



Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје  
Архитектонски факултет – Скопје

**СОФТВЕРСКА АНАЛИЗА НА КОНСТРУКТИВНИТЕ СИСТЕМИ И ЕНЕРГЕТСКАТА СОСТЈБА НА АРХИТЕКТОНСКИ  
ОБЈЕКТИ  
(САКСЕС)**

**НАУЧНОИСТРАЖУВАЧКИ ПРОЕКТ**

**Главни истражувачи:** доц. д-р Лилјана Димевска Софрониевска  
ас. м-р Теодора Михајловска

**Раководители на  
истражувачкиот тим:** проф. д-р Ана Тромбева - Гаврилоска  
проф. д-р Бојан Каранаков

**Место на изработка:** Скопје

**Датум на завршување:** Април, 2025

## РЕЗИМЕ

Целта на проектот е преку примена на современи технологии за истражување да се испитаат различни аспекти на архитектонските конструкции и објекти и да се направи софтверска анализа и испитување физички модели, при што анализите ќе бидат фокусирани на два засебни аспекти, енергетската ефикасност и статичката стабилност.

Критериумите за проектирање на објектите од аспект на нивната сеизмичка издржливост, енергетска ефикасност и одржливост се повеќе се заоструваат, што наложува спроведување на современи методи на проектирање користејќи 3Д моделирање, BIM технологија, софтверски симулации на конструкцијата, енергетската состојба и финансиските трошоци уште во процесот на проектирање. Најранлива категорија на изградени објекти во Скопје се објектите градени во постземјотресниот период, кај кои вградените градежни материјали согласно тогашните трендови на Модернизмот, како и тогашните стандарди за проектирање не се совпаѓаат со стандардите кои денес ги налага ЕУ. Со цел да се добие генерална слика за состојбата на овие објекти преку критички избор на 50 објекти, ќе биде спроведена детална анализа и ќе биде направен градежно–архитектонски пресек на архитектурата од втората половина на 20<sup>ти</sup> век во Скопје. Анализата ќе биде направена од аспект на вградените материјали, енергетската ефикасност, степенот на деградација, а со цел да се утврди најпроблематичната типологија, што понатаму резултира со избор на „case study“ објекти. Во вториот дел од анализата предвидено е да се примени 3Д моделирање и виртуелна симулација на избраните објекти, за преку споредба со физички модели да се добијат релевантни податоци за однесувањето на конструктивните системи, пред се со примена на тродимензионална графичка статика. Имено, проектирањето на полиедарски структури има потенцијал за развој на процесот на проектирање преку формата на конструкцијата со која ќе може да се подобри статичката стабилност уште во раните фази на проектирањето.

## SUMMARY

The aim of the project is to apply various aspects of architectural structures and buildings through the application of modern research technologies and to make software analysis and examination of physical models, where the analysis will focus on two separate aspects, energy efficiency and static stability.

The criteria for designing buildings in terms of their seismic durability, energy efficiency and sustainability are becoming more stringent, which requires the implementation of modern design methods using 3D modeling, BIM technology, software simulations of construction, energy condition and financial costs during the design process. The most vulnerable category of buildings in Skopje are the buildings built in the post-earthquake period, where the building materials that are in accordance with the then trends of Modernism, as well as the design standards of the time, and do not match the standards imposed by the EU today. In order to get a general picture of the condition of these buildings through a critical selection of 50 buildings, a detailed analysis will be conducted and a construction-architectural section of the architecture from the second half of the 20th century in Skopje will be made. The analysis will be made in terms of embedded materials, energy efficiency, degree of degradation, in order to determine the most problematic typology, which further results in the selection of "case study" facilities. In the second part of the analysis, it is planned to apply 3D modeling and virtual simulation of selected objects, in order to obtain relevant data on the behavior of structural systems by comparison with physical models, primarily by applying three-dimensional graphic statics. Namely, the design of polyhedral structures has the potential to develop the design process through the form of construction which will be able to improve the static stability in the early stages of design.

## СОДРЖИНА

РЕЗИМЕ.....	i
SUMMARY .....	ii
СОДРЖИНА .....	iii
ЛИСТА НА СЛИКИ.....	v
ЛИСТА НА ТАБЕЛИ .....	vii
1. ВОВЕД.....	1
2. ДЕФИНИРАЊЕ НА ПРЕДМЕТ И ЦЕЛИ .....	1
3. МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕ.....	2
4. ПРЕГЛЕД НА ДОСЕГАШНИ ИСТРАЖУВАЊА .....	3
4.1 Подобрување на енергетска ефикасност на објекти класифицирани како културно наследство од модернизмот .....	3
4.2 Софтверски технологии за симулации на енергетски карактеристики на објекти .....	4
4.3 Преглед на литература во областа на графичка статика.....	5
4.3.1 Основи на графичката статика .....	5
4.3.2 Современи тродимензионални методи во графичката статика .....	6
4.4 Преглед на литература во областа на параметарско проектирање .....	7
4.4.1 Компјутерски имплементирана графичка статика .....	8
5. СОСТОЈБА НА КУЛТУРНО НАСЛЕДСТВО НА ГРАДОТ СКОПЈЕ .....	9
5.1 Режији на заштита .....	10
5.1.1 Културно наследство на ниво на град Скопје.....	11
5.1.2 Објекти од модернизмот како културно наследство на градот Скопје .....	12
5.2 Критички избор на референтни архитектонски примероци.....	12
5.3 Резултати од спроведената анализа на објекти од модернизмот .....	13
5.3.1 Хронологија на градење и намена на објектите .....	13
5.3.2 Застапеност на различни конструктивни системи.....	14
5.3.3 Застаепност на градежни материјали употребени во обвивката на објектите и нивни термички карактеристики .....	16
5.3.4 Видови на спроведени мерки за обнова, подобрување на термичките карактеристики и заштита на објектите и нивна застапеност .....	19
5.3.5 Реперкусии од спроведени мерки за обнова, подобрување на термичките карактеристики и заштита, на сметка на автентичноста на објектите.....	20
5.3.6 Режији на заштита кај објектите и нивна застапеност.....	22
5.3.7 Детектирање на најранлива категорија на објекти од модернизмот и селектирање на студија на случај .....	23
6. МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА НА ЕНЕРГЕТСКАТА СОСТОЈБА НА ОБЈЕКТ СТУДЕНТСКИ ДОМ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ СКОПЈЕ.....	23
6.1 Геометрија, локација, ориентација, зонирање и проектна температура .....	24
6.2 Површина, волумен, корисници, електрична опрема, системи за греење, вентилација и подготовка на топла санитарна вода .....	25
6.3 Тип на конструкција, градежни материјали на обвивка (сидови, приездна плоча и кров), спецификација на конструктивните елементи.....	25

7.	МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА НА СТАТИЧКА СТАБИЛНОСТ НА ОБЈЕКТ ЦРКВА „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“ (СОБОРЕН ХРАМ) - СКОПЈЕ.....	26
7.1	Методи на пронаоѓање на форма на лушпа .....	28
7.2	Примена на методот во Rhinoceros 3D .....	29
7.3	Дисконтинуитет во геометрија .....	31
7.4	Корекција на влезни податоци .....	32
7.5	Python компонента за селекција на највисоки и најниски точки (класичен алгоритам).....	33
7.6	Дефинирање на енвелопата .....	34
8.	РЕЗУЛТАТИ.....	36
8.1	Резултати од симулација на енергетската состојба на објект студентски дом „Гоце Делчев“ ..	36
8.1.1	Потрошувачка на топлинска енергија .....	36
8.1.2	Потрошувачка на електрична енергија.....	37
8.1.3	CO <sub>2</sub> емисии.....	38
8.1.4	Топлински губитоци преку обвивка .....	39
8.1.5	U коефициенти на надворешните ѕидови.....	40
8.1.6	Сумарни резултати од спроведената симулација на енергетската состојба .....	40
8.2	Резултати од испитување на влијание на параметри на дебелината на лушпа на објект црква „Св. Климент Охридски“ (Соборен храм) - Скопје.....	41
8.2.1	Сооднос на распон наспроти висина .....	41
8.2.2	Интензитет на сеизмичка сила .....	42
9.	ЗАКЛУЧОК .....	43
10.	КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА.....	46

## ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика 1	Комплексна разгранета 3Д структура дизајнирана со реципрочни 3Д дијаграми на форма и на сили: а) дијаграмот на сили кој се состои од 72 затворени, конвексни полиедари и б) дијаграмот на реципрочна форма; и в) експлодираната аксонометрија на дијаграмот на силите прикажувајќи ги различните групи на полиедари (Akbarzadeh, 2016) ..... 7
Слика 2.	RhinoVAULT, дополнителна компонента за Rhinoceros за проектирање на фуникуларни форми на лушпи (Rippmann et al., 2012). ..... 8
Слика 3	PolyFrame додатна компонента за Rhinoceros која го имплементира Ранкиновиот принцип за рамнотежа: прикажана форма добиена за сет од вертикални товари (Nejur and Akbarzadeh, 2021)..... 9
Слика 4	Процентуална застапеност на различни категории на културни споменици (лево) Процентуална застапеност на режимите на заштита кај културните споменици (десно).. 11
Слика 5	Застапеност на културните споменици по категории и заштитен режим..... 11
Слика 6	Процентуална застапеност објекти од модернизмот и од постари историски периоди (лево) Процентуална застапеност на објекти од различни период на модернизмот (десно) ..... 12
Слика 7	Хронологија на градба и намена на објектите од модернизмот во Скопје ..... 14
Слика 8	Процентуална застапеност на намени ..... 14
Слика 9	Типови на конструктивни системи а) согласно периоди на изградба б) процент на застапеност ..... 15
Слика 10	Типови на надворешни ѕидови според употребени градежни материјали ..... 17
Слика 11	Типови на спроведени интервенции (реновирање, реконструкција, и сл.) а) по период б)вкупен %..... 19
Слика 12	Состојби на зачуваност на автентичен изглед а) по период б) во проценти ..... 21
Слика 13	Поделба на објектите согласно степенот на заштита а) по периоди б) процентуално ..... 22
Слика 14	Студија на случај – студентски дом “Гоце Делчев” ..... 24
Слика 15	Карактеристичен кат од блок Б – поделба на термални зони на кат ..... 24
Слика 16	Анализа на дефинирањето на формата на лушпата на соборната црква во Скопје ..... 27
Слика 17	Пронаоѓање на форма на лак ..... 28
Слика 18	Линија на потисок при дејство на сеизмичка сила; ..... 29
Слика 19	Споредба на површината на пресек на лак ..... 29
Слика 20	Симулација на дејството на хоризонтален товар преку наклонување на рамнината на дијаграмот на сили..... 30
Слика 21	Дејство на сеизмичка сила од различни правци..... 31
Слика 22	Грешка во дефиниција на мрежата: А) дисконтинуитетот во геометријата на лушпата; Б) резултатот по корекцијата на влезните податоци ..... 32

Слика 23	Визуелниот алгоритам изграден од достапни компоненти (со црвено означена новата компонента програмирана преку Python) .....	33
Слика 24	Компонетата скриптирана во Python, која врши селекција на највисоките и најниските точки .....	34
Слика 25	Делунијева триангулација .....	34
Слика 26	Дефинирање на дополнителни референтни точки со цел да се избегне непосакуван прекин на геометријата на лушпата .....	35
Слика 27	Конечни резултати од селектирањето на точките: а) точки кои дефинираат горна граница; б) точки кои дефинираат долна граница .....	35
Слика 28	Потрошувачка на топлинска енергија за греење на часовно ниво (kWh) – постоечка состојба .....	36
Слика 29	Вкупна потрошувачка на електрична енергија на часовно ниво (kWh) – постоечка состојба .....	37
Слика 30	Потрошувачка на електрична енергија за греење на часовно ниво (kWh) – постоечка состојба .....	38
Слика 31	CO <sub>2</sub> емисии на часовно ниво (kg) кај постоечката состојба .....	39
Слика 32	Месечни загуби на топлинска енергија .....	40
Слика 33	Споредба на дебелината на лушпа во однос на висината наспроти распонот .....	42
Слика 34	Споредба на дебелината на лушпа во однос на промената во интензитетот на сеизмичката сила .....	43

## ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

Табела 1	U вредности на конструктивните елементи од обвивката .....	40
Табела 2	U вредности на конструктивните елементи од обвивката .....	41

## **1. ВОВЕД**

Потребата за брза изградба на Скопје предизвикана од последиците на катастрофалниот земјотрес во 1963<sup>та</sup> година во тој временски период од аспект на архитектура укажуваат на следење на актуелниот светски модернизам, носејќи со себе револуција во однос на конструктивните системи, градежната статика и градежните материјали. Сето тоа придонело кон поинаков пристап на проектирање и градење на објектите, кое денес претставува значајно културно наследство поставувајќи го град Скопје на светската мапа како град со завиден број на објекти изградени во стилот на брутализмот. Објектите градени согласно тогашните стандарди и норми, проектирани и градени без примена на доволна топлинска изолација или уште почесто, во комплетно отсуство на термоизолациони материјали, денес од аспект на енергетска ефикасност, одржливост, термален комфор и услови за живот, спаѓаат во групата на големи потрошувачи на енергија.

Имено, најранливата категорија на веќе изградени објекти во Скопје се објектите градени во постземјотресниот период, кај кои вградените градежни материјали согласно тогашните стандарди за проектирање го следат модернизмот, не се во корелација со денешните стандарди. Со оглед на тоа дека критериумите за проектирање на објектите како од аспект на нивната сеизмичка издржливост, така и од аспект на енергетска ефикасност и одржливост, се повеќе се заоструваат, спроведувањето на современи методи на проектирање користејќи 3Д моделирање, БИМ технологии, софтверски симулации на конструкцијата, енергетската состојба и финансиските трошоци, стануваат задолжителен процес уште во почетоците на проектирањето.

Со примена на современи софтверски технологии, во рамките на овој научно истражувачки проект, за селектирани архитектонски објекти, преку софтверска анализа, разгледани се аспектите на енергетската ефикасност и статичката стабилност. Со цел да се добие генерална слика за состојбата на објекти од втората половина на 20<sup>от</sup> век во Скопје, најпрво документирани се карактеристични објекти, од аспект на вградените материјали, конструктивните системи, енергетската ефикасност и степенот на деградација. Селектирани се две студии на случај, од кои кај првата спроведена е анализа од аспект на енергетска ефикасност, додека кај втората спроведена е анализа од аспект на статичка стабилност со примена на графичка статика. Во рамки на засебните анализи на студии на случај земена е предвид реалната потрошувачка на енергија за одржување на објектите, како и примена на 3Д моделирање и виртуелна симулација на избраните објекти со примена на тродимензионална графичка статика. При тоа методологиите спроведени во анализите покажуваат голем потенцијал не само во согледување на недостатоците на постоечките објекти, туку и во процената за новите објекти, кои треба да бидат земени пред вид уште во самите почетоци на проектирање на објектите.

## **2. ДЕФИНИРАЊЕ НА ПРЕДМЕТ И ЦЕЛИ**

Предметна истражување на овој научно истражувачки проект е анализа на архитектонските и градежните карактеристики на карактеристични објекти во однос на енергетската ефикасност, конструкцијата, одржливоста и статичката стабилност.

Врз основа на спроведен преглед на литература и документирање на карактеристични објекти, треба да биде извршен избор на најсоодветна студија на случај за анализа, за која преку соодветна

апликација на компјутерски алатки, софтвери и методи ќе биде извршена софтверска анализа во однос на енергетската ефикасност, што претставува една од главните цели на научно истражувачкиот проект.

Имајќи предвид дека помеѓу различните методи на обликување, со развојот на современата компјутерска графика, директната примена на графичката статика во проектирањето и градежното инженерство ја овозможува посакуваната контрола на архитектите и инженерите со што се дефинира втората цел на научно истражувачкиот проект. Имено, примената на тродимензионалната графичка статика овозможува пристап на архитектот интуитивно да манипулира со геометријата на конструкцијата во согласност со натоварувањето и преку формата да ја подобри статичката стабилност во раните фази на проектирањето, без притоа да се ограничи креативната слобода. Главниот фокус во поглед на статичката анализа е поставен на тродимензионалната графичка статика, базирана на реципрочните тродимензионални дијаграми на формата и напрегањата, а која поддржана преку напредните компјутерски алатки и методи, треба да даде одговор во дефинирањето на статичката стабилност на формата.

### **3. МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕ**

Поставениот предмет на истражување и зададените цели на овој научно истражувачки проект се реализирани преку истражување на литературата, соодветна научна разработка преку теренска и софтверска анализа и споредба и анализа на добиените резултати.

Анализата на литературата е спроведена преку преглед на постојната библиографска документација, законската регулатива, како и практичните искуства во регионот и светот. Со цел соодветен избор на објекти за студија на случај фокусот на истражувањето е поставен на анализа на објектите од модернизмот во Скопје, за кои е спроведена сеопфатна анализа на енергетската состојба преку моделирање и динамичка симулација, при што симулираните реални услови детално ги прикажуваат термичките карактеристики на објектот.

Имено, истражувачкиот процес преку комплексен холистички пристап опфаќа разработка низ три сегменти, разработени преку три методолошки постапки:

- Најзначајните објекти од 20ти век од модерната архитектура во Скопје анализирани се од аспект на нивната конструкција, материјали, степен на заштита, степен на сочуваност, деградација, обнова. Изборот на студии на случај за понатамошна анализа е утврден избирајќи ги најпроблематичните објекти, со цел да биде спроведена нивна проценка и дијагноза за нивната патологија.
- За селектираните објекти спроведена е софтверска симулација за нивната енергетска состојба во реални услови, со што се утврдени недостатоците на објектот во однос на термоизолационите карактеристики на елементите на обвивката, потрошувачката на топлинска и електрична енергија за греење, ладење и одржување, емисија на штетни гасови и финансиски трошоци.
- Со цел развивање на нов пристап во дефинирање на формата на конструкцијата за дополнително истражување на карактеристиките на конструктивните системи спроведено е моделирање и изведени се симулации на модели во програмот Rhinoceros 3D.

- Со примена на алгоритам во виртуелната програмска околина Grasshopper кој за моделираните тродимензионални дијаграми на сили како влезна информација треба да го земе дијаграмот на сили, а како излезна информација да ја дефинира формата на самата конструкција воспоставена е врската помеѓу формата на дијаграмот на сили и формата на конструкцијата, а испитувањето на карактеристиките на вака добиените конструкции се дефинирани со примена на нумеричко истражување.

#### 4. ПРЕГЛЕД НА ДОСЕГАШНИ ИСТРАЖУВАЊА

Прегледот на литература за целите на ова истражување е конципиран во двете области кои се релевантни на предметот на истражување.

Првиот дел од прегледот на литература се однесува на досегашните истражувања поврзани со меѓународната и домашната законска регулатива за енергетска ефикасност за заштита на објекти како културно наследство од аспект на одржливоста и комфорот на објекти од постземјотресниот период во Скопје, чии енергетски карактеристики треба да бидат усогласени со денешните стандарди. Со цел да биде избран соодветен софтвер за моделирање на студиите на случај, врз основа на проектна документација и утврдени архитектонски и градежни карактеристики, направен е преглед на литература од областа на БИМ технологиите како и истражувања и компаративни анализи за начинот на функционирање и прецизноста на различни софтвери за енергетска симулација на згради.

Истражувањата за дигитална фабрикација, како предуслов за можност за развивање на проекти од повеќе области, како што е истражувањето на статичката стабилност на полиедарските структури, е заснован на основа на направениот преглед на веќе постоечки истражувања за примената на графичката статика.

##### 4.1 Подобрување на енергетска ефикасност на објекти класифицирани како културно наследство од модернизмот

Прегледот на литература од аспект на подобрување на енергетската ефикасност на објекти класифицирани како културно наследство од модернизмот, спроведен е на анализа на објекти кај кои се спроведени мерки за решавање на оваа проблематика.

Според Британското здружение за заштита на архитектурата од 20<sup>от</sup> век, „Twentieth Century Society” и Здружението за заштита на културното наследство на Англија, „English Heritage”, се наведува дека не секогаш е возможно задржување на целосната автентичност на модернистичкиот објект при дефинирање на решение за унапредување на градбата и нејзино усогласување со современите потреби, (Stratton, 1997). Се наведува дека главна причина за големиот неуспех на модерната архитектура е наглата промена и брзиот развој на нови градежни материјали и техники, кои не се тествани подолг временски период како традиционалните природни материјали, проследени со потфрлање на применетите материјали и технологии за брзата градежна експанзија. Според Институтот за заштита на културното наследство на Англија, поткрепено со примери на заштитени објекти од модернизмот, заклучено е дека овој тип на објекти не може да бидат третирали исто како и останатите историски градби и мора да биде направен компромис.

Кога станува збор за реновирање на објекти од модернизмот за подобрување на термичките карактеристики, на сметка на оригиналниот изглед, со решавање на проблемот на заштита постигнувајќи компромис, при реновирање на објект изведен во натур бетон е наведено во истражувањата на д-р Лембо и неговиот тим, (Lembo, 2014), (Paolo *et al.*, 2015). Реновирањето спроведено на јавна зграда во Потенза, Италија, е спроведено со имитација на фасада од натур бетон изведена со примена на нови, современи, фасадни системи од вентилирани панели, чиј завршен надворешен слој успешно ја имитираат текстурата на бетонот, заштитувајќи го голиот бетон од надворешни влијанија и подобрувајќи ги термичките карактеристики на зградата. Имајќи предвид дека објектот не е заштитен со одреден режим на заштита како културно наследство, со што се е овозможено претрпување на доста големи промени, може да се констатира дека станува збор за компромис, помеѓу подобрувањето на енергетските перформанси, комфорот и условите за живот во зградата, на сметка на автентичниот изглед. Имено, анализираниот објект според конструктивниот систем, материјалност и начин на изведба е сроден до голем дел од објектите во Скопје од анализираниот период, познат како бруталистичка архитектура.

Со цел подобрување на термоизолационите карактеристики на историските градби, а при тоа зачувување на нивниот оригинален изглед, развиена е технологија за производство на иновативни материјали од страна на швајцарскиот Институт за наука и технологија на материјали – ЕМРА. Имено, модернистичкиот објект „Plattenbau“ во Берлин изведен од префабрикувани армирано бетонски конструктивни елементи, реновиран е со аплицирање на иновативен малтер, со што значително е подобрена неговата енергетската ефикасност, а при тоа успешно е постигнат изгледот на стариот завршен малтер на фасадата, (Wakili *et al.*, 2018).

Од истражената литература може да се заклучи дека при интервенција на модернистичките градби, градени во претходниот век кои претставуваат значително културно наследство кое треба да биде заштитено, процесот на обнова треба да претставува реновирање со подобрени иновативни материјали.

#### 4.2 Софтверски технологии за симулации на енергетски карактеристики на објекти

Примената на софтверските технологии во архитектурата има суштествена улога, не само од аспект на зголемување на брзината и ефикасноста во процесот на проектирање, туку и од аспект на компјутерска графика при прикажувањето на реалистични претстави за изгледот на идните архитектонски решенија, особено користејќи ги современите графички софтвери за 3Д моделирање и визуализација.

Експанзијата на компјутерски графички системи за примена во архитектурата се одвива во континуитет од самите почетоци на графичките софтвери со воведувањето на системот Sketchpad од страна на Иван Сатерленд, (Dorsey and McMillan, 1998). Денес примената на БИМ технологијата, односно интегрираното моделирање на зградите, покажува најголем потенцијал за развој во областа на инженерството воопшто, особено во доменот на архитектурата и градежништвото, (Azhar, 2011). Имено, БИМ технологијата претставува нова парадигма во рамки на градежната индустрија, поттикнувајќи интеграција на улогите на сите засегнати страни во проектот. Со примена на БИМ технологијата овозможено е дигитално конструирање на точен виртуелен модел на објект, односно градежен информативен модел, кој треба да се користи во процесот на планирање, проектирање, изградба и изведба

на објектот, овозможувајќи визуелизација и симулација на изградената средина, со цел идентификација на потенцијални проблеми во однос на проектните и изведбените решенија.

Меѓутоа, од аспект на пресметка на енергетски перформанси на објектите во реални услови користењето на БИМ технологија, односно користење само на графички софтвери за креирање на информативен модел на зградата, не е доволно. За динамични симулации кои нудат точни и прецизни информации за однесувањето на објектот од аспектот на архитектонска физика, добивки и губитоци на различен тип на енергија, трансмисиони загуби, емисија на штетни гасови во реални нестационарни услови, потребна е примена на интегрирана софтверска програма за симулација на реалната експлоатација на објектот која ќе даде одговор од наједноставните енергетски придобивки па сè до најсложените енергетски процеси. Ваквата интегрирана програма подразбира примена на компатибилни интегрирани софтвери, од кои едниот софтвер претставува математички софтвер базиран на математичка вежба на алгоритми на воспоставен одреден модел/систем, во кој варијаблите на моделот се променети да го детерминираат ефектот на други варијабилни, додека другиот софтвер претставува тродимензионален интегриран модел со шематска дистрибуција на систем со познати карактеристики, чија основна намена е да претставува модел за понатамошно истражување.

Со цел да се добијат релевантни податоци, а врз основа на прегледот на литература, во рамки на ова истражување, користени се два типа на интегрирани софтвери од кои едниот претставува главниот мотор, познат како Energy Plus, кој што ги врши симултаните математички пресметки, додека другиот претставува негов графички интерфејс кој што служи како графичка комуникација при моделирањето на системите (од 3Д моделирање, форми и површини, конструкција, градежни материјали, до најсложени системи за греење, ладење и одржување на објектот, познат како Open Studio.

#### 4.3 Преглед на литература во областа на графичка статика

Литературата која се однесува на графичката статика хронолошки е поделена во две целини, литература која ги поставува основните принципи на графичката статика и нејзините методи од 16-тиот до крајот на 20-тиот век и литература која го опфаќа обновениот интерес за полето и развојот на тродимензионалната графичка статика и нејзината примена преку современи компјутерски методи од крајот на 20-тиот век до денес. Во текот на изминатите три децении, годишниот број на напишани публикации за графичка статика се зголемува со експоненцијална стапка (Lee, 2018). Иако основните принципи на графичката статика датираат од 18-тиот век, компјутерска графичка статика, а особено 3D графичката статика, се нови области на истражување со многу истражувачки можности кои треба да бидат развивани во иднина.

##### 4.3.1 Основи на графичката статика

Детален историски пресек на графичката статика е презентираан во „Историјата на теоријата на структурите“ од Карл-Еуген Курер (2008) и „Симетрија, групи и двојност“ од Ерхард Шолц (1989). Почетоците на графичката анализа на сили датираат уште од 16-ти век, кога Симон Стевин (1586) графички го прикажал балансот на силите на наклонетите рамнини користејќи дијаграми на јажиња под дејство на товар. „Нова механика или статика“ на Пјер Варињон (1725) е еден од првите примери за

примената на фуникуларни многуаголници или многуаголници на сили за да се опише статичката рамнотежа на внатрешните сили на едноставни структури и системи на затегнати јажиња .

Вилијам Џон Ранкин (1858) покажува како фуникуларни многуаголници може да се користат за пресметување на внатрешните сили на статички определени решетки. Графичките методи за анализа на статичката рамнотежа се формално воведени во полето на градежното инженерство како „графичка статика“, преку семиналната книга на Карл Кулман, „Графичката статика“ (1864). Врз основа на графичките методи на Кулман и Максвеловата теорија за реципрочни дијаграми, Луиџи Крмона го вовел методот за конструирање на реципрочни дијаграм (1872). Во 1864 година, приближно во исто време кога 2Д графичката статика била артикулирана од Кулман (1864), преку „Принцип на рамнотежа на полиедарски рамки“, Ранкин (1864) предложил можна реципрочна врска помеѓу форма и сили во 3Д. Сепак, тој никогаш не ја докажал или дополнително објаснувања или илустрации. Во истата година, како одговор на предлогот на Ранкин, Максвел (1864) прикажал геометриски метод за конструирање 3Д реципрочни дијаграми за конкретен случај, во кое ја нагласил комплексноста на решавањето на овие проблеми во третата димензија, но и незаинтересираноста за продолжување на темата.

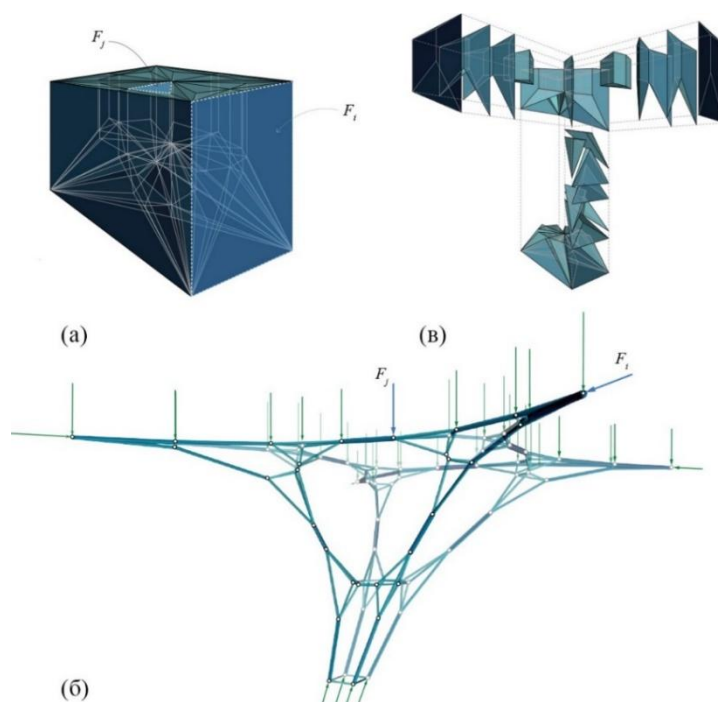
Во текот на доцниот 19-ти век, графичката статика повторно се популаризира поради нејзината примена како комплементарна техника за анализа на конструкции од леано железо (Kupfer, 2008). Во споредба со традиционалните камени и дрвени конструкции, конструкциите од леано железо се конструкции формирани од низа линиски елементи кои носат само аксијални сили, чија рамнотежа на сили може графички да биде определена. Проектирањето и анализата на ваквите сложени структурни форми, применувајќи ја графичката статика, се изведувало без примена на комплицирани нумерички методи и пресметки.

Графичката статика, како метод соодветен за анализа на конструкции од линиски елементи кои носат само аксијални сили, не е адекватен метод за анализа на армиранобетонски конструкции, кои се повеќе се применуваат од крајот на 20-тиот век. Како резултат на тоа, методите за проектирање и анализа на конструкциите постепено стануваат се повеќе зависни од нумеричките методи базирани на линеарна алгебра. Хронолошки, последна референца од овој период на разгледуваната литература е „Графичка анализа: учебник по графичка статика“ од Вилијам С. Волф (1921) кој претставува сеопфатен текст за примена на дотогаш познатите методи и нивна илустрација преку конкретни примери.

#### 4.3.2 Современи тродимензионални методи во графичката статика

Тродимензионалната графичката статика се заснова на полиедарски претстави на рамнотежата на силите, кои базираат на истражувањата на Ранкин (1864) и Максвел (1864). Со комбинирање на карактеристиките и предностите на современиот CAD софтвер, Акбарзадех (Akbarzadeh et al., 2015a; Akbarzadeh, 2016) графички ги разјаснува предлозите на Ранкин преку тродимензионални дијаграми и визуелизации. Во 2Д графичката статика, интензитетот на аксијалната сила на член е претставена со должината на соодветниот раб во дијаграмот на силите, додека во 3Д графичката статика, површините и ориентациите на лицата во полиедарскиот дијаграм на сили ги претставуваат насоките и големините на силите во соодветните членови во дијаграмот со полиедарски форми. Полиедарските реципрочни

дијаграми во литературата се нарекуваат и „Ранкинови реципрочни“ или „Ранкинови 3Д дијаграми“ (Konstantatou et al., 2016; McRobie, 2016). Во изминатите неколку години, презентирани се бројни апликации за дизајн со користење на 3Д графичка статика, меѓу кои истражувањата за дефинирање на формата преку итеративни поделби на полиедарите на силите (Akbarzadeh et al., 2015b; Ghomi et al., 2018), тестирање на модели на просторни структури кои носат само на сили на притисок (Bolhassani et al., 2018a) како и целосна материјализација на структура дизајнирана со 3Д графичка статика (Bolhassani et al., 2018b).



Сл. 1 Комплексна разгранета 3Д структура дизајнирана со реципрочни 3Д дијаграми на форма и на сили: а) дијаграмот на сили кој се состои од 72 затворени, конвексни полиедари и б) дијаграмот на реципрочна форма; и в) експлодираната аксонометрија на дијаграмот на силите прикажувајќи ги различните групи на полиедари (Akbarzadeh, 2016)

Покрај истражувањата за дизајн и дефинирање форма, МекРоби и Константату во своите истражувања воспоставуваат генерализирана теоретска основа за 3Д графичка статика, поврзувајќи ја со најфундаменталните принципи на структурното инженерство. Во нивните истражувања презентирани се: n-димензионални методи на реципрочна конструкција со помош на проективна геометрија (Konstantatou and McRobie, 2016; Konstantatou, D'Acunto and McRobie, 2018); дијаграми за суми на Минковски во однос на теоремата за патека на оптоварување на Максвел (McRobie, 2016); адресирање на нецелосноста на Ранкиновиот реципрочитет; како и генерализацијата на 3Д графичка статика за какви било тродимензионални рамки (McRobie, 2017, 2016). Имајќи ја предвид теоретската природа на овие истражувања, примената на овие принципи на пореални структури од поголеми размери е презентирано од страна на Атанасопулос (Athanasopoulos and McRobie, 2017; Athanasopoulos et al., 2018).

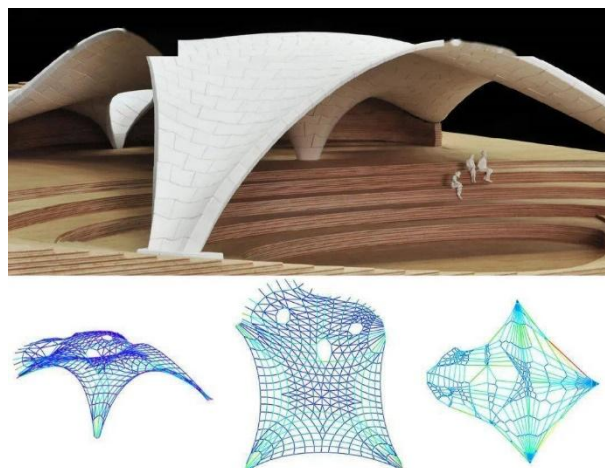
#### 4.4 Преглед на литература во областа на параметарско проектирање

Параметарското проектирање е метод на проектирање во кој влезните параметри преку алгоритми се трансформираат во излезен резултат дефинирајќи сложени форми преку процес заснован на

алгоритамско размислување, каде параметрите и правилата ја одредуваат врската помеѓу влезниот и излезниот резултат. Литературата која е издвоена од областа на параметарско проектирање е организирана методолошки, односно издвоена е она литература која ги користи методите на графичката статика аплицирани на најразлични теми. Разгледуваната литература, прикажува различни методи преку кои графичката статика може да биде имплементирана во различни софтверски пакети, а со цел да се утврди кои пристапи и програмски јазици нудат можност за примена во понатамошното истражување.

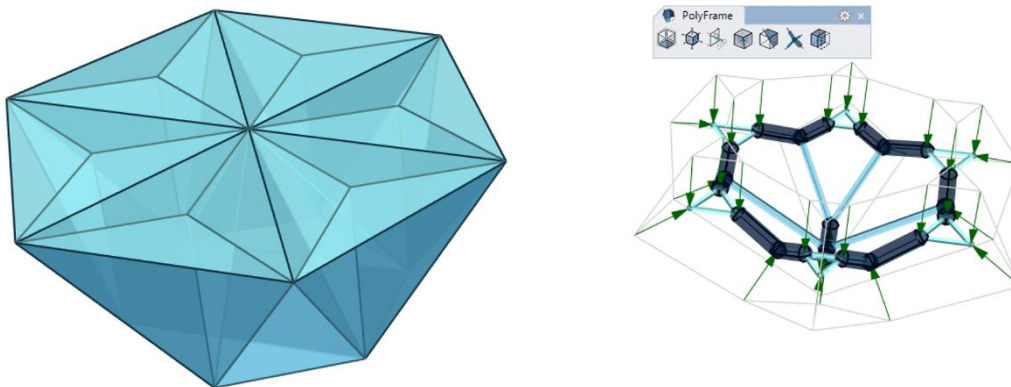
#### 4.4.1 Компјутерски имплементирана графичка статика

Имајќи предвид дека рачното цртање и конструирање на реципрочни дијаграми е долг процес, а слободното манипулирање со дијаграмите откако ќе бидат нацртани не е можно, надградбата на графичката статика се должи на нејзиниот потенцијал да се комбинира со современи алатки за компјутерско проектирање. Процесот на компјутерско цртање создава можност за автоматизирање, нудејќи им на корисниците да манипулираат со структурата во реално време преку менување на дијаграмите на силите, и обратно. Инхерентните параметарски квалитети на графичката статика најпрво беа прикажани преку развојот на 2Д апликации како ActiveStatics (Greenwold and Allen, 2003) InteractiveTHRUST (Block, 2005) и eEquilibrium (Block Research Group, 2010), додека преминот кон 3Д го започна RhinoVAULT (Rippmann et al., 2012), дополнителната компонента е Rhinoceros3D заснована на анализа на мрежата на потисок (TNA) (Block and Ochsendorf, 2007), која претставува интерактивна алатка за пронаоѓање форма на структури на лушпа во слободна форма со помош на реципрочни дијаграми. За да конструира интерактивна 2D форма и дијаграми на сили на рамнина RhinoVAULT врши проширување на графичката статика до димензии „2,5“ при тоа користејќи хоризонтални проекции на 3D структурите. Иако истовремено се обезбедува контрола и на формата и на силите уште во раните фази на проектирање, товарите можат да бидат само вертикални при што компонентата е ограничена на многу специфична структурна типологија на фуникуларни површински структури.



Сл. 2. RhinoVAULT, дополнителна компонента за Rhinoceros за проектирање на фуникуларни форми на лушпи (Rippmann et al., 2012).

Поконкретна имплементација на идејата на Ранкин и тродимензионалната графичка статика е направена преку дополнителните компоненти за Rhinoceros3D, PolyFrame (Nejur and Akbarzadeh, 2021) и 3DGS (Graovac, 2021), кои всушност претставуваат имплементација на реципрочните дијаграми на силата и формата. Најсеопфатна компјутерска основа заснована на 3Д графичка статика која применува полиедарски дијаграми на сили е опишана од Џунеј Ли (2018) преку развивање на генерализирана теоретска основа, поткрепена со формулација на три структури на податоци за решавање на широк опсег на проблеми со рамнотежата вклучувајќи просторни системи на сили.



Сл. 3 PolyFrame додатна компонента за Rhinoceros која го имплементира Ранкиновиот принцип за рамнотежа: прикажана форма добиена за сет од вертикални товари (Nejur and Akbarzadeh, 2021)

## 5. СОСТОЈБА НА КУЛТУРНО НАСЛЕДСТВО НА ГРАДОТ СКОПЈЕ

Огромен дел од културното наследство на градот Скопје, за жал е избришан е неповратно избришан во 1963та година. Во периодот на обнова на градот Скопје, модернистичкото движење во архитектурата ја доживува својата кулминација на глобално ниво. Објектите кои што ќе бидат изградени во постземјотресната обнова припаѓаат на правецот модернизам, кој што ќе стане главна одлика на архитектурата на градот Скопје. И покрај тоа што оваа архитектура датира од „блиското“ минато и многу често нејзините историски вредности не се препознаени, таа несомнено претставува големо културно - историско и градителско наследство. Модернистичката архитектура носи со себе револуционерна идеологија не само во културолошка и архитектонска смисла, туку и во градежна смисла, особено во употребата на новите конструктивни системи и градежни материјали. Традиционалните начини на изградба и материјали се напуштени, а преку светските трендови на градење, кои ќе се прошират во Скопје како град на солидарноста, градежништвото ќе доживее голем подем особено во текот на 70те и 80те. Главен градежен материјал е бетонот, а скелетните конструкции со посмели распони одобрени од страна на ново оформениот Институт за Земјотресно Инженерство и Сеизмологија (како постземјотресна реакција), се одлика на модерното градежништво на градот. Кога станува збор за енергетската ефикасност, одржливоста, термалниот комфор и условите за живот кај објектите од модернизмот, со оглед на нивната застапеност со повеќе од 60% (Дескова, 2015), постои сериозен проблем во однос на нивната потрошувачка на енергија и загадување на градот. Овие објекти, спаѓаат во групата на големи потрошувачи на енергија, особено затоа што се проектирани и градени без примена на доволна топлинска

изолација или уште почесто, во комплетно отсуство на термоизолациони материјали (Николовски, 2014). Од друга страна, благодарение на интернационалните организации за заштита на градителското наследство како што е DOCOMOMO1 и ICOMOS2, проблемот за прифаќање и третирање на објектите од модернизмот како културно историско и градителско наследство одамна е поставен и продлабочен од страна на архитектите на глобално ниво, а од неодамна и кај нас. Голем број на објекти од модернизмот ширум светот се заштитени како културно наследство. Во последните неколку години архитектите во Македонија се борат за заштита на македонската модернистичка архитектура. Она што претставува предизвик и големо проблемско подрачје како во светски рамки, така и кај нас е прашањето како модернистичката архитектура, чиј што автентичен архитектонски израз не смее да се компромитира, да се усогласи со денешните стандарди за енергетска ефикасност, да се продолжи нејзиниот животен циклус и да се зголеми термалниот комфор во овие објекти.

Со цел правилно да се пристапи кон решавање на овој проблем, најпрво се анализирани објектите кои претставуваат културно наследство на ниво на град Скопје, од кои подоцна селектирани за анализа само објектите од модернизмот. Темелната анализа на објектите од модернизмот во Скопје, што претставува и тема на истражување во овој проект овозможува да се дојде до увид за нивната моментална состојба, степенот на деградација, степенот на сочуваност, режимите на заштита како културно наследство, спроведените мерки и интервенции за нивно реновирање, нивните конструктивни системи и градежни материјали и сл. Ова е многу значајно за одредување на проблемите со кои се соочува секоја категорија од овие објекти, поделбата на истите во различни категории како и селектирање на најранливата категорија што е најподложна на деградација и претставува најголем предизвик во процесите на обнова, што претставува и заклучок на ова истражување.

### 5.1 Режими на заштита

Недвижното културно наследство во Македонија, согласно Правилникот за валоризација, категоризација и ревалоризација на културното наследство (2020) се определува според видот и категоријата односно заштитниот статус на доброто и може да биде: режим на заштита од прв степен, втор степен и трет степен. Режим на заштита од прв степен се применува на културно наследство од особено значење и резервирана археолошка зона. Режим на заштита од втор степен се применува на значајно културно наследство и добро под привремена заштита. Режим на заштита од трет степен се применува на контактните зони. Според (Правилник, 2005) објаснети се значењата на секој од заштитните режими:

- Режимот на заштита од прв степен подразбира чување, почитување, одржување, негување и користење на доброто, согласно неговата намена, како и конзервација, превентива и реставрација на негова непосредна заштита.
- Режимот на заштита од втор степен подразбира зачувување на изворната состојба и можност за: адаптација, ревитализација, уредување или изградба на нови објекти на празните локации, под одредени услови и интервенции врз делови во функција на подобра презентација.
- Режимот на заштита од трет степен подразбира прилагодување на архитектонскиот израз и ограничување во поглед на габаритот и катната височина на објектите.

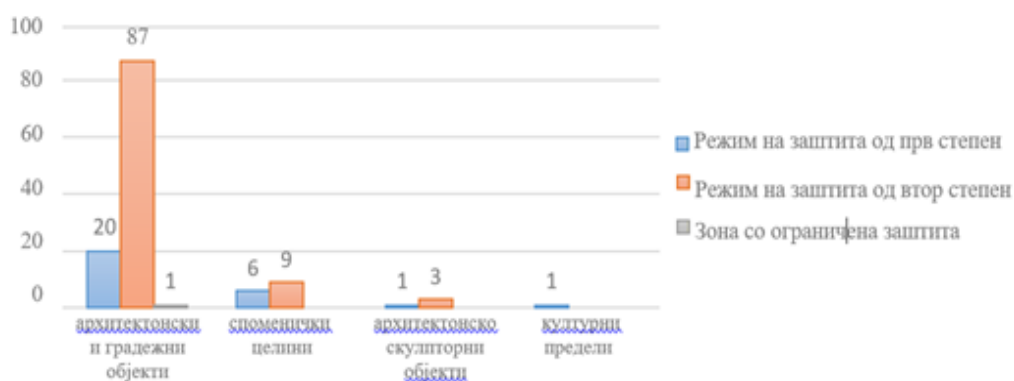
### 5.1.1 Културно наследство на ниво на град Скопје

Согласно последните податоци од Регистарот на недвижни споменици на културата во надлежност на НУ Конзерваторски центар на град Скопје (ЗКО, 2012-2022) направена е анализа на сите видови на евидентирани и заштитени културни споменици во Скопје и нивните режими на заштита. Анализата опфаќа: процентуална застапеност на различните категории на културни споменици и на режимите на заштита, групирање на културните споменици согласно категорија и режим на заштита и на крај идентификација на предложени објекти за заштита од периодот на модернизмот и нивна застапеност. Согласно спроведеното истражување, евидентирани и заштитени се 128 споменици и споменички целини под град Скопје, од кои 85% се архитектонски и градежни објекти (јавни, административни, станбени, комунални, инфраструктурни објекти и сл.), 11% се споменичките целини, 3.2% се архитектонско скулпторни објекти и 0.8% се културни предели ставени под различен режим на заштита (сл. 4). Со режим на заштита од прв степен заштитени се 22.6%, од втор степен заштитени се 76.6% додека 0.8% претставува зона со ограничена заштита (сл.4). Режимот на заштита од трет степен подразбира контактна зона на објекти во склоп на едно заштитено подрачје.



Сл. 4 Процентуална застапеност на различни категории на културни споменици (лево) Процентуална застапеност на режимите на заштита кај културните споменици (десно)

Под режим на заштита од прв степен заштитени се 20 архитектонско градежни објекти, 6 споменички целини, 1 архитектонско скулптурен објект и 1 културен предел. Под режим на заштита од втор степен заштитени се 87 архитектонско градежни објекти, 9 споменички целини и 3 архитектонско скулпторни објекти и 1 архитектонски објект е под зона со ограничена заштита. Најголем процент од културното градителско наследство на Скопје припаѓа на архитектонско градежните објекти заштитени под режим на заштита од втор степен (сл.5).

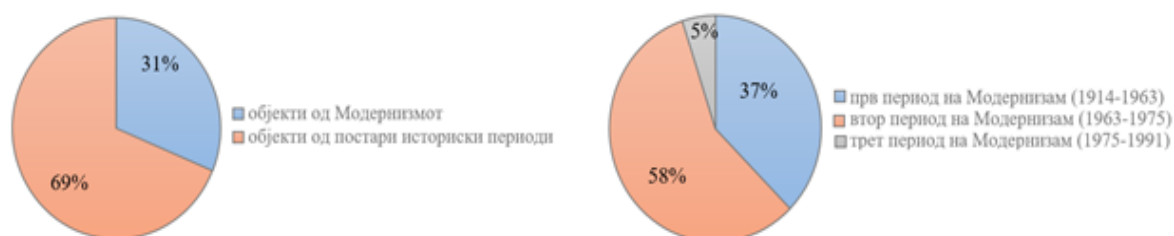


Сл. 5 Застапеност на културните споменици по категории и заштитен режим

### 5.1.2 Објекти од модернизмот како културно наследство на градот Скопје

Согласно податоците од ЗКО за ГУП на град Скопје (ЗКО, 2012-2022) голем број од објектите од модернизмот се предложени да бидат заштитени како културно наследство. Од вкупната бројка на заштитени градби, 31% се предложени за објектите од модернизмот, додека 69% на објектите од постарите историски периоди (од антички период до 19<sup>ти</sup> век), слика 9. Имајќи ја предвид големата градежна продукција на модернизмот во текот на краток временски интервал на градење, во споредба со долгиот временски интервал на градење за време на другите периоди, базиран врз сведоштва и археолошки пронајдоци кои тврдат дека Скопје е населен уште од 4000 г.п.н.е (Chulev, 2014), може да се заклучи дека градбите кои и припаѓаат на **модернизмот претставуваат исклучително значајно градителско културно наследство на градот Скопје.**

Најголема улога има деструктивниот земјотрес, што може да се види преку највисоката процентуална застапеност на предложени објекти за заштита во вториот период (1963 – 1875), сл.10, каде



Сл. 6 Процентуална застапеност објекти од модернизмот и од постари историски периоди (лево)  
Процентуална застапеност на објекти од различни период на модернизмот (десно)

што за период од неполни две децении архитектонско градежната продукција го достигнува својот врв, не само во интензивна изградба, туку особено, во изградба на значајна архитектура. Застапеноста на заштитени објекти од првиот период (1914 – 1963) е 37%, на вториот период (1963 – 1975) е 58% и третиот период (1975-1991) е 5%, прикажано на сл.9.

### 5.2 Критички избор на референтни архитектонски примероци

Објектите од модернизмот го сочинуваат најголемиот дел од градежниот фонд на град Скопје, а истовремено голем дел од нив се проценети како значајно културно наследство. Дел се веќе заштитени како културно наследство, додека дел се предложени да бидат заштитени под соодветен режим. Од погоре спроведената анализа согласно (ЗКО, 2012-2022), процентот на објектите од модернизмот кои се листата да бидат заштитени, изнесува над 30%, во однос на останатите временски периоди. Прегледувајќи ја домашната, но и светската литература, во Скопје се наоѓаат едни од најуникатните примероци на модернистичка архитектура. Голем процент од од вие објекти без разлика дали се заштитени или не, не се соодветно реновирани или воопшто не се реновирани. Најголеми проблеми кај објектите од модернизмот се јавуваат поради нивните екстремно слаби термички карактеристики како и начините на греење и ладење во нив.

Досега, објектите од модернизмот во Скопје, многу пати се истражувани и анализирани само од архитектонски аспект, попрецизно, анализирани се нивните архитектонски вредности (Дескова, 2015).

Меѓутоа, досега не е отворено прашањето за енергетските карактеристики на овие градби од аспект на енергетска ефикасност, потрошувачка на енергија, начини на греење и ладење, одржливост, термален комфорт, ниту пак се направени научни и систематски истражувања за решавање на овие прашања. Овој дел од трудот има за цел да ги анализира објектите од модернизмот на поинаков начин, односно да се направи увид во нивната конструкција, градежни материјали, степен на сочуваност, мерки за заштита и обнова, моментална состојба и сл.

За таа цел, направено е систематско истражување врз 50 вредни архитектонски примероци од модернизмот во Скопје. Објектите се селектирани врз основа на нивната архитектонска вредност, хронолошка и функционална застапеност (со цел да се опфатат објекти од сите периоди и со различни намени од модернизмот). Истражените објекти се анализирани од аспект на нивните градежно-архитектонски карактеристики: конструктивен систем, градежни материјали, термички карактеристики (присуство на термоизолациони материјали); како и од аспект на нивната состојба како културно наследство, сочувана автентична состојба, состојба после обнова (реновирање или реконструкција), проценка на соодветна или несоодветна обнова, намена, форма, катност, волумен и типологија. Ова истражување овозможува утврдување на градежната анатомија и патолошките проблеми со кои се соочуваат модернистичките градби. Заклучоците од анализата овозможуваат да се извршат компаративни согледувања од повеќе аспекти на различни типови на објекти и да се даде генерална слика за моменталната состојба на највредните објекти од модернизмот во градот.

Целта на темелната анализа е утврдување на најзастепената типологија на објекти, која истовремено е и најпроблематична во однос на нивните термички карактеристики и енергетска ефикасност, чиешто претставници ќе бидат предмет на продлабочено истражување.

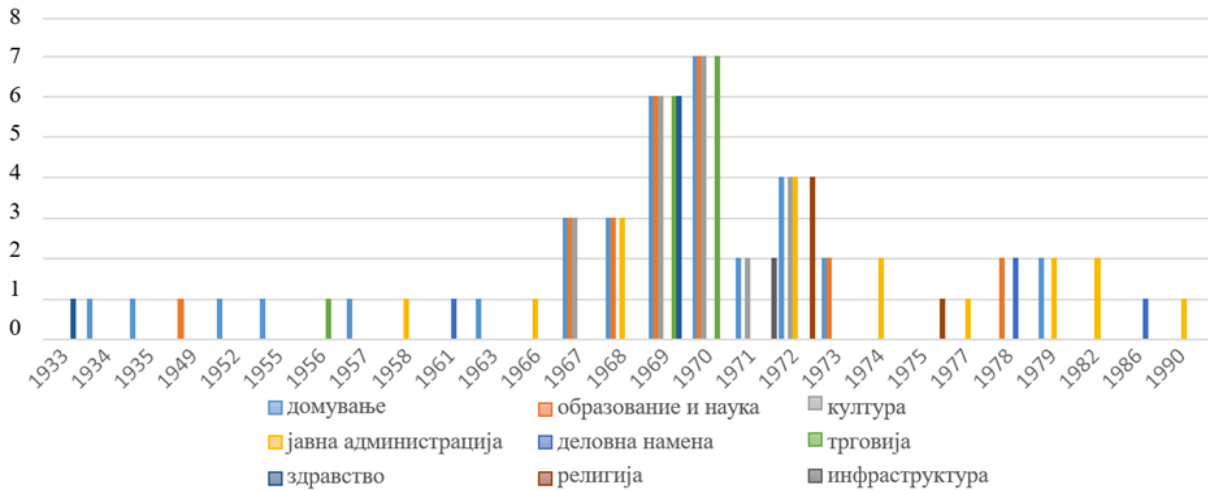
### 5.3 Резултати од спроведената анализа на објекти од модернизмот

Добиените резултати од спроведената анализа на објектите од модернизмот во Скопје, проследени низ трите периоди на модернизација на градот, се сумирани и образложени во однос на слте анализирани аспекти и се донесени заклучци во однос на објектите од модернизмот во Скопје.

#### 5.3.1 Хронологија на градење и намена на објектите

Најпрво преку хронолошки дијаграм за времето на изградба и класите на намена е прикажан интензитетот на градење низ годините, како и застапеноста на различните намени на објектите (сл. 7). Од оваа анализа може да се заклучи дека интензитетот на градење е најсилен после земјотресот особено во годините после донесувањето на новиот урбанистички план за реизградба на градот, т.е. периодот 1966 - 1975та кои го дефинираме како „период II” на модернизмот во Скопје. Исто така од дијаграмот може да се забележи дека во тој период се изградени најголем број од станбените објекти, јавните институции: јавна администрација, објекти од образование, наука, култура, трговија, здравство, инфраструктура. Во периодот пред земјотресот, поточно годините 1933-1963 односно „период I” најмногу доминира изградба на станбени објекти, додека во периодот од 1975-1990 односно „период III” доминираат комерцијално – деловни и административни згради. Ова укажува дека најпродуктивниот градежен период во Скопје е

периодот од 60те до крајот на 70те години. До денес, во овие објекти се сместени едни од најзначајните јавни функции.



Сл. 7 Хронологија на градба и намена на објектите од модернизмот во Скопје

На сл. 8 е прикажан процентот на застапеност на класите на намени на објектите низ сите три периоди. Најголема застапеност имаат станбените објекти (22%), потоа образовните објекти (18%) и јавната администрација (18%), па објектите од културата (16%) и со помала застапеност се деловните објекти (10%), трговските објекти (6%), здравствените (4%), верските (4%) и инфраструктурните т.е. објекти за транспорт (2%).



Сл. 8 Процентуална застапеност на намени

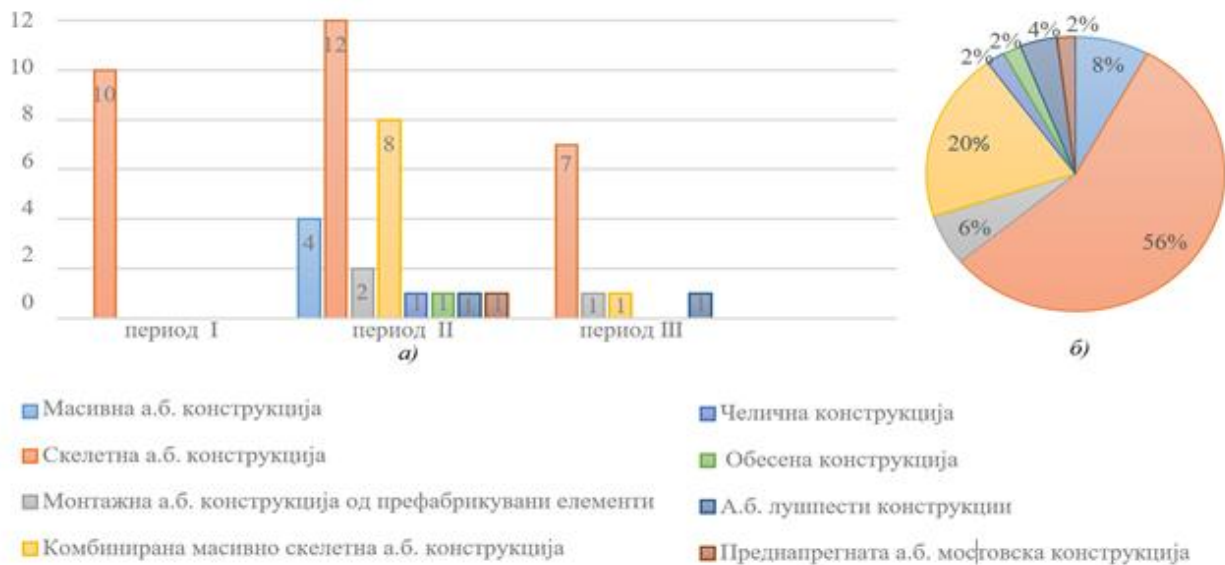
### 5.3.2 Застапеност на различни конструктивни системи

Конструктивните системи на истражените градби се групирани во осум типологии и тоа: масивен а.б. конструктивен систем, скелетен а.б. конструктивен систем, монтажнен а.б. конструктивен систем од префабрикувани а.б. елементи, комбиниран (мешовит) а.б. систем од а.б. скелетно – масивна или ободна конструкција (кај големи рапони); челичен конструктивен систем; обесена конструкција (челик и бетон), лушпеста а.б. конструкција и конструкција од преднапрегнат армиран бетон. (сл.9).

Истражуваните објекти до 1963та година (I период) се градени како а.б. скелетни конструкции (10 објекти). Истите доминираат и во период II (12 објекти) и во период III (7 објекти), прикажани на сл. 9-а. 56% од сите анализирани објекти се иведени во а.б.скелетна конструкција (сл. 9-б). Во а.б. масивна

конструкција се изведени претежно објектите од во период II (4 објекти), односно 8% од вкупниот број (сл. 9). Интензивната изградба со цел брзо вдување на што повеќе жители, после 1963та, резултира со појавата на монтажни а.б. конструкции од префабрикувани елементи (п.а.б. системи). Најчесто станбената архитектура и училиштата се изведувани од овие системи. Од овој конструктивен тип се изведени 6% од истражуваните објекти (период II – 2 објекта, и период III – 1 објект). (сл. 9).

Голем дел од објектите се изведувани и во комбиниран (мешовит) а.б. скелетно – масивен систем. Тоа се најчесто објекти каде што во еден дел има можност да се изведе класична скелетна конструкција,



Сл. 9 Типови на конструктивни системи а) согласно периоди на изградба б) процент на застапеност

но кај одредени простории (сали, аула, централни холови) се употребени а.б. платна или дебели бетонски површини – пилони. Исто така кај објекти со големи распони, се среќаваат и а.б. ободни конструкции. Конструкциите изведени од армиран бетон каде што се употребени повеќе видови на конструктивни системи (тоа се најчесто јавните институции, образовните институции и објектите од културата) се сместени во типологијата на комбинирани а.б. системи кои исто така се најмногу застапени во период II, најчесто кај „бруталистичките“ објекти, (8 објекти) и период III (1 објект) со застапеност од 20 %, веднаш после скелетните а.б. конструкции (сл. 9-а и б). Изведбата во челична скелетна конструкција, се појавува во период II (1 објект) т.е. 2% од вкупниот број истражени објекти иако челичните конструкции се употребувани и во другите конструктивни системи, особено за премостување на големи распони со челични рамки и решетки и сл. кај дел од истражуваните објекти (пр. аула кај ОУ „Јохан Хајнрих Песталоци“; МОБ, МКЦ и др.). Со иста застапеност се и конструкциите од преднапрегнат армиран бетон кој се појавува исто во период II (1 објект) односно 2%, најчесто кај инфраструктурните објекти (Транспортен центар). Лушпестите конструкции се карактеристични за верските објекти (Соборен храм - период II и Католичка црква, – период III) изведени од а.б. лушпести конструктивни системи, со масивни сидови и а.б. столбови, пилони, платна, со вкупна застапеност од 4% (сл. 9-а и б).

### 5.3.3 Застаепност на градежни материјали употребени во обвивката на објектите и нивни термички карактеристики

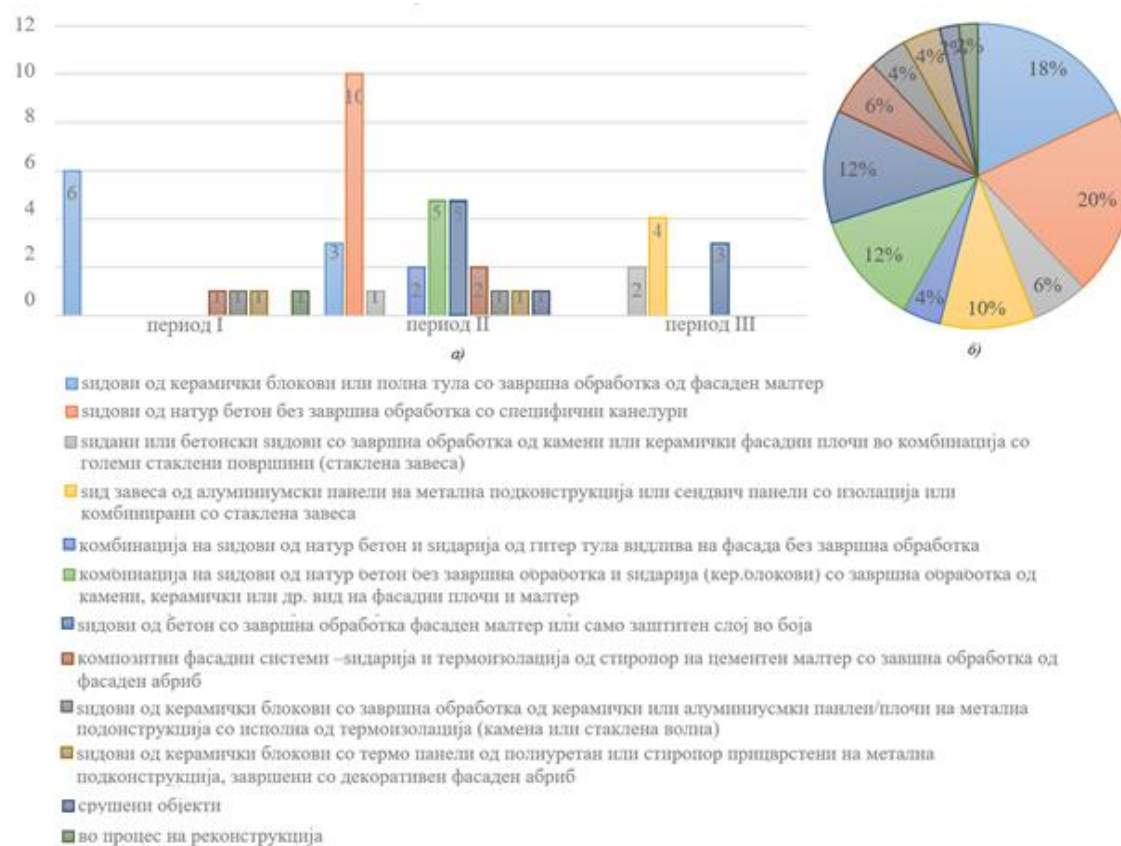
Најголем број од постоечките згради се стари околу 40 години и немаат надворешна топлинска изолација. Се проценува дека само 6% од зградите во земјата имаат енергетска класа „C“ или „D“, додека останатите згради може да се класифицираат во енергетска класа „E“, „F“ или „G“. (Блажев, 2017). Согласно (Блажев, 2017) повеќе од 90% од зградите немаат вградена термоизолација на надворешните ѕидови, покривот и основата. Во државата, во последните 10-15 години е воведена пракса на употреба на термоизолациони материјали на обвивките на зградите. Надворешните ѕидови, се најзначајниот дел од обвивката на објектот, кои со најголем процент учествуваат во вкупните загуби на топлинска енергија на објектот. Со соодветна изолација на обвивката, заштедите во однос на трошоците за греење може да се намалат дури и за 80 до 90%, во зависност од состојбата на ѕидот и од видот на вградената термоизолација. Согласно (Блажев, 2017) според спроведените енергетски контроли на стари објекти без термоизолациони материјали, како и во зависност од материјалите употребени во слоевите на надворешните ѕидови, максималните U коефициенти се 1.30 W/m<sup>2</sup>K. Додека измерените максимални U коефициенти на денешните градби после мерките за EE, како и максимално дозволените согласно (Правилник, 2013) се од 0.31-0.35 W/m<sup>2</sup>K (Блажев, 2017).

За да се дојде до податоци за структурата на обвивката, особено на надворешните ѕидови на анализираните објекти од модернизмот, кое подоцна резултира со селектирање на студија на случаи токму врз основа на структурата на надворешните ѕидови, спроведено е истражување кое доведе до групирање на објектите во 10 групи. Надворешните ѕидови согласно употребените градежни материјали се групирани во следните типови: ѕидови од керамички блокови или полна тула со завршна обработка од фасаден малтер:

- ѕидови од натур бетон без завршна обработка со специфични канелури;
- ѕидани или бетонски ѕидови со завршна обработка од камени или керамички фасадни плочи во комбинација со големи стаклени површини (стаклена завеса);
- ѕид завеса од алуминиумски панели на метална подконструкција или сендвич панели со изолација или комбинирани со стаклена завеса;
- комбинирани ѕидови од натур бетон и ѕидарија од гитер тула видлива на фасада без завршна обработка;
- комбинирани ѕидови од натур бетон без завршна обработка и ѕидарија (керамички блокови) со завршна обработка од камени, керамички или др. вид фасадни плочи и малтер;
- ѕидови од бетон со завршна обработка фасаден малтер или само заштитен слој во боја
- композитни фасадни системи – ѕидарија и термоизолација од експандиран полистирен на цементен малтер со завршна обработка од фасаден абриб;

- ѕидови од керамички блокови со завршна обработка од керамички или алуминиумски панели/плочи на метална подонструкција со исполна од камена или стаклена волна;
- ѕидови од керамички блокови со термо панели од полиуретан или експандиран полиситрен прицврстени на метална подконструкција, завршени со декоративен фасаден абриб.

Застапеноста и бројот на различните типови на ѕидови според употребените градежни материјали се прикажани на сл. 10. каде што сл. 10-а го прикажува бројот на објекти изградени од конкретните типови на надворешни ѕидови во одреден период, додека сл. 10 -б ја прикажува вкупната процентуална застапеност за секој од типовите.



Сл. 10 Типови на надворешни ѕидови според употребени градежни материјали

а) по период б) вкупен %

Од сл. 10, може да се заклучи дека најголем процент зафаќаат објектите чии што надворешни ѕидови се изградени од натур бетон без никаква надворешна обработка со или без специфичен фасаден дизајн – канелури, со застапеност од 20%. Овие објекти се најпроблематични во однос на повеќе аспекти, особено екстремно слабите термички својства на бетонот. Потоа со 12% застапеност се ѕидовите изведени од керамичка ѕидарија (блокови или тули) со завршен фасаден малтер. Со иста застапеност од 18% се комбинирани ѕидови од натур бетон без завршна обработка во комбинација со ѕидарија од гитер тула видлива на фасада, или во комбинација со ѕидарија од керамички блокови или тули но со завршна обработка од камени, керамички облоги или малтер, исто со удел од 12%. Објектите изведени како ѕид завеса од алуминиумски панели на метална подконструкција или сендвич панели со изолација или

комбинирани со стаклена завеса се застапени 10%. Застапеност од 6% имаат објектите изведени од сидани или бетонски сидови со завршна обработка од камени или керамички фасадни плочи во комбинација со големи стаклени површини (стаклена завеса). Ист удел од 6% имаат и објектите чии сидови се од композитни фасадни системи – сидарија и термоизолација од експандиран полистирен на цементен малтер со завршна обработка од фасаден абриб. Тоа се претежно реновираните објекти со дополнителен слој на термоизолација. Застапеност од 4% припаѓаат на објектите чии сидови се изведени од керамички блокови со завршна обработка од керамички или алуминиумски панлеи/плочи на метална подонструкција со исполна од термоизолација (камена или стаклена волна), исто и овде станува збор за подоцна реновирани објекти со додадени дополнителни слоеви на термоизолација. Ист удел од 4% имаат и сидови од керамички блокови со термо панели од полиуретан или експандиран полиситрен прицврстени на метална подконструкција, завршени со декоративен фасаден абриб, подоцна реновирани со додадена изолација. Останатите 4% припаѓаат на објекти чии што фасади се моментално во процес на реконструкција или обнова, или се срушени и не постојат повеќе.

Врз основа на спроведената проектна и теренска документација на истражуваните објекти и според (Блажев, 2017) се проценува дека градежната столарија (прозорци и надворешни врати), датира од периодот на нивната изградба и истата е најчесто изработена од дрвени профили со едноструко или поретко двоструко застаклување со различен квалитет на дрво и изработка. Во последните две-три децении, на пазарот во земјата е присутна градежна столарија изработена од алуминиумски, а во поново време од пвц профили, со сè подобри термички карактеристики (термопан стакла, најчесто изработени од две стакла помеѓу кои просторот е вакумиран или исполнет со инертен гас. Прозорците имаат големо учество во вкупните загуби, што укажува на нивното значење за енергетската ефикасност на еден објект. Губитоците на топлина низ прозорците се трансмисиjsки губитоци и истите може да изнесуваат и до 50% од вкупните топлински загуби низ обвивката на зградата (Гаврилоска, 2014). Замената на постојните прозорци што имаат висок коефициент на пропустливост ( $U=3,0-3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  кај стари објекти, па и повисок кај еднослојни стакла) со прозорци со помал коефициент на пропустливост (препорачано  $U=1,4-1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ , односно за нискоенергетски и пасивни објекти  $U=0,8-1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) е една од клучните препорачани интервенции за подобрување на енергетската ефикасност (Гаврилоска, 2014). Од истражуваните објекти целосна промена на столаријата (од дрвена или алуминиумска со едноструки стакла во пвц столарија со двоструки или троструки стакла) имаат 24% од објектите. Кај 26 % од објектите столаријата е делумно променета само во сегментни, тоа е најчесто кај станбените објекти по иницијатива на станарите. Останатите 50% имаат незадоволителна столарија согласно прописите за енергетска ефикасност.

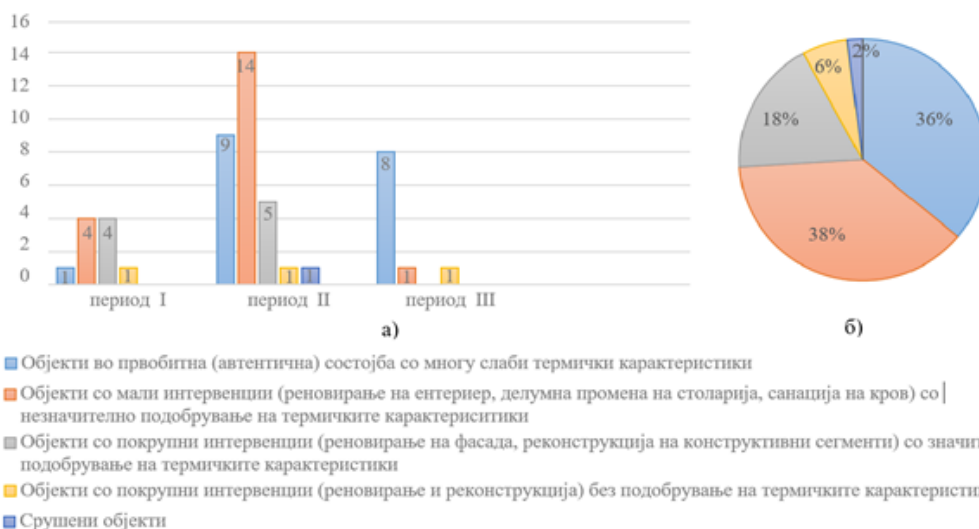
Во вкупните топлински загуби кај еден објект, покривот учествува со 10 до 30%. Изолацијата на покривот спаѓа во една од клучните препорачани мерки кај објектите кај кои се дејствува во насока на постигнување високо ниво на енергетската ефикасност, поради брзиот поврат на инвестицијата. Објектите од модернизмот најчесто се изведувани како рамни кровови без или со недоволна термичка изолација. Рамните кровови за разлика од косите, се уште попроблематични не само поради одведувањето на атмосферската вода, туку и од начините на поставување на топлинска и хидроизлација. Санација и промена на кровот со подбрани термички карактеристики имаат само 28% од објектите. Останатите 72% од објектите се без термоизолација или со недоволни термоизолациони материјали проектирани согласно

тогашните стандарди. Топлинските загуби на подовите на земја се понезначителни во споредба со загубите кај надворешните ѕидови, кај прозорците и кај покривите. Тие изнесуваат приближно 6-10% и кај новите градби се препорачува да се третираат соодветно. Кај постојните објекти каде што зафатот за изолација би бил покомплициран, а земајќи го предвид малото учество во вкупните загуби на енергија преку обвивката, интервенциите не се секогаш економски оправдани, што значи дека не се неопходни. Кај истражуваните објекти многу ретко се спроведувани интервенции со додавање на термоизолација на подовите кон терен.

#### 5.3.4 Видови на спроведени мерки за обнова, подобрување на термичките карактеристики и заштита на објектите и нивна застапеност

Од спроведеното истражување и анализа добиен е конкретен број на објекти кај кои се спроведени различни интервенции на обнова (реновирање, реконструкција или реставрација), било тоа да се соодветни или несоодветни интервенции кои што ја доведуваат во прашање нивната оригиналност. Интервенциите се групирани во четири групи, врз основа на два значајни аспекти: согласно обемот на интервенцијата (помали или покрупни интервенции) и согласно степенот на подобрување на нивните термички карактеристики. Групите на интервенциите спроведени врз истражуваните објекти се:

- Објекти во првобитна (автентична) состојба со многу слаби термички карактеристики (без термоизолациони материјали);
- Објекти со мали интервенции (реновирање на ентериер, делумна промена на столарија, санација на кров) со незначително подобрување на термичките карактеристики;
- Објекти со покрупни интервенции (реновирање на фасада-што подразбира додавање на термоизолација, реконструкција на конструктивни сегменти) со значително подобрување на термичките карактеристики;
- Објекти со покрупни интервенции (реновирање и реконструкција) нито без подобрување на термичките карактеристики, односно без додавање на термоизолациони материјали.



Сл. 11 Типови на спроведени интервенции (реновирање, реконструкција, и сл.) а) по период б) вкупен %

Резултатите од анализата за спроведените интервенции сумирани и прикажани на слика 11 покажуваат дека најмногубројни се објектите кај кои што се спроведени минимални интервенции, особено во промена на столаријата. Тие опфаќаат 38% од вкупниот број на анализирани објекти. Тоа укажува на потребата за подобрување на енергетската ефикасност на овие објекти, но исто така и на недолната грижа и заштита како и големиот степен на деградација на истите. Делумната промена на столаријата или само кровот, недоволно ја подобрува енергетската ефикасност, доколку ѕидовите останат неизолирани. Голем дел се објекти кои што се во својата првобитна оригинална состојба, и истите се со многу слаби енергетски перформанси и подложни на висок степен на деградација. Ваквите објекти се со застапеност од 36%. Објектите кај кои се спроведени покрупни интервенции односно целосно се реновирани, каде што е променета нивната фасада и е додадена термоизолација на фасадата и кровот, како и променета е столаријата во целост, се застапени со 18%, и кај нив има значително подобрување на термичките карактеристики. Меѓутоа постојат и објекти, кои се реновирани или реконструирани, но немаат подобрување на енергетската ефикасност, затоа што во интервенциите не се додадени термоизолациони материјали. Тој процес, е најчесто реставрација на овие објекти, каде што поради зачувување на автентичноста, енергетската ефикасност е занемарена. Ваквите објекти имаат удел од 6%.

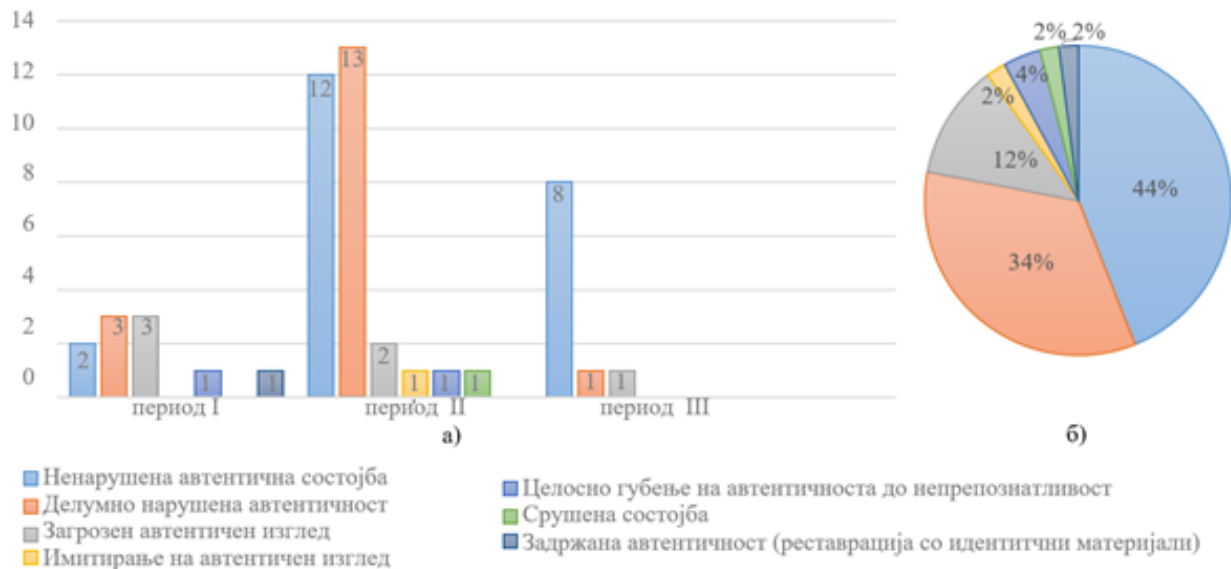
Од спроведената анализа може да се заклучи дека 80% од истражуваните објекти имаат многу слаби термички карактеристики и спаѓаат во групата на големи потрошувачи на енергија и објекти со лош термален комфор.

### 5.3.5 Реперкусии од спроведени мерки за обнова, подобрување на термичките карактеристики и заштита, на сметка на автентичноста на објектите

Кога станува збор за спроведување на мерки за обнова на објектите кои претставуваат културно наследство, не може, а да не се настојува во процесот на обновата максимално да се почитува оригиналноста на зградата односно нејзиниот автентичниот изглед. Обновата на културното наследство е сложен процес, кој дополнително е усложнет доколку тоа претставува архитектонски објект кој што е во секојдневна функција како станбена или административна зграда. Тука ја додаваме и енергетската ефикасност на зградата, како задолжителна мерка во процесот на реновирање. Моментално најактуелен проблем на глобално ниво е обновата т.е. реновирањето токму на историските објекти, со што истите треба енергетски да се подобрат а нивната оригиналност да остане непроменета. Професионалците што се занимаваат со оваа проблематика се во постојана контрадикторност околу поставувањето на соодветна методологија во пристапот кон решавање на енергетската ефикасност кај историските градби, особено објектите од модернизмот, кои се покажаа како најранливи. Решението се почесто го гледаат во компромис кој би резултирал со минимален импакт во однос на автентичноста а подобрување на енергетските карактеристики.

За таа цел, спроведена е анализа за тоа колку со погоренаведените постапки (Сл. 12-а и 12-б) за обнова (мали или покрупни интервенции со или без подобрување на термичките карактеристики на објектите) е загрозен идентитетот на градбата, односно оригиналниот автентичен израз. Анализата е прикажана на сл. 12-а и 12-б, каде што, објектите врз кои е извршена или не е извршена било каква интервенција се поделени во неколку групи на загрозеност и тоа:

- Ненарушена автентична состојба
- Делумно нарушена автентичност
- Загрозен автентичен изглед
- Имитација на автентичен изглед
- Целосно губење на автентичноста до непрепознатливост
- Задржана автентичност преку реставрација со идентични материјали
- Срушени објекти кои биле значајни културни споменици



Сл. 12 Состојби на зачуваност на автентичен изглед а) по период б) во проценти

Резултатите прикажани на сл. 12 покажуваат дека сеуште, преовладуваат објектите кои се во оригинална состојба со ненарушен автентичен изглед со удел од 46%. Тоа се должи на фактот дека кај добар дел од овие објекти не се спроведени никакви интервенции или се спроведени минимални интервенции како само санација на кров или реновирање на сегменти од ентериерот кои најчесто не ја нарушуваат автентичноста на целокупниот архитектонски израз. Потоа се објектите со делумно нарушен автентичен изглед со 31%, што најчесто се должи на малите интервенции на фасадата како несоодветната промена на прозорците и надворешните врати кај најголем дел од истражуваните објекти, исто образложени погоре. Објектите со загрозена автентичност земаат удел од 13%. Тоа најчесто подразбира целосна промена на фасадата на објектот на несоодветен начин, поточно со сосема различни материјали и техника на изведба од оригиналната (каков што е примерот со поранешниот хируршки центар), и др. меѓутоа архитектонската естетика, архитектонскиот стил и движење, формата, волуменот и генералниот изглед се задржани. Променет е само материјалот или бојата на фасадата, како и минимални промени во габаритот поради додавањето на термоизолација.

Имитирање на автентичниот изглед е најупотребувана мерка на обнова, заштита и подобрување на градбите од модернизмот, затоа што тука станува збор за т.н. компромис кој подразбира зачувување на оригиналноста на објектот преку создавање на еден вид реплика со подобрени перформанси. Меѓутоа, од анализираниите примери во Скопје, има значително мал процент на такви објекти. На тој начин е обновен само еден објект, чија што реконструкција го почитува оригиналниот изглед, и покрај одредените промени

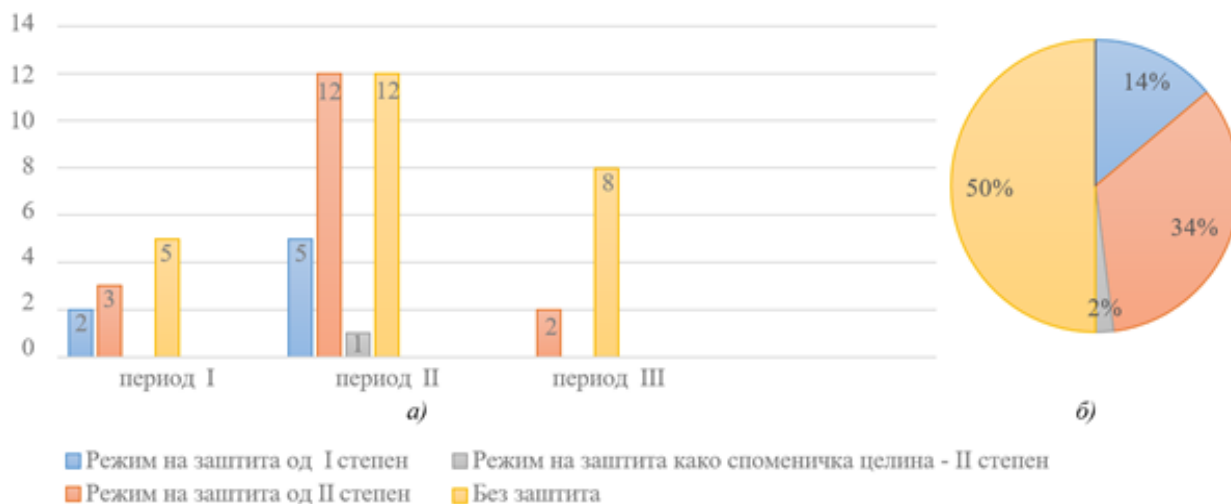
на сметка на оригиналноста (минимална промена на габаритот поради поставување изолација, промена на дебелината на столаријата и сл.) со цел подобрување на објектот. И покрај тоа што во овој случај, објектот е земен за позитивен пример, сепак, споредувајќи ја оригиналната со реновираната состојба, може да се заклучи дека денес, имајќи на располагање голем број на иновативни термоизолациони материјали, поставувањето на екструдирани полистирен на историски објект не е оправдан.

Објекти кај кои што е задржана автентичноста преку употреба на идентични материјали односно процес на реставрација е спроведена кај еден објект, меѓутоа со текот на времето, автентичниот израз е нарушен поради вграденото пвц столарија од страна на станарите.

Кај 4% од објектите се спроведени сосема неадекватни интервенции, кои што не можат да се стават во ни една од методолошките постапки за третирање на градителското наследство (реконструкција, реставрација, реновирање и сл.). Со овие интервенции целосно е променет изгледот на градбата до непознаватливост, односно подразбираат: неадекватна промена на надворешниот изглед: материјал, боја, пластика, форма и димензии; комплетна промена на архитектонската естетика, стил, движење, пропорции, габарит, т.е. целокупен архитектонски израз. Негрижата за објектите од објектите од модернизмот резултира дури и со рушење на значаен објект.

### 5.3.6 Режији на заштита кај објектите и нивна застапеност

За крај, анализирани се објектите од модернизмот кои што се веќе заштитени или само евидентирани и предложени да бидат заштитени како културно наследство под соодветен режим, и анализата е прикажана на сл.13.



Сл. 13 Поделба на објектите согласно степенот на заштита а) по периоди б) процентуално

Според податоците од Управата за заштита на културното наследство како и НУ Конзерватроски центар на град Скопје, 50% од истражуваните објекти воопшто не се евидентирани како културни споменици и за нив не е предложено да бидат ставени под одреден режим на заштита. Бројот на незаштитени објекти е пропорционален во сите три периоди. 34% од вкупниот број на објекти се веќе заштитени или само евидентирани и предложени од страна на институциите да бидат ставени под режим на заштита од втор степен. За разлика од незаштитените, најголем број на заштитени или евидентирани

објекти од втор степен се изградени во вториот период, додека мал број на заштитени објекти од втор степен се изградени во првиот и третиот период. 2% од објектите се под режим на заштита од втор степен како споменичка целина. Под режим на заштита од прв степен се 14% од објектите, најголем дел изградени во вториот период.

### 5.3.7 Детектирање на најранлива категорија на објекти од модернизмот и селектирање на студија на случај

Од анализираниите објекти, може да се заклучи дека најранлива група на објекти кои се најпроблематични во однос на енергетската ефикасност, одржливоста и термалниот комфор, како и најограничени во однос на можностите за конзервација т.е. заштита на нивниот автентичен изглед се оние изведени целосно во натур бетон многу често нарекувани „бруталистички објекти“. Фасадните ѕидови кај овие објекти се изведени целосно од натур бетон, тула или стакло, без никаква надворешна заштита, комплетно изложени на атмосферските влијанија. Голем дел од нив имаат специфичен фасаден дизајн од канелури добиени во процесот на лиење на бетонот „in situ“ во специјално изработени дрвени оплати, или пак без канелури, но каде што трагите од оплатите се видливи на фасада. Истовремено, овие објекти се најмногубројни од сите анализирани примери со застапеност од 20%, т.е. 10 од истражуваните објекти. За разлика од другите ѕидни структури кои најчесто се ѕидани од керамички блокови или тули, со различни завршни обработки: малтер, гитер тули, камени или керамички фасадни плочи, лепени или на метална подконструкција, ѕид завеси и стаклени завеси, кај објектите изведени исклучиво од натур бетон додавањето на термоизолација на фасадните ѕидови, а притоа задржувајќи ја оригиналноста претставува поголем предизвик. Клучните проблеми со кои се соочуваат овие објекти се:

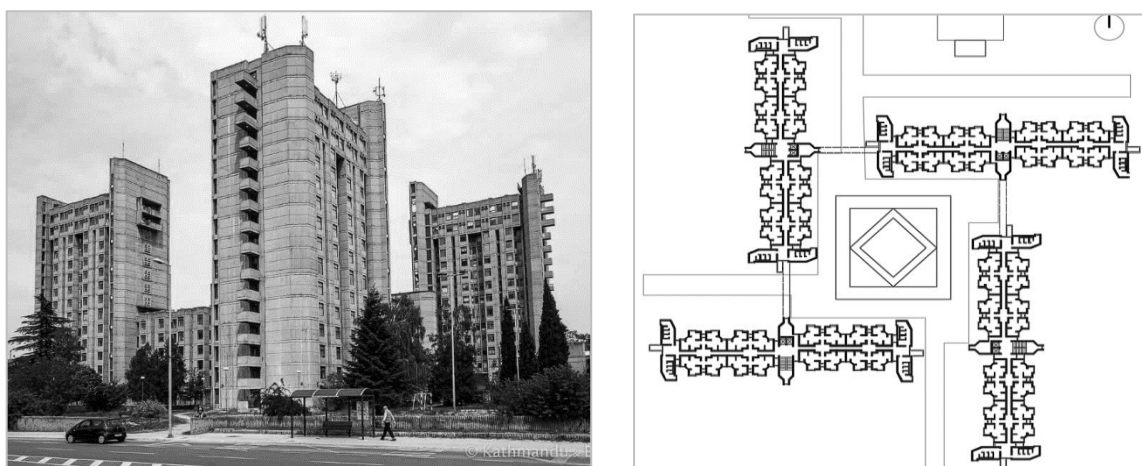
- Висок коефициент на топлинска спроводливост  $\lambda$  W/(Km)
- Висока термална маса
- Изложеност и незаштитеност од надворешни влијанија
- Губење на автентичноста со изолирање на обвивката
- Недостатоци при изолирањето на објектите од внатрешната страна
- Специфичен архитектонски фасаден дизајн
- Голема застапеност на објектите од натур бетон

Целта е да се спроведе 3Д моделирање и симулација на реалната енергетска состојба на еден од објектите од брутализмот - детектирани како најранлива категорија на истражувани објекти, и притоа да се видат реалните недостатоци и проблеми со кои се соочуваат како и информација за реалната потрошувачка на енергија и емисии. За таа цел, е селектирана студија на случај – типичен претставник на објектите од оваа категорија, односно студентскиот дом Гоце Делчев во Скопје.

## 6. МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА НА ЕНЕРГЕТСКАТА СОСТОЈБА НА ОБЈЕКТ СТУДЕНТСКИ ДОМ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ СКОПЈЕ

Студијата на случај за која е направена енергетска анализа е студентски дом во Скопје, граден во 70<sup>те</sup> години од минатиот век. Согласно неговиот архитектонски стил, објектот претставува бруталистичка

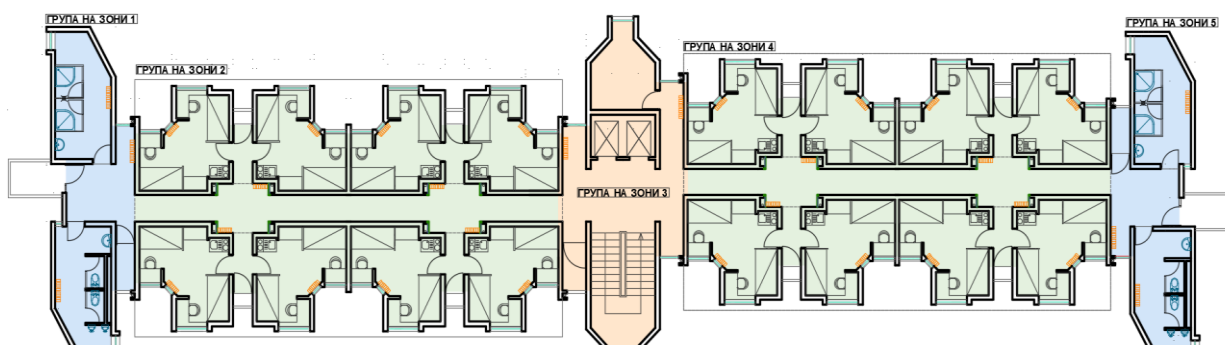
архитектура изведена исклучиво во натур бетон и е со предложен режим на заштита како културно наследство од втор степен (Meades, 2014). Студентскиот дом е комплекс од четири бетонски блокови, кои според архитектонската типологија се индивидуални кули, павилјонски поставени една наспроти друга во центрифугална композиција, така што не си фрлаат сенка една на друга (сл. 14). Блоковите имаат капацитет од вкупно 1324 легла, организирани во неколку типа на соби (British Brutalism, 2012). Катноста на блоковите варира од П+5 до П+14, односно секој од блоковите има низок дел - приземје и пет ката и завршува со рамна проодна тераса и висок дел - приземје и четиринаесет ката, кој завршува со рамен непрооден кров. Конструкцијата, градежните материјали, внатрешниот и надворешниот изглед на блоковите се идентични, но имаат различна ориентација.



Сл. 14 Студија на случај – студентски дом “Гоце Делчев”

### 6.1 Геометрија, локација, ориентација, зонирање и проектна температура

За анализата е земена кулата “Блок - Б”. На сл. 15 е претставен карактеристичен кат на “Блок – Б”. Блокот Б е со ориентација на собите исток – запад, односно помалиот фронт на објектот е свртен кон север – југ, додека подолжниот дел кон исток – запад. Сите четири фасади се изложени на ветер. Блокот Б е поделен на 62 термални зони, по пет зони на еден кат, односно една група на зони кај централните скали (група 3), лево и десно од централните скали по две зони со соби (група 2/4) и две зони со тоалети (група 1/5). Подрумот е моделиран како една посебна зона. Проектната температура, термалниот конфор и капацитетот на луѓе и опрема во овие зони е различна. Кај скалите внатрешната проектната температура е 20°C, кај собите 21°C, кај тоалетите 24°C, во подрумот 15°C (Проектна документација, 1969).



Сл. 15 Карактеристичен кат од блок Б – поделба на термални зони на кат

Ориентацијата, положбата, височината, контактот со друга зона, изложеноста на надворешни влијанија особено ветер и сл. се значајни фактори кои влијаат на зонирањето. Петте зони од приземјето се мултиплицирани на секој кат и функционираат како посебни зони. Секоја од зоните е со различна ориентација, се наоѓа на различна висина и околината има различно влијание за секоја од нив. Надворешната проектна температура за градот Скопје симултано се менува при процесот на симулација, согласно управата за хидрометеоролошки работи.

## 6.2 Површина, волумен, корисници, електрична опрема, системи за греење, вентилација и подготовка на топла санитарна вода

Блокот Б има вкупна нето корисна површина од 5 520.72m<sup>2</sup> и волумен 15 346.24m<sup>3</sup>, додека греана површина има од 5 002.72m<sup>2</sup> и греан волумен од 13 792.23m<sup>3</sup>. Целата површина е земена како греан простор освен подрумот. Површината на отвори – застаклување на фасадата изнесува 1268.12m<sup>2</sup>. Има капацитет од 304 корисници. Секоја просторија и зона е опремена со електрична опрема, осветлување и грејни тела. Електричната енергија потребна за осветлување изнесува 19 912W, а електричната енергија од апарати е 40 950W. Објектот се снабдува со топлинска енергија преку централната градска мрежа дистрибуирана од БЕГ (130/70°C вода) складирана во топлинска подстанција во подрумот на објектот со моќност од 578 980 kcal/h и дистрибуирана преку централна топоводна пумпа со принудена циркулација до грејните тела. Санитарната топла вода се приготвува преку бојлер со капацитет од 4 000 литри, со комбинирани греачи (вреловодни и електрични греачи). Ладењето и вентилирањето на објектот е природно, освен кај индивидуалните бањи во собите, каде што има механичка вентилација. Објектот се грее во месеците на грејна сезона т.е. од 15<sup>ти</sup> октомври до 15<sup>ти</sup> април. Во софтверот се спроведени подесувања за активирање на дополнително греење на електрична енергија, доколку постоечкиот греен систем не постигнува температура од 21°C.

## 6.3 Тип на конструкција, градежни материјали на обвивка (сидови, призмна плоча и кров), спецификација на конструктивните елементи

Објектот е изграден од армирано бетонска конструкција која се состои од а.б. платна и сидови и а.б. ситно ребрасти плочи. Објектот нема завршна обработка на фасадата, туку е граден согласно тогаш актуелниот тренд – бруталистички изглед на фасада од натур бетон. Градежните материјали употребени во обвивката се најважниот фактор кој влијае на заштедата на енергија и енергетската ефикасност на објектот. Врз основа на проектната документација од (Проектна документација, 1969) како и врз основа на теренското истражување на постоечката состојба е изработена студија на сите материјали употребени во сидовите (надворешни и внатрешни), меѓукатните конструкции (подовите, плочите, плафоните), кровните конструкции (проодни и непроодни) и столаријата на постоечката состојба на објектот. Истражени се термофизичките својства на вградените материјали: коефициентот на топлинска спроводливост  $\lambda$  (W/mK); специфичниот топлински капацитет  $c$  (J/kgK); густината  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>), коефициентот на апсорпција на влага ( $\mu$ ), текстурата и дебелината ( $m$ ).

Од анализата на обвивката може да се заклучи дека сидовите кои го сочинуваат најголемиот дел од обвивката на објектот (над 60%) се **изведени во комплетно отсуство на термоизолациони материјали**. Конструктивно и фасадно сидовите се изведени од армиран бетон, каде што од внатрешната

страна се дополнително обработени со перлит бетон и завршна обработка во зависност од типот на простријата (кај собите претежно пластични тапети или гипсен малтер, кај тоалетите керамички плочки, а скалите, лифтовите и ходниците исклучиво армиран бетон без завршна обработка. Материјалите имаат многу високи коефициенти на топлинска спроводливост, особено бетонот и немаат изолација. Ова значи дека сидовите се големи спроводници на топлина и дека енергетските губитоци преку сидовите (трансмисија и инфилтрација) на постоечката состојба се очекува да бидат многу големи, како и U вредностите на сидовите многу повисоки од дозволеното.

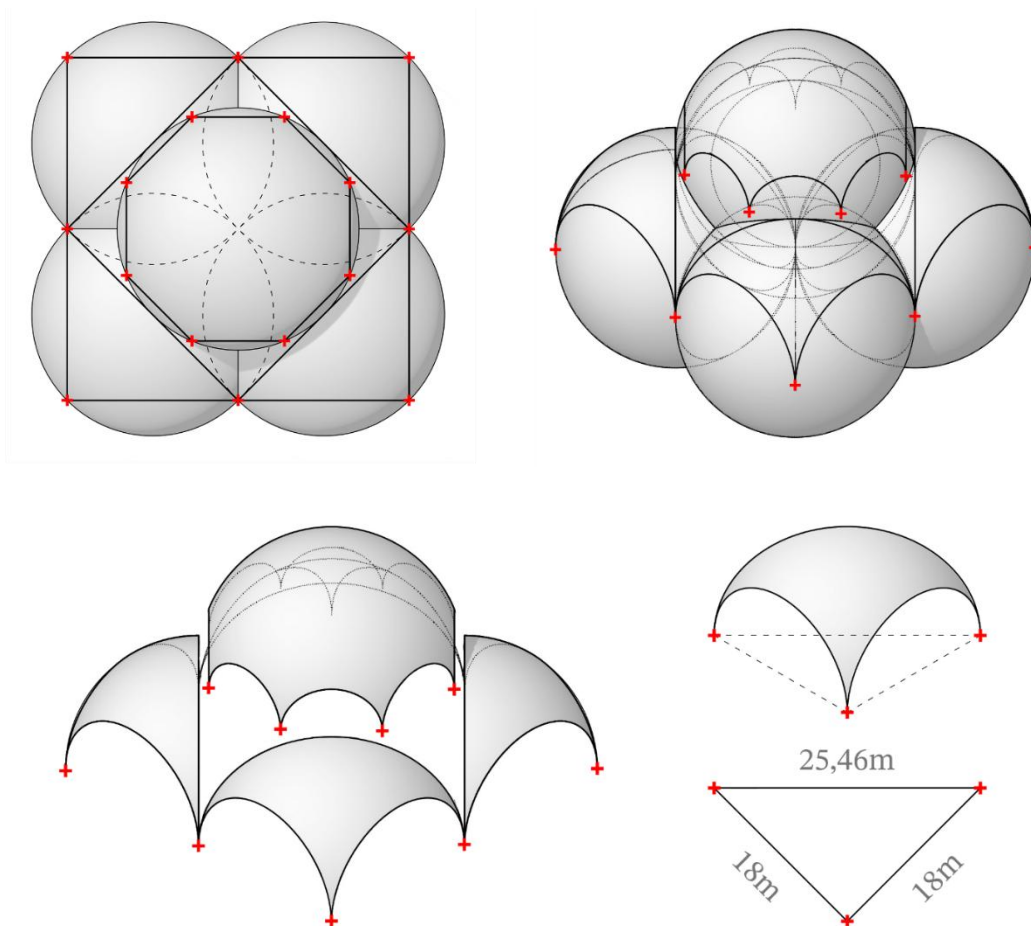
## **7. МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА НА СТАТИЧКА СТАБИЛНОСТ НА ОБЈЕКТ ЦРКВА „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“ (СОБОРЕН ХРАМ) - СКОПЈЕ**

Геометријата на лушпите може да се категоризира во три типа врз основа на тоа како се дефинира нивната форма (Adriaenssens et al., 2014):

- Слободна форма или слободно криви лушпи се дефинираат без да се земат предвид конструктивните и носивите карактеристики. Тие се конципирани преку процес на скулптурно проектирање.
- Математичките или геометриските лушпи се проектираат преку употреба на аналитички функции. Повеќето геометрии на лушпи во 1950-тите и 1960-тите се опишани со математички функции за цел да се олесни нивната изработка и понатамошните аналитички пресметки. Во оваа категорија спаѓаат типични облици на лушпи претставени со површини дефинирани од квадратни функции, како што се хиперболоиди, елипсоиди и хиперболични или елиптични параболоиди.
- Фуникуларните или лушпи со дефинирана форма бараат конструктивно информиран процес на проектирање. Ваквите форми вклучуваат облици дефинирани преку употреба на висечки модели и методи за пронаоѓање на пресметковни обрасци за истражување на состојби на статичка рамнотежа.

Претходно дефинираните геометрии на обвивката, како што се слободна форма и математички лушпи, обично се проектирани од архитект и последователно анализирани и димензионирани од инженер. За овие типови на лушпи, не се прават свесни напори за да се обезбеди посакувана состојба на напрегање на материјалот, што може да резултира со сите начини на дејство на силите, вклучувајќи комбинации на мембрански и сили на свиткување (Ramaswamy, 1984). Спротивно на тоа, методите за дефинирање на форма може да се користат за да се генерираат фуникуларни лушпи, гарантирајќи сили на притисок во рамнината без придружба на свиткување под сопствена тежина и постигнување на избалансирани гранични услови. Оттука, армирањето станува непотребно за доминантното оптоварување благодарение на отсуството на моменти на свиткување. Токму овој конструктивен принцип овозможува дискретните лушпи, составени од поединечни модули, да бидат стабилни. Со други зборови, геометријата на дискретна обвивка мора да содржи фуникуларна мрежа за пренос на сили за да се гарантира нејзината стабилност. Истражувањето на облиците фуникуларните форми бара употреба на методи за наоѓање форма, но уште поважно, бара разбирање на односот помеѓу формата и силата во процесот на проектирање.

Соборната црква Св. Климент Охридски во Скопје припаѓа во групата на геометриските лушпи кои претставуваат исечоци од сфера. Во основа е ротунда, со димензии 36 x 36 метри, а носивата конструкција се состои од само од куполи и лакови, под кои е опфатена површина од околу 1.000 метри квадратни. Проектирана е од архитект Славко Брезовски и изведена во 1972 година. Конструкцијата е изведена од армиран бетон, со фасадни облоги од црвена тула, делкан камен травертин, бел малтер. При првичната изведба лушпите се покриени со керамички плочки, кои при обновувањето се заменети со бакарен лим.



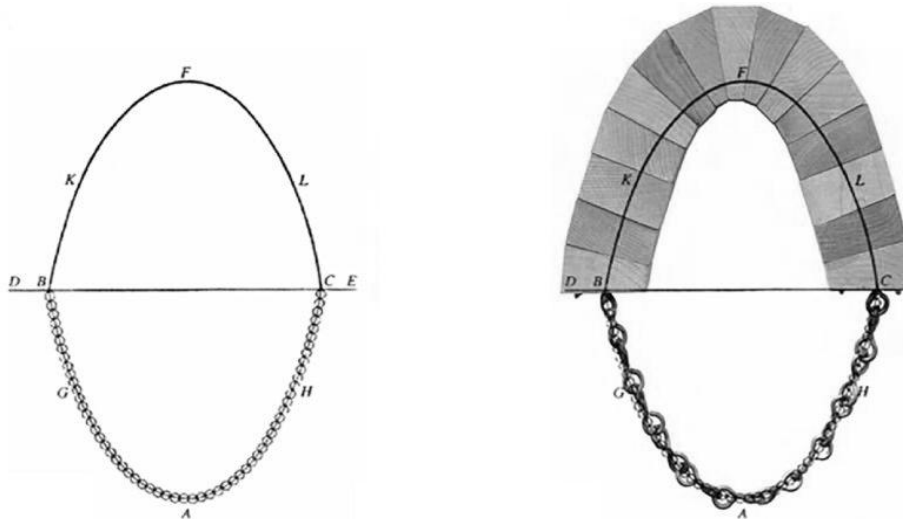
Сл. 16 Анализа на дефинирањето на формата на лушпата на соборната црква во Скопје

Авторот на самиот објект при објаснувањето на формата и неговиот пристап во проектирањето ги потенцира конструктивните квалитети на архитектурата:

„Овој општ просторен склоп на објектот можеме да видиме дека се состои од некои форми кои се или полутопка, кубе или делови од кубе. Тука се лаците и другите сферни форми кои се на некој начин ефектни архитектонски елементи сами за себе, меѓутоа тие се и пред се со статичко носечка функција на објектот. Тука јас гледам и го застапувам тој принцип во архитектонското творештво да се даде единство во таа смисла, една симбиоза конструкција-архитектура. Зошто? Затоа што во овој случај, како и во други, носечката конструкција има архитектонски ефекти како и просторни ефекти. А од друга страна тие просторни елементи, употребувани порано во нашата архитектура содржат во себе конструктивни функции. Тоа е првата работа која ќе ја создаде конечната импресија на овој објект.“

## 7.1 Методи на пронаоѓање на форма на лушпа

Еден од најстарите методи за пронаоѓање на формата за сводови и куполи напрегнати на чист притисок е Хуковиот принцип на висечки синцир (Нooke, 1676). Принципот е едноставен: доколку се преслика обликот на висечкиот синцир, кој по дефиниција е напрегнат на чисто затегнување, ќе се добие еквивалентен лак кој е напрегнат на чист притисок. Генерализирано, оваа значи дека формата што ја зазема синцирот го илустрира преносот на силите на притисок кај лакот (сл.17).



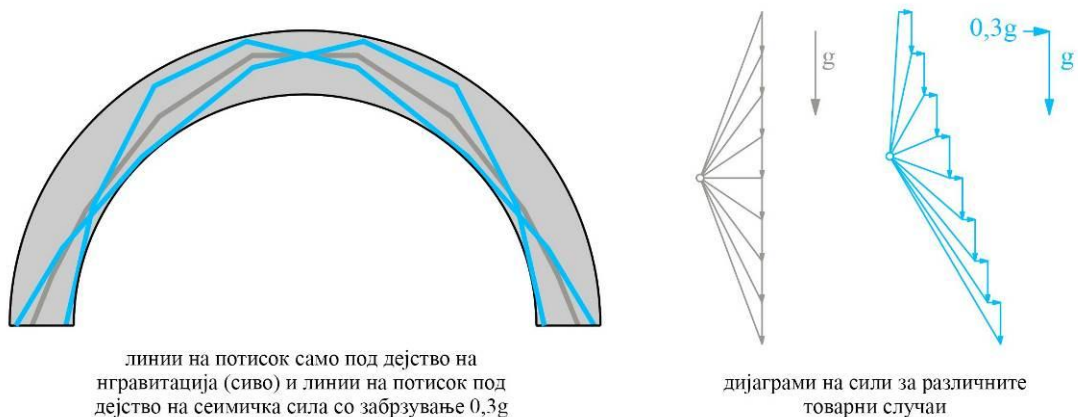
Сл. 17 Пронаоѓање на форма на лак

Хуковиот модел на висечки синцир (лево); Илустриција на принципот од Pedreschi (2008) (десно)

Формата на идеалниот лак ќе зависи од предвидените товари; за синцир чија тежина е константна по единица должина, обликот на висечкиот синцир што дејствува под неговата сопствена тежина ќе заземе форма на катенарна крива математички дефинирана од функцијата  $y = a \cdot \cosh(x / a)$ . Меѓутоа формата на катенарната крива ќе зависи и од должината на самиот синцир, односно соодносот на распонот наспроти висината. Така, дури и едноставниот дводимензионален лак има бесконечни можни форми кои би дејствувале во чист притисок, во зависност посакуваната висина на лакот.

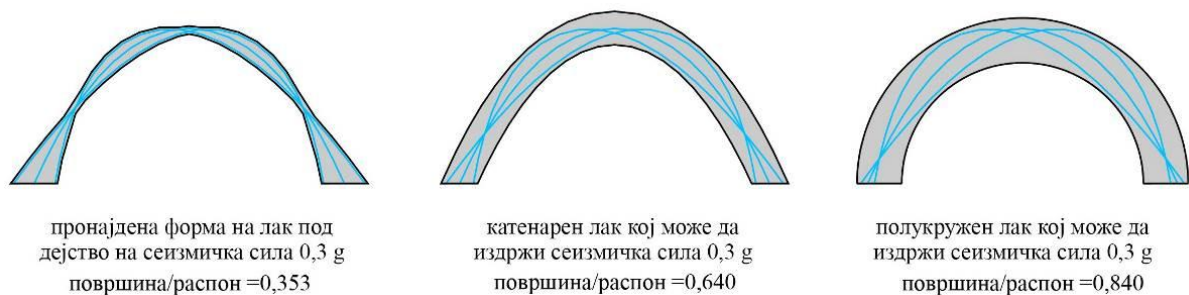
Овој принцип, може да се прошири надвор од формата на лакот и да се примени на лушпи со различни геометрии. Тридимензионалните форми се значително посложени поради можните повеќекратни патеки за пренос на силите. За разлика од дводимензионалниот лак, тродимензионалната лушпа може да носи широк опсег на различни оптоварувања преку дејство на мембрана без да се создаде напрегање на свиткување. Аналогно на висечкиот синцир на Хук за лакот, може да се создаде тродимензионален модел на вкрстени синцири за пронаоѓање на формата на лушпата. Со цел методот да го примениме за дејство на сеизмичка сила, најпрво ќе го разгледаме лакот. За лак изложен на дејство и на вертикална гравитација и на хоризонтално сеизмичка сила, линијата на потисок треба да биде присутна во формата на самиот лак за да се избегне создавање на механизам на колапс (Michiels, 2018). Пронаоѓањето на линијата на потисок, со употреба на дијаграм на сили, за разлика од физичкиот модел, дозволува да биде земена во предвид сила која дејствува во било кој правец. Во случајот на

дводимензионалниот лак се зема во предвид сеизмичка сила која дејствува во рамнината на лакот, во двете спротивни насоки.



Сл. 18 Линија на потисок при дејство на сеизмичка сила;

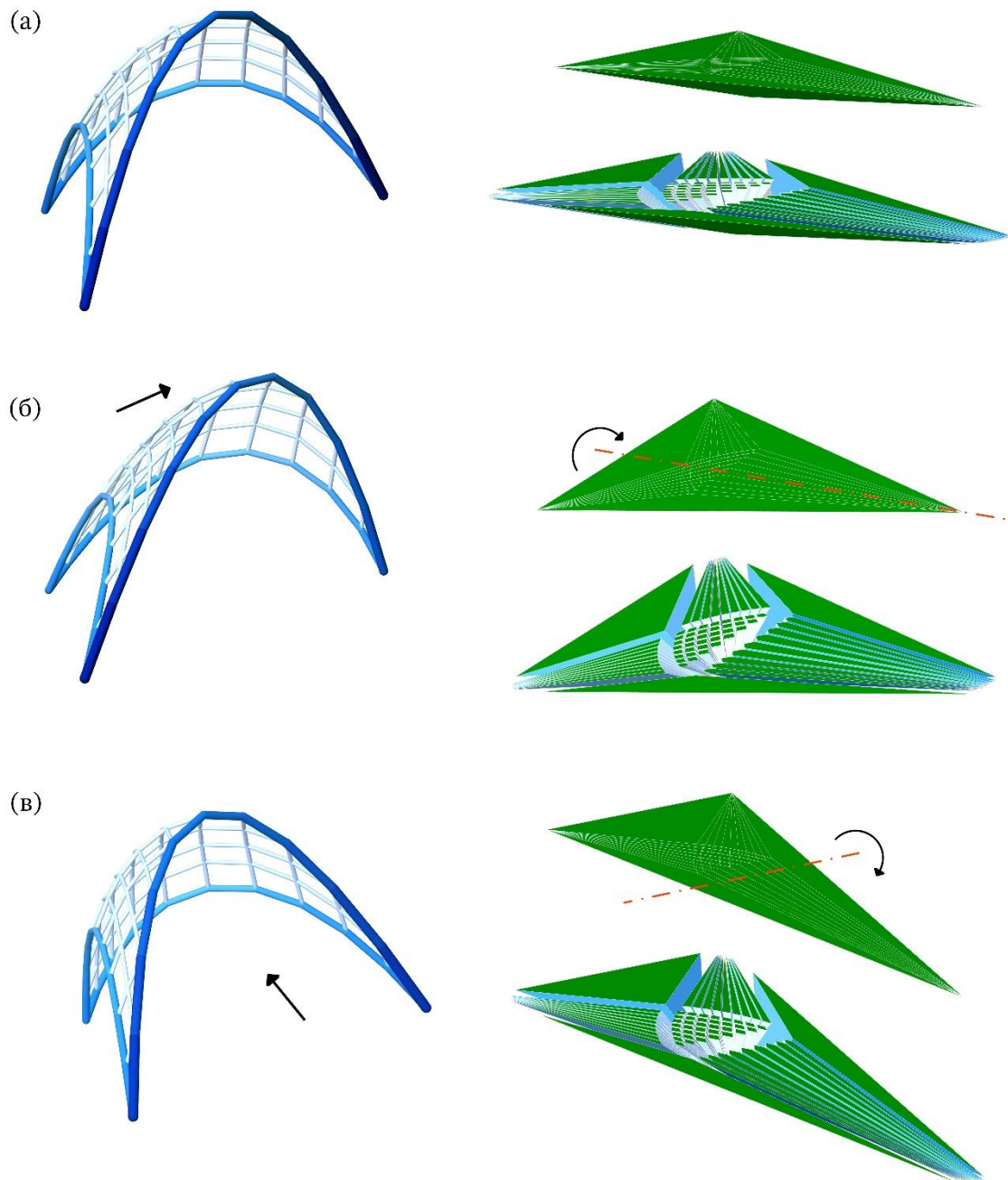
Од примерот прикажан на слика 19 можеме да заклучиме дека примената на методот за пронаоѓање на формата резултира со помала површина и следствено и помала маса на лакот. Истата аналогија може да биде применета и во третата димензија. Преку примената на моделот на инверзна висечка мрежа подложен на хоризонтално оптоварување преку употреба на тродимензионален полиедарски дијаграм, се генерираат облици на лушпи за кои може да се осигура дека постои таква површина на за пренос на силите (Michiels et al., 2017).



Сл. 19 Споредба на површината на пресек на лак

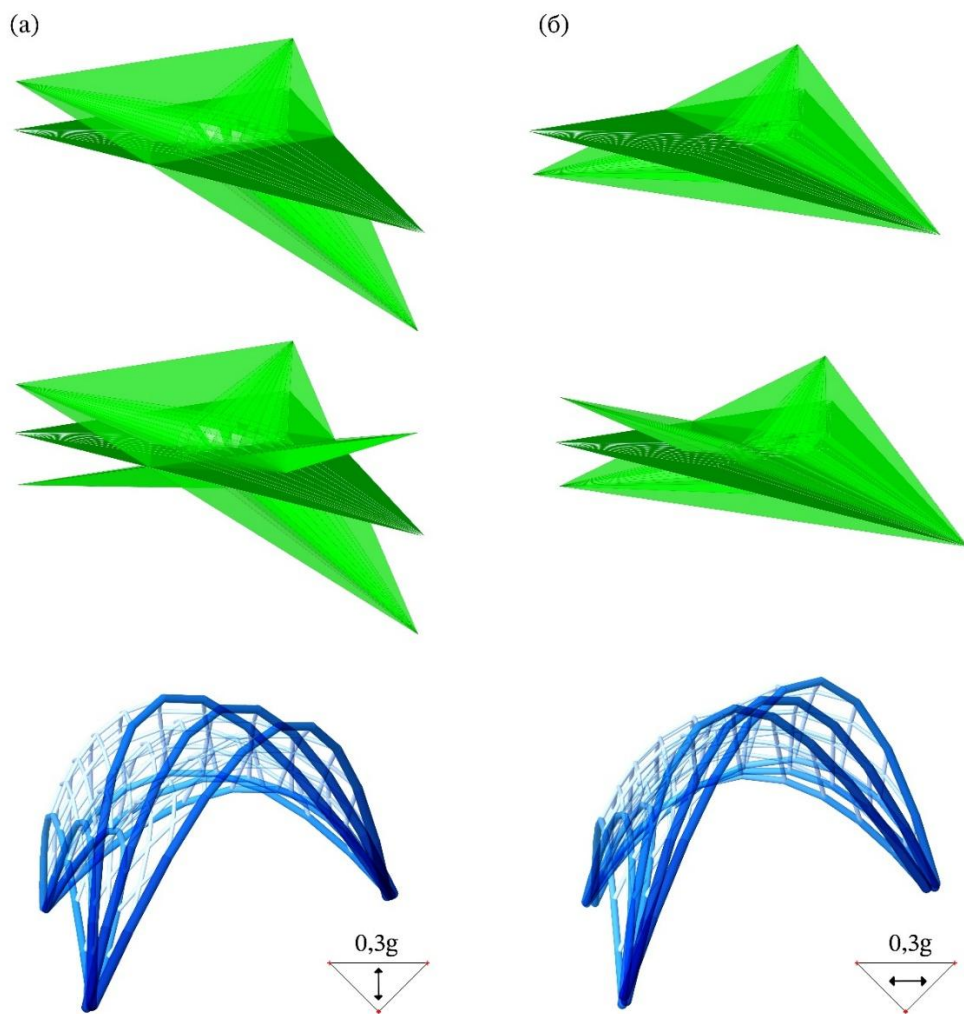
## 7.2 Примена на методот во Rhinoceros 3D

Симулацијата на дејството на сеизмичката сила во тродимензионалниот дијаграм се изразува преку наклонот на рамнината која ги дефинира надворешните товари. Во случај кога разгледуваме само вертикални товари рамнината е хоризонтална, додека во комбинација со хоризонтални таа ротира под агол зависен од големината на хоризонталниот товар.



Сл. 20 Симулација на дејството на хоризонтален товар преку наклонување на рамнината на дијаграмот на сили

Со цел добивање на еневелопа на двојна лушпа, најпрво се дефинираат поединечните лушпи од различни товарни случаи. Во ова истражување земени се 5 различни товарни случаи: дејство само од сопствената тежина и 4 комбинации на дејство од сопствена тежина и хоризонтални сеизмички сили во двата ортогонални правци, во позитивната и негативната насока со интензитет на забрзување од 0,3g. Генерирањето на формата од дијаграмот на сили е постигнато со примена на алгоритмот на PolyFrame (Nejur and Akbarzadeh, 2021).



Сл. 21 Дејство на сеизмичка сила од различни правци

Процесот на моделирање на лушпите во целост се изведува во виртуелната околина на Grasshopper и претставува алгоритам создаден преку истоимениот визуелен програмски јазик. Вака добиените лушпи претставуваат влезни информации за алгоритмот кој како излезна информација ја генерира енвелопата на двојната лушпа. Имајќи предвид дека специфичните функции потребни за генерирање на енвелопата не се достапни во библиотеките на Grasshopper, програмиран е класичен алгоритам во програмскиот јазик Iron Python (верзија 2.7.3) (Harris, 2010). Iron Python е интегриран во Grasshopper и директно се надоврзува на неговите визуелни алгоритми, со што се овозможува формирање на еден континуиран процес.

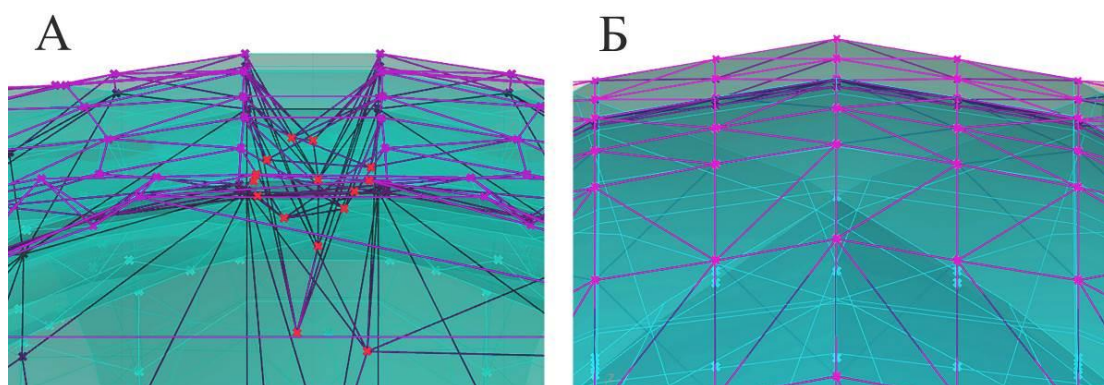
### 7.3 Дисконтинуитет во геометрија

Polyframe како излезна информација генерира засебна мрежа за секој од петте товарни случаи. Бројот на темиња и линии на овие мрежи е зависен од начинот на поделба на дијаграмот на сили, што значи дека за добиените лушпи се добива листа на референтни точки-темиња кои треба да бидат анализирани за да се дефинира енвелопата.

Првичниот пристап кон анализата беше групирање на точките во квадранти во однос на нивните  $x$  и  $y$  координати, односно создавање на листа од групи на точки каде што доколку  $x$  координатата на одредена точка припаѓа во одредени граници и  $y$  координатата припаѓа во одредени граници, тогаш точката припаѓа на одредена група на листата. Во визуелна смисла ова претставува ортогонална мрежа од квадратни полиња проектирана во хоризонталната  $XY$  рамнина и сите точки, чии проекции во хоризонталната рамнина припаѓаат во границите на едно поле, формираат група. Добиената листа од групи беше анализирана така што беа разгледани сите точки во рамки на групата и Python компонентата ги издвојува точката која има најголема  $Z$  координата и точката која има најмала  $Z$  координата. Вака дефинираните точки алгоритмот ги сортира во две листи, листа на точки со најголема  $Z$  координата, која се користи за генерирање на горниот слој од лушпата и листа на точки со најмала  $Z$  координата, која се користи за генерирање на долниот слој на лушпата.

Поставениот алгоритам успешно врши селекција на точките, меѓутоа е зависен од првичната дефиниција на мрежата од PolyFrame, при што како влезна информација потребно е да бидат дефинирани голем број на референтни точки. Во спротивно доколку бројот на дефинирани точки не е доволен при нивното групирање се создаваат групи во чии рамки не постојат референтни точки од секоја лушпа, што резултира со дисконтинуитет на геометријата на двослојната лушпа дефинирана од точките.

При разгледувањето на одредени групи можно е да не може да се дефинира референтна точка од лушпата која во тој сегмент има најголема  $Z$ -координата, што доведува алгоритмот да избере точка која не е вистинскиот максимум за тој сегмент, резултирајќи со грешка во дефиницијата на енвелопата (Сл.22). Грешката се отстранува ако се зголеми бројот на сегменти при првичната делба на мрежата. Ваквиот пристап не може прецизно да определи колкав е потребниот број темиња при првичното дефинирање на мрежата, а бараниот резултат се добива по пат на проба и грешка.



Сл. 22 Грешка во дефиниција на мрежата: А) дисконтинуитетот во геометријата на лушпата; Б) резултатот по корекцијата на влезните податоци

#### 7.4 Корекција на влезни податоци

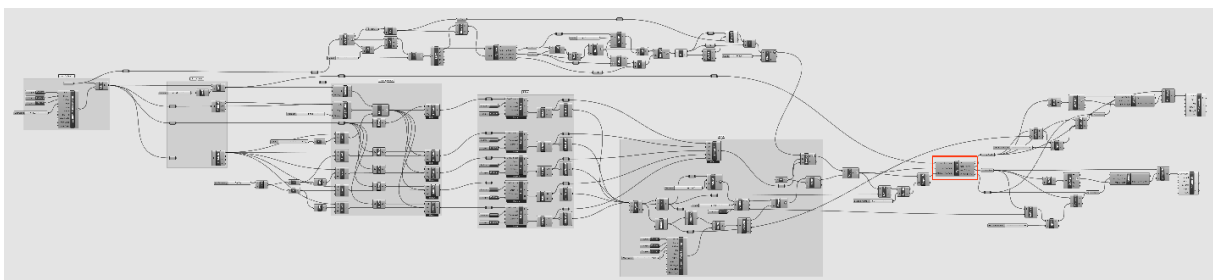
Со цел да се надмине проблемот на дисконтинуитетот на геометријата од првичниот алгоритам, разгледани се влезните информации-точки со кои работи, при што потребно е да се потврди дека за секој разгледуван сегмент се дефинира репрезентативен примерок на референтни точки. Grasshopper дефинира мрежи користејќи структура на податоци: теме, точка на мрежата - лице, многуаголник. Оваа структура е

едноставно листа на точки кои се групирани во многуаголници (триаголници или четириаголници) кои формираат една континуирана површина. Првично работата на алгоритмот е само со темињата на мрежата, користејќи ги директно како референтни точки. За да се определат референтните точки од лушпите се користи вградена функција на Grasshopper: проекција на точка на површина, која овозможува било која дадена точка да се проектира врз зададена геометрија во насока на зададен вектор. Во конкретниот случај тоа значи дека доколку во хоризонталната рамнина се зададат серија од точки, истите можат да се проектираат на лушпите (мрежите) во насока на Z оската. Имено, проектираните точки се фиксни во поглед на нивните x и y координати за секоја од поединечните лушпи, со што се добиваат референтни точки кои имаат идентични x и y координати, што овозможува надминување на проблемот со создавањето на празнини, добивајќи референтни точки од сите лушпи кои постојат за дадените координати.

При дефинирањето на серијата точки важно е да се дефинира границата во која точките ќе бидат зададени, со цел да се добијат референтни точки од истата, за со сигурност енвелопата во целост да ги опфати сите лушпи. Како граница на референтните точки за добивање на горниот слој од лушпата го дефинираме делот од XY рамнината во кој постои барем една од лушпите, додека како граница за долниот слој на лушпата го дефинираме делот од рамнината во која постојат сите разгледувани лушпи. Ова е неопходно затоа што во одредени сегменти постои само една од лушпите и во таков случај таа претставува дел од горниот слој на лушпата, а бидејќи нема присуство на други референтни точки истата би била одбрана и како највисока и како најниска точка. Границите се формираат земајќи ги проекциите на секоја од лушпите во XY рамнината и дефинирајќи ја нивната унија и нивниот пресек. Точките се зададени како темиња на мрежа која е дефинирана од унија на криви на сите проекции од лушпите во хоризонталната рамнина.

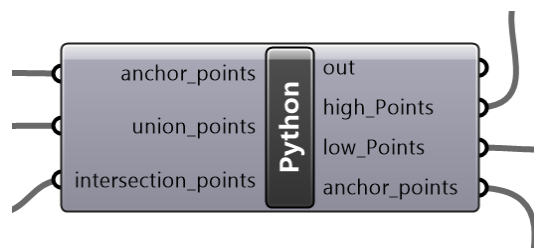
### 7.5 Python компонента за селекција на највисоки и најниски точки (класичен алгоритам)

До сега опишаните функции на алгоритмот се дефинирани преку визуелен јазик, без класично пишување на код, затоа што досега потребните операции можеа да бидат направени од веќе постоечки компоненти на Grasshopper. Меѓутоа групирањето на точки според нивните ху координати и селекцијата на локално највисоката и најниска точка според z координата не се достапни како готова компонента во виртуелната околина и истите мора да бидат скриптирани како нова оригинална компонента. Grasshopper поддржува употреба на неколку програмски јазици: Python, C# и VBscript. За потребите на овој труд одлучено е кодот да биде напишан во програмскиот јазик Python.



Сл. 23 Визуелниот алгоритам изграден од достапни компоненти (со црвено означена новата компонента програмирана преку Python)

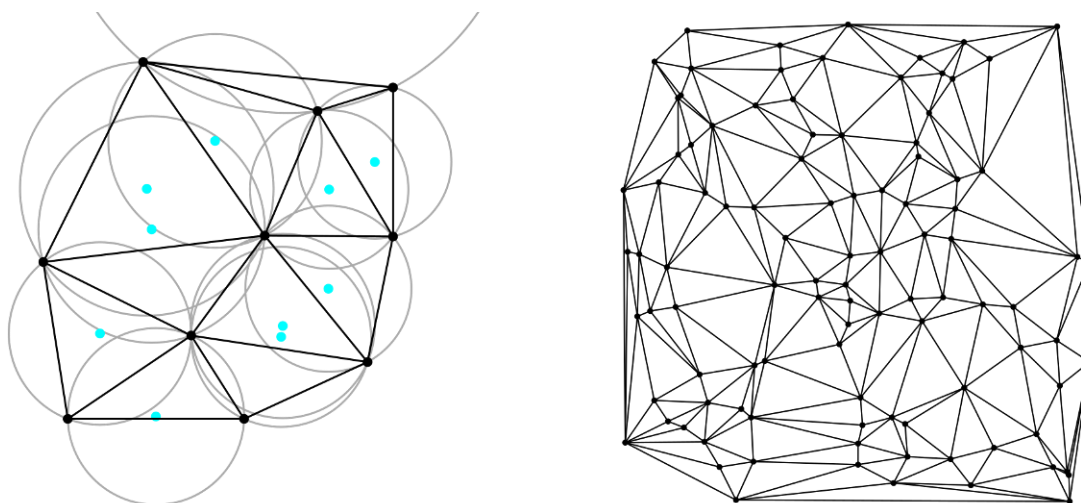
Во новата Python компонента како влезни податоци се дефинираат три листи на точки, листа на точки добиена со проекција на точките во рамки на унијата на проекциите (union\_points); листа на точки кои припаѓаат на пресекот на проекциите (intersection\_points) и листа на точки кои се неподвижни при симулацијата – лежишта (anchor\_points). Како излезни податоци се добиваат три листи со точки, кои го дефинираат горниот и долниот слој на лушпата, односно горната и долната граница на енvelopата и како посебни повторно се издвоени неподвижните точки – лежиштата.



Сл. 24 Компонетата скриптирана во Python, која врши селекција на највисоките и најниските точки

### 7.6 Дефинирање на енvelopата

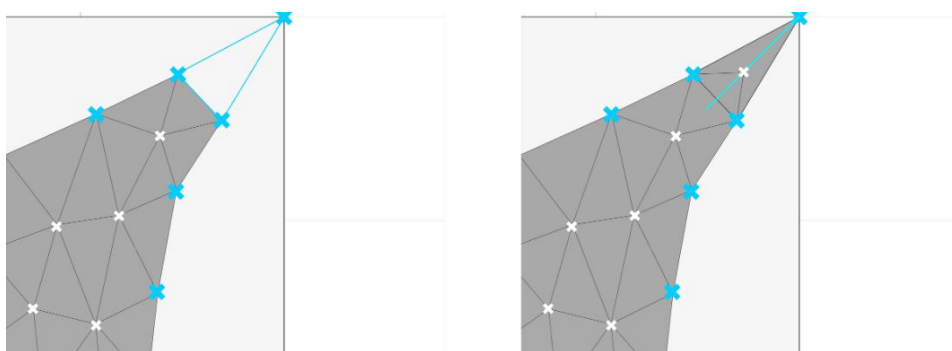
Од трите листи добиени од Python компонентата во следниот чекор повторно се формираат две засебни мрежи, едната ја претставува горната граница на енvelopата (создадена од точките со највисоки координати), другата ја претставува долната граница на енvelopата (дефинирана од точките со најниски координати). Меѓутоа во овој чекор нумеричкиот алгоритам од Python како излезна информација обезбедува листа од точки меѓутоа не и нивна конфигурација во лица на мрежа. Во математиката и компјутерски применетата геометрија, еден од најчесто употребуваните методи за дефинирање на мрежи е Делунијева триангулација (исто така позната како Делунијев триаголник) (Delaunay, 1934). Делунијева триангулација за дадено множество  $P$  од дискретни точки во општа положба е триангулација  $DT(P)$  таква што ниту една точка во  $P$  не е внатре во опишаниот круг на кој било триаголник во  $DT(P)$  (сл.25). Делунијева триангулација го максимизира минимумот од сите агли на триаголниците кои ја формира; и има тенденција да избегнува т.н. „тенки“ триаголници.



Сл. 25 Делунијева триангулација

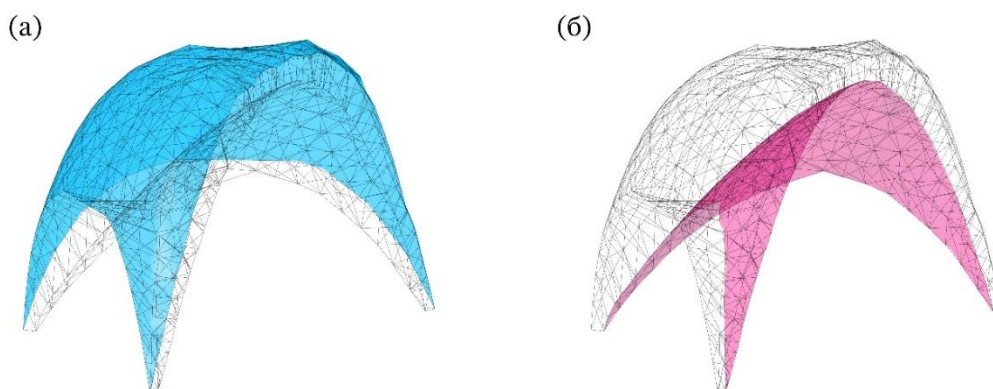
Делунијева триангулација успева успешно да ја формира мрежата од координатите, меѓутоа бидејќи тенденцијата е да се поврзат што е можно повеќе точки таа дефинира лица надвор од дефинираните граници на самите енvelopи. Ваквите непосакувани поврзувања се формираат кога триангулацијата воспоставува врски помеѓу точки кои припаѓаат на претходно дефинираните граници на енvelopата. За да се надмине овој проблем направено е прочистување на листата на лица на мрежата користејќи го критериумот: ако три од темињата кои го формираат триаголникот (лицето на мрежата) се дел од границата на енvelopата лицето од мрежата се брише.

Ваквиот критериум за елиминирање на лица од мрежата успешно ги отстранува непосакуваните поврзувања од нејзината дефиниција меѓутоа во одредени случаи може да резултира со бришење и на лица од мрежата кои се дел од самата енvelopа. Ваквиот проблем најчесто се јавува кај долната граница на енvelopата во зоната на лежиштето. Во овој сегмент кривите кои ја дефинираат границата конвергираат кон лежиштето и како резултат се добиваат помал број на референтни точки што може да резултира и со случај каде што единствените точки се оние од границите. За да се дефинираат дополнителни референтни точки уште при дефинирање на нови влезни точки преку проекција на точки врз лушпите листата на референтни точки се надополнува со точки од симетралите на аглиите формирани од лежиштата (сл.26).



Сл. 26 Дефинирање на дополнителни референтни точки со цел да се избегне непосакуван прекин на геометријата на лушпата

На слика 27 е претставен конечниот резултат од селектирањето на точките и дефиницијата на горна граница и долна граница на двослојната лушпа. Сите фуникуларни мрежи кој го илустрираат преносот на сили за различните товарни случаи се опфатени помеѓу горниот и долниот слој, при што лушпата ќе биде стабилна за зададеното хоризонтално оптоварување.



Сл. 27. Конечни резултати од селектирањето на точките: а) точки кои дефинираат горна граница; б) точки кои дефинираат долна граница

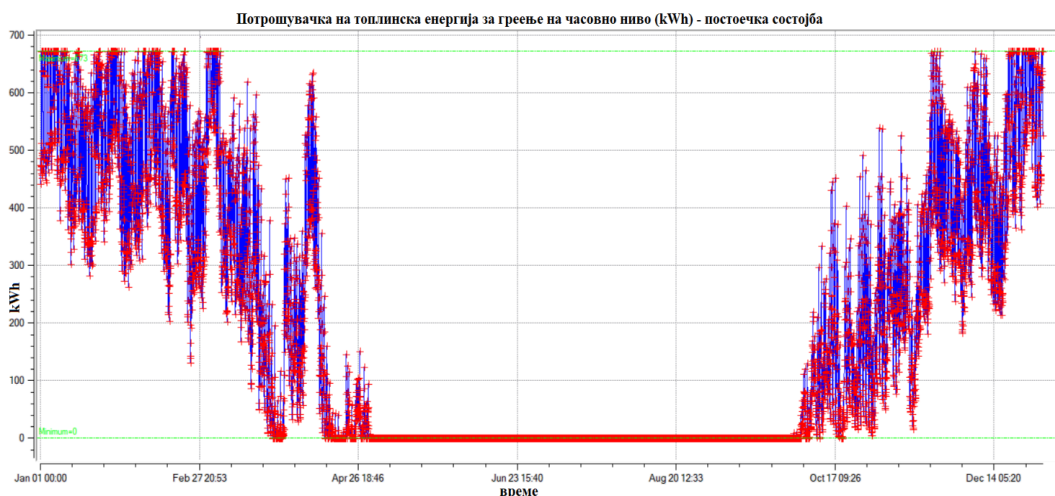
## 8. РЕЗУЛТАТИ

### 8.1 Резултати од симулација на енергетската состојба на објект студентски дом „Гоце Делчев“

Од симулацијата се добиени следниве резултати: потрошувачка на топлинска енергија; потрошувачка на електрична енергија за греење; потрошувачка на електрична енергија од електрични апарати и уреди; потрошувачка на електрична енергија за осветлување; потрошувачка на енергија за топла санитарна вода; CO<sub>2</sub> емисии; реалтивна влажност на воздухот во просториите во секоја зона; внатрешна температура на воздухот во просториите во секоја зона; површински внатрешни температури на ѕидовите; површински надворешни температури на ѕидовите; губитоци на енергија од инфилтрација за секоја зона; губитоци на енергија преку вентилација за секоја зона; губитоци на енергија преку столарија за секоја зона; губитоци на енергија преку конструктивни елементи; U вредности на сите конструктивни елементи на обвивката.

#### 8.1.1 Потрошувачка на топлинска енергија

Резултатите покажаа дека објектот троши најмногу топлинска енергија, т.е. енергија за греење. Тоа подразбира големи финансиски трошоци за одржување на внатрешната температура, т.е. постигнување на нормален термален комфор. На графикот на сл. 28 е прикажана реалната потрошувачка на топлинска енергија на часовно ниво во kWh. Може да се забележи дека има големи варијации во кривата, односно дека во зимските месеци (од ноември до март) е највисока, додека во април, септември и октомври опаѓа. Во месеците кога не е грејна сезона од мај до август, греењето е исклучено. При споредбата со реалните сметки има совпаѓање над 80% кај потрошувачката на топлинска енергија. Несовпаѓања од 30% има кај потрошувачката на електрична енергија, поради тоа што голем дел од корисниците на објектот борават на повисока температура над 21°C и за таа цел користат електрични греалки. Највисока потрошувачка на топлинска енергија е регистрирана на 4ти март, која што изнесува 673 kWh на часовно ниво, т.е. 15 012 kWh на дневно ниво. Најмногу потрошена енергија на месечно ниво има во периодот од јануари до февруари, и истата изнесува 390 611 kWh. Може да се заклучи дека во реални услови **просечната потрошувачка на топлинска енергија за греење изнесува 189.7 kWh на часовно ниво, 4 552.7 kWh на дневно ниво и 138 478 kWh на месечно ниво, односно 1 661 736 kWh годишно.**

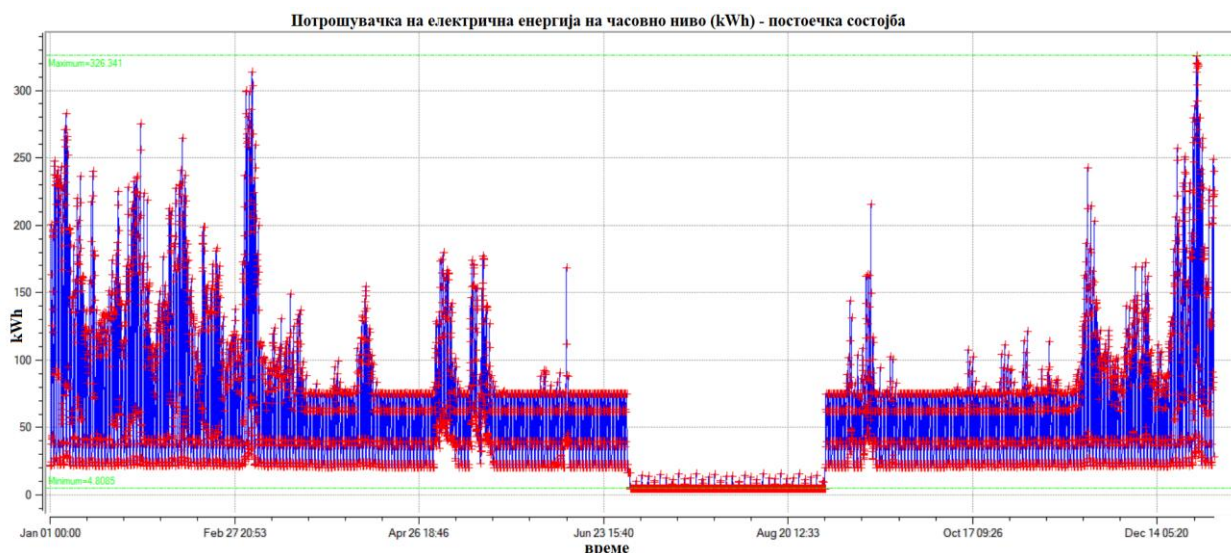


Сл. 28 Потрошувачка на топлинска енергија за греење на часовно ниво (kWh) – постоечка состојба

### 8.1.2 Потрошувачка на електрична енергија

Со цел да се направи попрецизна анализа на недостатоците на објектот од аспект на недоволна изолација, потрошувачката на електрична енергија кај анализираниот објект е разложена на неколку типа: електрична енергија за греење; електрична енергија за осветлување; електрична енергија од електрични апарати; електрична енергија за греење на топла санитарна вода. На потрошувачката на електрична енергија од осветлување, електричните уреди како и електричната енергија потрошена за греење на топла санитарна вода, не влијае вградената топлинската изолација на обвивката и промената на столаријата. Од друга страна, резултатите покажаа дека објектот освен голема потрошувачка на топлинска енергија за греење, троши и многу електрична енергија за греење. Тоа значи дека поради слабата термичка обвивка и покрај високата потрошувачка на топлинска енергија, сепак, системот за греење во најладните месеци не ја достигнува проектната температура и се користи дополнително греење на електрична енергија. На сл. 5 е прикажан графикот на вкупната потрошувачка на електрична енергија на часовно ниво.

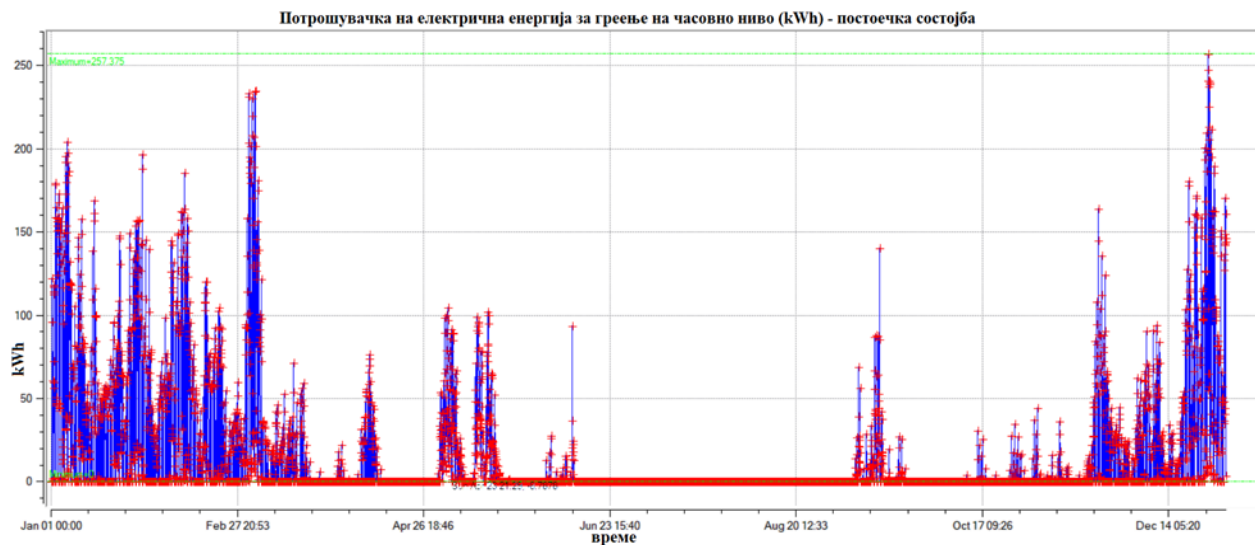
Од дијаграмот може да се заклучи дека највисоката потрошувачка на часовно ниво изнесува 314 kWh (декември), минималната 4.8 kWh (јули, август), а просечната 50 kWh. На дневно ниво највисоката потрошувачка на вкупна електрична енергија за одржување на објектот изнесува 3 642 kWh (декември), минималната 115.4 kWh (јули, август), а просечната 1 213 kWh. На месечно ниво највисоката потрошувачка на вкупна електрична енергија за одржување на објектот на часовно ниво изнесува 67 215 kWh, минималната 3 776 kWh. **Просечната вкупна потрошувачка на вкупна електрична енергија за постоечката состојба изнесува 53,2 kWh на часовно ниво, 1 275,5 kWh на дневно ниво и 38 796.2 kWh, односно 465 556,4 kWh годишно или 63,7 kWh/m<sup>2</sup>.**



Сл. 29 Вкупна потрошувачка на електрична енергија на часовно ниво (kWh) – постоечка состојба

На сл. 30 е прикажан дијаграмот на потрошувачката на електрична енергија за греење на часовно ниво кај постоечката состојба. Највисока потрошувачка на електрична енергија за греење е регистрирана на 26ти Декември, која што изнесува 235.2 kWh на часовно ниво (сл. 30), односно 2 772 kWh на дневно ниво. Најмногу потрошена енергија на месечно ниво има во периодот од јануари до февруари, која изнесува 30 130 kWh. На сл.30 може да се забележи дека имаме значителен пораст на кривата на електрична енергија за греење во одредени месеци. Во месеците мај и септември греењето од централната

градска мрежа е исклучено, но се забележува пад на надворешната температура, проектната температура од 21°C не е постигната и термалниот конфор не е задоволен, затоа корисниците се греат на дополнителна електрична енергија.



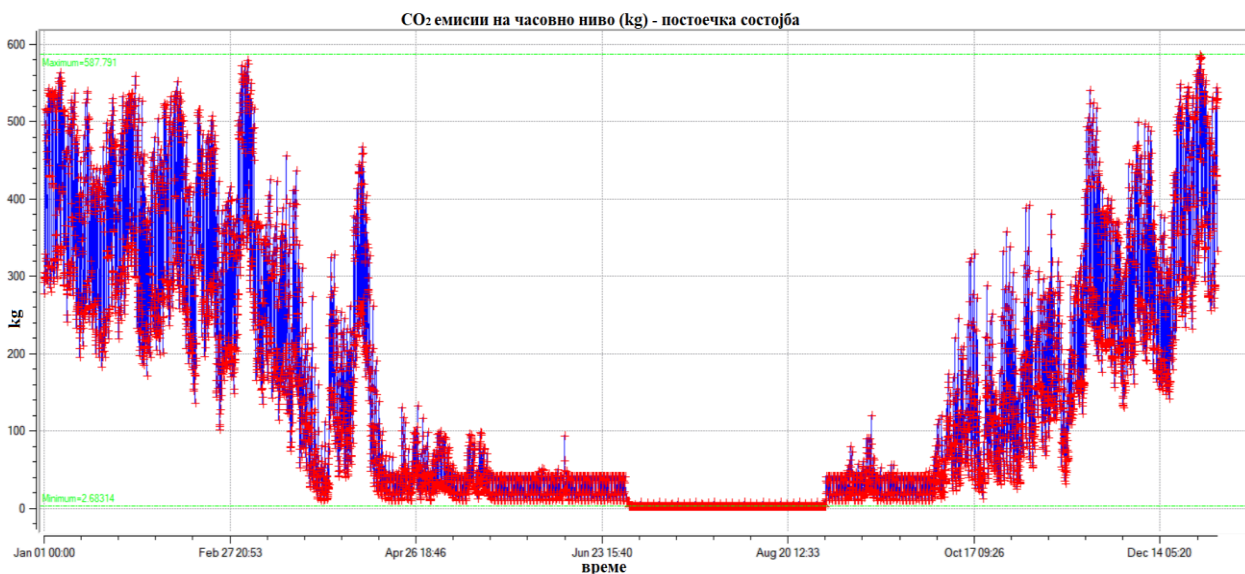
Сл. 30 Потрошувачка на електрична енергија за греење на часовно ниво (kWh) – постоечка состојба

Од графикот може да се заклучи дека **просечната потрошувачката на електрична енергија за греење во реални услови (постоечка состојба) изнесува 12 kWh часовно ниво, 288 kWh на дневно ниво, 8 762 kWh на месечно ниво, односно објектот за дополнително загревање користи 105 144 kWh годишно или 13.8 kWh/m<sup>2</sup>.**

### 8.1.3 CO<sub>2</sub> емисии

Објектите и нивната изградба имаат удел од 36% од глобалната потрошувачка на енергија и 39% од годишните CO<sub>2</sub> емисии (Bergel, 2018). Емисиите од објектите се генерираат на два начини. Првиот е преку секојдневната употреба на енергија за одржување на објектите: осветлување, загревање, ладење. Глобално, процесот на одржување на објектите е одговорен за 28% од емисиите годишно. Вториот начин на генерирање на CO<sub>2</sub> е преку процесот на производството на градежни материјали и транспорт на материјалите до градилиштата, кој што претставува ¼ од вкупниот животен циклус на емисиите на јаглерод. Истиот има удел околу 11% од глобалните емисии на годишно ниво (Röck, 2020). Преку намалување на трошоците за одржување на објектите, како и употребата на материјали при чијшто порцес на производство имаме ниска емисија на CO<sub>2</sub>, се намалуваат CO<sub>2</sub> емисиите во градежниот сектор, т.е. на глобално ниво. моќ. За таа цел, во симулцијата е вклучен и факторот на загадување т.е. испуштање на CO<sub>2</sub> емисии.

На сл. 31 е прикажан дијаграм на CO<sub>2</sub> емисии што објектот ги ослободува во текот на еден час, кај постоечката состојба. CO<sub>2</sub> емисиите се највисоки во периодот на зимските месеци (од декември до март) кога објектот троши најмногу енергијата за греење. Највисока емисивност од 580.9 kg на часовно ниво е забележана во декември (сл. 8), најниска во 2.6 kg во текот на еден час (јули и август). Во реални услови објектот на часовно ниво емитува просечно 144 kg CO<sub>2</sub> (табела 2). На дневно ниво просечната емисија на CO<sub>2</sub> изнесува 3 456 kg, на месечно ниво просечната емисија на CO<sub>2</sub> изнесува 105 125 kg. Согласно стандардите, овој објект има висока емисивност на CO<sub>2</sub>, односно во зимските месеци емисивноста речиси секој ден достигнува над 500 kg на час. **Годишната просечна емисија на CO<sub>2</sub> изнесува 1 261 500 kg, Доколку се надминие границата од 500 000 kg годишно, станува збор за високо загадувачки објект и може да се заклучи дека објектот е високо емисивен на CO<sub>2</sub>.**



Сл. 31 CO<sub>2</sub> емисии на часовно ниво (kg) кај постоечката состојба

#### 8.1.4 Топлински губитоци преку обвивка

Целта на овој дел од проектот е да покаже какви подобрувања во однос на заштедата на енергија, термалниот комфор, одржливоста и трошоците на анализираниот објект може да се постигнат со подобрување на термичките карактеристики на неговата обвивка, притоа, процесот на обнова да остави најминимален импакт врз архитектонскиот израз. За таа цел, покрај многуте спроведени анализи, една од најзначајните да се види импактот кој го има изолацијатата фасадата (како најпроблематична во однос на автентичноста) е анализата на трансмисиони загуби на енергија преку обвивка, од кој најголем дел припаѓа на надворешните ѕидови.

Спроведена е анализа на уделот на губитоците на енергија преку инфилтрација, вентилација, транспарентен дел – прозорци и надворешни врати и нетранспарентен дел од обвивката - надворешни ѕидови, подови и кров. Најмногу енергија се губи преку обвивката на објектот - 42% што укажува на недоволна термичка изолација; преку вентилација -31% што укажува на неконтролиран вентилационен систем и природна вентилација; инфилтрација - 16% и столарија - 11% (сл.32).



Сл. 32 Месечни загуби на топлинска енергија

### 8.1.5 U коефициенти на надворешните ѕидови

Врз база на податоците за градежните материјали од кои што се составени конструктивните елементи на обвивката 2, симулирани се нивните реални U вредности, и истите се споредени со оптималните препорачани U вредности согласно денешниот Правилник за енергетски карактеристики на зградите (Правилник, 2013). Од табела 1 може да се заклучи дека станува збор за големи разлики помеѓу дозволените и постоечките вредности, особено кај надворешните ѕидови. **Може да се заклучи дека надворешните ѕидови во постоечката состојба имаат многу високи U коефициенти, истите се изведени исклучиво во натур бетон без надворешна обработка, заземаат најголема површина и имаат најголем удел во намалувањето на вкупните трансмисиони загуби преку обвивка.**

Табела 1 U вредности на конструктивните елементи од обвивката

Обвивка	U вредност според симулирана постоечка состојба [W/m <sup>2</sup> K]	Максимално дозволена U вредност според Правилник [W/m <sup>2</sup> K]
надворешен ѕид тип 1	2.33	0.35
надворешен ѕид тип 2	3.93	0.35
надворешен ѕид тип 3	2.53	0.35
надворешен ѕид тип 4	4.41	0.35
меѓукатна конструкција (приземје) тип 1	2.97	0.35
меѓукатна конструкција (приземје) тип 2	2.55	0.35
меѓукатна конструкција (еркерни испусти)	3.22	0.30
прооден рамен кров	0.51	0.25
непрооден рамен кров	0.50	0.25
столарија	5.99	2.00

### 8.1.6 Сумарни резултати од спроведената симулација на енергетската состојба

Резултатите од спроведената енергетска симулација покажаа дека потрошувачката на топлинска и електрична енергија за одржување на објектот, паралелно со тоа и CO<sub>2</sub> емисиите и финансиските трошоци се значително високи. Овие податоци се сумирани табеларно, во табела 2, од каде што може да се утврдат високите вредности на сите анализирани параметри.

Табела 2 У вредности на конструктивните елементи од обвивката

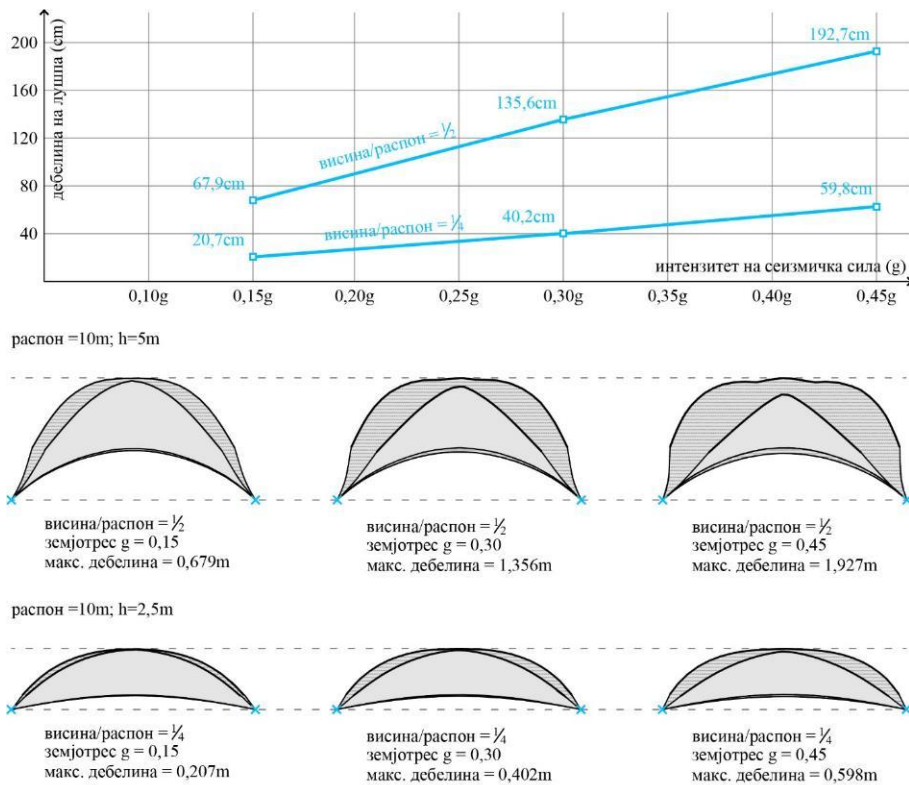
Сумирани просечни месечни вредности од спроведената симулација			
Потрошувачка на топлинска енергија (централно греење) [kWh]	Часовно	Дневно	Месечно
Потрошувачка на топлинска енергија (централно греење) [kWh]	189.7	4 552.7	138 478
Потрошувачка на електрична енергија за греење [kWh]	12	288	8 762
Потрошувачка на електрична енергија за топла санитарна вода[kWh]	10.4	250.9	7 631.5
Потрошувачка на електрична енергија од електрични апарати [kWh]	20.7	498.2	15 152.4
Потрошувачка на електрична енергија за осветлување [kWh]	8.9	214.9	6 536
Вкупна потрошувачка на електрична енергија [kWh]	53.2	1 275.5	38 796.2
CO <sub>2</sub> емисии [kg]	144	3 456.2	105 125

## 8.2 Резултати од испитување на влијание на параметри на дебелината на лушпа на објект црква „Св. Климент Охридски“ (Соборен храм) - Скопје

Алгоритмот дефиниран при испитувањето на соборниот храм во Скопје е понатаму искористен за генерално испитување на влијание на параметри на дебелината на лушпа. За да се добие појасна слика при анализата земена е квадратна основа која е симетрична во двата правци и има само прави агли. Откако ќе се дефинираат формата на дијаграмот на сили, во случајот пирамида со квадратна основа треба да се одреди само еден параметар за да се добие конечна форма, висината на пирамидата, која во суштина ја дефинира висината на лушпата. На пример, висината на лушпата може да се избере како половина од распонот, преку прилагодување на дијаграмот да се добие таква висина. Добиените лушпи се анализираат во однос на нивната дебелина, бидејќи одредени форми кои произлегуваат од процесот на пронаоѓање на формата бараат голема структурна длабочина, што може да доведе до дебели, а со тоа и тешки лушпи. Различните параметри во процесот на пронаоѓање на формата се разгледуваат и се проучува нивниот ефект врз конечната дебелина на лушпата.

### 8.2.1 Сооднос на распон наспроти висина

Соодносот висина распон на лушпата ја определува ранливоста на конструкцијата, имајќи предвид дека при поголеми висини влијанието на хоризонталните компоненти на натоварувањето од земјотресот е поголемо. Суштински плитките лушпи имаат и многу помалку шанси да бидат оштетени од хоризонталните забрзувања пред се поради нивната речиси рамна геометрија. За целите на истражувањето извршена е споредба на лушпа со сооднос висина распон од  $\frac{1}{2}$  и плитка лушпа со сооднос висина распон од  $\frac{1}{4}$ .



Сл. 33 Споредба на дебелината на лушпа во однос на висината наспроти распонот

Од анализата (Сл. 33) може да се заклучи дека зависноста помеѓу параметрите е линиска. Зголемувањето на дебелината на лушпите за 20,5 cm кај лушпите со сооднос висина распон од  $\frac{1}{4}$  настанува при зголемување на сеизмичката сила од 0,15g, додека кај лушпите со сооднос висина распон од  $\frac{1}{2}$  за зголемување на сеизмичката сила од 0,05g.

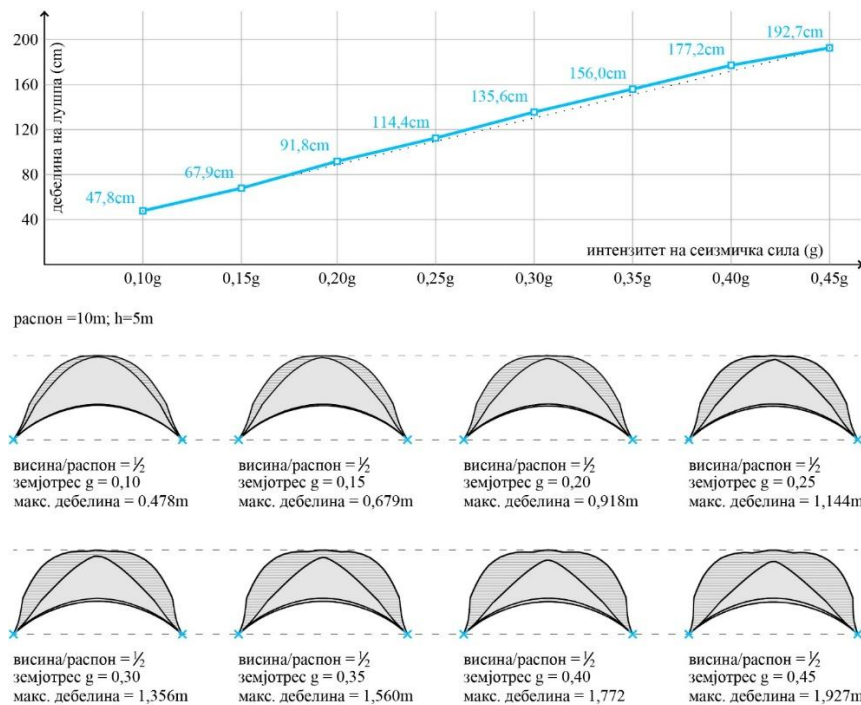
Може да се заклучи дека кај лушпи со помал сооднос висина распон дебелината на лушпата се зголемува помалку со порастот на сеизмичката сила и дека методот за дефинирање на формата може успешно да биде применет без разлика на соодносот висина распон, покажувајќи поголем потенцијал за примена кај лушпи со поголеми висини во однос на распонот.

### 8.2.2 Интензитет на сеизмичка сила

Во процесот на дефинирање на формата на поединечните лушпи, зголемувајќи на интензитетот на хоризонталната сила се зголемуваат поместувањата на точките, што резултира со поголема потребна дебелина на двослојната лушпа, односно најголемо нормално растојание на тангентата на кривата во било која точка помеѓу двата слоја. Може да се констатира дека интензитетот на сеизмичката сила е еден од главните параметри кои ја диктираат дебелината на двослојната лушпа.

Во ова истражување спроведена е анализа за определување на дебелината на лушпата при дејство на сеизмичка сила со различен интензитет (Сл. 34). Анализата е спроведена на лушпа со константен сооднос висина/дебелина и дефинирана местоположба на лежиштата за интензитет на сеизмичка сила од 0,10g до 0,45g со прираст од 0,05g. Максималниот интензитет на сеизмичка сила од 0,45g во спроведената анализа е дефиниран со цел да се утврди врската помеѓу параметрите и треба да се нагласи дека во

процесот на димензионирање на најголем дел од конструкциите не се земаат предвид сеизмички сили со толку голем интензитет.



Сл. 34 Споредба на дебелината на лушпа во однос на промената во интензитетот на сеизмичката сила

Дијаграмот (Сл. 34) ја прикажува зависноста на дебелината на генерираната лушпа во зависност од интензитетот на сеизмичката сила. Од дијаграмот може да се заклучи дека постои линеарна зависност и за прираст на сеизмичката сила од 0,05g дебелината на лушпата се зголемува за 20cm.

За интензитет на сеизмичка сила од 0,1g дебелината на лушпата изнесува 1/25 од нејзиниот распон, за интензитет на сеизмичка сила од 0,2g до 0,25g дебелината на лушпата изнесува 1/10 од нејзиниот распон и за интензитет на сеизмичка сила од 0,45g дебелината на лушпата изнесува 1/5 од нејзиниот распон. Од анализата може да се заклучи дека применетиот пристап генерира рационални форми за помал интензитет на сеизмичка, додека при поголем интензитет на сеизмичка сила дебелината станува нерационална во однос на распонот, резултирајќи со претешка лушпа со нерамномерно распределена маса.

## 9. ЗАКЛУЧОК

Над 80% од градежниот фонд на Скопје е уништен после земјотресот. Со новиот урбанистички план Скопје добива нов архитектонски идентитет со кој што се впишува во мапата на меѓународниот Модернизам. Скопје содржи ретки и уникатни примероци од Модернизмот, особено од „бруталистичка“ архитектура за што сведочат голем број на интернационални истражувања и публикации. Низ направениот пресек преку детална анализа на 50 архитектонски примери низ трите периоди на модернизација на градот, може да се заклучи дека најголем број од објектите се градени во периодот на 60те, 70те до 80те години. Низата на спроведени анализи, базирани врз преглед на обемна литература и увид во документацијата на евидентирани и заштитени објекти како културно наследство, може да се

заклучи дека објектите од постземјотресниот Модернизам во Скопје, претставуваат значајно културно наследство квантитет, така и по архитектонскиот диверзитет, квалитет, иновативност на градежни материјали и техники на градење, чија што особена кулминација се објектите градени во вториот период на Модернизмот во Скопје (1963та до 1975та година).

Од аспект на функцијата и намената на истражуваните објекти, трите најдоминантни намени се домување (22%), образование и наука (18%), јавна администрација (18%). Од аспект на градежните карактеристики на истражуваните објекти, може да се заклучи дека главен градежен материјал е армираниот бетон. Најголем процент од градбите се изведени од а.б. скелетни конструктивни системи (56%), а.б. комбинирани (скелетно – масивни) конструктивни системи (20%) и а.б. масивни конструктивни системи (8%). Другите видови на конструкции (челични, монтажно- префабрикувани, обесени и сл.) земаат понезначителен удел. Согласно поделбата на типови на надворшени ѕидови кај истражуваните градби, најголем процент (20%) зафаќаат градбите чија што обвивка на зградата е изведена комплетно од натур бетон, без завршна обработка, лиен во оплати со сепецифичен сличен дизајн скоро кај сите објекти од овој тип, т.н. канелури или вертикални жлебови, или отпечатоци, траги од самата дрвена оплата. Останатите типови на ѕидови се помалку застапени. „Бруталистичките“ градби се најпроблематични во однос на одржливоста, термичките својства и се подлежни на поголема карбонизација на бетонот, поради изложеност на бетонот на надворешни влијанија. Имајќи го пред вид фактот дека првите југословенски стандарди (и тоа со многу благи критериуми за енергетска ефикасност) се имплементирани кон крајот на 80те, а исто така и дека градежната експанзија се случува во периодот од 1963а до крајот на 80те, може да се заклучи дека во рокот од триесетина години, во период на најголемата градежна продукција објектите се градени без термоизолација. Тоа се најзначајните објекти за градот: јавни институции, администрација, културно образовни објекти, здравствени објекти итн. Може да се заклучи дека во текот на првите децении од 21от век, со воведувањето на новите мерки за енергетска ефикасност, ситуацијата во однос на истата е значително подобрена. Врз основа на спроведената проектна и теренска документација на истражуваните објекти се проценува дека градежната столарија (прозорци и надворешни врати), кај 50% од постојните згради датира од периодот на нивната изградба и истата е најчесто изработена од дрвени профили со едноструко стакло. Од истражуваните објекти, 24% имаа целосна промена на столарија со подобрени термички карактеристики (најчесто пвц или алуминиумска столарија со двоструки стакла), додека кај 26%, столаријата е променета само во делови. Што се однесува до термичката изолација само на кровот, кај 28% од истражуваните објекти е додадена термоизолација во кровната конструкција. Само 17% од вкупниот број на објекти имаат значително подобрена енергетска ефикасност на сите елементи од обвивката (надворешни ѕидови, кров, столарија основа). Најмногубројни се објектите кај кои се спроведени минимални интервенции (комбинација на промена на столарија, саниран кров, изолирање само на делови од обвивката). Тие опфаќаат 38% од вкупниот број на анализирани објекти. Тоа укажува на потребата од подобрување на енергетската ефикасност на овие објекти, но исто така и на недолната грижа како и заштита од страна на институциите кои што се занимаваат со заштита и конзервација на овие објекти. Изолирањето на зградите (во сегменти или целосно) со несоодветни материјали кои го променуваат надворешниот или внатрешниот изглед на објектот, промена на столаријата со несоодветен материјал (од дрво во пластика) како и сл. интервенции кои што со цел да ја подобрат енергетската ефикасност, значително го загрозуваат идентитетот на архитектурата се клучен проблем во оваа теза. Овој

проект има за цел да ги истражи, документаира и детектира проблемите со кои се соочуваат „бруталистичките“ градби во Скопје. Утврдено дека истите се најпроблематични во однос на сите истражени аспекти: енергетска ефикасност, степен на деградација, уникатност во архитектонска естетика која не смее да се компромитира, културно-историска и архитектонско-градителска вредност. За таа цел, врз основа на шест дефинирани фактори кои се значајни за понатамошната анализа, одберени се три „case study“ објекти, кои што се разликуваат согласно нивите архитектонско градежни карактеристики: форма, намена, локација, дизајн на фасадни ѕидови и процент на застаклување, степен на интервенција, обнова и режим на заштита. Одбраните објекти се темелат врз претходно спроведено обемно детално истражување и анализа. Истите ќе бидат предмет на подетални испитувања, односно локациски „in situ“ мерења на нивните енергетски карактеристики (U вредности), за да потоа преку алатката на BIM софтверско моделирање на енергетските перформанси на зградите, се спроведе симулација на нивната постоечка енергетска состојба, како и подобрени сценарија со цел решавање на детектираните проблеми во овој научно истражувачки проект.

Применувајќи напредни компјутерски технологии за моделирање и симулација на енергетските перформанси на зградите, добиени оригинални резултати преку спроведени динамички софтверски симулации на селектираната студија на случај. За симулацијата се користени современи математички и графички софтвери за добивање на реални резултати во нестационарни динамички реални услови преку користење на симултани климатски, временски и енвиromантални податоци. Добиени се голем број на податоци за енергетската состојба на објектот во реални услови како: потрошувачка на топлинска и електрична енергија за греење, електрична енергија за ладење, осветување, опрема, подготовка на топла санитарна вода, емисии на штетни како CO<sub>2</sub> и PM<sub>10</sub> честици, потоа трансмисиони загуби преку обвивка, вентилација и инфилтрација, површински температури на надворешните ѕидови, U вредности на обвивката, финансиски трошоци и сл. За да се утврди прецизноста и веродостојноста на софтверот, направена е споредба со реалните сметки за потрошувачка на топлинска и електрична енергија на селектираните објекти. Динамичките симулации на постоечката состојба покажаа голема прецизност, споредувајќи ги со реалната потрошувачка на енергија на студиите на случај и нивните трошоци, што укажува на голема релевантност на резултатите. Предложената методологија може да има реална примена во обновата и реновирањето на културното наследство од модернизмот и претставува основа за идни научни истражувања.

Предложениот алгоритам за дефиниција на горната и долната граница на енвелопата на лушпата изложена на дејство на сеизмичка сила за зададените параметри треба да овозможи уште во раните фази на проектирањето да се земат во предвид носивите карактеристики на формата. Ваквиот пристап резултира со побрз и поефикасен проектантски процес од конвенционалниот, во кој што статичката анализа се прави на веќе дефиниран и финализиран архитектонски проект. Пронаоѓањето на формата преку употреба на напредни компјутерски системи овозможува оптимизацијата на формата која е можна само доколку релевантните параметри се земат во предвид уште при самата генеза на формата.

Дополнително презентираниот алгоритам е развиен во софтверски пакет наменет за параметарско проектирање, а не статичка анализа, што го прави достапен како алатка за архитектот-проектант. Работењето во параметарски софтвер дозволува генерираните форми веднаш да бидат разгледани и од

останати аспекти во однос на програмските барања, околината, осветлувањето, со што едноставно може да се усвои оптималната форма. Визуелниот приказ на алгоритмот овозможува брзо воспоставување и анализирање на врските помеѓу различните параметри кои влијаат на конечната форма и со тоа се овозможува простор за нивна манипулација, што истовремено дозволува соодветна флексибилност на формата, но и нејзино ограничување во рамки на возможното.

Идните истражувања треба да бидат насочени кон усовршување на предложениот алгоритам и понатамошно тестирање на параметрите и утврдување како истите влијаат на пронајдената формата. Дополнително неопходно е понатамошно анализирање на носивоста на добиените форми преку други нумерички методи и физички модели со што би се потврдил нивниот потенцијал за примена.

## 10. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

Akbarzadeh, M., 2016. 3D Graphical Statics Using Reciprocal Polyhedral Diagrams (PhD Thesis). ETH, Zurich.

Akbarzadeh, M., Van Mele, T., Block, P., 2015a. On the equilibrium of funicular polyhedral frames and convex polyhedral force diagrams. *Computer-Aided Design* 63, 118–128.

Akbarzadeh, M., Van Mele, T., Block, P., 2015b. Three-dimensional compression form finding through subdivision, in: *Proceedings of the 2015 International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*. Amsterdam, Netherlands.

Athanasopoulos, G., McRobie, A., 2017. Graphic statics applied on grid shell roofs, in: *In Proceedings of the 2017 International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*. Hamburg, Germany.

Athanasopoulos, G.S., Akbarzadeh, M., McRobie, A., 2018. Graphic Statics: Constrained form finding for parallel system of forces using Corsican sum, in: *Proceedings of IASS Annual Symposia*. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), pp. 1–8.

Bergel T, Dean B, Dulac J, Hamilton I, Wheeler T (2018) Global status Report—Towards a zero- emission, efficient and resilient buildings and construction sector.

Block, P., 2005. *Equilibrium systems Studies in Masonry Structure* (Master's thesis). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.

Block, P., Ochsendorf, J., 2007. Thrust network analysis: a new methodology for three-dimensional equilibrium. *Journal- International Association for Shell and Spatial Structures* 48, 167–173.

Block Research Group, 2010. *eQUILIBRIUM*.

Bolhassani, M., Akbarzadeh, M., Mahnia, M., Taherian, R., 2018a. On Structural Behavior of a Funicular Concrete Polyhedral Frame Designed by 3D Graphic Statics. *Structures* 14, 56–68.

Bolhassani, M., Ghomi, A.T., Nejur, A., Furkan, M.O., Bartoli, I., Akbarzadeh, M., 2018b. Structural behavior of a cast-in-place funicular polyhedral concrete: Applied 3D graphic statics, in: *Proceedings of IASS Annual Symposia*. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), pp. 1–8.

British Brutalism. World monument fund. [Online] <https://www.wmf.org/project/british-brutalism>.

Cremona, L., 1872. *Le figure reciproche nella statica grafica*. Tipografia di G. Bernardoni, Milano.

Chulev, Basil. *Macedonian millennium continuity*, Brief Illustrated historypedia (Mkd-Cyrillic).

- 2014, <https://www.academia.edu/>.
- Culmann, K., 1864. *Die Graphische Statik*. Zürich: Verlag Meyer und Zeller.
- Delaunay, B., 1934. Sur la sphère vide. *Bull. Acad. Sci. URSS* 1934, 793–800.
- Ghomi, A.T., Bolhassani, M., Nejur, A., Akbarzadeh, M., 2018. Effect of Subdivision of Force Diagrams on the Local Buckling, Load-Path and Material Use of Founded Forms, in: *Proceedings of IASS Annual Symposia. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, pp. 1–8.
- Graovac, O., 2021. 3D GRAPHIC STATICS.
- Greenwold, S., Allen, E., 2003. *Active Statics*.
- Harris, A., 2010. Scripting via IronPython, in: *Pro ASP.NET 4 CMS*. Apress, Berkeley, CA, pp. 197–228. [https://doi.org/10.1007/978-1-4302-2713-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4302-2713-7_7)
- Hooke, R., 1676. *A description of helioscopes, and some other instruments*. printed by T.R. for John Martyn, London. <https://doi.org/10.3931/e-rara-2171>
- Konstantatou, M., D’Acunto, P., McRobie, F., 2018. Polarities in structural analysis and design: n- dimensional graphic statics and structural transformations. *International Journal of Solids and Structures* 152–153.
- Konstantatou, M., McRobie, A., Baker, W., Mitchell, T., 2016. Mechanisms and states of self-stress of planar trusses using graphic statics, part II: Applications and extensions. *International Journal of Space Structures* 31, 102–111.
- Konstantatou, M., McRobie, F., 2016. Reciprocal constructions using conic sections & Poncelet duality.
- Kurrer, K., 2008. *The History of the Theory of Structures: From Arch Analysis to Computational Mechanics*, 1st ed. Wiley.
- Lee, J., 2018. *Computational Design Framework for 3D Graphic Statics (PhD Thesis)*. ETH Zurich.
- Maxwell, J.C., 1864. XLV. On reciprocal figures and diagrams of forces. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 27, 250–261.
- McRobie, A., 2017. The geometry of structural equilibrium. *R. Soc. open sci.* 4, 160759.
- McRobie, A., 2016. Maxwell and Rankine reciprocal diagrams via Minkowski sums for two-dimensional and three-dimensional trusses under load. *International Journal of Space Structures* 31, 203–216.
- Meades, J. "The incredible hulks: Jonathan Meades' A-Z of brutalism". *The Guardian*. [Online] 02. 13., 2014. <https://www.theguardian.com/artanddesign/2014/feb/13/jonathan-meades-brutalism-a-z>.
- Michiels, T., 2018. *Form finding of arches and shell structures subjected to seismic loading (PhD Thesis)*. Princeton, New Haven.
- Michiels, T., Adriaenssens, S., Jorquera-Lucerga, J.J., 2017. Parametric Study of Masonry Shells Form-Found for Seismic Loading. *Journal IASS* 58, 267–275. <https://doi.org/10.20898/j.iass.2017.194.892>
- Nejur, A., Akbarzadeh, M., 2021. PolyFrame, Efficient Computation for 3D Graphic Statics. *Computer-Aided Design* 134.

- Rankine, W.J.M., 1864. XVII. *Principle of the equilibrium of polyhedral frames*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 27, 92–92.
- Rankine, W.J.M., 1858. A manual of applied mechanics. Griffin, London.
- Rippmann, M., Lachauer, L., Block, P., 2012. Interactive Vault Design. *International Journal of Space Structures* 27, 219–230.
- Röck M Ruschi M, Saade M, Balouktsi M, Rasmussen Nygaard F, Birgisdottir H, FrischknechtR, Habert G, Lützkendorf T, Passer A (2020) Embodied GHG emissions of buildings—The hidden challenge for effective climate change mitigation, *Appl Energy*, 258
- Scholz, E., 1989. *Symmetrie Gruppe Dualität: Zur Beziehung zwischen theoretischer Mathematik und Anwendungen in Kristallographie und Baustatik des 19. Jahrhunderts*. Science Networks. Historical Studies. Birkhäuser, Basel.
- Stevin, S., 1586. *De Beghinselen des Waterwichts*. Raphelengius, Franciscus.
- Varignon, P., 1725. *Nouvelle mécanique ou statique*. Chez Claude Jombert, Paris.

#### ДЕЛА ПЕЧАТЕНИ НА КИРИЛИЦА

- Блажев Д., Fellow Ron Terwilliger. Анализа на пазарот за резиденцијална енергетска ефикасност во колективни станбени згради во Република Македонија. *Habitat Macedonia*. [Online] декември 2017. [http://habitat.org.mk/doc/povik/analiza\\_na\\_pazarot-rezime.pdf](http://habitat.org.mk/doc/povik/analiza_na_pazarot-rezime.pdf).
- Дескова, Ивановска А. Архитектурата од периодот на постземјотресната обнова на Скопје - вредности и состојба во рамки на современиот контекст. Скопје : Архитектонски факултет, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ Скопје, 2015. (необјавена) докторска дисертација.
- ЗКО за ГУП на град Скопје (текстуален дел). Скопје : НУ Конзерваторски центар на град Скопје (2012-22)
- Николовски, П. Анализа на постоечката состојба на енергетската ефикасност на зградите, градежните единици, постројките и индустриските процеси. <http://ceprosard.org.mk/>. [Online] 04 04, 2014. [http://ceprosard.org.mk/MK/pdf/19.4\\_april\\_Obuka\\_za\\_energetski\\_kontrolori.pdf](http://ceprosard.org.mk/MK/pdf/19.4_april_Obuka_za_energetski_kontrolori.pdf).
- Правилник за енергетски карактеристики на зградите. Службен весник на РМ, бр. 94. [Online] 07 04, 2013. 20130942263.
- Правилник за валоризација, категоризација и ревалоризација на културното наследство. Закон за заштита на културно наследство (Службен весник на Република Македонија бр. 20/40). Управа за заштита на културно наследство. [Online] <http://www.uzkn.gov.mk/>.
- Проектна документација од Историски архив на град Скопје, основен проект за студентски дом „Гоце Делчев“. (Архив на град Скопје - Период по 1969г/ год:1969/ Кутија бр. XLII, d, e, f, g,h) : s.n.
- Тромбева Гаврилоска А., Лазаревска М., Градежни материјали. Термоизолациони материјали. Скопје : Архитектонски факултет, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, 2014.