима: за нетранспарентне грађевинске елементе, изузев подова и зидова у тлу и зид-завеса, у складу са стандардом SRPS EN ISO 6946; за подове и зидове у тлу у складу са стандардом SRPS EN ISO 13370; за грађевинске елементе типа прозора, балконских врата и ролетни у складу са стандардом SRPS EN ISO 10077-1 и SRPS EN ISO 10077-2; за зид-завесе у складу са стандардом SRPS EN 13947; за стакла у складу са стандардима SRPS EN 673 и SRPS EN 410; за елементе за зидање зиданих зидова и зидане зидове, у складу са стандардом SRPS EN 1745“ *Правилник о енергетској ефикасности зграда* (2011) стр. 35.

Коефицијент пролаза топлоте се израчунава у општем случају - за нетранспарентни грађевински елемент једноставне хетерогености, сагласно стандарду SRPS EN ISO 13789 односно SRPS EN ISO 6946, на следећи начин:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_m \frac{d_m}{\lambda_m} + R_{se}} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (IV-1)$$

Где је:

R_{si} унутрашњи отпор прелазу топлоте $\left[\frac{m^2K}{W} \right]$

R_{se} спољашњи отпор прелазу топлоте $\left[\frac{m^2K}{W} \right]$

d_m дебљина m – тог слоја зида $[m]$

λ_m топлотна проводљивости m – тог слоја. $\left[\frac{W}{mK} \right]$

Вредност топлотне проводљивости је дата табеларно за велики број материјала, а важно је нагласити да он у реалним условима може варирати у зависности од температуре и влажности (Fokaides, Soteris 2011) тако да се вредности добијене испитивањем на терену могу значајно разликовати од лабораторијских што представља проблем за примену свих *in situ* мерних метода. Ово питање код нас разматра и национални стандард⁶.

Унутрашњи и спољашњи отпор прелазу топлоте R_{si} и R_{se} су коефицијенти који описују појаву размене топлоте између флуида (ваздуха) и чврсте површине. Они представљају реципрочну вредност коефицијента прелаза топлоте h који се дефинише као количина топлоте која се кроз $1 m^2$ површине граничног слоја размени у временском интервалу од $1s$ за температурну разлику од $1K$ између „неометаног“ флуида и површине зида.

Важно је нагласити да се енергија која се одаје са чврсте површине (фасаде) према окружењу осим конвекцијом у великој мери одаје и зрачењем, о

⁶ SRPS EN ISO 10456:2012 Грађевински материјали и производи - хигротоплотна својства - табеларне пројектне вредности и поступци за одређивање декларисаних и пројектних топлотних вредности

чему је било више речи у поглављу III. Основна поставка истраживања у овој тези представља управо одређивање перформанси мерењем количине зрачења са површине фасадног омотача.

Коефицијент прелаза стога можемо изразити и помоћу формуле (SRPS EN ISO 6946):

$$h = h_r + h_c \quad (\text{IV-2})$$

где је:

h_r коефицијент прелаза топлоте зрачењем

h_c коефицијент прелаза конвекцијом

Даље се h_r мође изразити преко зрачења црног тела помоћу израза:

$$h_r = \varepsilon h_{r0} \quad (\text{IV-3})$$

где је:

ε емисивност посматране површине

h_{r0} коефицијент прелаза топлоте зрачењем за црно тело и може се изразити помоћу:

$$h_{r0} = 4\sigma T_m^3 \quad (\text{IV-4})$$

где је:

σ Штефан Болцманова константа $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W/m}^2 \text{K}^4]$

T_m температура црног тела на осредњеној температури околних површина [K]

Стандардом су дате и процењене вредности h_{r0} за различите вредности температура и приказане су у табели IV.1.

Табела IV-1 Вредности коефицијента прелаза топлоте зрачењем за различите средње вредности температуре (SRPS EN ISO 6946, стр. 13)

Средња вредност температуре [$^{\circ}\text{C}$]	h_{r0} [$\text{W/m}^2 \text{ K}$]
-10	4,1
0	4,6
10	5,1
20	5,7
30	6,3

Коефицијент прелаза конвекцијом h_c разликујемо за унутрашње и спољашње површине и стандардом су дефинисане вредности:

а) за унутрашње површине:

$$h_c = h_{ci} = 5.0 \text{ [W/m}^2 \text{ K]} \text{ за топлотни ток нагоре}$$

$$h_c = h_{ci} = 2,5 \text{ [W/m}^2 \text{ K]} \text{ за топлотни ток хоризонтално}$$

$$h_c = h_{ci} = 0,7 \text{ [W/m}^2 \text{ K]} \text{ за топлотни ток надоле}$$

б) за спољашње површине:

$h_c = h_{ce} = 4 + 4v \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$ где је v брзина ветра непосредно поред посматране површине. Прерачунате вредности исказане преко отпора прелазу споља у зависности од брзине ветра су дате у табели IV.2.

Табела IV-2 Отпор прелазу топлоте у зависности од брзине ветра (SRPS EN ISO 6946, стр. 13)

Брзина ветра [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]	R_{se} [$\text{m}^2 \text{ K/ W}$]
1	0,08
2	0,06
3	0,05
4	0,04
5	0,04
7	0,03
10	0,02

Иако је уобичајена пракса, за потребе прорачуна грађевинске физике, да се усваја обједињени коефицијент прелаза топлоте са спољашње или унутрашње стране који је за различите позиције омотача и њихове материјалне карактеристике дат у табели 3.4.1.1 правилника, уколико вршимо мерења применом методе инфрацрвене термографије нужно је посебно анализирати утицаје зрачења и конвекције јер читавања могу значајно варирати од табеларних.

IV.1.1.2. Коефицијент трансмисионог губитка топлоте H_T

Коефицијент трансмисионог губитка топлоте H_T [W/K] дефинише укупан пролаз топлоте кроз поједине делове термичког омотача. Његов значај за прорачун перформанси се огледа у чињеници да се укључује утицај топлотних мостова на укупан коефицијент трансмисије, а израчунава се на основу следећег израза:

$$H_T = \Sigma(F_{xi} U_i A_i) + H_{ТВ} [\text{W/K}]. \quad (\text{IV-5})$$

где је:

F_{xi} фактор корекције температуре за i -ти елемент термичког омотача

U_i коефицијента пролаза топлоте i -тог елемента термичког омотача

A_i површина i -тог елемента термичког омотача

$H_{ТВ}$ утицај топлотних мостова

Инфрацрвеном термографијом се, снимањем са спољашње или унутрашње стране, управо и врши „идентификација“ дела енергије која пролази кроз елементе омотача и потом бива предата окружењу, те је стога важно добро разумети физички процес провођења и одавања топлоте од стране термичког омотача.

Фактор корекције температуре F_{xi} се усваја на основу табеле 3.4.1.1. дате у Правилнику о енергетској ефикасности зграда и он, у ствари, редукује спољашњу прорачунску температуру (дата табеларно за већи број градова у Србији), у зависности од положаја који елемент има у оквиру структуре објекта. За спољашње зидове он има вредност 1, с обзиром да се не врши никаква корекција, док нпр. за зидове према негрејаном простору он износи 0.5 или за зидове који су делимично укопани 0.6, указујући да је температура ваздуха у тим зонама виша од спољашње пројектне. Овај фактор нема никаквог утицаја на процес снимања нити резултате њиме добијене, већ је везан за поступак израчунавања губитака топлоте кроз одређени елемент термичког омотача.

IV.1.2. Топлотни мостови

Уколико знамо да је полазиште примене метода базирано на термовизијском снимању, неопходно је објаснити природу промене перформанси сегмента омотача која се јавља као последица утицаја топлотних мостова⁷. Повећање губитака топлоте на месту топлотних мостова се манифестује повећањем измерених температурних вредности, те је у циљу валидације неопходно стручно разумевање природе топлотних мостова и начина прорачуна њиховог утицаја.

По карактеру појављивања у структури омотача разликујемо следеће типове топлотних мостова (Erhorn et al. 2010):

- **понављајуће термичке мостове** у оквиру конструкције самог елемента (спојнице у зидовима или међуспратним таваницама, рамови у монтажним елементима, дрвени елементи у зидовима или крововима и сл.) који се рачунају у оквиру припадајућих површина и представљају облик тзв. хетерогености конструкција,
- **непонављајуће термичке мостове** на спојевима елемената или склопова као и око отвора који се појављују на свим местима промене геометрије термичког омотача као и на споју унутрашњих елемената и термичког омотача,
- **посебне и тачкасте термичке мостове** (могу бити понављајући или непонављајући) на местима продора кроз термички омотач било елемената конструкције било појединих фиксационих елемената (анкера, котви, греда, металних веза и сл.), и
- **кретања ваздуха** у оквиру структуре или у оквиру слојева према спољашњем ваздуху односно слојева према унутрашњем ваздуху без трансфера ваздуха споља унутра се у ширем смислу такође могу сматрати типом топлотног моста.

⁷ Топлотни мостови се стандардом SRPS EN ISO 10211 дефинишу као:

„делови омотача зграда где се иначе униформни топлотни отпор значајно мења услед потпуног или делимичног пробоја кроз омотач зграде материјала другачије термичке проводљивости и/или као последица промене дебљине материјала и/или разлике између унутрашњих и спољашњих површина које се најчешће јављају на спојевима зидова/подова/таваница“.

По својој геометријској логици и начину провођења топлоте разликујемо линијске и тачкасте термичке мостове.

Линијски термички мостови су дефинисани као елементи карактерисани униформним попречним пресеком дуж једне од три просторне осе. Они, у ствари, настају на местима интеракције различитих склопова, било због промене геометрије (углови, сучељавање...), било због промене структуре склопа. По типу се могу назвати и **дводимензионални** термички мостови а назив линијски су добили на основу резултанте пресека два, по геометријској логици, површинска елемента.

Тачкасти топлотни мостови су локализоване појаве које се, по дефиницији, могу представити преко тачкасте термичке трансмисије. Они се најчешће односе на чворове који настају као последица веза (анкери, конектери) које продиру кроз термоизолациони слој. По геометријској природи они су **тродимензионални** и апроксимирају се продором линије кроз површ. (Рајчић, 2011)

Основно питање које се поставља у одређивању губитака топлоте је како се квантификује њихов утицај, односно прорачунава повећање губитака топлоте. Важећим Правилником о енергетској ефикасности зграда не мора се вршити посебан прорачун утицаја топлотних мостова већ се они могу паушално усвојити на основу следећег прорачуна:

$$H_{TB} = \Delta U_{TB} A \quad (IV-6)$$

где је:

ΔU_{TB} дефинисан као фиксна вредност од $0,1 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

$A [m^2]$ - збирна површина спољних грађевинских елемената (термички омотач објекта - спољне мере).

Уколико је прорачун топлотних мостова већ узет у обзир приликом прорачуна одговарајућег коефицијента пролаза топлоте, њихова површина се не укључује у збирну површину те се она тада назива A_{cor} .

Питање топлотних мостова је веома битно за процену перформанси омотача и њихов детаљнији третман је дат прописима SRPS EN ISO 14683

Топлотни мостови у грађевинској конструкцији – линијски коефицијент пролаза топлоте – Упрошћене методе и одговарајуће вредности⁸ и SRPS EN ISO 10211 Топлотни мостови у конструкцији зграде - Топлотни протоци и површинске температуре - Детаљни прорачуни⁹ који је наведен у листи „подржавајућих“ стандарда.

По поједностављеној процедури укупни топлотни пролаз кроз конструкцију са урачунатим линијским и тачкастим пролазом се може исказати следећим изразом:

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j \chi_j \quad (\text{IV-7})$$

где је:

A_i површина i -тог елемента омотача зграде [m^2]

U_i коефицијент пролаза (трансмисије) топлоте $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$

l_k дужина k -тог линијског термичког моста [m]

ψ_k коефицијент линијског пролаза топлоте k -тог линијског термичког моста $\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right]$

χ_j коефицијент тачкастог пролаза топлоте $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}}\right]$

Даље се наводи да је утицај тачкастих мостова најчешће могуће занемарити, те се упућује на њихово изостављање из једначине, односно на детаљнији принцип прорачуна дефинисан SRPS EN ISO 10211 уколико их не можемо искључити.

Линијски мостови се могу сматрати најзначајнијим елементом који утиче на перформансе омотача зграда и најчешће се јављају на следећим позицијама (SRPS EN ISO 14683):

⁸ овај пропис је донесен после усвајања правилника стога се не налази у листи наведених стандарда за његову примену

⁹ SRPS EN ISO 10211:2013 представља нову верзију стандарда са обједињеним текстом и замењује два дела предходне верзије стандарда из 2008. године (SRPS EN ISO 10211-1:2008 Топлотни мостови у грађевинској конструкцији – Прорачун топлотних флукса и површинских температура – Део 1: Опште методе и SRPS EN ISO 10211-2:2008 Топлотни мостови у грађевинској конструкцији – Прорачун топлотних флукса и површинских температура – Део 2: Линијски топлотни мостови)

- спојеви спољашњих елемената (углови зидова, зидови према кровним конструкцијама, зидови према конструкцијама на тлу),
- спојеви унутрашњих зидова са спољашњим зидовима или кровом, и
- спојеви међуспратних конструкција и спољашњих зидова

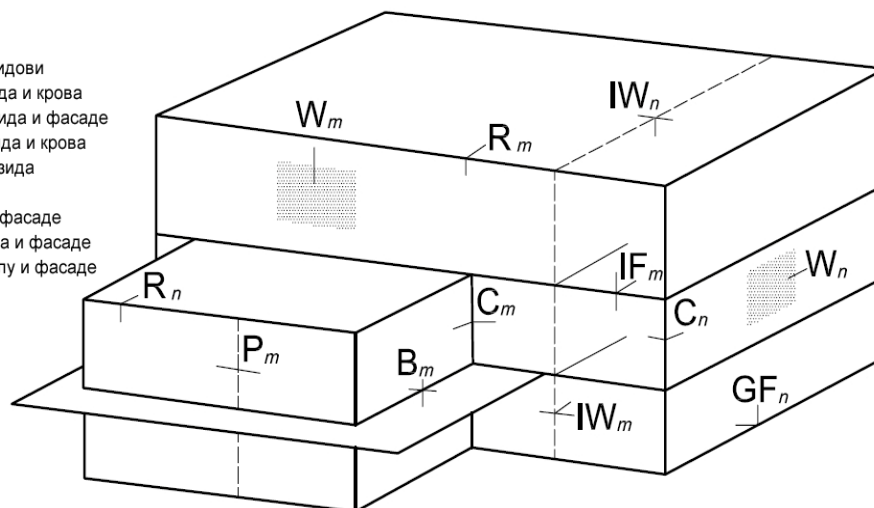
С обзиром на утицај који имају на перформансе, и самим тиме изглед термограма, корисно је графички илустровати могуће положаје линеарних топлотних мостова као што је то приказано на слици IV.1.

Прецизност поједностављеног метода датог овим стандардом се процењује да је од $\pm 5\%$ уколико се користе симулациони методи, $\pm 20\%$ уколико се користе каталози термичких мостова или примењује ручни принцип прорачуна, односно чак $\pm 50\%$ уколико се користе стандардне вредности без провере¹⁰.

Утицај топлотних мостова на повећање укупног коефицијента пролаза топлоте је веома значајан, те и сам стандард на једноставном примеру прорачуна зграде изводи резултат од 42% повећања уколико се за прорачун користе унутрашње димензије, односно 36% уколико се користе спољашње димензије.

ЛЕГЕНДА:

W_m, W_n - фасадни зидови
 IW_n - спој констр. зида и крова
 IW_m - спој констр. зида и фасаде
 R_m, R_n - спој фас. зида и крова
 C_m, C_n - углови фас. зида
 B_m - балкон
 IF_m - спој тавнице и фасаде
 P_m - спој прегр. зида и фасаде
 GF_n - спој пода на тлу и фасаде



слика IV-1 Шема положаја карактеристичних линијских мостова у структури зграде (SRPS EN ISO 14683, стр. 6)

Пружајући одговарајући каталог детаља, стандард, у складу са својим називом, пружа основне поједностављене методе прорачуна, док се за детаљнији прорачун упућује на SRPS EN ISO 10211. Уобичајени проблем који се јавља у

¹⁰ SRPS EN ISO 14683, стр. 20-21

примени каталога је релативно сведени број приказаних типова и немогућност усклађивања са реалном праксом, односно немогућност параметарске промене улазних података. Чак и обиман каталог, попут немачког „Новог каталога топлотних мостова“ (Schoch, T. 2012), са примерима урађеним по DIN V 4108, који на 400 страница излаже различите типове детаља, не може антиципирати све појавне облике склопова који се примењују у пракси већ упућује на дигиталну верзију коју је могуће параметарски мењати.

Поређењем датог каталога и вредности повећања ΔU_{TB} за иснос од $0,1 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$, како је наведено правилником, видимо да је дефинисана вредност за неке позиције довољна и одражава реално стање док је за неке значајно мања и не илуструје стваран утицај. Овај проблем је разматран у многим европским земљама те наилазимо на различите приступе приликом прорачуна (Erhorn, H. et al, 2010) нпр:

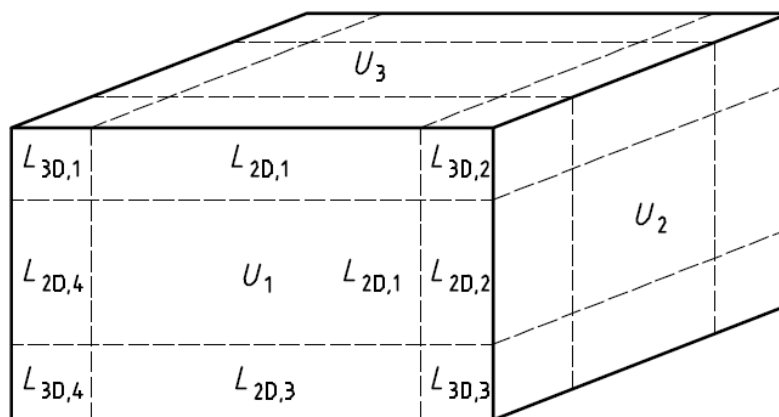
- Холандија: додаје се $\Delta U_{TB} = 0,1 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ за све случајеве,
- Немачка: прави се разлика у зависности од квалитета детаља те се усваја $\Delta U_{TB} = 0,1 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ за нове зграде, $\Delta U_{TB} = 0,05 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ за нове зграде пројектоване у складу са детаљима датим у DIN V 4108 и $\Delta U_{TB} = 0,15 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ за постојеће зграде са унутрашњом изолацијом, и
- Пољска: додаје се $\Delta U_{TB} = 0,05 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ за спољашње зидове са отворима за прозоре и врата, $\Delta U_{TB} = 0,15 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ за спољашње зидове на којима постоје „пробоји“ конзолних плоча.

У осталим земљама које немају овај тип препорука, упућује се или на локалне прописе на основу којих се мање или више детаљно врши прорачун утицаја топлотних мостова или на европске стандарде.

Детаљни прорачуни топлотних мостова се изводе, као што је то већ речено, на основу важећег стандарда SRPS EN ISO 10211 који практично уводи методологију нумеричке симулације перформанси помоћу примене математичког моделирања одговарајућих веза у циљу добијања прецизнијих резултата. Разлог за овакав приступ се огледа у новом методолошком оквиру по коме се приступа проблему проласка топлоте кроз елементе термичког омотача а који се анализира

као дводимензионални или тродимензионални топлотни ток. У ту сврху се конструишу одговарајући дводимензионални и тродимензионални модели. Дводимензионални се дефинишу као модели конструисани на основу графичке документације у виду карактеристичних пресека кроз сегмент омотача где не долази до промене карактеристика по оси управној на анализирани пресек. Тродимензионални модели се формирају на основу истих улазних података али код њих су могуће промене карактеристика дуж свих оса. Без обзира на усвојени тип модела, њихова израда се врши за тачно дефинисане сегменте карактеристичних пресека, на одређеном удаљењу од разматраних линијских мостова, како би се гарантовао претпостављени топлотни ток, а у складу са упутством назначеним у стандарду.

Илустрација елемената омотача и начина на који се они дефинишу у смислу прорачуна перформанси (моделују) дата је на слици IV-2.



Омотач зграде подељен на делове који се рачунају помоћу 3-D (симбол L_{3D}), 2-D (симбол L_{2D}) и 1-D (симбол U) геометријских модела

слика IV-2 Сегментирање омотача зграде у зависности од принципа на основу којих се врши прорачун перформанси тј. примене одговарајућих рачунских модела (SRPS EN ISO 10211, стр. 21)

Са аспекта примене термовизијског снимања, интересно је да методологија симулације претпоставља спољашњу граничну температуру (енг. *External boundary temperature*) као спољашњу температуру ваздуха, уз

претпоставку да је она једнака температури зрачења која долази до анализиране површине, што, најчешће, није случај. Сврха стандарда, међутим, је дефинисање прорачуна применљивог у општим условима, док би укључивање и ове променљиве (односно фактора који је условљавају) значајно усложнило прорачун. За разлику од спољашње, унутрашња гранична температура се симулира као аритметичка средина унутрашње температуре ваздуха и средње температуре зрачења површина у ентеријеру, што је боља апроксимација¹¹.

У прорачуну, стандард уводи термин **термичког спрезања** као проток топлоте при температурној разлици између две средине које се повезују преко одговарајуће конструкције (став 3.18) а на основу кога се касније израчунавају одговарајући коефицијенти линијских, односно тачкастих топлотних губитака. Прорачуни одговарајућих линијских губитака се врше на основу одређивања дводимензионалног или тродимензионалног коефицијента термичког спрезања од кога се потом одбијају површински, односно линијски пролази топлоте.

За потребе овог рада разматран је дводимензионални модел симулирања топлотног протока на основу кога се линеарни термички мост израчунава по следећој формули:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (IV-8)$$

где је:

ψ коефицијент линијског пролаза топлоте

L_{2D} коефицијент термичког спрезања

U_j коефицијент пролаза топлоте 1-D компоненте која раздваја две средине $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$

l_j дужина везе 2-D геометријског модела за који важи U_j [m]

N_j број 1-D компоненти.

Практично, од коефицијента термичког спрезања који можемо схватити као одлику укупног топлотног протока за симулирани склоп, одузимају се једнодимензионални протоци топлоте кроз граничне елементе (површине одговарајућих делова који чине склоп).

¹¹ SRPS EN ISO 10211, став 3.16, 3.17

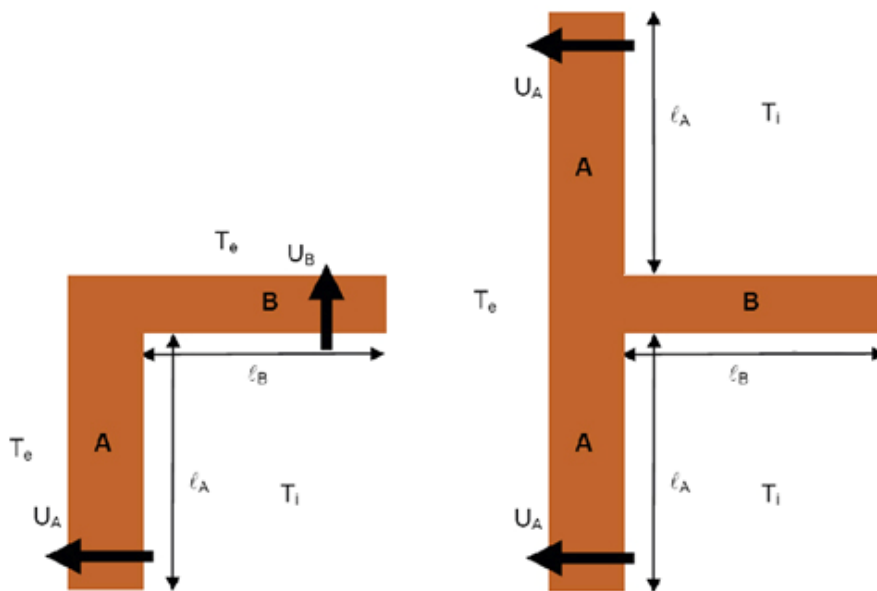
Коефицијент термичког спрезања се може израчунати на основу релације која дефинише топлотни проток ϕ_i по метру дужине линераног моста:

$$\phi_i = L_{2D}(\theta_i - \theta_e) \quad (\text{IV-9})$$

где су:

θ_i, θ_e температуре унутрашњег, односно спољашњег окружења

Графичка илустрација принципа прорачуна карактеристичних спојева елемената нпр. два фасадна зида на углу зграде, односно фасадног зида и међуспратне конструкције као типичног сегмента вишеспратних зграда може се видети на слици IV-3. У општем случају, дефинишу се минималне димензије елемената модела које мора обухватити симулација, а основни случај подразумева дужине од 1 m у свим правцима, односно растојање које мора бити веће од ширине пресечног сегмента елемената који се спајају.



слика IV-3 Шематски приказ карактеристичних спојева за моделирање и величина релевантних за прорачун линијског топлотног моста: а) детаљ угла (Рајчић, 2011 стр. 10), б) детаљ споја међуспратне конструкције. Карактеристичне дужине $l_A, l_B = 1m$.

Коефицијент линијског пролаза топлоте код линијског термичког моста се добија следећим изразом:

$$\psi = L_{2D} - (U_A l_A) - (U_B l_B) \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (IV-10)$$

где је:

L_{2D} коефицијент термичког спрезања

U_A и U_B коефицијент пролаза топлоте делова А и В $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$

l_A и l_B дужина U_A и U_B [m]

По истоветном принципу прорачуна се одређују и тачкасти термички мостови, са разликом принципа моделовања који се обавља у три димензије:

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i A_i - \sum_{j=1}^{N_j} \psi_j l_j \left[\frac{W}{K} \right] \quad (IV-11)$$

где је:

L_{3D} коефицијент термичког спрезања

U_i коефицијент пролаза топлоте 1-D компоненте која раздваја две средине $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$

A_i површина зида која се карактерише коефицијентом пролаза топлоте U_i [m²]

ψ_j линеарни коефицијент пролаза топлоте $\left[\frac{W}{mK} \right]$

l_j дужина везе 2-D геометријског модела за који важи ψ_j [m]

Практично, од укупног протока топлоте одузимају се вредности једнодимензионалног (раванског) протока топлоте и дводимензионалног (линијског) протока топлоте (Рајчић, 2011).

IV.1.3. Процена утицаја топлотних мостова на перформансе омотача

IV.1.3.1. Метода нумеричке процене утицаја топлотних мостова

Утицај топлотних мостова се, теоретски, може проценити на основу два параметра:

- одређивањем коефицијента линеарног пролаза топлоте ψ или
- применом тзв. температурног фактора.

Одређивањем коефицијента линеарног пролаза топлоте ψ , на начин како је то описано у претходном поглављу, на основу вредности укупног пролаза топлоте за посматрани сегмент могу се проценити локализовани утицаји, односно перформансе.

Класификација линијских топлотних мостова према утицају на перформансе зграда се може видети у табели IV-3.

Табела IV-3 Класификација термичких мостова у односу на вредност линеарног коефицијента пролаза топлоте (Рајчић стр. 17, на основу Wouters, Schietecat, & Standaert)

Класа	ψ вредност $\left[\frac{W}{mK}\right]$	Ефекат топлотног моста
1	$\psi \leq 0.10$	занемарљив
2	$0.10 \leq \psi \leq 0.25$	мали
3	$0.25 \leq \psi \leq 0.50$	значајан
4	$\psi \geq 0.50$	веома значајан

Температурни фактор је у регулативу уведен стандардима EN ISO 13788¹² (није објављен код нас) и SRPS EN ISO 10211.

Принцип прорачуна је идентичан у оба стандарда и дефинисан као:

$$f_{Rsi} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad (IV-12)$$

¹² EN ISO 13788: 2001. Хигротермичке перформансе компонената и елемената зграда-Унутрашња површинска температура у циљу избегавања критичне површинске влажности и кондензације-Метод прорачуна (Eng:Hygrothermal performance of building components and building elements — Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation —Calculation methods)

где је:

f_{Rsi} температурни фактор

T_{si} температура површине унутра

T_e спољашња температура ваздуха

T_i унутрашња температура ваздуха

На основу овог израза видимо да температурни фактор зависи само од температура, односно састава склопа који можемо карактерисати и одговарајућим отпором прелазу топлоте, чиме се одређује и површинска температура. Уколико претпоставимо да је карактеристика прелаза константна и да је састав зида хомоген, овај израз можемо користити за одређивање температуре површине зида. У пракси би требало, у циљу избегавања површинске кондензације и појаве буђи, увек обезбедити да вредности температурног фактора f_{Rsi} буде већа од 0,75 за стамбене објекте (Taylor et al., 2014).

Уколико у прорачун температурног фактора укључимо и утицај влажности ваздуха, температурни фактор можемо изразити помоћу следеће формуле (Viliems, et al.2006):

$$f_{Rsi} \geq \frac{(0.0125\phi)^{0.1247}(109.8 + T_i) - 109.8 - T_e}{T_i - T_e} \quad (IV-13)$$

где је:

ϕ релативна влажност унутрашњег ваздуха [%]

T_e спољашња температура [°C]

T_i унутрашња температура [°C]

Аутор, на основу стандарда DIN 4108-2, дефинише минималну вредност f_{Rsi} као 0,7, што је блажи услов од претходно изнетог.

IV.1.3.2. Поједностављена метода процене утицаја линијских мостова и других недостатака применом термовизијског снимања

Враћањем на полазиште примене методе испитивања перформанси термовизијским снимањем, видимо да је оно у директној корелацији са изнетим начином процене квалитета омотача, јер управо пружа податке о температурним карактеристикама омотача. Прецизније, овакав приступ нам омогућава приметно поједностављење истражног поступка јер подразумева да се у испитивању перформанси применом термовизијског снимања, евалуација врши само на основу температура површина одређених термовизијским снимањем без потребе за утврђивањем температура ваздуха (Ward, 2006). Методолошки се покушава учинити процес једноставнијим с обзиром да температуре ваздуха није једноставно одредити и подложне су великом броју различитих утицаја. Температуре површина су директно везане за проток топлоте кроз конструкцију, и уколико се само оне анализирају процес је бржи и могуће га је понављати и пратити резултате односно адекватно уочавати промене. Уколико познајемо тип конструкције као и основне законитости примене термовизијског снимања у смислу спољашњих утицаја и ограничења, снимањем температура површина и анализом њиховог међуодноса можемо доћи до одговарајућих закључака о квалитету. Овде се, наравно, разликује снимање изнутра, где су утицаји средине ограничени, у односу на снимање споља уз следеће препоруке:

- Спољашња испитивања не би требало спроводити за зидове на којима је разлика температура површина унутра и споља већа за више од 10% у односу на разлику температура површина зидова унутра и споља на северној страни.
- За делове омотача који се према принципу температурног фактора проглашавају неодговарајућим, тј. карактеришу се вредношћу мањом од 0,75, примењује се услов тзв. површинског фактора F_s који се посебно дефинише за снимања која се обављају са унутрашње у односу на снимања са спољашње стране.

- За унутрашња снимања површински фактор се дефинише следећим изразом:

$$F_{si} = \frac{T_{sia} - T_{so}}{T_{si} - T_{so}} \quad (\text{IV-14})$$

где је:

T_{sia} температура површине изнутра на месту уочене аномалије
(одступању од очекиваног или преовлађујућег читавања)

T_{so} температура површине споља

T_{si} температура површине изнутра

Критична вредност површинског фактора за унутрашња снимања израчунатог према претходном изразу за стамбене објекте износи 0,75.

- За спољашња снимања површински фактор се дефинише као:

$$F_{so} = \frac{T_{soa} - T_{si}}{T_{so} - T_{si}} \quad (\text{IV-15})$$

Где је:

T_{soa} температура површине споља на месту уочене аномалије

Критична вредност површинског фактора за спољашња снимања израчунатог према претходном изразу износи 0,93.

Практично, по установљавању параметара површинских фактора, снимањем се истражују површине, при чему се за унутрашња снимања идентификују сви делови са температурном вредношћу мањом од изведене вредности T_{sia} за температуру аномалије, узимајући граничну вредности за F_{si} на основу:

$$T_{sia} = F_{si}(T_{si} - T_{so}) + T_{so} \quad (\text{IV-16})$$

За спољашња снимања идентификују се сви делови за температурном вредношћу већом од изведене вредности T_{soa} за температуру аномалије, узимајући граничну вредност F_{so} на основу:

$$T_{soa} = F_{so} (T_{so} - T_{si}) + T_{si} \quad (IV-17)$$

Према техничким препорукама, на овај начин установљени дефекти у односу на претпостављене перформансе омотача би морали бити у границама $\leq 0,1\%$ односно 1m^2 на сваких 1000m^2 површине омотача што је веома мала маргина грешке (Flir, 2009).

У оквиру материјала припремљеног посебно за испитивање стања омотача зграда¹³ тј. „Сертификованог испитивања стања зграда“ (енг. *Certified Building Investigations*), даље се врши градација површинског фактора који се још назива и термални индекс и процењује степен ризика по конструкције као и за боравак људи. Материјалом није наглашено поље примене, али је из начина на који су дефинисане граничне вредности јасно да су препоруке направљене за снимање са унутрашње стране. Преглед препорука и одговарајућих вредности је дат у табели IV-4.

Табела IV-4 Граничне вредности температурног индекса и процена нивоа ризика (Flir, 2006, стр. 27)

Нормално стање омотача	• $F \geq 75\%$ за просторе који се користе за становање • $F \geq 50\%$ за просторе који се не користе за становање (магацини) • $F \sim 70\%$ за углове • $F \geq 90\%$ за базене и друге влажне просторе
Стамбени објекти - постојање грешака у омотачу	$65\% \leq F \leq 75\%$
Стамбени објекти – постојање грешака, дуготрајни ризици по здравље	$60\% \leq F \leq 65\%$
Стамбени објекти – постојање грешака, тренутни ризици по здравље	$F \leq 60\%$

¹³ Обука за примену инфрацрвене термографије се обавља у специјализованим центрима и састоји се од великог броја различитих модула, од основних до посебних, намењених специјализованим применама. Овде је коришћен материјал са курса „*Building Thermography module*” (Flir 2006) Више на сајту <http://www.infraredtraining.com/>

IV.2. Одређивање параметара енергетских перформанси омотача применом симулационих софтвера

Енергетске перформансе целокупне зграде и појединих сегмената се, као што је већ речено, могу утврђивати поједностављеним и детаљним начинима прорачуна. За разлику од поједностављеног прорачуна који је могуће непосредно рачунски применити, детаљни прорачун се заснива на принципу нумеричке симулације и самим тиме нас упућује на коришћење одговарајућих софтвера. У поступку симулација нарочито је битно питање третмана топлотних мостова који, осим што значајно утичу на перформансе, генеришу препознатљиво површинско „мапирање“ температурних вредности.

Питање третмана топлотних мостова, с обзиром на различитост искустава и локалних регулатива земаља ЕУ представљало је једну од истраживачких тема у оквиру АСИЕПИ (*ASIEPI*)¹⁴ пројекта који је у периоду од 2007-2010. проучавао утицај који примена ЕПБД (*EPBD*)¹⁵ директиве има на новопроектване и постојеће зграде. Истраживање је обухватало шири аспект примене директиве (укупно шест различитих тема) а за овај рад је од посебног интересовања 3. тема која се односила на начин третмана топлотних мостова. Осим прецизнијих дефиниција шта је топлотни мост, истраживања стања регулативе, начина прорачуна, дат је и преглед већег броја софтвера који су у свакодневной употреби. Међу њима постоје значајне разлике у комплексности, начину моделирања и пољима примене. Поједини софтвери су намењени искључиво симулацијама у 2D мрежном систему док су други намењени 3D моделовању, а најсложенији софтвери укључују и симулације перформанси целокупних зграда са детаљним прорачуном везаних за испис часовних вредности.

Иако је расположивост софтвера велика, проблем примене се огледа у различитости методологија прорачуна које могу дати различите резултате. Посебна пажња је стога посвећена процесу валидације софтвера, односно провери

¹⁴ ASIEPI – Assessment and Improvement of the EPBD Impact – for new buildings and building renovation. Више информација на www.asiepi.eu

¹⁵ Овде се мисли на примену тзв. ЕПБД I директиве од 16.12.2002. са пуним називом „DIRECTIVE 2002/91/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2002 on the energy performance of buildings“ која је донета са циљем унапређења перформанси зграда у оквиру ЕУ и са обавезношћу промене за све чланице. (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0071:EN:PDF>) приступљено 10.3.2014.

његове ваљаности. Констатовано је да је минимални услов постављен стандардом EN ISO 10211 недовољан, јер је превише симплификован и не одражава варијетет услова и појавних облика, те да би требало у том смислу извршити много опсежнија тестирања и поређења. (Erhorn. et al. 2010)

Детаљнију анализу расположивих софтвера и њихових основних одлика како за 2D тако и за 3D принципе моделовања можемо наћи у дисертацији А. Рајчића „Методe пројектовања и симулације термичких мостова у архитектонским објектима“ одбрањене на Архитектонском факултету у Београду 2011. (Рајчић 2011).

За потребе овог истраживања, односно симулације утицаја линијских мостова у типичним конструкцијама карактеристичним за стамбени фонд Србије, коришћен је софтвер *TStudio*[®], аутора А. Рајчића. У питању је 2D симулациони софтвер који је намењен израчунавању биланса одговарајућих склопова. Софтвер је базиран на методу коначних разлика уз итеративни процес прорачуна. У зависности од жељене прецизности, могу се подешавати детаљност прорачуна (величина иницијалне ћелије) као и број итерација од којих свака наредна повећава тачност резултата. Завршетак прорачуна се остварује постизањем топлотног еквилибријума у зависности од задатих услова. *TStudio*[®] је ауторски атестиран према упутствима одговарајућих стандарда, а симулациони резултати су, такође, поређени са резултатима сличних 2D метода и констатовано је да је постигнута задовољавајућа усаглашеност резултата.

Интересантно је напоменути да код нас, осим *TStudio*[®] не постоји ни један локално развијени, било академски било тржишно оријентисани, симулациони софтвер. Ова чињеница у великој мери описује стање струке, и свест о неопходности адекватног приступа проблему решавања архитектонских детаља у пројектној фази. Сведоци смо значајне симплификације примењиваних материјалних решења која, у највећој мери, представљају интерпретацију иностраних искустава, односно каталoшки доступних детаља што, са једне стране обезбеђује примену „добрих“ решења али истовремено и наглашава потпуно одсуство истраживачког процеса у домену материјализације, без покушаја развоја нових, локалних решења, која су у прошлости била значајна одлика струке.

Коришћење симулационих софтвера пружа и јединствену „подршку“ испитивању термовизијским снимањем јер, у зависности од примењеног метода моделовања, омогућава линијске, односно површинске приказе добијених температурних вредности. Основна карактеристика ове методе је што она није зависна од услова и није директно везана за истраживачки рад на терену, осим у домену идентификације карактеристичних услова снимања, како би се исти могли укључити у процес симулације.

Нумеричка симулација није временски ограничена нити условљена методологијом мерења, за разлику од испитивања конкретних физичких модела фасадних склопова, било у специјализованим лабораторијама било на терену, те може дати бржи резултат и истражити већи број утицајних фактора. У основи поступка моделирања је креирање виртуелног приказа материјализованог склопа и испитивање његових перформанси према дефинисаним протоколима и алгоритмима за реалне услове снимања. Информације које се могу добити по извршеном процесу нумеричке симулације су веома различите и зависе од природе програма који се користи и његове конкретне намене. Постоје програми који су намењени искључиво за одређивање температурних карактеристика појединих склопова у стационарном и нестационарном стању, потом програми који прорачунавају и остале аспекте грађевинске физике као што су пародифузија, периоди исушивања и фактори помераја амплитуде (такође у стационарном и нестационарном стању) и комплексни програми који симулирају перформансе целокупног објекта са свим припадајућим склоповима. (Tilmans, Van Orshoven, 2010)

Софтвер примењен за истраживање у тези се користи за дводимензионалне симулације стационарног тока и он нам пружа увид у дистрибуцију температура по карактеристичном пресеку склопа, топлотни проток и посредно прорачунавање коефицијента термичког спрезања, односно линијских коефицијената пролаза топлоте, на основу чега се одређују карактеристични температурни профили кроз целокупни склоп. За примену у термовизијском снимању од нарочитог интереса су профили дуж карактеристичних сегмената површина зидова јер нам пружају виртуелну расподелу температурних вредности коју можемо поредити са термовизијским читавањима.

Однос релације нумеричке симулације и истраживања на терену може бити двојак:

- о Моделирањем прорачунавамо дистрибуцију температурних вредности за реалне услове и потом их потврђујемо снимањем на терену, и
- о Моделирањем истражујемо неочекиване перформансе (дефекте) које смо идентификовали снимањем одређујући њихов потенцијални структурални узрок (Taylor et al. 2014).

У дисертацији се разматра првобитан принцип кроз утврђивање корелација између симулираних перформанси конкретних материјалних склопова и њихових температурних читавања добијених термовизијским снимањем.

IV.3. Одређивање параметара енергетских перформанси омотача применом термовизијског снимања

Нумеричка квантификација термограма је процес који се одвија према физичким законитостима описаним раније, на основу интерног софтвера камере. Резултат процеса представља термограм код кога је сваком детектованом пикселу додељена одговарајућа температурна вредност. Поступак тумачења резултата би требало да је крајње једноставан и да се своди на просто читавање добијених вредности, међутим, управо је супротно.

Проблем квантификативне анализе термограма у односу на квалитативну се, првенствено, огледа у правилном тумачењу добијених, односно измерених вредности, стога се инсистира да процене буду спроведене од стране обучених особа који своје знање потврђују одговарајућим лиценцама (ИТС 2006). Потреба за разумевањем „шире слике“, тј. теоретског основа и утицајних фактора је нарочито изражена развојем технологије која је довела до значајног смањења цена опреме са неколико десетина хиљада на неколико хиљада евра, чиме је поступак примене постао доступан широј публици а самим тиме и различитим неправилним тумачењима. Управо лаичко квантификовање термограма може довести до заблуде и обезвредити целокупну дијагностичку методу. (Vollmer, Moellmann 2010).

IV.3.1. Параметри од утицаја за примену методе термовизисјког снимања

Као што је објашњено у поглављу који се бави основама термовизијског снимања, наизглед једноставна формула (III-19) на основу које меримо долазно зрачење обухвата посредно читав низ параметара који значајно утичу на вредности добијених резултата.

Полазиште за спровођење процедура анализе параметара фасадног склопа на основу термовизијских снимака представља, пре свега, квалитетан снимак настао према упутствима наведеним у стандарду СРПС ЕН 13187, уз поштовање свих неопходних термичких и климатских услова. У зависности од жељеног правца истраживања које се даље спроводи на основу термограма, потребно је забележити и читав низ климатских и параметара зрачења, као и самих техничких карактеристика објекта који се истражује а што често није случај у пракси. Детаљнијим истраживањем утицаја климатских параметара на примену термовизије у процесу испитивања енергетских перформанси зграда уочавамо значајне варијације добијених резултата, односно могућност неправилних тумачења уколико нам нису на располагању сви услови снимања. (Lehmann et al. 2013), Аутори наглашавају неопходност веома прецизног регистровања свих утицајних фактора а обавезно:

- емисивности површине,
- температуре ваздуха,
- влажности ваздуха,
- интензитета и правца ветра,
- интензитета сунчевог зрачења и временског трајања осунчаности,
- интензитета зрачења окружења,
- интензитета зрачења небеске сфере,
- геометријског фактора зрачења,
- локалних извора зрачења,
- постојања и временског трајања кише,
- постојања и количине снега итд.

Већина ових параметара, у мањој или већој мери, утиче на нумеричке вредности резултата, а у циљу правилног тумачења добијених резултата неопходно је појаснити поједине утицајне факторе, односно њихове међуодnose.

Као што је већ наглашено, подразумева се да је снимање извршено у складу са процедурама дефинисаним стандардом тј. у одговарајућим климатским условима и са минималним негативним утицајима окружења. Стога ће анализа обухватити само грешке настале услед лоше одређених основних параметара који се непосредно уносе у софтвер камере, односно дефинишу касније приликом анализе термограма а то су: емисивност, температура окружења (још се назива и рефлектована температура) и температуре ваздуха.

На основу једначине зрачења (III-19) видимо да правилно одређивање вредности ових параметара може значајније утицати на прецизност резултата, односно да процес квантификације, у великој мери, зависи од искуства и обучености истраживача. Иако за поступак одређивања емисивности као и температуре окружења постоје одговарајућа упутства дата у литератури (FLIR 2009), грешке су веома честе и значајно утичу на апсолутне вредности читавања, нарочито уколико се јави њихова комбинација, тј. више лоше одређених параметара одједном.

Утицај варијација вредности емисивности, температуре окружења и температуре ваздуха биће приказани на примеру типичног фасадног склопа ФС1 приказаног на слици IV-4. Одговарајућим мерењима утврђене су следеће, полазне, вредности:

- емисивност површине зида $\varepsilon = 0,85$,
- рефлектована температура окружења $T_{refl} = 2.5^{\circ}\text{C}$,
- влажност ваздуха $R_h = 54\%$,
- температура ваздуха $T_{atm} = 0^{\circ}\text{C}$ и
- дистанца између камере и снимљеног објекта ($dist = 20\text{m}$)

Како су снимања вршена у условима релативне тишине (са занемарљивим брзинама ветра, мањим од $0,5\text{m/s}$), може се занемарити утицај који конвекција има на укупне перформансе и утврђене температурне вредности се могу посматрати као резултат укупног зрачења које детектујемо са посматране површине.



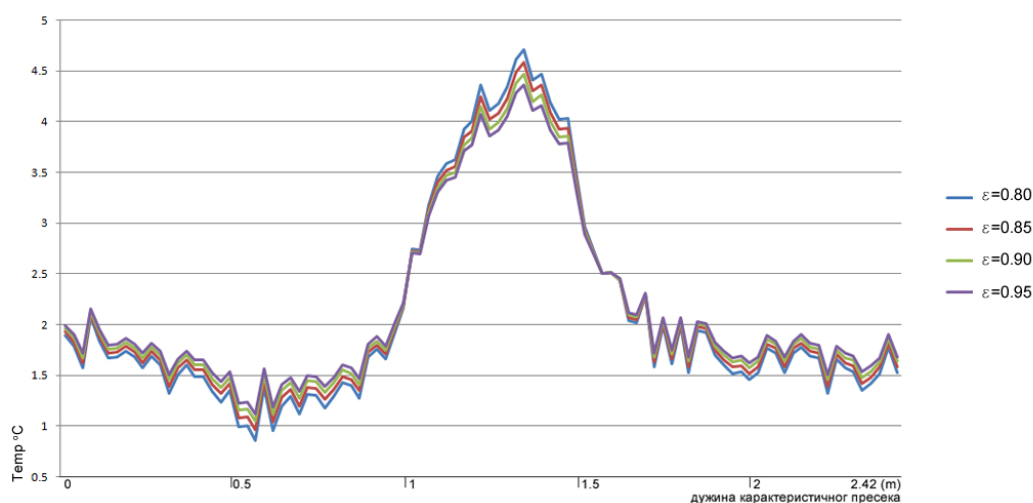
Слика IV-4 Сегмент фасаде склопа FC1 са назначеним карактеристичним правцем који одговара дужини симулираног детаља

IV.3.1.1. Утицај емисивности

Основно питање за правилно термовизијско снимање је одређивање емисивности површине коју истражујемо. Као што је речено у глави III, у зависности од коефицијента емисивности, а према једначини зрачења, температура коју читава камера у већој или мањој мери одговара реалним вредностима. Емисивност нам, практично, одређује удео којим ће се у израчунатим температурним вредностима исказати утицај зрачења окружења. Већа емисивност подразумева мањи утицај окружења у калкулацији и самим тиме реалнија температурна читавања, која су приближнија стварној температури површине. Табеле са вредностима емисивности појединих материјала се налазе како у софтверу камере, одакле се могу изабрати приликом снимања, тако и у аналитичким софтверима те се могу мењати и након снимања. Већина грађевинских материјала примењених на анализираним фасадним склоповима се карактеришу управо великом емисивношћу ($\varepsilon > 0,80$). Најчешће се јављају:

малтери ($\varepsilon = 0,85$), фасадна опека ($\varepsilon = 0,81$) и разноврсне бетонске завршне обраде ($\varepsilon = 0,95$). Ови материјали, према анализи грађевинског фонда, представљају најзаступљенији финални слој, док је употреба полираних или рефлексивних материјала типа алуминијумских плоча, ветрених фасада са завршним слојем од композитних панела или камена у станоградњи спорадична.

На слици IV-5 можемо видети варијације температурних читавања, дуж назначеног правца на слици IV-4, које се јављају као последица раличитих вредности коефицијента емисивности, уз непромењене остале параметре снимања. Вредности одступају за свега $0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Овако мале варијације се јављају услед велике сличности која постоји између температуре површине зида која је у распону од $1\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и рефлектоване температуре (квантификовано зрачење окружења) која је утврђена на $2,5^{\circ}\text{C}$. Уколико би се рефлектована температура значајније разликовала од температуре фасаде објекта, њен утицај на измерене вредности би био израженији.

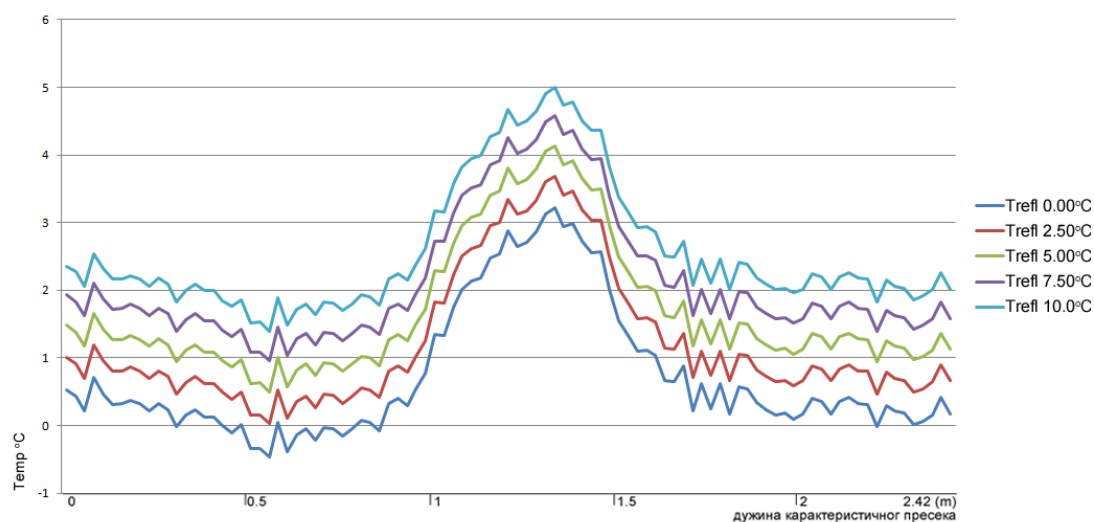


Слика IV-5 Варијације температурних читавања дуж карактеристичног правца насталих као последица различитих вредности емисивности фасаде (пример за склоп ФС1)

IV.3.1.2. Утицај рефлектоване температуре окружења

Утицај рефлектоване температуре окружења, може, у зависности од емисивности, значајније променити очитане вредности температура фасаде. Графички приказ овог утицаја, анализирајући релативно мали опсег варијација

температуре, приказан је на слици IV-6. Анализа је извршена за реалне карактеристике омотача тј. завршну обраду од малтера који се карактерише емисивношћу $\varepsilon = 0,85$ док су остали параметри снимања остали непромењени.



Слика IV-6 Варијације температурних очитавања дуж карактеристичног правца као последица различитих вредности температуре окружења (пример за склоп ФС1)

На графикону се примећује да температурна очитавања варирају значајније него у претходној анализи, тј. од 3,22-5,0 °C, што је и за очекивати с обзиром да су испитиване температурне разлике од 10 °C. У складу са једначином мерења (формула III-19), ниже температуре окружења дају више очитане температурне вредности површине фасаде, јер се енергија која потиче од окружења одбија од укупно измерене енергије помножена коефицијентом $(1 - \varepsilon)$.

Утврђивање температуре окружења и њен унос у једначину приказан у претходној анализи представља, у ствари, још једну од нужних апроксимација примене методе термовизијског снимања, где ми кроз нумеричку вредност рефлектоване температуре, у ствари, квантификујемо укупно зрачење које потиче од окружења. Ово зрачење представља суму утицаја који потичу од небеске сфере, урбаног и природног окружења као и земљишта, а у складу са геометијским фактором зрачења који одређује процентуални однос сваке од утицајних зона.

Поједностављен метод утврђивања температуре окружења је дат у литератури (FLIR, 2004) и подразумева примену поступка снимања термовизијском камером

више слика окружења и израчунавање просечних температура, уз претпоставку да је емисивност истог равна вредности 1, и уз усвајање дистанце од 0m чиме се искључује утицај атмосфере. Можемо користити и конвексно огледало облика полусфере, дакле идеалан рефлектор, и њега снимати термовизијском камером а за температуру усвојити осредњену вредност. У овом поступку, из укупног термограма морамо одузети рефлексију камере и особе која снима. Још једна могућност се огледа у коришћењу специјалног сочива тзв. рибље око (енг. *Fish eye*) постављеног директно на камеру које приликом снимања обухвата целокупну замишљену полусферу са базом у основи самог сочива. (Fouad, Richter 2012)

Детаљни прорачуни утицаја окружења, који пружају прецизније резултате, узимају у обзир велики број променљивих, почевши од зрачења свих окружујућих структура (природних и створених) која се потом квантификују на основу геометријских карактеристика. У овом процесу, целокупна замишљена небеска сфера која окружује наш објекат пројектује се на тзв. сферни дијаграм и на основу њега се одређују процентуалне заступљености појединих елемената за које се потом израчунавају температурне вредности, односно количине зрачења. Ради једноставније анализе, често се користе и тродимензионалне симулације окружења на основу којих лакше долазимо до одговарајућих процена утицаја, поготово што је на основу модела могуће добити реалне изгледе замишљене четвртсфере која „гледа“ (пројектује своје зрачење) на анализирану фасаду.¹⁶

Уколико смо одредили процентуално учешће различитих извора зрачења, неопходно је дефинисати и њихове температуре. За природно и урбано окружење оне се могу утврдити једноставније, директним термовизијским снимањем и упросечавањем измерених вредности, док је за утврђивање температуре неба потребно базично познавање климатологије и карактеристика зрачења небеске сфере. Зрачење неба може приметно варирати у зависности од степена облачности и спољашње температуре ваздуха. Облачна неба и ниска облачност се карактеришу знатно вишим температурама зрачења које се могу поистоветити са температурама ваздуха, док ведрa ноћна зимска неба могу зрачити и са

¹⁶ Један од софтвера који се може користити за ову намену је и *SkyHelios*, доступан на сајту <http://www.urbanclimate.net/skyhelios/>

температура које падају и до -50°C ¹⁷. Идеални услови, који подразумевају снимања која се врше у вечерњим сатима (после астрономског заласка сунца), у дану који се карактерише потпуном облачношћу, управо се и препоручују у циљу смањења утицаја које врши зрачење небеске сфере. Са друге стране, снимање се најчешће обавља при условима који одступају од идеалних, те морамо бити свесни последица утицаја свих радијацијских параметара у укупно очитаним вредностима.

IV.3.1.3. Утицај температуре атмосфере

Утицај температуре атмосфере је директно завистан од примењеног модела симулације карактеристика, односно зрачења које она емитује а које је сразмерно коефицијенту транспаренције¹⁸. У складу са једначином мерења, приликом калкулације утицаја јавља се појава да више температуре атмосфере резултирају нижим температурама зидова, јер се количина зрачења од атмосфере јавља као елемент умањења укупних вредности.

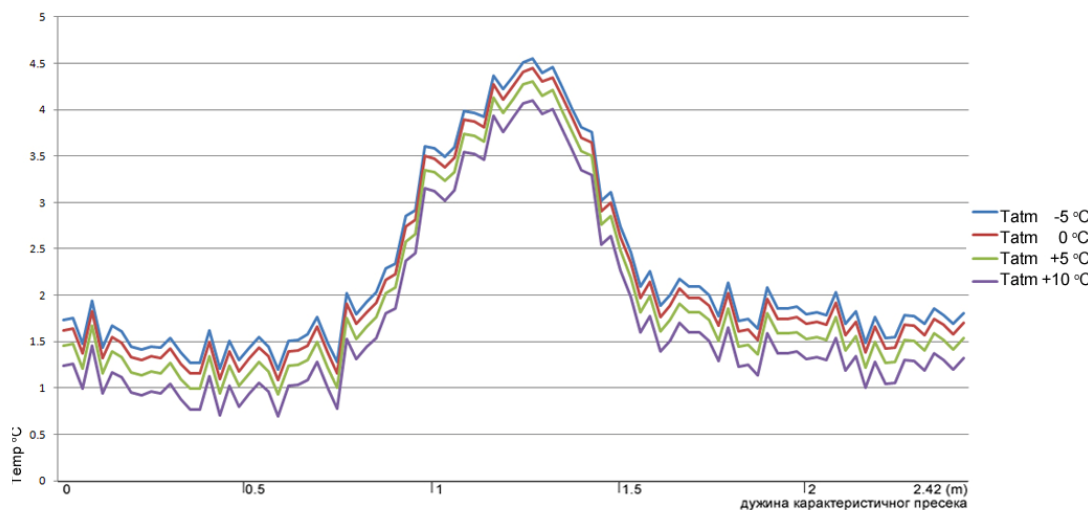
Осим саме температуре атмосфере, од битног утицаја на поступак снимања је и тренд њене промене који се посматра у одређеном временском периоду, а у зависности од типа конструкција које се истражују. Ове варијације температуре настају као последица деловања фронта топлог или хладног ваздуха који значајно утиче и на загревање, односно хлађење фасаде. Значајније локалне промене температуре ваздуха настају као последица и већег интензитета сунчевог зрачења, односно секундарног загревања ваздуха као последица дуготаласног зрачења земље. Да би се добили што валиднији резултати, неопходно је вршити снимање када су флукуације температура најмање а услови најконстантнији.

Уколико искључимо динамичност промена и анализирамо само вредности очитавања у зависности од температуре ваздуха, резултате можемо видети на

¹⁷ Зрачење неба се може израчунати на основу Свинбанкове (Swinbank) формуле или адаптиране формуле према Гофарту (Goforth). У оба случаја ми морамо знати вредности већег броја параметара као што су: проценат покривености неба облацима, висина облака, температура површине земље, релативна влажност ваздуха, емисивност неба итд. Више о принципима прорачуна код Goforth, M. et al. 2002

¹⁸ Модел симулације атмосфере је предефинисан софтвером камере.

слици IV-7. Анализом варијација температуре атмосфере уочавамо да је утицај који овај параметар има на укупна очитавања приметно мањи.



Слика IV-7 Приказ очитивања температурних вредности дуж карактеристичног пресека у зависности од варијација температуре ваздуха (пример за склоп ФС1)

Анализирајући снимљене температуре фасадног омотача према утицајним факторима окружења видимо да се нумеричке вредности мењају, док је природа очитавања истоветна, тј. да се готово увек јавља линеарна зависност добијених резултата, што омогућава дефинисање методе једноставне компарације очитаних вредности.

IV.3.2. Обрада термограма

Уколико претпоставимо да је процес снимања обављен у складу са стандардом примене методе, поступак тумачења се своди на примену одређених алата који су на располагању, како у самој камери тако и у специјализованим софтверима за анализу и обраду термограма.

У пракси постоји велики број софтвера који су комерцијално доступни а обухват њиховог аналитичког апарата зависи од намене и потребне прецизности испитивања, односно типа извештаја који се на основу њих израђују. У начелу разликујемо извештајне и истраживачке софтвере.

IV.3.2.1. Извештајни софтвери

Софтвери који не претпостављају потребу за комплекснијом математичком анализом, већ користе читав низ стандардних, унапред припремљених алата припадају такозваним извештајним (енг. *Reporting*) пакетима. Они се у реалним, ванлабораторијским, условима најчешће и употребљавају. Извештајни софтвери се могу поделити на две групе у зависности од комплексности анализе и извештавања:

- једноставнији софтвери, који пружају базичне могућности анализе и извештавања од којих је у раду коришћен *Flir Quick Reporter ver. 1.2* (FLIR, 2009), и
- обимнији софтвери, са већим бројем опција и могућности анализе од којих је у раду коришћен *FLIR Reporter pro Ver 9* (FLIR, 2012).

IV.3.2.2. Истраживачки софтвери

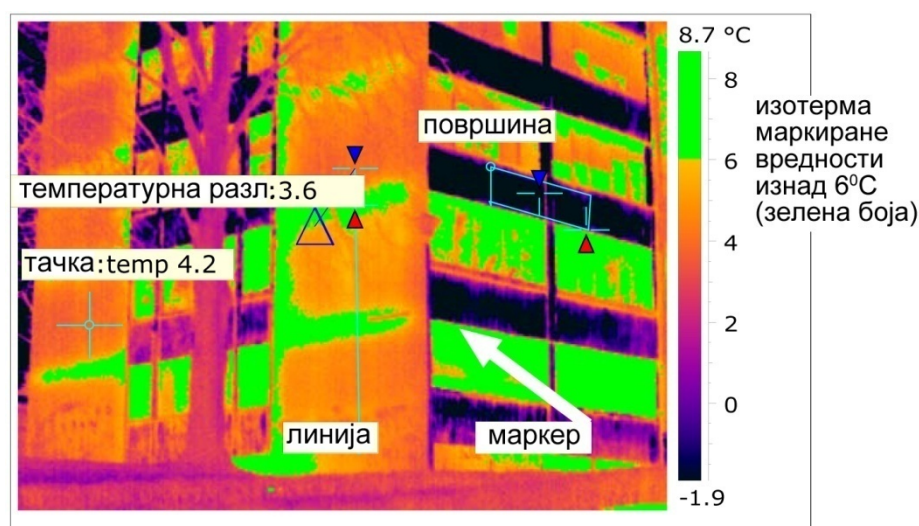
Истраживачки софтвери (енг. *R&D, research and development*) представљају групацију најкомплекснијих софтверских пакета који, осим целе палете предефинисаних алата за обраду термограма, пружају и могућност директне (у самом софтверу) или посредне (експортовањем у одређеном формату) анализе некомпензованих радиометријских података у смислу вредности измереног зрачења на основу директно прочитаног сигнала са детектора. Приступом овим необрађеним (енг. *raw*) подацима пружа се могућност примене суштински другачијих метода процесирања сигнала од стандардних дефинисаних самом камером. Коришћење различитих нумеричких алгоритама, као и употреба било екстерних било интерних анализа кроз креирање сопствених скрипти, односно потпрограма базираних на једном или целој серији мерења, пружа значајно другачије могућности анализе . (Maldaque, 2001)

Динамични развој тржишта и разноврсност примене методе термовизијског снимања у другим гранама, доводе до сталних унапређења постојећих, односно израде других специјализованих софтверских¹⁹ пакета.

¹⁹ Већина софтверских пакета израђених од стране компаније FLIR се иновира у периоду од неколико година, било кроз унапређења или кроз обједињавање са другим комплекснијим

IV.3.2.3. Алати за анализу термограма

У истраживању перформанси, коришћени су алати у оквиру извештајних софтвера који нам пружају упоредиве нумеричке показатеље са прорачунским и симулационим методама од којих су неки приказани на слици IV-8.



Слика IV-8 Термограм са графичким приказом најчешће коришћених аналитичких алата

Приликом анализе, стандардно се користе идентификације температурних вредности са термограма: у појединачној тачки, дуж правца (праволинијског, полигоналног и криволинијског), у оквиру површина (полигоналних или елиптичних-кружних) и др. За сваки од дијагностичких алата можемо изабрати податак који желимо да прикажемо на термограму, од чега се најчешће користе температура, емисивност и рефлексивност.

Идентификација минималних и максималних вредности, температурних разлика и графички прикази различитих нумеричких односа могу се примењивати за све линијске или површинске алате. За потребе овог истраживања коришћени су хистограми очитаних температурних вредности дуж карактеристичне линије која одговара позицији анализираног склопа.

софтверима. Тако, на пример, специјализовани софтвер типа *Flir Reporter Building* из 2009. који је развијан за примену у зградарству, са посебним алатима везаним за откривање дефеката термоизолације и проблеме везане за орошавање, више не постоји у понуди. Софтверу *Flir Quick Reporter ver. 1.2* промењен је практично само назив (сада *FLIR Tools*), док је *Flir Image Builder ver. 5.0* (намењен спајању појединачних термограма у целину) постао део *FLIR Tools+* софтвера.

У савременим камерама, такође постоји и опција сликања конвенционалних фотографија, тако да је могуће извршити потпуно прецизна преклапања два графичка приказа, уз подешавање степена провидности како би се јасније уочили недостаци. Овај алат је нарочито применљив за снимања унутар објеката, која не зависе од доба дана, док је за снимања са спољашње стране, која се врше у вечерњим часовима или рано ујутро најчешће неприменљив, те је неопходно поново посетити локалитет у одговарајућим условима за фотографисање.

У циљу поједностављења праћења добијених резултата, уобичајена пракса је да се приказују термовизијски и конвенционални снимци у геометријској корелацији, како би се једноставније могли извући одговарајући закључци о перформансама, односно како би се јасније идентификовале зоне које би требало испитати другим методама.

Припрема термограма за даљу анализу, у смислу регулисања температурног опсега, је извршена софтверски, како би се добиле визуелно упоредљиве слике. На овај начин се избегава графички приказ у коме се нереално наглашавају поједине зоне термограма, а који може резултирати погрешним тумачењима. Примењеним поступком се не врши квантитативна корекција вредности, тј. оне, за сваки пиксел термограма, остају непромењене. Усклађивање је извршено према препорукама дефинисаним у оквиру метода *QualiTermo* (Tanner et al. 2011).

Анализа карактеристика фасадних склопова применом термовизијског снимања је дата кроз упоредни приказ термограма и фотографија. На њима је назначен анализирани правац који је коресподентан симулираном пресеку. Очитавања температурних вредности дуж назначеног правца су дата на графикону постављеном паралелно са његовим пружањем. У циљу једноставнијег сагледавања односа измерених вредности, које су приказане на графикону са условима важећим у тренутку снимања, битни параметри, који се уносе у софтвер камере, дати су табеларно. Ови параметри укључују: температуру ваздуха споља и унутра, влажност ваздуха, удаљење од посматраног фасадног склопа као и рефлектовану температуру.

Овде је потребно, још једанпут, нагласити да се под рефлектованом температуром подразумева, у ствари, квантификована количина зрачења која долази до фасадног склопа од стране окружења. Квантификација је извршена

према препорукама за испитивање омотача зграда дефинисаним у стручној литератури (FLIR 2006). Метод се састоји од снимања термовизијском камером идеалног дифузног рефлектора направљеног од наборане алуминијумске фолије постављеног испред фасаде. Усвајањем вредности емисивности $\varepsilon=1$, чиме се целокупно измерено зрачење приписује посматраном извору (фолији), и упросечавањем измерених температура за посматрану површину, добијамо нумеричку вредност рефлектоване температуре.

IV.3.3. Могућности квантификације перформанси омотача применом термовизијског снимања

Анализа перформанси омотача на терену применом термовизијског снимања, као што је већ речено, у великој мери зависи од тренутних услова снимања на конкретној локацији, те је потребно велико стручно и практично искуство, уз познавање процеса и законитости мерења, како би се добили валидни резултати.

Уколико се руководимо научно дефинисаним принципом одређивања перформанси омотача, заснованим на детаљној идентификацији свих релевантних параметара и примени одговарајућих калкулација које би се потом поредиле са резултатима термовизијског снимања, суочени смо са два основна проблема:

- Потреба за великим бројем различитих мерења која се морају обавити у циљу прикупљања свих неопходних података. Ова мерења се изводе, најчешће, у дужем временском периоду, коришћењем разноврсне опреме, а сама расположивост, количина и материјална вредност мерне опреме у великој мери отежавају примену, и
- Ограничења примене методе термовизијског снимања, односно директна зависност од одговарајућих климатских услова.

Можемо рећи, базирано на основу доступних истраживања у литератури, да уколико вршимо процену стања одређеног фасадног склопа и нисмо временски ограничени, а на располагању су нам потребни мерни инструменти, примена методологије термовизијског снимања, комбиновано са детаљним мерењима параметара окружења, пружа веома прецизне резултате. Као и у сваком мерењу, тако и приликом утврђивања перформанси, морамо бити свесни грешака које се

могу јавити, те се у циљу добијања валидних закључака сви резултати морају адекватно стручно тумачити. Наиме, основи проблем поједностављења примене методе се огледа у директној зависности резултата од променљивости параметара спољашње и унутрашње средине који карактеришу реална мерења. Основна премиса на којој се базира поступак израчунавања термичких карактеристика омотача, и самим тиме енергетских перформанси зграде, се базира на стационарном топлотном току који се готово никада не јавља у реалности. Стога је потребно, чак и када се примењује методологија детаљних мерења, из података добијених у дужем временском интервалу издвојити оне периоде за које се може рећи да пружају тзв. квази-стационарне услове и само њих користити у калкулацији. Другим речима, потребно је велико искуство и знање у процесу селекције релевантних, од укупно расположивих података, добијених мерењима током дужег периода, чиме се значајно могу променити добијени резултати.

Приликом анализа карактеристичних фасадних склопова у реалној пракси се, у ствари, најчешће сусрећемо са потпуно другачијим потребама и условима који, на директан начин, условљавају примену методе термовизијског снимања. Углавном смо принуђени да неопходна мерења и снимања вршимо у расположивом временском интервалу на терену где владају спољашњи услови који не морају, и најчешће нису, идеални. Такође се очекује да се сва истраживања обаве у релативно кратком временском року те да се на основу њих пружи одговарајућа процена стања, најчешће, без могућности за додатним испитивањима, како при другачијим условима окружења тако и применама других дијагностичких метода.

Поставља се питање да ли је уопште могућа примена методе термовизијског снимања у квантитативне сврхе и која је релевантност добијених резултата? Проучавањем одговарајуће стручне и научне литературе, наилазимо на већи број истраживања која су посвећена управо овом проблему и његовој анализи, било у лабораторијским условима, било непосредним истраживањем на терену.

Као и у другим експерименталним истраживањима, основ за прихватање резултата примењених метода, односно њихову даљу примену у пракси, представља ниво комплексности и прихватљиви опсег грешке. Теоретски разматрано, грешка, у општем случају, у зависности од прецизности мерења,

може варирати у распону од релативно прихватљивих 10% (уколико се експертски адекватно обраде сви утицаји), па све до потпуно неприхватљивих 200% (уколико се врши „*ad hoc*“ процена утицаја), што се не може прихватити као референтни оквир за било какву примену у пракси. Уочене грешке могу потицати од квалитета термовизијске камере, чија је осетљивост уобичајено у распону $\pm 1^{\circ}\text{C}$, али и, што је много значајније, од лоше процењених или измерених параметара окружења. (Vavilov, 2010; Ohlsson и Olofsson, 2014)

Важно је нагласити да, без обзира на постојање ограничења методе, примена термовизијског снимања омогућава да одређивање релевантних температурних карактеристика омотача, које, у ствари, описују његове енергетске перформансе.

Може се, такође, утврђивати и вредност топлотног флукса, односно посредно коефицијента пролаза топлоте, компарацијом вредности температура зидова са унутрашње и спољашње стране. Истраживања у литератури за овакав тип прорачуна на основу очитаних вредности температура површина зидова и ваздуха се карактеришу грешком од 30%²⁰. Испитивање је вршено са спољашње стране, утврђивањем температуре зидова и ваздуха термовизијским снимањем, уз примену рачунских корекција према климатским и радијацијским параметрима окружења. У складу са физичким законитостима преноса топлоте која се са површине зида одаје и радијацијом и конвекцијом, код ове методе се уочава изузетна зависности добијених вредности од брзине ветра, те се препоручује снимање у условима тзв. потпуне тишине, односно при занемарљивим брзинама ветра. Такође су уочена и значајна одступања експериментално утврђених вредности коефицијента пролаза топлоте, у зависности од променљивости температурних услова окружења, са варијацијама и до 60% те је наглашено да је, уколико није могуће остварити одговарајуће услове, боље применити методе мерења који се базирају на другачијој, тј. динамичкој методологији прорачуна. (Albatici, Tonelli, 2010).

²⁰ Потребно је нагласити да постоји приметна различитост у карактеристикама материјала које се утврђују у лабораторијским условима и реалних перформанси, што битно може утицати на могућност утврђивања коефицијента пролаза топлоте и укупних перформанси зидова. У истраживању које су спровели Албатићи и Тонели, аутори се позивају на ову појаву која је препозната и одговарајућим италијанским стандардом којим се коефицијент топлотне проводљивости може, у зависности од услова, кориговати и до 50% од теоретски утврђеног, а у зависности од влажности ваздуха, услова употребе, старости итд. (Albatici, Tonelli, 2010)

Применом метода снимања изнутра, тј. из ентеријера, у великој мери искључујемо варијабилне климатске параметре и ограничавамо се на једноставнија мерења климатских и радијацијских карактеристика окружења. Иако ова метода делује једноставнија за примену у пракси, она, у великој мери, зависи од начина коришћења зграда и, нарочито, опреме инсталиране у њима. Веома често су површине зидова блокиране комадима намештаја или накнадно облагане декоративним облогама које не остварују директан контакт са зидом или су непознатог састава, што спречава директну примену методе. Такође, неопходно је извршити и одговарајућа мерења температура, односно рефлектованог зрачења, при чему је потребно минимизирати утицај циркулације ваздуха у самој просторији. Уколико је могуће превазићи наведена ограничења, истраживања обављена по овој методологији су једноставнија за примену од снимања споља. Квантификација резултата се такође може извршити преко посредног одређивања коефицијента пролаза топлоте. Потребни климатски услови снимања су слични онима дефинисаним у поступку испитивања са спољашње стране, уз релативно мањи степен грешака те се, према расположивим истраживањима за зидове, оне могу лимитирати у оквиру задовољавајућих 20% (Fokaides, Soteris, 2011).

IV.4. Метод утврђивања перформанси компаративном анализом моделованих и измерених температурних вредности

У циљу добијања релевантих оцена стања омотача, по завршеном поступку термовизијског снимања, неопходно је извршити стручну проверу и квантификацију добијених резултата. У оквиру стандарда СРПС ЕН 13187, који прописује процедуре примене методе термовизијског снимања, наводи се да је:

„У циљу утврђивања да ли су уочене варијације у термоизолационим карактеристикама омотача неодговарајуће неопходно је поредити термограм са претпостављеном температурном дистрибуцијом утврђеном на основу пројектних карактеристика омотача а на основу утицаја у време снимања. Претпостављена температурна дистрибуција се може утврдити на основу „референтних“ термограма, прорачуна и других испитивања.“ (СРПС ЕН 13187, стр. 4)

Пратећи препоруке, можемо закључити да би најпрецизније било користити методу референтних термограма и на основу ње вршити директну компарацију.

Проблем практичне примене овог поступка се огледа у расположивости референтних термограма, нарочито, за конкретан предмет истраживања, односно фасадни омотач. Другим речима, нама је потребан каталог термограма великог броја фасадних склопова, снимљених у лабораторијским условима или на терену, уз детаљна мерења свих утицајних фактора. Такав каталог би морао обухватити све „добре“ склопове, дефинисане као стандардна решења на којима не одлази до одступања перформанси, али и „лоше“, односно склопове који се карактеришу најчешће познатим дефектима.

Самим освртом на анализу типова конструкција који се јављају у пракси и потенцијалне грешке у њиховој реализацији које доводе до атипичних перформанси, можемо закључити да је готово немогуће креирати један овакав каталог. И сам стандард даје само сет термограма за дрвене куће типичног фасадног склопа, уз указивање на њихове најчешће недостатке.

Развијени метод оцене карактеристика фасадних омотача се стога, базира на коришћењу комбинације анализе термограма и поступка нумеричке симулације карактеристичних склопова, чији се резултати користе као референтни за оцену перформанси.

Термовизијским снимањем се утврђује реално стање омотача, са свим недостацима и грешкама тумачења, док се симулацијама дефинишу теоретске вредности појединих параметара омотача (површински и линијски коефицијенти пролаза топлоте), али и трендови, односно шеме дистрибуције температурних вредности. На овај начин могу се вршити снимања у реалним условима, поштујући стандардна ограничења методе уз минимална мерења других параметара (температуре ваздуха и рефлектоване количине зрачења), које је такође могуће остварити применом термовизијског снимања уз употребу једноставних мерних уређаја који симулирају црно тело односно омогућавају мерење долазног зрачења²¹.

Нас интересује стручна процена прикупљених информација које је могуће извести на основу термограма снимљених са спољашње стране, јер такав тип

²¹ Испитивање у лабораторијским условима и утврђивање мерења температура и емисивности посматраних површина теоретски су истражили Ohlsson и Olofsson, 2014, док се практична примена на терену по сличним принципима процене параметара може пронаћи код Albatici, Tonelli, 2010.

испитивања представља основ уобичајене примене методе. Том приликом, пажња се, у процесу анализе термограма, усмерава на одговарајуће сегменте фасаде, односно наменски одабране карактеристичне површине. Сужавање поља посматрања на карактеристични сегмент је извршено са циљем издвајања довољног репрезентативног узорка површине на коме је могуће испитати перформансе типичног склопа конструкције. За предмет истраживања и објашњење поступка је узет детаљ везе међуспратне конструкције и фасадног зида, али се истоветна методологија може применити и на испитивање свих карактеристичних делова омотача. У процени перформанси целокупног омотача, неопходно би било идентификовати све карактеристичне склопове и извршити њихова мерења, односно симулације, и потом приступити квантификацији степена одступања.

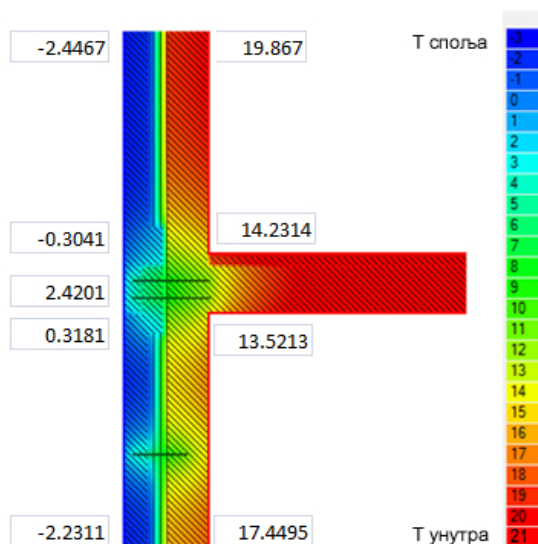
IV.4.1. Симулација одабраног склопа

За потребе симулације одабраног склопа је неопходно, на основу расположиве пројектне документације, формирати одговарајући нумерички модел, тако да он обухвати карактеристични „чвор“ који је одабран за анализу. Практично, креира се минимум онолико модела колико различитих типова веза постоји на омотачу. У испитиваним случајевима, обрађеним у овом истраживању, модели обухватају место споја међуспратне конструкције и фасадног зида.

Реални модел, који се користи у поступку, за разлику од теоретског случаја који је предвиђен стандардом, узима у обзир конкретне елементе материјализације свих градивних делова, као и климатске услове снимања. У примењеном поступку симулације, базираном на стационарном топлотном току, климатски услови се свode само на температуре ваздуха са унутрашње и спољашње стране конструкције. Типичан изглед једног моделованог склопа приказан је на слици IV-9.

С обзиром да метод подразумева поређење температурних читавања на површини фасаде, важно је нагласити да се, за симулирани пресек, могу одредити карактеристике свих тачака. Густина приказа се може подешавати у току самог процеса симулације, у зависности од жељене прецизности. Ограничење примене

приказаног модела симулације се огледа у његовој дводимензионалној природи, што практично значи да ми вршимо прорачун само једног карактеристичног



Слика IV-9 Симулиране карактеристике типичног фасадног склопа ФС4, са графичким приказом дистрибуције температуре и нумеричким вредностима на карактеристичним тачкама модела: крајеви зидова, спој међуспратне конструкције и фасадног зида, средина серклажа. Због природе анализираног склопа, у детаљу су приказани и челични анкери на месту споја спољашњег и унутрашњег дела панела, односно хоризонталног серклажа.

пресека, те би за све друге случајеве морали да вршимо нове прорачуне. Ограничење, такође представља и положај пресека, који мора бити довољно удаљен од потенцијалних утицаја који се јављају управно на њега, и који по својој геометријској природи захтевају моделовање у тродимензионалном систему.

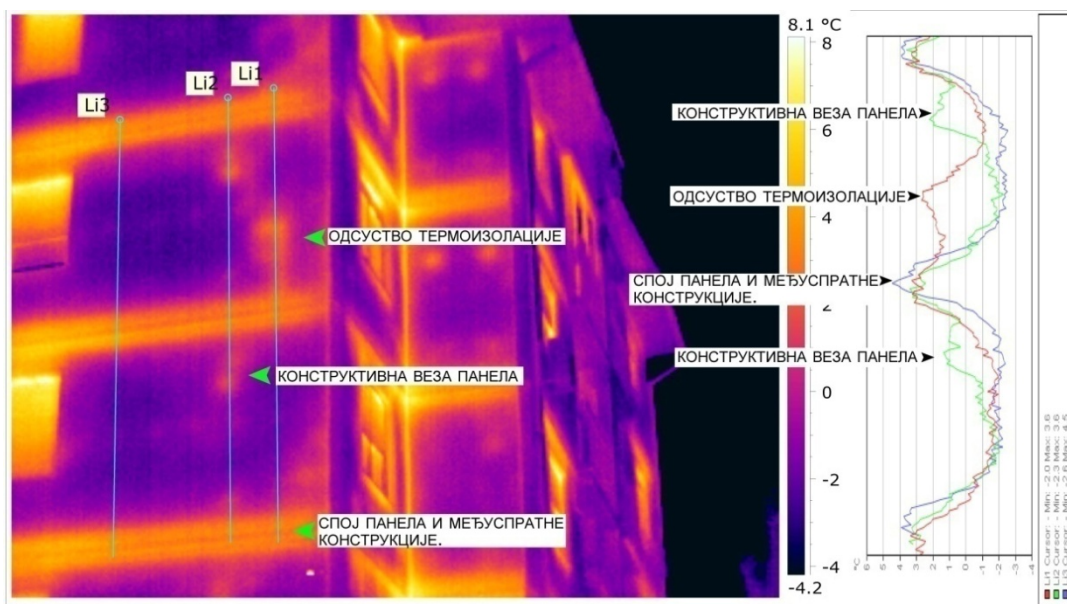
IV.4.2. Термовизијско снимање одабраног склопа

За назначени симулирани пресек, на одговарајућем коресподентном термограму, врши се идентификација комплементарног линијског сегмента и читавају измерене температуре. Поступак снимања се стога мора усагласити са потребама примене методе у смислу могућности одређивања јаснијих геометријских релација, што у пракси значи да је потребно снимати сегмент фасаде под што већим углом, односно, у идеалним условима, управно на фасаду. Уколико нисмо у могућности да извршимо снимање управно на фасаду, термограм ће бити перспективно завистан, тј. имаће одређени степен деформација, и самим

тиме површинска дистрибуција вредности неће бити исте густине. Појединачни пиксел на термограму ће, у зависности од видног угла камере и њене резолуције, покривати различите површине омотача исказане јединственом температурном вредношћу.

Уколико је прелиминарним снимањем већих површина омотача констатовано да нема значајнијих одступања вредности у правцу перспективног скраћења, поступак се може применити; међутим, уколико се јављају варијације температура, морамо променити угао снимања.

Илустрација могућих одступања измерених вредности дуж карактеристичних праваца, која се јављају код фасаде са нехомогеним карактеристикама, је дата на слици IV-10.

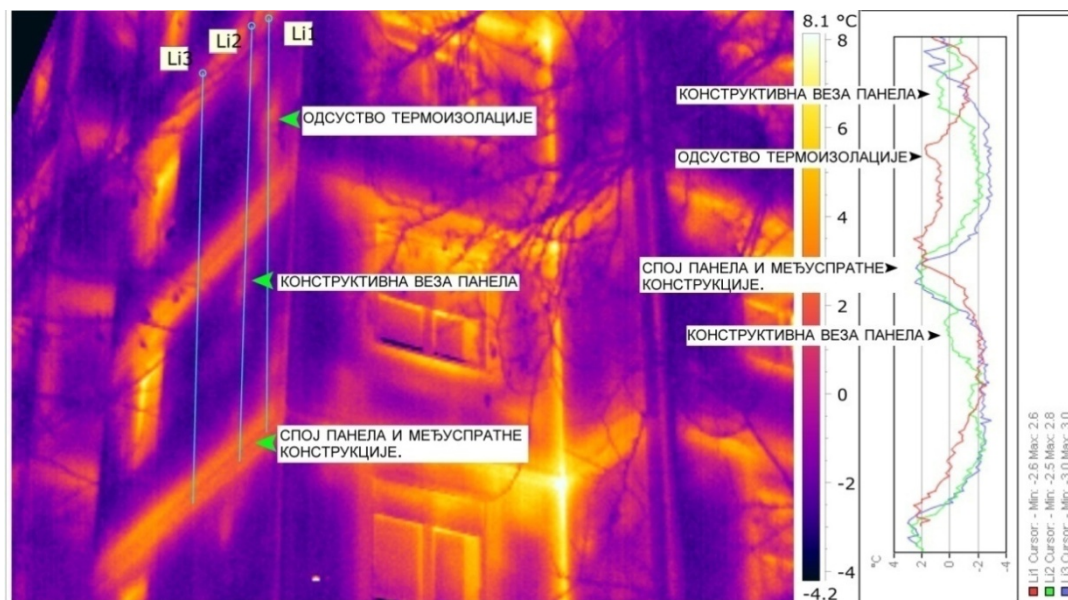


Слика IV-10 Приказ нехомогене структуре зида фасадног склопа ФС4. Термограм се карактерише различитим температурним очитавањима дуж неколико блиских паралелних праваца.

У овом случају је снимање вршено под одговарајућим углом, те се дуж назначених праваца LI1, LI2 и LI3 јасно уочавају различитости у саставу. На термограму и пратећем графикону су назначени претпостављени узроци одступања вредности.

Међутим, уколико анализирамо приказ на слици IV-11, јасно нам је да су грешке тумачења сасвим могуће. Зона одсуства термоизолације се очитава као

значајно израженија, док су се конструктивне везе панела готово спојиле са серклажима, односно линијским топлотним мостовима и немогуће их је адекватно детектовати.



Слика IV-11 Приказ релације угла снимања и нехомогене структуре зида фасадног склопа ФС4 . Термограм се карактерише температурним читавањима која не пружају реалне информације о саставу склопа.

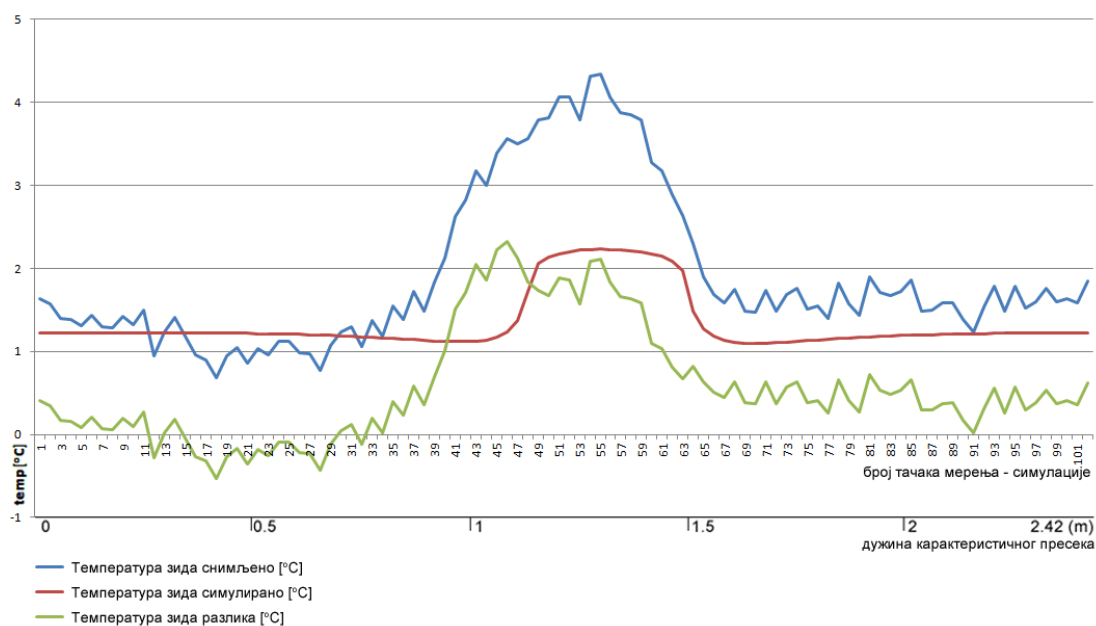
На основу приказаних примера можемо закључити да, иако је природа термограма површинска, у поступку компарације се користе линијски одређени подаци тј. само један правац, те је стога неопходно да зоне фасаде непосредно поред њега буду истих материјалних карактеристика, без варијација вредности.

IV.4.3. Усаглашавање измерених и симулираних резултата

Принцип анализе термограма који се заснива на установаљавању трендова и назакама зона потенцијалних одступања перформанси, није довољан за доношење релевантних оцена, већ се мора извршити одговарајућа квантификација вредности. Нумеричке вредности температура дуж анализираних праваца се идентификују коршћењем одговарајућих аналитичких софтвера од којих су у тези коришћени *Flir Reporter pro Ver 9*, и *Flir Quick Reporter ver. 1.2*.

У циљу једноставније обраде, нумерички подаци добијени применом обе методе су касније обрађивани у *Microsoft Office Excell* софтверу.

Већ поменути геометријска усаглашеност подразумева да су дужине симулација и мерења коресподентне. То, међутим, не значи да ће и подаци бити потпуно хармонизовани. Иако обе методе испитивања истражују исти линијски сегмент фасадног омотача, услед разлике резолуције снимања према моделовању, неопходно је извршити усаглашавање приказа. С обзиром да су термограми најчешће мање резолуције од симулационих приказа, потребно је извршити редукцију броја тачака које репрезентују анализирани линијски правац добијених поступком моделирања. Поступак редукције се у зависности од степена разлике „густине приказа“²² спроводи упросечавањем вредности суседних тачака. Резултат поступка усаглашавања исказа графички је приказан на слици IV-12

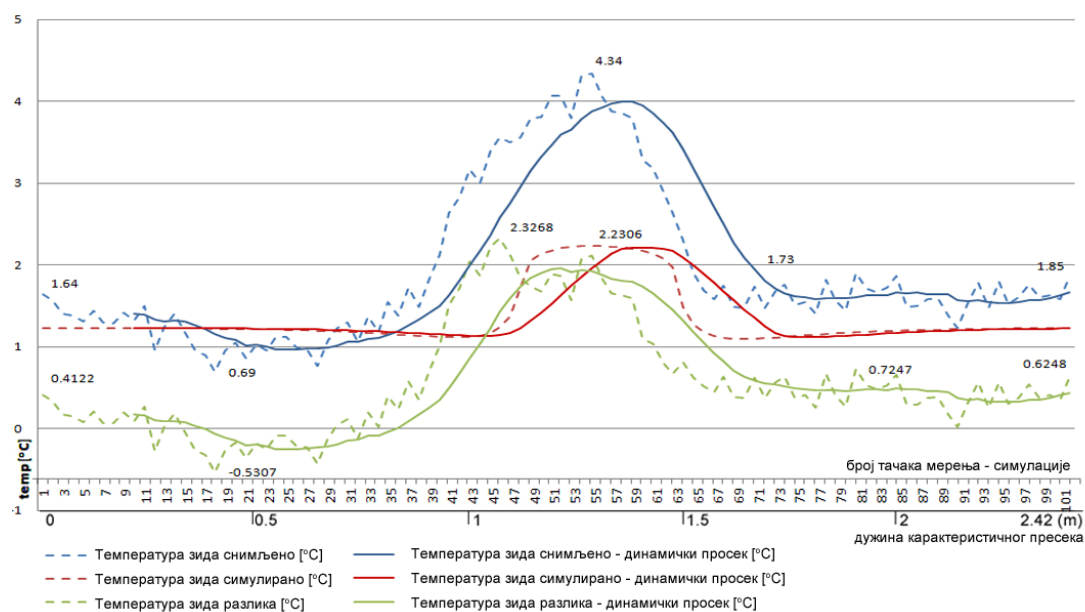


Слика IV-12 Приказ очитавања температурних вредности дуж карактеристичног пресека за Фасадни склоп ФС1. Дужина симулираног сегмента на површини фасаде износи 2.42m и приказана је преко 101 карактеристичне тачке, што одговара броју тачака добијеним из термограма.

На основу коресподентних вредности, могуће је једноставно утврдити карактеристике склопа исказане кроз степен одступања, просечне и максималне вредности одступања, доминанте трендове и др.

²² Овде се под „густином приказа“ мисли на број тачака према дужини анализираног пресека.

Графички приказ мерења се, услед храпавости посматраног омотача и појаве шума у процесу мерења карактерише препознатљивом расутошћу вредности у релативно малом температурном опсегу. Стандардни алгоритам обраде сигнала врши додељивање вредности појединим тачкама према калибрационим принципима, не усаглашавајући вредности. Ради поједностављења поступка праћења трендова, извршена је „нормализација“ измерених вредности увођењем тзв. динамичког просека (енг. *moving average*) који упросечује податке, почевши од иницијалног „осредњеног“ сегмента (у раду је коришћен распон осредњавања од 5-10%). Принцип се састоји у томе, да се за полазни распон, дефинисан процентуално, установи средња вредност, која постаје полазна тачка. Свака следећа позиција на новом графикону се рачуна померањем распона за једну вредност и поновним прерачунавањем просечне вредности. Приказ истог графикона после примене назначеног поступка дат је на слици IV-13.



Слика IV-13 Графичка илустрација „нормализованих дијаграма“ измерених и симулираних вредности, применом принципа динамичког просека са полазним кораком од 10%. Испрекиданом линијом су приказани резултати мерења, односно симулације, пре примене принципа динамичког просека.

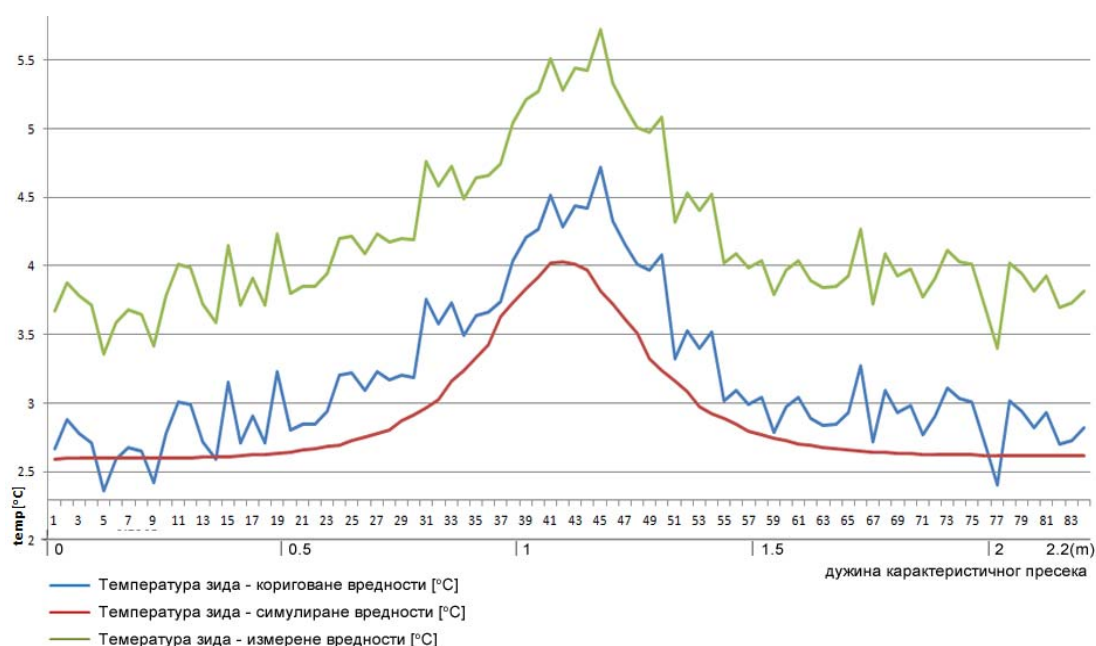
На графикону можемо видети карактеристично померање тачака за полазни сегмент као и осредњавање свих девијација, укључујући и максималне, односно минималне, вредности.

IV.4.4. Компарација измерених и симулираних вредности

У проценама перформанси се користе односи измерених према симулираним вредностима, док је приказани метод установљен ради једноставнијег сагледавања анализираних позиције.

Потребно је нагласити да се метод компарације, уз одређена ограничења, може вршити чак и у случајевима када поједини параметри снимања нису познати, односно нису тачно дефинисани. Као што је то већ објашњено приликом анализе утицајних фактора, већина параметара, уколико је снимање извршено у складу са препорукама за примену методе, се карактеришу линеарним односом према добијеним резултатима, док општи тренд остаје готово непромењен. Овом приликом се претпоставља равномеран утицај који неадекватно дефинисани параметри снимања имају на резултате, што је релативно груба апроксимација. Анализа се своди на утврђивање степена одступања, док се нумерички показатељи, у смислу температурне разлике, морају занемарити или узети са великом дозом резерве. Практично, за конкретан случај, може се извршити накнадна линеарна корекција измерених вредности и довести до поклапања доминантних сегмената графикана (зона највећих сличности), те потом анализирати одступања која се јављају на осталом делу.

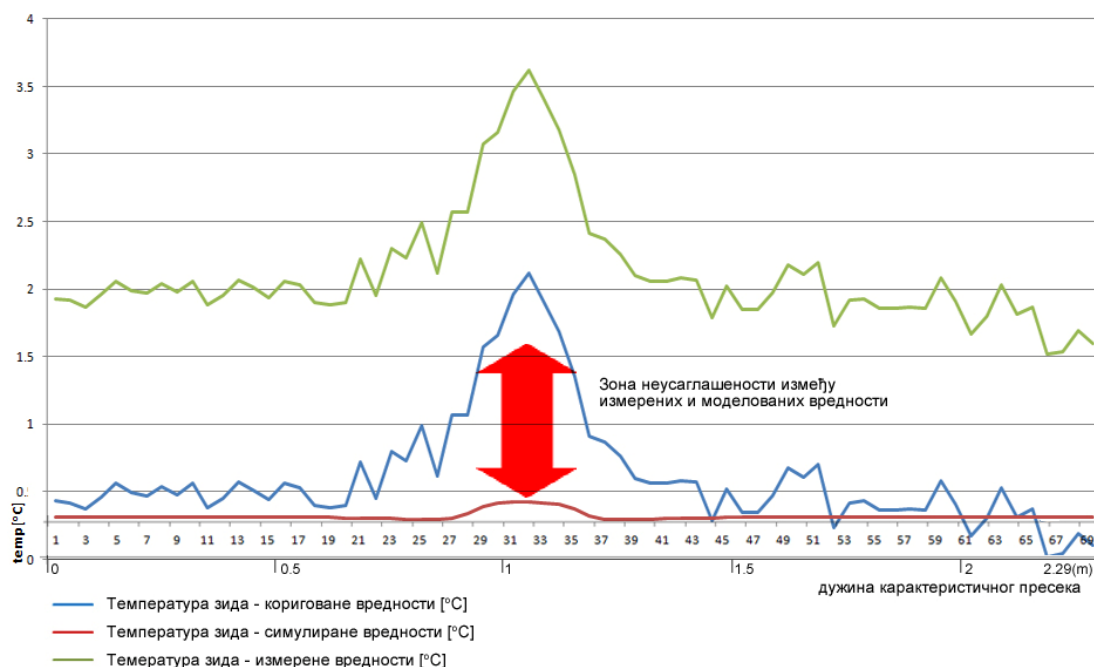
Илустрација приказаног принципа је дата на сликама IV-14 и IV-15.



Слика IV-14 Приказ графикана добијених након хармонизације измерених температурних вредности према симулираним вредностима. Кориговане температурне вредности указују на перформансе зида које по типу дистрибуције одговарају моделованом тренду.

На слици IV-14 можемо видети графиконе који приказују температурне вредности дуж карактеристичног сегмента фасадног склопа где се јављају приметна одступања. После корекције вредности, видимо да долази до поклапања трендова, те се може закључити да посматрани склоп поседује перформансе које су у складу са моделованим карактеристикама. На основу оваквих резултата може се очекивати да посматрани склоп одговара пројектованом стању, а да је до разлике у исказаним температурним вредностима дошло услед неправилно унетих параметара у процесу мерења.

На слици IV-15 можемо видети графиконе који приказују температурне вредности дуж карактеристичног сегмента фасадног склопа код којих, такође, постоји одступање у апсолутним вредностима температурних очитавања. За разлику од предходног случаја, овде се после корекције температурних вредности не јавља хармонизација трендова. Један део посматраног пресека се карактерише приметно већим одступањима од моделованих вредности што би значило да његове перформансе на овом сегменту нису одговарајуће и могу се сматрати дефектом.



Слика IV-15 Приказ графикана добијених након хармонизације измерених температурних вредности према симулираним вредностима. Кориговане температурне вредности указују на перформансе зида које по типу дистрибуције значајно одступају у односу на моделовани тренд.

Приказаним принципима поређења перформанси можемо вршити адекватну процену степена одступања реалних, односно измерених вредности према моделованим, без обзира на евентуалне неправилности у поступку мерења.

IV.4.5. Тумачење одступања перформанси

У пракси се најчешће јављају одступања измерених и симулираних вредности која настају као последица различитости процеса преноса топлоте између стационарног и нестационарног (динамичког) тока. Такође, резултати могу одступати услед грешака мерења, насталих као последица неодговарајућег утврђивања климатских услова и других параметара снимања. На основу расположивих истраживања, утврђено је да се трендови симулација (уколико се адекватно укључе сви утицајни фактори) и мерења углавном поклапају, док разлика између измерених и нумерички одређених вредности варира у зависности од спољашњих услова²³.

Принцип компарације се, стога, не своди нужно на тежњу за постизањем апсолутне усаглашености добијених резултата. Таква процедура би захтевала веома прецизно калибрисање сваког модела, што је у лабораторијским условима временски захтевно, а у реалној пракси готово неприменљиво. Процедура која је у овом раду дефинисана и испитана, базира се на установљавању преовлађујућих трендова и квантификацији степена одступања који се могу исказати процентуално. Другим речима, на основу трендова температура добијених моделовањем, који се узимају као референтне вредности, процењују се трендови температура добијених снимањем на терену и утврђује се степен одступања за сваки посматрани склоп. Утицаји за целокупан објект се могу квантификовати као збир појединачних случајева и њихових вредности.

Поређење шема дистрибуције температурних вредности, које се могу уочити на термограмима анализираних склопова, са њиховим симулираним панданима

²³ Разлика између измерених и нумерички одређених вредности креће се од 0,71°C (што је на нивоу грешке мерења и може се сматрати прецизним резултатом до одступања) до 3°C (за случајеве када се јављају интензивне варијације параметара окружења). Овде се говори о процени приликом квазистационарних услова, односно коришћењу динамичке симулације према реалним условима снимања. (Monchau et al. 2014)

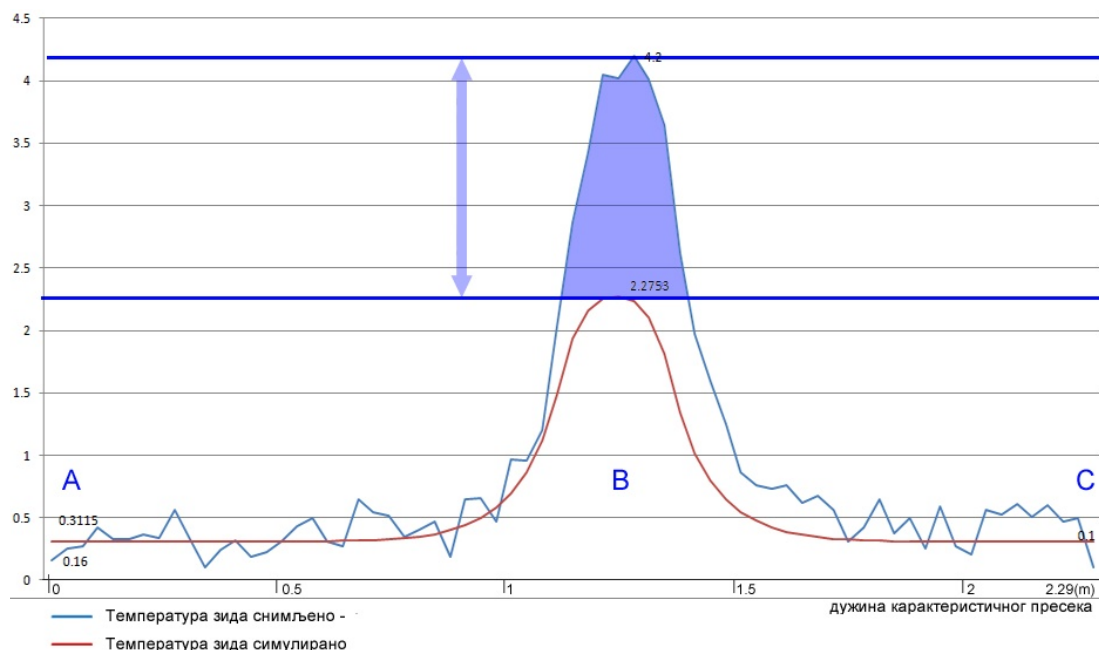
указује на доминантни шаблон провођења топлоте, који резултира одговарајућим термичким потписом - сликом.

Уколико термовизијским снимањем истражујемо фасадни омотач који би по својој структури требало да се карактерише релативно уједначеним материјалним карактеристикама, без већих одступања осим на местима где се јавља пројектовани утицај линијских топлотних мостова, поређење са моделом нам може дати увид у карактер процеса провођења топлоте и назначити зоне неусаглашености. Ове неусаглашености могу бити двојаке и исказују се као:

- Одступање амплитуда интензитета измерених вредности у односу на симулиране у оквиру истог шаблона расподеле температуре, и
- Различитост у шаблону расподеле температуре.

IV.4.5.1. Одступање амплитуда интензитета

У случају одступања амплитуда интензитета измерених вредности у односу на симулиране у оквиру истог шаблона расподеле температуре, долази до појаве већих нумеричких разлика између максималних (односно минималних) вредности температурних читавања појединих сегмената у односу на остатак анализираних дела фасадног омотача, посматрано према трендовима који су добијени симулацијама а који се користе као референтни ниво. Овакав тип неусаглашености нам говори да је анализирани склоп изведен, у већем делу, на пројектовани начин, док се одступања јављају најчешће као последица неодговарајућег квалитета примењених материјала, односно грешака у процесу извођења или услед других утицаја које није могуће утврдити термовизијским снимањем и неопходно их је подробније истражити другим методама. Уградња материјала чије перформансе не одговарају теоретски (лабораторијски) дефинисаним вредностима, односно грешке у процесу извођења које се јављају локализовано, су најчешћи узроци ових одступања. Пример фасадног склопа који се карактерише појавом повећаног интензитета термовизијски детектованих губитака у односу на симулиране вредности у оквиру истог тренда дистрибуције температурних вредности приказан је на слици IV-16.

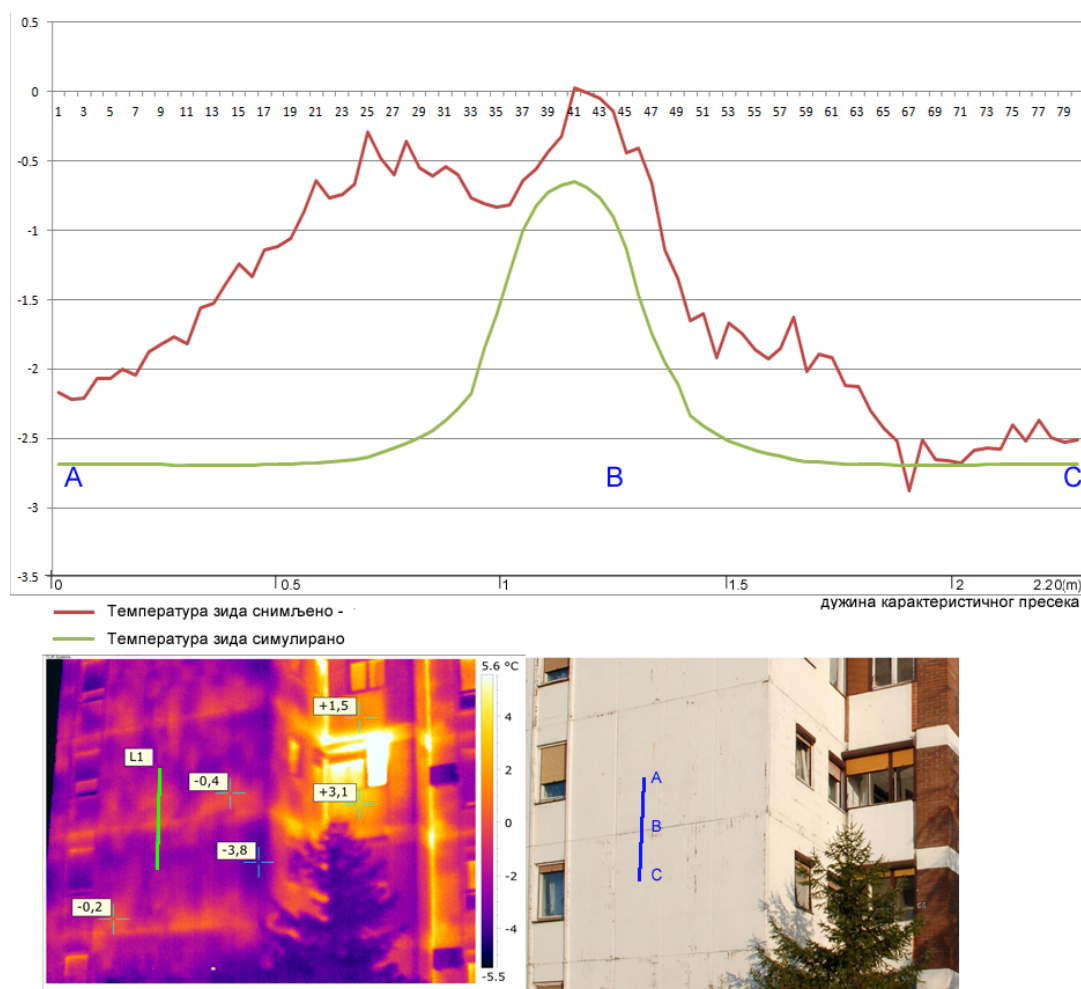


Слика IV-16 Карактеристичан детаљ удвојеног серклажа вишеслојног фасадног зида где се пројектом предвиђа постојање термоизолационог слоја, док је у пракси вероватно дошло до његовог изостављања и појаве знатно већих температурних читавања у односу на симулиране вредности (приказан је склоп ФС6)

IV.4.5.2. Различитост у шаблону расподеле температуре

Различитост у шаблону расподеле температуре измерених вредности у односу на симулиране указује на то да склоп није реализован према расположивој пројектној документацији (коришћеној за формирање симулационог модела), односно, да постоји већи број недостатака који карактеришу примењене материјале или више значајнијих грешака насталих у току извођења. Овакав тип неусаглашености може и указивати на већи степен одступања перформанси примењених материјала насталих као последица употребе објекта. Пример

фасадног склопа код кога се шема дистрибуције температурних вредности разликује у шаблону расподеле температуре као последица пропадања слоја термоизолације, или његовог оштећења у фази извођења, је приказана на слици IV-17.



Слика IV-17 Карактеристичан детаљ вишеслојног фасадног зида са префабрикованом завршном облогом. Пројектом се предвиђа термоизолациони слој у саставу фасадног склопа, док је у пракси вероватно дошло до његовог пропадања или оштећења у фази реализације, што за резултат има различит шаблон дистрибуције температуре у односу на симулиране вредности. Целокупан зид се одликује изразито нехомогеним саставом.

IV.4.6. Квантификација уочених одступања

Квантификација грешака уочених на структури фасадног омотача представља посебан проблем за примену методологије, јер, у законским и одговарајућим подзаконским актима (правилницима) нигде није дефинисана дозвољена граница

одступања. Практично се оставља стручности и личној процени експерата да сами доносе суд о квалитету омотача. Неопходно је стручно и научно дефинисати принципе по којима би се прецизније вршила градација уочених недостатака, што значајно превазилази обим рада у тези и представља тему за посебно истраживање.

Анализом расположиве научне и стручне литературе, као и истраживањем више од 50 зграда на терену, дошло се до становишта да се тренутно може примењивати принцип по коме се одступања могу рангирати према апсолутној разлици просечних вредности дуж посматраног пресека, односно њиховој проценуталној заступљености, посматрано према површини пресека на јединичној ширини од 1m. Овде можемо разликовати следеће случајеве:

- **Просечна одступања на целом пресеку мања од 0,5°C.**

За овакав склоп можемо сматрати да је изведен у потпуности према пројектованим карактеристикама и да се не јављају приметни дефекти без обзира на процентуалну заступљеност уочених одступања.

- **Просечна одступања на целом пресеку у распону од 0,5°C-2°C**

За овакав склоп се морају вршити детаљније анализе и извршити рангирање према процентуалној заступљености одступања. Уколико она прелазе 10% површине пресека можемо сматрати да је склоп реализован са значајним дефектима и у том случају је неопходно извршити додатне прорачуне и испитати утицаје уочених недостатака првенствено на могућност појаве буђи.

- **Просечна одступања на целом пресеку већа од 2°C**

За овакав склоп можемо сматрати да је реализован са изразитим дефектима који могу резултирати значајним недостацима у перформансама.

У зависности од степена уочених недостатака зависи и квантификација неправилности конструкције фасадног омотача и, касније, предлагање одговарајућих мера санације, односно довођења постојећег стања омотача на пројектовано стање или подизање на жељени квалитативни ниво.

V. КАРАКТЕРИСТИЧНИ СКЛОПОВИ ФАСАДНИХ ОМОТАЧА И ЊИХОВЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ПЕРФОРМАНСЕ

V.1. Идентификација карактеристичних склопова

У циљу анализе перформанси омотача стамбених зграда изграђених у периоду после Другог светског рата, неопходно је на основу истраживања приказаног у поглављу II, издвојити најфреквентније појавне облике који се могу сматрати типским и самим тиме репрезентативним за примену методологије.

У грађевинској пракси релативно дугог временског раздобља од пуних 65 година развијено је и употребљено веома много разноврсних материјалних решења, како примарних конструктивних склопова, тако и материјализације омотача, и практично је неоствариво детаљно анализирати и обрадити све појавне облике. За потребе истраживања у тези тј. утврђивања енергетских перформанси и њиховог испитивања методом термовизијског снимања, полазиште представља установљена примарна периодизација уз идентификацију најчешће примењиваних решења сегмента фасадног склопа који обухвата везу зида и међуспратне таванице.

Даљом анализом можемо закључити да, уколико посматрамо суштинско „решавање“ фасадних склопова у контексту енергетских перформанси, наилазимо на свега неколико основних типова, међусобно различитих према технолошком решењу зида. Према структури у пракси се најчешће јављају хомогени зидови од једног материјала или хетерогени који представљају вишеслојне зидове уз примену различитих материјала. Комплексност хетерогених зидова је значајнија и исказана већим бројем карактеристичних архитектонских детаља који утичу на перформансе и самим тиме изразитијом потребом за адекватним утврђивањем стања у процесу коришћења.

Поједине групације решења склопова које су по типу састава исте се могу идентификовати по препознатљивом „термичком“ потпису односно шеми дистрибуције температуре по спољашњој и унутрашњој површини, без обзира на различитост примењеног материјала и варијације дебљине слојева. Ова „слика“ нас може упутити на тип конструктивног решења док се варијације измерених

вредности јављају као последица разноврсности са материјалног аспекта. Значајнији утицај на промену шеме дистрибуције температурних читавања имају могући недостаци који настају било у процесу извођења било касније током експлоатације а који се примењеном методом могу адекватно уочити и касније детаљније истражити.

Прецизнија класификација зидова је условљена материјално конструктивним карактеристикама типског склопа који би се могли идентификовати као спој међуспратне конструкције и фасадног зида. Овде се уочава већа разноврсност решења нарочито у третману решавања детаља прихватања и ношења спољашњих слојева зида а који директно утичу на тип и интензитет линијских губитака а самим тиме и укупне перформансе.

Одабир карактеристичних случајева је извршен према временској периодизацији и тако ће бити представљен, међутим сами периоди градње нису пресудни већ укупне термичке перформансе односно конструктивно решење самог фасадног склопа.

Принцип одабира карактеристичних фасадних склопова је установљен према следећим критеријумима;

- Постојање термоизолационог склоја
- Степен комплексности фасадног склопа и примењених материјала
- Начин решавања линијских топлотних мостова

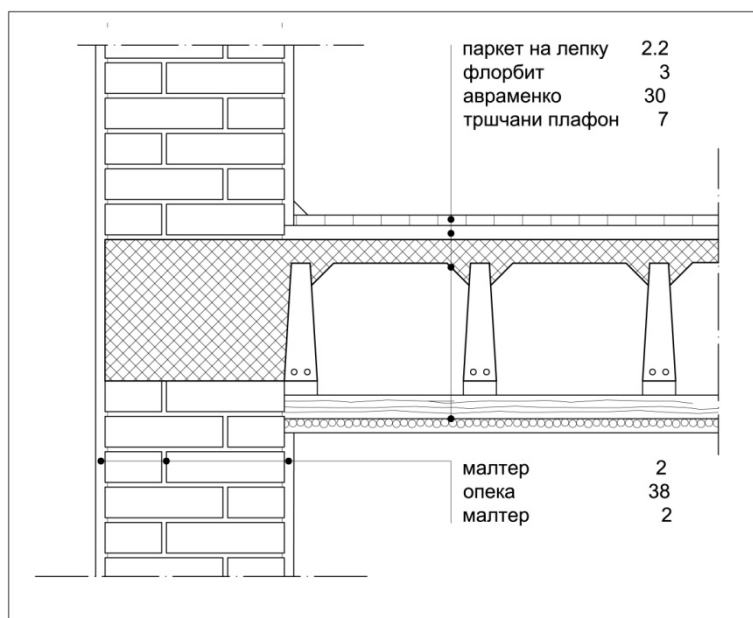
Идентификација конкретних склопова, односно прикупљање података о примењеним материјалима и технолошким решењима, је извршена на основу истраживања спроведеног за потребе израде „Националне типологије стамбених зграда Србије“ (Јовановић Поповић, М. и др. 2013б), односно израде студије „Атлас енергетских карактеристика омотача грађевинских објаката у Београду (Игњатовић, Д. Ђуковић Игњатовић, Н. 2012)

V.1.1. Период 1946-1970

Први установљени период 1946-1970. се, можемо сумирати, карактерише масивном градњом, једноставном технологијом грађења, без употребе термоизолације. За овај период је типична „класична“ градња уз масовну употребу опеке и међуспратних конструкција најчешће типа ситноребрастих или

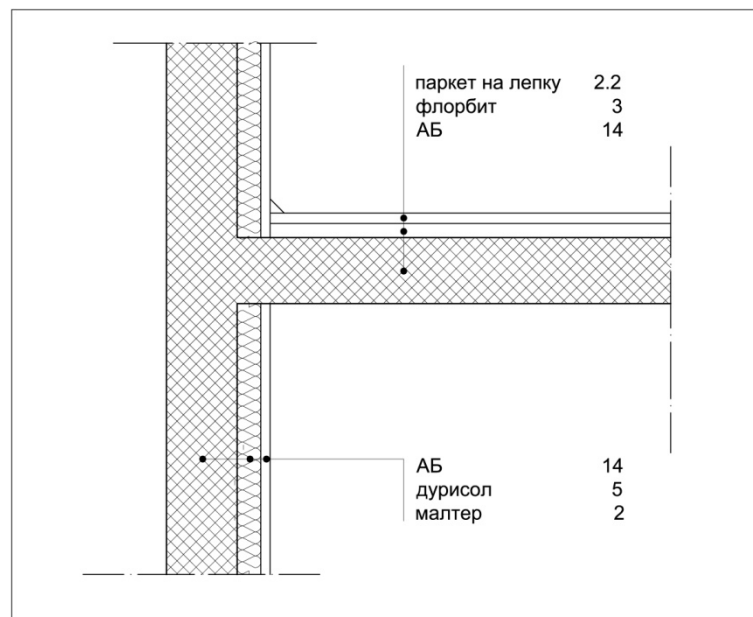
пуних армирано бетонских плоча. Истовремено почињу да се користе и армирано бетонске конструкције које, иако то није било захтевано прописима, у свом фасадном склопу имају термоизолациони слој који се углавном постављао са унутрашње стране. Као репрезент периода можемо узети следеће фасадне склопове:

ФС 1 – неизоловани фасадни зид од пуне опеке обострано малтерисан, у склопу са међуспратном конструкцијом типа „Авраменко“, чија је скица дата на слици V-1. Честа је појава, у каснијем делу периода и зидова од опеке дебљине 25cm, као и других типова ситноребрастих таваница полупрефабрикованих и рађених на лицу места.



Слика V-1 Фасадни склоп ФС-1, приказ материјализације

ФС 2 – фасадни зид од армираног бетона са слојем изолације постављеним са унутрашње стране и слојем малтера у склопу са међуспратном конструкцијом типа пуне армирано бетонске плоче чија је скица дата на слици V-2. Приказани детаљ је карактеристичан за ливене армирано бетонске конструкције.



Слика V-2 Фасадни склоп ФС-2, приказ материјализације

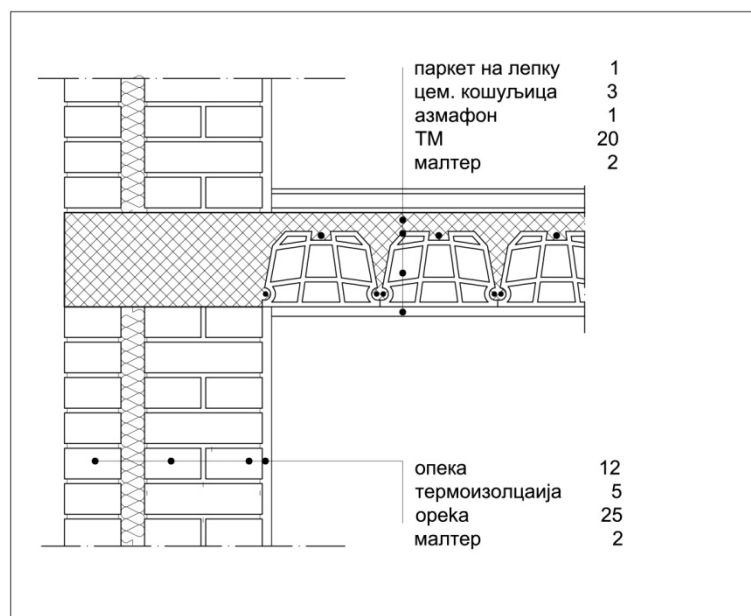
V.1.2. Период 1970-1987

Посматрани период се карактерише највећом разноврсношћу фасадних склопова у нашој пракси, како по питању примењених материјала тако и по технологији градње и обликовним донетима завршних слојева. Основна заједничка карактеристика се исказује кроз обавезну употребу термоизолационог слоја у саставу зида али без обраћања посебне пажње на решавање детаља односно минимизацију утицаја хладних мостова. „Сендвич“ зидови се најчешће ослањају на препуштене серклаже међуспратних таваница који се јављају или целокупном висином таванице или у виду конзолних препуста мање висине али без икаквог изолационог слоја.

Фасадни склопови су пројектовани тако да задовоље прописане вредности површинског коефицијента пролаза топлоте док утицај линијских мостова није улазио у укупан прорачун. Свест о проблемима који се могу јавити у оквиру фасадног омотача као последица лоших детаља је била присутна у пракси тако да се поједина решења карактеришу употребом термоизолационих материјала мада се и код њих и даље јављају значајни линијски топлотни мостови.

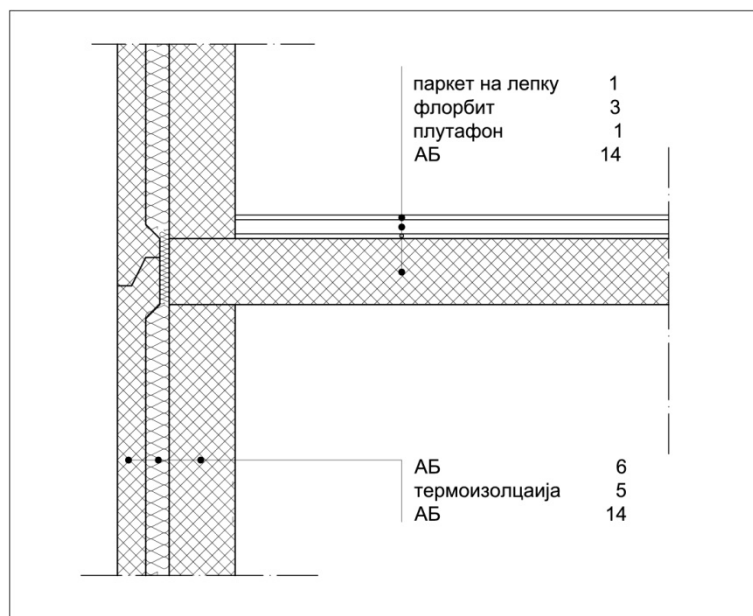
Као карактеристичне репрезенте периода можемо узети следеће фасадне склопове:

ФС 3 – (слика V-3) фасадни „сендвич“ зид са термоизолационим слојем у структури тј. средишњем сегменту зида. Носећи део је од пуне опеке а завршни од фасадне опеке. Међуспратна таваница је типа ТМ3. Често је у саставу зида уместо носећег дела од опеке изведен гитер блок а слој фасадне опеке замењен пуном опеком са слојем малтера као завршне обраде.



Слика V-3 Фасадни склоп ФС3, приказ материјализације

ФС 4 – (слика V- 4 фасадни префабриковани „сендвич“ зид – панел. Носећи део је од армираног бетона, слој термоизолације је постављен у средини а завршни слој је од армираног бетона. Међуспратна таваница је типа пуне армирано бетонске плоче. Приказан је фасадни склоп са континуираном термоизолацијом која се на месту споја облоге два панела стањује како би могло да се изврши одговарајуће повезивање и обезбеди водонепропусност споја. Код великог броја примера у овом споју уопште и нема термоизолације већ се врши линијско прихватање спољашњег дела целом дужином у виду серклажа а често се јављају и везе у пољу у виду ребара (вертикалних) или тачкастих спојева.



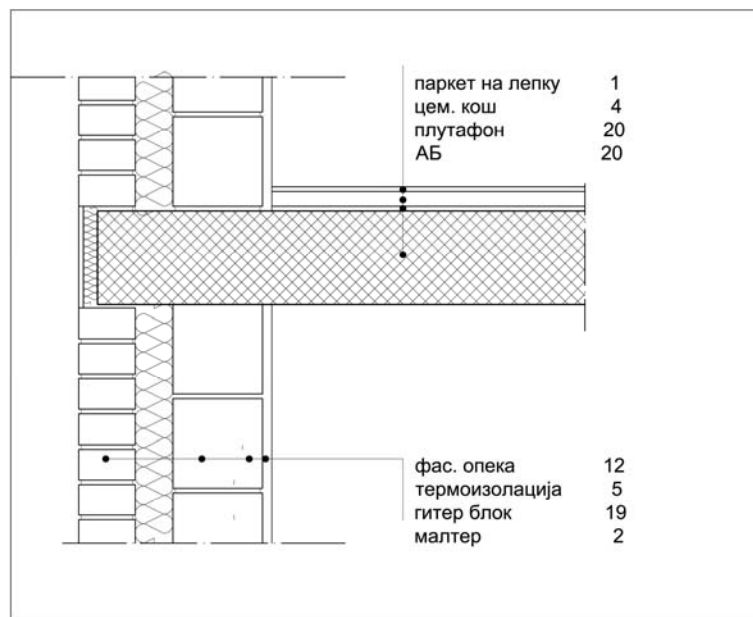
Слика V-4 Фасадни склоп ФС4, приказ материјализације

V.1.3. Период 1987-2011

Последњи анализирани период се карактерише смањењем варијетета појавних облика фасадних склопова уз значајније побољшање карактеристика са аспекта термичке заштите. Укључивање у прорачун линијских и тачкастих губитака топлоте резултирало је већом пажњом коју су пројектанти посвећивали решавању архитектонских детаља те се одређени број техничких решења може, уз адекватне модификације у смислу повећања термоизолационог слоја и смањења утицаја линијских топлотних мостова користи и данас.

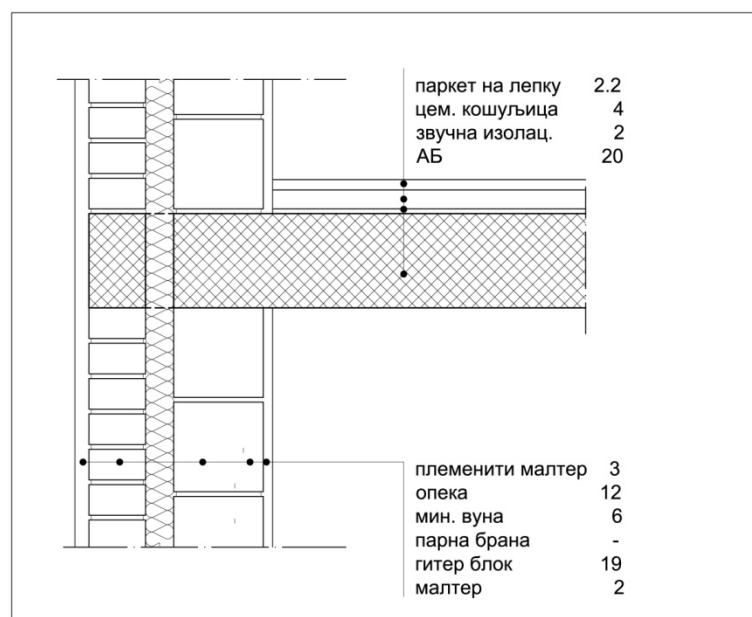
Као карактеристичне репрезенте периода можемо узети следеће фасадне склопове:

ФС 5 – (Слика V-5) фасадни „сендвич“ зид са термоизолационим слојем у средини зида. Носећи део је од гитер блока а завршни од фасадне опеке. Међуспратна таваница је типа пуне армирано бетонске плоче са препуштеним серклагом који је изолован са предње стране. Овај фасадни склоп, у ствари, представља унапређену варијанту решења ФС 3 са идејом смањења негативних утицаја које изложени армирано-бетонски серклаг има на термичке карактеристике склопа. Приказани детаљ се користио на самом почетку анализираног периода, те касније бива замењен склопом ФС 6.



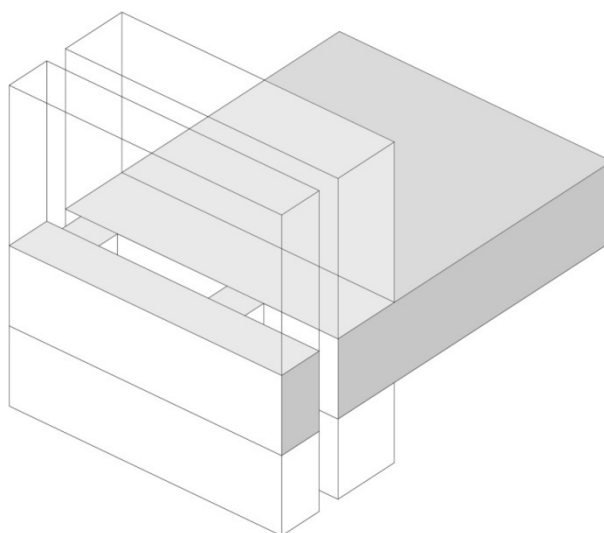
Слика V-5 Фасадни склоп ФС5, приказ материјализације

ФС6 - (слика V-6) фасадни „сендвич“ зид са термоизолационим слојем у средини зида. Носећи део је од гитер блока а завршни од пуне опеке завршно обрађене племенитим малтером.

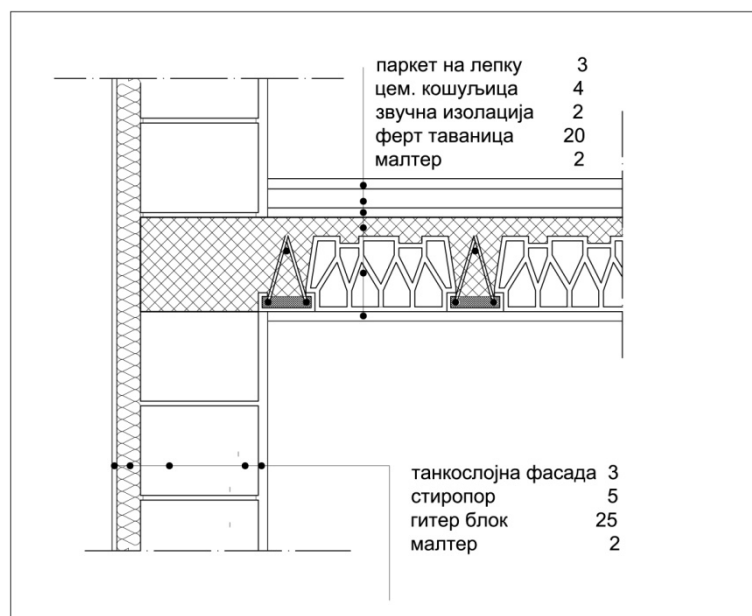


Слика V-6 Фасадни склоп ФС6, приказ материјализације

Међуспратна таваница је типа армирано бетонске плоче а прихват спољашњег слоја опеке се остварује извођењем тзв. удвојеног серклажа који омогућава континуитет термоизолације већим делом фасадног омотача и своди линијске топлотне губитке на тачкасте слика V-6а.



Слика V-6а Аксонометријски приказ удвојеног серклажа и тачкастог начина прихватања



Слика V-7 Фасадни склоп ФС7, приказ материјализације

ФС7 - (слика V-7) фасадни зид са термоизолационим слојем са спољашње стране изведен у типу контактне фасаде. Носећи део зида је од гитер блока а завршни изведен као танкослојна фасадна облога. Међуспратна таваница је типа ферт. Прихват термоизолационог слоја је лепљењем и тачкастим фиксирањем.

V.2. Прорачунске вредности параметара енергетских перформанси

Приликом одређивања прорачунских вредности параметара енергетских перформанси неопходно је прво дефинисати на основу којих стандарда вршимо прорачуне и како се квантификују добијени резултати.

Као што је већ раније речено актуелни прописи из области енергетске ефикасности лимитирају вредности коефицијента пролаза топлоте за поједине елементе уз додавање вредности од $\Delta U_{TB} = 0,1 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ на име линијских губитака. Са друге стране важећи СРПС EN ISO 14683 стандард разматра одређивање линијских губитака на основу поједностављене методологије базиране на каталожном принципу. Према овом стандарду, склоп који је усвојен као карактеристичан за проучавање перформанси фасадног омотача, у тези, је дат табеларно преко низа појавних облика приказаних на слици V-8.

--	--	--	--	--

међуспратне конструкције				
ИФ1 $\psi_e = 0,00$ $\psi_{ol} = 0,00$ $\psi_i = 0,10$	ИФ2 $\psi_e = 0,95$ $\psi_{ol} = 0,95$ $\psi_i = 1,05$	ИФ3 $\psi_e = 0,90$ $\psi_{ol} = 0,90$ $\psi_i = 1,00$	ИФ4 $\psi_e = 0,70$ $\psi_{ol} = 0,70$ $\psi_i = 0,80$	
ИФ5 $\psi_e = 0,60$ $\psi_{ol} = 0,60$ $\psi_i = 0,65$	ИФ6 $\psi_e = 0,90$ $\psi_{ol} = 0,90$ $\psi_i = 1,00$	ИФ7 $\psi_e = 0,70$ $\psi_{ol} = 0,70$ $\psi_i = 0,80$	ИФ8 $\psi_e = 0,45$ $\psi_{ol} = 0,45$ $\psi_i = 0,60$	

Слика V-8 Типични фасадни склопови: спој фасадног зида и међуспратне конструкције (на основу SRPS EN ISO 14683, стр. 11)

Приказане варијанте представљају случај који одговара изабраном типу детаља. Можемо разликовати следеће облике: (ИФ енг. *Intermediate floor*):

- ИФ1 – масивни зид изолован са спољашње стране, међуспратна конструкција ослоњена на зид целим пресеком зида, континуирана термоизолација
- ИФ2 – масивни сендвич зид изолован у оквиру структуре зида, међуспратна конструкција ослоњена на зид целим пресеком зида, прекинута изолација у зони међуспратне конструкције
- ИФ3 – масивни зид изолован са унутрашње стране, међуспратна конструкција ослоњена на зид целим пресеком зида, прекинута изолација у зони међуспратне конструкције
- ИФ4 – лаки или зид са дрвеном конструкцијом, без слоја термоизолације односно са изолацијом између дрвених носача, међуспратна конструкција ослоњена на зид целим пресеком зида, прекинута изолација у зони међуспратне конструкције
- ИФ5 – масивни сендвич зид изолован у оквиру структуре зида, међуспратна конструкција ослоњена на зид не обухвата целокупан пресек зида изолована са спољашње стране, прекинута изолација у зони међуспратне конструкције
- ИФ6 – масивни сендвич зид изолован у оквиру структуре зида, међуспратна конструкција ослоњена на зид целим пресеком зида, прекинута изолација у зони међуспратне конструкције, међуспратна конструкција изолована са доње и горње стране
- ИФ7 – масивни сендвич зид изолован са унутрашње стране, међуспратна конструкција ослоњена на зид не обухвата целокупан пресек зида изолована са спољашње стране, прекинута изолација у зони међуспратне конструкције
- ИФ8 – масивни сендвич зид изолован са унутрашње стране, међуспратна конструкција ослоњена на зид целим пресеком зида, међуспратна конструкција изолована са доње и горње стране

Прегледом приказаних случајева, а у контексту спроведеног истраживања грађевинског фонда, можемо закључити да стандард не предвиђа постојање масивног склопа без примене термоизолационог слоја чиме се за један велики дијапазон појавних облика постојећих склопова практично не дају смернице за прорачун линијских коефицијената пролаза топлоте. Даље, можемо констатовати да се случајеви ИФ4, ИФ6 и ИФ8 готово никада не јављају у нашој пракси док се случај ИФ7 јавља али веома ретко. Наиме, ИФ7 представља варијанту конструкције са масивним фасадним зидом изолованим са унутрашње стране и слојем изолације на месту серклажа са спољашње стране. Масивни зидови са изолацијом са унутрашње стране су, у пракси, извођени као армирано – бетонски по правилу хомогеног састава, тј. без слоја изолације у зони међуспратне конструкције те можемо сматрати и овај случај као нерелевантан за наше истраживање.

У тези су обрађени следећи, стандардном дефинисани случајеви:

- ИФ1 преко фасадног склопа ФС7
- ИФ2 преко фасадног склопа ФС3
- ИФ3 преко фасадног склопа ФС2
- ИФ5 преко фасадног склопа ФС5
- ИФ4, ИФ6, ИФ7, ИФ8 услед нерелевантности за нашу праксу нису обрађивани
- ФС1, ФС4 и ФС6 су случајеви склопа без термоизолације, односно са континуалном изолацијом (без прекида), и не налазе се у стандарду

Важно је напоменути да стандард, не пружа велики дијапазон варијанти конструкција коришћених приликом формирања одређеног склопа. Он, нпр. предвиђа међуспратну конструкцију само као армирано бетонску дебљине 20cm (што је повећање са 15 колико је ова вредност износила у претходној верзији стандарда EN ISO 14683:1999) као и фасадни зид дебљине 30cm за све случајеве. Верзија стандарда из 1999. године се карактерише мањим дебљинама елемената што за резултат има и ниже вредности линијских коефицијената пролаза топлоте те се може сматрати да је нови стандард на вишем нивоу.

Типови конструкција као и њихове карактеристике узете за нумерички прорачун и одређивање каталожних вредности линијских коефицијената пролаза

топлоте дати су табеларно у стандарду одакле се једноставно преузимају поређењем са типом који анализирамо. Јасно је да су вредности условљене унапред дефинисаним случајевима те се тешко могу применити за све остале типове конструктивних веза које се јављају у пракси што нас, уколико желимо прецизније вредности и резултате, упућује на детаљније прорачуне дефинисане стандардом SRPS EN ISO 10211: 2013.

Уколико вршимо само рачунске провере перформанси зграде а самим тиме и омотача поједностављеном методом, поступак се своди на израчунавање вредности коефицијента пролаза топлоте за зидове и усвајање одговарајућих коефицијената линијских топлотних мостова. Укупне вредности се на нивоу зграде проверавају поређењем са табеларно датим максималним вредностима. На нивоу фасаде провера се своди на задовољење коефицијената пролаза топлоте и прерачунавање параметра f_{Rsi} према раније представљеној методологији.

Одређивање коефицијента пролаза топлоте за зидове који су одабрани као карактеристични, као и провера пародифузије односно стабилности у летњем периоду урађена је коришћењем софтверског пакета KnaufTerm[®] ver 2s, аутора А. Рајчића.

Прорачуном склопова добијамо следеће основне карактеристике:

- **ФС1**

Прорачунска вредност коефицијента пролаза топлоте износи $U = 1,274 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$, што би значило да конструкција не задовољава стандард за постојеће објекте. Прорачунски температурни коефицијент $f_{Rsi} = 0,834$ рачунато без утицаја влажности ваздуха што указује да у зони површине зида без утицаја линијских мостова не долази до орошавања. Ψ коефицијент утицаја линијских мостова се не може усвојити из одговарајућег стандарда јер се исти односи на пројектовање нових зграда где није предвиђено постојање масивних неизолованих конструкција.

- **ФС2**

Прорачунска вредност коефицијента пролаза топлоте износи $U = 0,679 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$, што је приметно боље од предходног фасадног склопа али и даље недовољно

према стандарду за постојеће објекте. Прорачунски температурни коефицијент $f_{Rsi} = 0,91$, у пољу и без утицаја влажности ваздуха што указује да у зони унутрашње површине зида, не рачунајући на утицај линијских мостова не долази до орошавања. $\Psi_i=1$ на основу података из стандарда, што се сматра изразитим топлотним мостом и чиме се значајно повећавају губици у зони међуспратне конструкције.

- **ФСЗ**

Прорачунска вредност коефицијента пролаза топлоте износи $U = 0,678 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$.

“Сендвич“ зид који дефинише овај тип склопа се уз повећану дебљину термоизолационог слоја изводи и данас, према најновијим прописима. Прорачунски температурни коефицијент $f_{Rsi} = 0,91$ без утицаја влажности ваздуха што указује да у зони унутрашње површине зида без утицаја линијских мостова не одолази до орошавања. $\Psi_i=1.05$ на основу података из стандарда и представља изузетан утицај топлотног моста, чиме се у ствари карактерише тип везе на месту споја са међуспратном таваницом који није добро решен и резултује знатним повећањем губитака топлоте.

- **ФС4**

Прорачунска вредност коефицијента пролаза топлоте износи $U = 0,678 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$,

карактерише једну од варијанти префабрикованих фасадних панелних конструктивних решења. Прорачунски температурни коефицијент $f_{Rsi} = 0,91$ без утицаја влажности ваздуха што указује да у зони унутрашње површине зида без утицаја линијских мостова не долази до орошавања. Ψ_i за овај случај није наведен у стандарду, јер је претпостављен континуитет изолације. Међутим у пракси овакве конструкције се карактеришу изразитим губицима на месту спојева панела и везе унутрашњег и спољашњег дела панела те се, у ствари, веома често јавља тип везе – континуирани армирано бетонски серклаж који је карактеристичан за ФСЗ.

- **ФС5**

Прорачунска вредност коефицијента пролаза топлоте износи $U = 0,368 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$,

одражава приметно побољшање карактеристика и представљало је дуго времена најпримењиваније решење детаља споја сендвич зидова и међуспратне таванице.

Прорачунски температурни коефицијент $f_{Rsi} = 0,95$ без утицаја влажности ваздуха што указује да у зони унутрашње површине зида без утицаја линијских мостова не одлази до орошавања. $\Psi_i = 0,65$ на основу података из стандарда, чиме се у ствари објашњава тип везе на месту споја са међуспратном таваницом који је боље разрешен од претходне варијанте али и даље резултује знатним повећањем губитака топлоте.

- **ФС6**

Прорачунска вредност коефицијента пролаза топлоте износи $U = 0,379 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$, и одражава приметно побољшање термичких карактеристика. ФС6 је најбоље примењивано решење сендвич зидова. Прорачунски температурни коефицијент $f_{Rsi} = 0,95$ без утицаја влажности ваздуха што указује да не долази до орошавања. Ψ_i се за овај случај не наводи у каталогу приказаном у стандарду јер постоји континуитет термоизолације. На вези серклажа долази до појаве тачкастих губитака који се не рачунају стандардом.

- **ФС7**

Прорачунска вредност коефицијента пролаза топлоте износи $U = 0,526 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$. Прорачунски температурни коефицијент $f_{Rsi} = 0,93$ без утицаја влажности ваздуха што указује да у зони унутрашње површине зида без утицаја линијских мостова не долази до орошавања. Ψ_i се за овај случај не наводи у каталогу приказаном у стандарду јер постоји континуитет термоизолације.

V.3. Симулационе вредности параметара енергетских перформанси

Сви типични склопови су моделирани у складу са реалним карактеристикама (подаци прикупљени на основу расположиве пројектне документације), у смислу примењених материјала и дебљина слојева а, симулирање је извршено према препорукама датим стандардом тј. одређивањем карактеристичног склопа који обухвата дужине зидова и захваћене међуспратне конструкције од 1m.

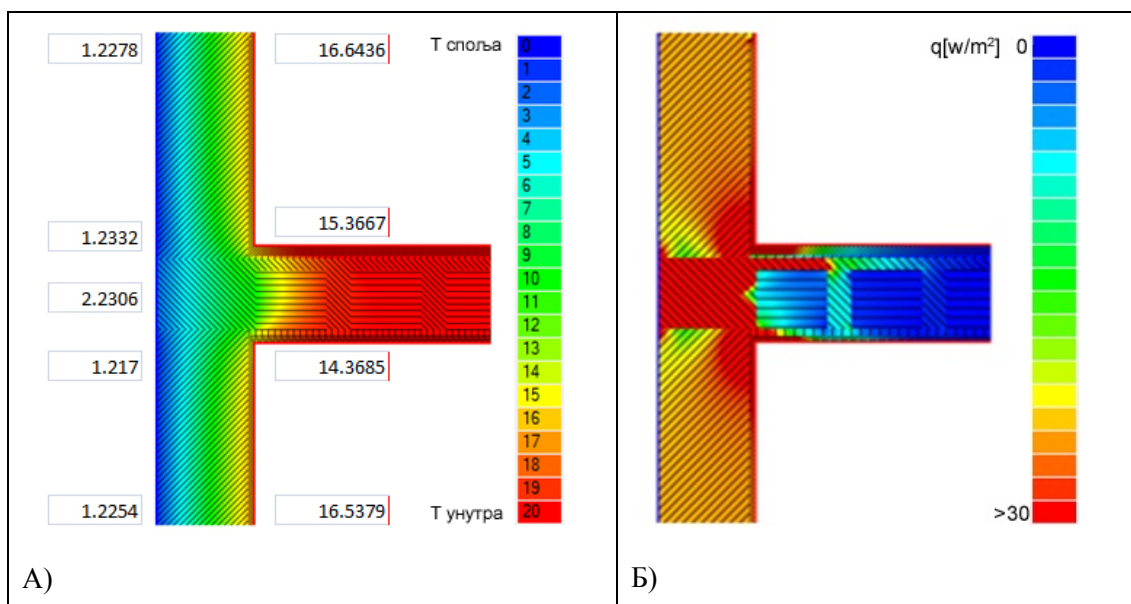
За разлику од класичног метода прорачуна где се, по одређивању коефицијената пролаза топлоте, температуре слојева зидова добијају на основу пројектних температура (све конструкције су рачунате за Београд који се карактерише зимском пројектном температуром од $-12.1^{\circ}C$) и на основу њих

утврђују температурни коефицијенти, приликом симулирања перформанси и одређивања температура прорачун је извршен за климатске услове важеће у тренутку снимања термовизијском камером, како би се добиле компаративно валидне вредности и утврдио реални температурни фактори карактеристични за одабране склопове.

Применом симулација на раније дефинисане карактеристичне склопове добијамо следеће графичке и нумеричке резултате:

- **Фасадни склоп ФС1:**

симулационе вредности прорачуна исказане кроз приказ дистрибуције



Слика V-9 ФС1, Приказ дистрибуције температурних очитавања А) и топлотног протока Б)

температура и топлотног протока можемо видети на слици V-9:

Дистрибуција температуре слика V-9А) одсликава релативну уједначеност промена вредности кроз целокупан пресек фасадног зида. Распон симулираних вредности варира од +1,23⁰С на спољашњој страни зида (температура ваздуха споља 0⁰С) +16,64⁰С на унутрашњој страни зида. (температура ваздуха унутра +20⁰С). Приметно је повишење температурних вредности у зони међусpratне конструкције са спољашње стране зида на +2,23⁰С.

Релација између нумеричких вредности и њихових графичких репрезентација помоћу боје дата је на одговарајућој скали и примењена је истоветно на свим осталим карактеристичним детаљима.

Топлотни проток V-9Б) се такође карактерише релативно уједначеном дистрибуцијом са јасном тенденцијом повећања интензитета у зони споја међуспратне конструкције и фасадног зида.

Карактеристичне вредности симулираних параметара су назначене у табели V-1:

Табела V-1 вредности параметара за ФС1 на основу симулације

Параметар	f_{Rsi} изнад/испод међуспратне конструкције	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ спрезања	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ зида	Ψ
вредност	0,77/0,73	1,1892	1.2928	-0.1

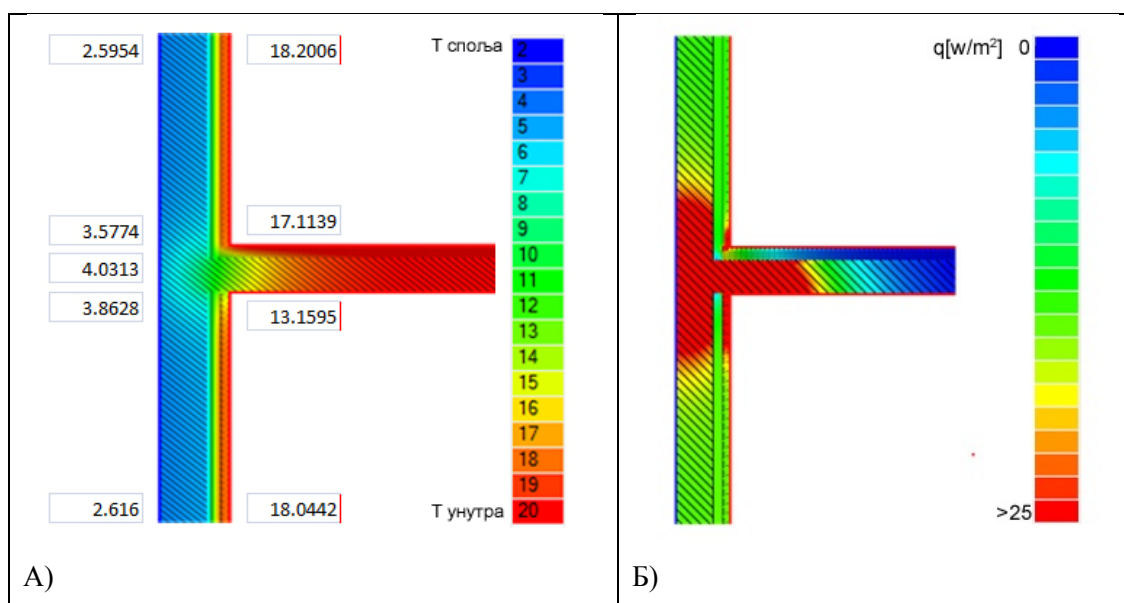
Прорачунска вредност температурног фактора, израчунатог само на основу температура, са доње стране међуспратне конструкције је испод препоручене вредности од 0.75 што значи да је код овог типа конструкције могућа појава конденза и буђи. Коефицијент линијског пролаза топлоте износи $\Psi = -0,1$ и упућује на постојање већег отпора пролазу топлоте у зони међуспратне конструкције него кроз сам зид, а што се може објаснити типом саме конструкције која се састоји од бетонских ребара и релативно танке плоче са ваздушним просторима затвореним слојем трске са доње стране, уз повећане изолационе карактеристике односно смањење топлотног протока.

- **Фасадни склоп ФС2:**

Симулационе вредности прорачуна исказане кроз приказ дистрибуције температура и топлотног протока можемо видети на слици V-10:

Дистрибуција температуре слика V-10А) указује на изражене варијације вредности дуж пресека фасадног зида. На крајевима модела (поље зида), где се „не осећа“ утицај топлотног моста температурне вредности се крећу од $+2,59^{\circ}\text{C}$ на спољашњој страни зида (температура ваздуха споља $+2^{\circ}\text{C}$) до $+18,20^{\circ}\text{C}$ на унутрашњој страни зида (температура ваздуха унутра $+20^{\circ}\text{C}$) са линеарном променом вредности. У зони топлотног моста долази до повећаних губитака,

неправилне готово радијалне дистрибуције вредности и симулираних температурних очитавања за спољашњу страну зида од +4,03 °C.



Слика V-10 ФС2, Приказ дистрибуције температурних очитавања А) и топлотног протока Б)

Топлотни проток приказан на слици V-10Б) се такође карактерише неуједначеном дистрибуцијом са јасном тенденцијом повећања интензитета у зони масивне међуспратне конструкције.

Карактеристичне вредности параметара су приказане у табели V-2:

Табела V-2 вредности параметара за ФС2 на основу симулације

Параметар	f_{Rsi} изнад/испод међуспратне конструкције	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ спрезања	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ зида	Ψ
вредност	0,85/0,57	1.2416	0.6774	0.5642

Код овог типа конструкције температурни фактор са доње стране плоче износи свега 0,57, што би значило да је примењено материјално решење веома лоше и подложно појави конденза и буђи. Израчунати коефицијент линијског

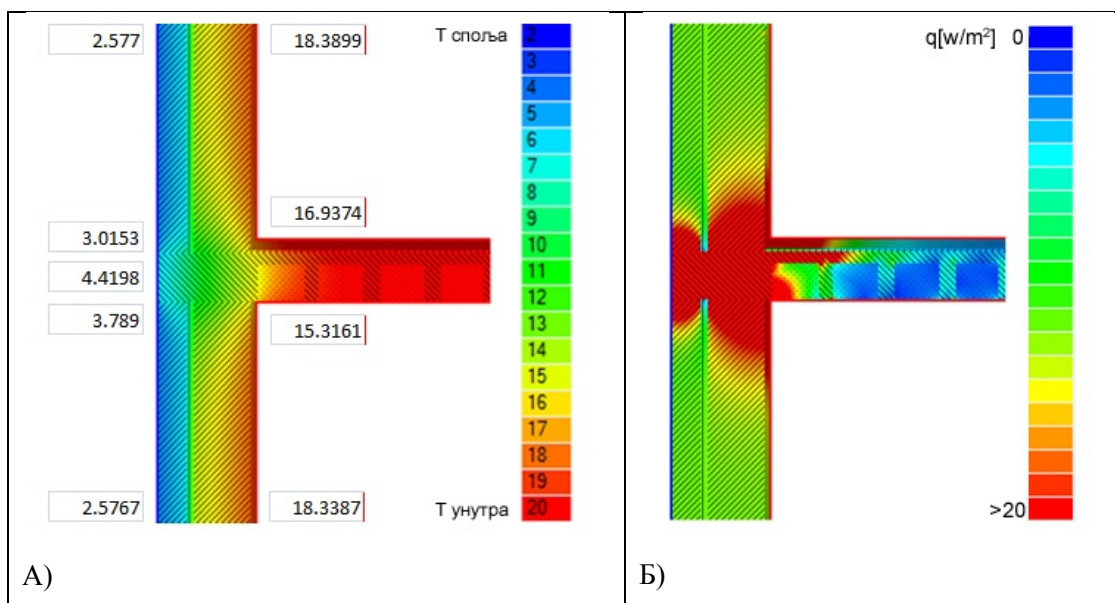
пролаза топлоте износи $\Psi = 0.5642$, што се сматра изузетно лошим, са веома значајним утицајем на перформансе.

Приметно је одступање израчунатог коефицијента Ψ у односу на табеларну вредност која се декларише, за унутрашње површине, вредношћу 1.0. Мања симулирана вредност је последица мањих дебљина слојева које чине анализирани склоп у односу на стандардом дефинисане.

Испитивање утицаја материјала и њихових дебљина на прорачунске вредности коефицијента линеарног пролаза топлоте показује да одступања могу бити знатна и до 80% за назначени склоп. (Рајчић, 2011)

- **Фасадни склоп ФСЗ:**

Симулационе вредности прорачуна исказане кроз приказ дистрибуције температура и топлотног протока можемо видети на слици V-11:



Слика V-11 ФСЗ, Приказ дистрибуције температурних читавања А) и топлотног протока Б)

Дистрибуција температурних вредности кроз попречни пресек склопа је приказана на слици V-11А). Основна карактеристика склопа се огледа кроз значајан утицај који континуирани серклаж има на термичке карактеристике, стога се уочавају приметне варијације у читавањима, у зависности од положаја у

структури зида. Симулиране температурне вредности се крећу од +2,57°C за спољашњу страну зида (температура ваздуха споља +2°C), односно +18,39°C за унутрашњу страну зида (температура ваздуха унутра +20°C). Повишење спољашње температуре зида, у зони утицаја линијског топлотног моста, је на +4,42°C.

Топлотни проток приказан на слици V-11Б) се такође карактерише неуједначеном дистрибуцијом са јасном тенденцијом повећања интензитета у зони континуираног армирано-бетонског серклажа. Приметно је смањење протока на местима глинених блокова ТМ таванице што потврђује добре термичке карактеристике овакве међуспратне конструкције.

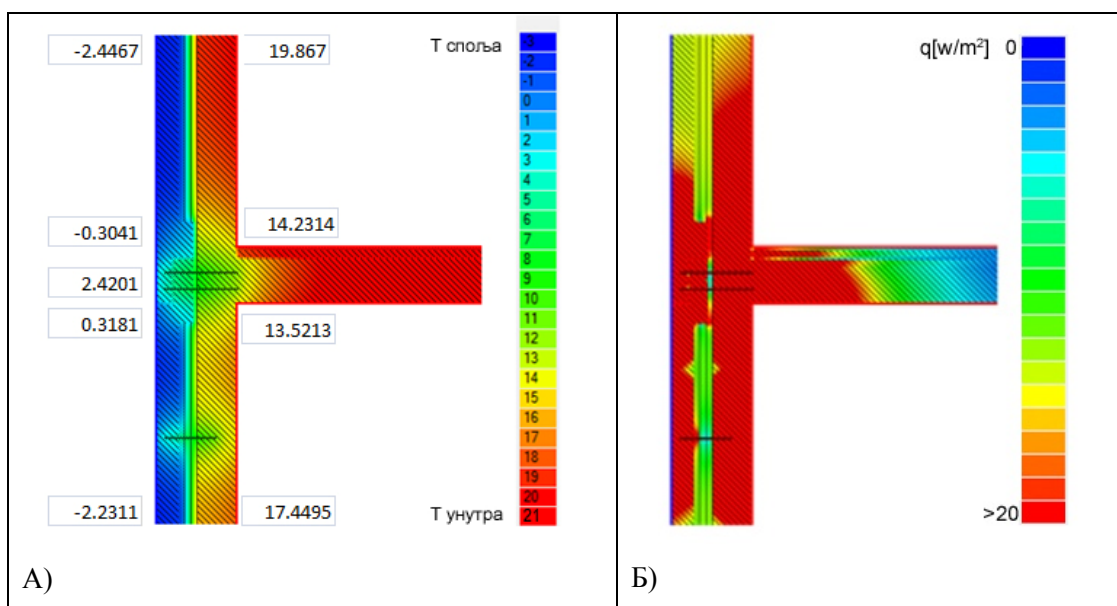
Карактеристичне вредности параметара су приказане у табели V-3:

Табела V-3 вредности параметара за ФС3 на основу симулације

Параметар	f_{Rsi} изнад/испод међуспратне конструкције	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ спрезања	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ зида	Ψ
вредност	0,71/0,73	0,9562	0,6727	0.2835

• Фасадни склоп ФС4:

симулационе вредности прорачуна исказане кроз приказ дистрибуције



Слика V-12 ФС3, Приказ дистрибуције температурних очитавања А) и топлотног протока Б)

температура и топлотног протока можемо видети на слици V-12:

Дистрибуција температурних вредности кроз попречни пресек склопа је приказана на слици V-12А). Основна карактеристика склопа се огледа кроз значајан утицај који хоризонтални серклаж има на термичке карактеристике, стога се уочавају приметне варијације у читавањима у зависности од положаја у структури зида. Симулиране температурне вредности се крећу од -2.44°C на спољашњој страни зида (температура ваздуха споља -3°C), односно $+19.87^{\circ}\text{C}$ (температура ваздуха $+21^{\circ}\text{C}$) за унутрашњу страну зида. Повишење спољашње температуре зида, у зони утицаја линијског топлотног моста, је на $+2.42^{\circ}\text{C}$.

Топлотни проток приказан на слици V-12Б) се такође карактерише неуједначеном дистрибуцијом са јасном тенденцијом повећања интензитета у зони серклажа, иако је он пројектован са термопрекидом.

Карактеристичне вредности параметара су приказане у табели V-4:

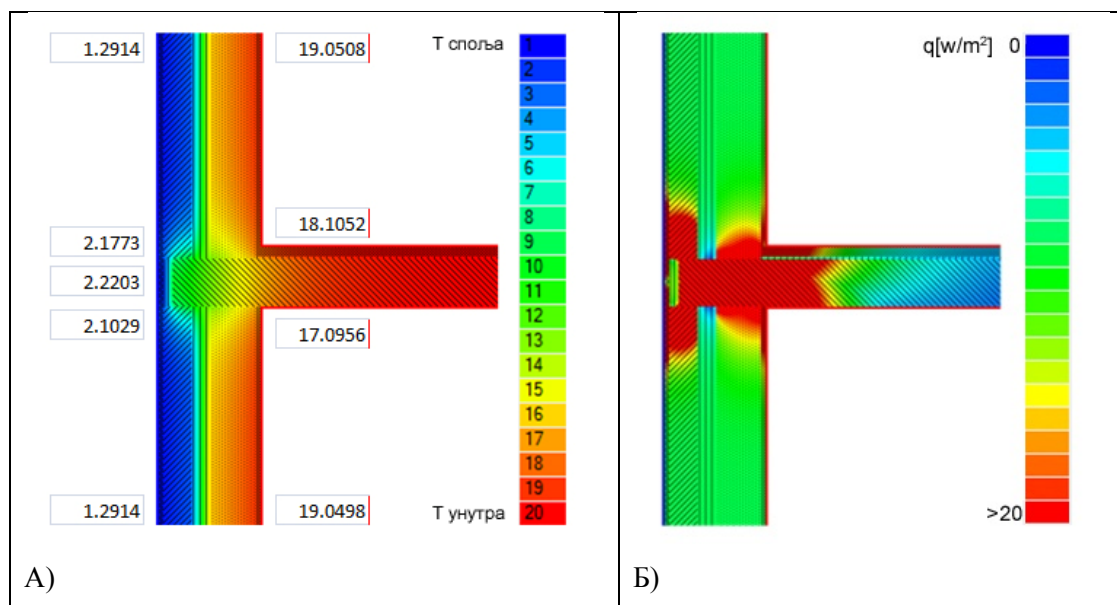
Табела V-4 вредности параметара за ФС3 на основу симулације

Параметар	f_{Rsi} изнад/испод међуспратне конструкције	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ спрезања	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ зида	Ψ
вредност	0,72/0,68	2,4896	0,6727	1,8169

- **Фасадни склоп ФС5:**

Симулационе вредности прорачуна исказане кроз приказ температура и топлотног протока можемо видети на слици V-13.

На приказу V-13А) можемо видети да је шема дистрибуције температурних вредности по пресеку зида веома слична случају ФС3 уз приметно смањење утицаја топлотног моста. Симулиране вредности спољашње температуре зида се крећу од 1.29°C на крајевима модела (температура ваздуха споља 1°C) до 2.22°C у зони линијског топлотног моста. Унутрашња температура зида се карактерише вредношћу од $+19.05^{\circ}\text{C}$ (температура ваздуха $+20^{\circ}\text{C}$). Термоизолациони слој постављен на месту продора серклажа кроз слојеве зида смањује утицај топлотног моста.



Слика V-13 ФС5, Приказ дистрибуције температурних очитавања А) и топлотног протока Б)

Топлотни проток V-13Б) се карактерише неуједначеном дистрибуцијом са јасном тенденцијом ширења кроз серклаж и на масивне зидове уз „заустављени“ ток у зони чела серклажа као последица термоизолационог слоја.. Карактеристичне вредности параметара су приказане у табели V-5:

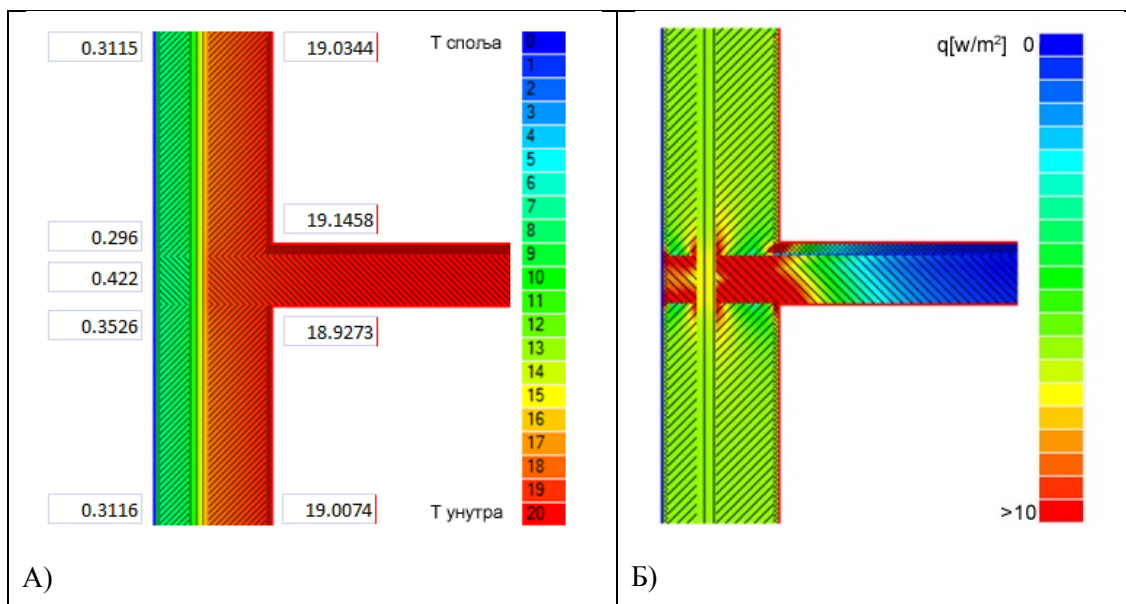
Табела V-5 вредности параметара за ФС5 на основу симулације

Параметар	f_{Rsi} изнад/испод међуспратне конструкције	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ спрезања	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ зида	Ψ
вредност	0,90/0,85	0,6789	0,3697	0.3092

Као и у претходном случају овде су моделиране вредности линијског коефицијента пролаза топлоте ниже од табеларне која износи 0,65 као последица бољих термичких карактеристика ТМ таванице у односу на пуну армирано бетонску плочу која је коришћена у прорачуну у оквиру стандарда.

- **Фасадни склоп ФС6:**

Симулационе вредности прорачуна исказане кроз приказ температура и топлотног протока можемо видети на слици V-14:



Слика V-14 ФС6, Приказ дистрибуције температурних очитавања А) и топлотног протока Б)

На приказу V-14А) можемо видети униформност дистрибуције температуре кроз пресек фасадног зида која се линеарно мења од спољашње +0,31°C (температура ваздуха споља 0°C) до унутрашње +19,03°C (температура ваздуха +20°C) на делу зида ван утицаја споја са међуспратном конструкцијом односно незнатним повишењем на +0,42°C у правцу таванице.

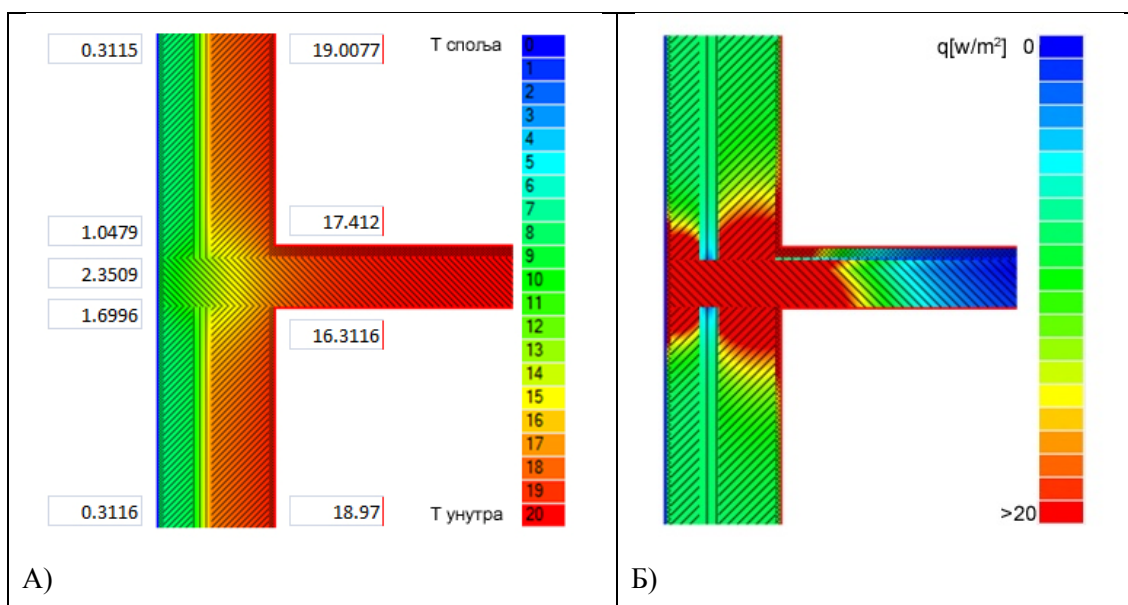
Топлотни проток V-14Б) је лимитиран на унутрашње слојеве зида са незнатним повећањем на местима где међуспратна конструкција остварује контакт са слојевима фасадног зида.

Карактеристичне вредности параметара су приказане у табели V-6:

Табела V-6 вредности параметара за ФС6 на основу симулације

Параметар	f_{Rsi} изнад/испод међуспратне конструкције	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ спрезања	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ зида	Ψ
вредност	0,96/0,94	0.3659	0.3708	0

Континуитет термоизолације кроз назначени пресек зида резултира минималним варијацијама температуре као што се на графичком приказу може уочити, међутим на месту где се повезују спољашњи и унутрашњи серклаж долази до пробоја термоизолације и појаве тачкастих губитака. С обзиром да се за одређивање прорачунских перформанси користи дводимензионално моделирање приказ температурних вредности и топлотног протока се не може дати по целокупној површини зида (неопходно је коришћење 3D софтвера) али се може симулирати кроз сам детаљ везе, уз карактеристичан приказ дат на слици V-15

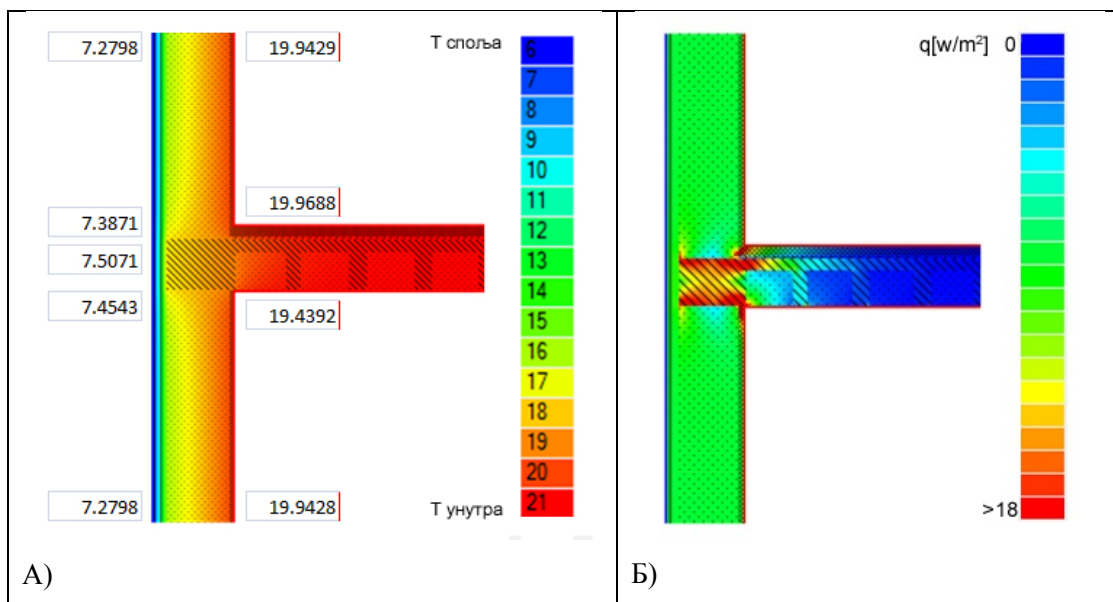


Слика V-15 ФС6, Приказ дистрибуције температурних очитавања А) и топлотног протока Б) на месту тачкастог топлотног моста односно везе спољашњег и унутрашњег серклажа

Можемо уочити да је дистрибуција топлотних вредности приметно другачија, као и да шема топлотног протока и више одговара случају континуираног серклажа обрађеном у оквиру ФС3, што овај тип везе, у ствари, и представља. Приметна су повећања температура површина зидова на спољашњој страни, у зони везе, на $+2,35^{\circ}C$ у односу на $+0,42^{\circ}C$ ван утицаја везе, односно смањења површинских температура унутрашњих слојева на месту споја са таваницом на $+17,41^{\circ}C$ са горње стране и $+16,31^{\circ}C$ са доње према $+19,14^{\circ}C$ и $+18,92^{\circ}C$. Температурни коефицијент f_{Rsi} износи на овим местима 0.87/0.82 што су и даље вредности које не упућују на могућност појаве конденза али приметно лошије од вредности ван утицаја тачкастог топлотног моста.

- **Фасадни склоп ФС7**

Симулационе вредности прорачуна исказане кроз приказ температура и топлотног протока можемо видети на слици V-16:



Слика V-16 ФС7, Приказ дистрибуције температурних очитавања А) и топлотног протока Б)

На приказу V-16А) можемо видети сегмент фасадног склопа примене тзв. контактне фасаде која се одликује униформношћу дистрибуције температуре кроз пресек фасадног зида са мањим варијацијама у зони серклажа. Моделиране вредности се крећу од $+0,30^{\circ}\text{C}$ за спољашњу површину зида ван утицаја серклажа (температура ваздуха споља 0°C), до $+19,03^{\circ}\text{C}$ за унутрашње површине зида (температура ваздуха унутра $+20^{\circ}\text{C}$). Приметно је незнатно повишење температуре на $+0,42^{\circ}\text{C}$ на месту хоризонталног серклажа у зиду.

Топлотни проток V-16Б) је лимитиран на унутрашње слојеве зида са препознатљивим преливањем на месту споја серклажа са термоизолације и релативно локализованим утицајима који не мењају перформансе склопа.

Приказани фасадни склоп представља један од најчешће примењиваних решења термичког изоловања фасадног зида у пракси, у последњем периоду, нарочито код зграда намењених тржишту.

Карактеристичне вредности параметара су приказане у табели V-7.

Табела V-7 вредности параметара за ФС7 на основу симулације

Параметар	f_{Rsi} изнад/испод међуспратне конструкције	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ спрезања	$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ зида	Ψ
вредност	0,93/0,89	0.4636	0.526	-0,0624

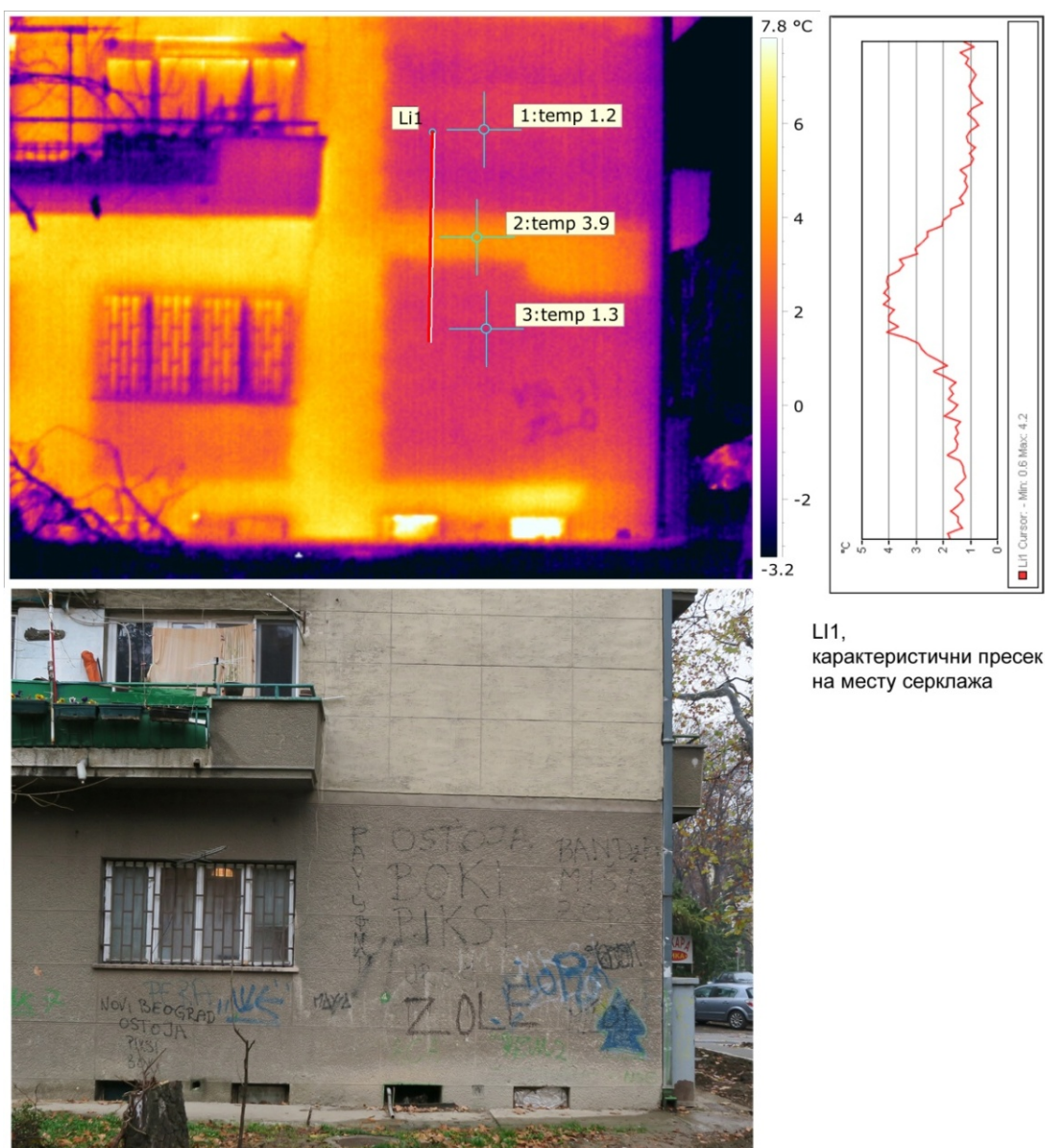
V.4.Измерене вредности параметара енергетских перформанси

Мерење температурних вредности дуж карактеристичног правца фасадног склопа је извршено дуж назначеног правца који кореспондира симулираном пресеку. Термограми за анализу су, у складу са могућностима расположивим на терену, снимљени према према препорукама за овај тип испитивања.

Резултати мерења су приказани за сваки анализирани фасадни склоп:

- **Фасадни склоп ФС1:**

Приказ карактеристичног термограма фасадног склопа дат је на слици V-17:



Li1,
карактеристични пресек
на месту серклажа

Слика V-17 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС1, са назначеним контролним правцем и профилем температуре дуж њега

Услови релевантни за снимање су дати у табели V-8:

Табела V-8 вредности параметара важећих у тренутку снимања - ФС1

Параметар	T_{out} [°C] Температура ваздуха споља	T_{int} [°C] Температура ваздуха унутра	T_{refl} [°C] Рефлектована температура	% Влажност ваздуха	d [m] удаљење
вредност	0	20	4	54	20

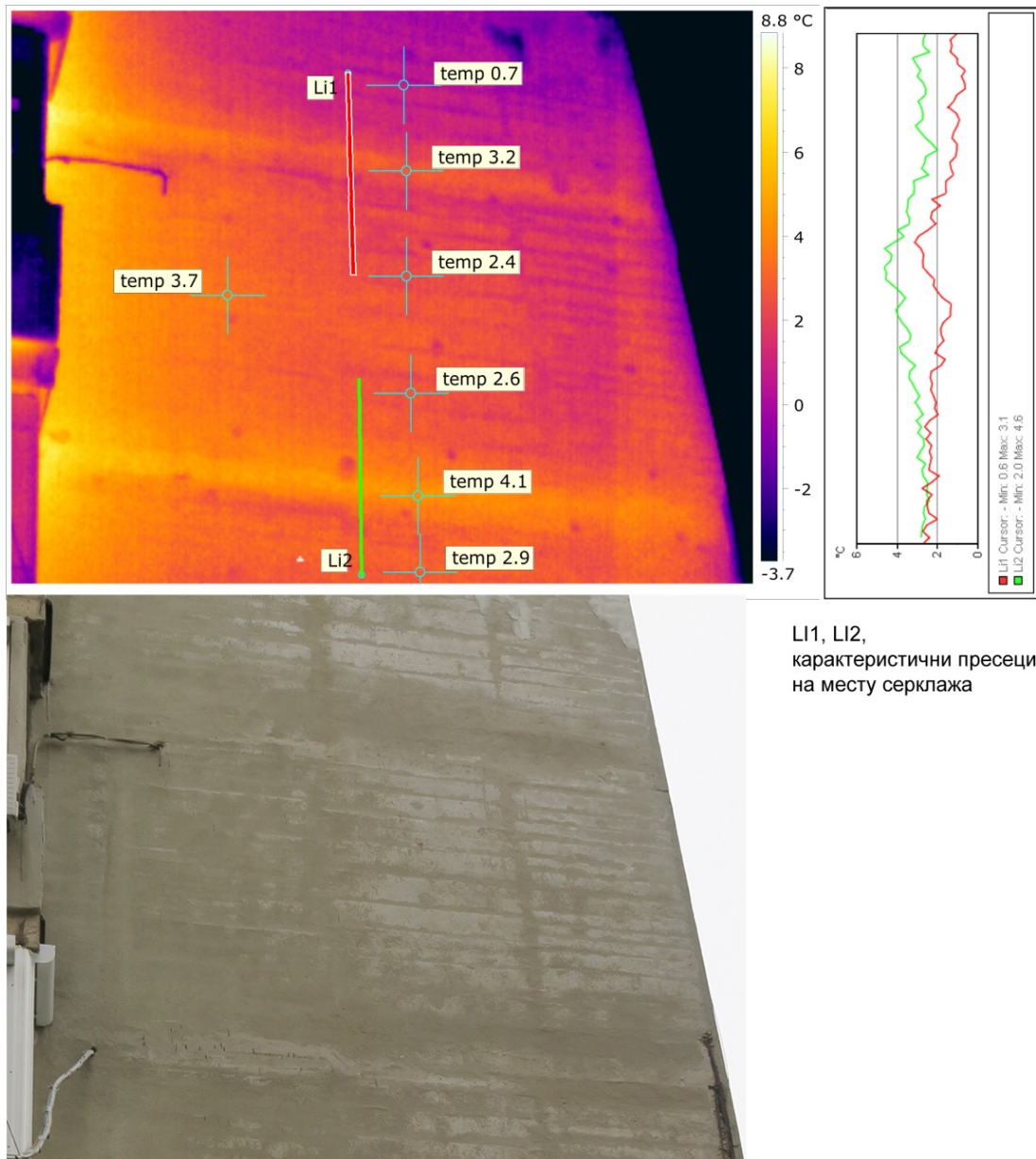
На слици V-17 можемо видети типичан термограм фасадних склопова, реализованих као масивне зидане конструкције, без термоизолационог слоја у свом саставу. На конкретном примеру склоп се одликује већом дебљином зида (пуна опека 38cm), карактеристичном за период градње, и применом армирано - бетонског серклажа на месту споја са међуспратном конструкцијом.

Посматрани фасадни сегмент се одликује униформном дистрибуцијом температурних вредности у зони зиданих делова склопа, и израженим повишењем очитаних вредности на свим позицијама линијских топлотних мостова, како хоризонталних тако и вертикалних.

Термограм нам, такође, илуструје и појаву приметног димензионалног варирања армирано бетонских елемената, јасно уочљивих као зоне изразито виших температурних вредности. Приликом проучавања расположиве пројектне документације овакве појаве није могуће адекватно идентификовати и антиципирати касније у процесу симулације, те је примена термовизијског снимања једина метода која нам открива њихово постојање.

- **Фасадни склоп ФС2:**

Приказ карактеристичног термограма фасадног склопа дат је на слици V-18:



Слика V-18 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС2, са назначеним контролним правцима и профилима температура дуж њих

Услови релевантни за снимање су дати у табели V-9:

Табела V-9 вредности параметара важећих у тренутку снимања –ФС2

Параметар	<i>T_{out}</i> [°C] Температура ваздуха споља	<i>T_{int}</i> [°C] Температура ваздуха унутра	<i>T_{refl}</i> [°C] Рефлектована температура	% Влажност ваздуха	d [m] удаљење
вредност	3	20	-10	80	20

На слици V-18 можемо видети термограм фасадног склопа састављеног од армираног бетонског фасадног платна и међусpratне конструкције, такође реализоване од армираног бетона. Конкретан пример је изведен са слојем термоизолације постављеним са унутрашње стране.

Основне одлике оваквог решења се огледају у релативно хомогеним карактеристикама зидова, са приметно повећаним губицима топлоте на месту линијског топлотног моста.

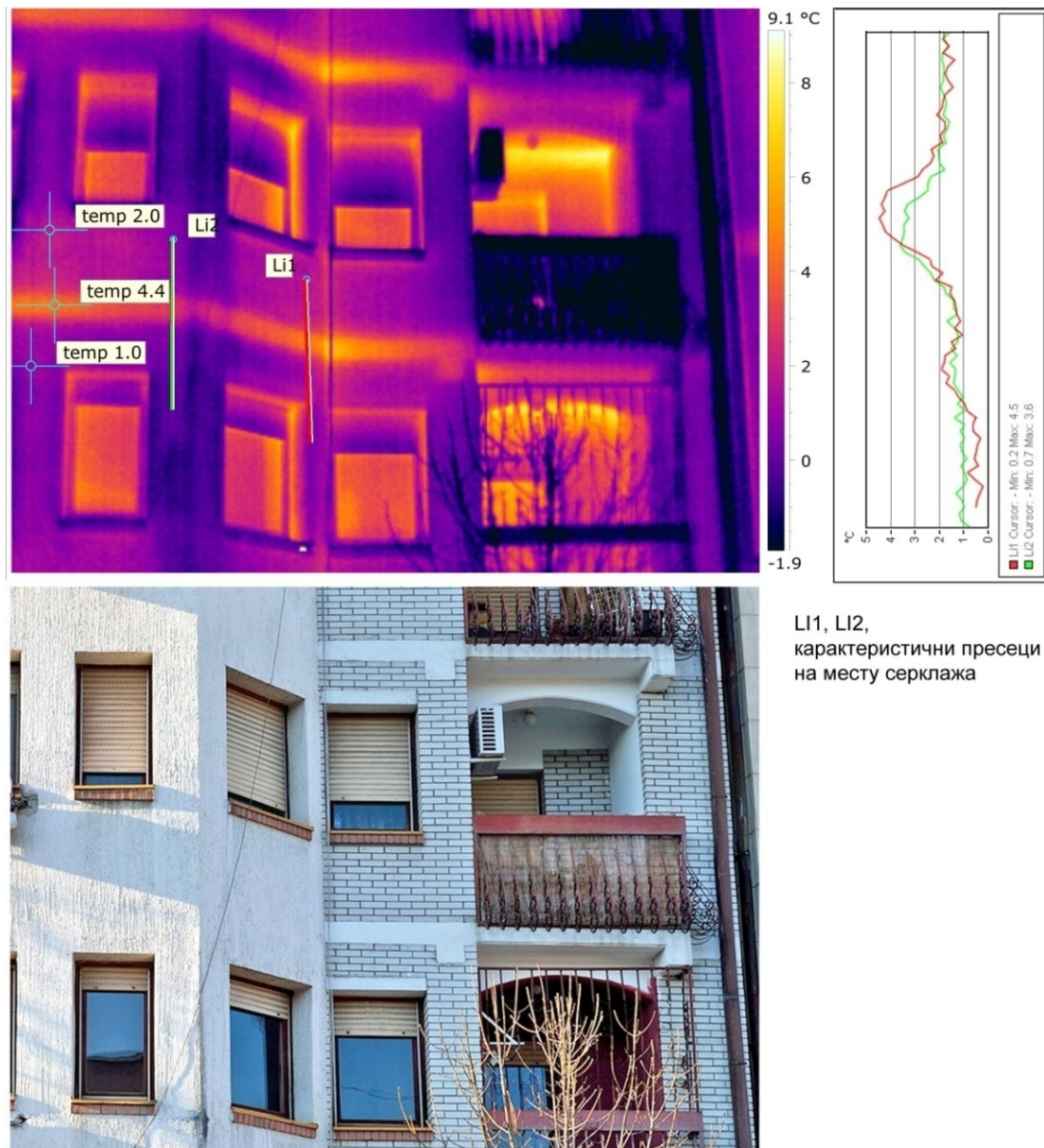
На приказаном термограму осим реалних перформанси зидова које се исказују кроз карактеристичну дистрибуцију температурних читавања за овај тип конструкције, можемо уочити проблеме који се јављају приликом анализе перформанси високих објеката. С обзиром да не можемо приступити снимању у позицији у којој се фасадни склоп „види“ под већим углом (нормално на површину) већ се оно врши са земље, јавља се значајнији утицај рефлектованог зрачења небеске сфере које, за резултат, има приметно ниже вредности температурних читавања. Појава је израженија у горњој зони термограма где су и рефлексије веће. Истовремено, на конкретном примеру се види утицај рефлексија од делова самог објекта, у овом случају, еркера са леве стране.

За потребе истраживања енергетских перформанси можемо претпоставити да је састав зида прилично уједначен (што се и види на снимку) а да различитости у температурним читавањима постоје као последица особености примењеног решења.

У циљу адекватног поређења резултата маркирана су два карактеристична положаја склопа. На графикону у оквиру слике V-18 видимо да су тенденције читавања температура сличне, а да се разликују само нумеричке вредности, што је резултат описаних утицајних фактора окружења односно саме геометрије зграде.

Фасадни склоп ФС3:

Приказ карактеристичног термограма фасадног склопа дат је на слици V-19:



Слика V-19 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС3, са назначеним контролним правцима и профилима температура дуж њих

Услови релевантни за снимање су дати у табели V-10:

Табела V-10 вредности параметара важећих у тренутку снимања –ФСЗ

Параметар	T_{out} [°C] Температура ваздуха споља	T_{int} [°C] Температура ваздуха унутра	T_{refl} [°C] Рефлектована температура	% Влажност ваздуха	d [m] удаљење
вредност	2	21	15	45	15

На слици V-19 можемо видети термограм фасадног склопа који се састоји од масивног „сендвич“ зида са термоизолационим слојем постављеним у средини и међуспратне, полупрефабриковане, конструкције завршене континуалним серклажем.

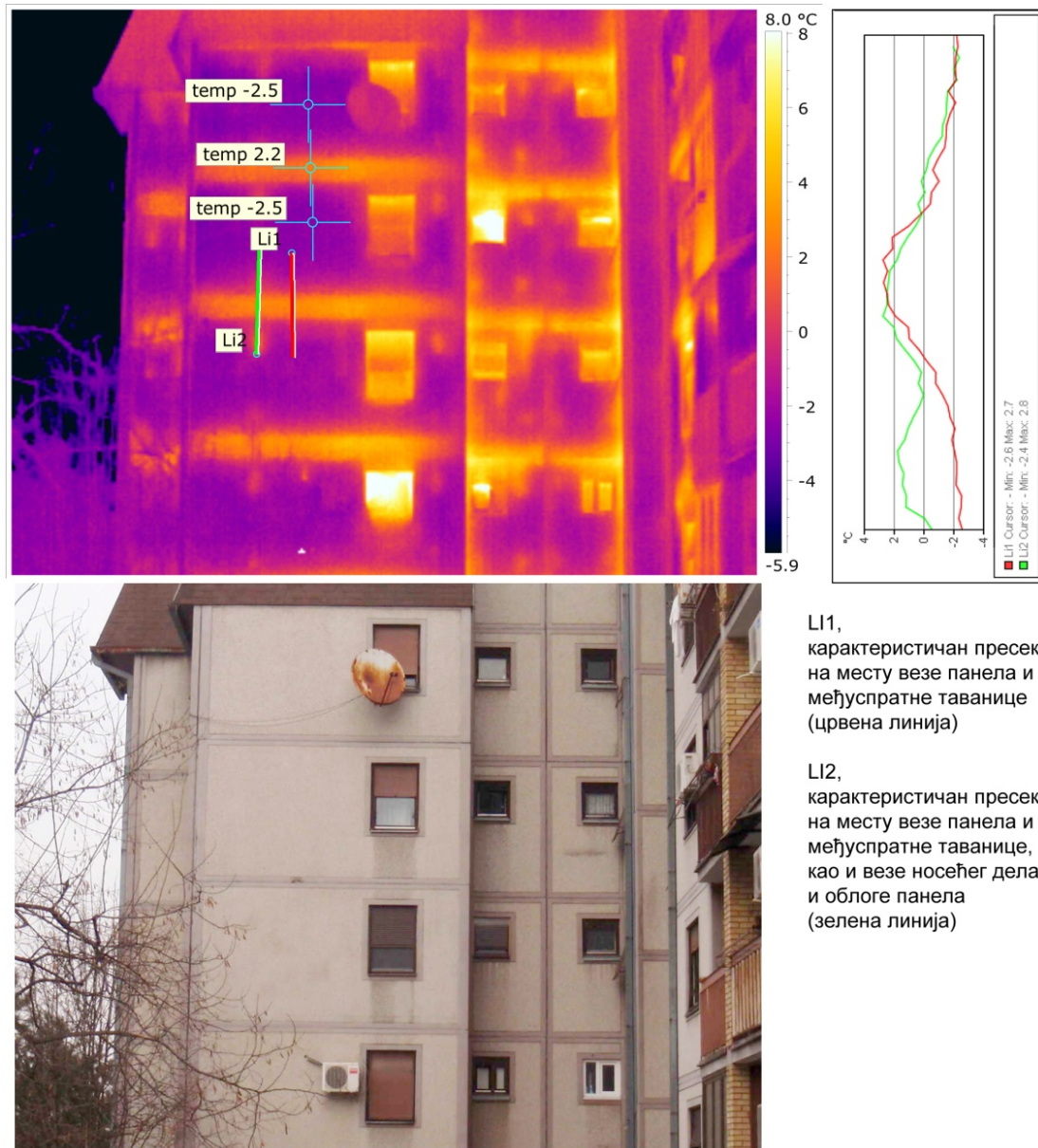
Приказани склоп представља релативно често решење споја фасадног зида и међуспратне конструкције, које се са термичког аспекта карактерише прекидом термоизолационог слоја на месту серклажа, који пролази кроз целокупан пресек фасадног зида. На конкретном објекту можемо приметити да су и армиранобетонске греде управне на фасадни зид такође „прошле“ кроз целокупан склоп, појачавајући утицај топлотних мостова.

На термограму се јасно уочавају изразити губици топлоте на свим местима континуалних хоризонталних серклажа, док се остатак фасадног зида може окарактерисати као површина релативно хомогеног састава, без значајнијих варијација температуре.

Приметна повећања у читавању температурних вредности која се уочавају на местима где долази до промене облика фасадне равни нису нужно последица лошијих перформанси, већ могу бити резултат варијације количине зрачења. која настаје услед геометријских карактеристика омотача.

- **Фасадни склоп ФС4:**

Приказ карактеристичног термограма фасадног склопа дат је на слици V-20:



Слика V-20 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС4, са назначеним контролним правцима и профилима температура дуж њих

Услови релевантни за снимање су дати у табели V-11.

Табела V-11 вредности параметара важећих у тренутку снимања –ФС4

Параметар	T_{out} [°C] Температура ваздуха споља	T_{int} [°C] Температура ваздуха унутра	T_{refl} [°C] Рефлектована температура	% Влажност ваздуха	d [m] удаљење
вредност	-2	22	7	60	20

На слици V-20 можемо видети термограм сегмента фасадног омотача префабрикованог крупнопанелног система са зидовима типа „сендвич“ конструкције израђеним од армираног бетона и термоизолационим слојем између њих. Међуспратна конструкција, која формира карактеристични склоп, је такође армирано бетонска, префабрикована. Приказани пример потиче из последњег периода коришћења префабрикације у станоградњи, те би било за очекивати да су губици топлоте, у односу на раније системе, нарочито у детаљима веза, минимизирани.

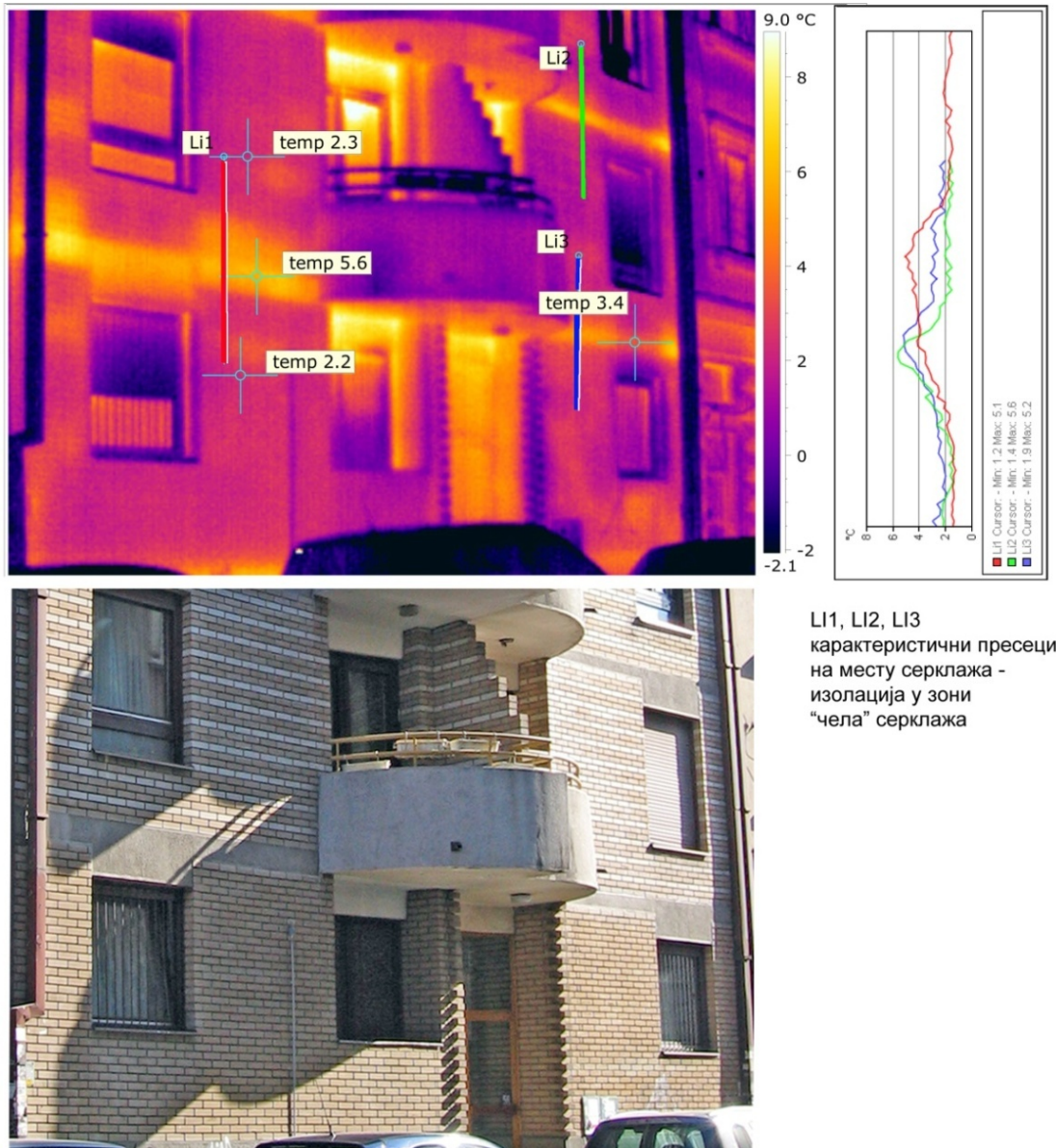
Теморграм склопа нам јасно илуструје типичне перформансе префабрикованих фасадних система, код којих се јављају приметни линијски и тачкасти топлотни мостови, најчешће настали као последица грешака у току производње или оштећењем у процесу монтаже на градилишту.

Пројектом је дефинисан одговарајући третман линијских топлотних мостова са термичким прекидом на месту спајања слојева панела и међуспратне конструкције. На анализираном примеру, услед изразито високих температурих читавања на термограму, можемо закључити да склоп није реализован у складу са пројектом. Измерене варијације температуре, дуж карактеристичног правца L11, од готово 5°C нас упућују на постојање занчајног линијског топлотног моста, односно, вероватног одсуства термоизолације.

Осим линијских топлотних мостова на местима хоризонталног спајања панела и конструкције, могу се уочити и тачкасти мостови настали као последица везе која постоји између спољашњег и унутрашњег дела панела, а које се јасно читавају дуж правца L2.

- Фасадни склоп ФС5:

Приказ карактеристичног термограма фасадног склопа дат је на слици V-21:



Слика V-21 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС5, са назначеним контролним правцима и профилима температура дуж њих

Услови релевантни за снимање су дати у табели V-12:

Табела V-12 вредности параметара важећих у тренутку снимања –ФС5

Параметар	T_{out} [°C] Температура ваздуха споља	T_{int} [°C] Температура ваздуха унутра	T_{refl} [°C] Рефлектована температура	% Влажност ваздуха	d [m] удаљење
вредност	1	20	3	80	15

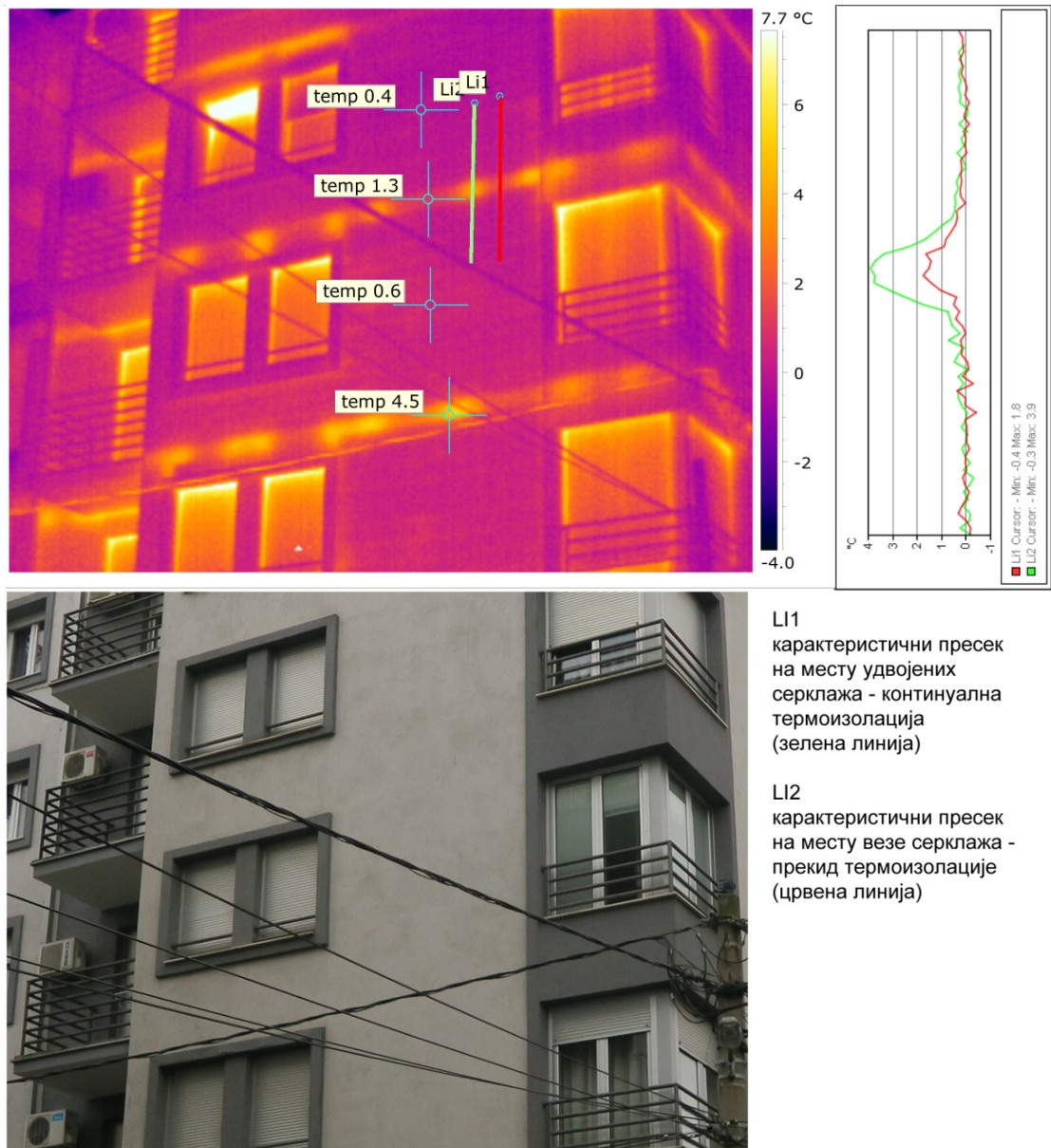
На слици V-21 можемо видети термограм фасадног склопа састављеног од масивног „сендвич“ зида са слојем термоизолације постављеним у средини и међуспратне конструкције са серклагом који је изолован са предње стране.

Приказано решење би, у теорији, требало да се одликује значајно побољшаним термичким карактеристикама на месту линијског топлотног моста, нарочито у односу на раније приказани фасадни склоп сличног састава ФС3. На анализираном примеру видимо да нема битних побољшања у перформансама склопа, те да се и овде јављају приметни губици топлоте на местима хоризонталних серклажа.

Анализирани фасадни склоп се такође карактерише и значајним варијацијама температурних очитавња на местима назначених пресека што указује на нехомогеност фасадног склопа и приметна одступања између пројектованих и реализованих карактеристика. Најприметнија одступања се јављају у зони серклажа L11, са леве стране термограма уз значајно повећање зоне интензивних топлотних губитака што нас упућује на неконзистентност процеса извођења.

- Фасадни склоп ФС6:

Приказ карактеристичног термограма фасадног склопа дат је на слици V-22:



Слика V-22 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС6, са назначеним контролним правцима и профилима температура дуж њих

Услови релевантни за снимање су дати у табели V-13.

Табела V-13 вредности параметара важећих у тренутку снимања –ФС6

Параметар	T_{out} [°C] Температура ваздуха споља	T_{int} [°C] Температура ваздуха унутра	T_{refl} [°C] Рефлектована температура	% Влажност ваздуха	d [m] удаљење
вредност	0	20	-6	60	10

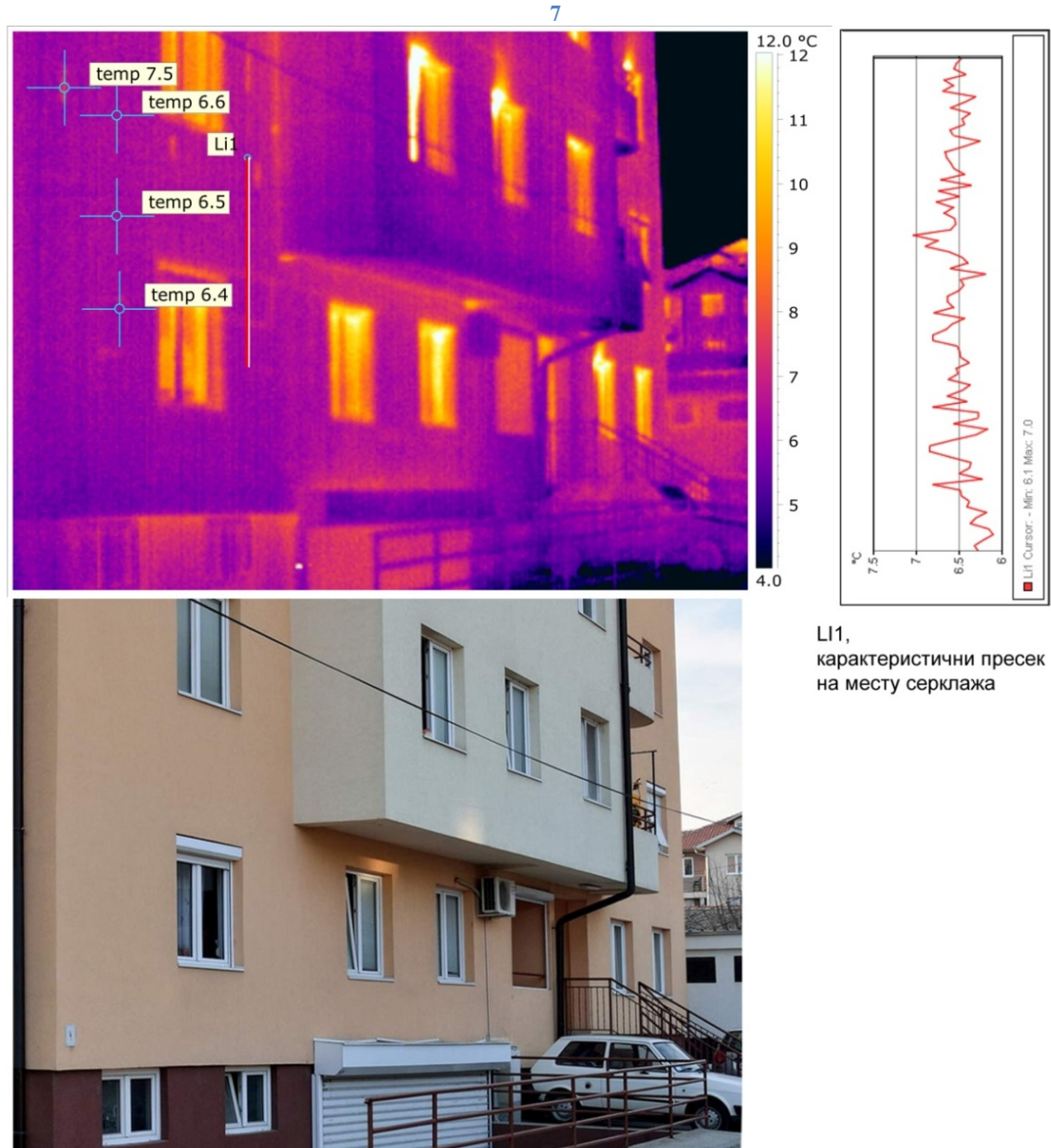
На слици V-22 можемо видети термограм фасадног склопа масивног „сендвич“ зида са слојем термоизолације постављеним у средини и армиранобетонске међуспратне конструкције са удвојеним хоризонталним серклажом.

Приказано решење, са раздвајањем серклажа на два дела и тачкастом везом између њих, је пројектовано у складу са прописима који су узимали у обзир прорачун свих линијских топлотних мостова, приликом одређивања перформанси зграда. Фасадни склоп је представљао најбоље решење топлотних мостова примењивано у пракси. Целокупан фасадни склоп се одликује приметно смањеним губицима топлоте, у односу на претходне начине решавања карактеристичног споја фасадног зида и међуспратне таванице.

Истовремено, на анализираном примеру, се поново може видети значај који процес извођења има на перформансе омотача. Поједини сегменти су реализовани према пројекту и карактеришу се препознатљивом сликом тачкастих топлотних мостова док је на другим деловима фасаде дошло до приметног одступања и појаве континуираног линијског топлотног моста.

- **Фасадни склоп ФС7:**

Приказ карактеристичног термограма фасадног склопа дат је на слици V-23:



Слика V-23 Термограм и визуелни приказ карактеристичног сегмента фасадног омотача ФС7, са назначеним контролним правцем и профилем температуре дуж њега

Услови релевантни за снимање су дати у табели V-14.

Табела V-14 вредности параметара важећих у тренутку снимања –ФС7

Параметар	T_{out} [°C] Температура ваздуха споља	T_{int} [°C] Температура ваздуха унутра	T_{refl} [°C] Рефлектована температура	% Влажност ваздуха	d [m] удаљење
вредност	6	21	15	60	10

На слици V-23 можемо видети термограм фасадног склопа масивног зида са слојем термоизолације постављеним са спољашње стране и полупрефабриковане међусpratне конструкције са испуном од опекарских блокова типа „ферт“. Секлаж на споју таванице и фасадног зида је реализован као континуирани у целој ширини зида.

На термограму анализираног фасадног склопа можемо видети изузетно хомогене перформансе са незнатним одступањима на местима серклажа. На појединим местима је могуће уочити мање линијске топлотне мостове настале као последица лоше реализације термоизолационог слоја односно појаве лошег спајања појединачних изолационих табли.

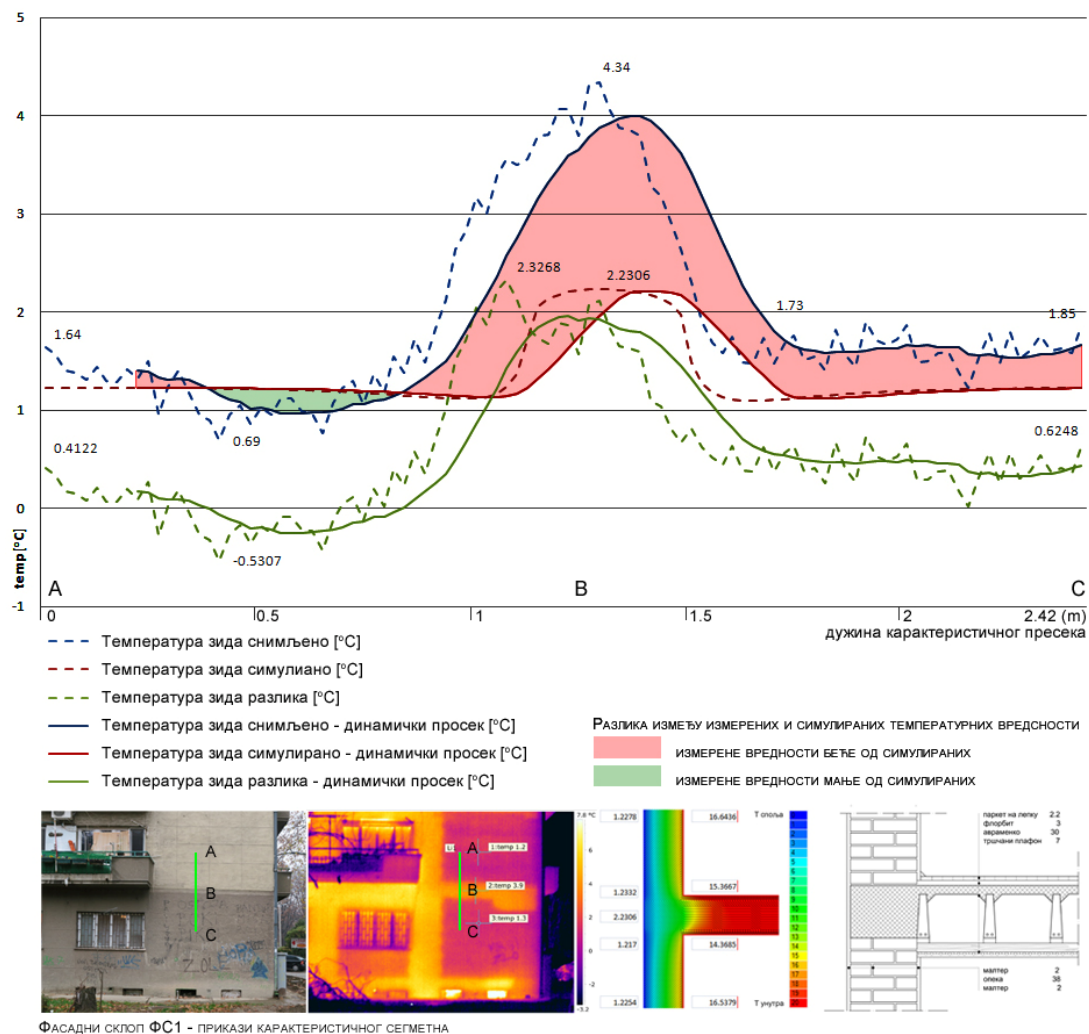
V.5.Компаративна анализа моделираних и дијагностификованих вредности

Компаративни приказ симулационих и снимљених (измерених) вредности карактеристичних склопова установљен је са циљем дефинисања могућег принципа квантификације резултата односно одређивања степена грешке за реалне случајеве конструктивних склопова који су реализовани према различитим термичким прописима важећим у тренутку зидања а значајно другачијим од актуелних.

Резултати анализе су приказани за карактеристичне случајеве:

- **Фасадни склоп ФС1:**

Синтезни преглед вредности за карактеристичан сегмент фасадног зида приказан је на слици V-24.



Слика V-24 ФС1 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека

Фасадни склоп ФС1 се карактерише различитим температурним читавањима у односу на моделоване које се испољавају у виду већих измерених вредности – већих губитака (разлика назначена црвеном бојом) односно мањих измерених вредности – бољих перформанси од симулираних (назначено зеленом бојом).

У целости гледано дуж карактеристичног пресека можемо установити температурну разлику од просечних $+0,66\text{ }^{\circ}\text{C}$, што је релативно мало одступање и за савремене камере једва да прелази границу грешке снимања. Међутим дистрибуција девијација није хомогена и разликују се поједини сегменти:

- на делу изнад међуспратне конструкције губици су мањи (чак и испод очекиваних) са температурном разликом од максималних $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ односно просечних $0,22\text{ }^{\circ}\text{C}$

- на делу испод међуспратне конструкције губици су већи са разликом од максималних $0,72^{\circ}\text{C}$ односно просечних $+0,42^{\circ}\text{C}$ и
- на месту линијског топлотног моста су веома изражени топлотни губици, са измереном температурном разликом од макс. $2,32^{\circ}\text{C}$ односно просечно $1,62^{\circ}\text{C}$.

Укупни проценат анализираног пресека чија су одступања већа од 1°C односно $0,5^{\circ}\text{C}$, који можемо узети за релевантну вредност с обзиром на примењену опрему и прецизност прорачуна, износи 21% односно 41. 6%.

Граница од 1°C је узета услед маргине грешке опреме док је вредност од 0.5°C узета као релевантна за квантитативна испитивања према истраживањима публикованим у литератури. (Van De Vijver et al. 2014)

На основу наведених података и температурних трендова можемо закључити да су перформансе фасадног склопа у границама очекиваних у пољу зида, ван утицаја линијских топлотних мостова са просечном температурном девијацијом од $0,29^{\circ}\text{C}$. Међутим у зони топлотног моста девијација се повећава на просечних 1.62°C што превазилази граничне вредности те се перформансе могу охарактерисати као неодговарајуће.

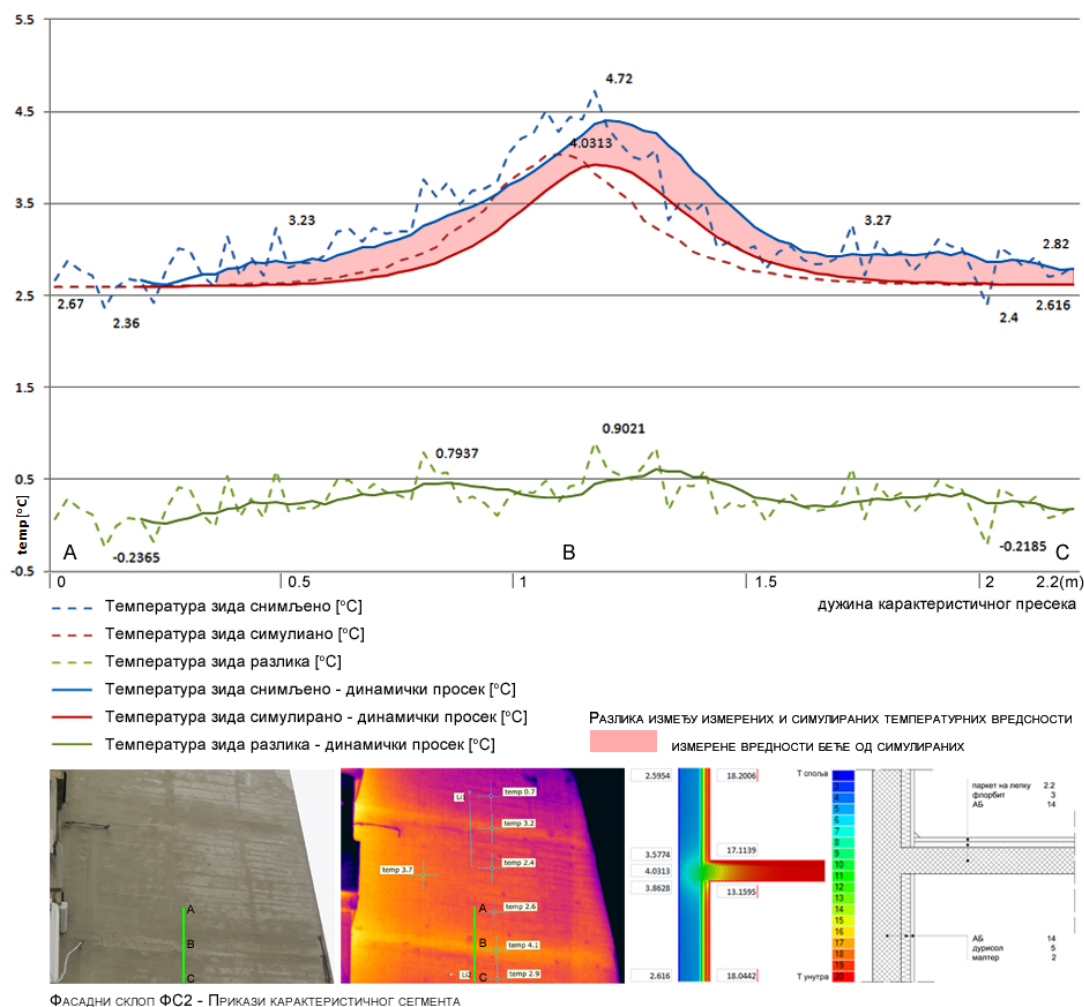
Одступање температурних вредности прерачунато на јединичну површину фасадног склопа (спратна висина, ширина узорка од 1m) износи 17,89% (за $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$) односно 34.15% (за $\Delta T=0,5^{\circ}\text{C}$) што представља изузетно велику вредност те се може закључити да је приликом конструкције анализираног склопа дошло до значајнијих одступања од пројектованих карактеристика. Одступања се могу јавити као последица примењеног квалитета материјала односно конструктивног решења споја фасадног зида са међуспратном конструкцијом. Даље истраживање је неопходно да би се установила природа неодговарајућих перформанси а могући узроци су: лоше реализован спој међуспратне конструкције (ситноребрасте таванице) са фасадним зидом где се јавља већи армирано бетонски серклаж од пројектованог односно слојеви плафонске конструкције (пројектовани тршчани плафон) који нису у складу са пројектованим квалитетом те доводе до изразитијих топлотних губитака.

Приказани компаративни метод је илустрован на карактеристичном пресеку те уколико желимо да установимо квалитет перформанси целокупног омотача

неопходно је извршити детаљна снимања односно симулације свих осталих карактеристичних склопова. На посматраном примеру се већ на основу прелиминарне анализе која је на нивоу феноменолошког испитивања једног детаља може рећи да зграда није реализована у складу са стандардом који је дефинисан пројектном документацијом.

- **Фасадни склоп ФС2:**

Синтезни преглед вредности за карактеристичан сегмент фасадног зида приказан је на слици V-25.



Слика V-25 ФС2 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека

Приликом одабирања карактеристичног пресека услед услова у којима је вршено снимање од већег броја могућих пресека за анализу, а који се због утицаја рефлексија небеске сфере међусобно разликују по вредностима у оквиру сличног

шаблона дистрибуције (што је раније објашњено), одабран је онај који је најусаглашенији са моделираним вредностима. На основу нумеричких података добијених из овог пресека можемо закључити да се фасадни склоп ФС2 карактерише незнатно различитим температурним читавањима у односу на моделоване које се углавном испољавају у виду већих измерених вредности – већих губитака (разлика назначена црвеном бојом).

У целости гледано дуж карактеристичног пресека можемо установити температурну разлику од просечних $+0,31^{\circ}\text{C}$, што је релативно мало одступање и за савремене камере не прелази границу грешке снимања. Дистрибуција девијација је веома хомогена са температурном разликом од максималних $0,9^{\circ}\text{C}$ при чему на пресеку не постоје зоне са одступањима већим од 1°C а свега 14.46% пресека се карактерише девијацијом већом од $0,5^{\circ}\text{C}$.

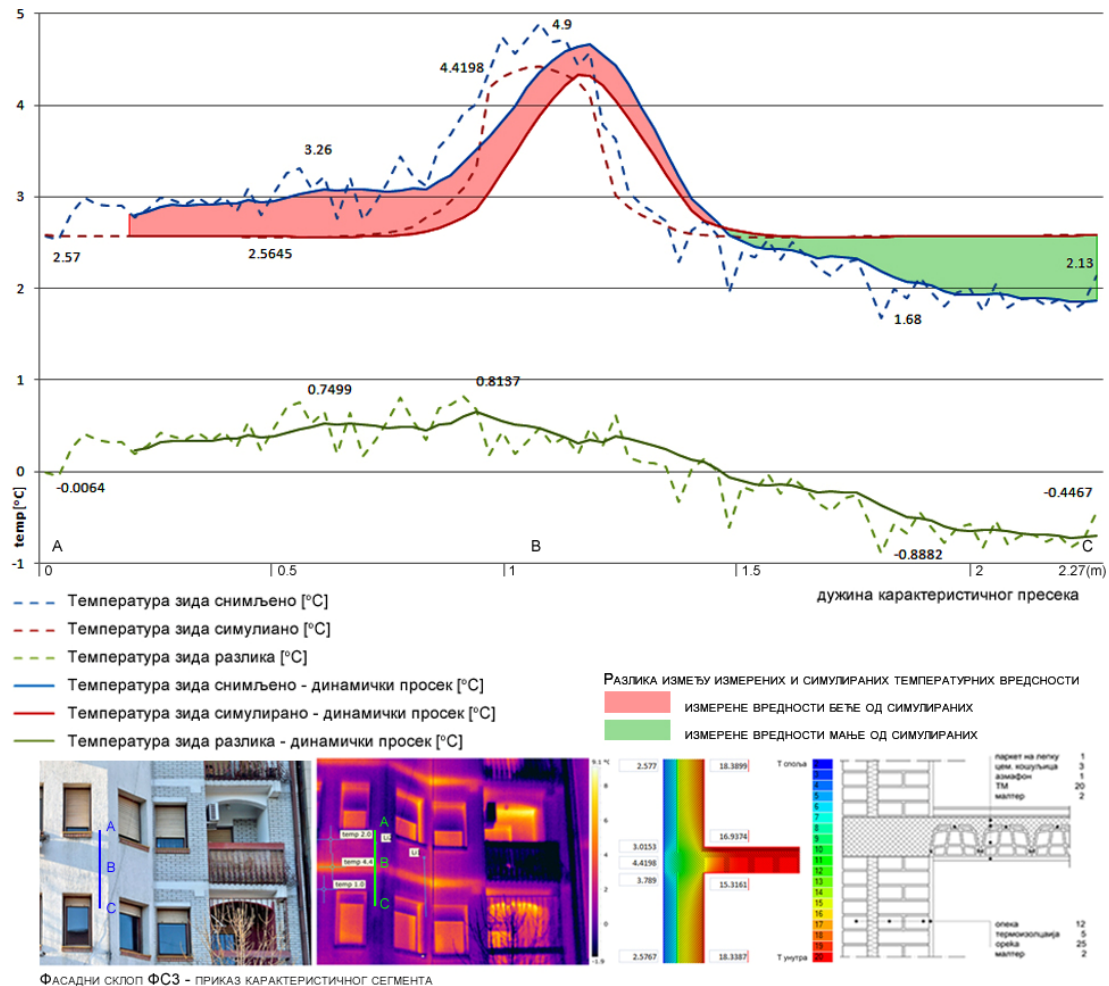
На основу наведених података и температурних трендова можемо закључити да су перформансе фасадног склопа у границама пројектованих вредности у целости за тип анализираног фасадног склопа. Другим речима моделирани трендови се у потпуности потврђују у реализованом стању укључујући и перформансе на месту линијског топлотног моста.

Одступање температурних вредности прерачунато на јединичну површину фасадног склопа (спратна висина, ширина узорка од 1m) износи 11,89% (за $\Delta T=0,5^{\circ}\text{C}$) што представља вредност која је веома задовољавајућа те се може закључити да је приликом зидања склопа он изведен у потпуности у складу са претпостављеним квалитетом материјала и пројектованог архитектонског детаља.

Иако се фасадни омотач карактерише перформансама које, са становишта савремених прописа, не задовољавају стандарде из области термичке заштите применом метода дефинисаног у тези можемо потврдити да је квалитет реализоване зграде у складу са, за доба пројектовања, важећим прописима тј. да се не уочавају приметни дефекти. Наравно, за потребе истраживања је вршена анализа једног сегмента омотача и то само једног типа везе, те је за доношење валидног суда о целокупном стању омотача неопходно извршити детаљнија снимања и провере свих, по типу различитих сегмената и склопова и извршити квантификацију према укупној површини омотача.

- **Фасадни склоп ФС3:**

Синтезни преглед вредности за карактеристичан сегмент фасадног зида приказан је на слици V-26.



Слика V-26 ФС3 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека

Фасадни склоп ФС3 се карактерише различитим температурним читавањима у односу на моделоване које се, испољавају на два начина: као зона већих губитака (изнад међуспратне конструкције) и зона мањих губитака (испод међуспратне конструкције) назначених на приказаном графикону црвеном односно зеленом бојом.

У целости гледано дуж карактеристичног пресека можемо установити температурну разлику од просечних $+0,42\text{ }^{\circ}\text{C}$, што је релативно мало одступање које се креће у границама грешке мерења, чак и за савремене термовизијске камере. Иако је просечна девијација између моделованих и измерених вредности

релативно мала њена дистрибуција је нехомогена те разликујемо два основна сегмента:

- на делу изнад међуспратне конструкције са губицима већим од моделованих уз измерену температурну разлику од максималних $0,80^{\circ}\text{C}$ односно просечних $0,31^{\circ}\text{C}$.
- на делу испод међуспратне конструкције са губицима мањим од моделованих и температурном разликом од максималних $0,89^{\circ}\text{C}$ односно просечних $+0,54^{\circ}\text{C}$
- на месту линијског топлотног моста топлотни губици су такође израженији уз температурну разлику од макс. $0,89^{\circ}\text{C}$ односно просечно $0,29^{\circ}\text{C}$.

На целокупном анализираном сегменту нису уочени делови са одступањима већим од 1°C , а док се 39% пресека карактерише одступањима већим од $0,5^{\circ}\text{C}$.

На основу наведених података и температурних трендова можемо закључити да су перформансе фасадног склопа у границама очекиваних дуж целокупног анализираног пресека, додуше са приметним варијацијама температурних читавања.

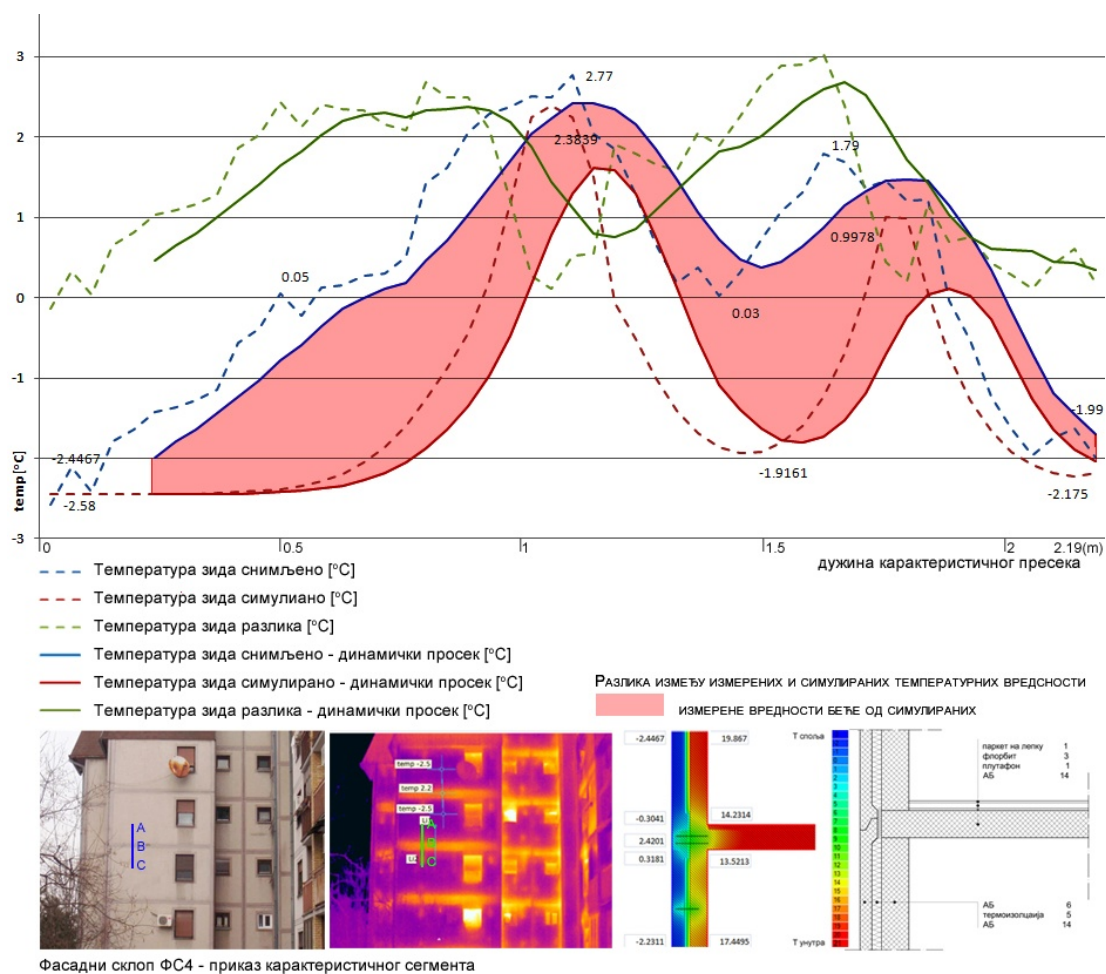
Значај правилног тумачења конкретних услова снимања у овом примеру је веома битан. Снимање фасадног склопа је обављено у вечерњим часовима при облачном небу које је било карактеристично за цео дан. Међутим, током преподневних часова, време је било кишовито са релативно малом количином падавина које је ипак резултовала квашењем финалних слојева фасадног омотача. Шаблон дистрибуције температурних вредности нам указује да су зоне нижих читавања (на угловима еркера и местима где не постоје линијски губици) вероватно и даље под утицајем влажности материјала завршне облоге. За разлику од њих сегменти парпетних зидова иза којих се налазе радијатори, облоге натпрозорних кутија, односно хоризонтални серклажа су места на којима је већи топлотни проток, брже долази до сушења конструкције те су и температурна читавања виша. Стога се ниже температурне вредности које су измерене на појединим деловима фасаде морају узети са дозом резерве, односно пре их можемо приписати влажности фасадне облоге него бољем квалитету фасадног склопа.

Одступање температурних вредности прерачунато на јединичну површину фасадног склопа (спратна висина, ширина узорка од 1m) износи 0% (за $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$) што се може сматрати за добром вредношћу и 38,5% (за $\Delta T=0,5^{\circ}\text{C}$).

У складу са резултатима можемо закључити да конструкција у већој мери задовољава стандарде важеће у доба њеног пројектовања и извођења те да се не јавља неочекивано одступање реализованог у односу на пројектовано стање. У циљу добијања валиднијих резултата за конкретан случај било би неопходно извршити додатна снимања у другачијим временским условима односно искључити ефекат влажења фасадног омотача и потврдити овом приликом презентоване налазе.

• Фасадни склоп ФС4:

Синтезни преглед вредности за карактеристичан сегмент фасадног зида приказан је на слици V-27.



Слика V-27 ФС4 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека

Фасадни склоп ФС4 се карактерише значајно различитим температурним читавањима у односу на моделоване вредности а које се, испољавају кроз приметно повећани ниво губитака назначених на приказаном графикону црвеном бојом.

У целости гледано дуж карактеристичног пресека можемо установити температурну разлику од просечних $+1,45^{\circ}\text{C}$, што је одступање које значајно превазилази границе грешке мерења, чак и за старије моделе термовизијских камера и може се сматрати веома лошом вредношћу. Посматрани пресек се, генерално, карактерише великим одступањима између моделованих и измерених вредности при чему се ова одступања не распростиру равномерно као што је случај код других фасадних склопова (нпр. ФС2), те можемо уочити три карактеристична сегмента:

- део изнад међуспратне конструкције са губицима приметно већим од моделованих уз измерену температурну разлику од максималних $2,43^{\circ}\text{C}$ (непосредно изнад серклажа) односно просечних $1,16^{\circ}\text{C}$.
- део испод међуспратне конструкције, такође са губицима већим од моделованих и температурном разликом од максималних $3,02^{\circ}\text{C}$ односно просечних $+1,26^{\circ}\text{C}$. Појава највећих топлотних губитака на целом пресеку се јавља управо у овом делу и то на месту везе спољашњег и унутрашњег дела панела односно готово целом дужином према међуспратној конструкцији.
- место линијског топлотног моста где су топлотни губици такође израженији уз температурну разлику од макс. $2,68^{\circ}\text{C}$ односно просечно $1,86^{\circ}\text{C}$.

На целокупном анализираном сегменту уочени су делови са одступањима већим од 2°C и то је карактеристика за чак 36% пресека, а док се 62% пресека карактерише одступањима већим од 1°C , а чак 76% одступањима већим од $0,5^{\circ}\text{C}$.

На основу наведених података и температурних трендова можемо закључити да су перформансе фасадног склопа далеко испод пројектованих и то дуж целокупног анализираног пресека. Анализирана фасадна конструкција префабрикованог крупно-панелног склопа се одликује лошим перформансама

највероватније као последица лошег извођења¹. Фасадни панели су пројектовани у складу са прописима уз употребу термоизолације у свом саставу и одговарајуће решеним термичким прекидима уз свођење топлотних мостова на тачкасте. Међутим, приликом процеса производње слој термоизолације је у великом делу панела оштећен а понегде и потпуно изостављен, што је посебно приметно у зонама линијских и тачкастих топлотних мостова тј. на месту споја са међуспратном конструкцијом односно веза између спољашњег и унутрашњег (носећег) дела панела. Због појаве великих одступања између пројектованих и реалних перформанси који резултују лошим условима комфора у самој згради, а који се манифестује кроз појаву буђи и орошавања на зидовима вршено је детаљније истраживање перформанси, мерењем контактним методама. Вршена су мерења топлотног протока тј. топлотног флукса као и одговарајућих температурних вредности ваздуха и површина зидова на укупно 20 тачака. Целокупан поступак је обављен током зимског периода 2014/15 и резултати добијени су потврдили су да се реални коефицијент пролаза топлоте зида значајно разликује од пројектованог, те да се карактерише вредностима у распону од 1,2-2 W/m²K што је два до три пута лошија вредност. Добијени нумерички резултати који описују карактеристике спољашњих зидова у великој мери потврђују уочене недостатке².

Одступање температурних вредности прерачунато на јединичну површину фасадног склопа (спратна висина, ширина узорка од 1m) износи 49,21% (за $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$) односно 60,32% (за $\Delta T=0,5^{\circ}\text{C}$) што представља изузетно велику вредност те се може закључити да је приликом конструкције анализираног склопа дошло до значајнијих одступања од пројектованих карактеристика.

У складу са резултатима можемо закључити да конструкција у већој мери не задовољава стандарде важеће у доба њеног пројектовања и извођења те да се јавља неочекивано одступање реализованог у односу на пројектовано стање. Уочени недостаци су, на основу компарације са другим анализираним објектима применом термовизијског снимања, чести и одсликавају типичне проблеме за

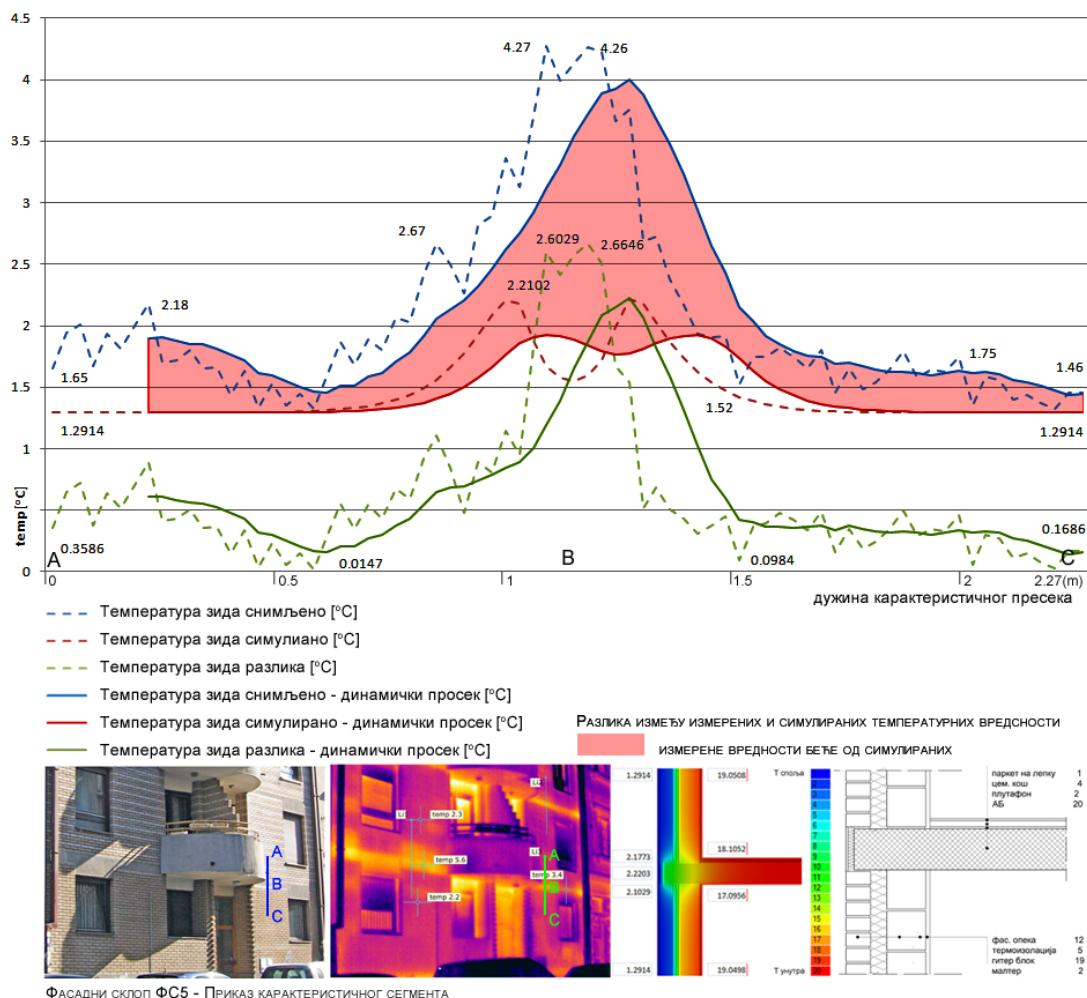
¹ У разговору са станарима од којих су неки били запослени у компанији која је изводила радове на изградњи анализираних зграда ове претпоставке су и усмено потврђене

² Студија испитивања стања фасадног омотача објеката у Дарвиновој улици бр. 25-29, израђена од стране Архитектонског факултета у Београду, Јули 2015.

примењени тип материјализације односно одступања која су настала у процесу извођења.

- **Фасадни склоп ФС5:**

Синтезни преглед вредности за карактеристичан сегмент фасадног зида приказан је на слици V-28.



Слика V-28 ФС5 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека

Фасадни склоп ФС5 се карактерише приметним температурним одступањима у односу на моделоване вредности а које се испољавају, дуж целокупног анализираног пресека, у виду већих измерених вредности – већих топлотних губитака (разлика назначена црвеном бојом).

На целокупном анализираном сегменту пресека можемо установити температурну разлику од просечних $+0,62\text{ }^{\circ}\text{C}$, што се може сматрати задовољавајућим резултатом, у границама грешке снимања. Међутим

дистрибуција девијација није хомогена односно вредности се разликују за поједине сегменте анализираног пресека:

- у делу изнад међуспратне конструкције губици су израженији са температурном разликом од максималних $0,89^{\circ}\text{C}$ односно просечних $0,42^{\circ}\text{C}$,
- у делу испод међуспратне конструкције губици су мањи са температурном разликом од максималних $0,45^{\circ}\text{C}$ односно просечних $+0,29^{\circ}\text{C}$ и
- на месту линијског топлотног моста се јављају најизраженији топлотни разлика од макс. $2,66^{\circ}\text{C}$ односно просечно $1,32^{\circ}\text{C}$.

Укупни проценат анализираног пресека чија су одступања већа од 1°C односно $0,5^{\circ}\text{C}$, износи 13,3% односно 37,3%.

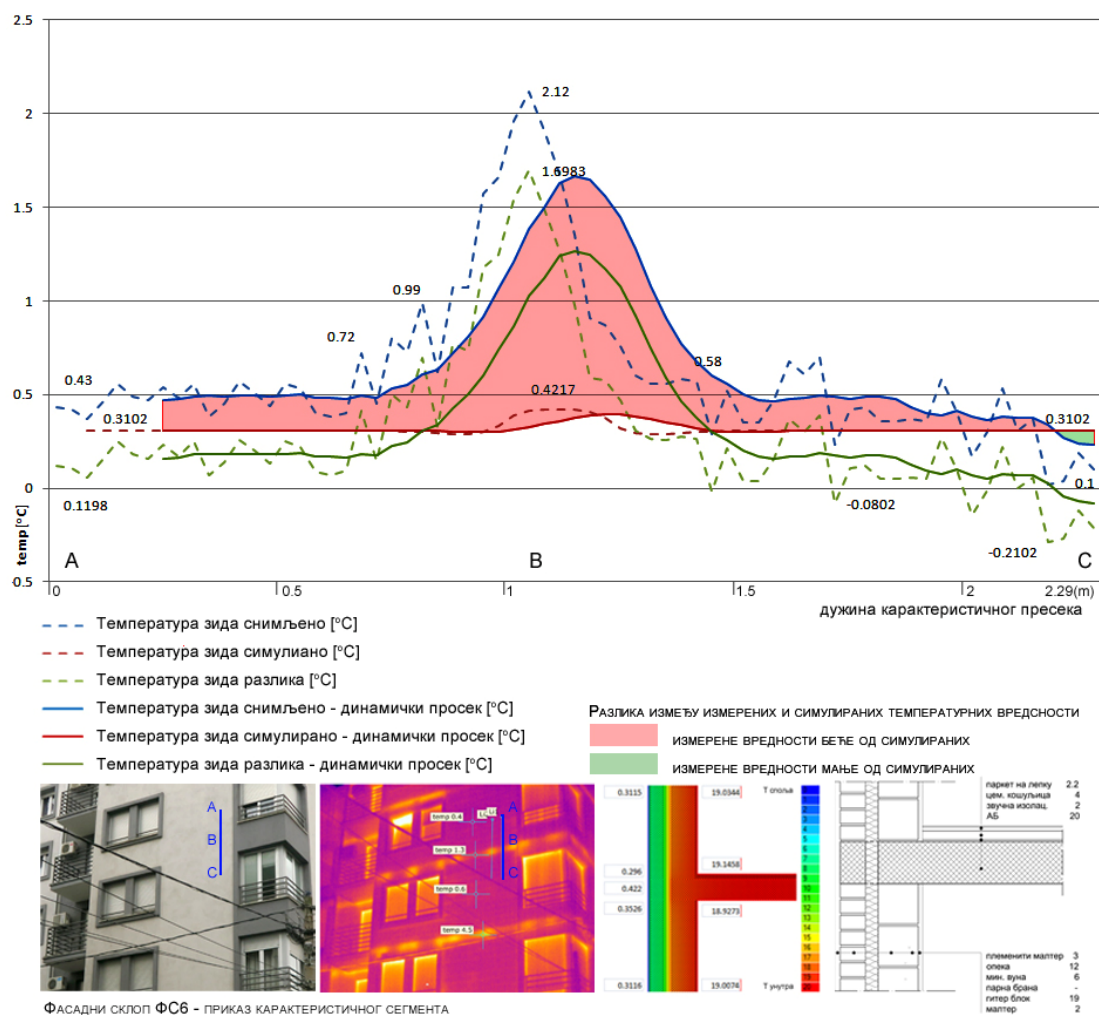
На основу наведених података и температурних трендова можемо закључити да су перформансе фасадног склопа у границама очекиваних у пољу зида, ван утицаја линијских топлотних мостова са просечном температурном девијацијом од $0,35^{\circ}\text{C}$. Међутим у зони топлотног моста девијација се повећава на просечних $1,32^{\circ}\text{C}$ што превазилази граничне вредности те се перформансе могу окарактерисати као неодговарајуће. Нарочито је интересантан тренд расподеле температурних вредности у зони „чела серклажа“ који би требало да је значајније бољих карактеристика услед постојања термоизолационог слоја а што није случај у реалним условима. Разлог за ову појаву се вероватно огледа у изостављању или неодговарајућој дебљини, односно квалитету термоизолационог слоја што захтева додатна проучавања уз примену других истражних метода.

Одступање температурних вредности прерачунато на јединичну површину фасадног склопа (спратна висина, ширина узорка од 1m) износи 10,52% (за $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$) односно 29,47% (за $\Delta T=0,5^{\circ}\text{C}$) што представља велику вредност те се може закључити да је приликом конструкције анализираног склопа дошло до значајнијих одступања од пројектованих карактеристика. Одступања се могу јавити као последица неодговарајућег квалитета материјала али и као последица конструктивног решења споја фасадног зида са међуспратном конструкцијом односно начина решавања одговарајућег архитектонског детаља.

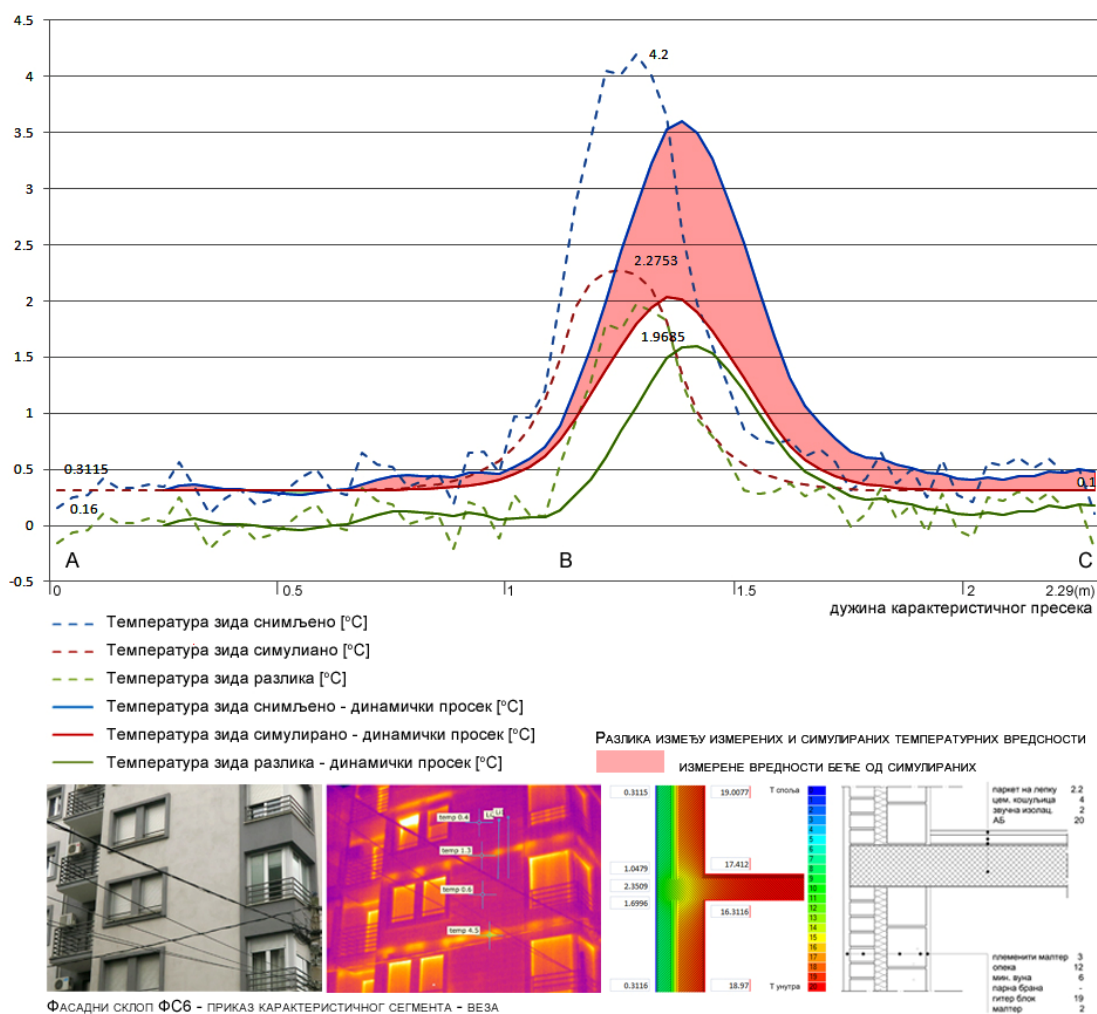
Што се тиче провере перформанси целокупног омотача, презентиран је моделски случај на пресеку који је приметно бољих карактеристика од суседног (правац L11 на левом делу фасаде - приказан на слици V-21) на коме се јавља повећани утицај топлотних губитака у зони линијског термичког моста, те се може закључити да су перформансе омотача нехомогене и разликују се од случаја до случаја. На основу прелиминарне анализе може се рећи да зграда у великом делу свог омотача није реализована у складу са квалитетом дефинисаним пројектом.

- **Фасадни склоп ФС6:**

Синтезни преглед вредности за карактеристичан сегмент фасадног зида приказан је на слици V-29, односно V-30.



Фасадни склоп ФС6 се карактерише различитим температурним читавањима у односу на моделоване које се, испољавају кроз незнатно повећање топлотних губитака у пољу зида и значајно повећање губитака у зони линијског топлотног моста. Стога је потребно посебно разматрати карактеристике на месту где су серклажи удвојени тј. не постоји физички контакт између њих (ФС6а, приказано на слици V-29) и места везе два серклажа (ФС6б, приказано на слици V-30).



Слика V-30 ФС6б - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека на месту тачкастих веза серклажа

На делу пресека који је постављен на месту удвојених серклажа пројектоване перформансе су значајно боље од реализованих са просечним одступањем од 0,34°C, што се може сматрати добром вредношћу.

Иако је просечна девијација између моделованих и измерених вредности релативно мала њена дистрибуција је нехомогена те разликујемо два основна сегмента:

- на делу изнад међуспратне конструкције са губицима незнатно већим од моделованих уз измерену температурну разлику од максималних $0,26^{\circ}\text{C}$ односно просечних $0,17^{\circ}\text{C}$.
- на делу испод међуспратне конструкције губици су такође незнатно већи од моделованих и температурном разликом од максималних $0,39^{\circ}\text{C}$ односно просечних $+015^{\circ}\text{C}$
- на месту линијског топлотног моста топлотни губици су приметно израженији уз температурну разлику од макс. $1,69^{\circ}\text{C}$ односно просечно $0,77^{\circ}\text{C}$, што су вредности које значајно превазилазе пројектоване.

На целокупном анализираном сегменту делови са одступањима већим од 1°C су заступљени са 8,2%, а док се 17,6% пресека карактерише одступањима већим од $0,5^{\circ}\text{C}$.

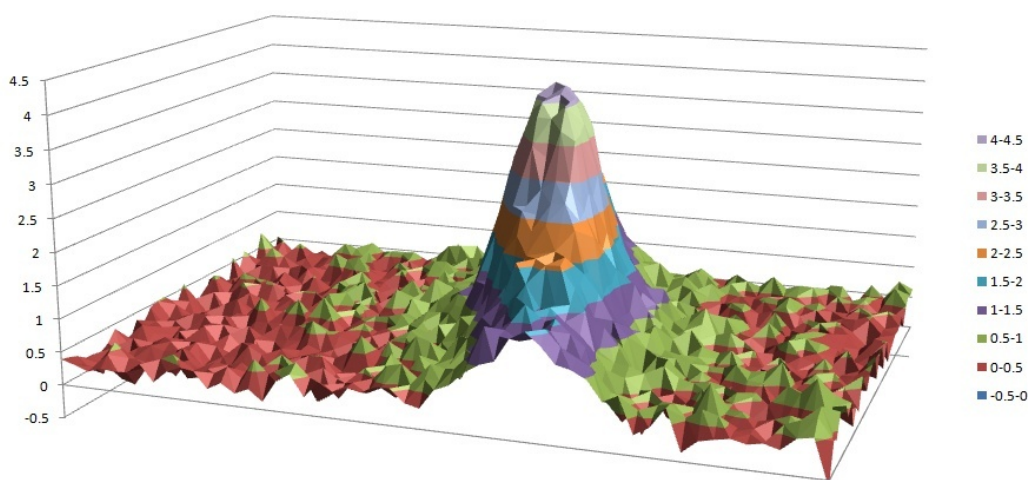
На основу наведених података и температурних трендова можемо закључити да су перформансе фасадног склопа у границама очекиваних дуж већег дела анализираног пресека, али са приметним одступањима перформанси у зони топлотног моста. Можемо претпоставити да симулирано решење архитектонског детаља који се одликује потпуним, тј. физичким раздвајањем серклажа у процесу извођења није реализовано, већ је дошло до значајног смањења термоизолационог слоја на неодговарајућу дебљину која не задовољава прописе.

На делу пресека који је постављен кроз тачкасте везе серклажа пројектоване перформансе су приближније реализованим са просечним одступањем од $0,36^{\circ}\text{C}$, што се може сматрати добром вредношћу.

Одступања су веома усаглашена у зонама изнад и испод међуспратне конструкције са температурном разликом од просечних $0,11^{\circ}\text{C}$ односно $0,22^{\circ}\text{C}$ уз појаву значајнијег одступања у зони топлотног моста од просечних $1,14^{\circ}\text{C}$ и максималних $1,97^{\circ}\text{C}$.

Утицај тачкастих мостова је пројектантским решавањем детаља конструктивне везе серклажа локализован на релативно малу површину пресека и карактерише се другачијим типом дистрибуције температурних вредности. За прецизније одређивање утицаја који тачкасти топлотни мостови имају на укупне перформансе као и процену њихове процентуалне заступљености у укупним губицима који карактеришу термички омотач морали бисмо користити сложенији

симулациони метод, односно принцип тродимензионалног моделовања перформанси фасадног склопа на основу кога је могуће добити површинске или просторне приказе. Комбинован ових приказа са релевантним анализама површинских узорака фасадног склопа и њихових измерених температурних вредности на основу одговарајућих термограма могуће је установити релевантну компарацију. Карактеристичан изглед мерења једног сегмента површине анализираног склопа исказано помоћу одговарајућег тродимензионалног графикона је приказан на слици V-31.



Слика V-31 Приказ измерених температурних вредности карактеристичног површинског сегмента фасадног омотача на месту тачкасте везе серклажа.

У свакодневној пракси можемо вршити и упросечавања вредности које смо измерили односно моделовали за карактеристичне случајеве јер, као што можемо видети на слици V-32, процес извођења у значајној мери дефинише финалне карактеристике, тако да пројектовани тип тачкасте везе, у ствари, постаје континуални линијски мост на већем делу фасаде. Класификација процента недостатака би у том случају захтевала снимање целокупне фасаде и квантификацију површинске заступљености.



Слика V-32 Приказ дела фасаде зграде са приметном разликом у квалитету извођења где се јасно уочавају зоне са удвојеним серклажима изведеним према пројекту (изнад прозора у средишњем делу) у односу на лоше изведене готово континуалне серклаже (изнад прозора на левом делу приказаног сегмента)

- **Фасадни склоп ФС7:**

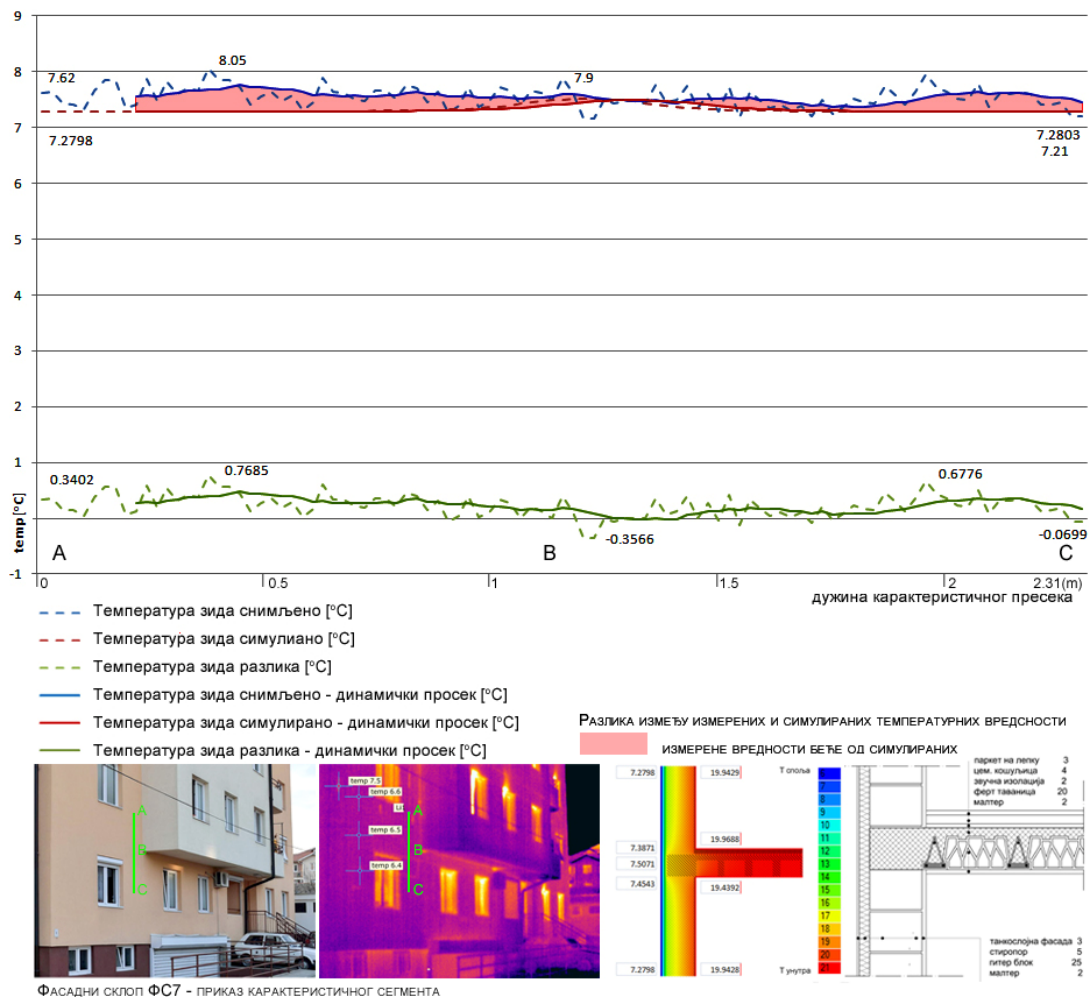
Синтезни преглед вредности за карактеристичан сегмент фасадног зида приказан је на слици V-33.

На основу нумеричких података добијених из карактеристичног пресека можемо закључити да се фасадни склоп ФС7 карактерише незнатно различитим температурним читавањима у односу на моделоване вредности које се углавном испољавају у виду већих измерених вредности – већих губитака (разлика назначена црвеном бојом).

У целости гледано дуж карактеристичног пресека можемо установити температурну разлику од просечних $+0,25^{\circ}\text{C}$, што је релативно мало одступање и за савремене камере не прелази границу грешке снимања. Дистрибуција девијација је веома хомогена са температурном разликом од максималних $0,76^{\circ}\text{C}$ при чему на пресеку не постоје зоне са одступањима већим од 1°C а свега 8,18% пресека се карактерише девијацијом већом од $0,5^{\circ}\text{C}$.

На основу наведених података и температурних трендова можемо закључити да су перформансе фасадног склопа у границама пројектованих вредности у целости за тип анализираног фасадног склопа. Другим речима моделирани

трендови се у потпуности потврђују у реализованом стању укључујући и перформансе на месту линијског топлотног моста који се због природе фасадног склопа типа контактне фасаде уопште и не уочава приликом мерења.



Слика V-33 FC7 - Синтезни преглед температурних вредности дуж карактеристичног пресека

Одступање температурних вредности прерачунато на јединичну површину фасадног склопа (спратна висина, ширина узорка од 1m) износи 6,52% (за $\Delta T=0,5$ °C) што представља вредност која је веома задовољавајућа те се може закључити да је приликом зидања склопа он изведен у потпуности у складу са претпостављеним квалитетом материјала и пројектованог архитектонског детаља.

Анализирани фасадни омотач карактерише перформансама које су незнатно ниже од тренутно важећих стандарда уз хомогену дистрибуцију вредности без приметних варијација што је било и за очекивати с обзиром на примењени тип решења. Уз незнатно повећање изолационог слоја FC7 би у потпуности

задовољио све захтеве савремених прописа, а одсуство линијских топлотних мостова у решавању детаља му даје значајну предност у односу на друга фасадна решења.

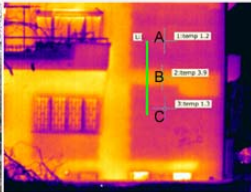
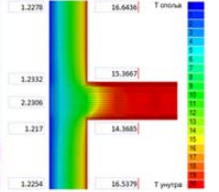
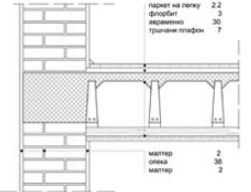
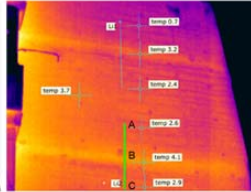
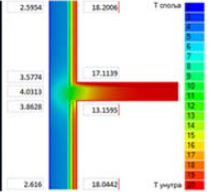
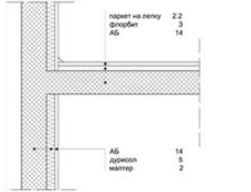
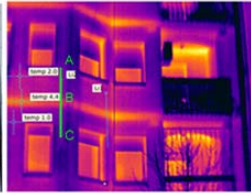
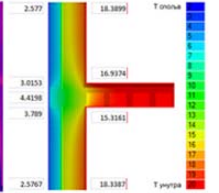
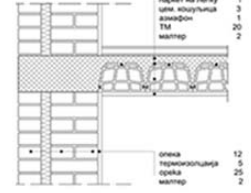
V.6. Дискусија резултата

Примењени метод оцене стања енергетске ефикасности фасадних омотача стамбених зграда је тестиран на узорку од 7 карактеристичних фасадних склопова који су одабрани према критеријуму термичког квалитета, комплексности склопа и начину решавања топлотних мостова.

Формирани метод оцене перформанси је базиран на приступу који узима у обзир специфичности анализираних склопова у реалним условима у смислу климатских параметара и режима коришћења. Применом развијеног метода, базираног на комбинацији два аналитичка алата: нумеричке симулације и термовизијског снимања, могу се вршити релевантна поређења између пројектованих и стварних карактеристика склопова и давати одговарајуће квантитативне оцене квалитета.

Преглед анализираних склопова дат је у табели табели V-15.

Табела V-15 Преглед анализираних склопова

Фасадни склоп	Карактеристике склопа: конвенционална фотографија, термограм, приказ симулираног пресека, скица склопа			
ФС1				
ФС2				
ФС3				

ΦC4				
ΦC5				
ΦC6a				
ΦC6б				
ΦC7				

Синтезни приказ карактеристика анализираних склопова је дату у табели табели V-16.

Табела V-16 Упоредни преглед карактеристика анализираних фасадних склопов са квантификацијом уочених одступања и укупном оценом перформанси

Ознака склопа	Уочене разлике између симулираних и измерених карактеристика	Степен одступања (%) за цео пресек	Оцена перформанси
ΦC1	Нехармонизована дистрибуција температурних вредности ($\Delta T=0,66^{\circ}\text{C}$ просечно за цео пресек); значајна одступања у зони серклажа ($\Delta T=1,62^{\circ}\text{C}$ просечно);	$\Delta T \geq 1^{\circ}\text{C}$ - 21% $\Delta T \geq 0.5^{\circ}\text{C}$ - 41.6%	Посматрани склоп не одговара пројектованим перформансама

ФС2	Харминизована дистрибуција температурних вредности ($\Delta T=0,31^{\circ}\text{C}$ просечно за цео пресек); Без непредвиђених одступања у зони серклажа	$\Delta T \geq 1^{\circ}\text{C}$ - 0% $\Delta T \geq 0.5^{\circ}\text{C}$ - 14,5%	Посматрани склоп одговара пројектованим перформансама
ФС3	Харминизована дистрибуција температурних вредности ($\Delta T=0,42^{\circ}\text{C}$ просечно за цео пресек); Без непредвиђених одступања у зони серклажа	$\Delta T \geq 1^{\circ}\text{C}$ - 0% $\Delta T \geq 0.5^{\circ}\text{C}$ - 39,0%	Посматрани склоп одговара пројектованим перформансама
ФС4	Нехармонизована дистрибуција температурних вредности ($\Delta T=1,45^{\circ}\text{C}$ просечно за цео пресек); значајна одступања у зони серклажа ($\Delta T=1,82^{\circ}\text{C}$ просечно);	$\Delta T \geq 2^{\circ}\text{C}$ - 36,0% $\Delta T \geq 1^{\circ}\text{C}$ - 62,0% $\Delta T \geq 0.5^{\circ}\text{C}$ - 76,0%	Посматрани склоп не одговара пројектованим перформансама
ФС5	Нехармонизована дистрибуција температурних вредности ($\Delta T=0,62^{\circ}\text{C}$ просечно за цео пресек); значајна одступања у зони серклажа ($\Delta T=1,32^{\circ}\text{C}$ просечно);	$\Delta T \geq 1^{\circ}\text{C}$ - 13,3% $\Delta T \geq 0.5^{\circ}\text{C}$ - 37,3%	Посматрани склоп не одговара пројектованим перформансама
ФС6а	Нехармонизована дистрибуција температурних вредности ($\Delta T=0,34^{\circ}\text{C}$ просечно за цео пресек); значајна одступања у зони серклажа ($\Delta T=0,77^{\circ}\text{C}$ просечно)	$\Delta T \geq 1^{\circ}\text{C}$ - 8,2% $\Delta T \geq 0.5^{\circ}\text{C}$ - 17,6%	Посматрани склоп, на делу удвојених серклажа, одговара пројектованим перформансама
ФС6б	Хармонизована дистрибуција температурних вредности ($\Delta T=0,36^{\circ}\text{C}$ просечно за цео пресек); значајна одступања у зони везе серклажа ($\Delta T=1,14^{\circ}\text{C}$ просечно)	$\Delta T \geq 1^{\circ}\text{C}$ - 10,29% $\Delta T \geq 0.5^{\circ}\text{C}$ - 17,65%	Посматрани склоп, на делу везе серклажа, одговара пројектованим перформансама
Напомена: За анализирани склоп је, у циљу добијања одговарајућих квантификативних података, потребно применити поступак тродимензионалноесимулације карактеристика односно површинске анализе.			
ФС7	Харминизована дистрибуција температурних вредности ($\Delta T=0,25^{\circ}\text{C}$ просечно за цео пресек); Без непредвиђених одступања у зони серклажа	$\Delta T \geq 1^{\circ}\text{C}$ - 0% $\Delta T \geq 0.5^{\circ}\text{C}$ - 8,1%	Посматрани склоп одговара пројектованим перформансама

Примењени метод анализе омотача омогућава адекватно сагледавање њихових карактеристика и добијање релевантних резултата. Упоредном анализом добијених резултата можемо закључити следеће:

- Перформансе омотача навише зависе од квалитета процеса иизвођења
- Перфомансе омотача одступају значајније код комплексних решења фасадних склопова
- Перфабриковани системи градње се одликују најизразитијим одступањима иизмеђу пројектованих и реализованих карактеристика
- Системи контактних фасада се карактеришу најхомогенијим карактеристикама без варијација посматрано по целокупној површини омотача.

VI. ЗАКЉУЧАК

Истраживање оцене перформанси омотача стамбених зграда базирано је на анализи грађевинског фонда са аспекта односа елемената материјализације фасадног склопа, њихових енергетских карактеристика и решавања детаља везаних за линијске топлотне мостове.

Проучавањем расположиве грађе, а нарочито обимне базе података формиране током израде „Националне типологије стамбених зграда Србије“, уочена је потреба за дефинисањем одговарајуће класификације појавних облика фасадних склопова прилагођене потребама конкретног истраживања. Подела зграда у оквиру Националне типологије је извршена првенствено у складу са урбанистичким карактеристикама и временским периодима дефинисаним на основу статистички расположивих података, и не одсликава директне релације према енергетским перформансама омотача. Имајући у виду састав фасадног склопа, употребу термоизолације и начин третмана линијских топлотних мостова, а у циљу одабира карактеристичних појавних облика који ће се обрађивати у истраживању, установљена је следећа периодизација:

- Период од 1946-1970. у коме се фасадни склопови доминантно формирају без употребе термоизолације,
- Период од 1970-1987. у коме се у саставу фасадних склопова користи термоизолациони слој, али се не обраћа посебна пажња на питања линијских топлотних мостова, и
- Период 1987-2011. у коме се у саставу фасадних склопова користе веће дебљине термоизолационих материјала и врши детаљни прорачун линијских топлотних мостова.

У оквиру сваког од дефинисаних периода, а на основу извршене анализе фреквентности материјалних решења и начина решавања детаља веза у оквиру фасадног склопа, одабрани су представници периода.

За период 1946-1970 као карактеристични се издвајају:

- ФС1 - масивни зидани фасадни склоп без термоизолације, са ситноребрастом међуспратном таваницом и непрекинутим неизолованим серклагом и

- ФС2 - масивни армиранобетонски склоп са слојем термоизолације постављеним са унутрашње стране и пуном армиранобетонском таваницом.

За период 1970-1987. изабрани су следећи склопови:

- ФС3 – масивни зидани фасадни склоп са термоизолационим слојем у саставу зида и полупрефабрикованом таваницом са неизолованим непрекинутим армиранобетонским серклагом и
- ФС4 – масивни префабриковани фасадни склоп са слојем термоизолације у саставу зида и пребарикованом армиранобетонском таваницом уз пројектовани термопрекид на месту серклажа.

За период 1987-2011 изабрани су следећи склопови:

- ФС5 – масивни зидани фасадни склоп са термоизолационим слојем у саставу зида и армиранобетонском таваницом са непрекинутим серклагом изолованим са спољање стране,
- ФС6 – масивни зидани фасадни склоп са термоизолационим слојем у саставу зида и армиранобетонском таваницом са прекинутим – удвојеним серклагом и слојем термоизолације између, и
- ФС7 – масивни зидани фасадни склоп са слојем термоизолације са спољашње стране и полупрефабрикованом међуспратном таваницом са непрекинутим серклагом.

У циљу утврђивања и квантификације енергетских перформанси одабраних склопова у реалним условима експлоатације, развијен је нови метод оцене, који се базира на употреби термовизијског снимања и нумеричке симулације карактеристичних сегмената омотача.

У циљу дефинисања стручно валидног метода који је једноставан за примену у свакодневној пракси и, истовремено, независан од индивидуалних тумачења, истражене су теоретске основе, принципи и ограничења примене термовизијског снимања омотача зграда, начина прорачуна као и нумеричке симулације енергетских перформанси.

Испитивање је обављено на сегменту фасадног омотача који је представљен кроз карактеристичан детаљ споја фасадног зида и међуспратне конструкције за сваки од одабраних склопова. Установљено је да предмет истраживања представља

репрезентативни моделски случај, те да се анализа целокупног фасадног омотача своди на истраживање перформанси осталих карактеристичних спојева по истом методолошком принципу.

На основу обимног истраживања, закључено је да принцип комбиновања два дијагностичка поступка - термовизијског снимања и нумеричке симулације - пружа адекватну подлогу за формирање валидне методологије која се може адекватно примењивати у пракси.

Сам метод је представљен у виду процедуре која обухвата неколико карактеристичних корака:

- Одабир карактеристичних склопова фасадног омотача за анализу
- Мерење температурних вредности фасадних омотача на терену применом термовизијског снимања
- Идентификација карактеристичних праваца комплементарних методи нумеричке симулације и читавање њихових температурних профила
- Одређивање температурних профила методом нумеричке симулације за климатске услове важеће у тренутку снимања
- Нормализација симулираних према измереним вредностима
- Компарација утврђених карактеристика
- Квантификација добијених резултата у складу са вредностима дефинисаним методом
- Класификација анализираног склопа према добијеним резултатима

Процедура дефинисана методом је тестирана на одабраним фасадним склоповима, снимањем на терену током зимског периода 2013-14. и 2014-15. године и симулацијама карактеристика обављеним по прикупљању пројектне документације, током 2015. године.

Применом описаних поступака извршена је квантификација степена одступања измерених у односу на моделоване перформансе и, на основу добијених вредности, извршена класификација зграда.

У истраживању је оцена енергетских карактеристика вршена на основу резултата анализе одабраног сегмента фасадног склопа у циљу илустрације принципа. За квантификацију целокупног термичког омотача зграде неопходно

истражити и остале карактеристичне сегменте на које је могуће применити развијени метод.

Основни закључци истраживања се могу исказати кроз неколико ставова:

- Принцип испитивања енергетских карактеристика типова фасадних омотача преко анализе репрезентативних склопова се, без обзира на варијације материјалних карактеристика, може адекватно применити у пракси.
- Примена термовизијског снимања у процени стања енергетске ефикасности омотача представља једну од најдиректнијих и најприменљивијих метода за ниво квалитативног испитивања где, уз основно познавање материјално конструктивних карактеристика фасадних омотача и принципа снимања, можемо доћи до прелиминарних закључака о квалитету омотача, односно дијагностиковати зоне које се карактеришу неодоговарјућим перформансама и касније их испитивати другим методама.
- Примена термовизијског снимања у домену квантитативних резултата није директна и захтева је детаљно познавање више стручних области а пре свега:
 - архитектонских конструкција и одговарајућих детаља,
 - основних принципа науке о топлоти и грађевинске физике,
 - принципа и метода термовизијског снимања,
 - процене и нумеричке анализе утицаја климатских параметара,
 - процене и нумеричке анализе утицаја окружења
 - статистичке процене степена грешке

Само применом свих ових знања се може адекватно приступити процесу снимања и каснијој правилној анализи добијених резултата.

- Примена поступака нумеричке симулације перформанси фасадних омотача омогућава генерисање температурних карактеристика анализираног склопа за реалне услове важеће у тренутку термовизијског снимања. Исказане у виду температурних профила за дводимензионалне моделе, односно површинских приказа за тродимензионалне моделе, симулиране

карактеристике се користе као референтне вредности приликом примене метода.

- За добијање релевантних резултата који нам говоре о карактеру анализираног омотача и његовим термичким карактеристикама примена развијеног метода базираног на принципу комбиновања термовизијског снимања и нумеричке симулације представља брзу и адекватну дијагностичку методу која нам даје релевантне одговоре на квалитативна и уз одговарајућу, стручно дефинисану и научно потврђену, класификацију степена одступања, и на квантитативна питања о перформансама омотача.
- Дијагностиковање дефеката у саставу термичког омотача могуће је вршити применом метода и без прецизно утврђених свих параметара снимања, применом корекционих процедура хармонизације дијаграма.
- Резултати истраживања у виду каталога карактеристичних фасадних склопова илустровних помоћу термограма, графичког приказа симулираног пресека и скице склопа, се могу користити као полазна основа приликом испитивања фасадних омотача непознатог састава.

У складу са принципима на којима је дефинисан метод оцене перформанси, а који подразумевају одређене апроксимације, јављају се специфични проблеми, који се не могу сматрати доминантним, а који нису детаљније разрешавани у истраживачком процесу.

Основна група нерешених проблема примене се односи на карактер самог процеса симулације и његову релацију са термовизијским снимањем. Полазна претпоставка примене методе се огледа у постојању стационарног топлотног протока кроз фасадни омотач. Другим речима, метода анализе склопова компарацијом температурних профила добијених симулацијама и термовизијским снимањем је, у великој мери, зависна од типа механизма провођења топлоте. Морамо бити свесни да се реални услови веома често карактеришу нестационарним топлотним протоком, те је неопходно стручно знање како би се извршила процена одговарајућих услова снимања за примену дефинисаног

метода. Примена методе се, без обзира на навођење основних услова снимања и прописаних процедура, заснива, у великој мери, на стручности истраживача.

Премиса стационарног топлотног тока лимитира примену развијеног метода у случајевима када се жели испитати динамички утицај који промене појединих параметара имају на перформансе.

Примена методе је развијена компајрацијом симулације базиране на дводимензионалном механизму прорачуна што представља лимитирајући фактор за примену у свим појавним случајевима архитектонских склопова. Иако је могуће анализирати и склопове који, по својој природи, захтевају примену тродимензионалних симулационих метода, није развијен одговарајући методолошки оквир који би поједноставио принципе оцено перформанси у овом случају.

Истраживање фасадних омотача подразумева велики број појавних облика те би евентуална поједностављена примена у смислу компарације према референтним термограмима морала садржати обиман каталог симулираних склопова праћен одговарајућим термограмима, као и евентуални алат за корекцију према утицајима окружења.

Развијени метод оцено перформанси пружа основни алат за анализу, у циљу ширења обима примене, неопходно је спровести нова истраживања која би се кретала у неколико основних праваца:

У примени метода се врши свођење резултата термовизијског снимања које је по природи процеса површинско на линијски квантификативни показатељ – температурни профил, како би се добили нумерички поредљиви подаци, са резултатима примене дводимензионалне нумеричке симулације. У циљу свеобухватније употребе метода морале би се истражити могућности компаративне анализе термограма и површинских температурних профила добијених тродимензионалним методама симулације.

Развијени метод је обрађен као теоретски дефинисан принцип, који је потпуно истражен на одговарајућем узорку, са циљем стручне и научне валидације. У дефинисаном процесу спровођења метода све фазе, од испитивања перформанси термовизијским снимањем, симулације склопова, нормализације резултата до

њихове квантификације су спровођене мануелно, што претпоставља широки дијапазон различитих знања и самим тиме релативно лимитирајућу могућност имплементације. На основу стечених искустава, јавља се потреба за развојем софтверске платформе која ће, по извршеном снимању односно моделирању, једноставније вршити нормализацију података и процену утицаја према дефинисаним границама. Истраживање би требало да испита и могуће аспекте примене принципа повратне спреге који би укључивао релацију односа установљених недостатака, препорука за њихову санацију и симулирања будућих резултата уз препоруке за имплементацију.

Литература:

- Albatici, R. Tonelli, A. Chiogna, M. (2015) A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance, Applied Energy no. 141, pp. 218–228
- Albatici, R.. Tonelli A (2010) Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site, in Energy and Buildings, no.42, pp. 2177-2183
- Asdrubali, F. Baldinelli, G. Bianchi, F. (2012) A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings, Applied Energy, no. 97, pp.365–373
- Asdrubali, F. D'Alessandro, F. Baldinelli, G. Bianchi F. (2014) Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries - A case study, Case Studies in Construction Materials, no. 1, pp.53–59
- Assessing thermal bridging and insulation continuity (UK example) – Technical note, UK Thermography Association, Northampton: British Institute of Nondestructive Testing –BINDT
- Avdelidisa, N.P. Moropoulou, A. (2003) Emissivity considerations in building thermography, Energy and Buildings, no.35, pp. 663–667
- Balaras, C. Argitiou, A. (2002) Infrared thermography for building diagnostics Energy and Buildings, no 34, pp. 171-183
- Благојевић, Љ. (2007) Нови Београд: оспорени модернизам. Београд: Завод за уџбенике
- Van De Vijver, S. Steeman, M. Van Den Bossche, N. Carbonez, K. Janssens, A. (2014) The influence of environmental parameters on the thermographic analysis of the building envelope, paper presented at 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT 2014), downloaded from: <https://biblio.ugent.be/publication/5672069/file/5672070>
- Vavilov, P. V. (2010) A Pessimistic View of the Energy Auditing of Building Structures with the Use of Infrared Thermography, Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 46, No. 12, pp. 906–910.
- Vavilov, P. V. (2010) How accurate is the IR thermographic evaluation of heat losses from buildings? In Quantitative InfraRed Thermography Journal, vol. 7, issue 2, pp. 255-258.
- Везилић Стрмо, Н. Делић, А. Кинц, Б. (2013): *Узроци проблема постојећег стамбеног фонда у Хрватској*, Човјек и простор, бр. 21, Загреб: Архитектонски факултет, стр. 340-349.

- Viliems, V., Shield, K., & Dinter, S., (2006). Грађевинска физика, Београд: Грађевинска књига
- Vollmer, M. Moellmann, K. P, (2010) Infrared Thermal Imaging – Fundamentals, Research and Application, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co,
- Wagner, H. (2011) Thermographie, Koln: Rudolf Müller GmbH & Co. KG,
- Walker, N. (2004). Infrared Thermography Handbook – Volume 1. Principles and Practice, Northampton: Bindt – British institute of Non-Destructive Testing
- Ward, T. (2006) Assessing the Effects of Thermal Bridging at Junctions and Around Openings, The BRE information Paper IP17/01, Building Research Establishment – BRE
- Goforth, M. Gilchrist, G. Sirianni, J. (2002) Cloud effects on thermal downwelling sky radiance, Thermosense XXIV, Xavier P. Maldague; Andres E. Rozlosnik, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 4710, SPIE, Bellingham, WA, pp.203-213
- Grimmond, C.S.B. Potter, S.K. Zutter, H.N. Souch, C. (2001) Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas, International Journal of Climatology, no. 21, pp. 903–913
- Grinzato, E., Vavilov, V. Kauppinen, T. (1998) Quantitative infrared thermography in buildings, Energy and Buildings, no. 29, pp. 1-9
- Dall'O', G. Sarto, L. Panza, A. (2013) Infrared Screening of Residential Buildings for Energy Audit Purposes: Results of a Field Test, Energies, no.6, pp. 3859-3878
- Дамјановић, Д. Глигоријевић, Ж. Ур (2010) Приказ стамбених пологитка Србије и одабраних земаља Европе, Београд: PALGO centar
- Добривојевић, И. (2013). Село и град: трансформација аграрног друштва Србије 1945-1955. Београд: Институт за савремену историју.
- Домаћи монтажни системи стамбене изградње (1967). Изградња, str. 185-190., Београд
- Ђукановић, Љ. (2015) *Типологија и валоризација грађевинске структуре стамбених зграда Београда са становишта комфора становања*, Докторска дисертација одбрањена на Архитектонском факултету Универзитета у Београду, 2015.
- Erhorn, H. et al. (2010) An effective Handling of Thermal Bridges in the EPBD context, Final report of the IEE ASIEPI Work on Thermal Bridges, ASIEPI, Интернет публикација, доступно на сајту www.asiepi.eu, приступљено 24.8.2015.

- Ibarra Castanedo, C. (2005) *Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase*, Докторска дисертација одбрањена на Универзитету Лавал, Квебек, Канада, 2005 (<http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/23016/23016.html>, приступљено 1.8.2015.)
- Ibarra-Castanedo, C, Tarpani, J.R., Maldague, X. (2013) Nondestructive testing with thermography, *European Journal of Physics*, no. 34, pp. 91-109
- ITC, Termografy, Level I, (2005), Publication No 1560093E, Infrared Training Center, Stockholm: Flir Systems
- Јовановић Поповић М. Игњатовић Д. (ур), (2013а). Национална типологија стамбених зграда Србије - Националне брошуре, Београд: GIZ
- Јовановић Поповић, М. Игњатовић Д. (ур), (2013б). *Национална типологија стамбених зграда Србије/National Typology of Residential Buildings in Serbia*, Београд: Архитектонски факултет Универзитета у Београду и GIZ (двојезично издање)
- Јовановић Поповић, М. Игњатовић, Д. (ур), (2012). *Атлас породичних кућа Србије/Atlas of Family housing in Serbia*, Београд: Архитектонски факултет Универзитета у Београду и GIZ (двојезично издање)
- Јовановић Поповић, М. Игњатовић, Д. (ур), (2013ц). *Атлас вишепородичних зграда Србије/Atlas of Family housing in Serbia*, Београд: Архитектонски факултет Универзитета у Београду и GIZ (двојезично издање)
- Јовановић-Поповић, М. (ур), (2003). Енергетска оптимизација зграда у контексту одрживе архитектуре - део 1, Београд: Архитектонски факултет
- Јовановић-Поповић, М. Игњатовић, Д. (2003). Концепт методологије структурирања грађевинског фонда са аспекта енергетске оптимизације, у Јовановић-Поповић, М. (ур.), *Енергетска оптимизација зграда у контексту одрживе архитектуре - део 1*, (стр. 1-24). Београд: Архитектонски факултет
- Кадијевић, А. (2008). *О социјализму у београдској архитектури и његовим опречним тумачењима*, Наслеђе br. IX, Београд : Завод за заштиту споменика културе града Београда
- Кузмановић, А. Ивановић, Р. (2008) Систем контактне фасаде са каменом вуном, Београд: Грађевинска књига
- Lehmann, B. Ghayi Wakili, K. Frank, Th. Vera collado B, Tanner Ch. (2013) Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings, *Applied Energy*, no. 110, pp. 29-43
- Maldague, X. (2001) *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, Wiley-Interscience, London

- Matuschek, O. Matzarakis, A. (2010) Estimation of sky view factor in complex environment as a tool for applied climatological studies. In: Matzarakis, A., Mayer, H., Chmielewski, F.-M. (Eds.), Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology. Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg No. 20, 535-540.
- Мецанов, Д. (2007): „*Могућности (ре)дефинисања и предлог периодизације градитељског наслеђа полератне модерне стамбене изградње Београда 1947-1967*“, Наслеђе, бр.VIII: Завод за заштиту споменика културе града Београда
- Мецанов, Д. (2014): *Прилог проучавању градитељског опуса Бироа за студије у Београду*, Наслеђе, бр. XV: Завод за заштиту споменика културе града Београда
- Миловановић, Б. (2013). *Карактеризација оштећења армираног бетона примењеном методе инфрацрвене термографије*, Докторска дисертација одбрањена на Грађевиниском факултету свеучилишта у Загребу 2013.
- Monchau, J.P. Ibos, L. Feuillet, V. (2014) Ddiagnosis of insulated building walls using passive infrared thermography and numerical simulations, proceedings of 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, pp. 96-103
- Novicki, A. (2004) Infrared thermography volume two – Applications, , Northampton: Bindt – British institute of Non-Destructive Testing
- Ohlsson, K.E.A. Olofsson, B. (2014) Quantitative infrared thermography imaging of the density of heat flow rate through a building element surface, Applied Energy no.134, pp. 499-505
- Palyvos, J.A. (2008) A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling, Applied Thermal Engineering no.28, pp. 801–808
- Petela, R. (2010). Engineering thermodynamics of thermal radiation for solar power utilization, New York: McGraw-Hill
- Радивојевић, А. (2003) Искуства и правци развоја стандарда из области термичке заштите код нас и у свету, у Јовановић-Поповић, М. (ур.), *Енергетска оптимизација зграда у контексту одрживе архитектуре - део 1*, (стр. 1-24). Београд: Архитектонски факултет
- Рајчић, А. (2011). *Методe пројектовања и симулације термичких мостова у архитектонским објектима*, Докторска дисертација, Одбрањена на Архитектонском факултету универзитета у Београду 2011.
- Rogalski, A. (2012) *History of infrared detectors*, Opto-Electronics Review no.20 issue no.3, pp. 201-308. Berlin: DeGruyter, (internet online version; Retrieved 20 Aug. 2015, from <http://www.degruyter.com/view/j/oere.2012.20.issue-3/issue-files/oere.2012.20.issue-3.xml>)

- Rogalski, A. Chrzanowski, K. (2002) *Infrared devices and techniques*, Opto-Electronics Review no.10 issue no.2, pp. 111-136. Berlin: DeGruyter
- Schoch, T. (2012) Neuer Wärmebrückenatlas, Beispiele und Erläuterungen nach DIN 4108 Beiblatt 2, Berlin: Beuth Verlag GmbH
- TABULA - Typology Approach for Building Stock Energy Assessment– Use of Building Typologies for Energy Performance Assessment of National Building Stocks. Existent Experiences in European Countries and Common Approach , IWU – Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, web publication, <http://www.building-typology.eu>
- Tanner C, Lehmann B, Frank T, Ghazi Wakili K. (2011) Vorschlag zur standardisierten Darstellung von Wärmebildern mit QualiThermo, Bauphysik no.33, pp.345–356.
- Tanner, C. Lehmann, B. Frank, T. (2011) Energetische Beurteilung von Gebäuden mit Thermografie und der Methode Quali Thermo, Erdgenossisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation: Bundesamt für Energie
- Taylor, T. Counsell, J. Gill S. (2013) Energy efficiency is more than skin deep: Improving constructionquality control in new-build housing using thermography, Energy and Buildings, no. 66, pp. 222–231
- Taylor, T. Counsell, J. Gill S. (2014) Combining thermography and computer simulation to identify and assess insulation defects in the construction of building facades, Energy and Buildings, no.76. pp.130-142
- Tilmans, A. Van Orshoven, D. (2010) Software and atlases for evaluating thermal bridges, ASIEPI project papers, Paper no. 198, интернет издање <http://www.buildup.eu/publications/5657>
- Trethowen, H. (1986) Measurement Errors with Surface-mounted Heat Flux Sensors, Building and Environment, Vol. 21, No. 1, pp. 41-56
- Медвед С. (2011) Грађевинска физика, Нови Пазар: Државни универзитет у Новом Пазару
- Томић, Р. Чанак, М. (1974) *Проблематика прилагођавања постојећег стамбеног фонда савременим захтевима и потребама*, Информативни билтен бр. 15, Београд; Институт за материјале СРС (ИМС), Центар за становање
- FLIR (2004), Flir ThermaCAM B20 operators manual, Publication No. 1 557 948 Rev. a 62, Danderyd: FLIR Sustems AB
- FLIR (2006), Flir Buildng module, user manual, Publication No. 1560205 Danderyd: FLIR Sustems AB

- FLIR (2009), Flir Quick Reporter ver. 1.2, user manual, Publication No. 1558629 Rev. a 362, Danderyd: FLIR Sustems AB
- FLIR (2009), Flir Reporter Buildng, user manual, Publication No. T559081 Rev. a 348, Danderyd: FLIR Sustems AB
- FLIR (2012), Flir Reporter pro Ver 9, user manual, Publ. No. 1558567, rev. 3020, Danderyd: FLIR Sustems AB
- Flir and ITC (2011), Thermal imaging guidebook for building and renewable energy applications, Stockholm: FLIR systems AB
- Fokaides, P. Soteris, K. (2011) Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes, Applied energy, no 88, pp. 4358–4365
- Fouad, N.. Richter, T. (2012) Leitfaden Thermografie im Bauwesen, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- Fox, M. Coley, D. Goodhew, S. De Wilde, P. (2012) Comparing transient simulation with thermography time series, Proceedings of BSO12, First Building Simulation and Optimization Conference, IBPSA, England, pp.356-363
- Fox, M. Coley, D. Goodhew, S. De Wilde, P. (2014) Thermography methodologies for detecting energy related building defects, Renewable and Sustainable Energy Reviews, no.40, pp. 296–310
- Changhai, P. Wua, Z. (2008) In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction, Energy and Buildings, no.40, pp. 2076–2082
- Chrzanowski, K. (2005), Review of infrared systems, Report AW321/2005, Kwirynow; Inframet
- Чаушевић, А. Рустемпашић, Н. (2014) Реконструкције зиданих објеката високоградње, Сарајево: Архитектонски факултет
- Šumarac, D. Todorović, M. Đurović-Petrović, M. Trišović, N. (2010) Energy Efficiency of Residential Buildings in Serbia, Thermal Science, Vol. 14, Suppl., pp. S97-S113

Закони и правилници

- *Закон о стамбеним односима*, (1990) Београд: Службени Гласник СРС бр. 12/90, 47/90
- *Закон о одржавању стамбених зграда* (1995) Београд: Службени Гласник РС бр. 44/95, 46/98, 1/01
- *Закон о становању*, (1992) Београд: Службени Гласник РС бр.50/92
- *Правилник о минималним техничким условима за изградњу станова* (1967). Београд: Службени лист СФРЈ бр. 45/67.
- *Правилник о техничким мерама и условима за топлотну заштиту зграда* (1970). Београд: Службени лист СФРЈ бр.35/70
- *Правилник о југословенским стандардима за топлотну технику у грађевинарству*, Београд: Службени лист СФРЈ бр.3/80
- *Правилник о енергетској ефикасности зграда*, (2011) Службени гласник РС бр. 61/2011.
- *Правилних о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда*, (2011) Службени гласник РС бр. 61/2011
- *Правилник о условима и нормативима за пројектовање стамбених зграда и станова* (2012) Београд: Службени гласник РС, бр. 58/2012
- *Услови и технички нормтиви за пројектовање стамбених зграда* (1983), Београд: Службени лист бр.32/83
- *Уредба о одржавњу стамбених зграда и станова* (1993) Београд: Службени Гласник РС бр.43/93
- 2002/91/EC, *Directive of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings (EPBD)*, of 16 December 2002

Стандарди

- СРПС ЕН 13187:2008 Топлотне перформансе зграда – Квалитативна детекција топлотних ирегуларности у омотачу зграде – Инфрацрвена метода адаптирани *EN ISO 13187:1998*
- SRPS EN ISO 13790:2010 Укупна потребна енергија за грејање и хлађење (узимајући у обзир губитке и добитке топлоте).

- SRPS EN ISO 10211:2013 Топлотни мостови у грађевинској конструкцији - Топлотни протоци и површинске температуре – Детаљни прорачун.
- SRPS EN ISO 6946:2013 Компоненте и елементи зграде – Топлотна отпорност и коефициент пролаза топлоте – Метода прорачуна
- SRPS EN ISO 14683:2012 Топлотни мостови у грађевинској конструкцији– линијски кефициент пролаза топлоте – Упрошћене методе и одговарајуће вредности
- SRPS EN 13829:2008 Топлотне перформансе зграда – Одређивње ваздушне пропустљивости зграда – Метода притиска удувавањем
- SRPS EN ISO 10456:2012 Грађевински материјали и производи – Хигротоплотна својства – Табеларне пројектне вредности и поступци за одређивање декларисаних и пројектних топлотних вредности.

Интернет извори:

- <http://popis2011.stat.rs/>
- <http://www.urbanclimate.net/skyhelios>

БИОГРАФИЈА

Душан Игњатовић рођен је 1969. године у Београду, где је завршио основно и средње образовање.

Архитектонски факултет Универзитета у Београду уписао је 1989. године и дипломирао 1996. као студент генерације, код ментора Проф. М. Лојанице.

1996-98. похађао Магистарске студије на Архитектонском факултету Универзитета у Београду, смер Архитектура, Енергија, Технологија

2008. Уписао Докторске студије на Архитектонском факултету Универзитета у Београду

У периоду 1996-1997. запослен је као Пројектант сарадник и Пројектант, у „Енергопројект МДЦ Индустрија“, а од 1997. на Архитектонском факултету Универзитета у Београду у звањима Асистент-приправник (1997-2001.), Стручни сарадник (2001-2005.), Самостални стручни сарадник (2005-2009.) и Доцент (од 2009.). Учествоје, као гостујући предавач у процесу извођења наставе на Факултету техничких наука у Приштини са седиштем у Косовској Митровици и Архитектонском факултету у Подгорици (2009-2010.)

Његов професионални и научни интереси су везани за пројектовање, енергетску ефикасност, зелену архитектуру и обнову зграда. Носилац је лиценце за пројектовање (2003.), Термовизијско снимање ИТС Ниво 1 (2006.), Сертификацију зелених зграда LEED GA (2010) и Енергетску ефикасности – нулта лиценца (2012.).

Као експерт и истраживач укључен је у бројне научне и професионалне активности. Учесник је ERASMUS + KLABS пројекта (2015-2018.) као истраживач, IEE EPISCOPE пројекта (2013-2016.) као истраживач. Такође је учествовао у својсу истраживача и координатора националног тима у IEE TABULA пројекту (2009-2012.) и већем броју пројеката у кооперацији са GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit): Survey of buildings, catalogue of building types and energy consumption properties, catalogue of energy

efficiency improvement modes (Phase A 2010, Phase B 2011, Phase C 2012-2013.), Serbian Residential Building Typology (2011-2013.).

Остварује учешће у националним интердисциплинаним истраживачким програмима: Истраживање и систематизација стамбене изградње у Србији у контексту глобализације и европских интеграција у циљу унапређења квалитета и стандарда становања (2011-2016.) и Интеграција система звучне заштите у зградама у контексту одрживог становања, (2011-2016.) а раније: Систем двоструких фасада као фактор енергетске ефикасности објеката (2003-2006.) и Енергетска оптимизација зграда у контексту одрживе архитектуре (2002-2005.).

Аутор је већег броја публикација и поглавља у монографијама од којих се издвајају националне монографије: Видети енергију (са М. Јовановић Поповић, 2011), Атлас породичних кућа Србије (са групом аутора, 2012), Атлас вишепородичних зграда Србије (са групом аутора, 2013), Национална типологија стамбених зграда Србије (са групом аутора, 2013), Use-Re-Use: New Belgrade (публикација презентирана на Венецијанском Бијеналу, 2014). Аутор је већег броја радова у интернационалним и националним часописима, редова презентираних на конгресима и штампаних у зборницима, у земљи и иностранству.

Учесник је великог броја професионалних курсева, радионица, симпозијума у својству позваног предвача из области Енергетске ефикасности и типологије зграда, у земљи и иностранству.

Он је пројектовао већи број зграда (27 реализованих) разноврсних програма у различитим културним и климатским окружењима (Габон, Екваторијална Гвинеја, Србија, Црна Гора, Русија, Грчка). Учесник је више од 24 групних изложби са интернационалном селекцијом и 3 ауторске изложбе. Учесник је великог броја националних и интернационалних архитектонских конкурса на којима је остварио већи број награда и признања.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Душан Игњатовић

број индекса 2007/5

Изјављујем

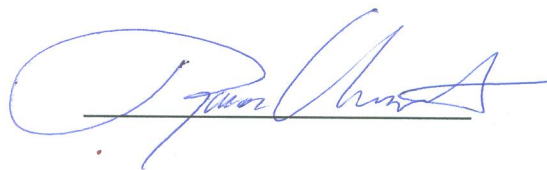
да је докторска дисертација под насловом

ОЦЕНА ЕНЕРГЕТСКИХ ПЕРФОРМАНСИ ОМОТАЧА СТАМБЕНИХ ЗГРАДА МЕТОДОМ ТЕРМОВИЗИЈСКОГ СНИМАЊА

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

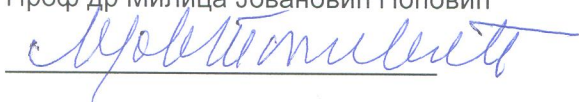
Потпис докторанда

У Београду, 22.12.2015.



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора	Душан Игњатовић
Број индекса	2007/5
Студијски програм	Докторске академске студије архитектура и урбанизам
Наслов рада	ОЦЕНА ЕНЕРГЕТСКИХ ПЕРФОРМАНСИ ОМОТАЧА СТАМБЕНИХ ЗГРАДА МЕТОДОМ ТЕРМОВИЗИЈСКОГ СНИМАЊА
Ментор	Проф др Милица Јовановић Поповић
Потписани/а	

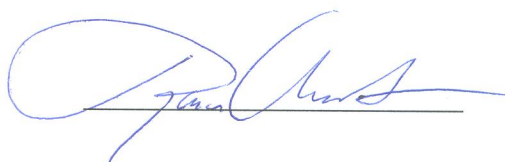
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

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

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

Потпис докторанда

У Београду, 21.12.2015.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

ОЦЕНА ЕНЕРГЕТСКИХ ПЕРФОРМАНСИ ОМОТАЧА СТАМБЕНИХ ЗГРАДА МЕТОДОМ ТЕРМОВИЗИЈСКОГ СНИМАЊА

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
- ☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 21.12.2015

Потпис докторанда


1. Ауторство - Дозвољавање 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. Дозвољавање 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 прераде. Дозвољавање 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. Дозвољавање 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 прераде. Дозвољавање 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. Дозвољавање 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.