

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Стеван Д. Вукадиновић, маг. инж. арх.

**ЕНЕРГЕТСКА ОПТИМИЗАЦИЈА
ПАРАМЕТАРСКИ МОДЕЛИРАНИХ
ФАСАДА**

Докторска дисертација

Београд, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ARCHITECTURE

Stevan D. Vukadinovic, M.Arch.

**ENERGY OPTIMISATION OF
PARAMETRIC MODELED FACADES**

Doctoral dissertation

Belgrade, 2020

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Ментор:

Др Александра Крстић-Фурунџић, редовни професор, Универзитет у Београду,
Архитектонски факултет

Чланови комисије:

Др Будимир Судимац, ванредни професор, Универзитет у Београду,
Архитектонски факултет, председник Комисије

Др Александра Крстић-Фурунџић, редовни професор, Универзитет у Београду,
Архитектонски факултет

Др Мирјана Деветаковић, доцент, Универзитет у Београду, Архитектонски
факултет

Др Игор Светел, научни сарадник, Универзитет у Београду, Иновациони центар
Машинског факултета

Датум одбране докторске дисертације: _____, Београд

ЗАХВАЛНИЦА

Захваљујем се:

мајци Милици, оцу Драгану,

сестри Вањи и брату Ивану.

Без ваше безусловне подршке, ово не би било могуће.

Волим вас.

ЕНЕРГЕТСКА ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРСКИ МОДЕЛИРАНИХ ФАСАДА

Резиме:

Истраживање испитује енергетска својства параметарски моделираних фасада пословних објеката за климатске услове Београда. Изглед фасаде је дефинисан на основу алгоритма, креираног у софтверу за „визуелно програмирање“ (*visual programming*) „Дајнамо“ (*Dynamo*). Информације из овог алгоритма користи софтвер „Рефинери“ (*Refinery*), како би испитао решења са променљивим вредностима величине и дистрибуције отвора на фасади, за унапред дефинисане функције циља (везане за количину директне дневне светлости), употребом метахеуристичког оптимизацијског метода – „генетског алгоритма“ (*genetic algorithm*). На основу валоризације резултата, одабира се најефикасније решење, које се додатно унапређује увођењем сенила, чију променљиву дужину одређује још једна оптимизација употребом генетског алгоритма, за сличне функције циља. Резултати свих оптимизација се користе за креирање седам хипотетичких модела са реалним карактеристикама, у „БИМ“ (*BIM*) софтверу „Ревит“ (*Revit*). Сви модели се финално тестирају преко интернет платформе која врши енергетске симулације - „Грин Билдинг Студио“ (*Green Building Studio*) и упоређују се добијени резултати. Главни задатак је изналажење енергетски најоптималнијег решења изгледа фасаде пословног објекта за београдске климатске услове. Методолошки поступак обухвата оптимизацију фасаде употребом генетског алгоритма, креирање хипотетичких модела пословних објеката, нумеричку симулацију њихових енергетских перформанси, компаративну анализу добијених резултата и рангирање предложених решења према енергетским својствима.

Кључне речи: пословни објекат, хипотетички модел, вишекритеријумска оптимизација, генетски алгоритам, енергетска ефикасност, енергетска симулација

Научна област: Архитектура и урбанизам

Ужа научна област: Технологије у архитектури и менаџмент и биоклиматска и еколошка архитектура

УДК број: 725:004.4:692.232:620.9(043.3)

ENERGY OPTIMISATION OF PARAMETRIC MODELED FACADES

Summary:

This paper examines the energy properties of parametrically modeled facades of office buildings in Belgrade climate conditions. The design of the facade was defined by the algorithm created in Dynamo, a visual programming software. Pieces of information from this algorithm are being used by Project Refinery, so it can analyze solutions with variable size and distribution of the openings on the facade, for predefined fitness functions (direct sunlight illumination), using metaheuristic optimization method - genetic algorithm. Examining the results, the most efficient solution was chosen and improved with the implementation of the shades, with variable length was defined by another optimization using a genetic algorithm, for the similar fitness functions. The results from all of the optimizations were used to create seven hypothetical models with real-life characteristics, in BIM software Revit. All models were tested in the cloud-based platform Green Building Studio for energy simulations, and the results were compared. The main task was to find the most optimal solution for the design of the facade for the office building in Belgrade climate conditions. The methodology contains an optimization of the facade using genetic algorithm, creation of the hypothetical models, numerical simulation of their energy performance, analysis of the results and ranking of the solutions by their energy properties.

Keywords: office buildings, hypothetical models, multi-objective optimization, genetic algorithm, energy-efficiency, energy simulations

Scientific field: Architecture and urbanism

Area of expertise: Technology in architecture and management and bioclimatic and ecological architecture

UDC number: 725:004.4:692.232:620.9(043.3)

САДРЖАЈ**СКРАЋЕНИЦЕ, ОЗНАКЕ, СИМБОЛИ****РЕЧНИК ТЕРМИНА (ГЛОСАРИЈУМ)****ПОПИС СЛИКА, ТАБЕЛА И ДИЈАГРАМА**

УВОД.....	1
Уводне напомене о теми, повод и актуелност теме.....	1
Образложење проблема и предмета истраживања	4
Критички преглед досадашњих истраживања	7
Обухват истраживања	11
Циљеви истраживања.....	11
Задаци истраживања.....	12
Научна оправданост дисертације, очекивани резултати и практична примена резултата.....	13
Полазне хипотезе истраживања.....	14
Научне методе истраживања.....	15
Генерална структура докторске дисертације	17
1. ПЕРФОРМАТИВНА АРХИТЕКТУРА	20
1.1 Компјутерски перформативни дизајн	22

1.2 Потрошња енергије у пословним објектима.....	25
1.3. Сертификација енергетски ефикасних пословних објеката.....	26
1.4 Енергетски ефикасни пословни објекти на територији општине Нови Београд	30
2. ПАРАМЕТАРСКИ МОДЕЛИРАНЕ ФАСАДЕ	42
2.1 Параметарско моделовање	43
2.2 Предности и мане параметарског моделовања	46
2.3 Параметри фасада	47
2.3.1 Геометрија фасаде.....	50
2.3.2 Геометрија елемената	52
2.3.3 Деформисање елемената	54
2.3.4 Величина елемената.....	56
2.3.5 Дистрибуција елемената	57
2.3.6 Ротација елемената	60
2.3.7 Артикулација фасаде	61
2.3.8 Боје и материјали фасаде	62
3. БИМ И ВИЗУЕЛНО ПРОГРАМИРАЊЕ	64
3.1 Аутодеск Ревит.....	66
3.2 Визуелно програмирање	69
3.2.1 Дајнамо	70
3.2.2 Пројекат Рефинери	74
3.3 Енергетске симулације у Ревиту	75
3.4 Предности и мане интегрисаног система.....	79
4. ОПТИМИЗАЦИЈСКЕ МЕТОДЕ	84

4.1	Метахеуристичке оптимизацијске методе.....	85
4.2	Еволуцијски алгоритми	87
4.3	Генетски алгоритам	88
4.3.1	Основна структура.....	89
4.3.2	Репрезентација решења	91
4.3.3	Функција циља	92
4.3.4	Селекција	93
4.3.5	Укрштање	95
4.3.6	Мутација	97
4.3.7	Услов заустављања	98
4.4	Вишекритеријумска оптимизација.....	99
4.4.1	Паретов оптимум	99
4.5	Предности и недостаци генетског алгоритма	101
5.	КРЕИРАЊЕ ХИПОТЕТИЧКИХ МОДЕЛА.....	103
5.1	Избор локације и оријентација.....	106
5.2	Климатске карактеристике значајне за енергетску анализу.....	108
5.3	Режим коришћења простора	113
5.4	Креирање унутрашње структуре хипотетичког модела	115
5.4.1	Организација простора	121
5.4.2	Креирање елемента фасаде хипотетичког модела	123
5.5	Креирање матрице фасаде	124
5.5.1	Дефинисање функција циља	127
5.5.2	Дефинисање променљивих параметара фасаде	130
5.5.3	Постављање елемената фасаде у хипотетички модел.....	134
5.6	Оптимизација фасаде употребом генетског алгоритма.....	135
5.6.1	Паретов фронт оптималних решења	136

5.7 Креирање референтних хипотетичких модела М1, М2 и М3	137
5.8 Креирање оптималних хипотетичких модела О1 и О2	141
5.9 Креирање алтернативних хипотетичких модела са сенилима А1 и А2	146
5.10 Упоредни приказ физичких карактеристика фасада изабраних модела	153
6. РЕЗУЛТАТИ ЕНЕРГЕТСКИХ СИМУЛАЦИЈА ИЗАБРАНИХ МОДЕЛА	156
6.1 Трансмисиони топлотни губици кроз омотач зграде	157
6.2 Годишња финална енергија за грејање и хлађење зграде.....	160
6.2.1 Годишња финална енергија за грејање зграде	161
6.2.2 Годишња финална енергија за хлађење зграде	164
6.2.3 Месечна финална енергија за грејање и хлађење зграде	167
6.2.4 Укупна годишња финална енергија раздвојена по системима.....	171
6.3 Топлотна оптерећења	174
6.3.1 Топотно оптерећење за најтоплији период године.....	175
6.3.2 Топотно оптерећење за најхладнији период године.....	177
6.4 Анализа емисије угљен-диоксида.....	178
6.5 Дискусија.....	180
7. ЗАКЉУЧАК.....	185
ИЗВОРИ И ЛИТЕРАТУРА.....	190
ПРИЛОГ 1: ФИНАЛНИ ИЗГЛЕД ДАЈНАМО СКРИПТЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПАРАМЕТРАСКИ ПРОМЕНЉИВИХ ФАСАДА УПОТРЕБОМ ГЕНЕТСКОГ АЛГОРИТМА	210

ПРИЛОГ 2: ВИЗУЕЛНИ ПРИКАЗ ДИСТРИБУЦИЈЕ ДНЕВНЕ СВЕТЛОСТИ НА ОСНОВАМА ПРИЗЕМЉА ХИПОТЕТИЧКИХ МОДЕЛА.....	220
ПРИЛОГ 3: ТОПЛОТНА ОПТЕРЕЂЕЊА ХИПОТЕТИЧКИХ МОДЕЛА.....	228
БИОГРАФИЈА АУТОРА	243
ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ	
ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА	
ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ	

СКРАЋЕНИЦЕ, ОЗНАКЕ, СИМБОЛИ**Скраћеница Пун назив**

ЕЕ	Енергетска ефикасност
КГХ	Климатизација, грејање и хлађење
ГУП	Генерални урбанистички план
<i>EPBD</i>	<i>Energy performance of buildings Directive</i>
<i>HVAC</i>	<i>Heating, ventilation and air-conditioning</i>
<i>LEED</i>	<i>Leadership in energy and Environmental Design</i>
<i>UN</i>	<i>United Nations</i>
<i>UNEP</i>	<i>United Nations Environment Programme</i>
CO_2	Угљен-диоксид

Ознака Значење

$Q_{H,a}$	Годишња потребна енергија за грејање зграде [MJ, GJ, kWh]
U	Коефицијент пролаза топлоте [W/(m ² K)]
H_{Ts}	Површински трансмисиони губици топлоте
n	Број измена ваздуха на сат [h ⁻¹]
F_{xi}	Фактор корекције температуре
f_o	Фактор облика зграде [m ⁻¹]
A	Површина [m ²]
V	Запремина [m ³]
t	Температура [°C]

Индекси

min	Минимално
max	Максимално
rel	Релативно
a	Годишње
H	Грејање
C	Хлађење

РЕЧНИК ТЕРМИНА (ГЛОСАРИЈУМ)

Годишња потребна топлота за грејање зграде, $Q_{an,H}$ [kWh/a] је рачунски одређена количина топлоте коју грејним системом треба довести у зграду током године да би се обезбедило одржавање унутрашњих пројектних температура;

Годишња потребна енергија за хлађење зграде, $Q_{an,C}$ [kWh/a] је рачунски одређена потребна количина топлоте коју расхладним системом треба одвести из зграде током године да би се обезбедило одржавање унутрашњих пројектних температура;

Унутрашња пројектна температура [$^{\circ}\text{C}$] је задата температура унутрашњег ваздуха за израчунавање топлотних губитака и топлотног оптерећења;

Топлотно оптерећење представља количину енергије коју током најтоплијег периода године треба одвести из објекта, односно током најхладнијег периода године довести у објекат, како би се одржале унутрашње пројектоване температуре;

Осветљеност [lux] је физичка величина која представља однос светлосног флукса и површине коју осветљава и њена јединица је лукс;

Фактор дневног осветљаја [%] представља однос између осветљености неке тачке у унутрашњости зграде и хоризонталне осветљености у спољашности, за расподелу сјајности неба која одговара стандардном облачном небу;

Аутономија дневне светлости у некој тачки у згради је проценат од укупног броја сати у току године када се зграда користи, у коме је могуће постићи минималну захтевану осветљеност коришћењем само дневне светлости.

Фактор облика $f_o = A/V_e$, [m^{-1}] је однос између површине термичког омотача зграде и њиме обухваћене бруто запремине зграде;

Конвергенција је процес постепеног приближавања тачки у простору или времену, различитих или сродних мишљења или вредности;

ПОПИС СЛИКА, ТАБЕЛА И ДИЈАГРАМА**Попис слика:**

Слика 1. МекЛимијева крива. Извор: Ауторска илустрација према <i>MacLeamy</i> , 2010	21
Слика 2. Компјутерски перформативни дизајн	22
Слика 3. Извођење објекта Градске већнице (лево) и анализе соларне радијације (десно).....	23
Слика 4. Изглед зграде „Геркин“ (лево) и анализе кретања ваздуха (десно).....	24
Слика 5. Изглед објекта „Куће уметности“ (лево) и анализе акустичних симулација (десно). Извор: https://www.inexhibit.com/mymuseum/kunsthhaus-graz/	24
Слика 6. Локације пословних објеката који поседују неке од сертификата енергетске ефикасности. Подлога преузета са https://www.google.com/maps	31
Слика 7. Локације пословних објеката који су у процесу добијања неких од сертификата енергетске ефикасности. Подлога преузета са https://www.google.com/maps	31
Слика 8. Изглед зграде „Блу Центра“ на Новом Београду.	32
Слика 9. Изглед зграде „ГТЦ, објекат А1“ на Новом Београду.....	33
Слика 10. Изглед енергетског пасоша зграде „ГТЦ, објекат А1“.....	34
Слика 11. Изглед <i>LEED</i> сертификата „ГТЦ, објекат А1“.....	35
Слика 12. Изглед „ГТЦ Куће“ на Новом Београду.	36
Слика 13. Изглед зграде „Навигатор бизнис центар“ на Новом Београду.	37
Слика 14. Будући изглед зграде „Навигатор 2“ на Новом Београду.	37
Слика 15. Изглед зграде „Ушће кула 2“ (лево), поред постојеће зграде „Кула 1“ (десно) на Новом Београду. Извор: http://beobuild.rs/u%C5%A1%87e-kula-2-p2877.html	38

Слика 16. Изглед параметарски моделоване фасаде Интернационалног омладинског културног центра у Нанђингу, у Кини.	42
Слика 17. Пројекат параметарског стадиона Луиђија Моретија.	43
Слика 18. Енетријер базилике Колонија Гуељ.	44
Слика 19. Олимпијски копмплекс у Минхену.	45
Слика 20. Иван Садерленд демонстрира функције Скечпеда.	45
Слика 21. Шематски приказ дистрибуције елемената.	49
Слика 22. Изглед цилиндричне параметарске фасаде „Ројал Арене“.	50
Слика 23. Изглед синусоидне фасаде болнице у Лондону.	51
Слика 24. Изглед слободне форме зграде „Селфрицис“.	51
Слика 25. Изглед фасаде са сферичним елементима тржног центра „Хенђи Ванда“. Извор: https://www.domusweb.it/en/architecture/2013/11/29/unstudio_hanjie_wanda_square	52
Слика 26. Изглед фасаде зграде Медицинског института Јужне Аустралије. Извор: https://www.atelierten.com/projects/south-australian-health-and-medical-research-institute/	53
Слика 27. Изглед Пољског павиљона на „Експу“ у Шангају, 2010. године.	53
Слика 28. Изглед фасаде са савијеним елементима „ИБМ“-ове зграде.	54
Слика 29. Изглед таласања фасаде зграде „Епикл риформ“.	55
Слика 30. Изглед фасаде са преплитањем елемената на згради „Аргул Вејв“.	55
Слика 31. Изглед фасаде зграде Националне библиотеке „Краљ Фахад“.	56
Слика 32. Изглед фасаде „Истленд тржног центра“.	57
Слика 33. Изглед фасаде зграде нове библиотеке Универзитета у Абердину.	58
Слика 34. Изглед фасаде Музеја савремене уметности у Марсеју.	59
Слика 35. Изглед фасаде „АБЦ музеја“ у Мадриду.	59
Слика 36. Изглед фасаде реновираног складишта у Шангају.	60
Слика 37. Изглед фасаде Музеја савремене уметности у Лос Аађелесу.	61
Слика 38. Изглед фасаде зграде Министарства здравља Баскије, у Билбау.	62

Слика 39. Изглед фасаде Шпанског павиљона на „Експу“ у Јапану, 2005. године.	63
Слика 40. Концепт „БИМ“-а. Извор: Ауторска илустрација према <i>NBIMS-US</i> , 2016	64
Слика 41. Изглед интерфејса програма „Архикед“	66
Слика 42. Изглед интерфејса програма „Ревит“	67
Слика 43. Изглед интерфејса програма „Грасхопер“	70
Слика 44. Изглед интерфејса програма „Дајнамо“	71
Слика 45. Изглед унапред програмираног поља	72
Слика 46. Изглед поља за текстуално програмиње.....	72
Слика 47. Изглед интерфејса „Ревит АПИ“. Извор: https://www.revitaridocs.com/2020/	73
Слика 48. Изглед интерфејса програма „Рефинери“	74
Слика 49. Изглед нумеричког „слајдера“	75
Слика 50. Изглед интерфејса интернет платформе „Грин Билдинг Студио“ за упоређивање резултата симулације (горе) и приказ индивидуалног решења (доле).	76
Слика 51. Изглед интерфејса панела са приказаним топлотним оптерећењима за цео објекат (горе) и индивидуалне компоненте (доле) у „Ревит“-у	77
Слика 52. Изглед контролне табле симулације дневног осветљења у „Ревит“-у	78
Слика 53. Интегрисана методологија истраживања.	80
Слика 54. Детекција судара у БИМ моделу.	81
Слика 55. Метакхеуристичке методе претраге.....	86
Слика 56. Основна структура простог генетског алгорита.....	90
Слика 57. Изглед хромозома и гена. Извор: Ауторска илустрација према <i>Dimic</i> , 2011.....	91
Слика 58. Рулет селекција. Извор: Ауторска илустрација према <i>Dimic</i> , 2011	94
Слика 59. Једнопозиционо укрштање.....	96
Слика 60. Двопозиционо укрштање.....	96

Слика 61. Униформно укрштање са маском	97
Слика 62. Мутација – насумично изабрани, други, трећи и осми бит мутирају.....	98
Слика 63. Паретов фронт оптималних решења.	100
Слика 64. Паретов фронт са јаким (лево) и slabим компромисом (десно)	101
Слика 65. Позиција хипотетичког модела на територији општине Нови Београд.....	106
Слика 66. Означавање оријентације објеката.	107
Слика 67. Позиција на парцели и оријентација хипотетичког модела.....	108
Слика 68. Ружа ветрова за град Београд. Извор: Републички хидрометеоролошки завод.....	110
Слика 69. Основа (горе) и пресеци (доле) унутрашње структуре хипотетичког модела.....	117
Слика 70. Аксонометријски приказ унутрашње структуре хипотетичког модела	118
Слика 71. Слојеви пода на тлу	118
Слика 72. Слојеви равног крова	119
Слика 73. Слојеви фасадног зида.....	120
Слика 74. Пример отвореног и затвореног канцеларијског простора.....	121
Слика 75. Могуће решење поделе канцеларијског простора	122
Слика 76. Технички део објекта.....	122
Слика 77. Аксонометрија и попречни пресек фасадног елемента.....	123
Слика 78. Изглед (горе) и аксонометријски приказ (доле) матрице фасаде.....	124
Слика 79. Креирање матрице једне од фасада.....	125
Слика 80. Изглед (горе) и аксонометријски приказ (доле) нових правоугаоника унутар матрице фасаде	126
Слика 81. Граничне вредности са степеном, за које се правоугаоник умножава	126
Слика 82. Вредност за коју се правоугаоник умножава	127
Слика 83. Унапред испрограмирана поља пакета „Солар Аналисис фор Дајнамо“	128

Слика 84. Креирање затворених површина подова на којима се врши соларна студија	129
Слика 85. Креирање затворене површине крова на којем се врши соларна студија.....	129
Слика 86. Функција циља укупне површине увучених правоугаоника	130
Слика 87. Претрага тачке привлачења у хоризонталној равни фасаде	131
Слика 88. Претрага тачке привлачења у вертикалној равни фасаде	131
Слика 89. Аксонометријски приказ могуће позиције тачке привлачења	131
Слика 90. Распон вредности параметара а) минимални и б) максимални.....	132
Слика 91. Компактност отвора са фактором од 100% и 50%.....	132
Слика 92. Величина отвора на фасади са вредностима параметара -1, 0 и +1	133
Слика 93. Креирање елемената зидова	134
Слика 94. Креирање елемената прозора.....	135
Слика 95. Изглед конторлне табле програма „Рефинери“	136
Слика 96. Паретов скуп оптималних решења (горе) и сва решења добијена из оптимизације (доле).....	137
Слика 97. Резултати оптимизације у „Ексел“ табели	137
Слика 98. Изглед јужне фасаде (горе) и ксонометријски приказ (доле) модела М1	138
Слика 99. Изглед јужне фасаде (горе) и ксонометријски приказ (доле) модела М2	139
Слика 100. Изглед јужне фасаде (горе) и ксонометријски приказ (доле) модела М3	140
Слика 101. Изглед а) јужне б) источне в) северне и д) западне фасаде модела О1	142
Слика 102. Аксонометријски прикази модела О1. Југо-исток (горе) и северозапад (доле)	143
Слика 103. Изглед а) јужне б) источне в) северне и д) западне фасаде модела О2	144
Слика 104. Аксонометријски прикази модела О2. Југо-исток (горе) и северозапад (доле)	145

Слика 105. Аксонометријски приказ сенила на фасади.....	146
Слика 106. Распон вредности параметара дужине сенила	147
Слика 107. „Ремапирање“ вредности променљивих параметара.....	147
Слика 108. Посављање елемената сенила	148
Слика 109. Изглед а) јужне б) источне в) северне и д) западне фасаде модела А1	149
Слика 110. Аксонометријски прикази модела А1. Југо-исток (горе) и северозапад (доле)	150
Слика 111. Изглед а) јужне б) источне в) северне и д) западне фасаде модела А2	151
Слика 112. Аксонометријски прикази модела А2. Југо-исток (горе) и северозапад (доле)	152
Слика 113. Аксонометријски приказ аналитичког модела.....	156
Слика 114. Прорачун топлотног оптерећења за најтоплији период године у „Ревит“-у.	174

Попис табела:

Табела 1. Одређивање енергетског разреда пословних зграда. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011	27
Табела 2. Највеће дозвољене вредности коефицијента пролаза топлоте за омотач зграде. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011	28
Табела 3. Прорачунски подаци за пројектовање пословних објеката. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011	28
Табела 4. Фактори претварања за прорачунавање годишње примарне енергије за поједине врсте извора топлоте. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011	29
Табела 5. Специфичне емисије CO ₂ за поједине врсте енергената. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011	29
Табела 6. Приказ пословних објекта на територији града Београда, који поседују неки од иностраних сертификата.	39
Табела 7. Приказ пословних објекта на територији града Београда, који поседују енергетски пасош по Правилнику сертификата о енергетским својствима зграда у Републици Србији.	40
Табела 8. Приказ пословних објекта на територији града Београда који су у процесу сертификације.	41
Табела 9. Параметри фасада. Извор: <i>Caetano et al.</i> , 2015	48
Табела 10. Методологија истраживања	105
Табела 11. Оријентација и азимут објекта, мерено од јужне оријентације. Извор <i>ASHRAE</i> , 2009	107
Табела 12. Средње месечне, годишње и екстремне вредности од 1981-2010. године. Извор: Републички хидрометеоролошки завод	109
Табела 13. Релативне честине ветра по правцима и тишине у промилима и средње брзине ветра у m/s 1981-2010. год. Извор: Републички хидрометеоролошки завод.....	111
Табела 14. Климатски пројектни подаци за Београд и утицај ветра на зграду. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011	111

Табела 15. Средња месечна температура спољашњег ваздуха и број степен дана за грејање за град Београд. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011.....	112
Табела 16. Средње суме сунчевог зрачења. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011	112
Табела 17. Оптерећења топлотних зона референтног пословног објекта од осветљења и опреме. Извор: <i>United States Department of Energy</i> , 2019.....	113
Табела 18. Подаци о људској активности. Извор: <i>United States Department of Energy</i> , 2019	114
Табела 19. Временски распоред унутрашње пројектне температуре за модел пословног објекта. Извор: <i>United States Department of Energy</i> , 2019	114
Табела 20. Карактеристике референтног модела пословног објекта средње величине. Извор: <i>Deru et al.</i> , 2011.....	115
Табела 21. Основне карактеристике унутрашње структуре хипотетичког модела	116
Табела 22. Дозвољене и остварене вредности коефицијента пролаза топлоте за елементе омотача зграде	120
Табела 23. Површине омотача и удео застакљења фасада креираних модела	153
Табела 24. Упоредни приказ вредности функција циља креираних модела	154
Табела 25. Укупна површина и дужина сенила алтернативних хипотетичких модела А1 и А2	155
Табела 26. Физичке карактеристике креираних модела	157
Табела 27. Површине термичког омотача зграде	158
Табела 28. Коефицијент пролаза топлоте и фактор корекције температуре	158
Табела 29. Површински трансмисиони губици H_{Ts} [W/K]	159
Табела 30. Специфични трансмисиони губици топлоте кроз омотач зграде	160
Табела 31. Годишња потребна финална енергија за грејање објекта [MWh/a]	162
Табела 32. Годишња потребна финална енергија за грејање по јединици површине [kWh/(m ² a)].....	162
Табела 33. Енергетски разред објекта	163

Табела 34. Годишња потребна финална енергија за грејање објекта по јединици запремине [kWh/(m ³ a)]	164
Табела 35. Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта [MWh/a]	165
Табела 36. Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта по јединици површине [kWh/(m ² a)]	165
Табела 37. Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта по јединици запремине [kWh/(m ³ a)]	166
Табела 38. Годишња потребна финална енергија по системима и укупно [MWh/a]	171
Табела 39. Топлотно оптерећење за најтоплији период године [kW]	176
Табела 40. Топлотно оптерећење за најхладнији период године [kW]	177
Табела 41. Годишња емисија угљен-диоксида	179
Табела 42. Ранг хипотетичких модела према резултатима добијених из оптимизације и енергетских симулација	183
Табела 43. Коначан ранг хипотетичких модела	184

Попис дијаграма:

Дијаграм 1. Укупна потрошња енергије на годишњем нивоу комерцијалних објеката различитих намена. Извор: EIA, 2012	25
Дијаграм 2. Годишња финална потрошња електричне енергије пословних објеката према намени у милијардама [kWh] Извор: EIA, 2012	26
Дијаграм 3. Паретов скуп оптималних решења (плаво) и одабрано оптимално решење (црвено).....	141
Дијаграм 4. Паретов скуп оптималних решења (плаво) и одабрано оптимално решење (црвено).....	148
Дијаграм 5. Укупна количина директне светлости [kWh/m ²] креираних модела	155
Дијаграм 6. Укупна површина свих отвора на фасади [m ²] креираних модела	155
Дијаграм 7. Годишња потребна финална енергија за грејање објекта по јединици површине [kWh/(m ² a)].....	163
Дијаграм 8. Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта по јединици површине [kWh/(m ² a)].....	166
Дијаграм 9. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта М1 [MWh/a]	167
Дијаграм 10. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта М2 [MWh/a]	168
Дијаграм 11. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта М3 [MWh/a]	168
Дијаграм 12. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта О1 [MWh/a]	169
Дијаграм 13. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта О2 [MWh/a]	169
Дијаграм 14. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта А1 [MWh/a]	170

Дијаграм 15. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта А2 [MWh/a]	170
Дијаграм 16. Годишња потребна финална енергија по системима [MWh/a]	172
Дијаграм 17. Удео свих система у укупној потрошњи енергије модела М3 [%]	173
Дијаграм 18. Удео свих система у укупној потрошњи енергије модела О1 [%]	173
Дијаграм 19. Удео свих система у укупној потрошњи енергије модела А2 [%]	173
Дијаграм 20. Топотно оптерећење за најтоплији период године [kW]	176
Дијаграм 21. Топотно оптерећење за најхладнији период године [kW]	178
Дијаграм 22. Годишња емисија угљен-диоксида	179
Дијаграм 23. Годишња финална енергија за грејање и хлађење објекта [MWh/a]	182

**ЕНЕРГЕТСКА ОПТИМИЗАЦИЈА
ПАРАМЕТАРСКИ МОДЕЛИРАНИХ
ФАСАДА**

УВОД

Уводне напомене о теми, повод и актуелност теме

Индустријска револуција средином осамнаестог века, била је почетак континуалног технолошког развоја. Од тог тренутка па све до данас, напредак човечанства је значајно приметан у свим сферама живота, а тај процес се експоненцијално убрзава кроз време које долази. Овај рапидни развој резултирао је многим научним открићима, која су омогућила човеку да живи дуже него икад, окружен информацијама које му раније нису биле доступне. Индиректна последица овог процеса је значајан пораст броја становника. Светска популација премашила је 7 милијарди становника у 2011. години (*European Environment Agency*, 2012, стр. 41), а очекује се до 2050. године више од 9 милијарди (*European Environment Agency*, 2012, стр. 41). Повећање броја становника резултирало је новим потребама које су могле да се задовоље искључиво у градским срединама, па је из тог разлога урбанизација у наглој експанзији. Тренутно 53% становништва живи у градовима (*United Nations Human Settlements Programme - UN Habitat*, 2006, стр. 4), а тај проценат се убрзано повећава. Међутим, постоји негативна последица целог процеса. Равнотежа у природи која је одувек постојала, уздрмана је новонасталим променама. Свет се суочава са кризом енергије, експлоатацијом ресурса, загађењем. Из тог разлога, неопходно је развити свест о значају ових проблема и активно тражити решења која ће за почетак барем ублажити негативне ефекте, а временом их и у потпуности зауставити.

Архитектура и грађевинарство уопште, активно су пратили ове промене током времена и мењали се и прилагођавали њима. Пораст становништва и појаве нових технологија резултирали су повећаним интересовањем за овај сектор, што је за последицу имало масовну градњу и експоненцијални пораст грађевинског фонда. Резултат је податак да су зграде тренутно заслужне за потрошњу 40% укупне енергије у Европској Унији и узрочници 27% укупне емисије угљен-диоксида (*Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the*

energy performance of buildings - EPBD, 2010, стр. 13). Из тог разлога, јавила се потреба за еколошки одрживим планирањем, пројектовањем извођењем и употребом објеката. Сваки од ових процеса једнако је важан за остваривање циља одрживости. Поред социјалног, економског, еколошког, организационог и техничког аспекта одрживости у архитектури, енергетска ефикасност објеката је аспект који дотиче три највећа проблема данашњице – заштиту животне средине, климатске промене и енергетску сигурност. Енергетски ефикасан објекат, мало троши енергије за грејање и хлађење, користи обновљиве изворе за добијање енергије, користи еколошке материјале који се делимично или у потпуности могу рециклирати, мање сагорева фосилна горива и емитује угљен-диоксид у атмосферу. Регулативе високо развијених земаља већ захтевају овакав вид планирања, а извесно је да се активно прикључе и земље у транзицији. Република Србија показује све веће интересовање за имплементирање принципа одрживе градње, те је у претходној деценији донет низ закона и других мера који дефинишу и промовишу овај вид планирања. Очекује се унапређење ових аката и увођење нових, како би енергетски ефикасна градња постала стандард пројектовања и извођења објеката у будућности.

Фасада као веза између објекта и средине у којој се налази има веома значајан утицај на енергетска својства објекта, јер директно доприноси термичком комфору. Нове технологије у грађевинарству, појава нових и отпорнијих материјала и унапређење карактеристика постојећих, утицали су на неограничене могућности дизајна фасада, а сва решења имају унапређена енергетска својства у односу на традиционални приступ. Процес пројектовања фасада се током времена усложњавао, те резултовао великим бројем јединствених приступа и стилова. Један од приступа, који се посебно издваја и скорије привлачи све већу пажњу стручне и шире јавности је параметарско моделовање. Параметарско моделовање је парадигма у процесу пројектовања при којем се однос између елемената користи као полазиште за креирање комплексних форми и структура (*Woodbury*, 2010, стр. 11). Термин „параметрицизам“ потиче из математике и односи се на употребу одређених параметара или варијабли које се користе да манипулишу или промене крајњи исход неког решења једначине или система (*Jabi*, 2013, стр. 22). Параметарски шаблони нису ограничени само на фасаду објекта, већ су

применљиви и на друге појединачне сегменте структуре зграде, али и на форму као целину. Фасаде примењују панеле карактеристика дефинисаних односима између параметара, који се односе на димензије панела, облик панела, материјализацију, позицију на фасади, заротираност према основној равни фасаде итд. Рани облик параметарског моделовања у архитектури се јавља још крајем деветнаестог века на примерима сакралних објеката каталонског архитекте Антонија Гаудија (*Antonio Gaudi*), (*Sert*, 1972, стр. 26).

Модификацијом појединачних параметара, може се креирати неограничен број потенцијалних варијанти дизајна фасаде, свака са јединственим енергетским својствима, што значајно отежава добијање најадекватнијег решења. Из тог разлога неопходно је увести метод, који самостално валоризује наведене варијанте и унапређује их све до тренутка изналажења сета оптималних решења. Један од најпримењенијих и најефикаснијих оптимизацијских метода је „генетски алгоритам“ (енг. *genetic algorithm*).

Генетски алгоритам је „метахеуристички“ (енг. *metaheuristic*) оптимизацијски метод који имитира природни еволуцијски процес при добијању одговарајућег решења (*Mitchell*, 1994, стр. 239). Структуру генетског алгоритма чине процеси селекције, укрштања и мутације по унапред дефинисаним правилима, који се понављају до тренутка изналажења најбољег решења. Погодан је због способности да самостално анализира велики број решења, те модификацијом параметара креира нова, како би финално резултирао решењем које је најоптималније за један или више предуслова. Почетак његове примене се јавља средином двадесетог века, док термин популаризује Џон Холанд (*Holland*, 1975) у својој књизи „Адаптација природних и вештачких система“ (енг. *Adaptation in Natural and Artificial System*). Генетски алгоритам има широку примену у различитим научним областима, а због великог потенцијала све више налази своју примену и у архитектури.

Специфично, генетски алгоритам се може употребити приликом оптимизације енергетских својстава параметарски моделираних фасада.

Образложење проблема и предмета истраживања

Предмет истраживања предложене докторске дисертације је изналажење оптималног решења параметарски моделираних фасада, употребом генетског алгоритма, зарад унапређења енергетских својстава објеката на којима се таква фасада налази. Истраживање се одвија на хипотетичком моделу пословног објекта, који се креира на основу реалних карактеристика (спратност, положај на парцели, оријентација и сл.) и позиционира на територији општине Нови Београд. Фасаду хипотетичког модела чине прозори са сенилима, чију величину и дистрибуцију контролишу унапред дефинисани параметри са својим граничним вредностима. Модел се тестира кроз програме који врше компјутерске симулације рачунања количине дневне светлости и потрошње енергије, за скуп решења које проналази генетски алгоритам на основу задатих параметара, који дефинишу фасадне панеле. Упоредна анализа резултата ових симулација ће утврдити да је свако решење из скупа оптималних решења, знатно енергетски ефикасније у односу на конвенционална решења.

Теоријско одређење предмета истраживања обухвата:

- Формирање типологије параметарски моделираних фасада, са аспекта потрошње енергије и количине дневне светлости којој су изложени;
- Формирање критеријума и креирање хипотетичког модела објекта;
- Формирање критеријума и креирање параметарски моделираних фасада;
- Компјутерске симулације и изналажење сета оптималних решења употребом генетског алгоритма;
- Анализу резултата добијених из симулација и упоредну анализу ефеката оптималних решења на термичке и обликовне карактеристике објекта, у односу на конвенцијална решења;
- Формирање закључака о значају генетског алгоритма као метода оптимизације параметарски моделираних фасада, у оквиру термичких и визуелних карактеристика.

Просторно одређење предмета истраживања ограничено је на подручје Новог Београда, конкретно на парцелу коју не заклањају други објекти, како овај фактор не би имао утицаја на резултате симулација. Избор реалне локације је неопходан због климатских услова који се морају јасно дефинисати, да би симулације приказале што прецизније резултате. Методологија добијена из овог истраживања може се користити и за подручја са сличним, али и потпуно другачијим климатским условима, уз промену параметара везаних за локацију, приликом креирања хипотетичког модела објекта.

Функционално одређење односи се на јавне објекте - пословне објекте, који су у знатној мери присутни на одабраној општини. Истраживање се бави пословним објектима само на нивоу режима коришћења простора, који је фактор неопходан за добијање што прецизнијих резултата симулација. Посебно треба истаћи да се методологија добијена из овог истраживања може користити и за објекте других намена, уз адекватну промену параметара везаних за режим коришћења простора. Временско одређење истраживања је ограничено на савремено доба, односно на актуелне захтеве у области пројектовања и извођења објеката, који се тичу питања енергетске ефикасности.

Фокус истраживања је на оптимизацији параметарски моделираних фасада зарад побољшања енергетских карактеристика објеката уз максимално присуство дневног осветљаја.

Актуелност теме се огледа у израженој потреби за изградњом енергетски ефикасних објеката, како због законске регулативе, тако и због развијене свести о неопходности очувања животне средине. Ову тврдњу поткрепљују многобројни пројекти широм света.

Проблем истраживања је креирање генетског алгоритма, који ће на основу задатих параметара, самостално моћи да испитује различите варијанте решења дизајна параметарски моделираних фасада, на основу што мањег утрошка енергије и што већег процента аутономије дневне светлости.

Потенцијални проблеми који се доводе у везу са овим истраживањем су следећи:

- Ова тема је само делимично обрађена у светској литератури уз потпуно одсуство истраживања у домаћој;
- Одсуство примера који примењују методе оптимизације параметарски моделираних фасада употребом генетског алгорита;
- Распоживи системи компјутерских симулација енергетских перформанси објекта нису једноставни за коришћење и разумљиви за архитекте, софтверски пакет за обраду података је углавном финансијски неприступачан, велики број софтвера има ограничене могућности када је у питању оптимизација термичких карактеристика фасада;
- Ограниченост законске регулативе у Србији само на поједине енергетске карактеристике објекта;

Разлози за одсуство имплементације параметарски моделираних фасада на територији Републике Србије, али и уопште, било на новим, било на реконструисаним објектима, су:

- Економског карактера - имплементација параметарских фасада изискује веће иницијално улагање;
- Кадровског карактера - мали број стручњака истраживача и истраживачких организација, као и ограничена количина финансијских средстава за едукацију и спровођење истраживања из референтних области;
- Одсуство интересовања инвеститора за подстицање одрживе градње.

Критички преглед досадашњих истраживања

За потребе овог истраживања прикупљен је велики број информација, које третирану тему сагледавају из више различитих углова. Прикупљене информације се угрубо могу поделити на три основне категорије:

- Прву категорију чине истраживања која се баве глобалним проблемима који се тичу климатских промена, потрошње енергије и загађења, као и проблематиком одрживости и специфично енергетске ефикасности у области архитектуре, као потенцијалним решењем за те проблеме. Овој категорији припадају прва и друга група истраживања;
- Друга категорија истраживања се односи на параметарско моделовање у архитектури, са посебним акцентом на типологију параметарски моделираних фасада у својству енергетске ефикасности. Овој категорији припада трећа група истраживања;
- Трећа категорију чине истраживања метода и техника које се користе у циљу постизања енергетски ефикаснијих решења. Ову категорију чине истраживања везана за методе оптимизације које изналазе решења, као и компјутерске програме и програмске додатке који ту оптимизацију могу да изврше. Овој категорији припадају четврта и пета група истраживања;

Специфично, предмет истраживања се третира кроз изворе информација подељене у следеће групе истраживања:

Прва група истраживања се бави поводом који је покренуо размишљање о теми дисертације. Климатске промене су узрочник потенцијално великих проблема на планети Земљи, а последице глобалног загревања и повећаног нивоа угљен-диоксида се већ примећују. Као би се овај процес деградације животне средине зауставио или барем знатно ублажио, неопходан је читав низ конкретних акција и мера, али и свеобухватно повећање свести о важности проблема.

Друга група истраживања се бави питањем одрживости са посебним акцентом на енергетску и еколошку одрживост. Грађевинска индустрија, као један

од главних узрочника претходно наведених проблема има велику одговорност да промени традиционалне постулате процеса пројектовања и извођења објеката. Као резултат тога, све је већа потреба за тзв. „перформативном архитектуром“ (енг. *performative architecture*), односно начином пројектовања који посебну пажњу поклања перформансама објекта, у циљу умањења потрошње енергије и емисије штетних гасова. Коначно, ову групу истраживања чине већ донети закони и друге мере пре свега у регулативама земаља Европске Уније и Сједињених Америчких Држава, али и Републике Србије, који дефинишу и промовишу овај вид пројектовања.

Трећа група истраживања се бавим параметарским моделовањем као савременим феноменом у архитектури, разлозима његове појаве, као и широм применом у процесу пројектовања. Специфично истраживања се фокусирају на фасаде, као везу између објекта и спољашње средине, која има највећи утицај на енергетска и еколошка својства будућег објекта. Истраживања се баве типологијом параметарски моделираних фасада, обликом и материјалима панела који је чине, као и математичким правилима по којем се параметарски шаблони јављају.

Четврта група истраживања се бави улогом „БИМ“ програма (енг. *Building Information Modeling - BIM*) у креирању симулација које испитују енергетска и еколошка својства објеката у раним фазама пројектовања. Истраживања се фокусирају на програм „Аутодеск Ревит“ (енг. *Autodesk Revit*), као најзаступљенији БИМ програму, са великим потенцијалом, али тренутно и великим ограничењима када су у питању енергетске симулације. Специфично истраживања се специјализују за део Ревит програма који је у служби тзв. „визуелног програмирања“, а који се назива „Дајнамо“ (енг. *Dynamo*). Дајнамо омогућава креирање параметарски дефинисаних форми, а садржи и посебно програмиране додатке који могу да испитују добијене форме на различите начине. Посебно се препознају и програм „Пројекат Рефинери“ (енг. *Project Refinery*), који врши оптимизацију форме употребом генетског алгоритма, као и интернет платформе „Аутодеск Инсајт“ (енг. *Autodesk Insight*) и „Грин билидинг студио“

(енг. *Green Building Studio – GBS*), које анализирају различите енергетске карактеристике.

Пета група истраживања анализира оптимизацијске методе, као део метахеуристичких метода за изналажење оптималних решења, са посебним фокусом на генетски алгоритам, који је најраспрострањенији и тренутно најпоузданији међу истраживачима, не само у архитектури, него и у другим областима. Генетски алгоритам је погодан при изналажењу решења, како са једним, тако и са више критеријума који га дефинишу. Вишекритеријумска оптимизација је посебно значајна, јер резултује скупом оптималних решења из којег архитекта може одабрати оно које највише одговара захтевима пројекта. Коначно истраживања се баве и питањем тзв. „Парето оптимума“ (енг. *Pareto optimum*), који графички приказује скуп оптималних решења добијених процесом вишекритеријумске оптимизације.

Развијање свести о последицама климатских промена резултирале су великим бројем истраживања на ту тему. Највећи број истраживања се односи на уочавање проблема глобалног повећања температуре, све учесталијих појава климатских екстрема, као и претерана загађеност животне средине. Један део истраживања се фокусира на законску регулативу и друге акције и мере које, пре свега високо развијене државе, примењују у циљу спречавања ових појава.

Република Србија, као и друге државе у развоју, тренутно недовољно придаје значај овој теми, али је приметан повећан ниво интересовања, те је све већи број истраживања која се баве овом проблематиком на локалном нивоу.

Третирање омотача објеката као прве и најзначајније баријере између објекта и окружења, у својству енергетских и еколошких перформанси је такође детаљно обрађена тема. Постоји знатан број истраживања која испитују материјале фасада, димензије отвора на фасади, засторе и друге параметре у контексту енергетске ефикасности (*Wright et al., 2002, Malkawi, 2004*). Међутим, постоји јако мали број истраживања у светској пракси уз потпуно одсуство у домаћој, који се бави везом између параметарски креираних форми и енергетске

ефикасности, а специфично параметарски моделираним фасадама као потенцијално енергетски ефикасним решењима.

Истраживања која се баве употребом БИМ програма зарад постизања енергетски ефикасних решења су недавно постала актуелна. Број ових истраживања је у знатном порасту, услед увиђања предности везане за количину информација које БИМ модели разматрају током анализе. Други разлог за повећано интересовање је и готово стандардизована употреба програма као што је Ревит у свакодневној пројектантској пракси, па је директно вршење анализа у оквиру овог програма много ближе архитектама и генерално практичније, него што је то било случај са специјализованим програмима са нејасним интерфејсом или без интерфејса уопште. Веома мали број истраживања се бави визуелним програмирањем као методом за решавање енергетских, структуралних и других проблема у процесу пројектовања, али је и тај број у експоненцијалном порасту, због енормног потенцијала које овај концепт нуди. Постојећа истраживања на ту тему су у највећем проценту везана за програм за визуелно програмирање „Грасхопер“ (енг. *Grasshopper*), који ради на платформи програма „Рајноцерос“ (енг. *Rhinoceros*) из простог разлога што је овај програм најдуже доступан архитектама и истраживачима. Међутим, од појаве Дајнама 2015. године, овај тренд се сигурним корацима мења, због наведених значајних предности које БИМ модел нуди. Ови програми се ретко помињу у домаћој литератури, уз потпуно одсуство истраживања њихових могућности.

Тема оптимизације употребом генетског алгорита, као метода за изналажење адекватног решења, је позната у медицини, биологији, математици, програмирању и неким другим областима, али је веома мало истражена у области архитектуре. Међутим, потенцијал за примену овог метода у архитектури је веома велик и то у циљу изналажења решења везаних за форму, конструкцију, енергетске перформансе објекта, просторне шеме и друго. Највећи број истраживања дефинише генетски алгоритам као методу која је најфлексибилнија и најједноставнија, па се најлакше може потенцијално имплементирати у свакодневној пракси. Знатно је мањи број истраживања која се баве другим оптимизацијским методама у архитектури, као што су „симулирано каљење“ (енг.

simulated annealing) или „табу претрага“ (енг. *tabu search*), али је и њихов број у порасту, а стално се откривају и нови примери где се могу употребити. Домаћа литература садржи информације о оптимизацијским методама употребом генетског алгорита, пре свега из области математике, али се готово нигде не помиње у контексту архитектуре.

Обухват истраживања

Истраживање уопштено обухвата питања перформативне архитектуре и параметарског моделовања.

Специфично истраживање обухвата генетски алгоритам као адекватан метод оптимизације, који може да помогне у изналажењу оптималног решења параметарски моделираних фасада, са аспекта аутономије дневне светлости и потрошње енергије. У том смислу, анализирају се хипотетички модели поменутих фасада за климатске услове Београда. Нумеричке симулације би требало да покажу сет оптималних решења, чија ефикасност директно зависи од параметара који се дефинишу приликом моделовања фасаде.

Циљеви истраживања

Основни циљ истраживања је да прикаже примену једне јасно дефинисане методологије енергетске оптимизације параметарски моделиране фасаде употребом генетског алгорита.

Конкретно истраживање има за циљ:

- Дефинисање референтног модела пословног објекта са параметарски моделираном фасадом за климатске услове Београда;
- Испитивање параметарски моделиране фасаде са аспекта енергетске ефикасности употребом генетског алгорита;
- Формирање препорука за даљи рад.

Истраживање има за циљ да истакне значајне потенцијале оптимизацијских метода приликом изналажења оптималних решења, не само у контексту енергетске ефикасности, већ и шире, те да покрене свест о томе како се овај метод може користити и за неке нове, досад нерешиве проблеме. Са друге стране истраживање има за циљ да покаже да се ове анализе могу спровести интегрисано у оквиру БИМ програма као што је Ревит, а да је то заправо и пожељно, узимајући у обзир ниво информација које БИМ модел сам по себи иницијално садржи или се накнадно може дефинисати. Коначно истраживање има за циљ да промовише употребу програма за визуелно програмирање као што је Дајнамо, јер вишеструко може да унапреди ефикасност Ревита у оквиру самог процеса пројектовања, а специфично може имати улогу у креирању параметарски дефинисаних форми, те су могућности примене практично неограничене.

Задаци истраживања

На основу циљева могу се дефинисати следећи задаци истраживања:

- Идентификација и анализа кључних карактеристика које дефинишу параметарске фасаде, као што су облик и величина панела, заротираност панела, примењени материјали и слично;
- Идентификација и анализа кључних параметара који дефинишу објекат на којем је имплементирана параметарски моделирана фасада, као што су спратност, оријентација, режим коришћења простора, климатски услови;
- Нумеричке симулације хипотетичког модела, које на основу дефинисаних параметара, резултирају сетом оптималних решења;
- Анализа и валоризација добијених решења са аспекта енергетске ефикасности, упоредна анализа резултата и сагледавање доприноса;
- Систематизација резултата кључних при формирању препорука за примену оваквог метода изналажења решења.

Научна оправданост дисертације, очекивани резултати и практична примена резултата

Научна оправданост овог истраживања се огледа у чињеници да у домаћој литератури не постоји истраживање које се бави енергетском оптимизацијом параметарски моделираних фасада, док у светској пракси постоје истраживања која се делимично баве овом проблематиком: као што је примена метода оптимизације у раној фази пројектовања, али користећи Рајноцерос као програм за моделовање и Грасхопер као програм за визуелно програмирање; или употреба БИМ програма као што је Ревит за процес енергетских симулација, али без примене оптимизацијских метода кроз Дајнамо програм за визуелно програмирање и Рефинери програм за вишекритеријумску оптимизацију.

Научни допринос овог истраживања је да докаже како се употребом генетског алгоритма као вишекритеријумског оптимизацијског метода, при раној фази пројектовања, може дизајнирати параметарски дефинисан облик фасаде објекта, који доприноси побољшању визуелног комфора и уштеди енергије будућег објекта, конкретно за пословне објекте у климатским условима Београда. Посредно, допринос овог истраживања је и дефинисање смерница за примену овог метода за објекте било којих намена и климатских услова.

Допринос се огледа у формирању референтних хипотетичких модела параметарски моделираних фасада и енергетских симулација њихових перформанси за климатске услове Београда, на основу чега се формирају препоруке за даље пројектовање.

Очекивани резултати овог истраживања су:

- Типологија параметарски моделираних фасада формирана на основу анализе примера;
- Креирање алгоритма у Дајнаму, за коју Рефинери врши оптимизацију параметарски моделираних фасада у контексту енергетске ефикасности;

- Методологија и препоруке за енергетску оптимизацију и пројектовање енергетски ефикасних параметарски моделираних фасада;
- Операционализација знања – имплементација нових сазнања у пракси.

Практичан део овог истраживања је подстрек другим истраживачима, да уче и прошире потенцијалну примену генетског алгорита, а посредно и других оптимизацијских метода, као и подстрек пројектантима да користе ову методу приликом пројектовања фасада, како би на основу сета добијених оптималних решења, могли сами да се одреде за оно које највише одговара конкретном пројектом задатку, али и личним преференцијама. Добијена методологија би требало да буде универзална за све локацијске услове, али и применљива независно од намене објекта који имплементирају параметарски дефинисану фасаду.

Полазне хипотезе истраживања

У складу са изнетим предметом, проблемима и циљевима истраживања, дефинисане су следеће хипотезе:

Хипотеза 1: *Могуће је формирати методолошки поступак који у раној фази пројектовања омогућава креирање сета оптималних решења параметарски моделираних фасада употребом генетског алгорита, за климатске услове Београда, која у исто време омогућавају одговарајући природни осветљај унутар објекта и минимизују потрошњу енергије потребну за грејање и хлађење.*

Предметно истраживање представља методологију за вишекритеријумску оптимизацију параметарски моделираних фасада за климатске услове Београда. Ова претпоставка се доказује изналажењем оптималног хипотетичког модела, који би својим карактеристикама (отвор панела, величина панела, материјализација, оријентација, позиција на фасади) омогућио максимални светлосни комфор уз минималну потрошњу енергије за темперирање простора.

Хипотеза 2. *Енергетска ефикасност параметарски моделиране фасаде директно зависи од одабира параметара (као што су величина, облик, заротираност и материјал панела, као и позиција на фасади на којој се панел налази) и њихових граничних вредности.*

Ова претпоставка се доказује упоређивањем решења добијених из ранијих генерација оптимизације, са оптималним решењима. Генетски алгоритам током процеса оптимизације контролише ове параметре и за сваки бира вредност у раније дефинисаном граничном опсегу. Током приказа првог сета решења, тј. прве генерације, генетски алгоритам насумично бира вредности параметара које чине решење, док током времена, кроз следеће генерације, генетски алгоритам се унапређује тако што чешће користи оне вредности параметара које су у ранијем генерацијама давали добра решења. Осим што се доказује да ови параметри имају директан утицај на енергетска својства фасаде, на овај начин се доказује и који од параметара има више утицаја на добијена решења.

Научне методе истраживања

Током овог истраживања примењено је више научних метода уз помоћ којих се третира постављени проблем истраживања, доказују постављене хипотезе и остварују циљеви истраживања.

Дисертација почиње јасном дефиницијом проблематике која се истражује, на основу критичке анализе прикупљене референтне литературе. Ова анализа омогућава поставку теоријског оквира на којем ће се ослањати даље истраживање. Теоријски оквир се фокусира на параметарско моделовање, специфично на параметарски моделиране фасаде, како би се дошло до формирања типологије неопходне за даљи ток истраживања. Формирање типологије параметарских фасада последично утиче на одабир референтних примера, чија даља анализа, финално доводи до уочавања и дефинисања кључних параметара који утичу на енергетске перформансе објеката. Добијени параметри ће касније бити употребљени као променљиве вредности приликом оптимизацијског процеса.

Како би се доказале научне хипотезе врши се експериментални део истраживања. Процес почиње креирањем хипотетичког модела објекта са јасно дефинисаним реалним карактеристикама (форма, оријентација, спратност, спратна висина, конструкција, материјали, намена објекта), позиционираног у реалним климатским условима Београда. Овај процес се одвија у Ревиту, који има могућности да све ове карактеристике директно имплементира у хипотетички модел. Унете карактеристике су перманентне и не мењају се током процеса оптимизације. Процес се наставља креирањем хипотетичког модела фасаде која обухвата објекат, на основу параметара који су добијени из претходне анализе референтних примера. Процес параметарског моделовања се одвија директно у Дајнаму, док се у Ревиту визуализује у реалном времену. Параметри који дефинишу фасаду су током процеса оптимизације променљиви и имају своје граничне вредности, како би касније генетски алгоритам самостално одабрао потребне вредности зарад креирања оптималног решења.

Дајнамо скрипта која дефинише изглед параметарске фасаде се проширује посебно програмираним пакетима који ће у процесу симулације вршити испитивања својстава енергетске ефикасности. Конкретно, скрипта се програмира тако да посредно испитује својства потрошње енергије у хипотетичком моделу са једне стране и количину дневне светлости која допире у објекат са друге стране. Оптимизација се врши у Рефинерију, користећи информације добијене из Дајнама и Ревита. Резултати оптимизације се аутоматски записују у екстерну Ексел табелу. Током оптимизацијског процеса, Рефинери унапређује решења, тако што „памти“ параметре који су претходно доводили до добрих решења и укршта их са другим параметрима који су доводили до добрих решења, креирајући тако нова, потенцијално боља решења. Генетски алгоритам понавља овај процес, све док решења не постану оптимална, односно задовољавају обе задате функције, у овом случају директно за максимизацију количине дневне светлости и посредно за минимализацију утрошка енергије. Добијени резултати се уписују у Паретов дијаграм, у којем оптимална решења формирају Паретов фронт. Решења из Паретовог фронта финално креирају хипотетичке моделе фасаде, чија се енергетска својства тестирају преко интернет платформе Грин Билдинг Студија.

Након синтезе претходно прикупљених података и добијених резултата анализа, установљавају се основни принципи и закључци и дефинишу препоруке за пројектовање енергетски ефикасних параметарски моделираних фасада за конкретне климатске услове.

Генерална структура докторске дисертације

Рад је подељен у две опште целине.

Прву целину чини теоријски оквир који се бави узроцима и поводима за истраживање предложене теме, као и анализом чињеница које недвосмислено објашњавају предмет истраживања. Говори се о перформативној архитектури као актуелном начину пројектовања енергетски ефикасних зграда, параметарском моделовању и параметарски моделираним фасадама, БИМ моделима у служби анализе енергетске ефикасности, као и метахеуристичким оптимизацијским методама са посебним акцентом на генетски алгоритам. Први део је подељен у четири поглавља и то:

- Прво поглавље се бави перформативном архитектуром као све заступљенијем начином пројектовања у савременој архитектонској пракси. Компјутерски перформативни дизајн се на основу референтних, интернационалних примера, уочава као потенцијално решење за проблеме превелике потрошње енергије у зградама. Приказују се статистички подаци о потрошњи енергије у пословним објектима, као и сертификациони системи према којима се они класификују. Финално се наводе примери изведених и планираних објеката на територији Београда који поседују неки од ових сертификата или су у процесу сертификације;
- Друго поглавље се бави параметарски моделираним фасадама. Дефинише се параметарско моделовање са својим предностима и недостацима. Финално се кроз референтне интернационалне примере дефинишу кључни параметри који чине ове фасаде, као што су геометрија фасаде, геометрија

елемената, величина елемената, дистрибуција елемената, ротација елемената, артикулација фасаде и боје и материјали фасаде;

- Треће поглавље се бави дефинисањем интегрисаног система, који у оквиру једног БИМ програма, има техничке могућности да изврши све неопходне процесе везане за моделовање, оптимизацију и енергетске симулације хипотетичких модела. Дефинише се појам БИМ-а, као система за координацију током свих фаза пројектовања, извођења и одржавања објекта. Описује се БИМ програм Ревит, као најзаступљенији у савременој архитектонској пракси, који служи креирању хипотетичких модела са реалним физичким карактеристикама. Дефинише се појам визуелно програмирања, које омогућава креирање алгорита, за аутоматско извршење одређених задатака. Описује се програм за визуелно програмирање Дајнамо, који ради у окружењу Ревита. Описује се програм Рефинери, који користи информације из Дајнама и Ревита, како би вршио оптимизацију употребом генетског алгорита. Описује се платформа Грин Билдинг студио, која врши енергетске симулације у Ревит окружењу. Финално, уочавају се предности и недостаци оваквог интегрисаног система;
- Четврто поглавље се бави оптимизацијским методама. Дефинише се појам метахеуристичких оптимизацијских метода и еволуцијских алгоритама као једне од ових метода. Специфично, дефинише се генетски алгоритам као најзаступљенији еволуцијски оптимизацијски метод. Детаљно се описује основна структура генетског алгорита, кроз основне чиниоце који се називају селекција, укрштање и мутација. Дефинише се функција циља, начин на који генетски алгоритам репрезентује решења и услове заустављања алгорита. Након тога се описује вишекритеријумска оптимизација, као и Паретов оптимум који служи за приказивање оптималних решења. Финално се уочавају предности и недостаци генетског алгорита.

Другу целину чини експериментални део истраживања, којег карактеришу креирање хипотетичког модела, програмирање скрипте, дефинисање променљивих параметара, оптимизацијски процес и финално нумеричке

симулације. Детаљно се описује оптимизацијски процес, даје приказ резултата истраживања, потврђују постављене хипотезе, образлаже применљивост постигнутих резултата и указује на правце даљих истраживања. Други део је подељен у три поглавља и то:

- Прво поглавље се бави креирањем хипотетичких модела. Дефинише се локација на територији општине Нови Београд, одређује се оријентација хипотетичких модела, дефинишу се реални климатски услови за ту локацију, као и режим коришћења простора који осликава пословне објекте. Креира се унутрашња структура хипотетичког модела и описује се начин на који организација простора унутар те структуре може да се мења. Креира се матрица фасаде, дефинишу се функције циља и променљиви параметри, неопходни за оптимизацију. Врши се оптимизација фасаде употребом генетског алгоритма и уочава се Паретов фронт оптималних решења. На основу добијених резултата, формирају се два оптимална хипотетичка модела са променљивим параметрима, а дефинишу се и три хипотетичка модели са фиксним параметрима, који служе као референтни оквир за валоризацију резултата. Оптимални хипотетички модели, додатно се унапређују након још једне оптимизације и дефинишу се два нова алтернативна модела. Финално се упоређују физичке карактеристике свих седам хипотетичких модела;
- Друго поглавље се бави вршењем енергетских симулација изабраних модела. Добијени резултати се валоризују и међусобно упоређују. Приказују се трансмисиони топлотни губици кроз омотач зграде, годишња финална енергија за грејање зграде, годишња финална енергија за хлађење зграде, месечна финална енергија за грејање и хлађење зграде, укупна годишња финална енергија раздвојена по системима, топлотна оптерећења за најтоплији и најхладнији период године и количина емисије угљен-диоксида. Финално се дискутује о добијеним резултатима;
- Треће поглавље чини закључак у којем се образлаже примена ове методологије у пракси, потврђују полазне хипотезе истраживања и дају смернице за даља истраживања на ову тему.

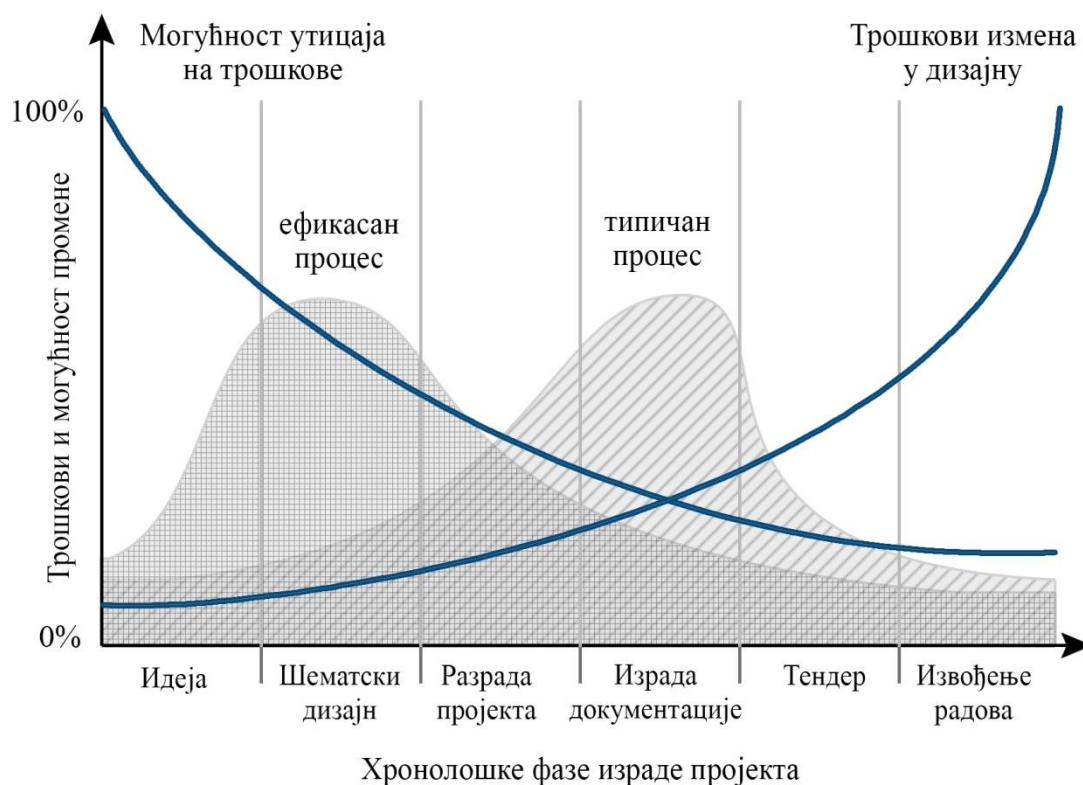
1. ПЕРФОРМАТИВНА АРХИТЕКТУРА

Перформативна архитектура је метод пројектовања по којем перформансе будућег објекта имају водећу улогу у креирању његове форме (Oxman et al., 2007, стр. 227). Термин „перформативно“ је заснован на два принципа: креирање и трансформација геометријског модела и евалуација квалитета заснована на симулацијама енергетских, структуралних, механичких или других особина. Перформативни дизајн се из тог разлога односи на примену резултата добијених из симулација, на креирање и модификовање геометријске форме. На овај начин, дизајн долази као резултат, који је при симулацији приказао најбоље решење за одређени сет услова. Перформативна архитектура привлачи све већу пажњу у савременој архитектонској пракси. Потреба за ефикаснијим решењима, сигурним корацима мења тренутну парадигму процеса пројектовања при којој „форма прати функцију“ (енг. *form follows function*), установљену још крајем деветнаестог века од стране Луиса Саливена (*Louis Sullivan*), за нову, у којој „форма прати перформансе“ (енг. *form follows pefromnace*), (*Hensel, Menges*, 2008, стр. 188). Перформативна архитектура потенцијално може бити једно од кључних решења за савремене горуће проблеме, као што су велики утрошак енергије, климатске промене и последице глобалног загревања.

Првобитне идеје о перформативној архитектури јавиле су се седамдесетих година двадесетог века, али су доживеле експанзију развојем софтвера који врше различите типове симулација. Перформансе дизајна су још тада препознате као главне одреднице приликом креирања нових, ефикаснијих решења. Међутим, првобитни софтвери омогућавали су тестирање перформанси тек након изградње објекта, па је револуција у овој области почела са појавом софтвера који омогућавају дигиталну симулацију објекта, још у раној пројектантској фази. На овај начин, може се доћи до решења која су ефикаснија по многим параметрима, уз смањење трошкова, али и знатну уштеду времена. Перформативни дизајн може узети у разматрање један критеријум (нпр. структуралне перформансе, енергетске перформансе, акустичне перформансе итд.) или више критеријума одједном.

Софтвери за симулацију засновани су на методу коначних елемената (енг. *finite-element method - FEM*), при којем се модел дели на мање, међусобно повезане елементе, на којима се прецизно врши структурална, енергетска, акустична и друга анализа, било које комплексности (*Shea, 2003, стр. 255*). Развојем софтвера за симулацију, квантитативна евалуација специфичног дизајна може бити и квалитативно сагледана, захваљујући визуелном графичком приказу резултата. Упоредивањем различитих решења, једноставније него икад пре се може доћи до решења који даје најбоље перформансе.

Грађевински инжењер и професор Бојд Полсон (*Boyd Paulson*), објављује истраживање (*Paulson, 1976*) у којем уочава опадање могућности утицаја на архитектонски пројекат, како он напредује временом. Ову појаву додатно истражује и прилагођава савременим условима архитекта Патрик МекЛими (*Patrick MacLeamy*), те закључује важност перформативне архитектуре, посебно у раној фази израде пројекта, где постоји највише могућности за промену, уз минималне последице на финалне трошкове (*MacLeamy, 2010, стр. 2*), (слика 1).



Слика 1. МекЛимијева крива. Извор: Ауторска илустрација према *MacLeamy, 2010*

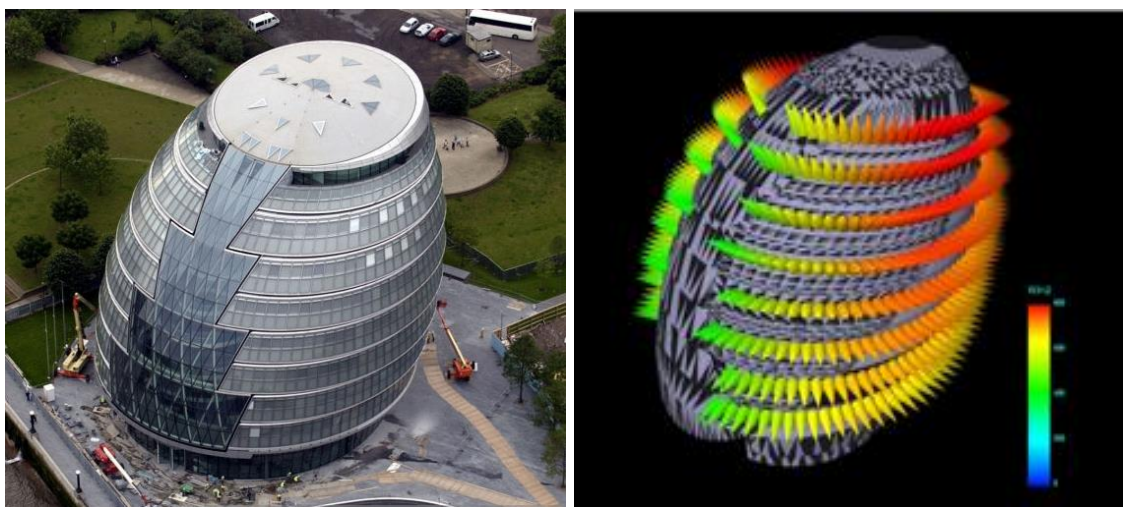
1.1 Компјутерски перформативни дизајн

Компјутерски перформативни дизајн је метод изналажења оптималног решења изгледа форме објекта и садржи три основне компоненте: компјутерски дизајн, еволуцијску оптимизацију и симулацију перформанси објеката (*Toulouropaki, Theodosiou, 2017, стр. 4*), (слика 2). Свака од ових компоненти има важну улогу у креирању моћне синергије, која резултира најбољим решењем за постављене захтеве. Компјутерски дизајн се односи на креирање виртуелног хипотетичког модела са реалним физичким својствима, као и окружења у којем се модел налази. Симулација перформанси се односи на метод за прецизно рачунање перформанси хипотетичких модела или изведених објеката, са аспеката потрошње енергије, осветљења, акустике, климатизације, унутрашњег квалитета ваздуха, трошкова реализације итд. Еволуцијска оптимизација је процес изналажења оптималног решења за дефинисане функције циља употребом еволуцијских метода претраге. Ови појмови су детаљније објашњени у поглављима 3 и 4.



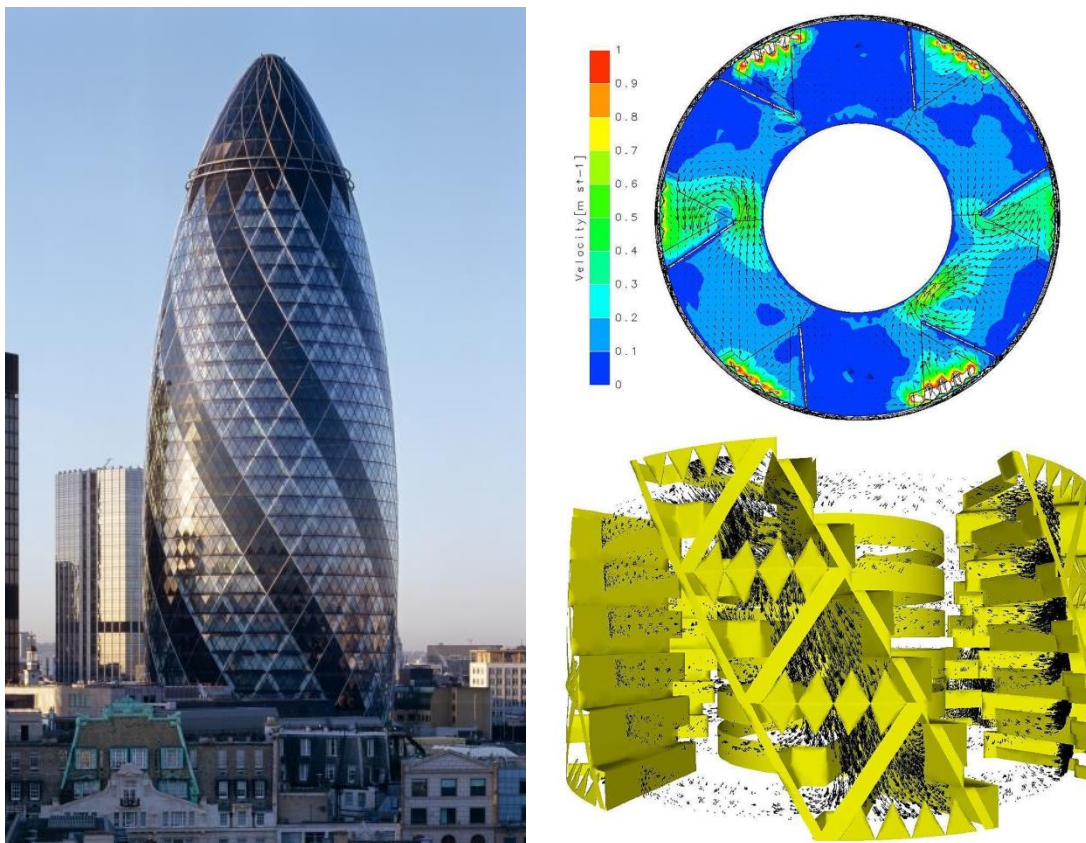
Слика 2. Компјутерски перформативни дизајн
Извор: Ауторска илустрација према *Toulouropaki et al., 2017*

Пројекти широм света засновани су на принципима перформативне архитектуре. Успешни примери, мотивишу и подстичу свест за даље унапређење принципа перформативног дизајна. На примеру Градске већнице Лондона (енг. *The Greater London Authority - GLA*), (слика 3, лево), соларна радијација је употребљена као детерминишући фактор при креирању основне форме објекта. Интеракција између модела и дневног осветљаја је истраживана, а резултати су искоришћени за добијање енергетски оптималног дизајна (слика 3, десно).



Слика 3. Извођење објекта Градске већнице (лево) и анализе соларне радијације (десно)
Извори: <https://www.gettyimages.dk/detail/news-photo/aerial-view-of-the-new-gla-headquarters-on-the-banks-of-the-news-photo/830879312> (лево) и
<http://kweehow.blogspot.com/2014/06/week-7-lure-of-continous-skin.html> (десно)

Основна форма зграде „Геркин“ (енг. *The Gherkin*) у Лондону је прилагођена структуралним оптерећењима и преовлађујућим ударима ветра (слика 4, лево). Дигитални модел је подвргнут специјалним анализама кроз систем „компјутеризоване динамике флуида“ (енг. *Computational fluid dynamics - CFD*), како би се визуелно анализирано кретање ваздуха кроз објекат, али и око њега (слика 4, десно).



Слика 4. Изглед зграде „Геркин“ (лево) и анализе кретања ваздуха (десно).
Извор: <https://www.archdaily.com/447205/the-gherkin-how-london-s-famous-tower-leveraged-risk-and-became-an-icon-part-2>

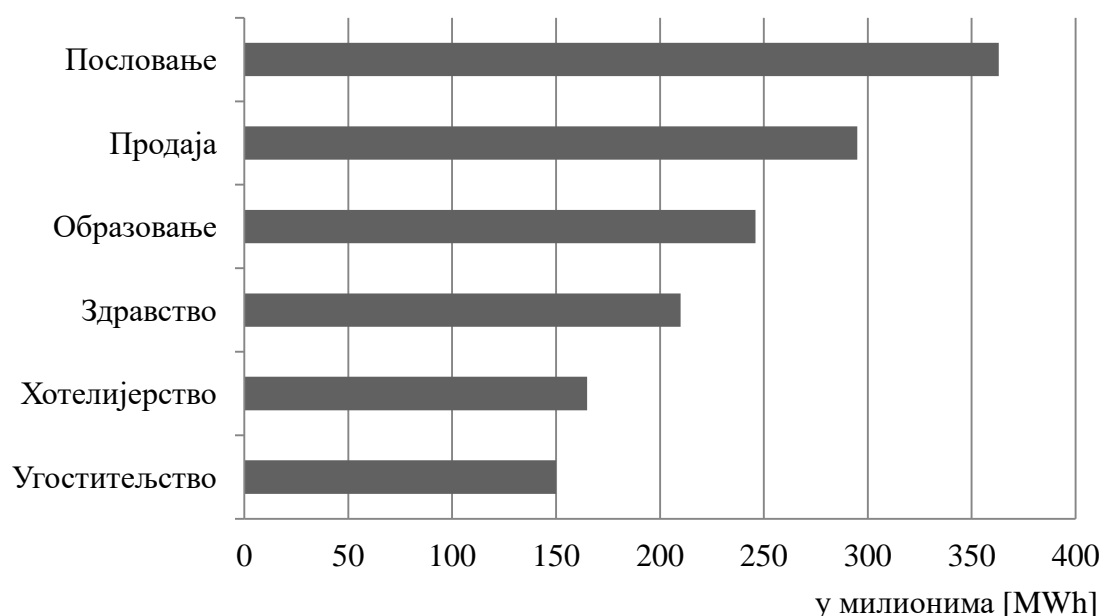
Форма објекта „Куће уметности“ (нем. *Kunsthaus*) у Грацу, у Аустрији (слика 5, лево), је након акустичних симулација, накнадно модификована и прилагођена повољним перформансама звука (слика 5, десно).



Слика 5. Изглед објекта „Куће уметности“ (лево) и анализе акустичних симулација (десно). Извор: <https://www.inexhibit.com/mymuseum/kunsthau-graz/>

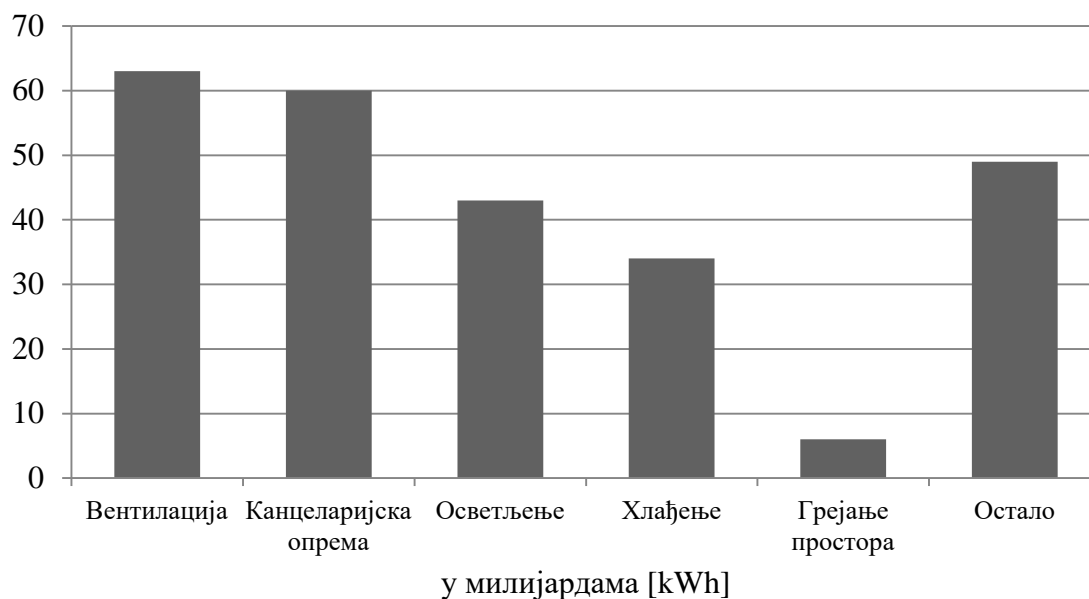
1.2 Потрошња енергије у пословним објектима

Према Америчкој администрацији која пружа информације о потрошњи енергије (енг. *The U.S. Energy Information Administration's - EIA*), зграде троше 41 % укупне енергије у Сједињеним Америчким државама (*EIA*, 2012, стр. 20). Према истом извору, комерцијални објекти свих намена заједно троше 19% укупне енергије. Највише енергије од свих комерцијалних објеката, троше пословни објекти (*EIA*, 2012, стр. 20), (дијаграм 1).



Дијаграм 1. Укупна потрошња енергије на годишњем нивоу комерцијалних објеката различитих намена. Извор: *EIA*, 2012

Највише електричне енергије пословни објекти троше на вентилацију, затим на канцеларијску опрему, те осветљење, хлађење и грејање простора (дијаграм 2). Реална потрошња количине енергије за грејање објекта је знатно већа од приказане вредности, али је удео електричне енергије мали, јер се највећи део ове енергије добија из неке врсте горива, најчешће природног гаса. Под категоријом „остало“, спада потрошња енергије за рад моторних пумпи, компресора ваздуха, генератора струје у случају нестанка исте, припрема топле воде, припремање и замрзавање хране.



Дијаграм 2. Годишња финална потрошња електричне енергије пословних објеката према намени у милијардама [kWh] Извор: EIA, 2012

Пословни објекти у САД на годишњем нивоу потроше 7,79 милијарди кубних метара природног гаса, од чега највећи део (6,06 милијарди кубних метара) за грејање простора (EIA, 2012, стр. 21).

1.3. Сертификација енергетски ефикасних пословних објеката

Сертификација енергетски ефикасних објеката у Србији је започета доношењем Правилника о енергетској ефикасности зграда (2011) и Правилника о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда (2011). Правилници садрже све информације неопходне за прорачун енергетских карактеристика зграде, као и њихову класификацију у тзв. „енергетске разреде“.

Пројектовање, извођење и употреба свих објеката високоградње, мора бити у складу са дефинисаним прописима везаних за енергетска својства објекта (Закон о планирању и изградњи, 2011). Енергетска својства објекта се потврђују добијањем тзв. „енергетског пасоша“, од стране овлашћеног лица и институције.

Овај сертификат је саставни део техничке документације која се прилаже уз захтев за издавање употребне дозволе. Енергетски пасош садржи израчунате вредности потрошње енергије у оквиру одређене категорије зграда, енергетски разред зграде и смернице за побољшање енергетских својстава зграде. Енергетски пасош приказује годишњу потребну енергију за грејање и хлађење објекта, припрему санитарне топле воде, вентилацију и осветљење.

Према Правилнику о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда (2011), енергетски разред за одређену намену објекта се додељује на основу релативне вредности годишње потрошње финалне енергије за грејање [%] и представља процентуални однос специфичне годишње потребне топлоте за грејање по јединици површине Q_H [kWh/m²a] и максимално дозвољене специфичне годишње потребне топлоте за грејање по јединици површине $Q_{H,max}$ [kWh/m²a] (табела 1).

Табела 1. Одређивање енергетског разреда пословних зграда. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011

Пословне зграде		Нове	Постојеће
Енергетски разред	$Q_{H,nd\ rel}$ [%]	$Q_{H,nd}$ [kWh/(m ² a)]	$Q_{H,nd}$ [kWh/(m ² a)]
A+	≤ 15	≤ 8	≤ 10
A	≤ 25	≤ 14	≤ 17
B	≤ 50	≤ 28	≤ 33
C	≤ 100	≤ 55	≤ 65
D	≤ 150	≤ 83	≤ 98
E	≤ 200	≤ 110	≤ 130
F	≤ 250	≤ 138	≤ 163
G	> 250	> 138	> 163

Зграде могу имати неки од осам енергетских разреда од „А+“ до „G“. Енергетски разред „А+“ имају зграде са најбољим енергетским својствима, а енергетски разред „G“ зграде са изразито неповољним енергетским својствима. Енергетски разред нове зграде мора бити најмање „C“, те је дозвољена максимална годишња потрошња финалне енергије за грејање нових пословних зграда 55 kWh/m².

Потрошња енергије за грејање и хлађење у значајној мери зависи од термичког омотача објекта. Пролаз топлоте кроз елементе омотача изражен је коефицијентом U . Коефицијент пролаза топлоте неког елемента омотача се може добити путем прорачуна, међутим, савремени софтвери имају могућност аутоматског прорачуна на основу задатих термичких својстава материјала који га чине. Правилник о енергетској ефикасности зграда (2011) дефинише максималне дозвољене вредности коефицијента пролаза топлоте за омотач зграде (табела 2).

Табела 2. Највеће дозвољене вредности коефицијента пролаза топлоте за омотач зграде. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011

Грађевински елемент	Дозвољен U_{max} [W/(m ² K)]
Раван кров изнад грејаног простора	0,15
Под на тлу	0,3
Спољни зид	0,3
Прозори, врата	1,5

Правилник о енергетској ефикасности зграда (2011), дефинише и друге параметре неопходне за пројектовање пословних објеката (табела 3).

Табела 3. Прорачунски подаци за пројектовање пословних објеката. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011

Улазни подаци	Пословна зграда	Јединица
Унутрашња пројектна температура за зимски период	20	°C
Унутрашња пројектна температура за летњи период	26	°C
Површина по особи (заузетост)	20	m ² /per
Одавање топлоте по особи	80	W/per
Одавање топлоте људи по јединици површине	4,0	W/m ²
Присутност током дана (просечно месечно)	6	h
Годишња потрошња електричне енергије по јединици површине грејаног простора	20	kWh/m ²
Проток свежег ваздуха по јединици површине грејаног простора	0,7	m ³ /(h×m ²)
Проток свежег ваздуха по особи (оброк по особи)	14	m ³ /(h×per)
Топлота потребна за припрему СТВ по јединици површине грејаног простора	10	kWh/m ²

Исти Правилник, дефинише начин прорачуна емисије угљен-диоксида, на основу годишње примарне енергије коју објекат троши. За разлику од финалне енергије, примарна енергија узима у обзир и енергент који се користи за рад техничких система, неопходних пре свега за грејање простора. Примарна енергија се може добити и путем прорачуна, тако што се финална енергија помножи са фактором претварања за одређени енергент. Овај фактор је такође дефинисан Правилником и приказан је у табели 4.

Табела 4. Фактори претварања за прорачунавање годишње примарне енергије за поједине врсте извора топлоте. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011

Енергент	Фактор претварања
Уље за ложење	1,2
Гас	1,1
Угаљ	1,3
Дрвена биомаса	0,1
Електрична енергија	2,5
Даљинско грејање на фосилна горива	1,8
Даљинско грејање когенерацијом	1,0

Емисија угљен-диоксида која настаје приликом рада техничких система за климатизацију одређује се на основу дефинисане специфичне емисије угљен-диоксида за поједине врсте енергената (табела 5).

Табела 5. Специфичне емисије CO₂ за поједине врсте енергената. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011

Енергент	По јединици горива	По јединици енергије
Земни гас	1,9 kg/m ³	0,20 kg/kWh
Течни нафтни гас	2,9 kg/kg	0,215 kg/kWh
Екстра лако уље за ложење	2,6 kg/l	0,265 kg/kWh
Лако уље за ложење	3,2 kg/kg	0,28 kg/kWh
Даљинска топлота	0,33 kg/kWh	0,33 kg/kWh
Електрична енергија	0,53 kg/kWh	0,53 kg/kWh
Смеђи угаљ (домаћи)	1,5 kg/kg	0,32 kg/kWh
Смеђи угаљ (страни)	1,88 kg/kg	0,40 kg/kWh
Лигнит (домаћи)	1,0 kg/kg	0,33 kg/kWh

Емисија угљен-диоксида се приказује на годишњем нивоу и изражава у тонима или килограму по метру квадратном површине унутар термичког омотача зграде (Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011).

Осим домаће сертификације енергетски ефикасних објеката, у свету постоји и велики број других сертификационих система, од којих су најзаступљенији *LEED* (Сједињене Америчке Државе и Азија), *BREEAM* (Велика Британија), *GREENSTAR* (Аустралија), *DGNB* и *PASSIVHAUS* (Немачка) и други. Ови системи сертификације не сагледавају само количину потрошње енергије, већ и многе друге факторе везане за окружење, потрошњу воде, употребу одрживих материјала и могућност њихове рециклаже, квалитет унутрашњег окружења, па чак и иновације у дизајну и јединствене предности које поседује одређени објекат. Већина ових система се заснива на систему бодовања, те збир остварених поена, класификује објекат у неки од одређених стандарда (*LEED* сертификат омогућава четири нивоа класификације - основни, сребрни, златни и платинасти, *BREEAM* три – бронзани, сребрни и златни). Критеријуми по којем се објекти испитују су универзални, па ови системи имају интернационалну примену.

1.4 Енергетски ефикасни пословни објекти на територији општине Нови Београд

На територији града Београда постоји десетак објеката који поседују енергетски пасош Републике Србије или неки од иностраних сертификата енергетске ефикасности (*LEED* или *BREEAM* сертификат), (слика 6), док је одређен број њих у процесу сертификације (слика 7). Јасно се уочава да је највећи број ових објеката на територији општине Нови Београд. Разлози за то су велике површине парцела, на којима је могућа изградња великих пословних објеката са пратећим паркингом за запослене, као и добра повезаност са широким саобраћајницама и ауто-путем. Врло ја важна и непосредна близина великих хотелских објеката (хотел „Хајат“ (енг. *Hyatt Regency*), хотел „Краун Плаза“ (енг. *Crowne Plaza*), хотел „Фалкенштајнер“ (енг. *Falkensteiner*), хотел „Холидеј Ин“ (енг. *Hotel Holiday Inn*) и други), који омогућавају организацију великих

Прва енергетски ефикасна пословна зграда у Србији је „Блу Центар“ (енг. *Blue Center*), у Улици Шпанских бораца на Новом Београду (слика 8). Објекат површине око 50 хиљада метара квадратних, изграђен 2010. године, поседује енергетски пасош и *BREEAM* сертификат. Укупна количина енергије потребне за грејање, класификује овај објекат у „В“ енергетски разред од 2016. године. Са друге стране, сертификација на основу *BREEAM* стандарда, урађена је за перформансе објекта, где је са резултатом 63,4 % оцењен као „веома добар“ (енг. *very good rating*) и одржавање објекта, где је са резултатом 70,7 % оцењен као "одличан" (енг. *excellent rating*). Према *BREEAM* стандарду, сви резултати преко 50 % се оцењују као енергетски ефикасни. Фасаду чини структурална зид завеса са затамњеним анти-рефлекс стаклима, високих термичких перформанси.



Слика 8. Изглед зграде „Блу Центра“ на Новом Београду.

Извор: <http://www.energoprojekt.rs/poslovni-objekat-blue-centar-i-zgrada-sertifikovana-po-breeam-standardu-srbija/>


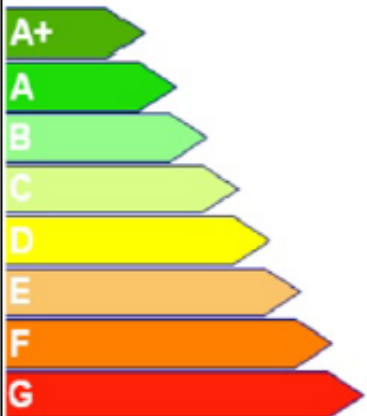
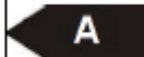
Само још једна пословна зграда тренутно поседује и енергетски пасош и неки од иностраних сертификата. Ова зграда се назива „ГТЦ, објекат А1“ (енг. *GTC Fortyone, building A1*) и налази се у Булевару Милутина Миланковића на Новом Београду (слика 9). Објекат површине око 15 хиљада метара квадратних, изграђен 2015. године, је уједно енергетски најефикаснија пословна зграда у Србији, тако што поседује *LEED GOLD* сертификат (од 2016. године) и „А“ енергетски разред (од 2015. године). Фасаду чини структурална зид завеса, са уграђеним сенилима на југозападној страни. Примењени материјали на фасади обезбеђују висока термичка својстава објекта.



Слика 9. Изглед зграде „ГТЦ, објекат А1“ на Новом Београду.
Извор: <https://gradinazemun.rs/reference-prikaz/gtc-fortyone-objekat-a1/>

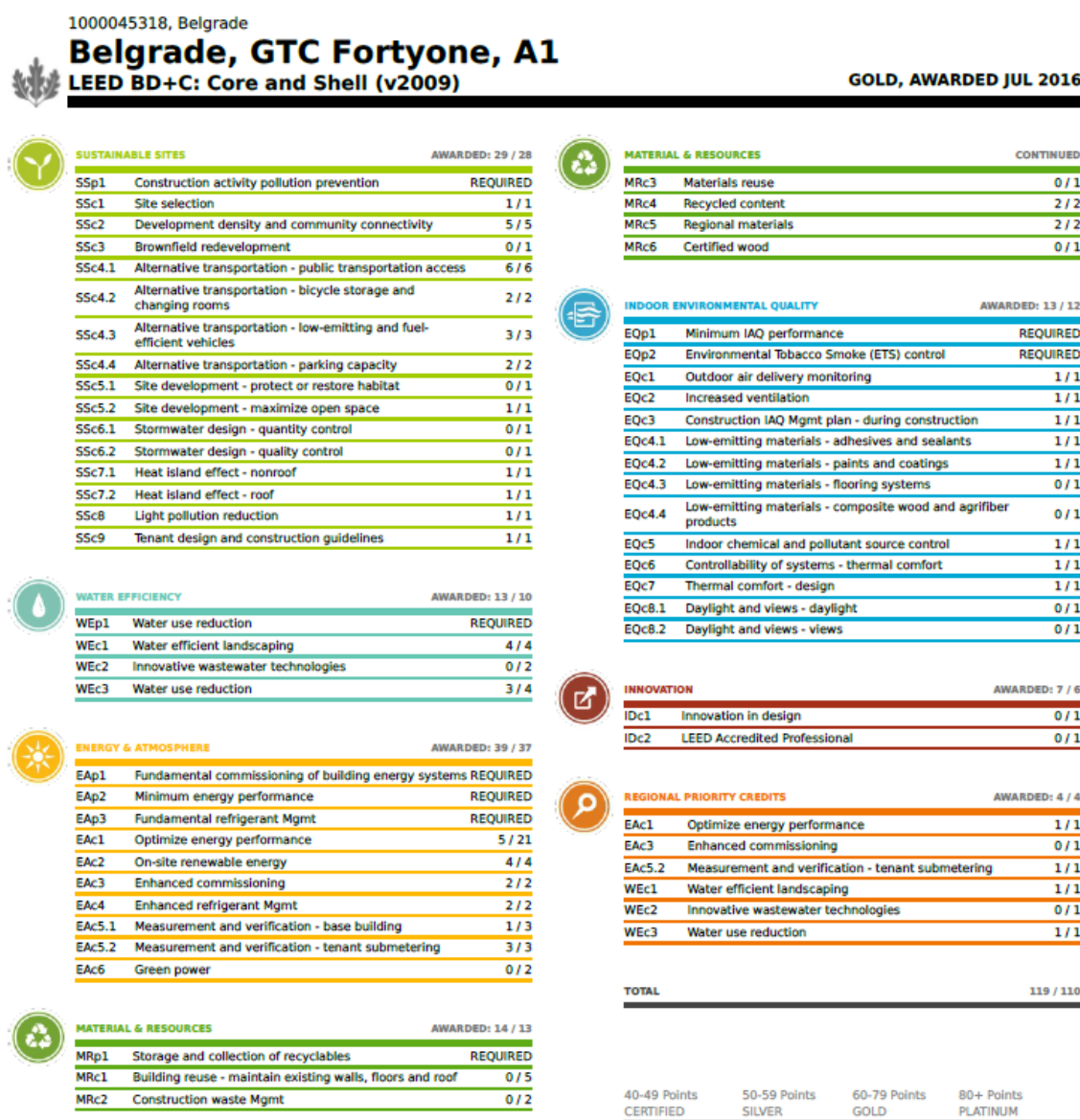
Изглед енергетског пасоша зграде „ГТЦ, објекат А1“ приказан је на слици 10. Према пасошу се закључује да је вредност релативне годишње потрошње финалне енергије за грејање је 24,98 %, односно 13,74 киловатчасова по метру квадратном нето површине зграде унутар термичког омотача.

ЕНЕРГЕТСКИ ПАСОШ ЗА НЕСТАМБЕНЕ ЗГРАДЕ

ЕНЕРГЕТСКИ ПАСОШ		ЗГРАДА	Нова зграда	
		Категорија зграде:	Управне и пословне зграде	
		Тачна намена зграде:	Пословни центар	
		Место, адреса:	НОВИ БЕОГРАД - БЕОГРАД, Београд (Нови Београд), Блок 41	
		Катастарска парцела:	К.Р. 6782, К. О. НОВИ БЕОГРАД	
		Назив објекта:	Пословни објекат (ГТЦ)	
		Власник/инвеститор/правни заступник:	Демо инвест д.о.о. Нови Београд	
		Извођач	Градина д.о.о. Београд	
		Година изградње:	2015	
		Година реконструкције/енергетске санације		
		Нето површина зграде унутар термичког омотача A_n [m ²]	10329,94	
		Прорачун	$Q_{H,nd,ref}$ [%]	$Q_{H,nd}$ [kWh/(m ² a)]
			24,98	13,74
			≤ 15	
			≤ 25	
			≤ 50	
			≤ 100	
		≤ 150		
		≤ 200		
		≤ 250		
		> 250		
	Подаци о лицу које је издало енергетски пасош			
	Овлашћена организација: Energy Concept DOO Novi Sad Тихомира Остојића 4/2 НОВИ САД - ГРАД			
	Одговорни инжењер: Горан Тодоровић Број лиценце: 381028012			
	Број пасоша:	EP000003172		
	Датум издавања/рок важења:	23.07.2015	23.07.2025	

Слика 10. Изглед енергетског пасоша зграде „ГТЦ, објекат А1“.
Извор: <http://www.crep.gov.rs/Reports/Pregled.aspx?idd=317&full=False>

Изглед *LEED* сертификата зграде „ГТЦ, објекат А1“ приказан је на слици 11. На основу увида у резултате, закључује се да објекат испуњава готово све услове везане за локацију и окружење (избор локације, приступ јавном превозу, као и бицикличком саобраћају), али и да има смањену потрошњу енергије за грејање и хлађење, смањену потрошњу воде и добар унутрашњи квалитет ваздуха. Са друге стране, зграда није направљена од материјала који се могу рециклирати, што је резултирало смањеним бројем бодова у укупном резултату.



Слика 11. Изглед *LEED* сертификата „ГТЦ, објекат А1“.
Извор: <https://www.usgbc.org/projects/belgrade-gtc-fortyone-a1>

Сертификат *LEED GOLD* поседују и остали објекти који припадају компанији „ГТЦ Србија“ („ГТЦ Кућа“ (енг. *GTC House*), (слика 12), „ГТЦ, објекат А2“ (енг. *GTC Fortyone, building A2*) и „ГТЦ, објекат Б“ (енг. *GTC Fortyone, building B*)), као и „Бизнис Гарден“ (*Business Garden*) у Кнез Даниловој улици, „Атријум“ (енг. *Atrium Belgrade Offices*) и „Имо Сава“ (енг. *SA Immo Sava City*) на Новом Београду.



Слика 12. Изглед „ГТЦ Куће“ на Новом Београду.
Извор: <http://www.gtcserbia.com/sr/projekti/vise/gtc-house/>

Сертификат *LEED GOLD* поседује и „Навигатор бизнис центар“ (енг. *Navigator Business Center*) који се налази у Булевару Милутина Миланковића на Новом Београду (слика 13). Поред овог објекта, тренутно је у изградњи и други објекат под називом „Навигатор 2“, који је већ у процесу сертификације (слика 14).



Слика 13. Изглед зграде „Навигатор бизнис центар“ на Новом Београду.
Извор: <http://navigatorbusinesscenter.rs/>



Слика 14. Будући изглед зграде „Навигатор 2“ на Новом Београду.
Извор: <https://cordmagazine.com/corporation-presentations/mpc/navigator-business-center-2/>

Посебну пажњу привлачи најсавременија пословна зграда у Србији под називом „Ушће кула 2“ (енг. *Usce Tower 2*), (слика 15). Изграђена 2019. године на Новом Београду поред већ постојеће „Куле 1“, ова зграда има 22 спрата и укупну површину од око 23 хиљада метара квадратних. Фасаду објекта чини структурална зид завеса, осмишљена тако да омогућава децентрализован систем природне вентилације, са константним приливом свежег ваздуха. Према количини потрошње енергије за грејање, ова зграда има тек „С“ енергетски разред (остварен 2020. године), али на основу других параметара претендује на *BREEAM* „одличан рејтинг“ (енг. *excellent rating*). Процес ове сертификације је у току.



Слика 15. Изглед зграде „Ушће кула 2“ (лево), поред постојеће зграде „Кула 1“ (десно) на Новом Београду. Извор: <http://beobuild.rs/u%C5%A1%87e-kula-2-p2877.html>

Детаљан преглед свих пословних објеката на територији града Београда, који поседују неки од иностраних сертификата, приказан је у табели 6.

Табела 6. Приказ пословних објекта на територији града Београда, који поседују неки од иностраних сертификата.

Назив објекта	Локација	Год. изградње	Жељени сертификат	Статус	Год. серт.
<i>Atrium Belgrade Offices</i>	Булевар Михајла Пупина - Нови Београд	2005.	<i>LEED O+M: Existing Buildingsv3 - LEED 2009</i>	<i>LEED GOLD</i>	2017.
<i>Blue Center</i>	Шпанских бораца - Нови Београд	2010.	<i>BREEAM In-Use Asset performance</i>	<i>Breem 63.4% very good</i>	2016.
<i>Business Garden</i>	Кнез Данилова - Београд	2019.	<i>LEED BD+C: Core and Shell v4 - LEED v4</i>	<i>LEED GOLD</i>	2020.
<i>CA Immo Sava City</i>	Булевар Милентија Поповића – Нови Београд	2010.	<i>LEED O+M: Existing Buildingsv3 - LEED 2009</i>	<i>LEED GOLD</i>	2019.
<i>GTC 19 Avenue</i>	Владимира Поповића – Нови Београд	2008.	<i>LEED O+M: Existing Buildingsv3 - LEED 2009</i>	<i>LEED SILVER</i>	2016.
<i>GTC Fortyone, building A1</i>	Булевар Милутина Миланковића – Нови Београд	2015.	<i>LEED BD+C: Core and Shellv3 - LEED 2009</i>	<i>LEED GOLD</i>	2016..
<i>GTC Fortyone, building A2</i>	Булевар Милутина Миланковића – Нови Београд	2015.	<i>LEED BD+C: Core and Shellv3 - LEED 2009</i>	<i>LEED GOLD</i>	2017.
<i>GTC Fortyone, building B</i>	Булевар Милутина Миланковића – Нови Београд	2015.	<i>LEED BD+C: Core and Shellv3 - LEED 2009</i>	<i>LEED GOLD</i>	2017.
<i>GTC House</i>	Булевар Зорана Ђинђића – Нови Београд	2004.	<i>LEED O+M: Existing Buildingsv3 - LEED 2009</i>	<i>LEED GOLD</i>	2015.
<i>Navigator Bussines Center</i>	Булевар Милутина Миланковића – Нови Београд	2016.	<i>LEED BD+C: New Constructionv3 - LEED 2009</i>	<i>LEED GOLD</i>	2017.

Детаљан преглед свих пословних објеката на територији града Београда, који поседују енергетски пасош, приказан је у табели 7.

Табела 7. Приказ пословних објекта на територији града Београда, који поседују енергетски пасош по Правилнику сертификата о енергетским својствима зграда у Републици Србији.

Назив објекта	Локација	Год. изградње	Жељени сертификат	Статус	Год. серт.
<i>Belgrade Business Center</i>	Јурија Гагарина – Нови Београд	2009.	Енергетски пасош за нестамбене зграде	Енергетски разред „В“	2016.
<i>Blue Center</i>	Шпанских бораца - Нови Београд	2010.	Енергетски пасош за нестамбене зграде	Енергетски разред „В“	2016.
<i>GTC Fortyone, building A1</i>	Булевар Милутина Миланковића – Нови Београд	2015.	Енергетски пасош за нестамбене зграде	Енергетски разред „А“	2015.
<i>GTC Green Heart E1</i>	Булевар Милутина Миланковића – Нови Београд	2019.	LEED BD+C: Core and Shell v3 - LEED 2009	Енергетски разред „С“	2020.
<i>Usce Tower 2</i>	Булевар Михаила Пупина – Нови Београд	2019.	Енергетски пасош за нестамбене зграде	Енергетски разред „С“	2020.

Детаљан преглед свих пословних објеката на територији града Београда, који су у процесу сертификације приказан је у табели 8.

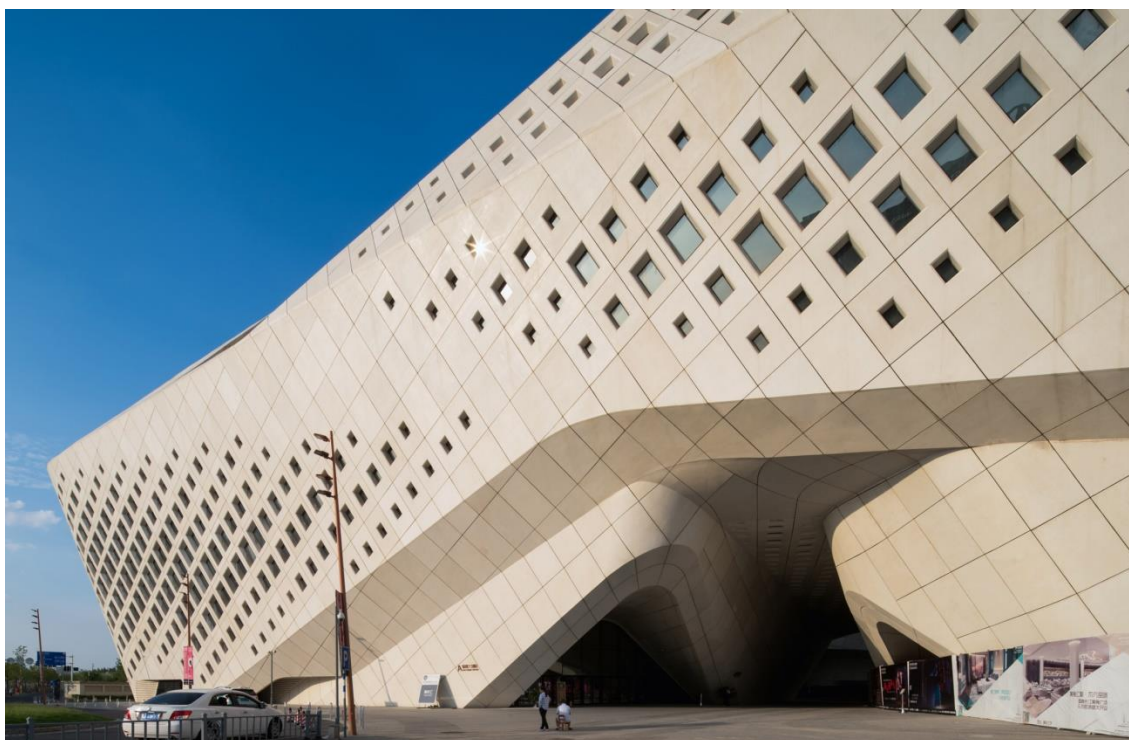
Табела 8. Приказ пословних објекта на територији града Београда који су у процесу сертификације.

Назив објекта	Локација	Жељени сертификат
<i>Banca Intesa New Headquarter</i>	Владимира Поповића – Нови Београд	<i>LEED BD+C: New Construction v3 - LEED 2009</i>
<i>Business zone A Blok</i>	Јурија Гагарина – Нови Београд	<i>LEED BD+C: Core and Shell v3 - LEED 2009</i>
<i>Delta Headquarters Business Center</i>	Београд – биће накнадно објављена тачна локација	<i>LEED BD+C: New Construction v3 - LEED 2009</i>
<i>GTC Green Heart E1</i>	Булевар Милутина Миланковића – Нови Београд	<i>LEED BD+C: Core and Shell v3 - LEED 2009</i>
<i>GTC Green Heart E2</i>	Булевар Милутина Миланковића – Нови Београд	<i>LEED BD+C: Core and Shell v3 - LEED 2009</i>
<i>K2 Business Campus - Merin Holdings</i>	Нови Београд – биће накнадно објављена тачна локација	<i>LEED BD+C: New Construction v4 - LEED v4</i>
<i>Navigator Business Centar 2</i>	Булевар Милутина Миланковића – Нови Београд	<i>LEED BD+C: Core and Shell v4 - LEED v4</i>
<i>Skyline Bureau</i>	Кнеза Милоша - Београд	<i>LEED BD+C: New Construction v4</i>
<i>Ušće Tower 2</i>	Булевар Михаила Пупина – Нови Београд	<i>BREEAM In-Use Asset performance</i>

2. ПАРАМЕТАРСКИ МОДЕЛИРАНЕ ФАСАДЕ

Архитекте су одувек придавале велики значај изгледу фасада. Пажљиво одабрани орнаменти, пропорционално дистрибуирани, са усклађеним бојама и материјалима, поносно су красили фасаде објеката свих намена, креирајући упечатљиве стилове вековима уназад. Појава модернизма је снажно потиснула ове идеје, па је значај изгледа фасаде потпуно замењен неким другим елементима у пројектовању. Постмодернизам је вратио овај тренд, а његова рапидна експанзија, кренула је након појаве рачунара. Дигиталне технике, омогућиле су креирање дотад незамисливих елемената и форми, што је финално резултирало новом стилу, који се назива параметарско моделовање, скраћено параметрицизам.

Иако постоје већ одређено време, параметарски моделиране форме су још увек у раној фази истраживања, те постоји велики простор за напредак у иновацији, дизајну, продукцији и реализацији (слика 16).



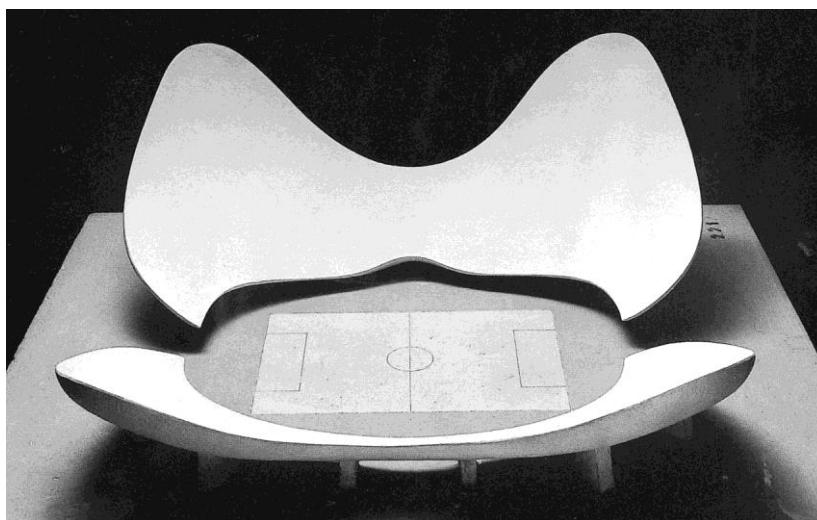
Слика 16. Изглед параметарски моделоване фасаде Интернационалног омладинског културног центра у Нанђингу, у Кини.

Извор: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/nanjing-culture-conference-centre/>

2.1 Параметарско моделовање

Параметарско моделовање је процес при којем добијена геометрија има променљива својства, дефинисана параметрима и правилима који владају између елемената (*Woodbury, 2010, стр. 41*). Приликом моделовања, дизајнер креира сет односа и правила по којем се контролишу креирани елементи. На овај начин се приликом модификовања једног параметра, мењају карактеристике свих елемената које овај параметар повезује.

Параметарско моделовање је термин који први помиње Морис Рујтер (*Maurice Ruitter*) у научном раду под називом „Параметарски дизајн“ (енг. *Parametric Design*) из 1988. године. Међутим, сматра се да је зачетник параметарског моделовања италијански архитекта Луиђи Морети (*Luigi Moretti*), четрдесетих година двадесетог века (*Stiles, 2006, стр. 37*). Морети је писао о параметарској архитектури, као "односу између димензија зависних од разних параметара" (*Moretti, 1971, стр. 207*). Морети је ову идеју приказао на дизајну стадиона, дефинишући деветнаест параметара, као што су угао посматрања и економска цена бетона. Визија Моретијевог параметарског стадиона је приказана као део његове изложбе под називом „Параметарска архитектура“ (ита. *Architettura Parametrica*), на „Дванаестом миланском тријеналу“ 1960. године (слика 17).



Слика 17. Пројекат параметарског стадиона Луиђија Моретија.

Извор: <http://www.arcduecitta.it/2015/12/studio-di-ricerche-di-luigi-moretti-in-architettura/>

Пример прото параметарског моделовања датира још од краја деветнаестог века када је каталонски архитекта Антонио Гауди (*Antonio Gaudi*) користио аналогни модел viseћих канапа како би дефинисао форму базилике „Колонија Гуељ“ (шпан. *Colònia Güell*), у Барселони (слика 18). Гауди је уз помоћ канапа качио вреће напуњене оловом за таваницу, те тако посматрао и анализирао статичка оптерећења. Затим је сликао добијену поставку, окренуо је наопако и добијено решење искористио за основну форму објекта (*Sert, 1972, стр. 26*). Базилика је данас под заштитом УНЕСКО-а.



Слика 18. Енетријер базилике Колонија Гуељ.

Извор: <http://patrimoni.gencat.cat/es/coleccion/crypta-de-la-colonia-guell>

Сличну технику користио је и немачки архитекта Фрај Ото (*Frei Otto*) приликом дизајна „Олимпијског комплекса“ (нем. *Olympiapark*), у Минхену, педесетих година двадесетог века (слика 19). Систем преднапрегнутих челичних каблова и акрилних панела, развучених између 58 челичних пилона, креира форму која треба да подсећа на планински масив Алпа (*Rosenfeld, 2000, стр. 153*).



Слика 19. Олимпијски копмплекс у Минхену.

Извор: <https://www.sbp.de/en/project/roof-for-munich-olympic-stadium-1972/>

Дигитална револуција долази након настанака првог параметарског софтвера креираног од стране Ивана Садерленда (*Ivan Sutherland*) који се назива „Секчпед“ (енг. *Sketchpad*), 1963. године (слика 20). Скечпед је имао могућност креирања геометрије на основу корисничких инпута, што је била велика иновација у то време.



Слика 20. Иван Садерленд демонстрира функције Скечпеда.

Извор: <https://bimaplus.org/news/the-very-beginning-of-the-digital-representation-ivan-sutherland-sketchpad/>

Први комерцијални софтвер за параметарско моделовање креирала је компанија „Параметрик технолоџи корпорација“ (енг. *Parametric Technology Corporation - PTC*), под називом „Про/ИНЖЕЊЕР“ (енг. *PRO/ENGINEER*), 1988. године. Данас постоји велики број различитих софтвера који омогућавају одређени вид параметарског моделовања, кроз физичко моделовање, текстуално програмирање и визуелно програмирање.

2.2 Предности и мане параметарског моделовања

Основна предност моделовања параметарских фасада је могућност истраживања великог броја различитих решења. За разлику од традиционалних програма, који се заснивају на скицирању и физичком моделовању елемената, те функционишу по принципу додавања и одузимања, параметарско моделовање омогућава брзи преглед више решења одједном, због веза и односа који постоје између елемената. Параметарско моделовање омогућава креирање иновативних и узбудљивих форми и посебно је значајно током ране фазе дизајна. Међутим, постоје предности и у каснијим фазама, где параметарско моделовање омогућава аутоматизацију пројектантске документације, те уштеду времена и новца унифицирањем елемената који се могу префабриковати, па чак и креирати на 3D штампачу.

Рационализација дизајна има кључну улогу у креирању параметарски моделованих фасада. Рационализација омогућава унапређење дизајна познатим геометријским принципима и техникама градње, а може бити спроведена у односу на енергетске перформансе, једноставност извођења, буџетска ограничења, изглед итд. Рационализација је могућа уз помоћ процеса оптимизације. Реч оптимизација потиче од латинске речи „оптимус“ (лат. *optimus*), што у буквалном преводу значи најбољи. Оптимизацијским процесом, може се доћи до најбољег решења, за унапред дефинисане циљеве.

Основна предност параметарског моделовања је једноставна могућност креирања великог броја потенцијалних решења. Поставком динамичких веза између елемената, могуће је добити неограничен број различитих решења, уместо

традиционалног приступа по којем се тражи само једно решење. Креирање релација између елемената је моћна техника, али је неопходан опрез, јер неретко модификовањем једног параметра елемента, нарушава се логика других елемената и потенцијално добија нежељно решење.

Недостаци параметарског моделовања фасада су углавном техничке природе. Тренутни софтвер је врло лимитиран, нема могућности креирања комплексних енергетских, структуралних, механичких и других симулација, често је комплексан за учење, финансијски неприступачан и захтева велику снагу рачунара.

Међутим, недостаци се увиђају и у самом приступу параметарском моделовању. Један од највећих проблема, везан је непотребну комплексност решења, која садржи велики број информација. Дизајн параметарски моделираних фасада може бити превише комплексан за детаљнију разраду и потенцијално извођење. Са друге стране, велики број решења, умањује основну улогу архитекте у дизајнерском процесу, па финално решење често зависи од многих других техничких фактора, али и осталих учесника у процесу.

2.3 Параметри фасада

Параметри фасада се могу класификовати у осам основних категорија: геометрија фасаде, геометрија елемената који чине фасаду, деформација елемената, величина елемената, дистрибуција елемената, ротација елемената, артикулација фасаде и боје и материјали фасаде (*Caetano et al.*, 2015, стр. 531).

Параметри се угрубо могу груписати на:

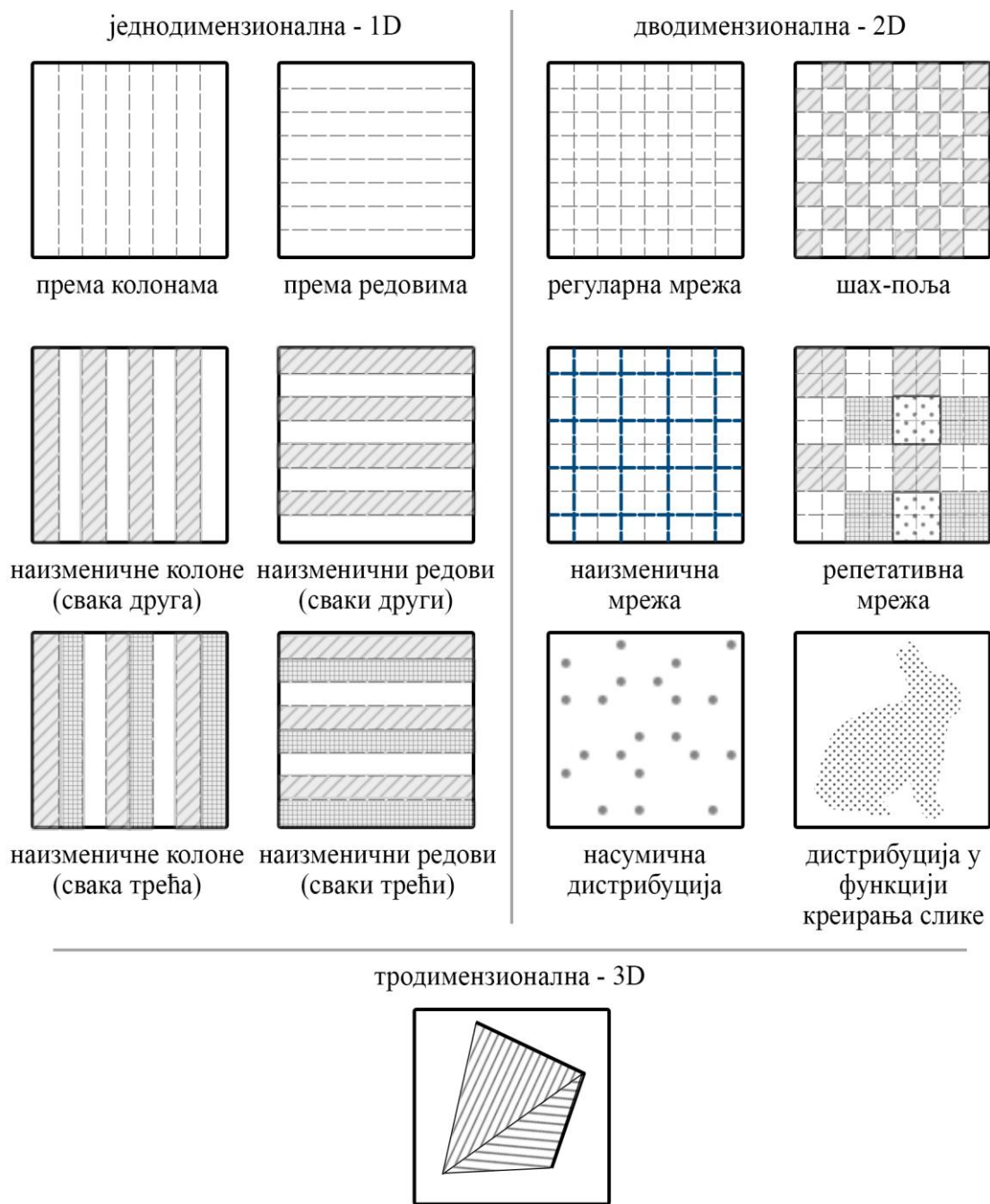
1. параметре који дефинишу геометрију фасаде,
2. параметре који дефинишу карактеристике или геометрију елемената који чине фасаду, као што су облик, димензије и тип деформисања елемената,
3. дистрибуцију, која укључује позицију елемената на фасади, као и њихову ротацију и

4. изглед фасаде, са дефинисаним бојама и материјалима од којих су елементи фасаде начињени (табела 9).

Табела 9. Параметри фасада. Извор: *Caetano et al.*, 2015

Геометрија фасаде	Геометрија елемента	Деформисање елемента	Величина елемента
Равна	Кружна	Увијен	Фиксна
Цилиндрична	Цилиндрична	Таласаст	Са повећањем
Сферична	Сферична	Испреплетан	Са привлачењем
Таласаста	Овална	Савијен	Насумична
S-елипсаста	Троугаона		У функцији креирања слике
Торусна	Пирамидална		
Слободна форма	Квадратна		
Артикулација фасаде	Правоугаона	Материјали и боје	
Одузимање елемената	Кубоидна	Дрво	Једна боја
Додавање елемената	Хексагонална	Метал	Више боја
	Пентагонална	Бетон	Насумичне боје
	У функцији креирања слике	Пластика	У функцији креирања слике
Ротација елемента	Дистрибуција елемента		
	<i>1D</i>	<i>2D</i>	<i>3D</i>
Хоризонтална	Према колонама	Регуларна мрежа	
Вертикална	Према редовима	Шах-поља	
Под одређеним углом	Наизменичне колоне	Наизменична мрежа	
Насумична	Наизменични редови	Репетативна мрежа	
У функцији креирања слике		Насумична дистрибуција	
		Дистрибуција у функцији креирања слике	

Шематски приказ дистрибуције елемената приказан је на слици 21.



Слика 21. Шематски приказ дистрибуције елемената.
Извор: Ауторска илустрација према *Caetano et al.*, 2015

У даљем тексту се дају образложења наведених параметара фасада.

2.3.1 Геометрија фасаде

Параметарски моделиране фасаде могу имати различите облике. Првенствено се деле на фасаде које имају:

- Правилан облик и
- Неправилан облик.

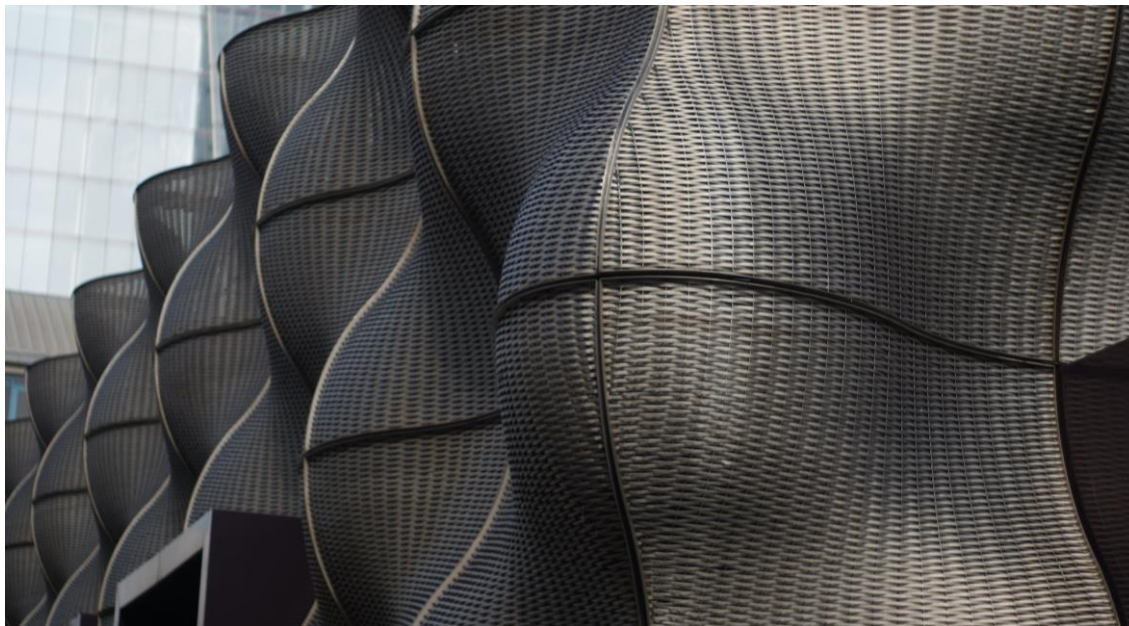
Фасаде правилног облика могу бити равне, односно планарне, затим цилиндричне, сферичне итд. Цилиндричну фасаду има „Ројал Арена“ (енг. *Royal Arena*), у Копенхагену, у Данској (слика 22).



Слика 22. Изглед цилиндричне параметарске фасаде „Ројал Арене“.

Извор: <https://www.archdaily.com/883844/royal-arena-3xn-plus-hks>

У параметарске фасаде правилног облика, убрајају се и тзв. „синусоидне фасаде“ (енг. *sinusoidal facades*). Синусоидне фасаде имају облик који је креиран на основу одређених математичких правила, а деле се према броју равни у којима се таласање ових фасада јавља. Синусоидну фасаду са таласањем у две равни има болница (енг. *Guy's Hospital*) у Лондону, у Уједињеном Краљевству (слика 23).



Слика 23. Изглед синусоидне фасаде болнице у Лондону.
Извор: <https://www.flickr.com/photos/hobbitbrain/7257663688/>

Постоје и фасаде са потпуно неправилним обликом, као што има зграда „Селфридис“ (енг. *Selfridges Building*) у Бирмингему, у Уједињеном Краљевству (слика 24). Специфично, овакве фасаде се класификују као слободне форме (енг. *Free-Form*). Параметарске фасаде слободних форми се креирају мануелно.

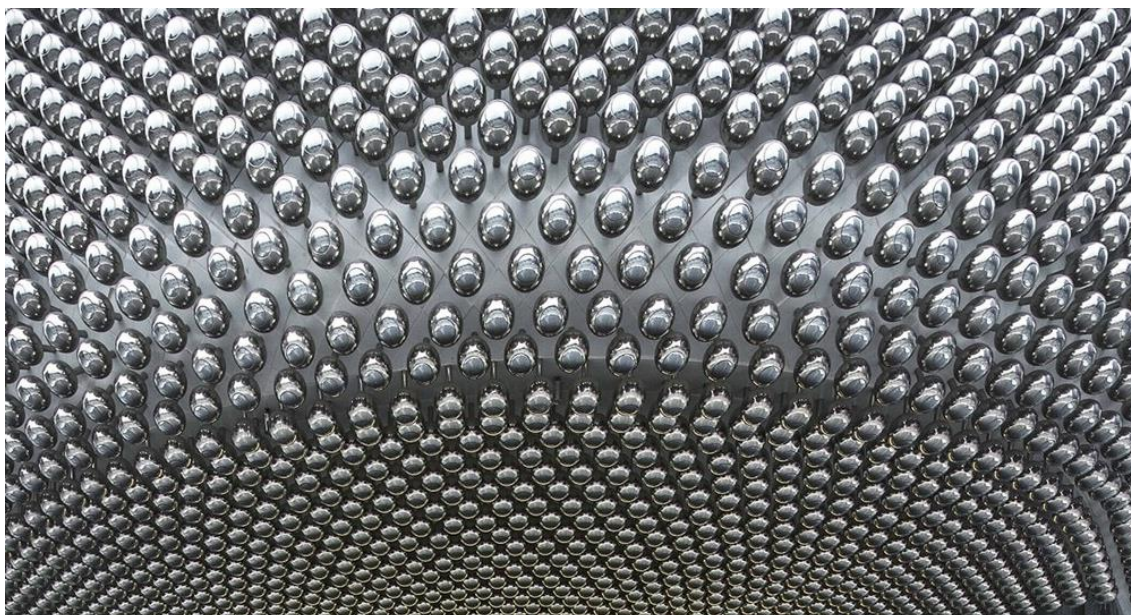


Слика 24. Изглед слободне форме зграде „Селфридис“.
Извор: <http://www.archimagazine.com/aselfridges.htm>

2.3.2 Геометрија елемената

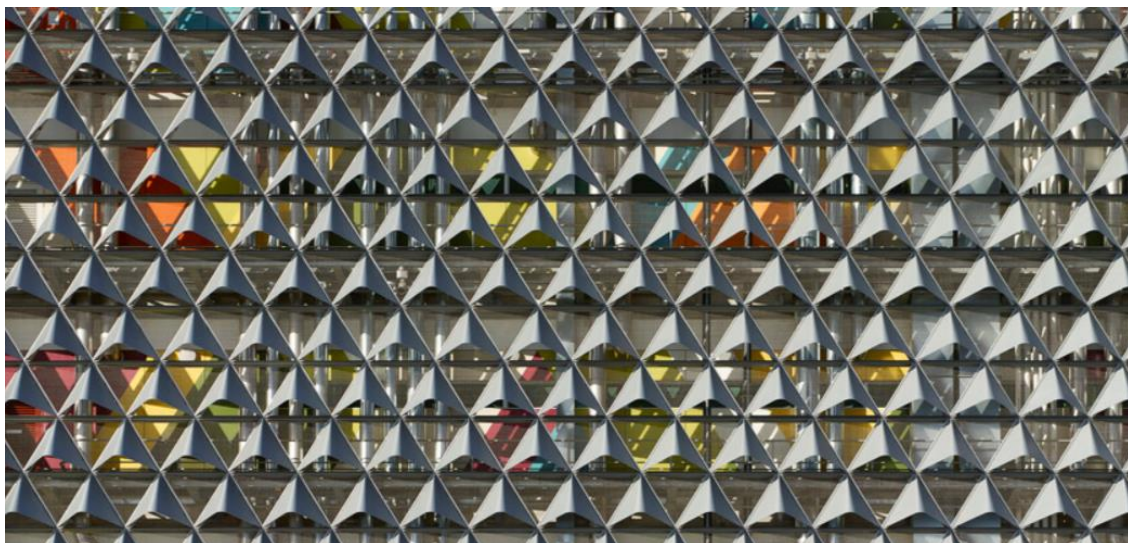
Геометрија елемената параметарски моделоване фасаде, може бити дефинисана истим облицима као и сама геометрија фасаде. Геометрија елемената подељена је на правилне и неправилне облике, који су најчешће префабриковани и толико је разноврсна да је могућност изгледа фасаде практично неограничена.

Фасада тржног центра „Хенђи Ванда“ (енг. *Hanjie Wanda Square*), у Вухану, у Кини, прекривена је металним сферичним куглама са променљивим међусобним растојањем, како би симулирали кретање воде (слика 25).



Слика 25. Изглед фасаде са сферичним елементима тржног центра „Хенђи Ванда“.
Извор: https://www.domusweb.it/en/architecture/2013/11/29/unstudio_hanjie_wanda_square

Фасаде са правоугаоним елементима се могу поделити на квадратне, кубоидне итд. Врло су популарни и елементи са n -бројем правилних полигона и те фасаде се класификују као пентагоналне, хексагоналне, хектагоналне итд. Троугаоне елементе има фасада зграда Медицинског института Јужне Аустралије (енг. *SAHMRI - South Australian Health and Medical Research Institute*), (слика 26).



Слика 26. Изглед фасаде зграде Медицинског института Јужне Аустралије. Извор: <https://www.atelierten.com/projects/south-australian-health-and-medical-research-institute/>

Изван регуларне геометрије, постоје фасаде на којима су креиране слике и које се у архитектонској пракси популарно називају „пикторијалне“ (енг. *pictorial* изведено од енглеске речи *picture*, што значи слика). Димензије и облик елемената фасаде дефинише специјално програмиран алгоритам, тако да гледано са стране, цела структура подсећа на слику, по чему су и добиле назив. Пример оваквог типа фасаде има Пољски павиљон приказан на „Експу“ (енг. *Expo*), у Шангају, 2010. године (слика 27).

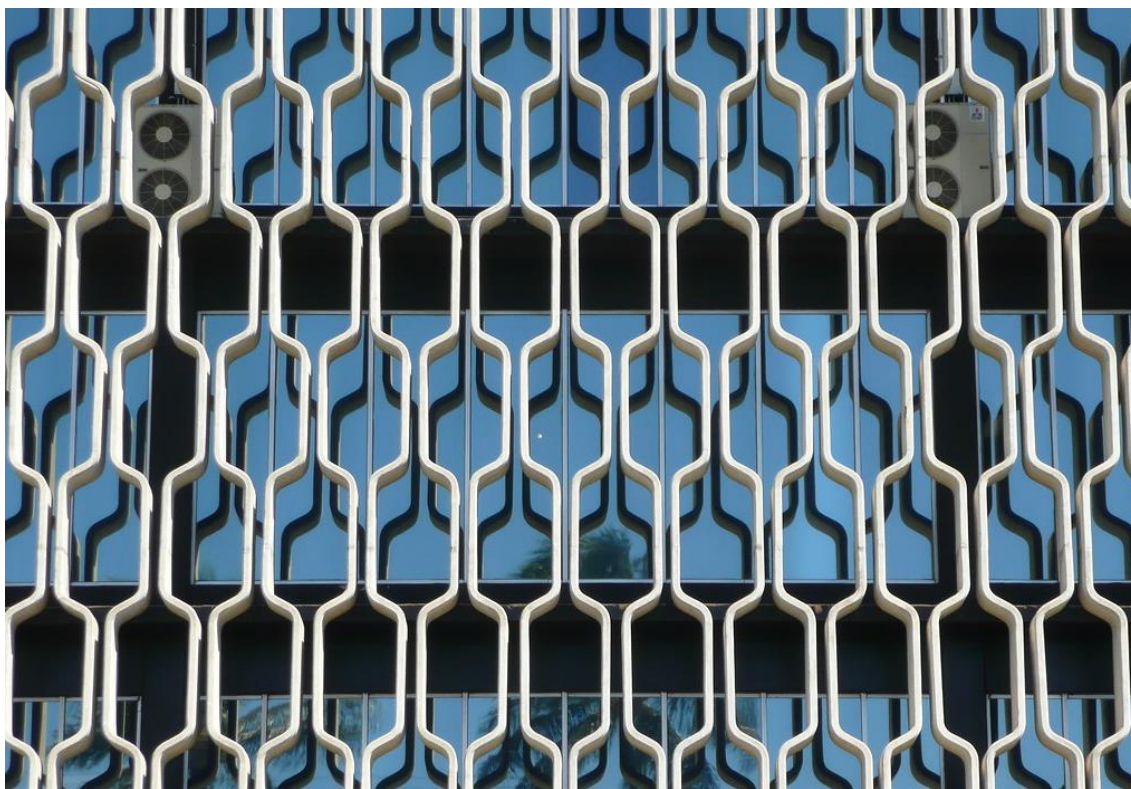


Слика 27. Изглед Пољског павиљона на „Експу“ у Шангају, 2010. године. Извор: <https://www.dezeen.com/2010/06/03/polish-pavilion-for-shanghai-expo-2010-by-wwaa-architects/>

2.3.3 Деформисање елемената

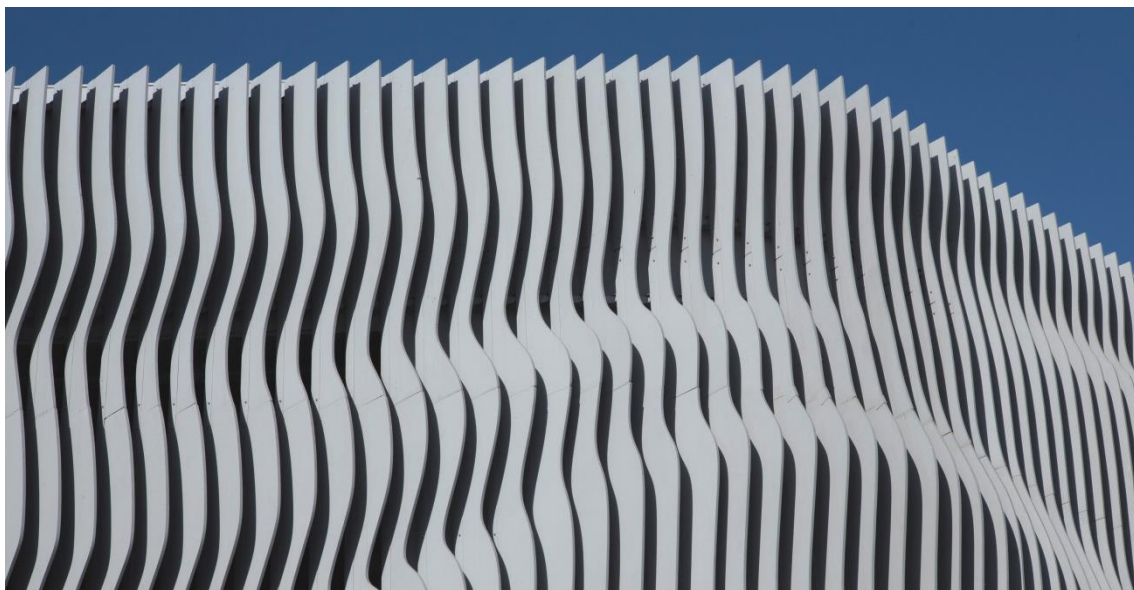
Елементи геометрије фасаде се могу трансформисати према унапред дефинисаним правилима, креирајући специфичан изглед фасаде. Постоји више типова деформисања елемената, а неки од њих су савијање, таласање, преплитање, увртање итд.

Савијање је основни тип деформације, при којој се елементи модификују према угловима дефинисаним од стране корисника. Савијене елементе на фасади има „ИБМ“-ова (енг. *IBM*) зграда, у Хонолулу, на Хавајима, САД (слика 28).



Слика 28. Изглед фасаде са савијеним елементима „ИБМ“-ове зграде.
Извор: https://modtraveler.net/city/honolulu_655/listing/ibm-building/

Таласање је тип деформације, где је замишљена линија по којој се деформишу елементи синусоидна. Пример овог начина деформације је на фасади зграде „Епикл риформ“ (енг. *Apical Reform*), у Ахмедабаду, у Индији (слика 29).



Слика 29. Изглед таласања фасаде зграде „Епикл риформ“.

Извор: <http://www.apicalreform.com/portfolio/studio/>

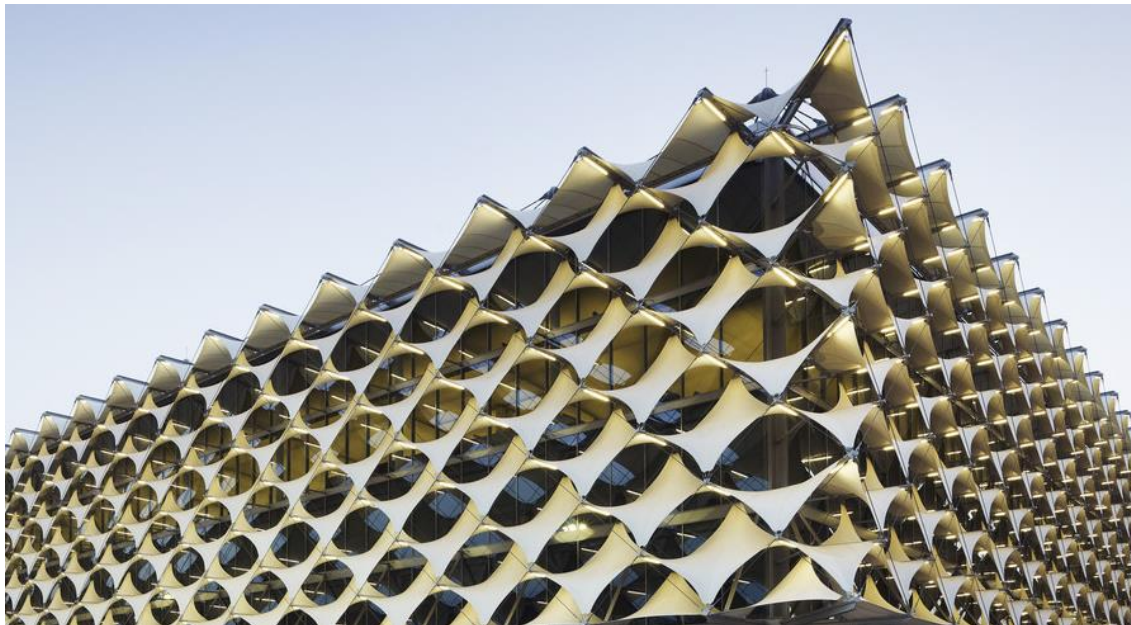
Преплитање је тип деформације, при којој елементи таласају у два правца, хоризонтално и вертикално. Ова деформација се постиже наизменичном променом синусоиде. Пример преплитања је на фасади зграде „Аргул Вејв“ (енг. *Argul Weave Building*), у Бурси, у Турској (слика 30).



Слика 30. Изглед фасаде са преплитањем елемената на згради „Аргул Вејв“.

Извор: <https://www.archdaily.com/548602/argul-weave-binaa-smart-architecture>

Увртање је тип деформације, при којој се елементи ротирају око сопствене осе. Пример увртања је на фасади зграде Националне библиотеке „Краљ Фахад“ (енг. *King Fahad National Library*), у Ријад, у Саудијској Арабији (слика 31).



Слика 31. Изглед фасаде зграде Националне библиотеке „Краљ Фахад“.

Извор: <https://www.archdaily.com/469088/king-fahad-national-library-gerber-architekten>

2.3.4 Величина елемената

Величина елемената на фасади може бити фиксна или променљива. Код променљивих параметарски моделираних фасада, величина елемената се углавном мења по неком правилу. Она може варирати у односу на удаљеност од одређене тачке или линије, а овај принцип се назива „метод привлачења“ (енг. *attractor method*). Метод привлачења је уочљив на примеру зграде „Истленд тржног центра“ (енг. *Eastland Shopping Centre*), у Рингвуду, у Аустралији. На овом примеру се јасно види како отвори не постоје на самом углу фасаде, док се постепено отварају и повећавају, како се од њега удаљавају (слика 32).



Слика 32. Изглед фасаде „Истленд тржног центра“.
Извор: <https://archello.com/project/eastland-shopping-centre-2>

Елементи, чија величина зависи од слике коју креирају, у архитектонској пракси популарно се називају „пикторијални елементи“. У овим случајевима, слика представља инпут, при чему боја сваког пиксела кореспондира са димензијом елемента. Финално, елементи могу бити и насумично одабраних димензија без утврђеног правила, креирајући насумични изглед фасада.

2.3.5 Дистрибуција елемената

Дистрибуција елемената дефинише распоред елемената на фасади. Дистрибуција се може вршити једнодимензионално, дводимензионално, тродимензионално или насумично.

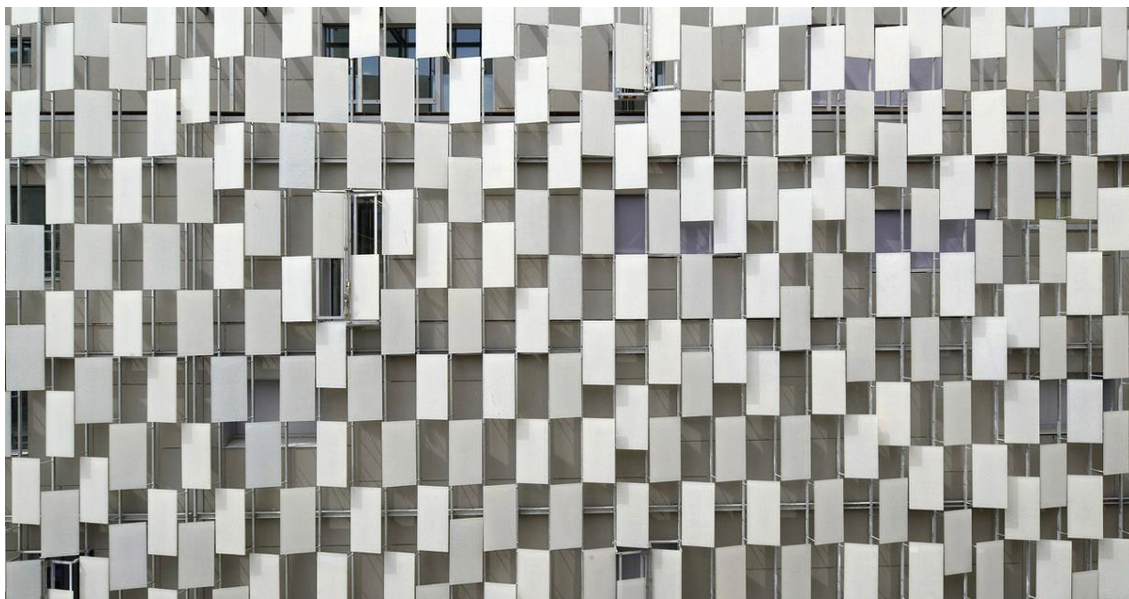
Једнодимензионална дистрибуција може бити хоризонтална, вертикална или имати одређен угао. Пример једнодимензионалне хоризонталне дистрибуције

је фасада зграде нове библиотеке Универзитета у Абердину, у Уједињеном Краљевству. Јасно изражена хоризонтална дистрибуција у равни фасаде, приказана је на слици 33.



Слика 33. Изглед фасаде зграде нове библиотеке Универзитета у Абердину.
Извор: <https://www.archdaily.com/276161/university-of-aberdeen-new-library-schmidt-hammer-lassen-architects>

Дводимензионална дистрибуција најчешће позиционира елементе и у хоризонталној и у вертикалној равни. Специфичну подгрупу дводимензионалне дистрибуције, чини наизменична дистрибуција, при којој парни елементи имају једне карактеристике, а непарни друге као на примеру „ФРАЦ“ (фра. *Frac Provence-Alpes-Côte d'Azur*) Музеја савремене уметности у Марсеју, у Француској. Фасада овог објекта има панеле који се наизменично разликују и у хоризонталној и у вертикалној равни, креирајући мрежу тзв. „шах-поља“ (слика 34).



Слика 34. Изглед фасаде Музеја савремене уметности у Марсеју.

Извор: <https://kkaa.co.jp/works/architecture/frac-marseille/>

Посебну групу чини дводимензионална насумична дистрибуција, са елементима који су позиционирани на фасади без утврђеног правила. Пример овог приступа је на фасади „АБЦ музеја“ (енг. *ABC Museum*) у Мадриду, Шпанија (слика 35).



Слика 35. Изглед фасаде „АБЦ музеја“ у Мадриду.

Извор: <https://www.archdaily.com/146168/abc-museum-illustration-and-design-center-aranguren-gallegos-architects>

2.3.6 Ротација елемената

Ротација елемената на параметарски променљивој фасади може бити хоризонтална или вертикална, али и имати неки одређен угао. Ротација може бити индивидуална, за сваки елемент понаособ или заједничка за групу елемената или целу фасаду. Пример индивидуалне ротације има фасада реновираног складишта у Шангају, у Кини (слика 36). Сваки од бетонских елемената има јединствен угао ротације, за нијансу другачији у односу на суседне елементе, што даје таласаст изглед фасаде.



Слика 36. Изглед фасаде реновираног складишта у Шангају.

Извор: <https://inhabitat.com/gallerys-undulating-skin-of-block-wraps-a-reclaimed-warehouse/cinderskin-ed01>

Уколико је сваки елемент заротиран у тој мери да цела фасада финално прикаже одређену слику, онда се назива пикторијална ротација. Такође постоји и насумична ротација елемената без утврђеног правила.

2.3.7 Артикулација фасаде

Артикулација је метод спајања елемента зарад добијања уједињеног решења које је читко, посебно и са јасним међусобним односима (*Pell*, 2010, стр. 32). Постоји велики број различитих метода артикулације фасаде, од којих сваки резултира јединственим финалним изгледом. Артикулација фасаде се може вршити одузимањем или додавањем елемената.

„Перфориране фасаде“ (енг. *perforated facades*) настају тако што једни елементи издубљују површину других елемената. Такву фасаду има објекат „Брод“ (енг. *The Broad*), Музеј савремене уметности у Лос Анђелесу, у Сједињеним Америчким Државама. Планарна параметарска фасада издубљена је елипсастом формом и на тај начин је креиран прозор (слика 37). Овај прозор је једини отвор тог типа на целој фасади. На овом примеру примењено је одузимање елемената.



Слика 37. Изглед фасаде Музеја савремене уметности у Лос Анђелесу.

Извор: <https://parametrichouse.com/broad-art-museum/>

Супротно перфорираним, постоје и фасаде коју чини спајање, односно „унија“ два или више елемената. Елементи који чине унију, могу, али и не морају

се препознавати на финалном изгледу фасаде. Пример уније више елемената очљив је на фасади зграде Министарства здравља Баскије (енг. *Basque Health Department Headquarters*), у Билбау, у Шпанији (слика 38). Елементи неправилног облика међусобно су повезани тако да креирају изломљену форму фасаде.



Слика 38. Изглед фасаде зграде Министарства здравља Баскије, у Билбау.
Извор: <http://blog.zricks.com/worlds-20-most-unique-architectural-and-innovative-buildings/basque-health-department-building/>

2.3.8 Боје и материјали фасаде

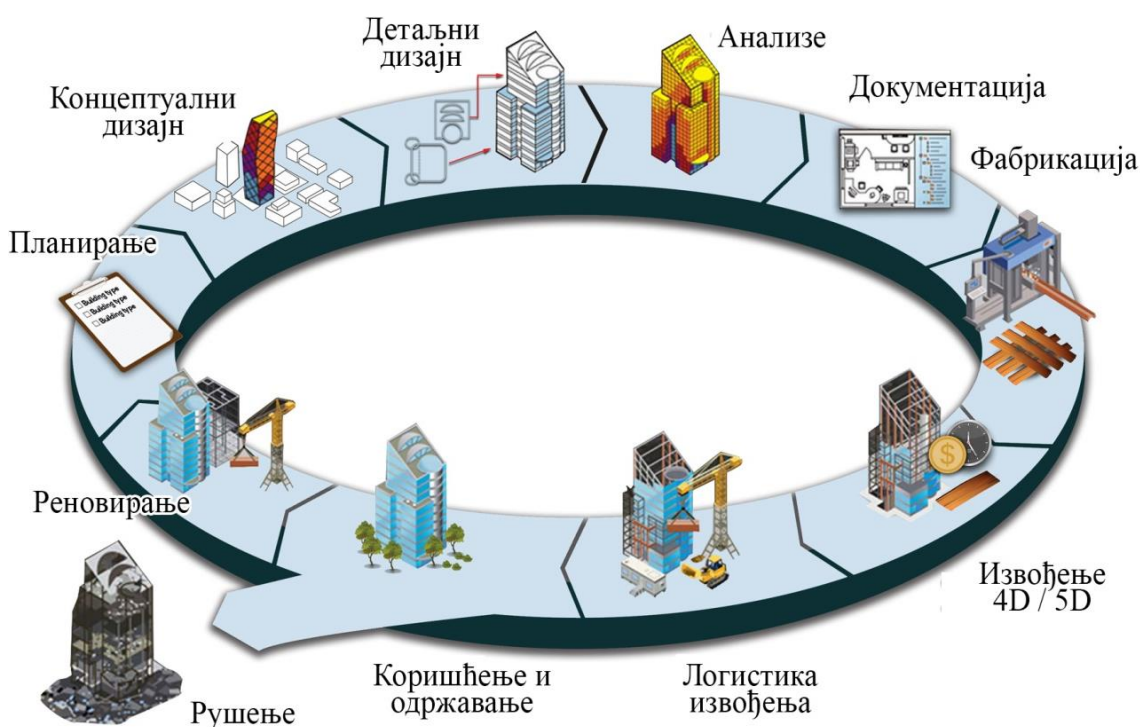
Параметарски променљиве фасаде могу бити различитих боја и материјала. Најчешће се примењују метал и дрво, а неретко и бетон, специјално третиран пластични материјали, па чак и текстил. Фасаде могу бити једнобојне или вишебојне. Боје могу бити и насумично одређене, као на примеру фасаде Шпанског павиљона на „Експу“ у Аичију, у Јапану, 2005. године (слика 39). Елементи фасаде могу имати и дефинисане различите боје, тако да финално креирају одређену слику.



Слика 39. Изглед фасаде Шпанског павиљона на „Експу“ у Јапану, 2005. године.
Извор: <https://djscadteam4.wordpress.com/2012/01/29/world-fair-events/>

3. БИМ И ВИЗУЕЛНО ПРОГРАМИРАЊЕ

„БИМ“ (енг. *Building information modeling - BIM*) је реална дигитална репрезентација физичких и функционалних карактеристика неког објекта. БИМ је дељени извор информација, који формира поуздану основу за одлуке током животног циклуса зграде, од ране фазе пројектовања до рушења (*NBIMS-US*, 2016, стр. 8), (слика 40)

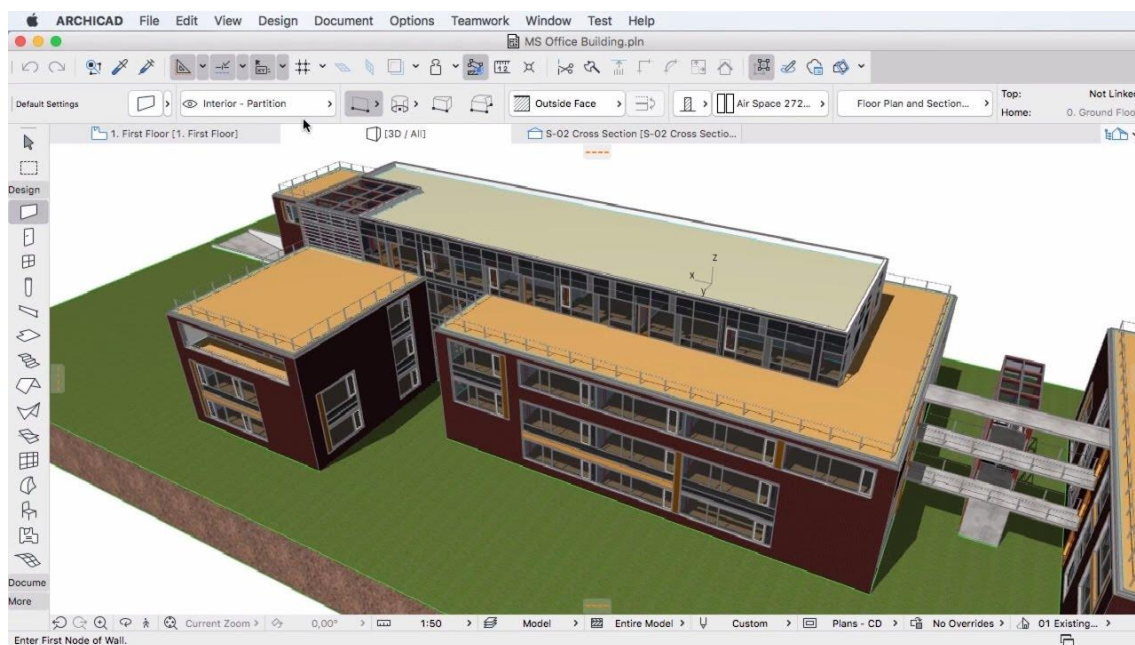


Слика 40. Концепт „БИМ“-а. Извор: Ауторска илустрација према *NBIMS-US*, 2016

БИМ на интелигентан начин омогућава планирање, дизајн, конструкцију и менаџмент објеката или инфраструктуре (*NBIMS-US*, 2016, стр. 9). За разлику од традиционалног тзв. „компјутерски потпомогнутог дизајна“ (енг. *Computer-aided design - CAD*), БИМ пружа додатан сет информација везаних за елементе модела (подови, зидови, прозори, врата) и системске информације (структурална оптерећења, проток ваздуха итд.). БИМ омогућава координацију свих учесника у

процесу пројектовања, извођења и одржавања објекта (архитекте, грађевински, машински и електро инжењери). Посебно је важно напоменути да БИМ није софтвер, већ процес који повезује различите *2D* и *3D* софтвере у циљу креирања дигиталног модела, који садржи све неопходне информације. Информације које поседују елементи унутар модела, тичу се његових димензија, материјала, механичких, акустичних и других својстава. Осим информација о физичким карактеристима објекта, БИМ садржи и информације које су везане за његово окружење, као што су географска локација и временске прилике, али и за намену објекта и режим коришћења простора. Ове информације су од пресудног значаја приликом енергетских, али и других типова анализа. Информације унутар БИМ-а могу бити графички или нумерички приказане, а омогућавају темељно сагледавање односа између архитектонских, статичких, електричних, машинских и других елемената. Ове информације могу бити сачуване, те прослеђене на даље анализирање у неком другом програму, уколико је неопходно.

Концепт БИМ-а појавио се седамдесетих година двадесетог века под називом „Описни систем“ (енг. *Building Description System - BDS*), (*Eastman et al.*, 1974, стр. 11). Термин "модел зграде" је први пут употребљен 1985. године у научном раду везаном за компјутерски асистирани дизајн (*Ruffle*, 1985, стр. 386). Седам година касније, термин "информациони модел зграде" је први пут употребљен у научном раду везаном за аутоматизацију у конструкцији (*Van Nederveen et. al*, 1992, стр. 215). Први комерцијални БИМ софтвер, доступан за персоналне рачунаре, који је имао могућност креирања *2D* и *3D* елемената, развио је Графисофт (енг. *Graphisoft*) 1987. године и зове се „Архикед“ (енг. *Archicad*), (слика 41). Архикед је и даље активан и користе га архитектонске фирме широм света.



Слика 41. Изглед интерфејса програма „Архикед“.

Извор: https://www.graphisoft.com/learning/online-seminars/webinar-bim_details_ARCHICAD_17-gsid.html

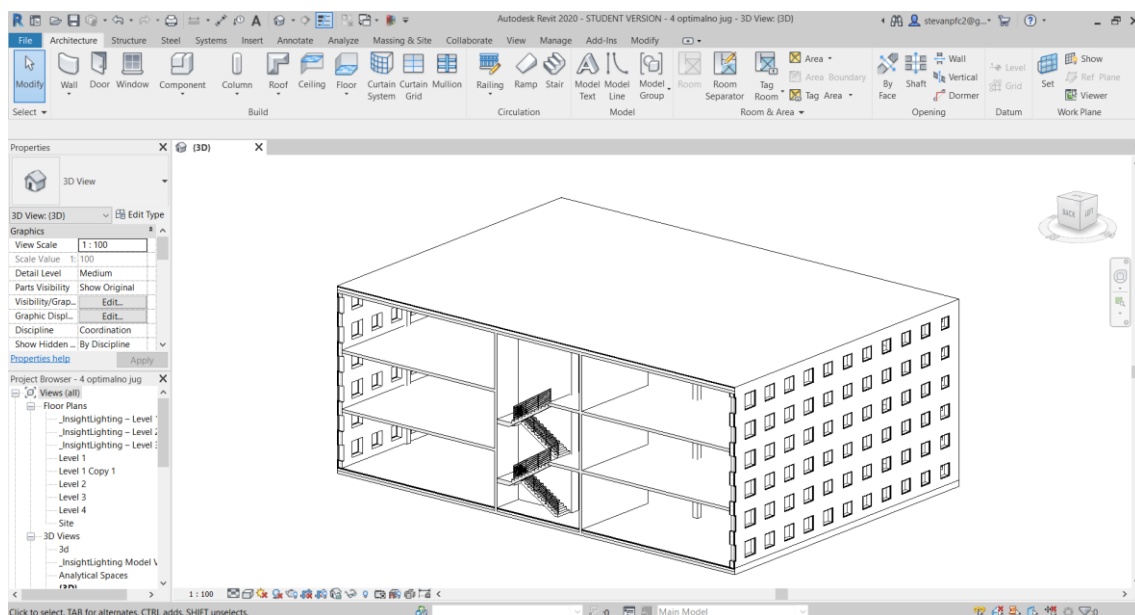
Утицај БИМ-а на грађевинску индустрију је немерљив, па тренутно 75% архитектонских фирми користе БИМ у одређеном облику (*Poirier et al.*, 2015, стр. 76). Продуктивност рада у фирмама које имплементирају БИМ повећана је од 75% до 240% (*Poirier et al.*, 2015, стр. 76). Због својих предности, владе држава Велике Британије, Финске и Сингапура, већ су законски обавезале употребу БИМ-а приликом планирања јавних инфраструктурних пројеката.

3.1 Аутодеск Ревит

Као што је раније поменуто, 1988. године, компанија „Параметрик технолоџи корпорација“ (енг. *Parametric Technology Corporation – PTC*) креира свој први параметарски одређени софтвер под називом Про/ИНЖЕЊЕР (енг. *PRO/ENGINEER*) или кратко ПРО/Е (енг. *PRO/E*). Двојица колега Ирвин Џангрис (*Irwin Jungreis*) и Леонид Рајз (*Leonid Raiz*), убрзо након тога напуштају ову фирму, те 2000. године самостално креирају софтвер који се назива „Ревит“

(*Revit*), (скраћено од енглеске речи „ривајз ит“ (енг. *Revise it*), што значи ревидирати, односно направити ревизију), (слика 42). Компанија „Аутодеск“ (енг. *Autodesk*), 2002. године откупљује софтвер, унапређује га, те почиње интензивно да га пласира на тржиште.

Ревит је донео многе иновације на тржиште, увођењем јединствених параметарских елемената (прозора, врата, намештаја, опреме итд.), тзв. „фамилија“ (енг. *Revit family*), контролом фаза пројектовања, креирањем табела итд. Ревит је у међувремену унапређен и за друге инжењерске струке, па тренутно постоје посебне верзије намењене грађевинским инжењерима (*Revit Structure*) и електро и машинским инжењерима (*Revit MEP*). Ово омогућава Ревиту да кроз јединствен модел, у потпуности координише са свим осталим струкама неопходним у процесу планирања и изградње објекта. Сталним унапређењима и интензивним маркетингом, Ревит је током времена готово потпуно потиснуо остале БИМ програме, па је тренутно програм који се користи највише у грађевинској индустрији.



Слика 42. Изглед интерфејса програма „Ревит“

Основне предности Ревита су:

- Параметарске компоненте - сваки елемент креиран у Ревиту има своје параметарске вредности, које преузимају информације из једне базе података. Када се направи измена на било ком елементу унутар модела, ова база података се ажурира. Динамичке измене штеде доста времена, а осигуравају јединственост и доследност исте информације било где у моделу;

- Умањење посла који се понавља - Ревит омогућава ажурирање модела у реалном времену, те било која измена настала у моделу, биће аутоматски промењена у свим плановима у којима се види (основе, пресеци изгледи, табеле). На овај начин се у потпуности одбацује традиционалан начин при којем се измена мора унети мануелно у сваком постојећем плану. Мануелне измене су склоне пропустима и грешкама, те захтевају пуно времена, па због тога финална документација често буде недоследна или непотпуна;

- Креирање окружења - Осим моделовања архитектонских објеката, Ревит пружа могућност и креирања његовог окружења, како би финални производ визуелно био што реалније приказан, али и да би се вршиле одређене анализе (падови терена, количине земље за ископ, анализе тла итд.);

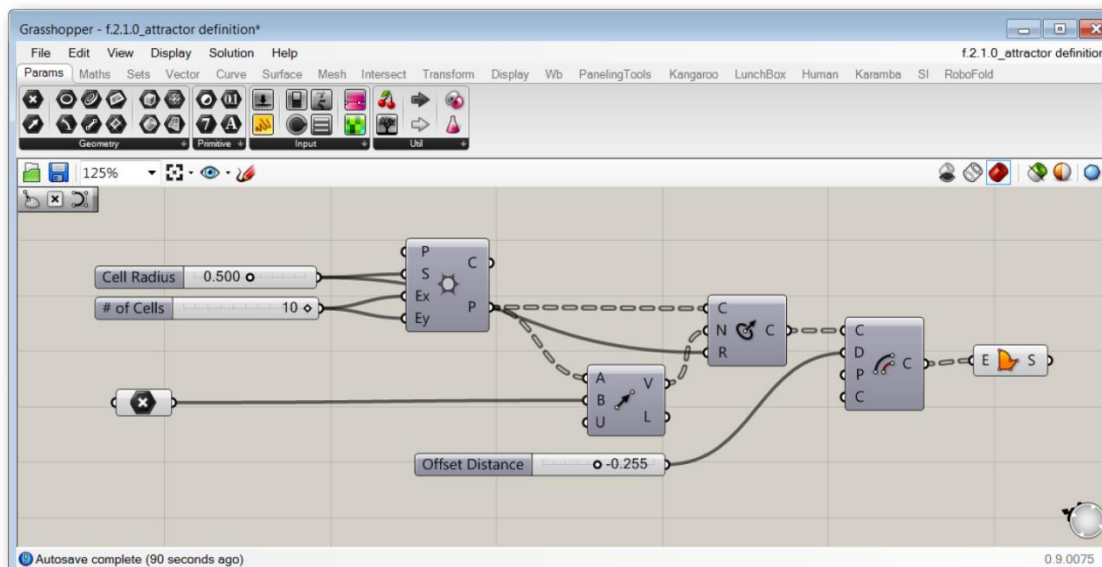
- Енергетски ефикасан дизајн - Ревит садржи сет алата које омогућавају симулацију утицаја будућег објекта на животну средину. Такође садржи и алате који врше енергетске симулације, симулације везане за количину дневне светлости и потенцијалну имплементацију фотонапонских панела. Добијени резултати су од кључног значаја приликом креирања енергетски ефикасног дизајна;

- Велика библиотека - Ревит садржи базу са великим бројем унапред моделованих елемената, различитих типова и функција (врата, прозори, намештај итд.). Осим тога, постоји и велики број интернет портала преко којих се може преузети још материјала. Ови елементи се могу одмах користити или претходно модификовати и прилагодити индивидуалним потребама. Сви елементи се могу поново користити за неке друге пројекте, те овај процес значајно штеди време.

3.2 Визуелно програмирање

Жеља за креирањем иновативног и атрактивног дизајна је одувек била присутна у свету архитектуре. Развојем рачунара и појавом компјутерски потпомогнутих дизајнерских програма, овај процес је постао знатно олакшан. Међутим, ови програми и даље имају одређена ограничења, посебно приликом креирања комплексних форми. Креирање таквих модела унутар БИМ програма, традиционално је било могуће једино уз познавање програмског језика, истог оног од којег је конкретан програм и направљен. Традиционално текстуално програмирање је тешко савладиво, посебно за архитекте и друге дизајнере, који углавном немају ни основног знања програмских језика. Из тог разлога уведен је концепт тзв. „визуелног програмирања“ (енг. *visual programming*), које је разумљивије за све остале кориснике. Визуелно програмирање носи назив од графичке репрезентације унапред програмираних поља, чијим повезивањем се добијају алгоритми за извршавање одређене функције. Софтвери за визуелно програмирање су прилагођени кориснику, а омогућавају му да прошири могућности програма у којем ради. У случају БИМ програма, корисник може да користи софтвер за визуелно програмирање при креирању нових форми, оптимизацију постојећих форми, аутоматизацију процеса унутар пројекта и друго. Истраживање показује да је визуелно програмирање погодно чак и за програмере на почетку учења програмских језика (*Rahmani, 2015, стр. 126*). Визуелно програмирање се развија и за друге софтвере изван архитектуре, те омогућава научницима из разних других области да решавају досад нерешиве проблеме, везане за своју струку. Софтвери за визуелно програмирање који архитекте тренутно користе се зову „Грасхопер“ (енг. *Grasshopper*) и „Дајнамо“ (енг. *Dynamo*) и засновани су на „Пајтон“ (енг. *Python*) програмском језику.

Грасхопер је додатак за „Рајноцерос“ (енг. *Rhinoceros*), софтвер за тродимензионално моделовање, док је Дајнамо додатак за Ревит. Грасхопер је програмски додатак настао 2007. године од стране Роберта Мек Нила и сарадника (*Robert McNeel and associates*), (слика 43). Његова употреба је и даље веома значајна, а архитектонски бирои широм света га користе у различите сврхе, првенствено за креирање комплексних форми, али и разне анализе и симулације.



Слика 43. Изглед интерфејса програма „Грасхопер“.

Извор: <http://grasshopperprimer.com/es/0-about/1-grasshopper-an-overview.html>

3.2.1 Дајнамо

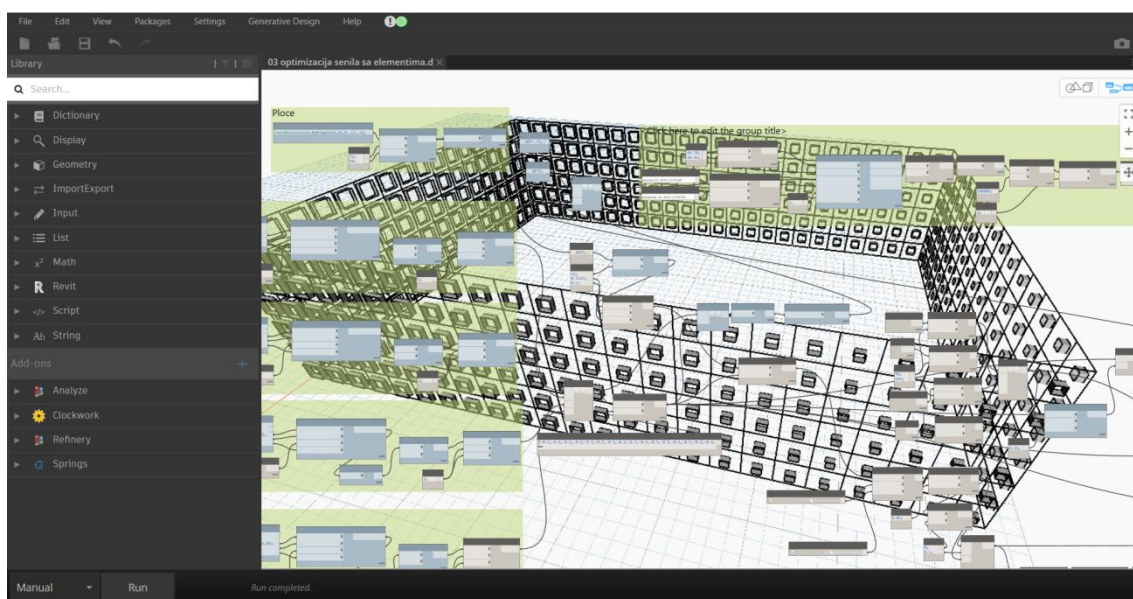
Дајнамо је знатно новији програм, настао 2015. године од стране Аутодеска. Може се бесплатно преузети са интернета као додатак за Ревит или купити у својој самосталној верзији која се зове „Дајнамо Студио“ (енг. *Dynamo Studio*). Дајнамо је софтвер креиран пре свега за архитекте, али и друге инжењерске стручњаке (грађевински, машински, електро инжењери). Основна предност Дајнама у односу на Грасхопер се првенствено огледа у програму на којем раде, где Ревит омогућава употребу свих информација које садржи један БИМ програм, док је Рајноцерос предвиђен за визуализацију. Остале предности Дајнама су:

- Прилагођавање Ревита - Дајнамо омогућава кориснику да аутоматизује процесе у Ревиту, без потребе за учењем програмског језика Пајтон. Ова чињеница пружа бројне могућности за кориснике Ревита, јер тако могу да прилагоде радно окружење и значајно умање време за извршење одређених задатака;

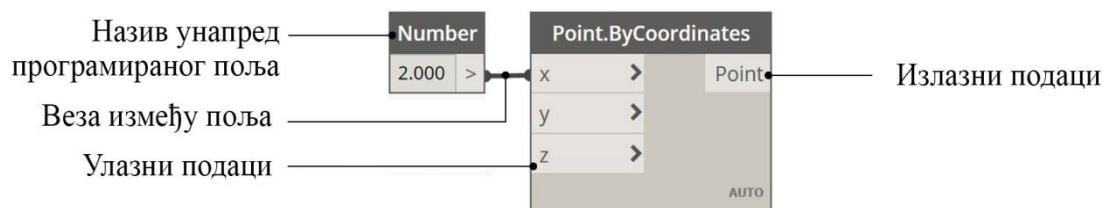
- Контролисање информација унутар модела - као БИМ софтвер, стварна моћ Ревита није само у креирању визуелне геометрије, већ и у праћењу и контроли информација унутар те геометрије. Дајнамо омогућава кориснику да креира систематске везе којима може да манипулише елементима модела и њиховим параметрима, што иначе није могуће конвенционалном употребом Ревита;

- Дизајн у оквиру БИМ-а - Ревит се углавном употребљава као софтвер за продукцију планова архитектонског пројеката, а ретко у дизајнерске сврхе. Дајнамо пружа могућност да се то стање промени, те омогућава дизајнерима да истражују итерацијске оквире креирања геометрије у контексту БИМ-а.

Дајнамо чини радни простор, у којем корисник креира алгоритам који се назива „скрипта“ (енг. *script*), (слика 44). Скрипту сачињавају унапред програмирана поља која се називају „нодови“ (енг. *nodes*) и њихове међусобне везе. Свако поље има јединствену сврху у алгоритму, те тако постоје поља која омогућавају кориснички унос вредности – „инпут“ (енг. *input*), поља која приказују вредности – „аутпут“ (енг. *output*) и поља која врше одређену функцију (рачунарске операције, креирање геометрије, модификовање параметара Ревит елемената итд.), (слика 45).



Слика 44. Изглед интерфејса програма „Дајнамо“



Слика 45. Изглед унапред програмираног поља

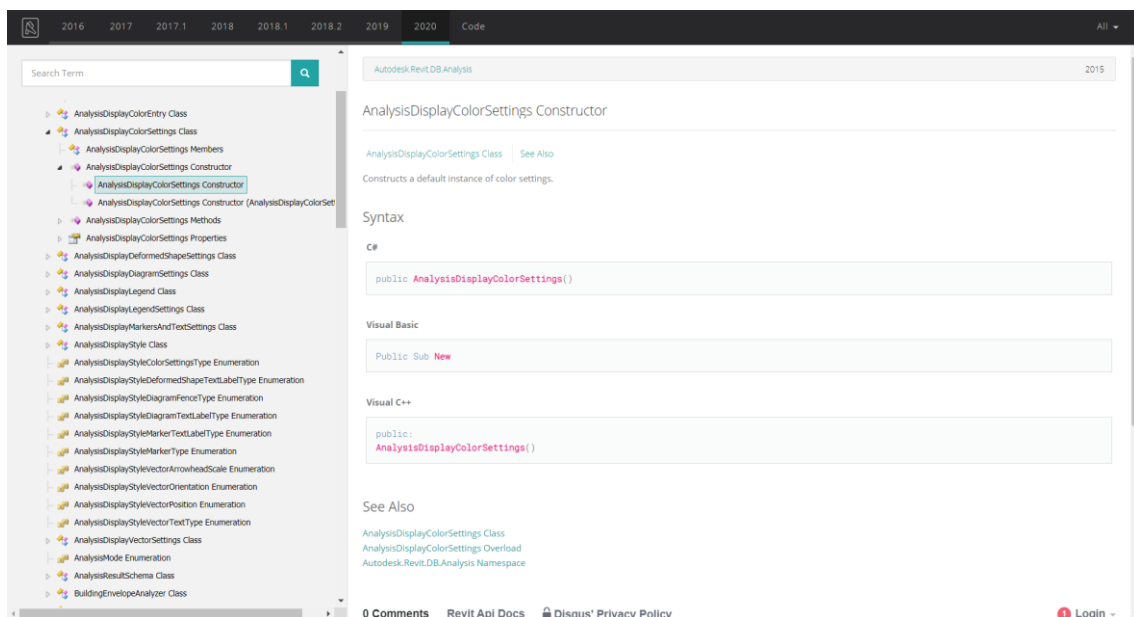
Односи између поља могу бити у оба смера, за разлику од Грасхопера у којем алгоритам увек иде слева надесно. Уколико постоји проблем за који не постоји унапред програмирано поље, корисник има могућност да самостално креира ново поље традиционалном текстуалном методом програмирања, користећи Пајтон као програмски језик (слика 46). Међутим, овај процес је знатно компликованији и захтева напредно програмерско знање, али уколико се савлада, финално пружа неограничене могућности креирања скрпити.

```

Python Script
1 # Enable Python support and load DesignScript library
2 import clr
3 clr.AddReference('ProtoGeometry')
4 from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
5
6 # The inputs to this node will be stored as a list in the IN variables.
7 #The solid module to be arrayed
8 solid = IN[0]
9 #A number that determines which rotation pattern to use
10 seed = IN[1]
11 #The number of solids to array in the X and Y axes
12 xCount = IN[2]
13 yCount = IN[3]
14
15 #Create an empty list for the arrayed solids
16 solids = []
17 # Create an empty list for the edge curves
18 crvs = []
19
20 # Place your code below this line
21 #Loop through edges and append corresponding curve geometry to the list
22 for edge in solid.Edges:
23     crvs.append(edge.CurveGeometry)
24 #Get the bounding box of the curves
25 bbox = BoundingBox.ByGeometry(crvs)
26
27 #Get the X and Y translation distance based on the bounding box
28 yDist = bbox.MaxPoint.Y-bbox.MinPoint.Y
29 xDist = bbox.MaxPoint.X-bbox.MinPoint.X
30
31
32 # Assign your output to the OUT variable.
33 OUT = solids
  
```

Слика 46. Изглед поља за текстуално програмиње

Током програмирања, корисник има могућност приступа бази података свих команди које чине Ревит програм. Ова база података се назива „Ревит АПИ“ (енг. *Revit application programming interface - API*), (слика 47). Коришћење информација из ове базе података је неопходан чинилац приликом самосталног програмирања нових поља.

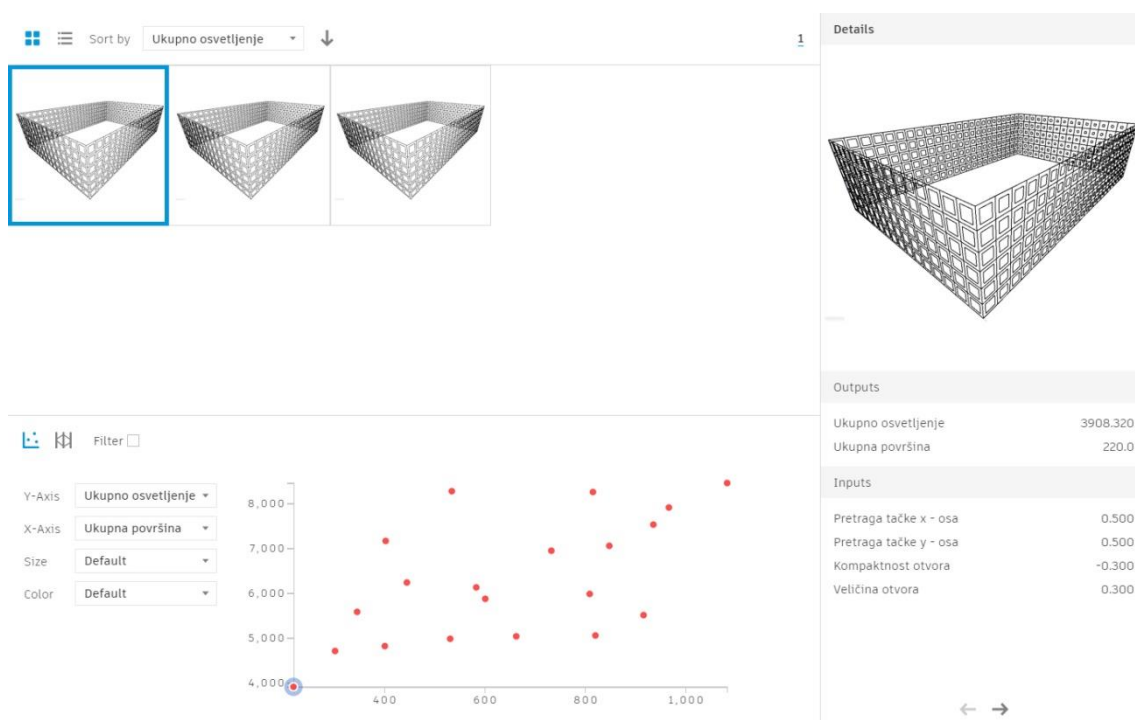


Слика 47. Изглед интерфејса „Ревит АПИ“. Извор: <https://www.revitapidocs.com/2020/>

Креирана Дајнамо скрипта се може покренути мануелно притиском на дугме или подесити на аутоматски режим, који покреће скрипту сваки пут када се догоди нека промена у радном простору. Резултати се приказују у Дајнаму или у Ревиту, у зависности од типа проблема који се решава. Уколико скрипта није добро направљена, Дајнамо ће при покретању исте избацити грешку, те директно упутити на локацију где је проблем настао. Проблеми су најчешће везани за неадекватне инпуте, погрешно повезивање унапред програмираних поља и слично.

3.2.2 Пројекат Рефинери

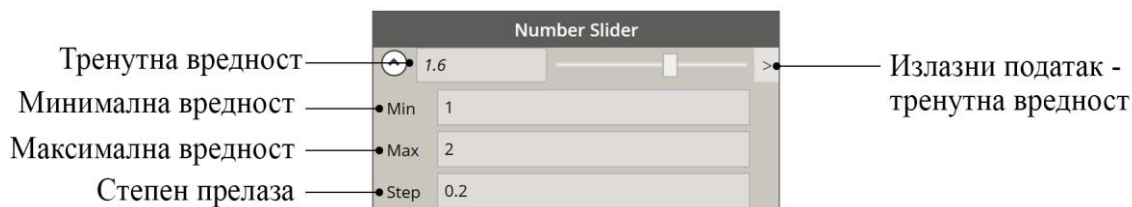
„Пројекат Рефинери“ (енг. *Project Refinery*) је софтвер компаније Аутодеск, који омогућава изналажење оптималних решења употребом генетског алгоритма, у оквиру Ревит и Дајнамо окружења (слика 48). Пројекат је још увек у својој експерименталној „бета“ (енг. *Beta*) фази, али се у наредном периоду очекује и званична верзија. Тренутна верзија је искључиво за истраживачке намене. Покреће се као самостални програм из Ревита или из Дајнама, а користи информације из оба програма.



Слика 48. Изглед интерфејса програма „Рефинери“

Механизам по којем Рефинери ради је заснован на изналажењу недоминантних оптималних решења. Корисник има могућност да унесе број иницијалних решења прве генерације, као и укупан број генерација. Сви инпути који ће генетски алгоритам контролисати током оптимизације морају бити креирани у Дајнаму, морају бити нумеричке вредности и морају бити унапред испрограмирана поља која се зову „слајдери“ (енг. *Slider*). Корисник слајдеру додељује минималну и максималну вредност, као и степен преласка из једне

вредности у другу. На пример, слајдер са минималном вредности 1 и максималном 2 и степеном прелаза 0,2, нуди листу нумеричких вредности коју чине 1,0, 1,2, 1,4, 1,8 и 2,0 (слика 49).



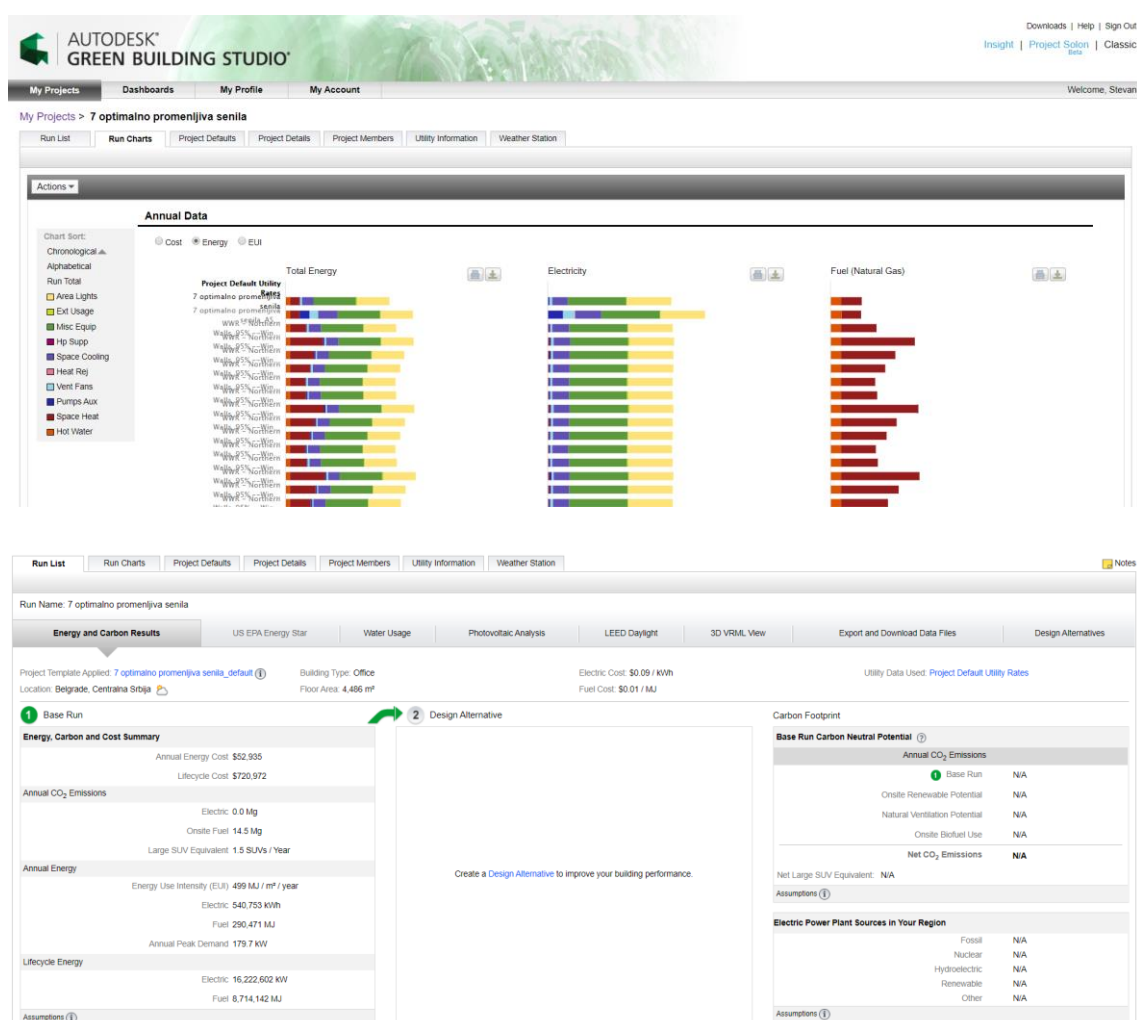
Слика 49. Изглед нумеричког „слајдера“

Рефинери омогућава кориснику да одабере који од инпута ће разматрати током процеса оптимизације, као и могућност корекције минималне и максималне вредности. Функције циља се такође морају дефинисати у Дајнаму и морају бити нумеричке вредности, како би ове информације Рефинери користио приликом тестирања решења. Рефинери омогућава кориснику да одабере које функције циља из Дајнама жели да размотри приликом калкулација, као и да подеси која од тих функција тежи минималној или максималној вредности. Финално, корисник има могућност да ограничи неку од функција циља између две вредности, те Рефинери неће тестирати решења која су изван тих вредности. Корисник сам дефинише инпите, као и функције циља, у зависности од потребе, током креирања скрипте у Дајнаму. Све резултате Рефинери уписује у екстерну Мајкрософт Ексел (енг. *Microsoft Excell*) табелу, те је могуће директно имати увид у резултате или вратити информације назад у Дајнамо и Ревит, па их тамо непосредно користити за друге потребе. Генетски алгоритам је детаљније објашњен у поглављу 4.

3.3 Енергетске симулације у Ревиту

Ревит нуди могућност вршења енергетских симулација кроз интернет-платформу која се назива „Инсајт 360“ (енг. *Insight 360*). Инсајт има могућност вршења симулација везаних за укупну потрошњу количине енергије, енергију потребну за грејање и хлађење објекта, емисију угљен диоксида, као и симулације

везане за природно осветљење. Симулације за потрошњу енергије за грејање и хлађење се врше преко интернет платформе која се назива „Грин Билдинг Студио“ (енг. *Green Building Studio – GBS*). Ова платформа користи „ДОЕ-2.2“ (енг. *DOE-2.2*) симулациони метод. DOE-2.2 је нашироко прихваћен и коришћен симулациони метод за прорачуне енергетских анализа објеката свих намена, а користи физичке информације о моделу, режим коришћења простора информације о системима климатизације, као и информације о временским приликама. Овај метод врши прорачуне у интервалу од сат времена, за унапред дефинисан временски период. Резултате симулација Грин билдинг студио приказује у форми извештаја (слика 50).



Слика 50. Изглед интерфејса интернет платформе „Грин Билдинг Студио“ за упоређивање резултата симулације (горе) и приказ индивидуалног решења (доле).

Извор: <https://gbs.autodesk.com/GBS/Project>

Прорачуни везани за топлотна оптерећења, неопходна за дефинисање капацитета система климатизације, врше се директно у Ревиту (слика 51). Ревит има могућност приказа топлотних оптерећења на нивоу целог објекта или зона и просторија, али и индивидуално за компоненте које утичу на та оптерећења (зидови, кровови, подови, прозори, врата итд.). Топлотна оптерећења су детаљније објашњена у поглављу б.

Project Summary

Location and Weather	
Project	Project Name
Address	## Street City, State Zip
Calculation Time	28. април 2019. 23:37
Report Type	Standard
Latitude	42.36°
Longitude	-71.06°
Summer Dry Bulb	34 °C
Summer Wet Bulb	25 °C
Winter Dry Bulb	-14 °C
Mean Daily Range	9 °C

Building Summary

Inputs	
Building Type	Office
Area (m ²)	98
Volume (m ³)	392.83
Calculated Results	
Peak Cooling Total Load (W)	11,734
Peak Cooling Month and Hour	July 15:00
Peak Cooling Sensible Load (W)	10,780
Peak Cooling Latent Load (W)	954
Maximum Cooling Capacity (W)	11,734
Peak Cooling Airflow (L/s)	777.2
Peak Heating Load (W)	15,312
Peak Heating Airflow (L/s)	731.4
Checksums	
Cooling Load Density (W/m ²)	119.48
Cooling Flow Density (L/(s·m ²))	7.91
Cooling Flow / Load (L/(s·kW))	66.23
Cooling Area / Load (m ² /kW)	8.37
Heating Load Density (W/m ²)	155.92
Heating Flow Density (L/(s·m ²))	7.45

Components	Cooling		Heating	
	Loads (W)	Percentage of Total	Loads (W)	Percentage of Total
Wall	76	0.65%	207	1.35%
Window	7,679	65.44%	13,468	87.96%
Door	0	0.00%	0	0.00%
Roof	0	0.00%	0	0.00%
Skylight	0	0.00%	0	0.00%
Partition	0	0.00%	0	0.00%
Infiltration	0	0.00%	0	0.00%
Ventilation	1,242	10.59%	1,637	10.69%
Lighting	884	7.54%		
Power	1,150	9.80%		
People	400	3.41%		
Plenum	0	0.00%		
Fan Heat	302	2.58%		
Reheat	0	0.00%		
Total	11,734	100%	15,312	100%

Слика 51. Изглед интерфејса панела са приказаним топлотним оптерећењима за цео објекат (горе) и индивидуалне компоненте (доле) у „Ревит“-у

Симулације везане за количину упада дневне светлости у објекат се врше преко интернет-платформе Инсајт 360. Ревит аутоматски припрема модел за анализу, шаље на Инсајт путем интернет конекције, те добијене резултате

преузима назад и приказује их у свом интерфејсу. Корисник има могућност да одабере неку од понуђених типова анализа, као што су количина осветљености (енг. *illuminance*), фактор дневног осветљења (енг. *daylight factor – DF*), аутономија дневне светлости (енг. *daylight autonomy*), али и анализе неопходне за добијање *LEED* кредита за осветљење (*LEED 2009 IEQc8 opt 1* и *LEED v4 EQc7 opt 2*), (слика 52).

Lighting Analysis in the Cloud

Select Analysis Type

For best results, follow the best practices checklist in Help

Analysis: **LEED 2009 IEQc8 opt1**

Levels: **All**

Environment

Location: Belgrade, Serbia

Date/Time: Near September 21, 9am and 3pm, clear sky

The following weather values will be used:
Weather file data for a clear sky day
within 15 days of 9/21 at 9am and 3pm

Illuminance Settings

Threshold: 10 to 500 foot-candles
LEED 2009 IEQc8.1 threshold will be used

Thresholds are used for results in Room and Floor Schedules

Cloud Credits

Resolution: **12 inch grid**

Required: Check Price

Available: Education

Email: stevanpfc2@gmail.com when complete

v3.1.2.1

Check Price Cancel

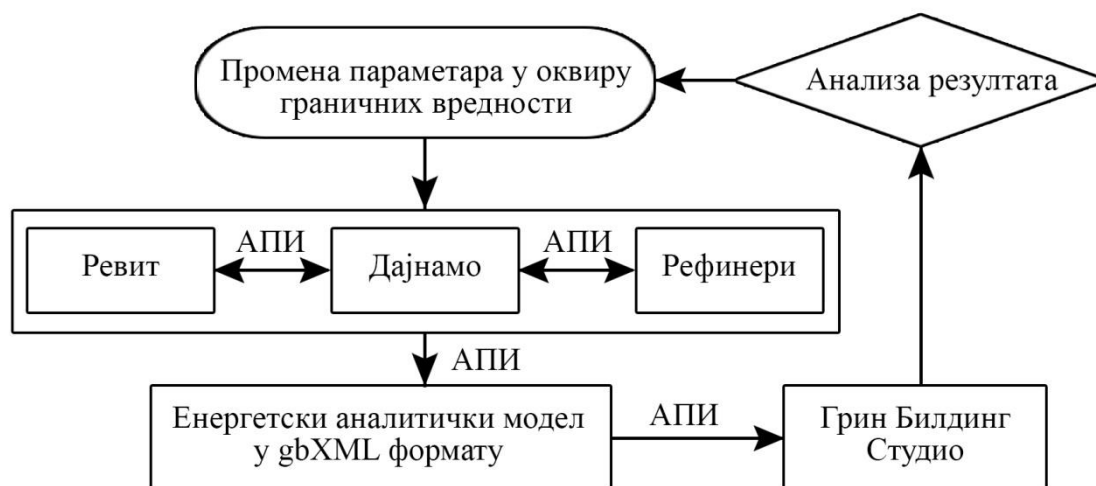
Слика 52. Изглед контролне табле симулације дневног осветљења у „Ревит“-у

Осветљеност је физичка величина која представља однос светлосног флукса и површине коју осветљава и њена јединица је лукс [lux] (Veličković et al. 2002, стр. 6). Фактор дневног осветљаја представља однос између осветљености неке тачке у унутрашњости зграде и хоризонталне осветљености у спољашности, за расподелу сјајности неба која одговара стандардном облачном небу и изражава се у процентима [%] (Veličković et al. 2002, стр. 6). Аутономија дневне светлости у некој тачки у згради је проценат од укупног броја сати у току године када се зграда користи, у коме је могуће постићи минималну захтевану осветљеност коришћењем само дневне светлости (Veličković et al. 2002, стр. 6).

За добијање *LEED* кредита, неопходан је минимални ниво осветљености од 270 лукса и максимални од 5.400 лукса, у условима ведрога неба 21. септембра, у 9 сати ујутру и 3 сата поподне (*USGBC*, 2020). Ревит има могућност да визуелно прикаже површине које испуњавају и које не испуњавају овај услов, као и градацијске разлике између различитих нивоа осветљења.

3.4 Предности и мане интегрисаног система

Сви описани процеси заједно формирају интегрисан систем за комплетно креирање и анализу хипотетичког БИМ модела. Дајнамо представља срж овог система, јер контролише процесе осталих делова програма. Ревит служи за физичко креирање хипотетичког модела са реалним карактеристикама, док Рефинери врши оптимизацију употребом генетског алгорита. Дајнамо користи информације из Ревита за креирање променљивих параметара и функција циља које су неопходне Рефинерију у процесу оптимизације. Добијени оптимизовани хипотетички модел се тестира за енергетска својства, преко Грин билдинг судија и за количину дневног осветљења, преко Инсајта. Резултати симулација показују да ли су неопходне додатне корекције зарад унапређења решења, те се потенцијално мењају основни параметри и процес почиње испочетка. Веза између свих елемената унутар програма се остварује преко Ревит АПИ базе података (слика 53).



Слика 53. Интегрисана методологија истраживања.
Извор: Ауторска илустрација према *Rahmani*, 2015

Суштина БИМ програма је аутоматско ажурирање промена које су настале у моделу, у свим плановима у којима се та промена види (основама, пресецима изгледима, табелама, листовима спремних за штампу). Из тог разлога основне предности интегрисаног система су следеће:

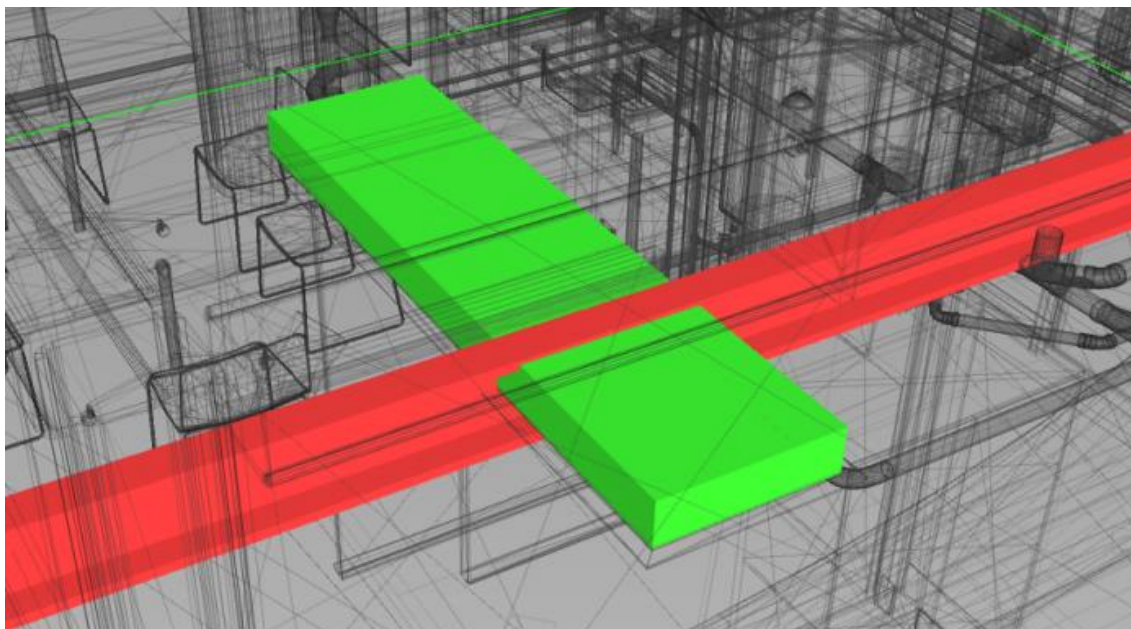
- Унапређен проток информација – интегрисани БИМ модел поседује све информације на једном месту, па је из тог разлога проток тих информација ефикасан између свих учесника, како дизајнера, тако и извођача радова, али и инвеститора и власника. БИМ модел може садржати информације из свих фаза пројектовања и извођења, па се на тај начин могу пратити временски интервали и дефинисани рокови (*Ford et al.*, 1995, стр. 6). Сви учесници имају могућност да у реалном времену посматрају, анализирају или мењају БИМ модел, уз аутоматско ажурирање свим другим учесницима, што умањује потребу за изменама и могућност грешака;

- Боља визуализација дизајна - тродимензионални модел омогућава прегледно сагледавање елемената креираних пре свега од стране архитеката али и других инжењера. Корисник има могућност да сагледа простор, визууре које се пружају из тог простора, боје и материјале, све у реалном времену, те могућност да креира слике или анимације, зарад успешније презентације дизајна;

- Унапређена процена трошкова - БИМ може врло једноставно да процени трошкове везане за пројектовање и изградњу објекта, јер садржи све неопходне информације унутар елемената. Ове информације се лако могу табеларно приказати, те аутоматски израчунати укупна количина и цена. БИМ модел је веома користан систем за рачунање предмера и предрачун;

- Унапређене анализе - структуралне, енергетске и друге симулације су знатно једноставније за коришћење, а дају прецизније резултате због информација које БИМ модел у себи садржи (Bazjanac, 2008, стр. 295);

- Умањење трошкова изградње будућег објекта - БИМ модели имају могућност тзв. „детекције судара“ (енг. *clash detection*), при којем се сагледавају потенцијални проблеми колизије између елемената креирани од стране различитих струка (нпр. уочен је проблем продора одређене цеви кроз греду), (слика 54). Захваљујући БИМ моделу, овакви проблеми се могу елиминисати пре фазе извођења, па потенцијално остаје знатно мање проблема који се морају директно решити на градилишту. БИМ модел омогућава и припрему елемената за префабрикацију, што додатно штеди време и трошкове;



Слика 54. Детекција судара у БИМ моделу.

Извор: <https://www.thebimcenter.com/2016/03/what-is-clash-detection-how-does-bim-help.html>

- Праћење објекта у свим фазама - како пројекат напредује од своје идејне фазе, преко изградње до употребе, БИМ модел служи као библиотека која чува информације као и њихове промене током времена. Уколико се појави неки проблем, БИМ модел може да идентификује место, а потенцијално и узрок проблема, као и да прегледно визуализује проблем како би се једноставније решио;

- Ефикасно проналажење најбољих решења – интегрисан систем пружа анализирање великог броја различитих решења у веома кратком временском периоду, те одабир најбољег на основу услова које је дефинисао корисник. Промена вредности параметара аутоматски резултира променама на БИМ моделу, без могућности губљења информација. Овакав приступ може највише допринети ефикаснијем доношењу одлука у раним фазама пројектовања;

- Аутоматизација процеса пројектовања – интегрисани систем омогућава повећање ефикасности приликом креирања планова и припреме документације, креирањем неопходних скрипти које самостално извршавају неке репетитивне радње (нпр. аутоматско додељивање вредности параметара креираним елементима, аутоматско постављање планова на листове за штампу итд.). На овај начин се знатно штеди време, те повећава продуктивност рада.

Мане интегрисаног система су углавном техничке природе и односе се на:

- Неусклађеност програма и делова програма – иако сви поменути програми припадају једном великом интегрисаном систему, који развија иста компанија (Аутодеск), чињеница је да програми функционишу као самосталне целине, те се често јавља неусклађеност између одређених верзија. Пројекат Рефинери је у експерименталној развојној фази и још увек није доступан за јавност, док Дајнамо постоји тек од 2015. године, па се из тог разлога неретко појављују грешке у програму, посебно при покретању великих и захтевних скрипти;

- Недостатак одређених унапред програмираних поља – библиотека унапред програмираних поља је велика и повећава се сваком новом верзијом програма, али још увек недостају поља пре свега везана за директне енергетске

симулације, као и анализе структуралних оптерећења. Креирање ових поља традиционално текстуалном методом је комплексно и захтева напредно знање програмског језика Пајтон;

- Споре калкулације – величина скрипти директно утиче и на време потребно да се оне изврше, посебно ако преузимају информације из БИМ модела или уносе информације у исти. Време извршења скрипти директно зависи и од начина на који је она креирана (употреба више унапред програмираних поља са међусобним конекцијама спорије врши калкулације у односу на једно текстуално програмирано поље), као и од типа калкулација које врше (математички прорачуни, симулације и анализе, креирање и модификација елемената и друго);

- Споре енергетске симулације и симулације осветљења – све симулације се врше преко интернет платформе, па је неопходна стабилна интернет конекција. Пребацивање модела у одговарајуће формате, слање на интернет платформу и финално симулациони процес је аутоматски, али захтева пуно времена;

- Лимитираност Грин билдинг студија – Резултати добијени од Грин билдинг студија су поуздани, али лимитирани на годишњу и месечну потрошњу количине енергије за грејање и хлађење објекта и емисију угљен-диоксида. Грин билдинг студио нема могућности комплексних анализа на нивоу термичких зона и индивидуалних просторија, као ни анализе кретања ваздуха и унутрашњег комфора уопште.

4. ОПТИМИЗАЦИЈСКЕ МЕТОДЕ

Појава рачунара средином двадесетог века омогућила је решавање најразличитијих типова до тада нерешивих проблема. Снага рачунара се током времена експоненцијално повећавала, те у овом тренутку просечан рачунар има могућност обраде и по неколико милијарди операција у секунди (*Padua*, 2011, стр. 2026). Рачунар обрађује податке тако што започиње нов процес оног тренутка када заврши активан процес. Такав вид обраде података се назива „серијска обрада“ (енг. *serial computing*) и она се најчешће користи приликом изналажења решења одређеног проблема (*Wilkes*, 1956, стр. 66). Серијском обрадом података тестира се свако могуће решење, једно по једно, док се не појави одговарајуће решење.

Одређени специфични проблеми се због своје комплексности, не могу се решити серијском обрадом података, јер због огромног броја решења која морају да се испитају, чак и тренутно најбољем рачунару би биле потребне године вршења калкулација. Код оваквог типа проблема постоји коначан, али велики број тачних (допустивих) решења. Стога је неопходно наћи скуп приближно тачних – оптималних решења. За решавање оваквих типова проблема, неретко се користе тзв. „оптимизацијске методе“ (енг. *optimization methods*). Оптимизацијске методе испитују само одређени број решења, али по унапред дефинисаним правилима, према којима бирају решења за која потенцијално сматрају да могу бити исправна. На овај начин, може се наћи велики број квалитетних решења за релативно кратко време. Оваква претрага решења се зове „хеуристичка“ (енг. *heuristic*) и због своје потенцијално широке примене, привукла је велику пажњу академске заједнице. Усавршавањем хеуристичких метода претраге формиране су универзалне хеуристичке методе, тзв. „метахеуристичке методе“ (енг. *metaheuristic*). Метахеуристичке методе користе уопштени скуп правила, па се исти принцип може применити на различите типове проблема, чак и на различите дисциплине, док класичне хеуристичке методе могу решити искључиво индивидуални проблем, јер користе специфичне особине датог проблема приликом његовог решавања.

4.1 Метакхеуристичке оптимизацијске методе

Метакхеуристике су методе претраге, осмишљене да траже, генеришу или бирају најадекватнија решења за одређени оптимизацијски проблем, а посебно су погодне у случају непотпуних информација или лимитиране компјутерске моћи (*Bianchi et al.*, 2009). Појам је настао од грчких речи „хеуристик“ (грч. *ευρετικός*), што значи „тражити“ и „мета“ (грч. *μετά*), што значи „на вишем нивоу“. Метакхеуристике су универзалне методе, те су погодне за решавање различитих проблема оптимизације, независно од струке (*Blum et al.*, 2003, стр. 270). Веома су значајне, јер неретко представљају једини начин доласка до решења одређених проблема. Могу се користити за претрагу великог броја решења, те изналажење скупа оптималних решења или за брзо изналажење довољно доброг почетног решења, код проблема који имају једно егзактно решење.

Особине, које једна ефикасна метакхеуристика треба да поседује како би обезбедила значај на практичном и теоријском плану (*Glover, Kochenberger*, 2003, стр. 573), су:

- једноставност - треба да буде заснована на једноставним и лако разумљивим правилима;
- прецизност - кораци којима се описује метакхеуристичка метода треба да буду формулисани прецизно, по могућности математичким терминима;
- доследност - сви кораци методе треба да буду у складу са правилима којима је метакхеуристика дефинисана;
- ефикасност - примена метакхеуристике на неки конкретан проблем треба да обезбеди добијање решења блиских оптималном за већину реалних примера, нарочито за званичне тест примере расположиве у тој класи;
- ефективност - за сваки конкретан проблем, метода мора да обезбеди оптимално или решење блиско оптималном у разумном времену извршавања;
- робусност - метода треба да даје подједнако добре резултате за широк спектар примера из исте класе, а не само за неке одабране тест примере;

- јасноћа - треба да буде јасно описана како би се лако разумела и, што је још важније, лако имплементирала и користила;

- универзалност - принципи којима је метода дефинисана треба да буду општег карактера како би се са лакоћом могла применити на нове проблеме.

Метахеуристичке методе се успешно користе приликом изналажења решења за комплексне проблеме у области математике, медицине, биологије инжењерских наука итд. Посебна примена, која привлачи све већу пажњу научника је у области програмирања, специфично креирања вештачке интелигенције, због могућности ових метода да се током изналажења решења, самостално унапређују.



Слика 55. Метахеуристичке методе претраге.
Извор: Ауторска илустрација према Hoos, 2005

До сада је развијен велики број метахеуристичких метода које најчешће симулирају већ познате природне процесе, првенствено у биологији, (као што је еволуција – „еволуцијски алгоритми“ (енг. *evolutionary algorithms*) са својим варијацијама, са посебним акцентом на „генетски алгоритам“ (енг. *genetic algorithm*); „неуралне мреже“ (енг. *neural network*), које имитирају рад можданих синапси; методе које имитирају мравље колоније (енг. *ant colony optimization*) или колоније пчела (енг. *particle swarm optimization*); „учење машина“ (енг. *machine learning*) - које имитирају људско понашање) и физици („метод симулираног каљења“ (енг. *simulated annealing*)), али и методе инспирисане локалним претраживањем са разним идејама да се избегне замка локалног минимума („итерацијско локално претраживање“ (енг. *iterated local search*), „метода променљивих околнина“ (енг. *variable neighborhood search*), „табу претрага“ (енг. *tabu search*)) и друге (Glover, Kochenberger, 2003, стр. 626), (слика 55).

4.2 Еволуцијски алгоритми

Еволуцијски алгоритми су најраспрострањенија и најупотребљенија врста метахеуристичких метода изналажења решења. Засновани су на Дарвиновој теорији Еволуције, која указује на то да је сав живот на Земљи настао од заједничког претка (Darwin, 1859). Теорија претпоставља да су комплекса жива бића, еволуирала од својих простијих предака, природно током времена. Овај процес се одвија тако што јединке са добрим особина имају веће шансе да преживе од других јединки, те самим тим имају веће шансе да преносу добре гене на следећу генерацију. Укрштањем јединки са добрим генима, добијају се још бољи потомци, па се цео процес понавља и наставља у следећој генерацији. Процес „чувања“ и преношења добрих гена током генерација се назива „природна селекција“ (енг. *natural selection*). Количина добрих и лоших особина неке јединке, као и њихов међусобни однос одређују њен квалитет тзв. „фитнес“ (енг. *fitness*). Што су јединке више „фит“, односно имају већи број добрих него лоших особина, веће су им шансе да преживе. Фитнес сваког биолошког бића зависи од много фактора, а како јединка еволуира током времена, тако се и фитнес мења и адаптира, како према окружењу, тако и према другим јединкама. Ова адаптација

је од кључног значаја за еволуцијске алгоритме, јер омогућава претрагу сета решења који се константно мења, па се због тога овај метод зове још и „адаптивна еволуција“ (енг. *adaptive evolution*). На овај начин може се тестирати и уједно мењати велики број решења паралелно, у релативно кратком временском периоду, за разлику од серијског тестирања сваког решења понаособ. Претрага решења у условима који се константно мењају је управо оно што даје предност еволуцијским у односу на друге типове алгоритама. Постоји неколико врста еволуцијских алгоритама, од којих се посебно издваја генетски алгоритам као најстарији и најпознатији оптимизацијски метод изналажења решења.

4.3 Генетски алгоритам

Генетски алгоритам је адаптивни еволуцијски оптимизацијски метод, откривен од стране Џона Хенри Холанда (*John Holland*), током рада са својим студентима и колегама шездесетих година двадесетог века, на Универзитету у Мичигену. Холандов циљ, првобитно је био везан за посматрање адаптивних принципа као природног феномена и начин на који би се могао применити у рачунарске сврхе. Појам генетски алгоритам се први пут помиње у његовој књизи „Адаптација природних и вештачких система“ (*Adaptation in Natural and Artificial System*) из 1975. године, где га теоријски описује и препоручује као метод за изналажења оптималних решења (*Holland, 1975*). У овој књизи, Холанд описује процес природне селекције, кроз трансфер скупа особина или „хромозома“ (енг. *chromosome*), са својим индивидуалним особинама или „генима“ (енг. *gene*) на следећу генерацију. Холанд такође уводи и основне појмове генетског алгоритма као што су „селекција“ (енг. *selection*), (одабир јединки), њихово „укрштање“ (енг. *crossover*), (имитација биолошког спајања две јединке) и „мутација“ (енг. *mutation*), (насумичне промене настале на неком делу хромозома).

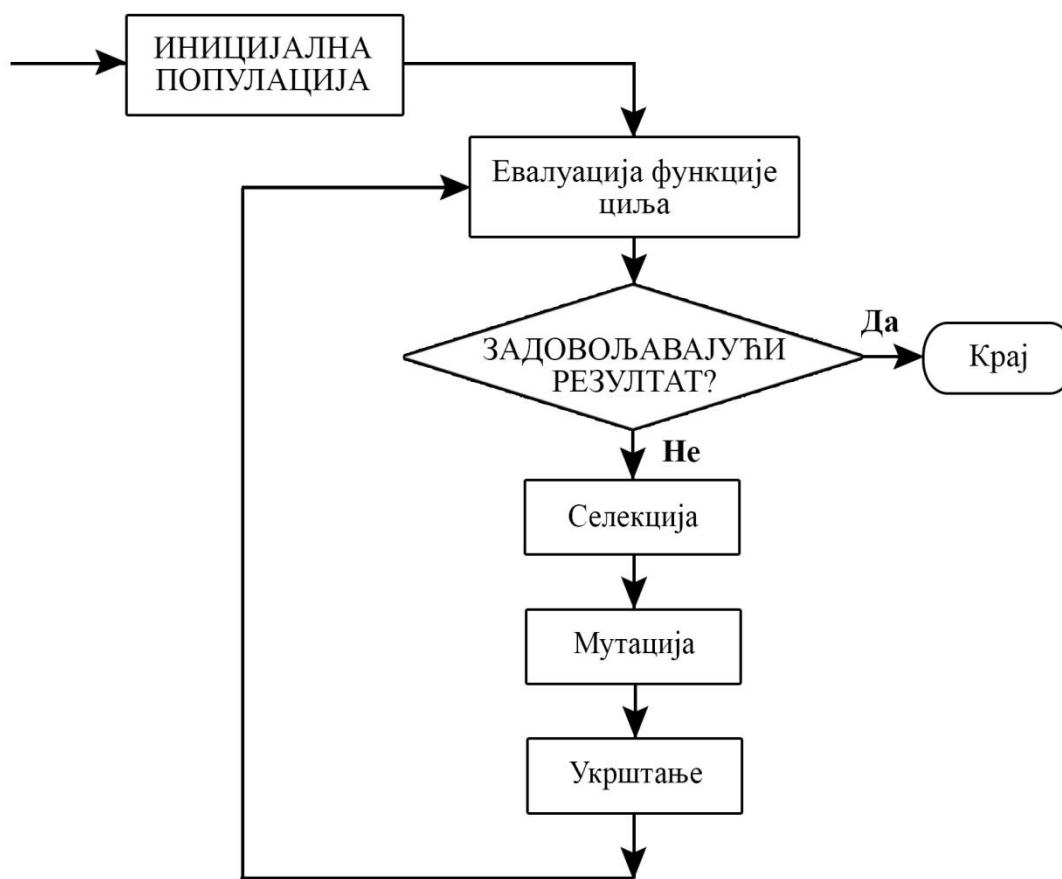
Холандово откриће генетског алгоритма је било значајан технолошки напредак. Велики потенцијал примене генетског алгоритма је убрзо уочен, те се овај принцип и данас интензивно проучава и унапређује.

4.3.1 Основна структура

Према структури, генетски алгоритам се дели на прост и сложен. Прост генетски алгоритам користи своју бинарну репрезентацију и основно је полазиште за креирање неких сложенијих верзија генетског алгоритма. Основну структуру чине проста селекција, укрштање са једном тачком прекида и проста мутација. Џон Холанд је у својој књизи дефинисао прост генетски алгоритам (*Holland, 1975, стр. 7*).

Код генетског алгоритма јединке представљају апроксимативне репрезентације решења проблема. Свака јединка садржи скуп особина које се називају хромозом, а којег у бинарном кодирању представља низ сачињен од нула и јединица или „битова“ (енг. *bit*). Одређена особина се назива ген, индивидуални је део хромозома и као таква представља један „бит“. Одређени ген, односно „бит“ има само два могућа „стања“ (0 или 1). Свака јединка има одређену меру квалитета хромозома који се назива „фитнес“, а услове који одређују по чему је једна јединка прилагођенија од друге дефинише функција циља, односно функција фитнеса (енг. *fitness function*).

Генетски алгоритам почиње формирањем скупа почетних решења, односно скупа јединки, чији домен (укупан број) одређује корисник. Генетски алгоритам насумично бира јединке које ће чинити иницијалну популацију унутар дефинисаног домена. Затим следи процес који чине селекција решења, њихово укрштање и случајна мутација одређених јединки. Овај процес се понавља све до тренутка добијања сета оптималних решења. Вишеструком применом оператора селекције, јединке са лошим особинама током генерација нестају („умиру“), док се оне са добрим особинама укрштају и преносе гене на следећу генерацију. Током процеса одређене јединке случајно мењају неке од својих гена и тај процес се назива мутација. Она омогућава да се на тај начин врате одређени хромозоми који су током процеса селекције изгубљени и на тај начин „освежи“ и финално побољша квалитет следећих генерација (слика 56).



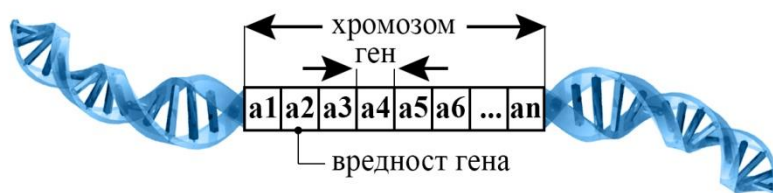
Слика 56. Основна структура простог генетског алгоритма.
Извор: Ауторска илустрација према *Srinivas, Patnaik, 1994*

Основне карактеристике генетског алгоритма (*Borak, 2009, стр. 9*) су:

- постоји популација јединки;
- неке јединке су боље прилагођене околини;
- боље јединке имају већу вероватноћу преживљавања и репродукције;
- особине јединки записане су помоћу генетског кода;
- деца наслеђују особине родитеља;
- јединке могу мутирати.

4.3.2 Репрезентација решења

Квалитет добијених решења у генетском алгоритму директно зависи од начина на који се то решење репрезентује. Свако решење у генетском алгоритму има свој хромозом, односно скуп одређених особина. Процес креирања хромозома се назива „кодирање“ (енг. *coding*), јер је свако решење репрезентовано кодом. Хромозом чини скуп знакова које могу имати различите вредности у зависности од типа кода (слика 57). Постоје бинарни и небинарни кодови. Код бинарног кода, сваки индивидуални члан хромозома, односно ген, може имати једну од две могуће бинарне вредности: нула (0) или један (1). Код небинарног кода, ген може имати више вредности, у опсегу природних или реалних бројева. У зависности од конкретног проблема, неопходно је користити једну или другу врсту кода, а постоји могућност и комбиновања више различитих репрезентација одједном.



Слика 57. Изглед хромозома и гена. Извор: Ауторска илустрација према *Dimcic*, 2011

Бинарна репрезентација је једна од првих коришћених репрезентација хромозома. Управо због своје једноставности, погодна је за решавање великог броја проблема. Хромозом јединке у бинарном коду чини низ састављен од нула и јединица (нпр. 001101001), а његова дужина зависи од врсте проблема који се решава. Математички посматрано, јединка са k бројем гена се представља као:

$$(a_1, a_2, \dots, a_k), \text{ где је } k \in \{0, 1\}.$$

Код избора начина кодирања специфичног проблема, неопходно је да сва могућа решења могу да се репрезентују кроз тај код, као и да свако решење које је сачињено од кода буде валидно.

Рачунарски репрезент решења у виду низа сачињеног од знакова се назива „генотип“ (енг. *genotype*), док се његове реалне карактеристике називају „фенотип“ (енг. *phenotype*). Процес при којем се репрезентовани код дешифрује у реалне особине се назива „декодирање“ (енг. *decoding*), (Dimcic, 2011, стр. 60).

4.3.3 Функција циља

Сва решења током процеса генетског алгоритма пролазе кроз евалуацију, на основу које се одређује мера квалитета неке јединке, односно исправности неког решења, а која се назива „прилагођеност“ или „фитнес фактор“ (енг. *fitness factor*), (Srinivas, Patnaik, 1994, стр. 21). Фитнес неке јединке је дефинисан на основу гена који чине хромозом, односно на основу његових особина. Фитнес неке јединке одређује функција која оцењује њен квалитет и назива се „фитнес функција“ или „функција циља“ (енг. *fitness function*). Све операције унутар генетског алгоритма се спроводе на јединкама, осим оцене њиховог квалитета која се врши на декодираним јединкама - потенцијалним решењима.

Функција циља је најзначајнији део генетског алгоритма, али је њено дефинисање најкомплекснији задатак који корисник мора да уради. На основу ње се одређује колико је нека јединка квалитетна, односно прилагођенија функцији циља. Њена правилна поставка је врло важна, јер директно утиче на процес селекције и на тај начин генетски алгоритам одређује јединке које ће се елиминисати а које оставити у популацији. Јединке са бољим фактором фитнеса (јединке које су прилагођеније, квалитетније јединке) имају веће шансе за преживљавање, односно већу могућност да током процеса селекције буду одабране за укрштање, те финално пренесу своје гене у наредне генерације. Јединке са слабијим фактором фитнеса имају мању шансу за преживљавање, те већу могућност да током процеса селекције буду изостављене, без могућности да пренесу гене у наредне генерације.

Генетски алгоритам може имати једну или више функцију циља. Уколико постоји само једна функција циља, генетски алгоритам врши једнокритеријумску оптимизацију, док више функција циља омогућава генетском алгоритму да врши

вишекритеријумску оптимизацију (енг. *Multi-Objective Optimization - MOO*). Вишекритеријумска оптимизација је знатно сложенија, те посебно служи за решавање комплекснијих проблема.

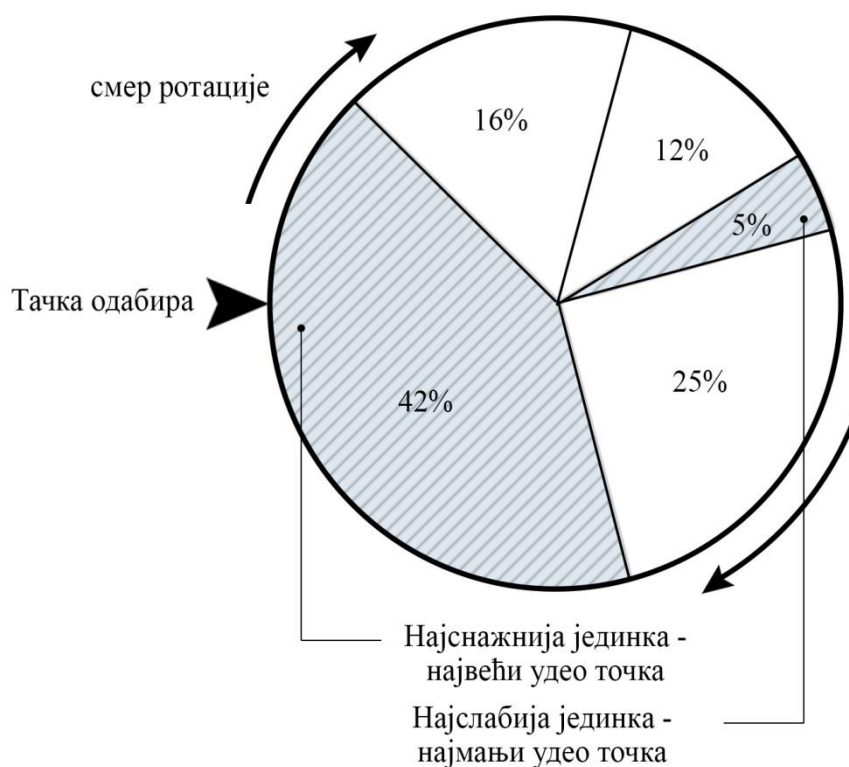
4.3.4 Селекција

Селекција је први оператор у генетском алгоритму. Циљ селекције да бира јединке са што бољим особинама за касније укрштање. Селекција увек даје већу шансу за одабир јединки са већим фитнес фактором (*Goldberg, Deb, 1991, стр. 71*). Из тог разлога неопходно је дефинисати селекцију која обезбеђује и лошим јединкама неку шансу за преживљавање. Како би се ово постигло, примењују се одређене стратегије замене генерација. Најпримењеније стратегије су: генерацијска - при којој се у свакој генерацији мењају све јединке из популације; стационарна - при којој се у свакој генерацији мења само део популације, док се остатак преноси из претходне популације; и елитистичка - при којој се најбоље јединке из сваке генерације чувају од измена или елиминације и непромењене се преносе у наредну генерацију (*Baluja, 1995, стр. 38*). Добре јединке имају посебан статус, те се због тога називају „елитним“ јединкама. Елитистичка стратегија је најзаступљенија и даје најбоље резултате, јер спречава генетском алгоритму да у процесима селекције и укрштања, губи јединке са добрим особинама. На овај начин се умањују шансе да генетски алгоритам дође до решења из локалног екстрема, већ експоненцијално из генерације у генерацију тражи резултате које доводе до глобалног екстрема - оптималног решења.

Како би се имитирала природна селекција, током усавршавања генетског алгоритма развили су се различити типови селекције. Два основна и најзаступљенија типа селекције су „рулет-селекција“ (енг. *roulette wheel selection*) и „турнирска селекција“ (енг. *tournament selection*).

Рулет селекција или проста селекција је метод по којем се бира нови број јединки, једнак постојећем броју јединки, које се налазе у генерацији. Назив је добила због сличности са рулет-точком, чије делове заузимају јединке пропорционално свом фитнес фактору. Јединка са највећим фитнес фактором

заузима највећи део точка, док она са најмањим фитнес фактором, најмањи део. Процент који јединка заузима на рулет-точку, једнака је количнику њеног фитнес фактора и збира свих фитнес фактора помножено са 100. Селекција се врши тако што се точак „окреће“ онај број пута колико има јединки у популацији, а након сваког окретања, бира се по једна јединка коју означи показивач на рулет-точку (слика 58), (Dimcic, 2011, стр. 54). Популација од 10 јединки, захтева 10 пута окретање точка, те одабир 10 јединки које ће се укрштати при креирању наредне генерације потомака. Недостатак оваквог приступа је чињеница да због високог фитнес фактора једне јединке, она буде најчешће одабрана, а чак постоји теоретска шанса да само она буде одабрана. Појава дупликата је најчешћи проблем код рулет-селекције, те се примењују различите методе да се овај проблем избегне.



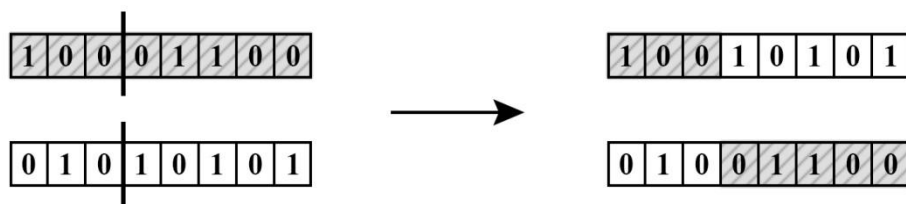
Слика 58. Рулет селекција. Извор: Ауторска илустрација према Dimcic, 2011

Турнирска селекција се састоји од избора јединки формирањем тзв. „турнира“ (Borak, 2009, стр. 17). Турнири су такмичења у којем се јединке боре за преживљавање и селекцију. Број турнира једнак је броју јединки, како би се на крају одабрао исти број јединки за укрштање. Величину турнира унапред одређује корисник. Јединке се насумично бирају и међусобно такмиче на основу својих фитнес фактора, према функцији циља. Слично као и код рулет-селекције, јединке са бољим фитнес фактором имају веће шансе да буду одабране. Турнирска селекција је знатно бржа од рулет-селекције, али њен велики недостатак је чињеница да овом методом истражује знатно мањи број потенцијалних решења, те се врло често додаје посебан фактор који успорава процес, али испитује знатно већи број потенцијалних решења.

4.3.5 Укрштање

Укрштање или репродукција је основни оператор генетског алгорита. Циљ укрштања је размена генетског материјала између две јединке и пренос генетског материјала на следеће генерације. Аналогно природном процесу, у укрштању учествују две претходно одабране јединке које се називају „родитељи“ (енг. *parents*), (Baluja, 1995, стр. 39). Након процеса укрштања, стварају се једна или две нове јединке које се називају „потомци“ или „деца“ (енг. *offspring*). Деца наслеђују генетски материјал од родитеља, те је већа вероватноћа да уколико су родитељи добри и деца буду добра па чак и боља од њих. Ово је основна суштина укрштања, која омогућава генетском алгоритму да током генерација добија све боља решења. Постоји више начина укрштања од којих су најзаступљенији једнопозиционо, вишепозиционо и униформно укрштање (Mühlenbein, 1997).

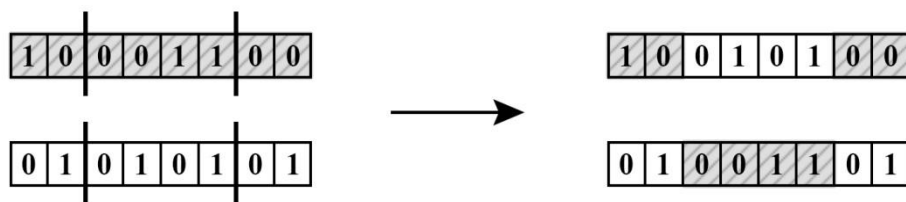
Једнопозиционо укрштање је најпростији начин укрштања јединки. Генетски алгоритам насумично одређује позицију која је цео број у интервалу од $[0, k-1]$, где је k дужина јединке родитеља. Укрштање се врши заменом преосталог дела између родитеља (слика 59).



Слика 59. Једнопозиционо укрштање.

Извор: Ауторска илустрација према *Spears, De Jong, 1991*

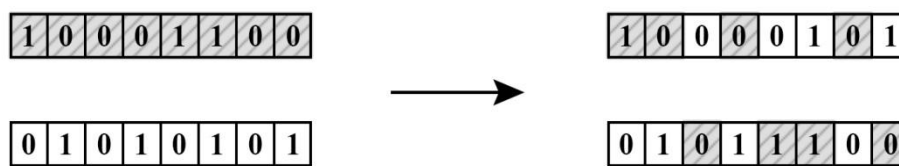
Вишепозиционо укрштање је знатно флексибилнији и успешнији метод од једнопозиционог укрштања, јер је претпоставка да добар генетски материјал не мора увек бити на суседним генима (*Spears, De Jong, 1991, стр. 232*). Код N - вишепозиционог укрштања, генетски алгоритам насумично одређује N тачака прекида, те врши замену гена хромозома родитеља између тих тачака (слика 60). Што је број позиција већи, већа је и комбинаторика изгледа јединки потомака.



Слика 60. Двопозиционо укрштање

Извор: Ауторска илустрација према *Spears, De Jong, 1991*

Униформно укрштање је тип укрштања са $k-1$ тачака прекида, где је k дужина јединке родитеља и коефицијентом вероватноће да потомак наследи гене од својих родитеља – P (*Spears, De Jong, 1991, стр. 233*). Уколико је коефицијент $P = 0.5$, то значи да ће један потомак, након укрштања, пола гена од укупног броја који се налази у хромозому добити од једног родитеља, а пола од другог. Уколико настају два потомка, други ће имати супротна стања гена у хромозому од првог, што не значи да је други потомак негација првог, јер је могуће да на одређеним позицијама родитељи имају исто стање гена. У случају P - униформног укрштања, могуће је дефинисати и вектор који ће за сваки ген садржати вероватноћу да се одређена особина наследи од једног или другог родитеља, те се овакав вектор зове „маска“ (енг. *mask*), а процес „униформно укрштање са маском“ (енг. *uniform crossover with mask*), (слика 61), (*Spears, De Jong, 1991, стр. 233*).



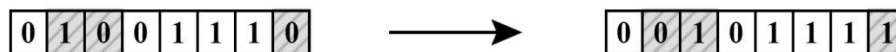
Слика 61. Униформно укрштање са маском
Извор: Ауторска илустрација према *Spears, De Jong, 1991*

4.3.6 Мутација

Мутација је најзначајнији оператор унутар генетског алгорита. Као имитација природног процеса, она шири претрагу за потенцијалним решењима, тако што ојачава популацију јединки и чини је разноврснијом (*Srinivas, Patnaik, 1994, стр. 20*). Мутација на овај начин враћа потенцијално добар материјал који је изгубљен током селекције и укрштања, те умањује шансу да генетски алгоритам погрешно тако што ће прерано одабрати локално оптимално решење, које није глобално оптимално решење. Мутација је једини начин да уколико се генетски алгоритам „заглави“ унутар локалне претраге, насумичном мутацијом изађе из ње и настави претрагу за потенцијално бољим решењима. Мутација је промена или грешка у хромозому, при којој се један ген насумично замени неким другим.

Параметар који одређује вероватноћу мутације P_m , одређује корисник пре почетка генетског алгорита и његова вредност може бити између 0 и 1. Уколико коефицијент мутације тежи јединици, алгоритам се претвара у насумичну претрагу за решењем, док уколико тежи нули, велике су шансе да генетски алгоритам упадне у неки од локалних екстрема. Из тог разлога је коефицијент мутације најчешће између 0,001 и 0,01.

Основни вид мутације је проста мутација, која је заступљена у бинарној репрезентацији решења (слика 62), (*Spears, De Jong, 1991, стр. 234*). Код прости мутације сваки ген у хромозому има могућност да промени своје стање из 0 у 1 или обрнуто према вероватноћи дефинисаној коефицијентом P_m . Из тог разлога број мутација унутар хромозома није фиксан. За дужину хромозома k , просечно ће $P_m * k$ гена бити промењено.



Слика 62. Мутација – насумично изабрани, други, трећи и осми бит мутирају
Извор: Ауторска илустрација према *Spears, De Jong*, 1991

Постоји могућност да унутар популације све јединке имају исто стање гена на истом месту унутар хромозома и ти гени се називају „залеђени гени“ (енг. *frozen genes*), (*Beasley et al.*, 1993, стр. 63). Проблем код залеђених гена је тај што се не могу променити ни након селекције и укрштања, јер уколико оба родитеља имају исти ген на истом месту и дете ће имати исти ген на истом месту. Ова појава доводи до сужене претраге за оптималним решењем, те преране конвергенције уколико генетски алгоритам западне у локалне екстреме. Мутација је одличан начин да се овај проблем избегне, јер једина омогућава промену залеђеног гена пре процеса селекције и укрштања. Постоји могућност при којој се коефицијент мутације може повећати за случајеве замрзнутих гена, што додатно побољшава квалитет генетског алгоритма.

4.3.7 Услов заустављања

Након дефинисања почетне популације, генетски алгоритам врши операторе селекције, укрштања и мутације и понавља их све док је (*Borak*, 2009, стр. 23):

- достигнут максималан број генерација;
- превелика сличност јединки у популацији;
- најбоља јединка поновљена одређен број пута;
- достигнуто унапред задато оптимално решење;
- доказана оптималност најбоље јединке (ако је то могуће);
- ограничено време извршавања генетског алгоритма;
- инициран прекид од стране корисника итд.

4.4 Вишекритеријумска оптимизација

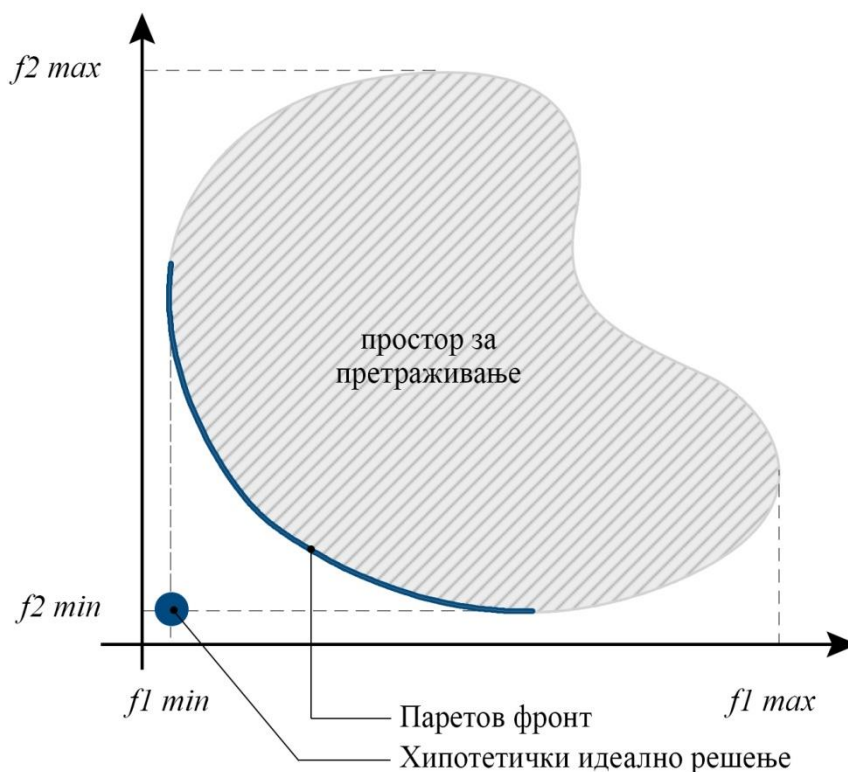
Вишекритеријумска оптимизација је метод по којем се решавају проблеми са две или више функције циља. Функције циља могу имати исте тенденције, те да побољшање фактора фитнеса јединке, повољно утиче на обе функције циља. Овакав приступ најчешће није случај у пракси, него функције циља имају опречне тенденције, те побољшавање фактора фитнеса јединке да одговара првој функцији циља, неповољно утиче на другу и обрнуто. У оваквом случају неопходно је доћи до прихватљивог, односно оптималног решења, које ће бити добро за обе функције, али неће бити најбоље ни за једну понаособ.

Стратегија која објашњава овај приступ настала је средином двадесетог века и назива се „Теорија игара“ (енг. *game theory*). Иако је објашњена на примеру економије, принцип је применљив и на друге науке. Према овој теорији, одлуке свих учесника који имају одређени циљ стварања профита, зависе од одлука других учесника (Myerson, 1991, стр. 37). Ситуација у којој су сви учесници задовољни својом позицијом иако нужно није најбоље решење за неке или све учеснике, се назива „Нешов еквилибријум“ (енг. *Nash equilibrium*), (Myerson, 1991, стр. 88), према Џону Форбсу Нешу (*John Forbes Nash*) који га је изложио 1951. године на Универзитету Принстон. Врста Нешовог еквилибријума, која је посебно присутна током вишекритеријумске оптимизације се назива „Паретов оптимум“ (енг. *Pareto optimum*), (Dimcic, 2011, стр. 97).

4.4.1 Паретов оптимум

Паретов оптимум је принцип по којем се приказују оптимална решења у вишекритеријумској оптимизацији за две или више опречне функције циља. Назив је добио по италијанском економисти Вилфреду Парету (*Vilfredo Federico Damaso Pareto*), који је овај принцип презентовао почетком двадесетог века (*Chinchuluun*, 2008). Паретов оптимум се најчешће користи за две функције циља, али сличан принцип се може применити и за три или више функције циља. У простору претраге за две опречне функције циља f_1 и f_2 , налази се скуп

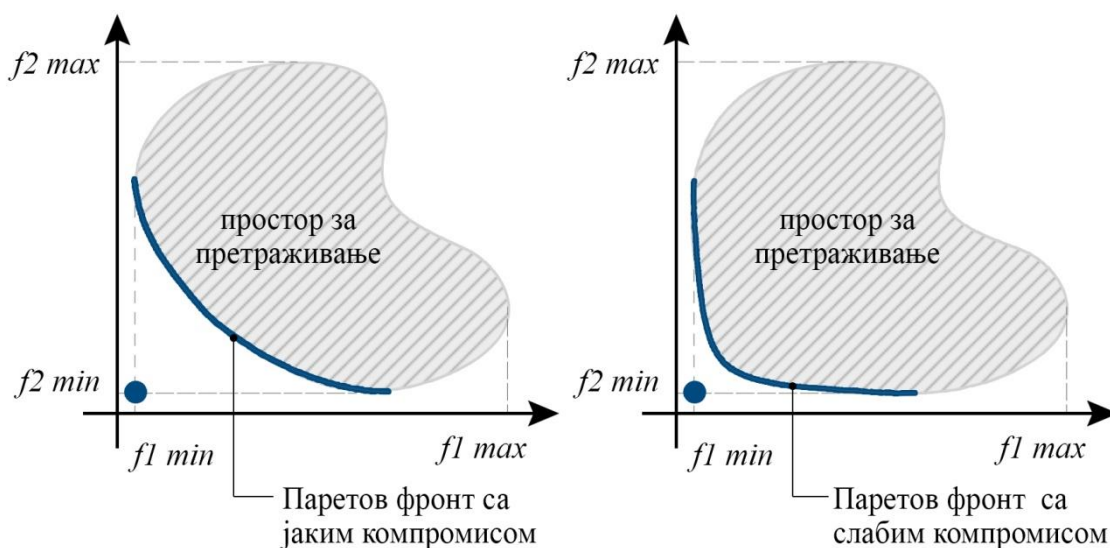
оптималних решења који прихватљив и за једну и за другу функцију. Оваква решења се називају „Паретовим ефикасним решењима“ (енг. *Pareto efficient solutions*), а заједно формирају имагинарну линију која се назив „Паретов фронт“ (енг. *Pareto frontier*), (слика 63), (Dimcic, 2011, стр. 97).



Слика 63. Паретов фронт оптималних решења.

Извор: Ауторска илустрација према Dimcic, 2011

Није могуће пронаћи решења која су оптималнија од оних које се налазе на Паретовом фронту. Паретова оптимална решења се сматрају доминантним у односу на решења изван Паретовог фронта, док се два решења која се налазе на Паретовом фронту међусобно не сматрају доминантним. Паретов фронт може бити са јачим или слабијим „компромисом“ (енг. *trade-off*), у зависности од удаљености тачака које чине решења на фронту од идеалног решења (слика 64), (Dimcic, 2011, стр. 98). Током генетског алгоритма, решења се из генерације у генерацију приближавају Паретовом фронту, до тренутка формирања Паретовог фронта са скупом оптималних решења.



Слика 64. Паретов фронт са јаким (лево) и slabим компромисом (десно)

Извор: Ауторска илустрација према *Dimcic*, 2011

4.5 Предности и недостаци генетског алгорита

Предности генетског алгорита.

Основна предност генетског алгорита је паралелно тестирање решења у више праваца. У класичним претраживачким методама, уколико резултат даје само локално оптимално решење, програм мора да крене са претрагом испочетка. Генетски алгорита са друге стране има могућност да у таквом случају усмери претрагу у неком другом смеру у циљу проналажења глобалног оптималног решења.

Значајна предност генетског алгорита је и могућност претраге енормно великог броја решења. Класичним методама рачунарима би за претрагу оптималног решења у истом претраживачком простору требало и по неколико година. Генетски алгорита оптимизује време, тако што на паметан начин бира решења која треба тестирати.

Предност генетског алгорита је што подржава рад са комплексним функцијама фитнеса, које се могу мењати током времена, дајући оптимална решења из више Паретових фронтова.

Финално, предност генетског алгоритма је и његова могућност да манипулише са више параметара одједном. Ово својство омогућава приказ већег броја добрих и оптималних решења, различитих по изгледу хромозома.

Недостаци генетског алгоритма.

*Преурањена конвергенција** је најчесталији проблем код простог генетског алгоритма. Појава се дешава када јединке са релативно добрим генетским материјалом, али не и најбољим, превладавају у популацији. Генетски алгоритам сужава претрагу комбинацијом ових решења, која доводе до локалног екстрема, али не може доћи до глобалног екстрема - оптималног решења, јер је у процесу селекције изгубио добар генетски материјал. Ово се дешава првенствено због рулет-селекције, јер јединке са добрим фактором фитнеса имају много веће шансе да се одаберу за укрштање и креирање наредних генерација, а врло брзо се елиминишу оне са slabим фитнес фактором иако је могуће да оне поседују добар, чак неопходан генетски материјал за креирање оптималног решења. Селекција и укрштање у популацији која има исте јединке не даје ефекта, јер производи исте потомке. Овај проблем једино може да реши мутација, с тим што њен коефицијент треба бити пажљиво одабран, јер у случају малог коефицијента, мутиране јединке ће врло брзо поново бити избачене рулет-селекцијом, а самим тим ће поново нестати добри гени, док у случају великог коефицијента, цео процес генетског алгоритма постаје много ближи неконтролисаној насумичној претрази.

Спора конвергенција је проблем који настаје у каснијим генерацијама, где сва решења у популацији почињу да личе једна на друга, а разлике у фитнес фактору између најбоље јединке и осталих су врло мале. У том случају градијент који дефинише функција циља је превише мали, да би генетски алгоритам дошао до оптималног решења.

**Конвергенција је процес постепеног приближавања тачки у простору или времену, различитих или сродних мишљења или вредности (Kirk, 2007, стр. 15).*

5. КРЕИРАЊЕ ХИПОТЕТИЧКИХ МОДЕЛА

На основу закључака добијених из теоријског дела, други део истраживања се бави креирањем оптималних хипотетичких модела пословног објекта са параметарски променљивом фасадом и испитивањем њихових енергетских својстава. Испитивање се врши компјутерском симулацијом, а очекује се добијање конкретних резултата. С обзиром на чињеницу да на подручју Београда нема изведених објеката са параметарски променљивом фасадом, компјутерска симулација на хипотетичком моделу је једини метод за испитивање својстава енергетске ефикасности.

Како би се једноставније сагледала комплексна проблематика истраживања, методологија је систематизована и подељена на три фазе:

Фаза „А“ – Креирање окружења у којем ће се наћи хипотетички модели,

Фаза „Б“ – Креирање хипотетичких модела и

Фаза „В“ – Енергетске симулације хипотетичких модела.

Фазу „А“ чини креирање виртуелног окружења са условима што прецизнијим реалном свету, како би енергетске симулације приказале што тачније резултате. У креирање окружења спадају одабир локације, оријентација хипотетичког модела и дефинисање климатских услова. Посебно је значајно и адекватно успостављање режима коришћења простора, које одговара намени пословног објекта. Финално, неопходно је креирати и основну структуру хипотетичких модела (стубове, зидове, таванице и кров) са реалним физичким и термичким својствима материјала, као и параметарски променљиве елементе прозора и сенила, који ће бити део фасада. Сви процеси из ове фазе се врше у Ревиту.

Фазу „Б“ чини креирање параметарски променљивих фасада, који заједно са структуралним елементима из прве фазе формирају хипотетичке моделе. У Дајнаму се дефинишу матрица фасаде, променљиви параметри са својим граничним вредностима и функције циља неопходне за процес оптимизације.

Креирају се основни хипотетички модели М1, М2 и М3 који имају минималне, максималне и средње вредности параметара. Након тога, у Рефинерију се врши оптимизација фасаде употребом генетског алгоритма за количину осветљења. На основу добијених резултата, бирају се оптимална решења која формирају хипотетичке моделе О1 и О2. Од оптималног хипотетичког модела О1 се креирају два нова алтернативна решења, зарад додатног унапређења енергетских својстава. Алтернатива А1 је хипотетички модел О1 са додатим фиксним сенилима. Финално се у Рефинерију врши оптимизација сенила модела А1 употребом генетског алгоритма за количину осветљења. На основу добијених резултата, бира се оптимално решење које формира хипотетички модел А2. Ова фаза се завршава упоређивањем физичких својстава свих хипотетичких модела.

Фазу „В“ чине енергетске симулације свих хипотетичких модела и упоређивање добијених резултата. Модели се тестирају за количину потрошње годишње и месечне финалне енергије за грејање и хлађење, као и за количину енергије која је потребна објекту да одржава унутрашње пројектоване температуре, током најхладнијег и најтоплијег периода у години. Финално, модели се тестирају за емисију угљен-диоксида. Све симулације се врше у Ревиту и Грин Билдинг Студију.

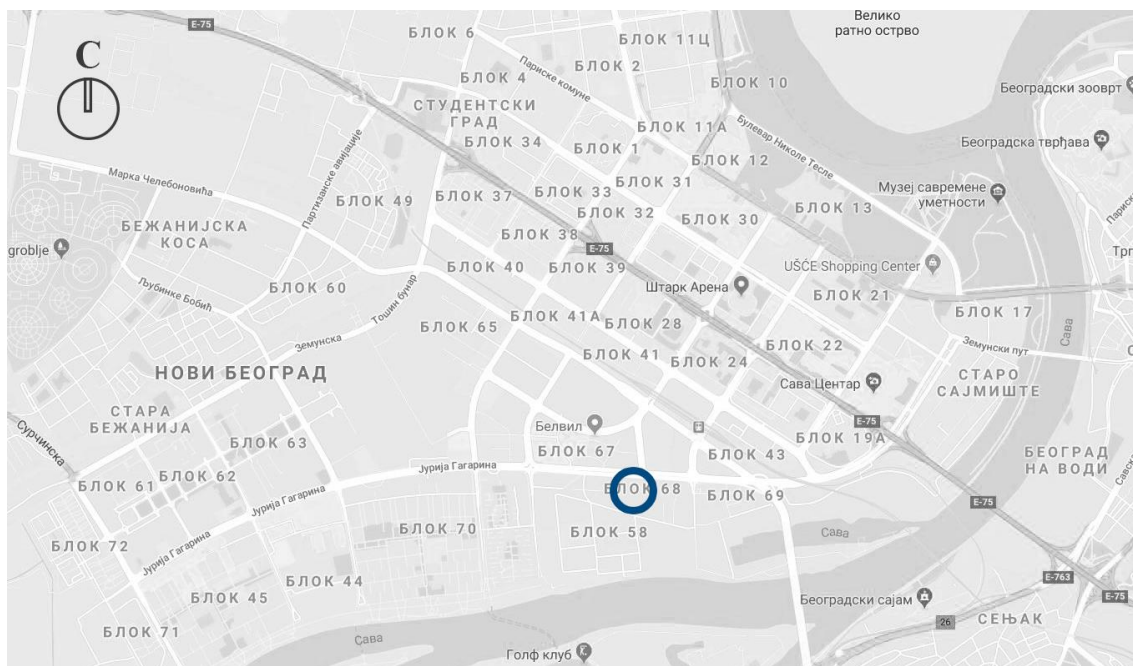
Детаљан шематски приказ методологије истраживања приказан је у табели 10.

Табела 10. Методологија истраживања

ФАЗА	ПРОЦЕС	ПРОГРАМ
А	1. Креирање окружења	
	Локација и оријентација	Ревит
	Климатски услови	
	Режим коришћења простора	
	2. Креирање хипотетичког модела структуре објекта	
	Креирање структуралних елемената објекта	Ревит
	Креирање фасадног елемента	
Б	1. Креирање хипотетичких модела фасаде	
	Креирање матрице фасаде	Дајнамо
	Дефинисање функције циља	
	Дефинисање променљивих параметара фасаде	
	2. Оптимизација фасаде употребом генетског алгоритма	
	Креирање основних модела М1, М2 и М3	Ревит
	Креирање оптималних модела О1 и О2	Рефинери
	3. Креирање алтернативних хипотетичких модела фасаде	
	Креирање модела са фиксним сенилима А1	Ревит
	Дефинисање функције циља	Дајнамо
	Дефинисање променљивих параметара сенила	
	4. Оптимизација сенила употребом генетског алгоритма	
	Креирање оптималног модела А2	Рефинери
	5. Упоредивање физичких карактеристика свих хипотетичких модела	
В	1. Енергетске симулације свих хипотетичких модела	
	Трансмисиони топлотни губици кроз омотач зграде	Дајнамо
	Годишња финална енергија за грејање и хлађење објекта	Грин Билдинг Студио
	Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта	
	Количина енергије потребна за одржавање пројектних температура	Ревит
Количина емисије угљен диоксида	Грин Билдинг Студио	

5.1 Избор локације и оријентација

Хипотетички модел објекта је неопходно позиционирати на реалној локацији како би се могао сагледати тачан утицај оријентације, односно изложености фасада сунчевом зрачењу. Објекат је позициониран као слободностојећи на равној парцели, без могућности заклањања од стране других објеката. Фактори окружења као што су нагиб терена или близина других зграда, могу негативно утицати на тачност резултата енергетских симулација, те су намерно изостављени. Локација која подржава овакве карактеристике се може наћи на неизграђеној парцели у Улици Јурија Гагарина, у Блоку 68, на општини Нови Београд (слика 65).



Слика 65. Позиција хипотетичког модела на територији општине Нови Београд.
Подлога преузета са <https://www.google.com/maps>

Тачна локација је одабрана на основу увида у распоред пословних објеката у окружењу, добре саобраћајне повезаности са другим деловима града, као и других фактора детаљно анализираних у првом поглављу овог истраживања.

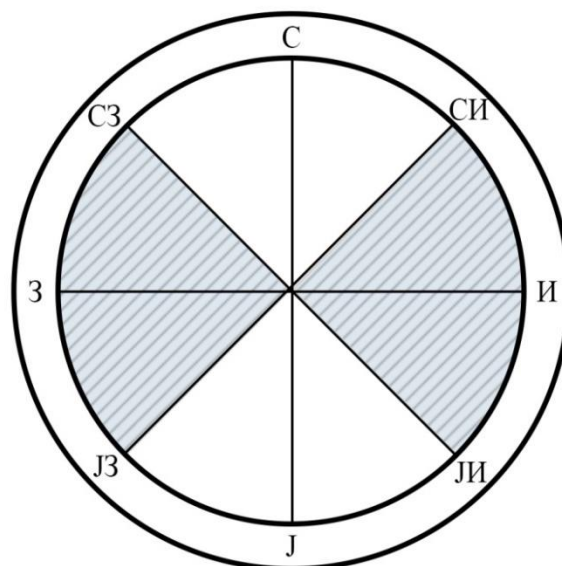
Оријентација површине која прима сунчево зрачење, одређује се нагибним углом и азимутом. Нагибни угао је угао између пријемне површине и

хоризонталне равни и креће се од 0° до 180° . Сви анализирани хипотетички модели имају вертикалне стране, односно нагиб 90° . Азимут површине који прима сунчево зрачење дефинисан је углом између нормале на пријемној површини и јужне оријентације. Површине оријентисане ка западу имају позитиван азимут, док оне оријентисане ка истоку имају негативан (ASHRAE, 2009), (табела 11).

Табела 11. Оријентација и азимут објекта, мерено од јужне оријентације. Извор ASHRAE, 2009

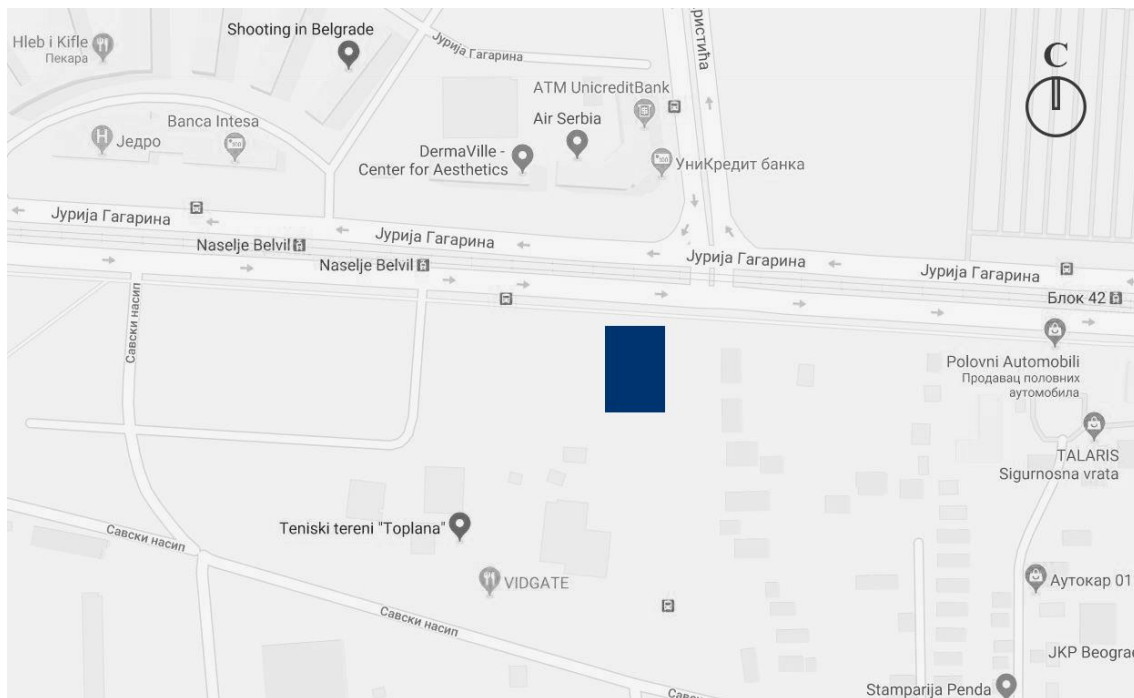
Оријентација	С	СИ	И	ЈИ	Ј	ЈЗ	З	СЗ
Азимут површине	180	-135	-90	-45	0	45	90	135

Оријентација фасадних зидова се дефинише према претежној оријентацији ка једној од четири стране света - исток, запад, север и југ (Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011), (слика 66).



Слика 66. Означавање оријентације објекта.
Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011

На основу увида у ове податке, закључује се да хипотетички објекат има јужну оријентацију, са нагибним углом од 90° и азимутом од 0° (слика 67).



Слика 67. Позиција на парцели и оријентација хипотетичког модела.
Подлога преузета са <https://www.google.com/maps>

5.2 Климатске карактеристике значајне за енергетску анализу

Хипотетички модел се тестира у виртуелним условима, који симулирају реалне временске прилике за град Београд. Тачни подаци су од пресудног значаја за добијање прецизних резултата енергетских симулација. Програм аутоматски преузима све неопходне информације из хидрометеоролошке станице која је најближа одабраној локацији.

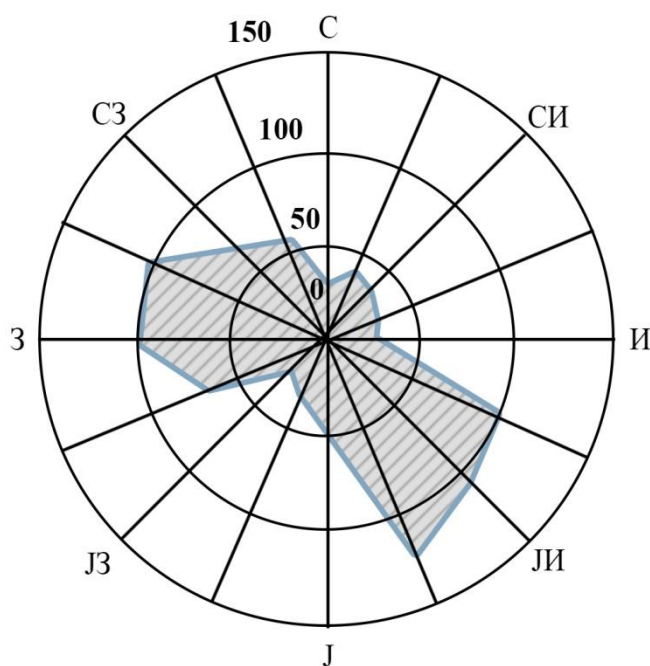
Београд се налази на $44^\circ 48'$ северне географске ширине, $20^\circ 28'$ источне географске дужине и просечној надморској висини 132 m. Према подацима Републичког хидрометеоролошког завода, клима у Београду је умерено континентална, са просечном температуром од $12,5^\circ\text{C}$ (табела 12).

Табела 12. Средње месечне, годишње и екстремне вредности од 1981-2010. године.
Извор: Републички хидрометеоролошки завод

Месец	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Температура [°C]													
Средња максимална	4,6	7,0	12,4	18,0	23,5	26,2	28,6	28,7	23,9	18,4	11,2	5,8	17,4
Средња минимална	-1,1	-0,1	3,7	8,3	13,0	15,8	17,5	17,6	13,5	9,0	4,2	0,2	8,5
Нормална вредност	1,4	3,1	7,6	12,9	18,1	21,0	23,0	22,7	18,0	12,9	7,1	2,7	12,5
Апсолутни максимум	20,7	23,9	28,8	32,2	34,9	37,4	43,6	40,0	37,5	30,7	28,4	22,6	43,6
Апсолутни минимум	-18,2	-15,4	-12,4	-3,4	2,5	6,5	9,4	6,7	4,7	-4,5	-7,8	-13,4	-18,2
Средњи бр. мразних дана	18	14	5	0	0	0	0	0	0	0	5	15	58
Средњи бр. тропских дана	0	0	0	0	2	7	12	12	3	0	0	0	36
Релативна влага [%]													
Просек	78	71	63	61	61	63	61	61	67	71	75	79	68
Трајање сијања сунца													
Просек часова	72,2	101,7	153,2	188,1	242,2	260,9	290,8	274,0	204,3	163,1	97,0	64,5	2111,9
Број ведрих дана	3	5	5	4	5	6	11	12	8	7	4	3	75
Број облачних дана	14	10	9	8	6	5	4	3	6	7	11	15	99
Падавине [mm]													
Средња месечна сума	46,9	40,0	49,3	56,1	58,0	101,2	63,0	58,3	55,3	50,2	55,1	57,4	690,9
Макс. дневна сума	33,2	39,1	36,8	64,2	56,4	94,0	80,1	75,6	41,9	43,7	51,8	39,9	94,0
Ср. бр. дана ≥ 0.1 mm	13	12	11	13	13	13	10	9	10	10	12	14	139
Ср. бр. дана ≥ 10.0 mm	1	1	1	2	2	3	2	2	2	2	2	2	21
Појаве [број дана са....]													
снегом	10	7	4	1	0	0	0	0	0	0	3	8	33
снежним покривачем	13	10	4	0	0	0	0	0	0	0	3	10	39
маглом	5	3	1	1	0	0	0	0	0	2	4	6	24
градом	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Према подацима Републичког хидрометеоролошког завода, најхладнији месец је јануар, са просечном температуром $1,4^{\circ}\text{C}$, а најтоплији месец је јул, са просечном температуром 23°C . Највише мразних дана има у децембру, јануару и фебруару, док су тропске температуре највише заступљене у јулу и августу. Средњи атмосферски притисак у Београду је 1.001 mb , а средња релативна влажност ваздуха је 68% . У просеку има $2111,9$ сунчаних сати годишње. Сунчеве светлости има највише у јуну, јулу и августу, око 10 сати дневно, док су децембар и јануар познати као најоблачнији са око $2,3$ сунчана сата дневно. На Београд и околину годишње падне просечно $690,5\text{ mm}$ кише. Најкишовитији месец је јун. У Београду, у просеку има 39 снежних дана годишње.

За Београд је карактеристичан источни и југоисточни ветар – кошава, који доноси ведро и суво време и најчешће дува током јесени и зиме (слика 68). Просечна брзина кошаве је око 3 m/s , али у појединим ударима може достићи и десет пута већи интензитет.



Слика 68. Ружа ветрова за град Београд. Извор: Републички хидрометеоролошки завод

Средње брзине ветра и интензитет ветра по правцима приказани су у табели 13.

Табела 13. Релативне честине ветра по правцима и тишине у промилима и средње брзине ветра у m/s 1981-2010. год. Извор: Републички хидрометеоролошки завод

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
Релативне честине (%)	25	38	31	28	25	97	105	121	44	32	22	65	99	106	66	55
Средње брзине (m/s)	2,3	2	2	1,9	2,4	3,1	3	2,9	2,2	1,8	1,7	2	2,2	2,3	2,3	2,3

Према Правилнику о енергетској ефикасности зграда (2011), климатске карактеристике локације на основу којих се израђује елаборат енергетске ефикасности су спољне пројектоване температуре градова у републици Србији (-12,1°C за град Београд), број степен дана грејања (2520 за град Београд), средња температура грејног периода (5,6°C за град Београд), број дана грејне сезоне (175 за град Београд), средње суме сунчевог зрачења и средње месечне температуре спољашњег ваздуха. У обзир се узима и утицај ветра на објекат. Унутрашња пројектна температура је 20°C за зимски и 26°C за летњи период године. Проветравање кроз транспарентни омотач зграде предвиђено је са 0,5 измена ваздуха на сат (табела 14).

Табела 14. Климатски пројектни подаци за Београд и утицај ветра на зграду. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011

Климатски подаци за град Београд	
Спољна пројектна температура [°C]	-12,1
Број степен дана грејања <i>HDD</i>	2520
Број дана грејне сезоне <i>HD</i>	175
Средња температура грејног периода [°C]	5,6
Унутрашња пројектна температура за зимски период [°C]	20
Унутрашња пројектна температура за летњи период [°C]	26
Проветравање / број измена ваздуха [h ⁻¹]	0,5
Утицај ветра	
Положај (изложеност ветру)	Умерено заклоњен
Број фасада изложених ветру	Више од једне фасаде

Вредности месечне средње температуре и број степен дана грејања за град Београд који се користе при прорачуну потребне енергије за грејање, дати су у табели 15 (Правилник о енергетској ефикасности зграда 2011).

Табела 15. Средња месечна температура спољашњег ваздуха и број степен дана за грејање за град Београд. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011

Месец	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Зима
Средња месечна температура [°C]	0,9	3,0	7,3	12,5	17,6	20,6	22,3	22,0	17,7	12,7	7,2	2,6	5,6
HDD (2520)	585	458	370	102	0	0	0	0	0	101	373	531	

Вредности средњих сума сунчевог зрачења, који се користе при прорачуну директних соларних добитака топлоте, за све локације на територији Републике Србије, дати су у табели 16 (Правилник о енергетској ефикасности зграда 2011).

Табела 16. Средње суме сунчевог зрачења. Извор: Правилник о енергетској ефикасности зграда, 2011

Месец	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Зима
Хоризонт. површина [kWh/m ²]	42,75	60,35	103,86	133,65	170,43	181,23	192,83	170,43	127,58	88,94	45,50	33,87	398
Југ [kWh/m ²]	64,25	76,98	96,43	86,73	86,28	81,43	90,31	99,43	107,38	109,22	66,52	52,80	455
Исток, запад [kWh/m ²]	32,57	55,35	79,80	96,05	112,9	116,78	125,22	114,37	91,32	67,21	34,67	25,53	310
Север [kWh/m ²]	17,42	22,38	36,04	44,64	55,69	56,88	58,27	52,83	38,78	29,16	17,93	14,31	145

5.3 Режим коришћења простора

Креирање окружења обухвата и дефинисање режима коришћења простора, без којег добијени резултати енергетских симулација не би били потпуни. Режим коришћења простора се односи на број људи који борави у одређеној просторији, пројектне температуре просторија за летњи и зимски период, режим коришћења вештачког осветљења, електричне опреме и слично. Ови параметри директно зависе од намене објекта, а програм има могућност подешавања овог режима на нивоу целог објекта, као и на нивоу појединачних зона и просторија. Све податке везане за режим коришћења простора програм користи као подразумеване вредности на основу истраживања америчког Одељења за енергију (*United States Department of Energy*, 2019).

Потребна снага за електричне инсталације и опрему, која је неопходна је за нормално функционисање одређених зона унутар пословног објекта, дата је у табели 17 (*United States Department of Energy*, 2019).

Табела 17. Оптерећења топлотних зона референтног пословног објекта од осветљења и опреме. Извор: *United States Department of Energy*, 2019

Оптерећење топлотних зона	Осветљење [W/m^2]	Електрична опрема [W/m^2]
Канцеларијски део (отворени план)	11,84	16,15
Технички део	13,99	2,15

Подаци о људској активности, такође су дефинисани у режиму коришћења простора. Програм поседује податке о топлотном оптерећењу добијеном од људске активности, као и податке који се односе на потребну површину по кориснику простора и количину свежег ваздуха по кориснику простора (табела 18), (*United States Department of Energy*, 2019). На основу ових података програм аутоматски израчунава број људи, као и заузетост у одређеним просторијама и целом објекту.

Табела 18. Подаци о људској активности. Извор: *United States Department of Energy*, 2019

Људска активност	Топлотно оптерећење од људске активности [W/особа]	Површина по особи [m ² /особа]	Количина ваздуха по особи [L/s/особа]
Канцеларијски део (отворени план)	131,88	20	2,36
Технички део	131,88	10	2,36

Режим коришћења простора дефинише и пројектне температуре унутар објекта, током радног времена (табела 19). Уколико је температура унутар објекта у неком тренутку изван пројектне, аутоматски се укључује систем за грејање и хлађење, који је активан све док се температура не врати у дозвољене границе.

Табела 19. Временски распоред унутрашње пројектне температуре за модел пословног објекта. Извор: *United States Department of Energy*, 2019

Временски распоред	Пројектна температура	08:00 – 17:00
Цео објекат	Грејање [°C]	21
	Хлађење [°C]	23

Ово истраживање се фокусира искључиво на физичку структуру објекта и његов омотач, како би се анализирао утицај фасадних елемената на количину енергије потребну за грејање и хлађење простора. Специјални услови за климатизовање, припремање топле воде и слично, нису разматрани, јер нису релевантни за пројектантску анализу утицаја параметарски моделоване фасаде на енергетске карактеристике. Међутим, како би се уопште вршиле енергетске анализе, неопходно је одабрати један од понуђених система климатизације, те је за овај случај употребљен режим који је типичан за пословне објекте, а односи се на кретање ваздуха испод завршне облоге пода и дистрибуцију топлог ваздуха кроз подне конвекторе. Слично правило важи и приликом дефинисања врсте горива, те је у овом случају одабран природни гас као основни извор.

5.4 Креирање унутрашње структуре хипотетичког модела

Правилно дефинисање структуралних елемената хипотетичког модела је кључно за добијање што прецизнијих резултата енергетских симулација. Структуралне елементе чине стубови, зидови, таванице и кров и неопходно их је креирати са свим својим механичким и термичким својствима. Међутим, објекат треба конципирати тако да ови елементи минимално утичу на енергетска својства, како би резултати енергетских симулација, у највећој мери зависили од различитих изгледа параметарски променљивих фасада. Из тог разлога дефинише се само један тип унутрашње структуре пословног објекта, док ће разлика између хипотетичких модела бити искључиво на фасадама. На овај начин је унутрашња структура модела независна, што потенцијално омогућава примену методологије овог истраживања на било коју другу форму објекта.

Основни габарит објекта је дефинисан према свеобухватном истраживању америчког „Одељења за енергију“ (*United States Department of Energy*), (*Deru et al.*, 2011), у недостатку јасно дефинисаних референтних примера пословних објеката на територији Републике Србије. За референтни модел, одабран је пример пословног објекта средње величине, који је дефинисан као објекат од 3 спрата, укупне површине 4.982 m² и спратном висином од 3,96 метара. Однос странице у основи оријентисане правцем север-југ, у односу на страницу оријентисану правцем исток-запад је 1,5. Укупни удео застакљења на свим фасадама је 33% (табела 20).

Табела 20. Карактеристике референтног модела пословног објекта средње величине. Извор: *Deru et al.*, 2011

Површина [m ²]	Однос страница у основи	Број спратова	Спратна висина [m]	Светла висина [m]	Удео застакљења [%]
4.982	1,5	3	3,96	2,74	33

На основу локацијских услова за општину Нови Београд и референтног модела дефинисаног истраживањем америчког „Одељења за енергију“, креирана је унутрашња структура пословног објекта спратности Пр+2, димензија основе 32

метра * 48 метара, површине основе 1.536 m², односно 4.608 m² укупно за сва три спрата. Укупна површина је за 374 m² мања од референтног модела, али је овакво решење било неопходно како би се задржао однос страница у основи од 1,5, а у исто време омогућила матрица на фасади ширине 2 метра. Ова ширина матрице дозвољава да јужна и северна фасада имају по 16 поља (32 / 2), а источна и западна фасада по 24 (48 / 2). Спратна висина је заокружена на 4 метра, те је укупна висина 12 метара за сва три спрата, што је неопходно како би фасадна матрица по вертикали такође била 2 метра, односно садржала 6 поља, по два за сваки спрат (табела 21).

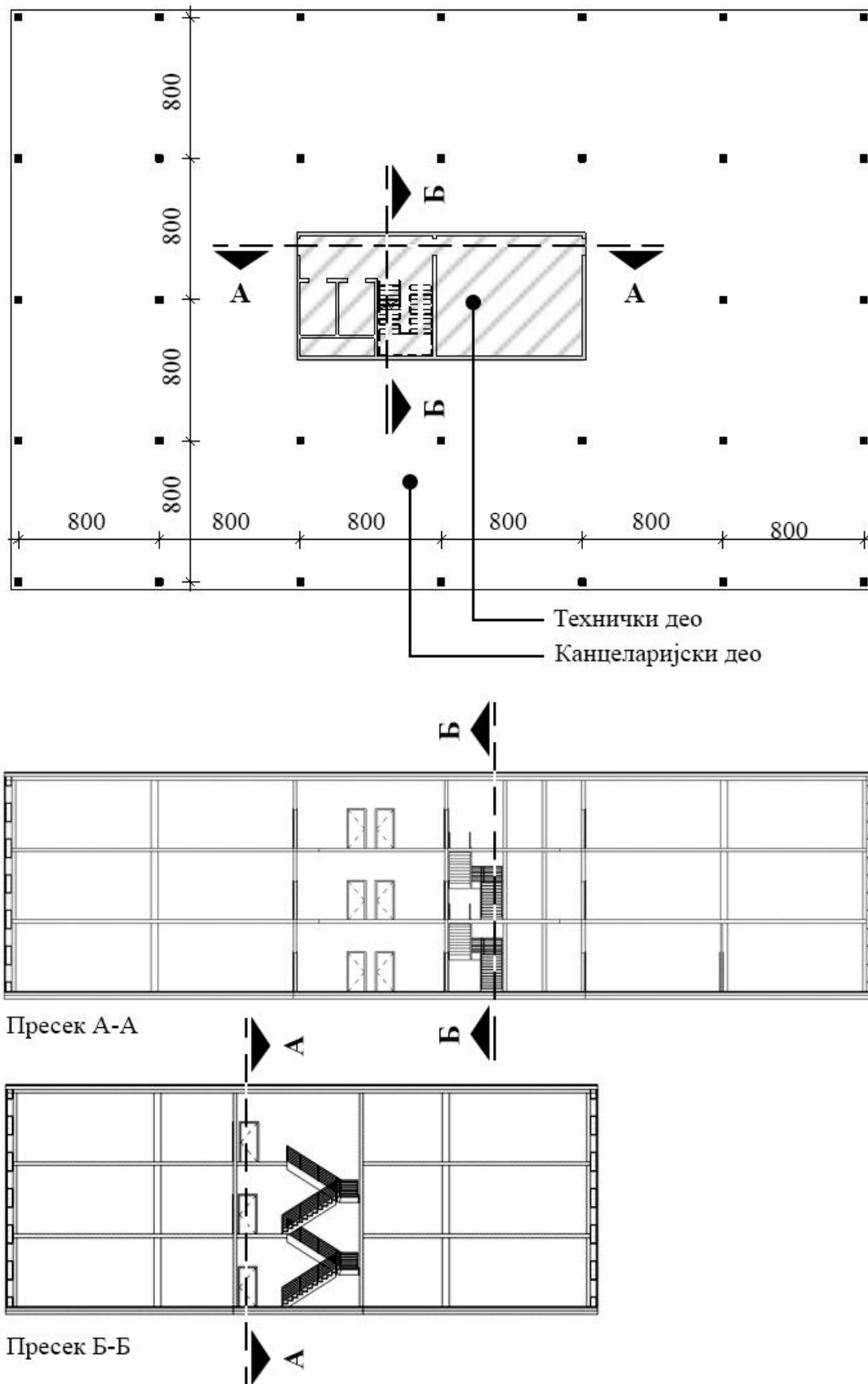
Укупно застакљење ће варирати од модела до модела, у зависности од изгледа параметарски променљивих фасада.

Табела 21. Основне карактеристике унутрашње структуре хипотетичког модела

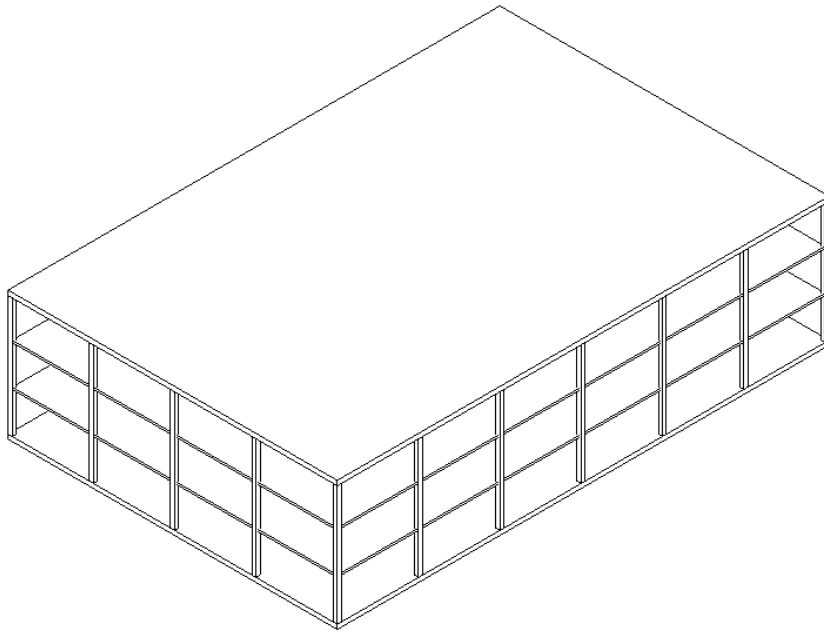
Однос страница основе	Површина основе [m ²]	Укупна површина објекта [m ²]	Површина омотача [m ²]	Површина крова [m ²]	Запремина објекта [m ³]
1,5	1.536	4.608	1.920	1.536	18.432

Број спратова	Спратна висина [m]	Светла висина [m]
3	4,0	3,4

Конструкцију објекта чини структурални склоп са армирано-бетонским стубовима димензија 40 центиметара * 40 центиметара, на међусобном растојању од 8 метара. У средини објекта се налази армирано-бетонско језгро, укупних димензија 16,4 метара * 7,2 метара, са простором предвиђеним за лифт и армирано-бетонско степениште (слика 69). Међуспратна таваница је такође армирано-бетонска, дебљине 20 центиметара, са ослањањем у оба правца, па из тог разлога нису потребне греде (слика 70). Сви армирано-бетонски елементи су марке бетона МБ30, ливени на лицу места. Унутрашњу структуру хипотетичког модела пословног објекта чине још и под, подигнут на висину од 20 центиметара од горње коте армирано-бетонске плоче за пролаз инсталација, као и плафон, спуштен на висину од 20 центиметара од доње коте армирано-бетонске плоче, такође за пролаз инсталација.

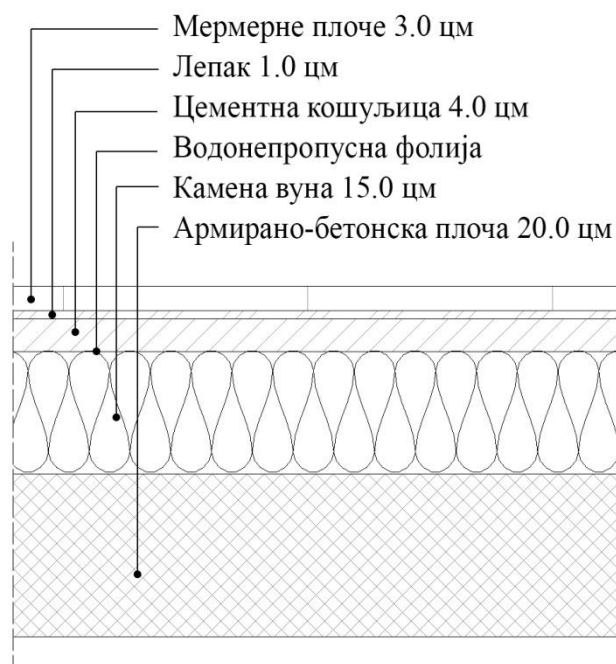


Слика 69. Основа (горе) и пресеци (доле) унутрашње структуре хипотетичког модела



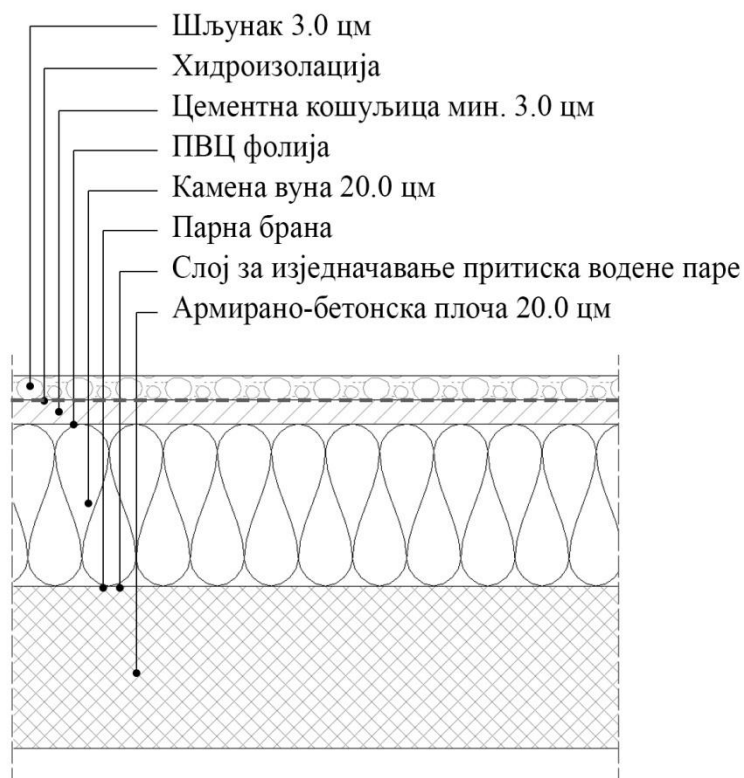
Слика 70. Аксонометријски приказ унутрашње структуре хипотетичког модела

Под на тлу се састоји од армирано-бетонске плоче дебљине 20 центиметара, термоизолације од камене вуне дебљине 15 центиметара, свих потребних фолија и мембрана, цементне кошуљице и завршне обраде од мермерних плоча на лепку (слика 71).



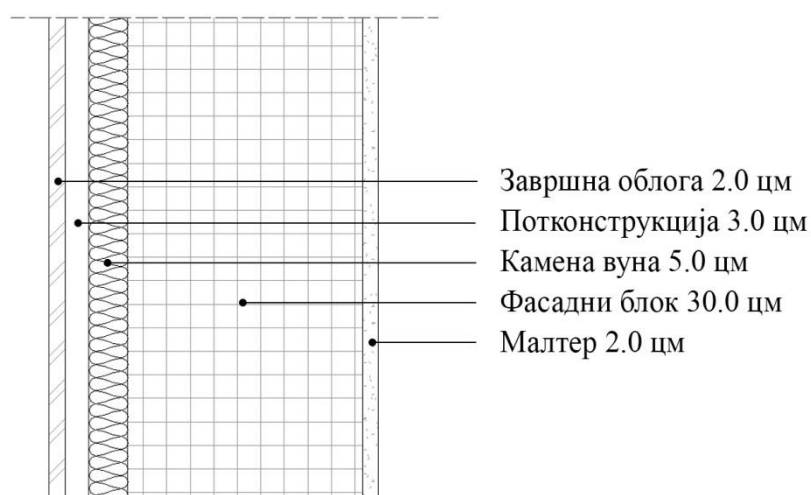
Слика 71. Слојеви пода на тлу

Раван кров се састоји од армирано-бетонске плоче дебљине 20 центиметара, термоизолације од камене вуне дебљине 20 центиметара, свих потребних фолија и мембрана, цементне кошуљице и слоја шљунка који штити хидроизолацију (слика 72).



Слика 72. Слојеви равног крова

Фасадни зид се састоји од Итонг (*YTONG*) фасадног блока дебљине 30 центиметара, термоизолације од камене вуне дебљине 5 центиметара, као и потконструкције на коју се монтира облога од керамичких панела (слика 73).



Слика 73. Слојеви фасадног зида

Грађевински материјали и елементи дефинисани су у свему према Правилнику о енергетској ефикасности зграда (2011), тако да задовољавају све прописане вредности у смислу топлотне проводљивости. Дозвољене и остварене вредности коефицијената пролаза топлоте за грађевинске елементе омотача зграде приказане су у табели 22.

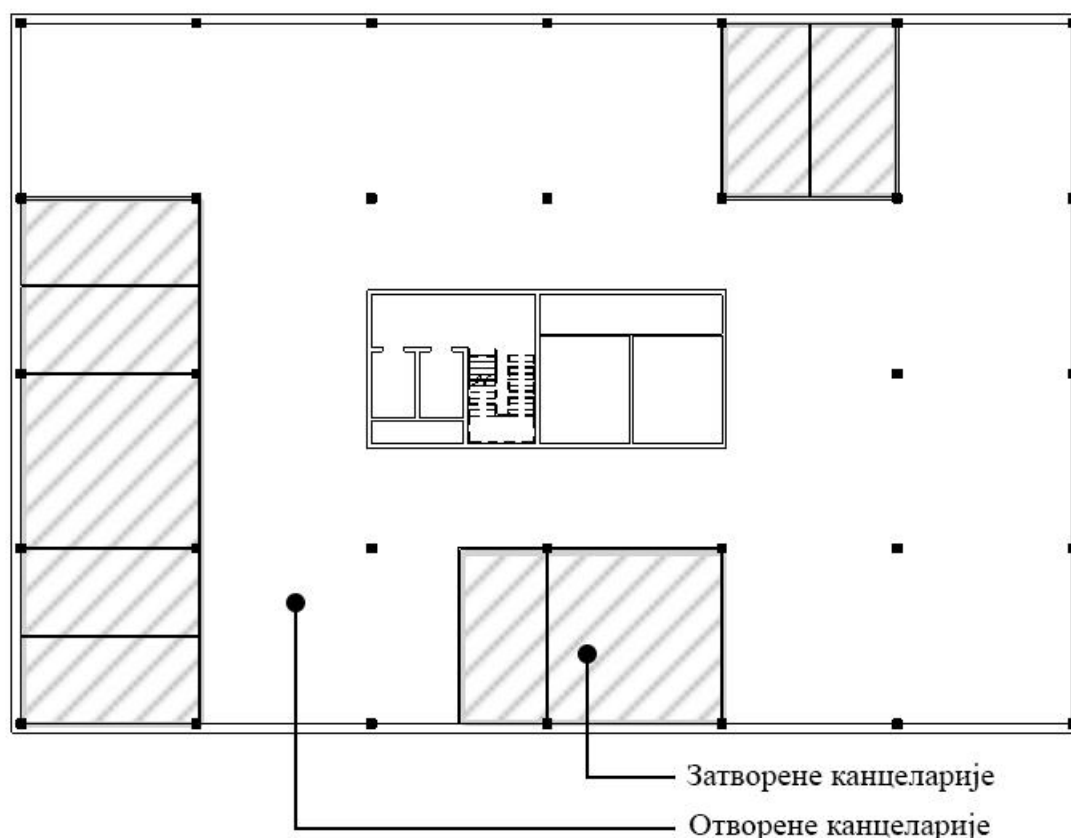
Коефицијент пролаза топлоте неког елемента програм аутоматски обрачунава на основу термичких својстава свих материјала које чине тај елемент.

Табела 22. Дозвољене и остварене вредности коефицијента пролаза топлоте за елементе омотача зграде

Грађевински елемент	Коефицијент пролаза топлоте	
	Дозвољен U_{\max} [$W/(m^2K)$]	Остварен U [$W/(m^2K)$]
Раван кров изнад грејаног простора	0,15	0,15
Под на тлу	0,3	0,19
Спољни зид	0,3	0,26
Прозори, врата	1,5	1,45

5.4.1 Организација простора

Простор унутар објекта је подељен на канцеларијски и технички део. Канцеларијски део је замишљен као отворени простор без преградних зидова тзв. „леднскејп офис“ (енг. *landscape office*), што је уобичајена пракса у савременом пословању. Међутим, матрица стубова од 8 метара * 8 метара пружа флексибилност, те омогућава преграђивање и формирање затворених канцеларија у зависности од потребе (слика 74). Преграђивање је могуће зидовима од гипс-картона или неким другим монтажним елементима.



Слика 74. Пример отвореног и затвореног канцеларијског простора

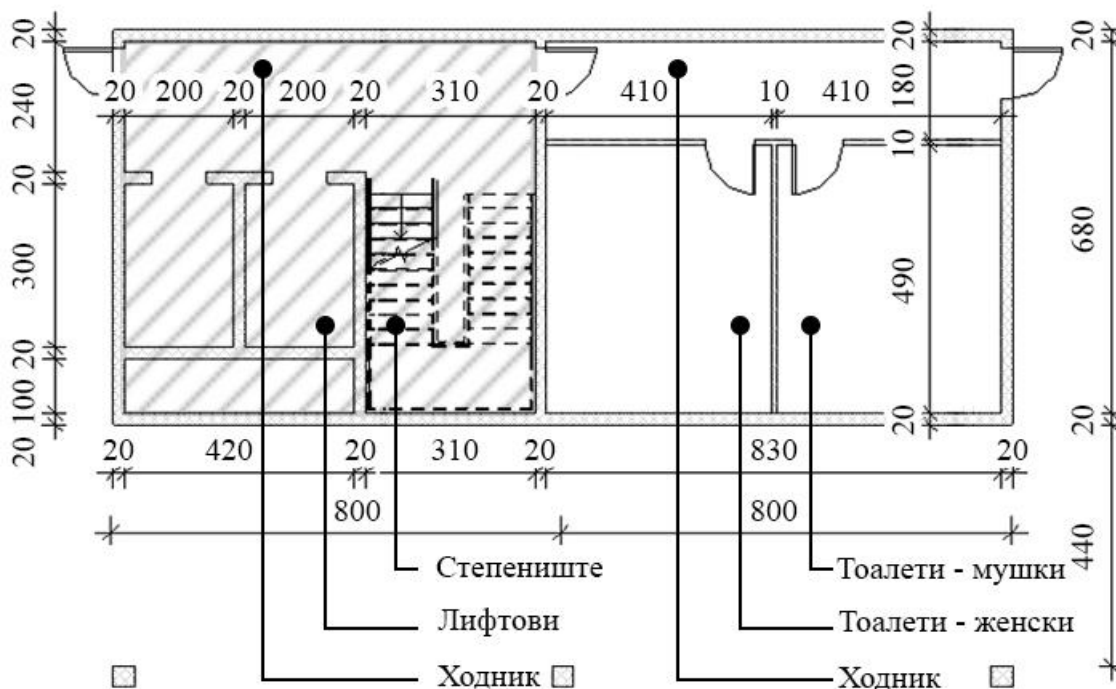
Подела канцеларијског простора мора да прати матрицу фасаде ширине 2 метра, како се не би догодио случај да преградни зид буде у колизији са прозором. Простор се може поделити на више начина: 1) цело поље матрице - канцеларијски простор је димензија 8 * 8 метара, укупно 64 m², довољно за велику канцеларију или салу за састанке; 2) половина матрице - канцеларијски простор је димензија 4

* 8 метара, укупно 32 m^2 , довољно за канцеларију или малу салу за састанке; 3) четвртина матрице - канцеларијски простор је димензија $4 * 4$ метра, укупно 16 m^2 , довољно за малу канцеларију; 4) остале величине – могуће је комбиновати било које димензије докле год су дељиве са 2, у зависности од потребе ($4 * 6$, $8 * 12$, $4 * 12$ метара и слично), (слика 75).



Слика 75. Могуће решење поделе канцеларијског простора

Технички део се налази у средини објекта и чине га простор за лифт и степениште, као и мушки и женски тоалети (слика 76).

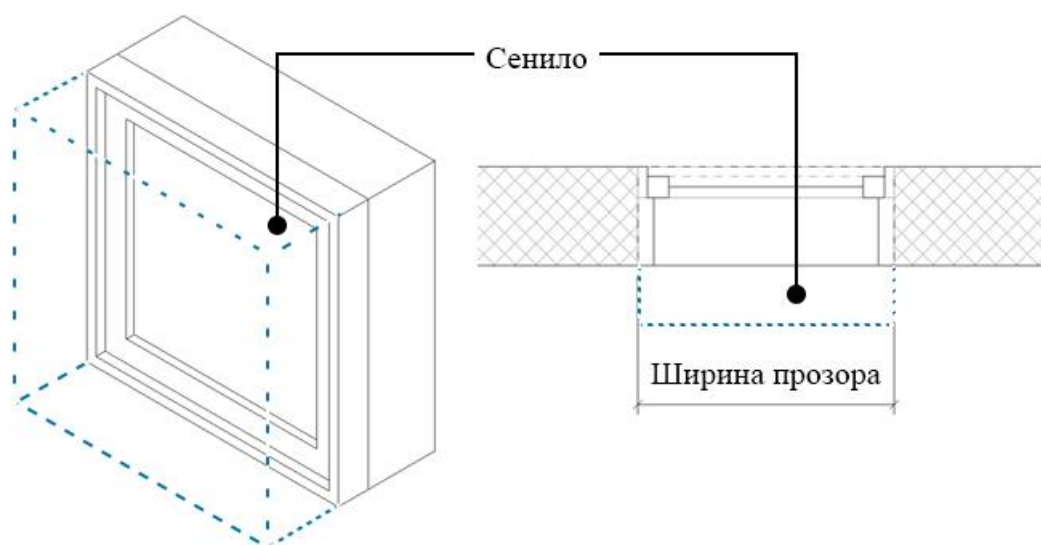


Слика 76. Технички део објекта

Како би унутрашња организација простора имала што мање утицаја на резултате енергетских симулација, канцеларијски део се анализира као отворени простор без преградних зидова и исти је за сва три спрата.

5.4.2 Креирање елемента фасаде хипотетичког модела

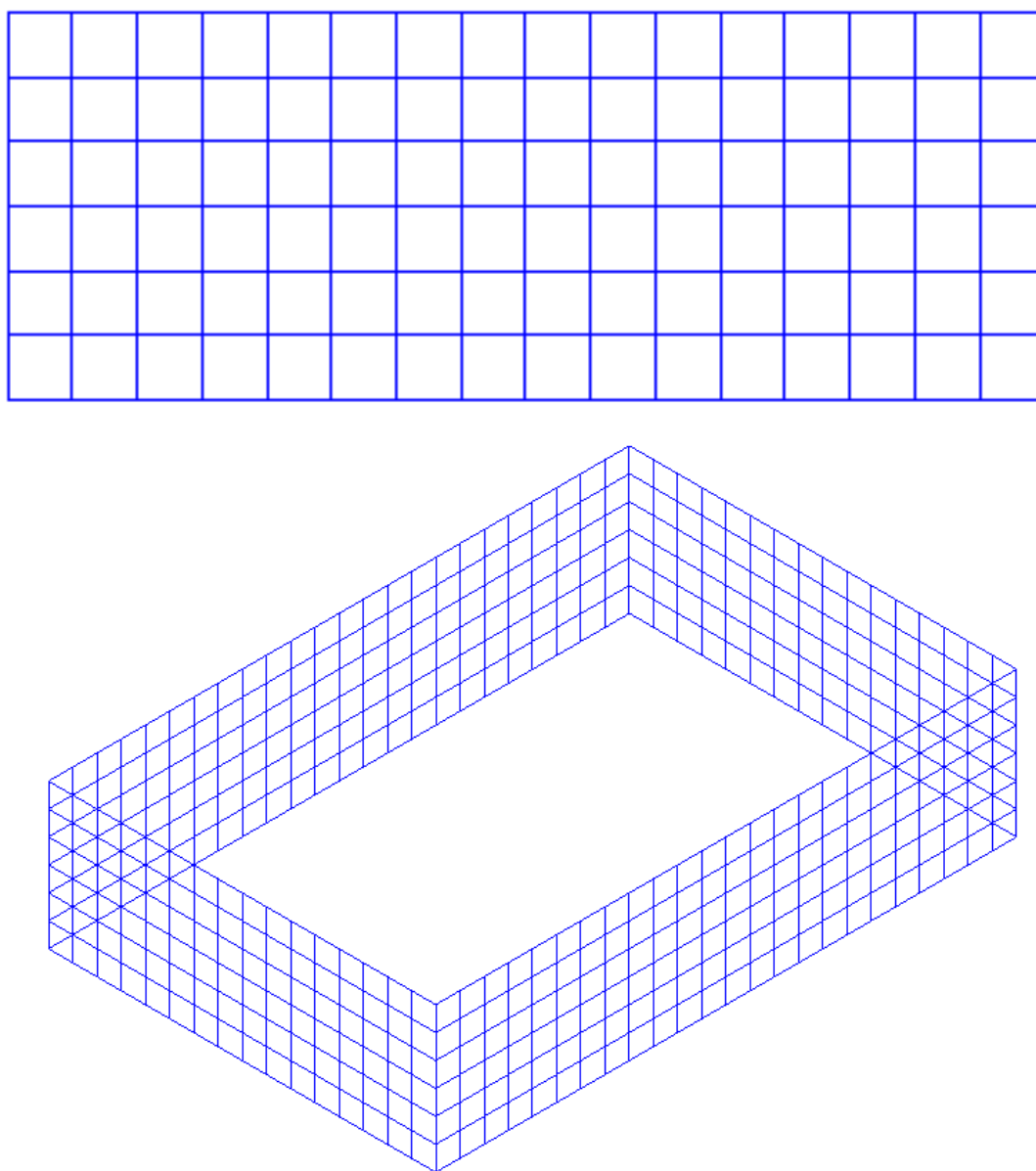
Основни фасадни елемент чини прозор алуминијумског оквира, са трослојним нискоемисионим стаклом коефицијента пролаза топлоте $U=1,45W/(m^2K)$. Фасадном елементу су додељени параметри за висину и ширину који су променљиви, али су међусобно једнаки, па димензије прозора увек задржавају пропорцију 1:1. На овај начин, величина елемента варира у зависности од резултата оптимизације. Посебно, фасадни елемент може бити са свих страна окружен сенилима, који могу бити фиксне или променљиве дужине, у циљу унапређења енергетских карактеристика објекта (слика 77).



Слика 77. Аксонометрија и попречни пресек фасадног елемента

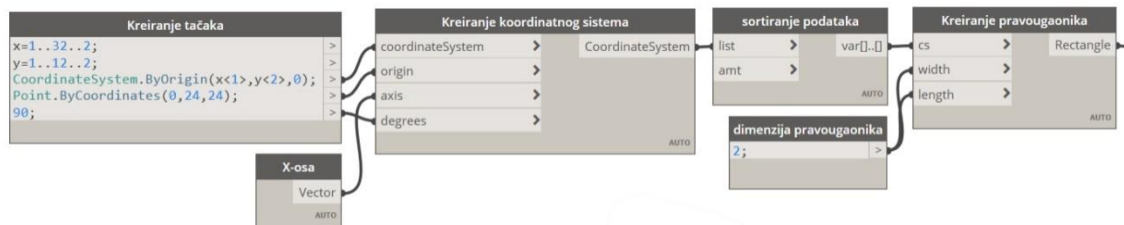
5.5 Креирање матрице фасаде

Креирање параметарске фасаде почиње успостављањем матрице коју чине 480 поља једнаке ширине и висине од два метра. Ова матрица је подељена тако да се на јужној и северној фасади уклопи по 96 поља – $16 * 6$ поља на површини фасаде од 32 метара * 12 метара; а на источној и западној фасади по 144 поља – $24 * 6$ поља на површини фасаде од 48 метара * 12 метара (слика 78). Ова матрица је дефинисана тако да се у сваком пољу позиционира по један параметарски променљив фасадни елемент, укупно 480 елемената.



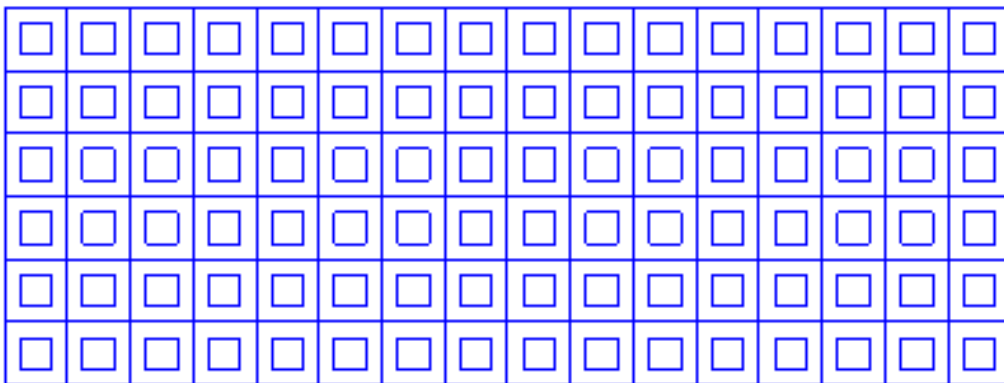
Слика 78. Изглед (горе) и аксонометријски приказ (доле) матрице фасаде

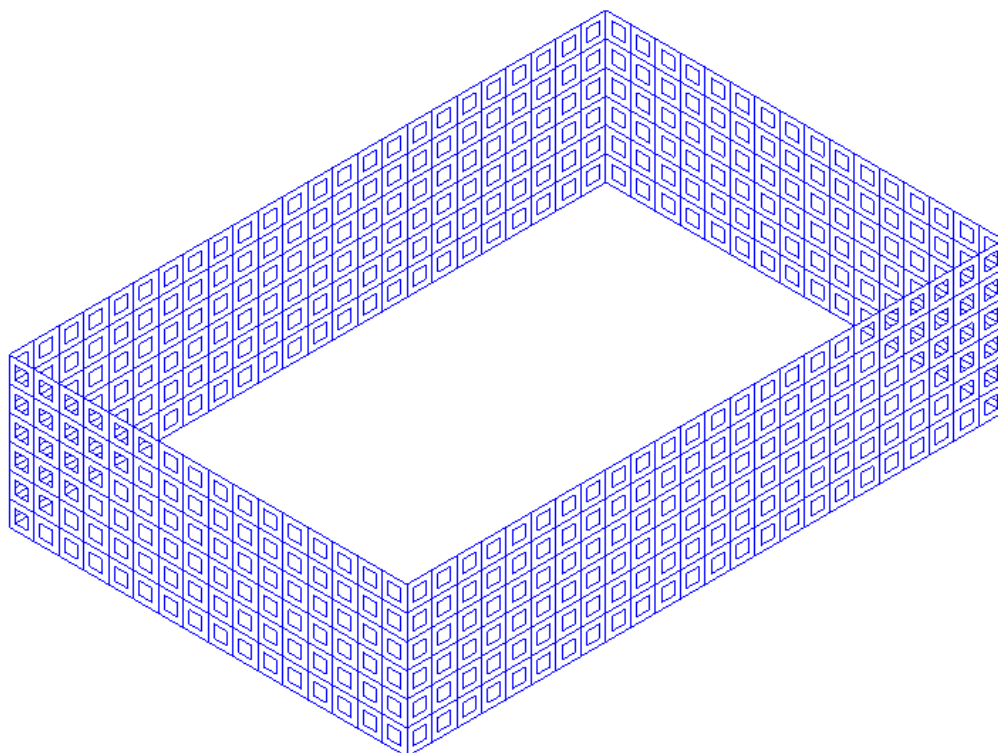
Креирање матрице се наставља дефинисањем скупа координатних тачака (16*6, укупно по 96 за јужну и северну фасаду, односно 24*6, укупно по 144 за источну и западну фасаду). Ове тачке су међусобно удаљене 2 метра по хоризонталној и вертикалној оси. Након тога се формирају правоугаоници чије су димензије 2 метра, а дефинисане тачке су центри ових правоугаоника. На овај начин се добија матрица $(2*16+2*24)*6$ поља, укупно 480 правоугаоника чије се стране међусобно преклапају (слика 79). Матрице све четири фасаде се разликују у координатама тачака које представљају центар правоугаоника, те се морају пажљиво позиционирати.



Слика 79. Креирање матрице једне од фасада

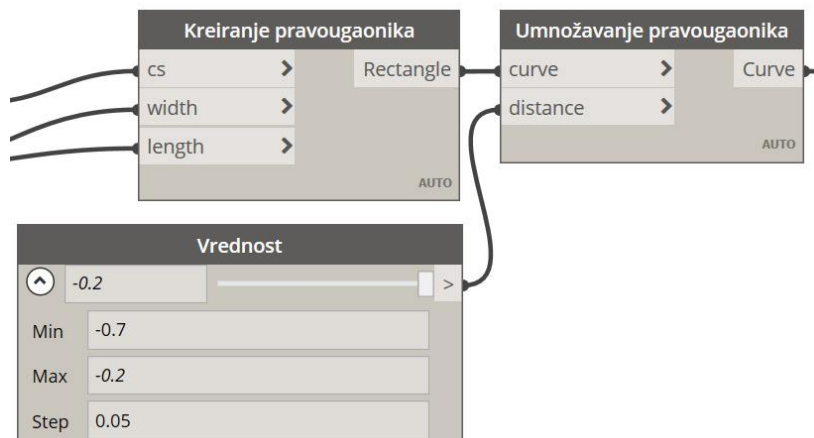
Свим правоугаоникима из матрице је додељена команда по којој се они множавају унутар себе за одређену вредност. Ова вредност је променљива и јединствена за сваки правоугаоник. Вредности одређује генетски алгоритам, те ће након процеса оптимизације неки правоугаоници бити различитих димензија од других. На тај начин настаје 480 нових правоугаоника (слика 80). Димензије и позиција правоугаоника након оптимизације, представљају величину и позицију прозора на фасади хипотетичког модела.





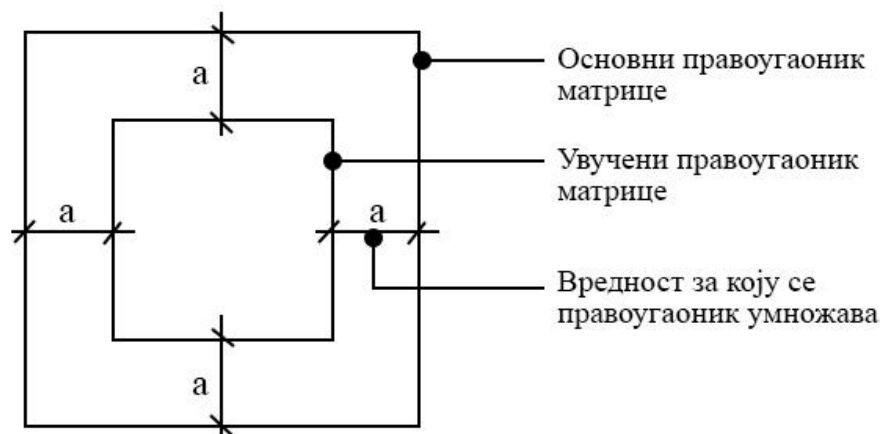
Слика 80. Изглед (горе) и аксонометријски приказ (доле) нових правоугаоника унутар матрице фасаде

Вредности за коју се правоугаоници умножавају су негативне, јер се они умножавају ка унутра. Минимална вредност је $-0,7$, максимална $-0,2$, а степен је $0,05$, што значи да нови правоугаоници могу бити увучени за растојање које је између $0,2$ и $0,7$ метара, на сваких $0,05$ метара (слика 81). Из претходно наведеног закључује се да вредности растојања могу бити $0,2$, $0,25$, $0,3\dots0,6$, $0,65$ и $0,7$ метара.



Слика 81. Граничне вредности са степеном, за које се правоугаоник умножава

Пошто је вредност смицања подједнака са свих страна, нови правоугаоници могу бити димензија између 0,6 метара ($2 - 2 * 0,7$) и 1,6 метара ($2 - 2 * 0,2$), на сваких 0,1 ($2 * 0,05$) метар (слика 82). Финално се закључује да величина прозора на параметарски променљивој фасади може бити 0,6, 0,7, 0,8...1,4, 1,5 и 1,6 метара, а генетски алгоритам у процесу оптимизације ће одабрати неку од ових димензија индивидуално за сваки елемент.



Слика 82. Вредност за коју се правоугаоник умножава

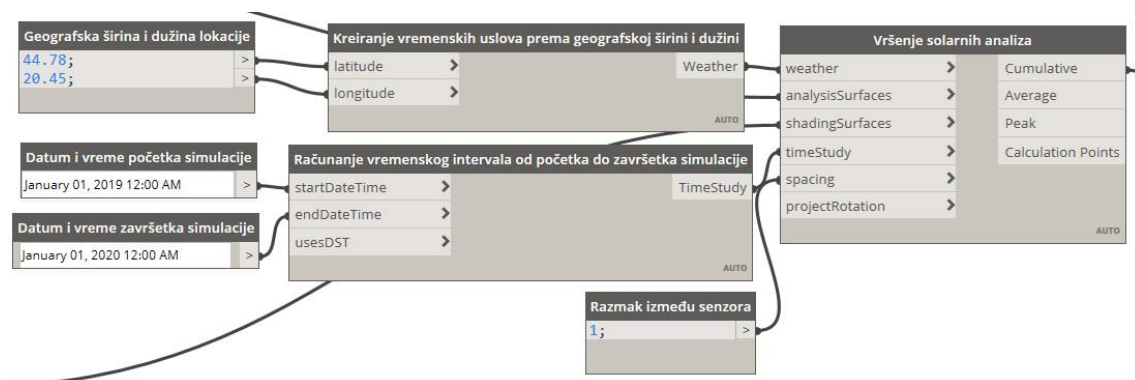
Дефинисане граничне вредности параметара су намерно одабране, како ни прозор највећих димензија (1,6 метара) не би могао да буде у колизији са таваницом, спуштеним плафоном и подигнутим подом. Са друге стране, прозор мањи од 0,6 метара, не би могао да задовољи минималне потребе за дневном светлости.

5.5.1 Дефинисање функција циља

Многа истраживања потврђују директан однос количине дневне светлости у канцеларијама и продуктивности у раду, као и замора, мотивисаности и личне сатисфакције запослених (Ariës, 2005, Boyce, 2003, De Giuli, 2009, Tanabe, Nishihara, 2004). Из тог разлога, канцеларијама је неопходно обезбедити што је могуће већу количину природног осветљења у току дана. Међутим, велики отвори на фасади кроз које пролази сунчево зрачење, резултирају и већем утрошку енергије за грејање и хлађење објекта, јер је коефицијент пролаза топлоте прозора вишеструко већи, у односу на коефицијент пролаза топлоте зидова. У конкретном

случају, прозори ($U=1,45$ [$W/(m^2K)$]) имају око 5,6 пута већи коефицијент у односу на фасадне зидове ($U=0,26$ [$W/(m^2K)$]), односно исто толико пута мања изолациона својства. Генетски алгоритам у процесу оптимизације тежи да „помири“ ове две опречне функције, тако што тражи оптимално решење које у исто време максимизује количину дневне светлости, али и минимизује величину отвора, те посредно смањује утршак енергије.

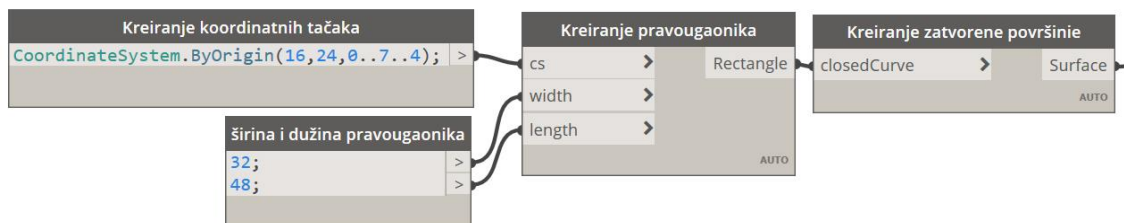
Прва функција циља дефинисана је количином светлости која упада у објекат. У процесу оптимизације, ова функција циља тежи максималној вредности, односно што већем упаду сунчеве светлости. Пакет унапред испрограмираних поља, који врши соларне студије у оквиру Дајнама, се назива „Солар Аналисис фор Дајнамо“ (енг. *Solar Analysis for Dynamo*), (слика 83). Овај пакет омогућава прорачун кумулативне количине светлости која пада на унапред дефинисане сензоре на површинама у одређеном временском интервалу, а има могућност да у своје анализе уврсти и елементе који заклањају те површине, као што су сенила или суседни објекти.



Слика 83. Унапред испрограмирана поља пакета „Солар Аналисис фор Дајнамо“

Програмирано поље које врши анализе, захтева као инпуте:

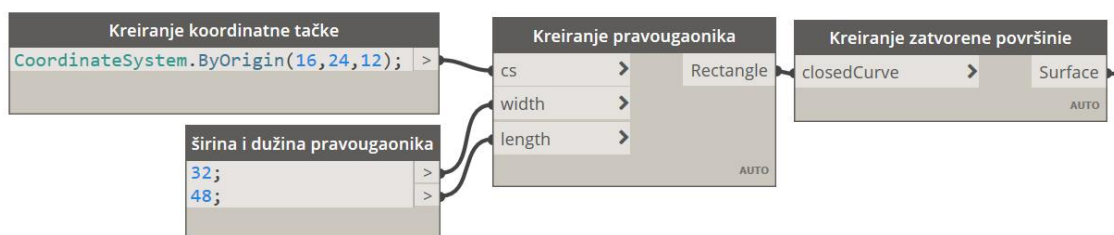
1. Површине на којима се врши анализа – креиране су три затворене хоризонталне правоугаоне површине, димензија $32 * 48$ метара, које се налазе на висинама од 0, 4 и 7 метара и представљају подове приземља и спратова. Површине су креиране са сличан начин као и фасаде, уз помоћ координатних тачака које представљају центар правоугаоника (слика 84).



Слика 84. Креирање затворених површина подова на којима се врши соларна студија

2. Површине које служе као засенчења – засенчења су зидови хипотетичког модела фасаде, односно простор између основних правоугаоника који чине матрицу и умножених правоугаоника увучених за променљиву вредност.

Додатно, засенчење врши и затворена површина димензија 32 * 48 метара, која се налази на висини од 12 метара и представља кров објекта (слика 85).



Слика 85. Креирање затворене површине крова на којем се врши соларна студија

3. Информације о локацији на којој се хипотетички модел налази – унети су географска ширина и дужина одабране локације на општини Нови Београд, а све информације о временским приликама програм преузима на основу унетих координата (слика 83).

4. Временски интервал током којег се врши анализа – временски период је у трајању од годину дана, од 1. јануара 2019. године у 0:00 часова, до 1. јануара 2020. године у 0:00 часова (слика 83).

5. Густину распореда сензора који читавају вредности са површина на којима се врши анализа – ова вредност је подешена да буде 1, што значи да се сензори налазе на међусобном растојању од једног метра (слика 83).

Друга функција циља дефинисана је укупном површином увучених правоугаоника који представљају прозоре на хипотетичком моделу фасаде и она тежи минималној вредности (слика 86). На основу сагледавања коефицијента пролаза топлоте прозора и зидова, закључено је да мањи прозори на фасади, резултирају мањем утрошку енергије за грејање и хлађење објекта. Другу функцију циља је неопходно поставити тако да индиректно утиче на енергетска својства објекта, јер тренутно не постоје унапред програмирана поља која врше енергетске симулације у Дајнаму. Очекује се појава ових пакета у блиској будућности, што би сигурно покренуло читав низ нових истраживања на ову тему.

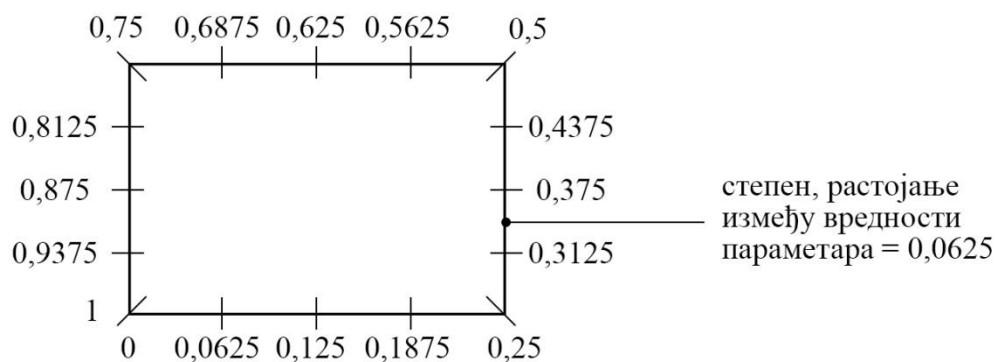


Слика 86. Функција циља укупне површине увучених правоугаоника

5.5.2 Дефинисање променљивих параметара фасаде

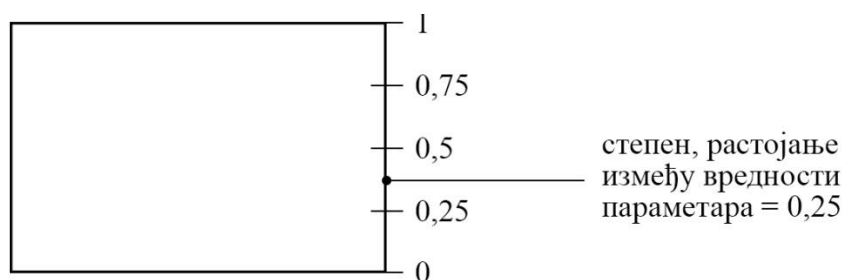
Како би процес оптимизације резултирао великим бројем различитих решења, неопходно је дефинисати променљиве параметре са својим граничним вредностима. Генетски алгоритам током процеса оптимизације бира ове вредности и користи их како би креирао решења, која тестира за дефинисане функције циља. Конкретно, дефинисана су четири променљива параметра: претрага тачке привлачења по хоризонталној оси, претрага тачке привлачења по вертикалној оси, компактност отвора на фасади и величина отвора на фасади.

1. Претрага тачке привлачења – генетски алгоритам током процеса оптимизације претражује тачку на фасади око које ће постојати највећи отвор, кроз који пролази највећа количина сунчеве светлости. Отвори на фасади ће се пропорцијално смањивати како се удаљавају од ове тачке. Први параметар тражи ову тачку у хоризонталној равни, по обиму фасаде и има минималну граничну вредност 0, максималну вредност 1 и степен 0,0625, што укупно даје 17 вредности параметара (слика 87).



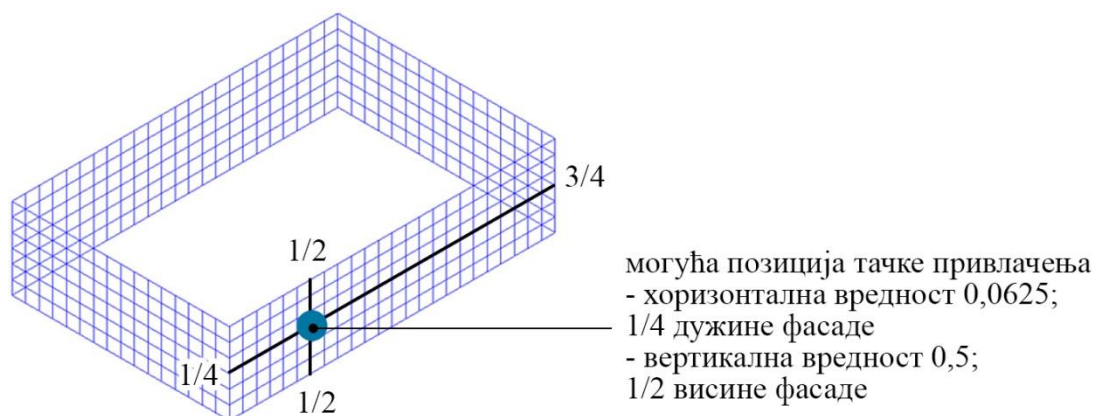
Слика 87. Претрага тачке привлачења у хоризонталној равни фасаде

Други параметар на сличан начин тражи тачку привлачења на вертикалној равни фасаде. Овај параметар има минималну граничну вредност 0, максималну вредност 1 и степен 0,25, што укупно даје 5 вредности параметара (слика 88).



Слика 88. Претрага тачке привлачења у вертикалној равни фасаде

Степен, односно растојање између вредности параметара је конципиран тако да тачка привлачења може бити једино на углу фасаде, њеној средини или на четвртини дужине (слика 89).



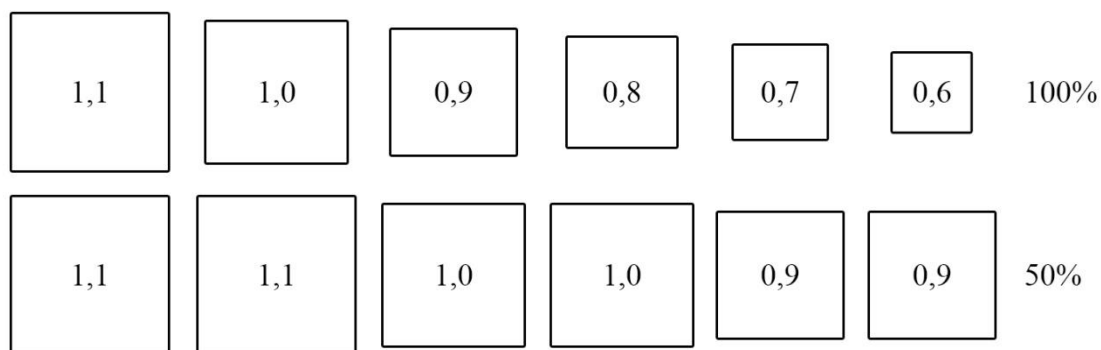
Слика 89. Аксонометријски приказ могуће позиције тачке привлачења

2. Компактност отвора на фасади – као што је раније наведено, све вредности параметара за коју се правоугаоници основне матрице умножавају, варирају у распону од $-0,7$ до $-0,2$. Параметар компактности отвора, омогућава генетском алгоритму у процесу оптимизације да коригује овај распон уколико је потребно. Минимална вредност овог параметра је $-0,6$, максимална $-0,2$, док је степен $0,1$. Закључујемо да овај параметар може имати 5 вредности и то $-0,6$, $-0,5$, $-0,4$, $-0,3$ и $-0,2$ (слика 90). Када параметар има вредност $-0,2$, онда је распон вредности максималан (100%) и креће се у интервалу од $-0,7$ до $-0,2$ (слика 90а). Када параметар има вредност $-0,6$, онда је распон вредности минималан (0%) и креће се у интервалу од $-0,7$ до $-0,6$ (слика 90б). Граничне вредности параметара су намерно одабране тако да вредности у било ком опсегу не прелазе $-0,2$, односно отвор величине 1,6 метара и $-0,7$, односно отвор величине 0,6 метара.



Слика 90. Распон вредности параметара а) минимални и б) максимални

Ако узмемо пример при којем постоји 6 параметарски променљивих отвора, од којих је сваки мањи од претходног за $0,1$ метар и дефинишемо овај распон као максималан, односно 100%, у том случају распон од 50% би омогућио да сваки други отвор буде мањи од претходног за $0,1$ метар (слика 91).



Слика 91. Компактност отвора са фактором од 100% и 50%

3. Величина отвора на фасади – последњи параметар омогућава генетском алгоритму да у процесу оптимизације директно коригује величину свих отвора. Минимална вредност овог параметра је -0,5, максимална 0,5, а степен 0,1, што укупно омогућава 11 различитих вредности (-0,5, -0,4, -0,3... 0... 0,3, 0,4, 0,5). Генетски алгоритам има могућност да увећа или умањи величину свих отвора за одабрану вредност параметра (слика 92).

0,9	0,8	0,7	0,6	вредност параметра -0,1
1,0	0,9	0,8	0,7	вредност параметра 0
1,1	1,0	0,9	0,8	вредност параметра +0,1

Слика 92. Величина отвора на фасади са вредностима параметара -1, 0 и +1

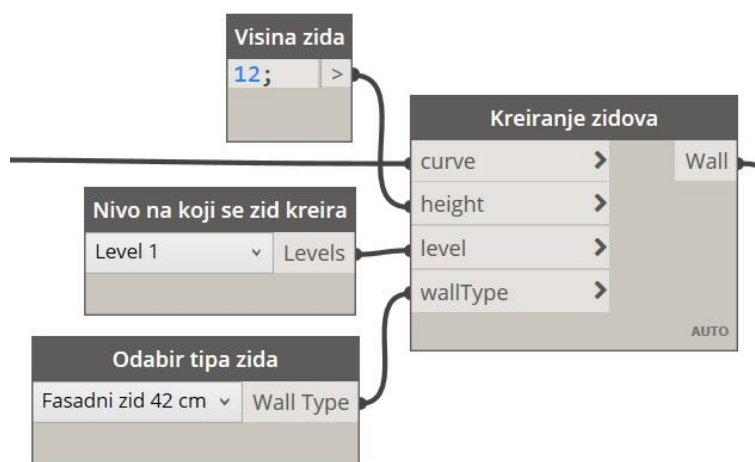
Граничне вредности параметара (-0,5 и 0,5) су намерно одабране тако да омогућавају и отворима са најмањим димензијама да постану отвори са највећим димензијама и обрнуто и то на следећи начин:

$$\begin{aligned}
 & -0,7 \text{ (мин. гранична вредност)} - 0,5 \text{ (мин. вредност параметра)} = -1,2; \\
 & -0,7 \text{ (мин. гранична вредност)} + 0,5 \text{ (макс. вредност параметра)} = -0,2; \\
 & -0,2 \text{ (макс. гранична вредност)} - 0,5 \text{ (мин. вредност параметра)} = -0,7; \\
 & -0,2 \text{ (макс. гранична вредност)} + 0,5 \text{ (макс. вредност параметра)} = 0,3.
 \end{aligned}$$

Закључујемо, било да је вредност за коју се умножавају правоугаоници матрице минимална (-0,7) или максимална (-0,2), овим променљивим параметром може да се коригује до супротних вредности. Скрипта је подешена тако да додељује граничну вредност параметру сваки пут када његова вредност са увећањем или умањењем пређе ту границу (на пример, ако вредност параметара са увећањем износи 0,1, том параметру се додељује максимална гранична вредност од -0,2).

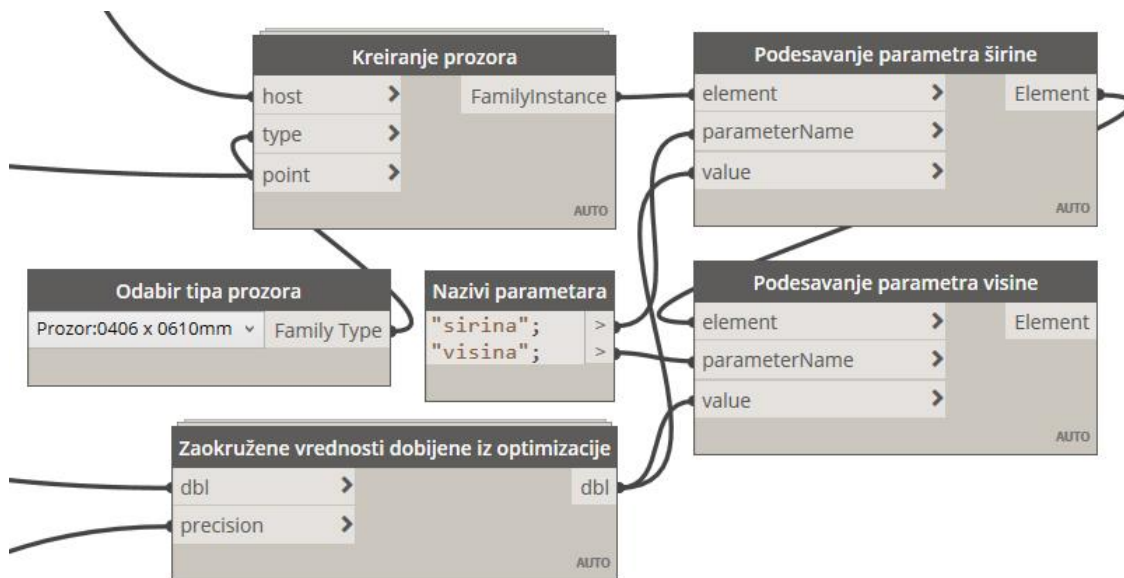
5.5.3 Постављање елемената фасаде у хипотетички модел

Скрипта садржи и део који креира елементе зидова и прозора хипотетичког модела према вредностима параметара добијених из оптимизације. Посебно програмирано поље за креирање зидова се налази у основном Дајнамо пакету. Ово поље од инпута захтева путању по којој ће креирати елемент зида, ниво на којем ће га креирати, висину зида и тип који ће користити у том процесу (слика 93). Путања и висина зида су већ одређене током креирања матрице фасаде, а као тип се користи фасадни зид са раније дефинисаним слојевима.



Слика 93. Креирање елемената зидова

Последњи део скрипте поставља елементе прозора унутар креираних зидова. Унапред програмирано поље припада посебном пакету које се назива „Спрингс“ (енг. *Springs*). Ово поље од инпута захтева елементе зидова, тип прозора који се креира и тачку уметања. Елемент прозора је раније дефинисан тако да његова тачка уметања буде на средини доње стране, па је из тог разлога тачка уметања на средини доње стране увучених правоугаоника. Креираним фасадним елементима накнадно се додељују вредности параметара ширине и висине, на основу резултата добијених из оптимизације (слика 94).



Слика 94. Креирање елемената прозора

Изглед комплетне Дајнамо скрипте која врши оптимизацију параметарски променљивих фасада употребом генетског алгоритма приказан је у прилогу 1.

5.6 Оптимизација фасаде употребом генетског алгоритма

Оптимизација употребом генетског алгоритма се врши директно у Рефинерију. При покретању новог процеса оптимизације, програм препознаје 4 инпута са њиховим граничним вредностима. Функција циља директног упада сунчеве светлости је подешена да тежи максималној вредности, док је функција циља укупне површине отвора подешена да тежи минималној вредности. Функције циља се могу нумерички ограничити, тако да програм не препознаје резултате које су изван тих ограничења, али у конкретном случају то није потребно активирати. Величина популације је дефинисана са 20 јединки, а оптимизација је подешена да траје 40 генерација. Вредност одабира варијанте првог насумичног решења је остављена да буде 1, што је подразумевано подешавање (слика 95).

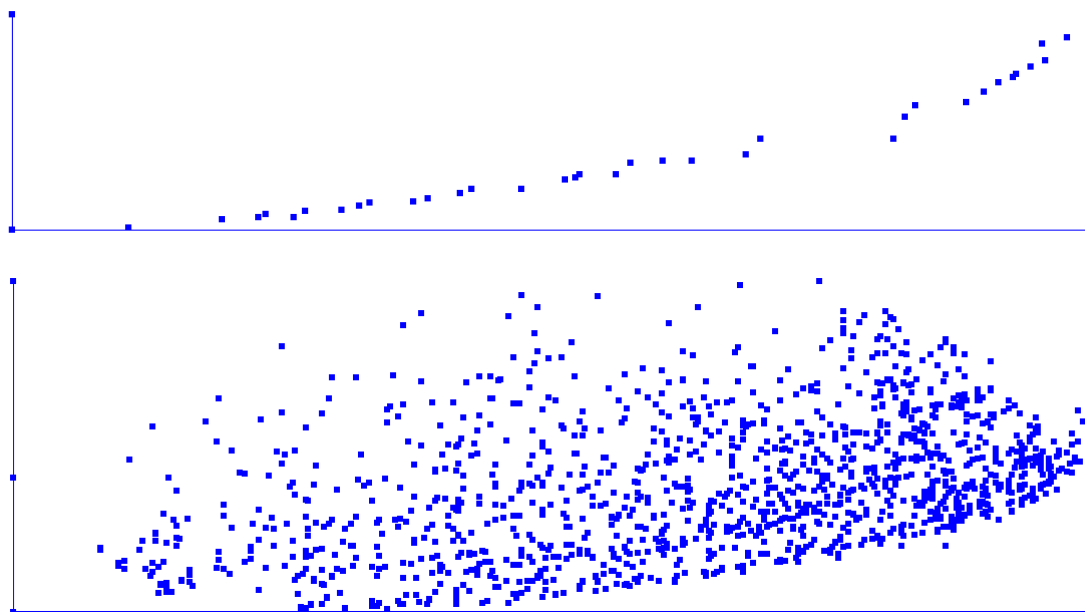
The image shows a control panel for a program named 'Refineries'. It is divided into several sections:

- Which inputs should vary?** (dropdown menu)
 - Pretraga tačke x - osa (0 to 1)
 - Pretraga tačke y - osa (0 to 1)
 - Kompaktnost otvora (-0.6 to -0.2)
 - Veličina otvora (-0.5 to 0.5)
- Which outputs should be used as goals?** (dropdown menu)
 - Ukupno osvetljenje
 - Minimize
 - Maximize
 - Ukupna površina
 - Minimize
 - Maximize
- Which outputs should be constrained?** (dropdown menu)
 - Ukupno osvetljenje
 - Ukupna površina
- Generation Settings** (dropdown menu)
 - Population Size:
 - Generations:
 - Seed:

Слика 95. Изглед конторлне табле програма „Рефинери“

5.6.1 Паретов фронт оптималних решења

Након истека 40 генерација, добијен је скуп оптималних решења (слика 96). Као што је било очекивано, решења су током генерација формирала Паретов фронт оптималних решења. Генетски алгоритам је очекивано пронашао и екстремне вредности оптималних решења, једно при којем је и вредност укупне количине упада директне светлости и вредност укупне површине минимална и друго при којем су обе вредности максималне.



Слика 96. Паретов скуп оптималних решења (горе) и сва решења добијена из оптимизације (доле)

Све резултате програм аутоматски чува у екстерној Мајкрософт Ексел табели, а подаци су груписани према генерацијама и сортирани према променљивим параметрима и функцијама циља (слика 97).

	A	B	C	D	E	F
1	Генерација 1					
2	Укупно осветљење	Укупна површина	Претрага тачке - x оса	Претрага тачке - y оса	Компактност отвора	Величина отвора
3	9334,95	1229	0,5	0,5	-0,4	-0,5
4	3440,57	173	0,375	0,25	-0,4	0,5
5	5744,83	600	1	0,75	-0,6	-0,2
6	6635,9	787	0,0625	0,25	-0,3	-0,1
7	7296,08	835	0,1875	0,5	-0,6	-0,3
8	4955,07	505	0,0625	0,75	-0,2	0,1
9	8401,8	992	0,4375	0,5	-0,5	-0,3
10	7544,42	867	0,125	0	-0,3	-0,1
11	4114,36	265	0,1875	0,5	-0,3	0,2
12	8442,5	1059	0,125	0,75	-0,3	-0,2

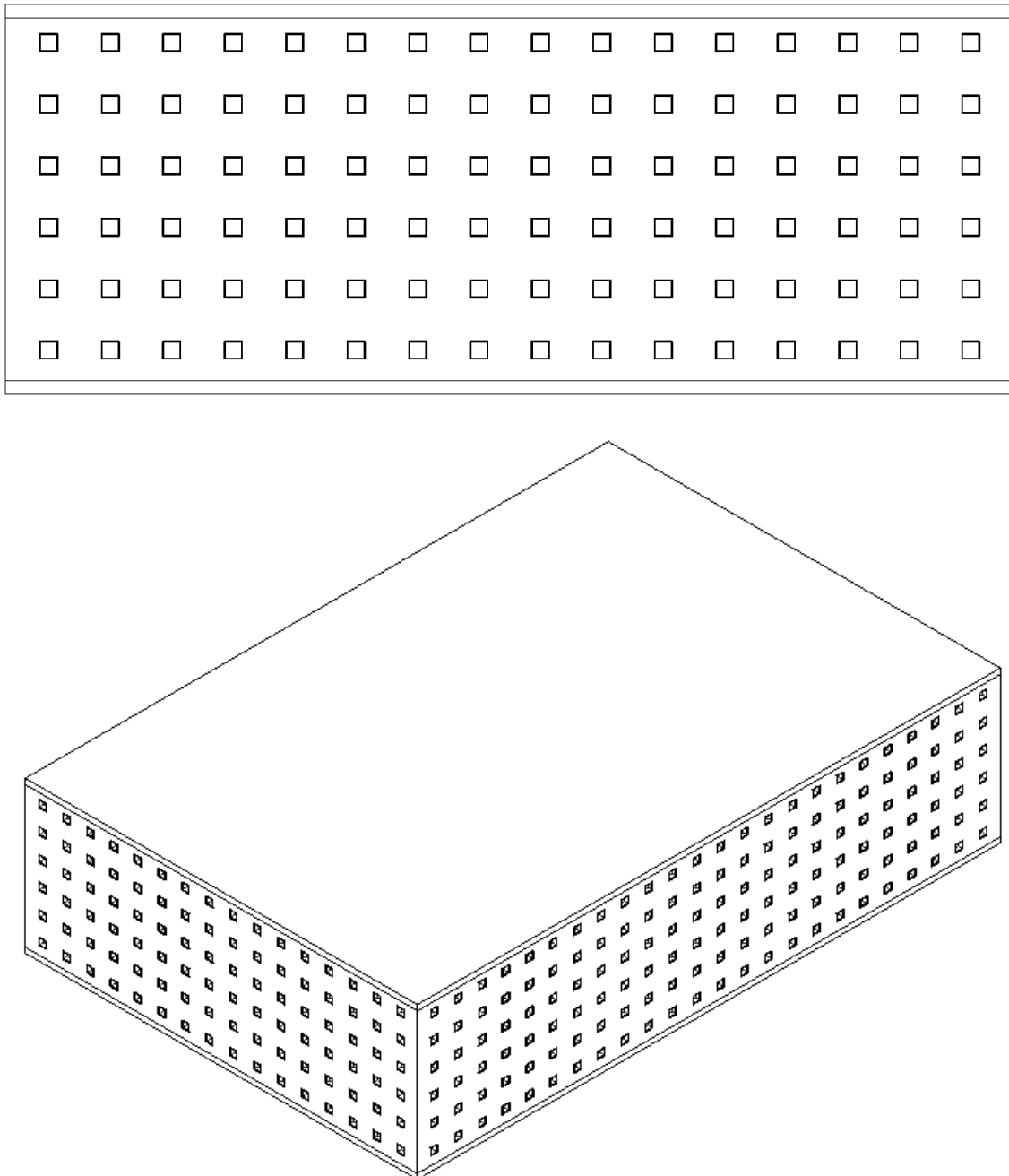
Слика 97. Резултати оптимизације у „Ексел“ табели

5.7 Креирање референтних хипотетичких модела М1, М2 и М3

Осим креирања хипотетичких модела на основу резултата добијених из оптимизације, неопходно је креирати и хипотетичке моделе са фиксним параметрима фасадних елемената, као референтни оквир за упоређивање резултата добијених из енергетских симулација. Дефинисана су три хипотетичка модела, на којима параметри фасадних елемената имају минималну, максималну и средњу вредност.

МОДЕЛ М1. Хипотетички модел на чијој фасади сви прозори имају минималне димензије од $0,6 * 0,6$ метара (слика 98).

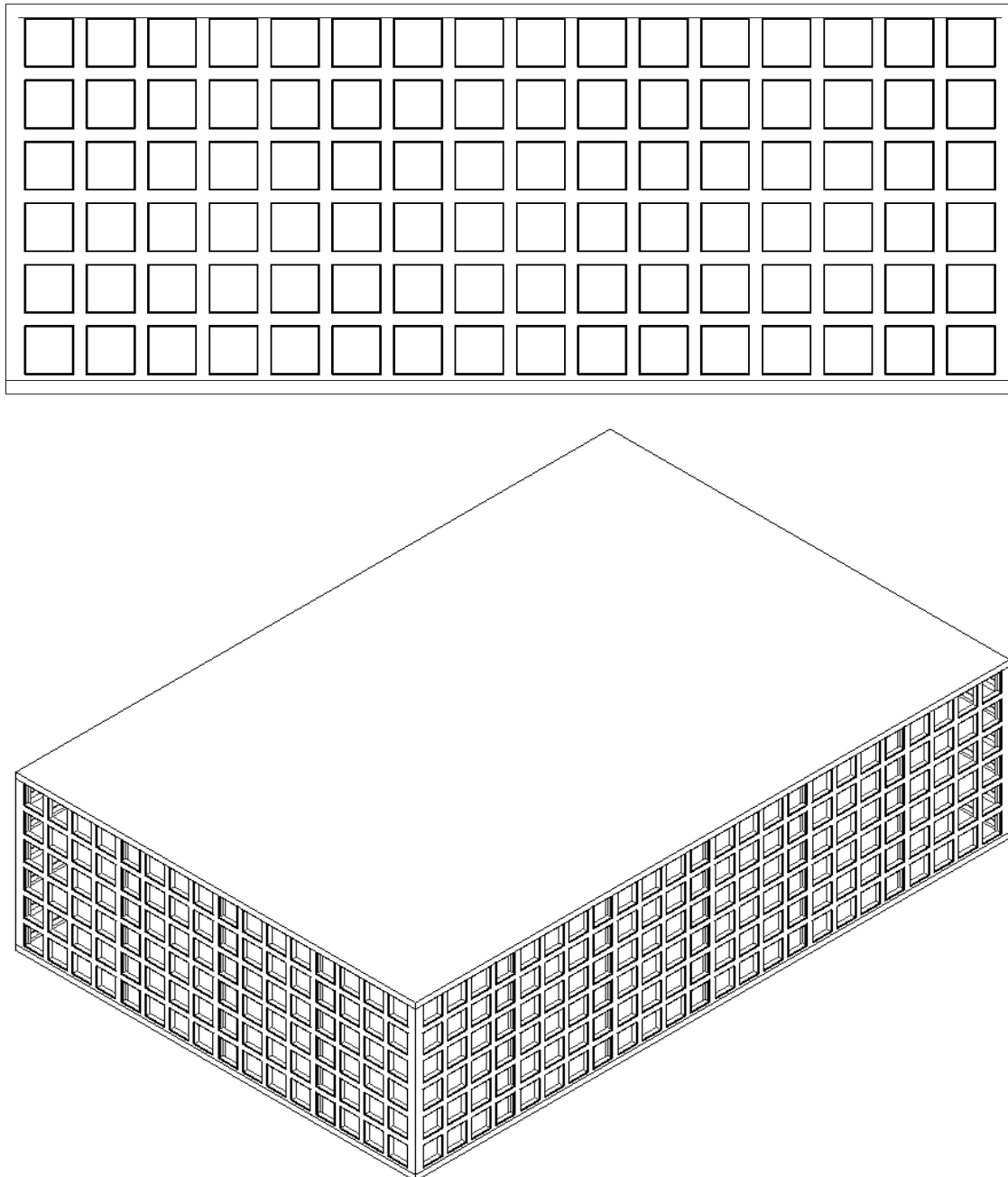
Укупна количина сунчевог зрачења која упада у објекат током једне целе године износи $3,27 \text{ kWh/m}^2$. Укупна површина отвора на фасади износи 173 m^2 .



Слика 98. Изглед јужне фасаде (горе) и ксонометријски приказ (доле) модела М1

МОДЕЛ М2. Хипотетички модел на чијој фасади сви прозори имају максималне димензије од $1,6 * 1,6$ метара (слика 99).

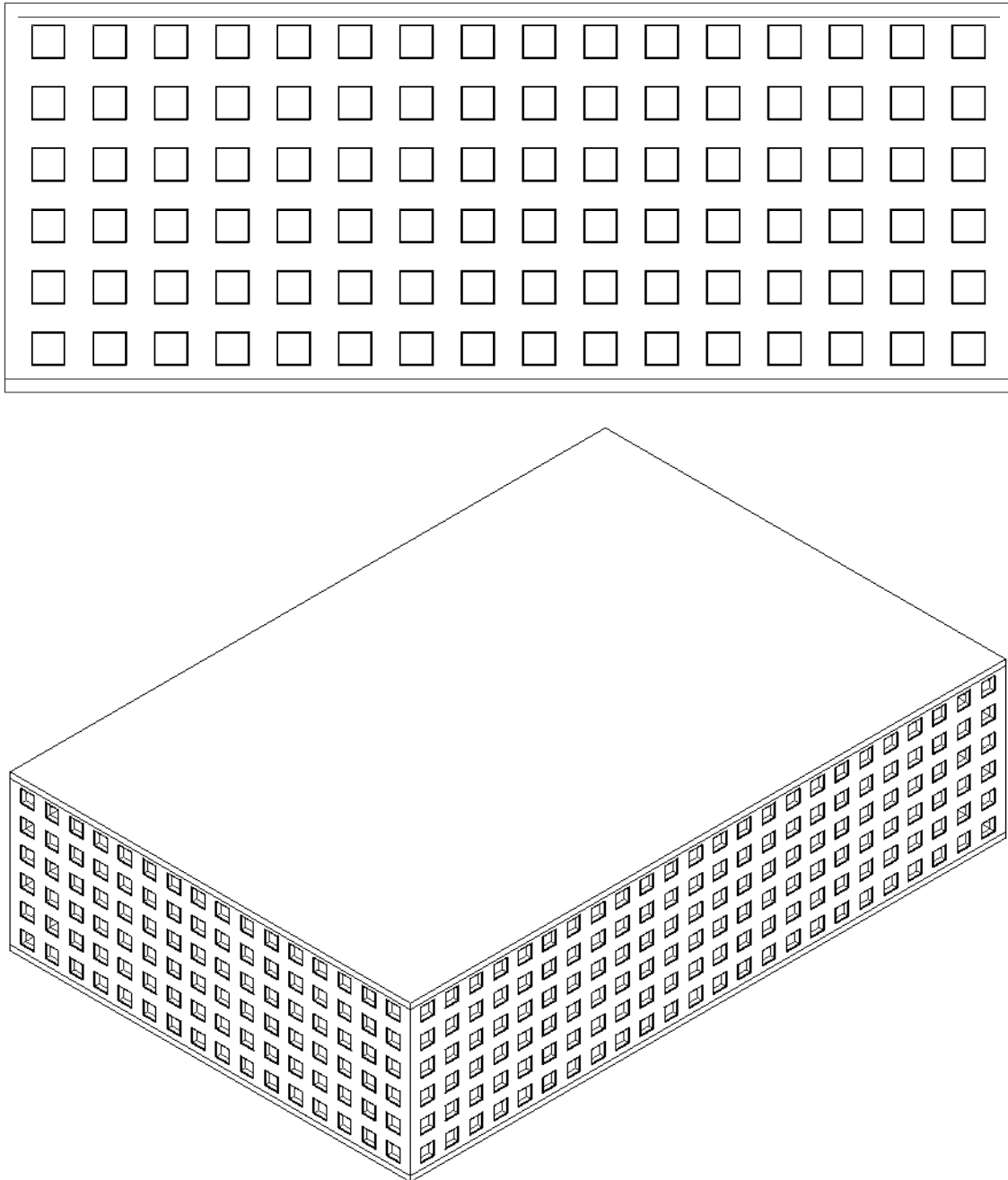
Укупна количина сунчевог зрачења која упада у објекат током једне целе године износи $9,28 \text{ kWh/m}^2$. Укупна површина отвора на фасади износи 1.229 m^2 .



Слика 99. Изглед јужне фасаде (горе) и ксонометријски приказ (доле) модела М2

МОДЕЛ М3. Хипотетички модел на чијој фасади сви прозори имају средње димензије од $1,2 * 1,2$ метра (слика 100).

Укупна количина сунчевог зрачења која упада у објекат током једне целе године износи $5,61 \text{ kWh/m}^2$. Укупна површина отвора на фасади износи 581 m^2 .

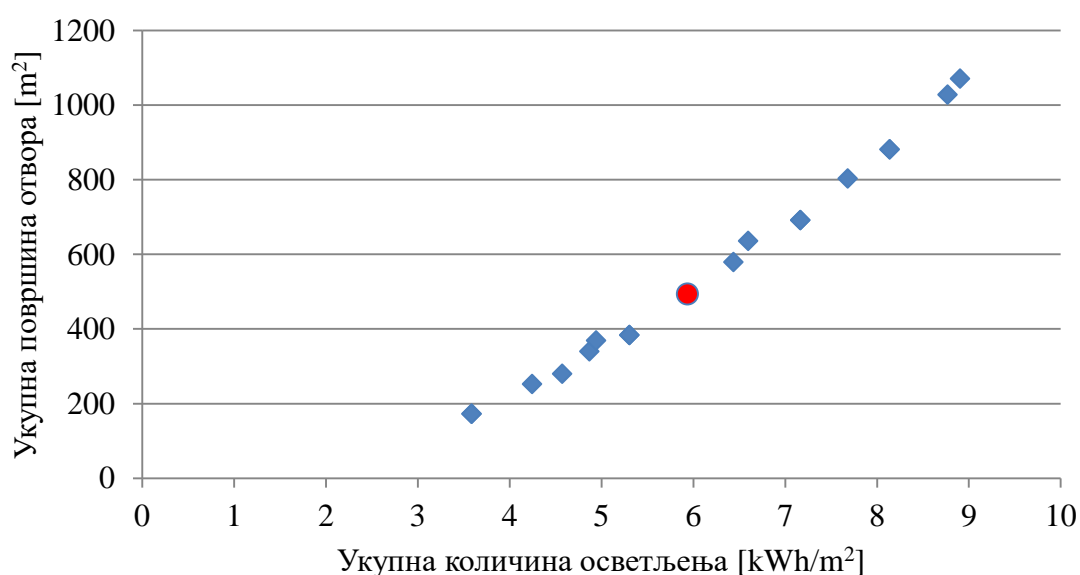


Слика 100. Изглед јужне фасаде (горе) и ксонометријски приказ (доле) модела М3

5.8 Креирање оптималних хипотетичких модела О1 и О2

Одабир оптималног решења увек је део субјективне процене, а критеријуми на основу којег се решење бира, зависи од пројектантског задатка, дизајна које то решење креира, личних аспирација особе која бира итд.

На основу детаљног увида у скуп оптималних решења, одабрано је једно које резултира приближно средњим вредностима функција циља (дијаграм 3) и као такво креира хипотетички модел О1.

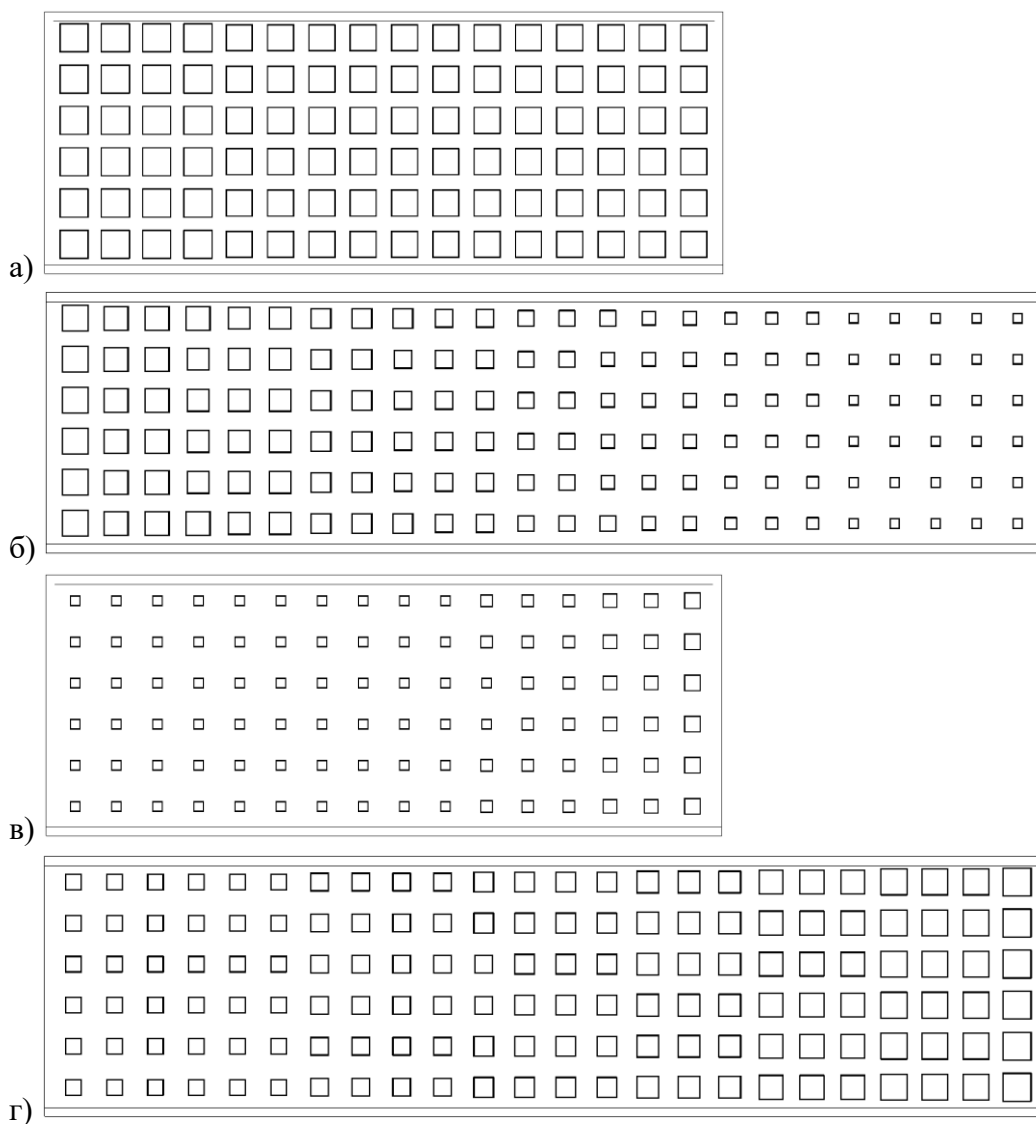


Дијаграм 3. Паретов скуп оптималних решења (плаво) и одабрано оптимално решење (црвено)

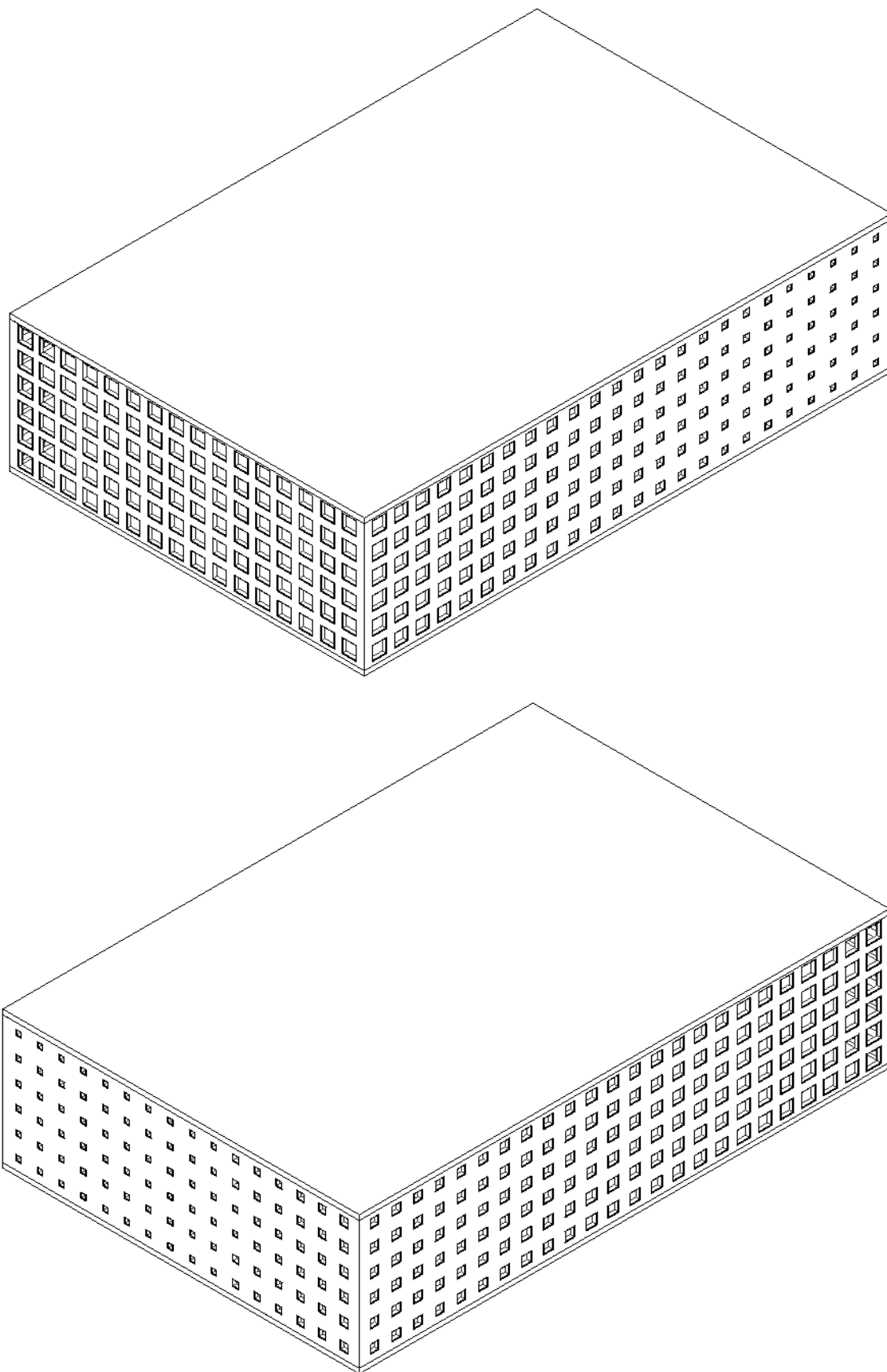
Оптимизација је показала да отвори највећих димензија треба да се налазе приближно на средини јужне фасаде. Уз претпоставку да на овај начин, велика количина директног сунчевог зрачења негативно утиче на потрошњу енергије за грејање и хлађење, урађена је још једна оптимизација, са истом величином популације и бројем генерација, уз измену при којој функција циља укупне количине дневне светлости тежи минимуму, а укупна површина отвора тежи максимуму. Ново добијено оптимално решење показује да отвори највећих димензија треба да се налазе приближно на средини северне фасаде (максимално је индиректно осветљење), те као такво креира хипотетички модел О2 и служи као референти оквир за упоређивање резултата енергетских симулација.

МОДЕЛ О1. Хипотетички модел добијен на основу одабира оптималног решења (слике 101, 102). Вредности променљивих параметра овог решења су: 0,3125 – позиција тачке привлачења по хоризонталној равни. Тачка привлачења у хоризонталној равни је на $\frac{1}{4}$ дужине јужне фасаде; 0,5 – позиција тачке привлачења по вертикалној равни. Тачка привлачења у вертикалној равни је на $\frac{1}{2}$ висине фасаде; -0,2 - компактност отвора. Распон вредности компактности отвора је максималан, односно 100%; 0,1 – величина отвора. Сви отвори на фасади су увећани за 0,1 метар.

Укупна количина сунчевог зрачења која упада у објекат током једне целе године износи $5,93 \text{ kWh/m}^2$. Укупна површина отвора на фасади износи 463 m^2 .



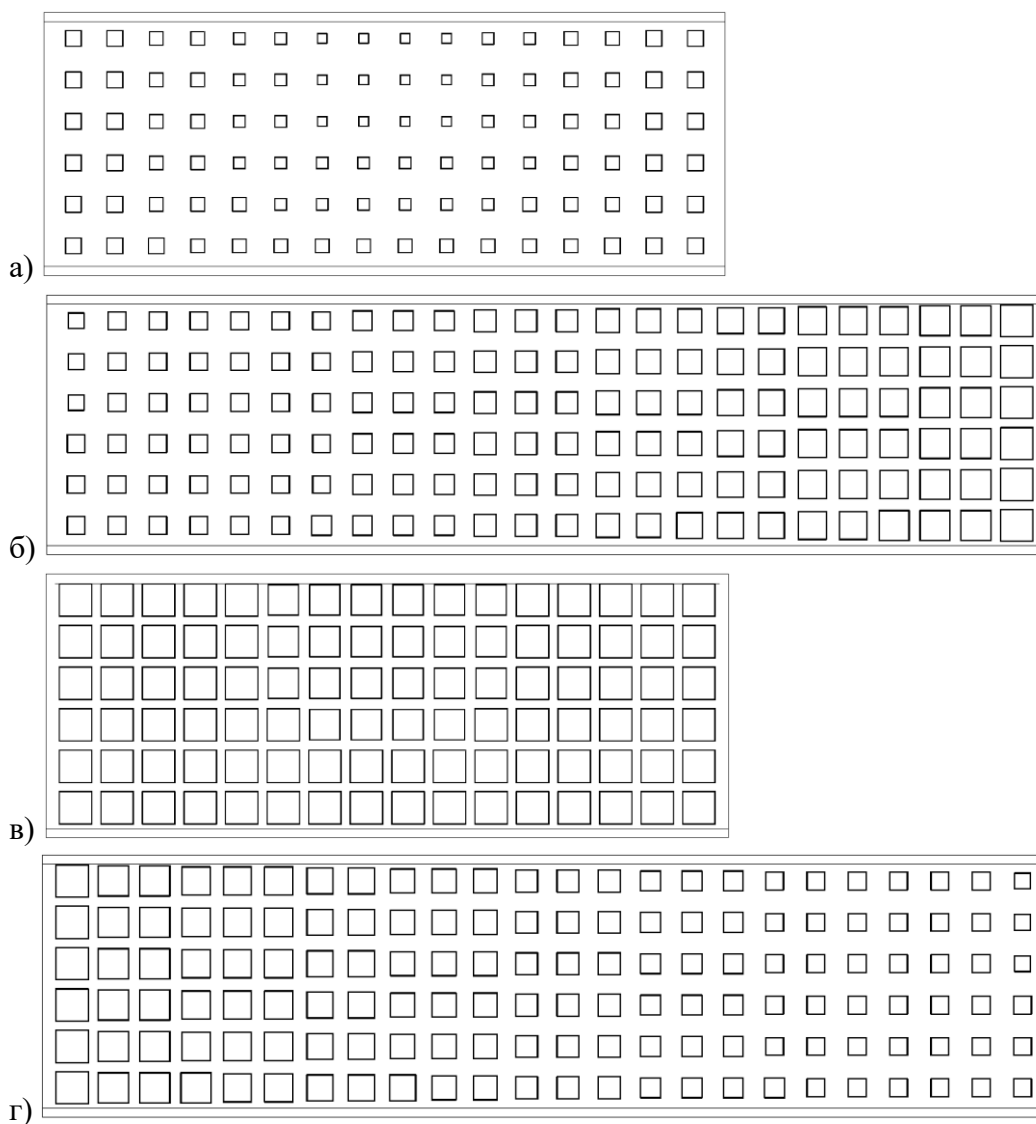
Слика 101. Изглед а) јужне б) источне в) северне и д) западне фасаде модела О1



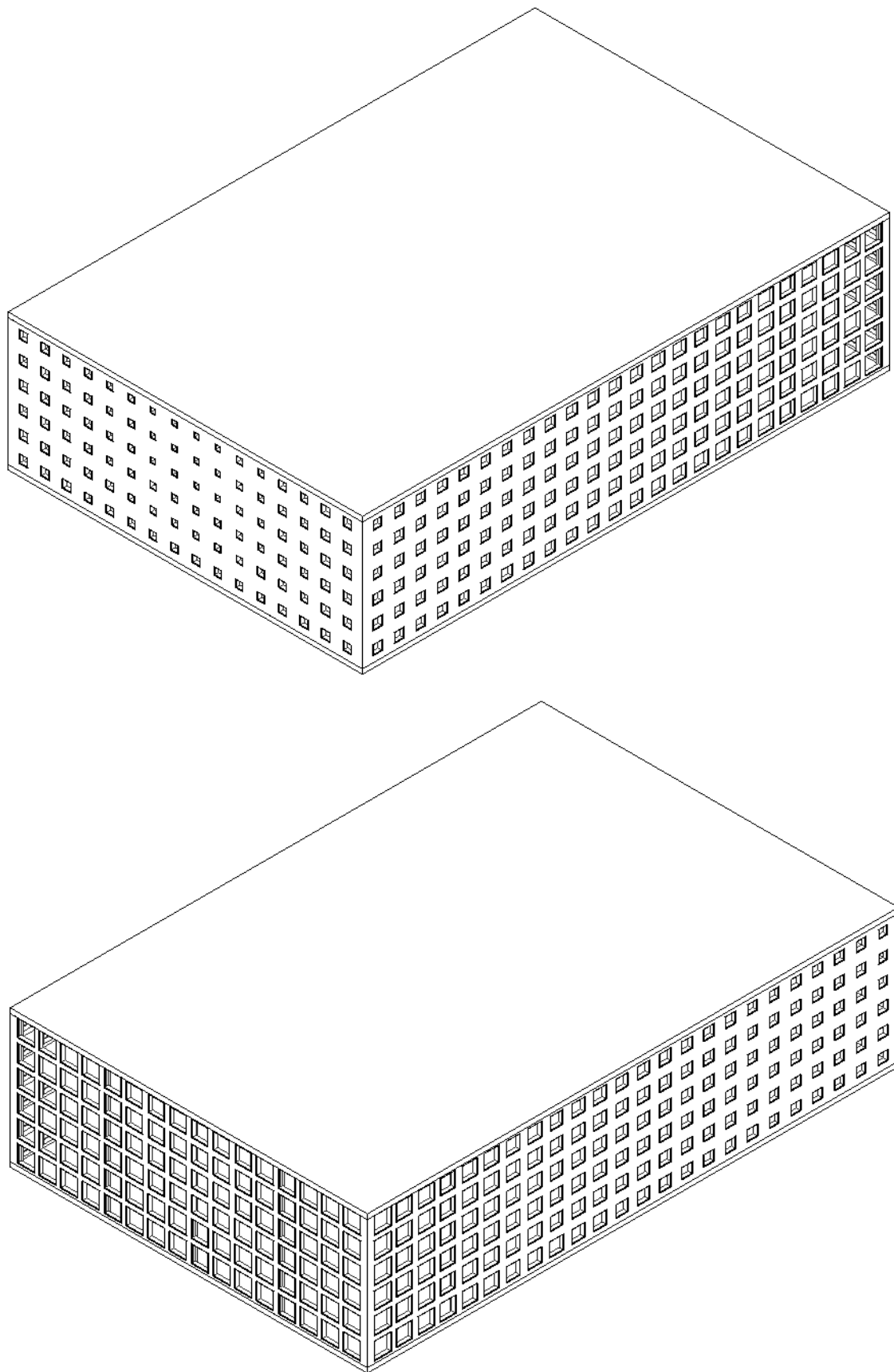
Слика 102. Аксонометријски прикази модела O1. Југо-исток (горе) и северозапад (доле)

МОДЕЛ О2. Хипотетички модел добијен на основу одабира оптималног решења (слике 103, 104). Вредности променљивих параметра овог решења су: 0,875 – позиција тачке привлачења по хоризонталној равни. Тачка привлачења у хоризонталној равни је на $\frac{1}{2}$ дужине северне фасаде; 0,75 – позиција тачке привлачења по вертикалној равни. Тачка привлачења у вертикалној равни је на $\frac{3}{4}$ висине фасаде; -0,2 - компактност отвора. Распон вредности компактности отвора је максималан, односно 100%; 0 – величина отвора. Отвори на фасади се не увећавају.

Укупна количина сунчевог зрачења која упада у објекат током једне целе године износи 5,56 kWh/m². Укупна површина отвора на фасади износи 720 m².



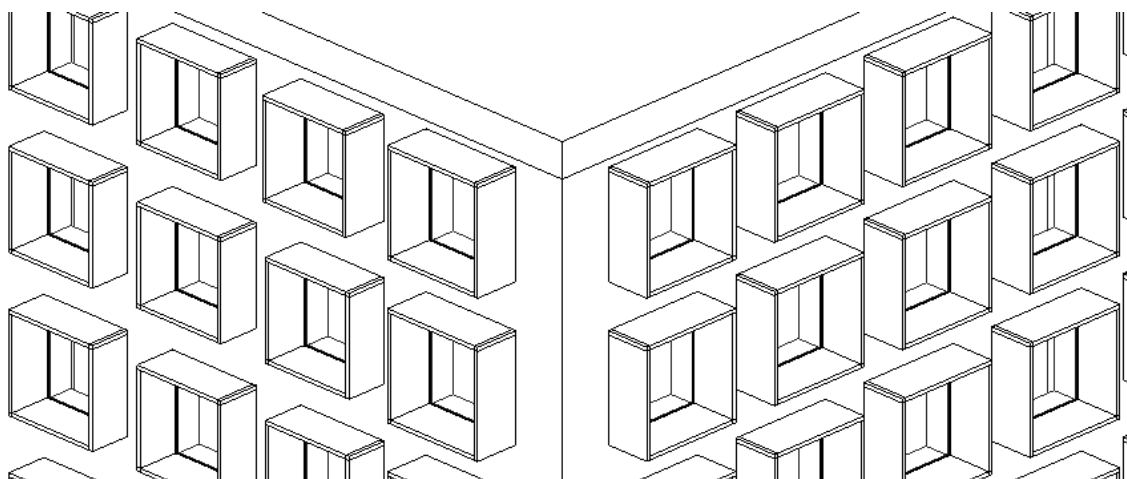
Слика 103. Изглед а) јужне б) источне в) северне и д) западне фасаде модела О2



Слика 104. Аксонометријски прикази модела О2. Југо-исток (горе) и северозапад (доле)

5.9 Креирање алтернативних хипотетичких модела са сенилима А1 и А2

Дефинисање алтернативних хипотетичких модела подразумева увођење непокретних сенила око свих страница параметарски променљивих елемената фасаде, зарад потенцијалног унапређења енергетских својстава (слика 105). Сенила су под нагибом од 90° у односу на раван застакљења фасадног елемента. Површина сенила може послужити као подлога за инсталацију соларних колектора за загревање топле воде или фотонапонских панела за производњу електричне енергије. Топла вода добијена преко оваквих колектора може послужити као допуна за систем грејања у прелазним или чак и хладнијим периодима године. Дужина сенила биће одређена резултатима оптимизације.



Слика 105. Аксонометријски приказ сенила на фасади

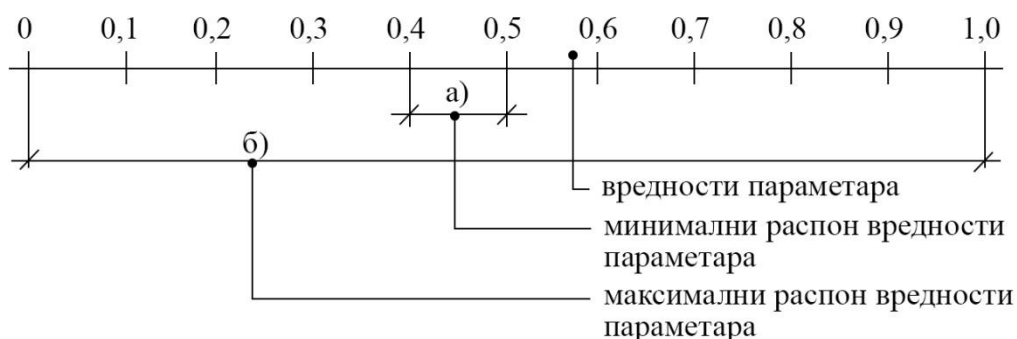
Оптимизација сенила се врши преко фасаде оптималног модела О1.

Прва функција циља дефинисана је количином светлости која упада у објекат. У процесу оптимизације, ова функција циља тежи максималној вредности, односно што већем упаду сунчеве светлости. Део скрипте који анализира ову функцију циља идентичан је као код претходне оптимизације, уз измену да сада и сенила праве засенчења унутар објекта, те се морају узети у обзир приликом симулација.

Друга функција циља дефинисана је укупном површином сенила. Ова функција такође тежи максималној вредности, уз претпоставку да већа засенчења

спречавају директан упад јаког сунчевог зрачења, највише на јужној фасади, те самим тим умањују потрошњу енергије, посебно за хлађење објекта током лета.

Процес оптимизације користи два променљива параметра: минималну и максималну вредност дужине сенила. Минимална вредност дужине сенила може бити између 0 и 0,4 метара, док максимална вредност дужине сенила може бити између 0,5 и 1,0 метра (слика 106). Степен разлике за оба параметра износи 0,1. Закључујемо да дужина сенила може да варира од минималног распона између 0,4 и 0,5 метара (слика 106а), до максималног распона између 0 и 1 метра (слика 106б).



Слика 106. Распон вредности параметара дужине сенила

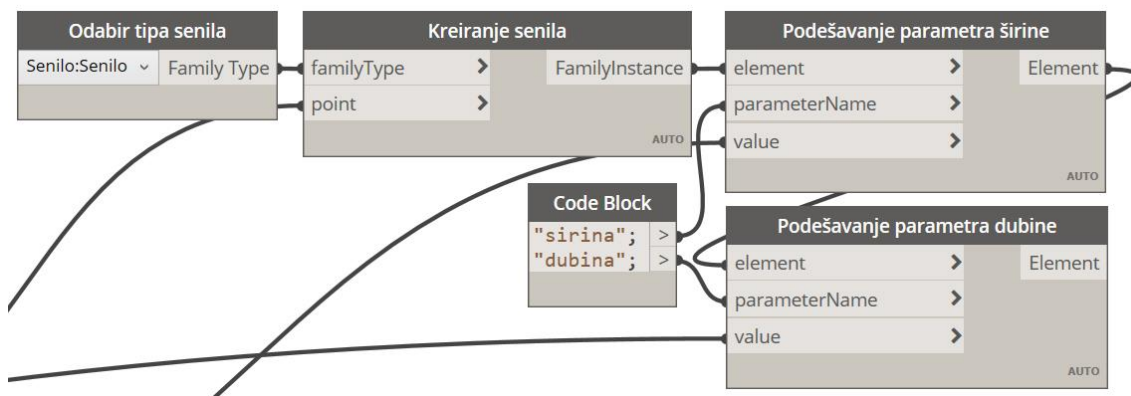
Финално кориговање дужине сенила преко променљивих параметара омогућено је „ремапирањем вредности“ (енг. *remap*). Ово унапред програмирано поље, омогућава генетском алгоритму да, уколико је потребно, вредности добијене из оптимизације пребаци у неки други дефинисани опсег (слика 107).



Слика 107. „Ремапирање“ вредности променљивих параметара

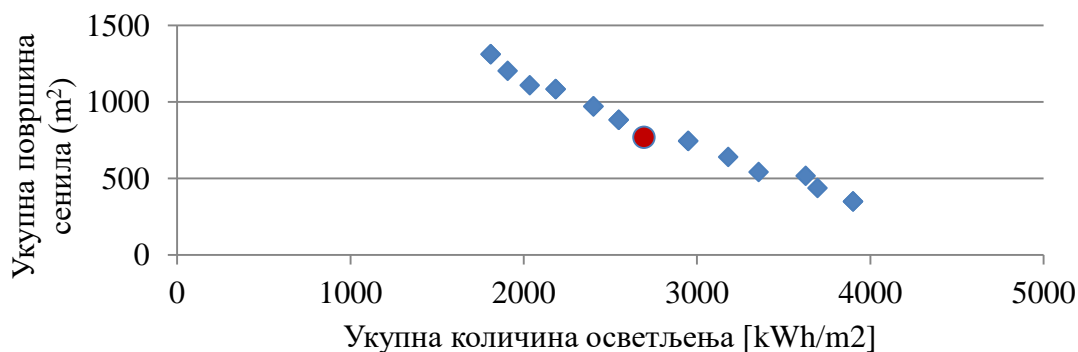
Скрипта меморише хоризонталну и вертикалну вредност тачке привлачења на фасади добијену из претходне оптимизације, те ће на том месту сенила бити најдужа, док ће дужина опадати пропорцијално са удаљавањем од ње.

Постављање елемената сенила, омогућено је унапред програмираним пољем које се налази у основном Дајнамо пакету. Ово поље од инпута захтева одабир раније дефинисаног типа сенила, као и тачке уметања, која се поклапа са координатним тачкама средине увучених правоугаоника - отвора. Финално, параметри ширине и висине сенила се преузимају из димезнија отвора, док се параметри дубине сенила преузимају из резултата оптимизације (слика 108).



Слика 108. Посављање елемената сенила

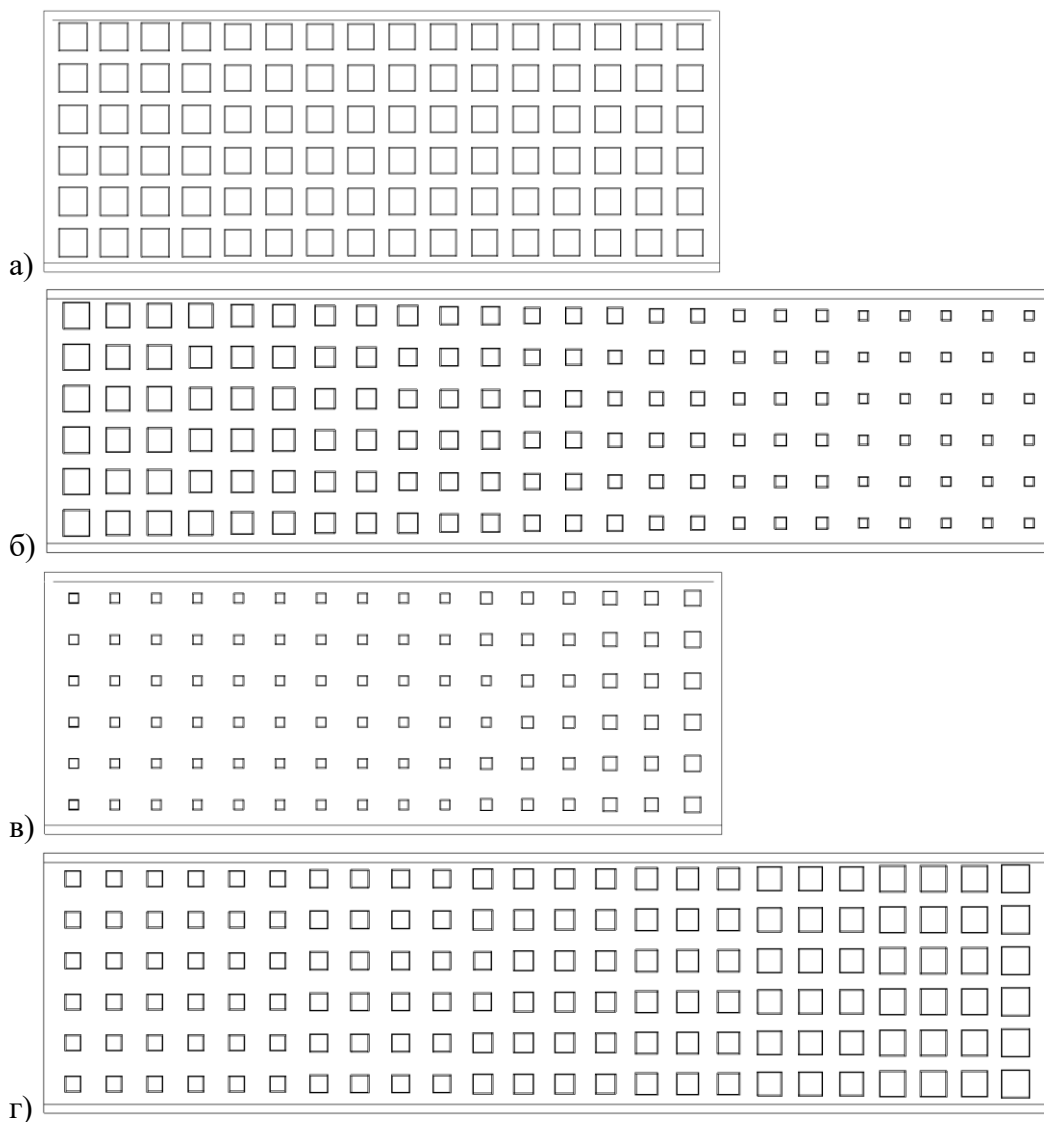
Величина популације је дефинисана са 20 јединки, а оптимизација је подешена да траје 20 генерација. На основу анализе резултата, одабрано је оптимално решење, за приближно средње вредности функције циља (дијаграм 4).



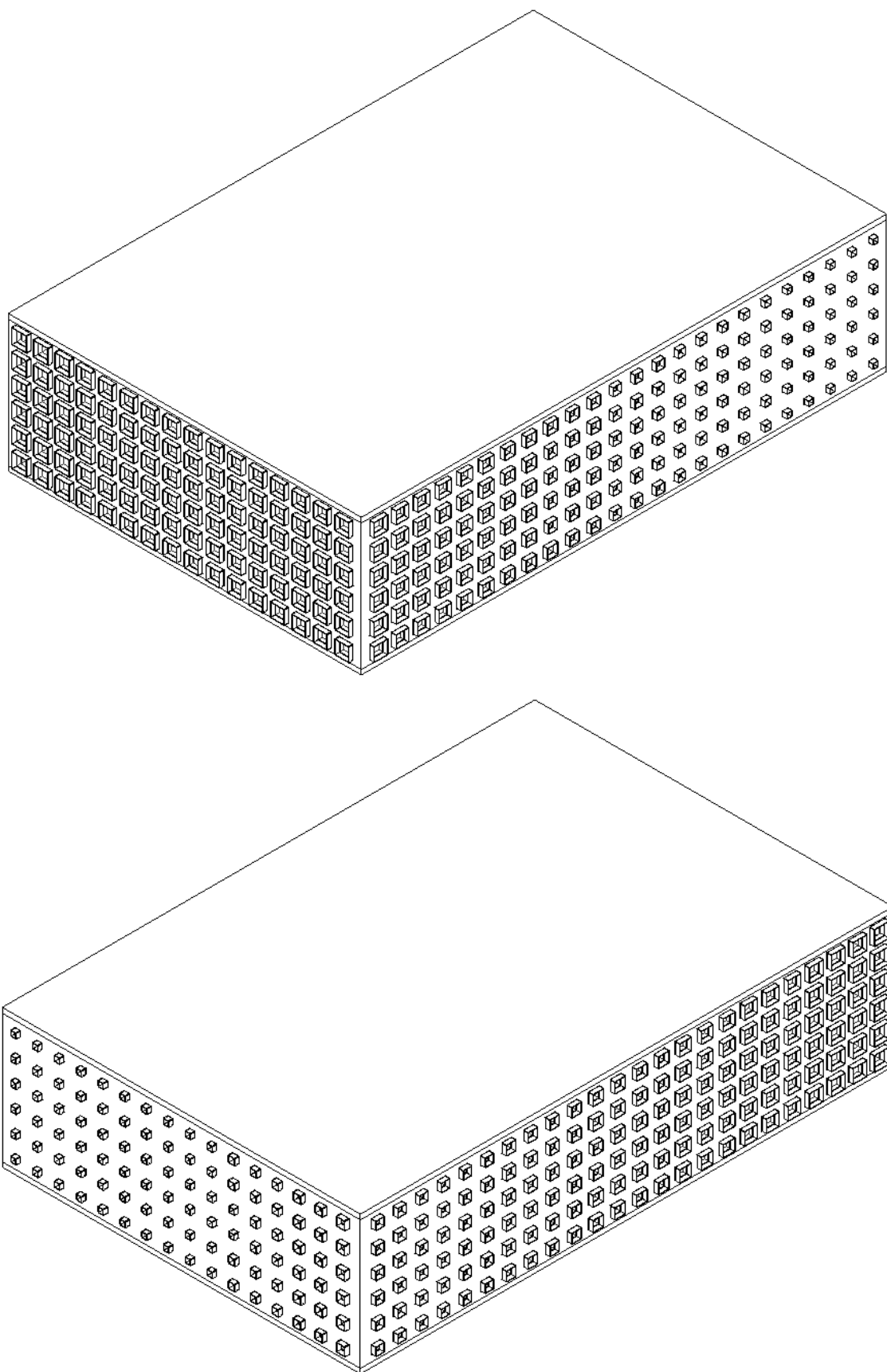
Дијаграм 4. Паретов скуп оптималних решења (плаво) и одабрано оптимално решење (црвено)

МОДЕЛ А1. Резултати симулација су показали да оптимална дужина сенила треба да варира између 0,1 и 0,6 метара. Из тог разлога, креиран је први алтернативни хипотетички модел, при којем сва сенила имају једнаку, средњу вредност од 0,35 метара (слике 109, 110). Улога овог хипотетичког модела је да буде референти оквир за упоређивање резултата енергетских симулација са моделом које има променљиву дужину сенила, али и са другим раније дефинисаним моделима.

Укупна количина сунчевог зрачења која упада у објекат током једне целе године износи $3,03 \text{ kWh/m}^2$. Укупна површина отвора на фасади износи 463 m^2 . Укупна површина сенила износи 626 m^2 .



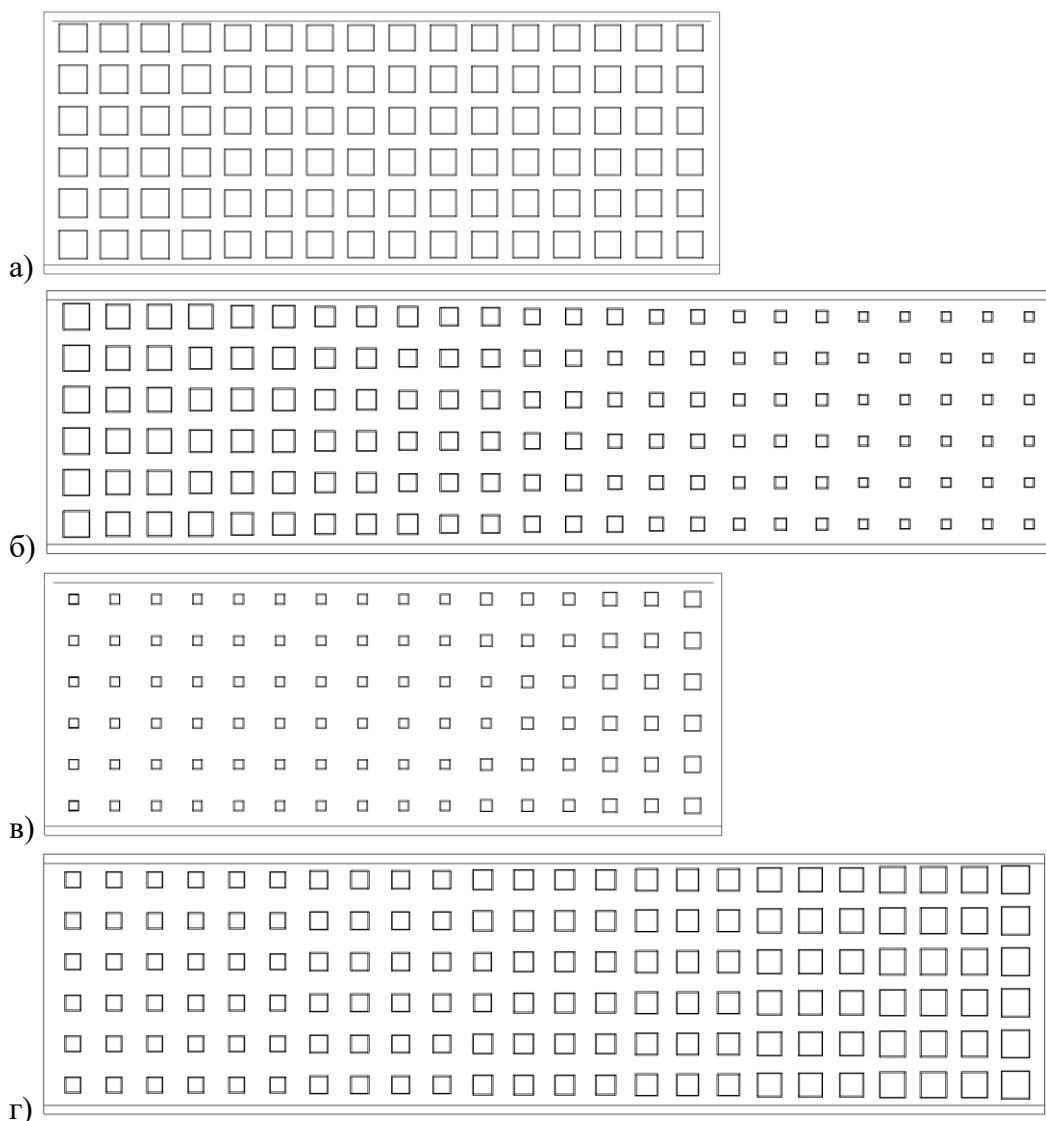
Слика 109. Изглед а) јужне б) источне в) северне и д) западне фасаде модела А1



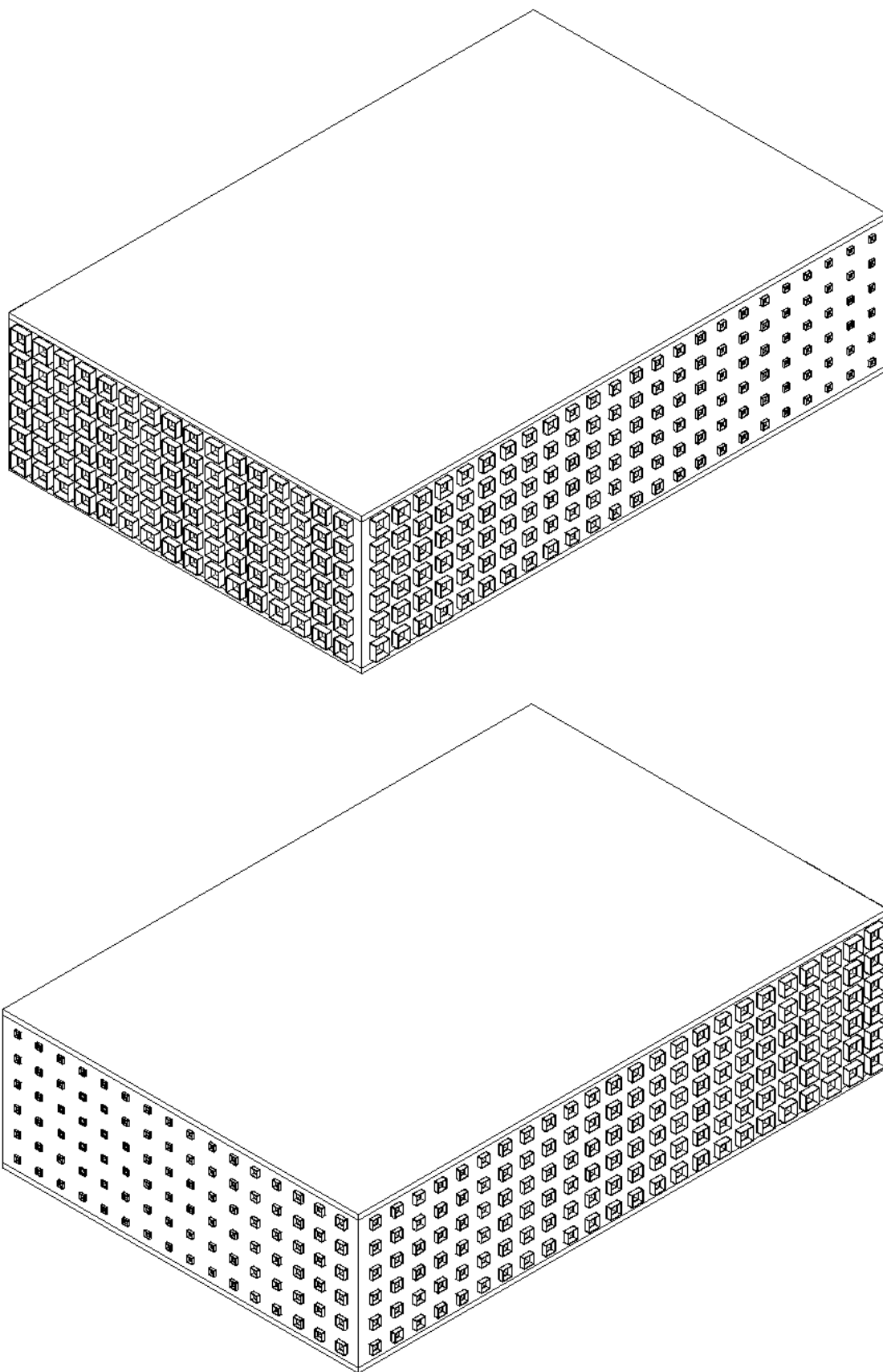
Слика 110. Аксонометријски прикази модела А1. Југо-исток (горе) и северозапад (доле)

МОДЕЛ А2. Хипотетички модел добијен на основу одабира оптималног решења (слике 111, 112). Као што је наведено, према резултатима оптимизације, минимална дужина сенила треба да буде 0,1 метар, а максимална 0,6 метара. Сенила максималне дужине од 0,6 метара, позиционирана су непосредно око отвора на којем се налази тачка привлачења ($\frac{1}{4}$ дужине и $\frac{1}{2}$ висине јужне фасаде) и пропорционално се смањују са удаљавањем од исте.

Укупна количина сунчевог зрачења која упада у објекат током једне целе године износи $2,51 \text{ kWh/m}^2$. Укупна површина отвора на фасади износи 463 m^2 . Укупна површина сенила износи 769 m^2 .



Слика 111. Изглед а) јужне б) источне в) северне и д) западне фасаде модела А2



Слика 112. Аксонометријски прикази модела А2. Југо-исток (горе) и северозапад (доле)

Изглед комплетне Дајнамо скрипте која врши оптимизацију параметарски променљивих фасада, као и оптимизацију параметарски променљивих сенила на фасади употребом генетског алгоритма приказан је у прилогу 1.

5.10 Упоредни приказ физичких карактеристика фасада изабраних модела

Хипотетички модели су намерно дефинисани тако да имају исте просторно-физичке карактеристике, а једина разлика је у изгледу параметарски променљиве фасаде. На овај начин, упоредна анализа резултата добијених из енергетских симулација, јасно ће показати разлику коју ове фасаде праве. Фасаде хипотетичких модела имају различиту величину отвора, те удео застакљења варира од 8 до 63 процената (табела 23). Хипотетички модели фасада са фиксним димензијама отвора имају исти удео застакљења на јужној и северној, као и на источној и западној страни, док решења добијена из оптимизације имају различити удео застакљења на свим фасадама.

Табела 23. Површине омотача и удео застакљења фасада креираних модела

Омотач [m ²] / застакљење [m ²] / удео застакљења [%]	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Укупно фасада	1940,16/ 172,80/ 8,90	1940,16/ 1228,80/ 63,33	1940,16/ 580,80/ 29,93	1940,16/ 463,08/ 23,87	1940,16/ 679,34/ 35,01	1940,16/ 463,08/ 23,87	1940,16/ 463,08/ 23,87
Јужна фасада	389,04/ 34,56/ 8,88	389,04/ 245,76/ 63,17	389,04/ 116,16/ 29,86	389,04/ 168,72/ 43,37	389,04/ 44,68/ 11,48	389,04/ 168,72/ 43,37	389,04/ 168,72/ 43,37
Источна фасада	581,04/ 51,84/ 8,92	581,04/ 368,64/ 63,44	581,04/ 174,24/ 29,99	581,04/ 107,40/ 18,48	581,04/ 197,86/ 34,05	581,04/ 107,40/ 18,48	581,04/ 107,40/ 18,48
Северна фасада	389,04/ 34,56/ 8,88	389,04/ 245,76/ 63,17	389,04/ 116,16/ 29,86	389,04/ 30,98/ 7,96	389,04/ 238,94/ 61,42	389,04/ 30,98/ 7,96	389,04/ 30,98/ 7,96
Западна фасада	581,04/ 51,84/ 8,92	581,04/ 368,64/ 63,44	581,04/ 174,24/ 29,99	581,04/ 155,98/ 26,84	581,04/ 197,86/ 34,05	581,04/ 155,98/ 26,84	581,04/ 155,98/ 26,84

Укупна количина сунчевог зрачења која упада у објекат током једне целе године, био је главни критеријум одабира оптималних решења. Изузев екстремних вредности које имају хипотетички модели са минималном и максималном величином отвора М1 и М2 (3,27 kWh/m² и 9,28 kWh/m²), оптимална решења О1 и О2 имају приближне вредности хипотетичком моделу са средњом величином отвора М3 (О1 = 5,56 kWh/m²; О2 = 5,93 kWh/m²; М3 = 5,61 kWh/m²). Алтернативни хипотетички модели због сенила имају нешто мању укупну количину сунчевог зрачења (А1 = 3,03 kWh/m²; А2 = 2,51 kWh/m²) од модела М3, О1 и О2. Претпоставка је да ова вредност може бити једнака, па чак и већа од поменутих модела, у случају да су сенила начињена од материјала који рефлектује сунчеву светлост. Међутим, тренутно не постоје унапред програмирана поља која би разматрала и рефлексију материјала током симулације дневног осветљења, али се њихово појављивање очекује у блиској будућности.

Укупне површине отвора такође варирају између модела. Најмању површину има модел М1 (173 m²), а највећу М2 (1.229 m²). У односу на средњу вредност модела М3 (581 m²), оптимално решење О1, са највећим отворима на јужној страни има 20 % већу укупну површину (720 m²), док оптимално решење О2, са највећим отворима на северној страни има 25 % мању укупну површину (463 m²). Алтернативни модели А1 и А2 су настали од хипотетичког модела О1, па имају исту укупну површину (табела 24).

Табела 24. Упоредни приказ вредности функција циља креираних модела

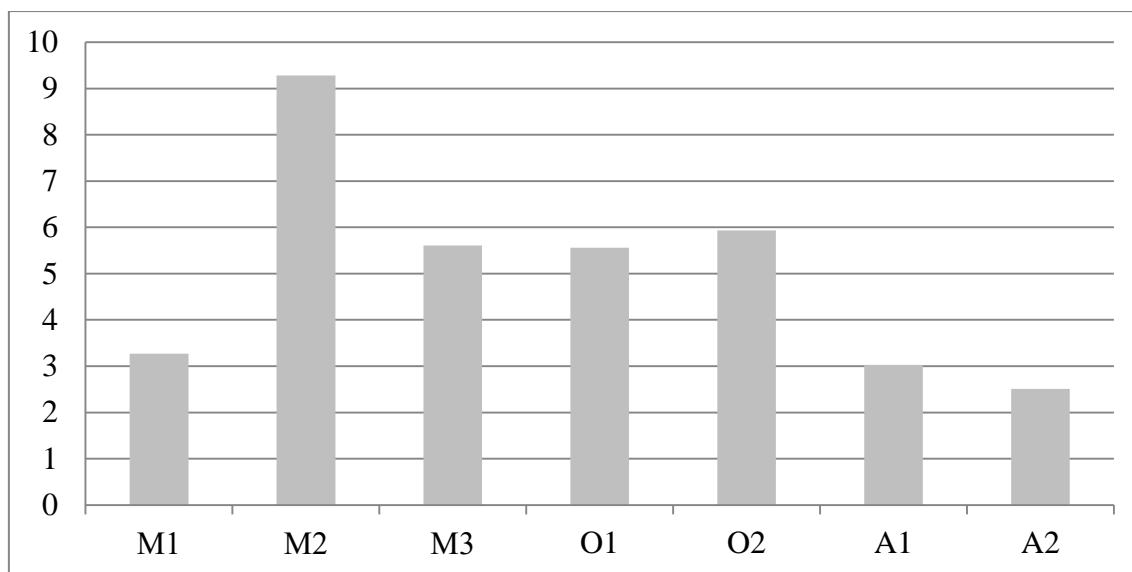
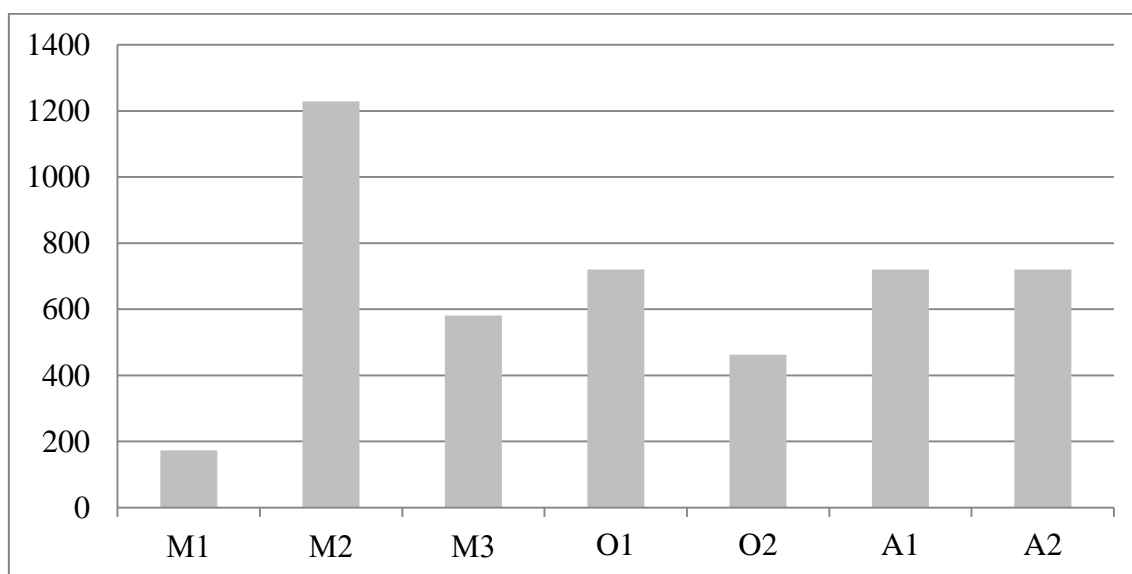
Функције циља	М1	М2	М3	О1	О2	А1	А2
Укупна количина директне светлости [kWh/m ²]	3,27	9,28	5,61	5,56	5,93	3,03	2,51
Укупна површина свих отвора на фасади [m ²]	173	1229	581	720	463	720	720

Алтернативни модел са променљивом дужином сенила А2 има 19 % већу укупну површину сенила од модела А1. Модел А2 има највећу дужину сенила (0,6 метара) на највећим отворима на фасади, а најмању (0,1 метар) на најмањим отворима на фасади, па из тог разлога има већу укупну површину од модела А1, који на свим отворима има фиксну дужину сенила (0,35 метара), (табела 25).

Табела 25. Укупна површина и дужина сенила алтернативних хипотетичких модела А1 и А2

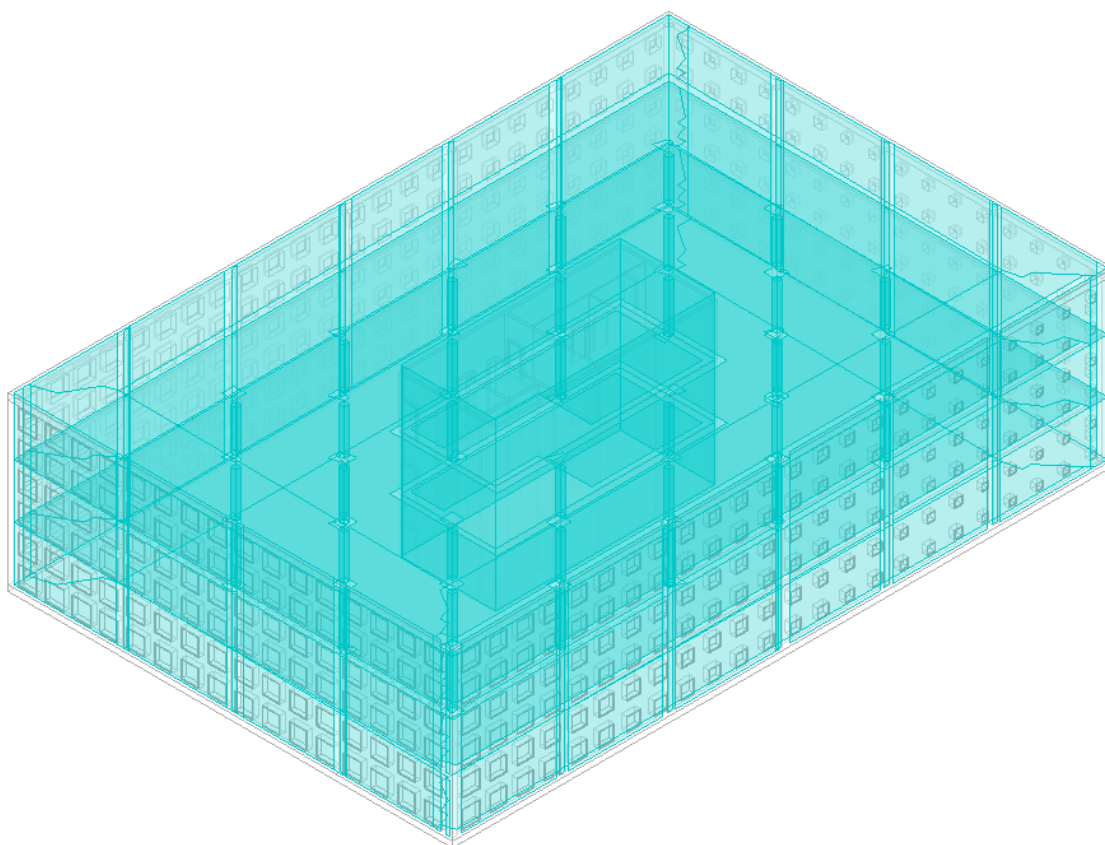
Функције циља	A1	A2
Укупна површина сенила [m ²]	626	769
Дужина сенила [m]	0,35	0,1 – 0,6

Упоредни приказ свих хипотетичких модела дат је у дијаграму 5, за укупну количину директне светлости и дијаграму 6, за укупну површину свих отвора на фасади.

**Дијаграм 5.** Укупна количина директне светлости [kWh/m²] креираних модела**Дијаграм 6.** Укупна површина свих отвора на фасади [m²] креираних модела

6. РЕЗУЛТАТИ ЕНЕРГЕТСКИХ СИМУЛАЦИЈА ИЗАБРАНИХ МОДЕЛА

Дефинисане хипотетичке моделе (M1, M2, M3, O1, O2, A1 и A2), неопходно је претворити у адекватан формат аналитичког модела предвиђеног за израду енергетских симулација (слика 113). Сви аналитички модели се аутоматски конвертују у стандардни енергетски формат - *gbXML*, па се путем интернет конекције отпремају на виртуелну платформу „Грин Билдинг Судео“ (енг. *Green building studio - GBS*), где се врше енергетске симулације. Енергетска симулација сваког од хипотетичких модела траје око пола сата, а пошто се врши на интернет платформи, не зависи од јачине рачунара.



Слика 113. Аксонометријски приказ аналитичког модела

Нумеричка симулација спроводи се у складу са важећим прописима из области енергетске ефикасности, на основу климатских карактеристика локације, података о грађевинским материјалима, елементима и системима, података о електро опреми, уређајима и начину коришћења објекта.

Ово истраживање се фокусира на физичку структуру зграде и њен омотач, како би се увидео директан утицај ових елемената на енергетске перформансе објеката. Специјални услови за климатизовање нису разматрани јер нису релевантни за пројектантску анализу.

6.1 Трансмисиони топлотни губици кроз омотач зграде

Правилник о енергетској ефикасности зграда (2011) захтева испуњење норми везаних за трансмисионе губитке кроз омотач зграде. Сви хипотетички модели се анализирају, како би се утврдило да ли су ове норме задовољене. Физичке карактеристике омотача модела дате су у табели 26. Као што је раније закључено, унутрашња структура свих хипотетичких модела је иста, па су вредности површине термичког омотача, запремине грејног дела и фактора облика зграде* једнаке. Разлика између модела је искључиво у уделу транспарентних површина.

Табела 26. Физичке карактеристике креираних модела

Подаци о згради	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Површина термичког омотача зграде $A [m^2]$	5147,96	5147,96	5147,96	5147,96	5147,96	5147,96	5147,96
Запремина грејаног дела зграде $V [m^3]$	18926,02	18926,02	18926,02	18926,02	18926,02	18926,02	18926,02
Фактор облика зграде $f_o [m^{-1}]$	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Удео транспарентних површина [%]	8,90	63,33	29,93	23,87	35,01	23,87	23,87

*Према Правилнику о енергетској ефикасности зграда (2011), фактор облика зграде је однос површине термичког омотача зграде и њиме обухваћене бруто запремине зграде $f_o = A/V [m^{-1}]$

Површине делова омотача и целог омотача зграде кроз коју се врши трансмисија топлоте, дата је у табели 27. Иста унутрашња структура свих модела резултира истим површинама крова и пода на тлу, док површине спољног зида и прозора варирају.

Табела 27. Површине термичког омотача зграде

Површина термичког омотача зграде $A [m^2]$	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Спољни зид	1767,36	711,36	1359,36	1477,08	1260,82	1477,08	1477,08
Раван кров изнад грејаног простора	1603,90	1603,90	1603,90	1603,90	1603,90	1603,90	1603,90
Прозори, врата	172,80	1228,80	580,80	463,08	679,34	463,08	463,08
Под на тлу	1603,90	1603,90	1603,90	1603,90	1603,90	1603,90	1603,90
Укупно ΣA	5147,96	5147,96	5147,96	5147,96	5147,96	5147,96	5147,96

Формула за израчунавање трансмисионих губитака топлоте (H_{Ts}) је:

$$H_{Ts} = U * A * F_{xi}$$

при чему је:

U - Коefицијент пролаза топлоте грађевинског елемента [$W/(m^2K)$]

A - Површина термичког омотача зграде [m^2]

F_{xi} - Фактор корекције температуре

Правилник о енергетској ефикасности зграда (2011) дефинише фактор корекције температуре. Вредности фактора, дате су у табели 28, поред коефицијената пролаза топлоте раније израчунатих за делове омотача зграде.

Табела 28. Коefицијент пролаза топлоте и фактор корекције температуре

Грађевински елемент	Коefицијент пролаза топлоте $U [W/(m^2K)]$	Фактор корекције температуре F_{xi}
Спољни зид	0,26	1,0
Раван кров изнад грејаног простора	0,15	1,0
Прозори, врата	1,45	1,0
Под на тлу	0,19	0,5

Израчунати површински трансмисиони губици топлоте (H_{Ts}) за сваки део омотача зграде појединачно и укупно за цео омотач, представљени су у табели 29.

Табела 29. Површински трансмисиони губици H_{Ts} [W/K]

Површински трансмисиони губици H_{Ts} [W/K]	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Спољни зид	459,51	184,95	353,43	384,04	327,81	384,04	384,04
Раван кров изнад грејаног простора	240,58	240,58	240,58	240,58	240,58	240,58	240,58
Прозори, врата	250,56	1781,76	842,16	671,46	985,04	671,46	671,46
Под на тлу	152,37	152,37	152,37	152,37	152,37	152,37	152,37
Укупно ΣH_{Ts}	1103,02	2359,66	1588,54	1448,45	1705,80	1448,45	1448,45

Формула за израчунавање линијских трансмисионих губитака топлоте (H_{TB}) је:

$$H_{TB} = \Delta U_{TB} * \Sigma A$$

при чему је:

ΣA - Укупна површина термичког омотача зграде [m^2]

ΔU_{TB} - Усвојена вредност према Правилнику о енергетској ефикасности зграда 0,10 W/(m^2K)

из чега следи да је:

$$H_{TB} = 0,1 * \Sigma A$$

Правилник о енергетској ефикасности зграда (2011) дефинише максималне допуштене вредности специфичних трансмисионих губитака топлоте ($H'_{T max}$). Према овом правилнику, нестамбене зграде са уделом транспарентних површина $> 30\%$ и фактором облика 0,2-0,3, имају вредност $H'_{T max}$ 1,55 W/ m^2K , а нестамбене зграде са уделом транспарентних површина $\leq 30\%$ и фактором облика 0,2-0,3, имају вредност $H'_{T max}$ 0,80 W/ m^2K .

Финално израчунати специфични трансмисиони губици топлоте кроз омотач зграде за све моделе, представљени су у табели 30.

Табела 30. Специфични трансмисиони губици топлоте кроз омотач зграде

Трансмисиони губици топлоте	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Линијски трансмисиони губици [W/K] $H_{TB} = 0,1 * \Sigma A$	514,80	514,80	514,80	514,80	514,80	514,80	514,80
Укупни трансмисиони губици [W/K] $H_T = H_{Ts} + H_{TB}$	1617,82	2874,46	2103,34	1963,25	2220,60	1963,25	1963,25
Специфични трансмисиони губици [W/(m ² K)] $H'_T = H_T / A$	0,31	0,56	0,41	0,38	0,43	0,38	0,38
Дозвољени трансмисиони губици $H'_{T max}$ [W/(m ² K)]	0,8	1,15	0,8	0,8	1,15	0,8	0,8

Специфични трансмисиони губици кроз омотач су код свих хипотетичких модела далеко испод максимално дозвољених вредности које су дефинисане Правилником о енергетској ефикасности зграда (2011). Закључује се да поменути модели имају омотач који је добро топлотно изолован.

6.2 Годишња финална енергија за грејање и хлађење зграде

Енергетске симулације омогућавају увид у нумеричке резултате свих хипотетичких модела, како на годишњем, тако и на месечном нивоу. Програм приказује вредности годишње финалне енергије за грејање и хлађење објекта, месечне финалне енергије за грејање и хлађење објекта, укупне потрошње енергије одвојене према системима, топлотна оптерећења и емисију угљен-диоксида. Енергетске симулације приликом прорачуна ових вредности, узимају у обзир раније наведене информације о локацији и климатским карактеристикама, физичка својства објекта и режим коришћења простора. Иако је интернационална мерна јединица за енергију џул (J), резултати енергетских симулација се

приказују у јединици киловатчас (kWh), према Правилнику о енергетској ефикасности зграда (2011). Исти правилник дефинише годишњу потребну финалну енергију за грејање зграде, $Q_{a,H}$ [kWh/a] и годишњу потребну финалну енергију за хлађење зграде, $Q_{a,C}$ [kWh/a], као рачунски одређену количину енергије која је систему климатизације неопходна да би одржала унутрашња пројектована температура. Годишња финална енергија се односи искључиво на климатизацију, без обзира на врсту погонског горива. Резултати годишње финалне енергије за грејање и хлађење приказани су и по јединици површине и запремине простора. Резултати годишње финалне енергије за грејање простора по јединици површине $Q_{H,nd}$ [kWh/(m²a)], се према Правилнику о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда (2012), користе за одређивање енергетског разреда објекта.

6.2.1 Годишња финална енергија за грејање зграде

Резултати енергетских симулација свих хипотетичких модела, за укупну годишњу финалну енергију за грејање, приказани су у табели 31. Хипотетички модели са минималном и максималном величином отвора (M1 и M2), очекивано су резултирали минималном и максималном потребном енергијом за грејањем објекта. Модел M3 са средњом величином отвора, резултирао је и приближно средњом вредности потребне енергије за грејање.

Оптимално решење O1, са највећим отворима на јужној страни фасаде, приказује 23,8 % мању потрошњу финалне енергије за грејање у односу на модел са средњим вредностима M3. Резултати су показали и да хипотетички модел O2, са највећим отворима на северној страни, има 38,4 % већу потрошњу енергије од модела O1. Велики отвори на северној фасади директно су негативно утицали на годишњу потрошњу енергије неопходну за грејање објекта.

Алтернативни хипотетички модели са фиксном дужином сенила A1 и са променљивом дужином сенила A2, који су изведени од хипотетичког модела O1, приказали су незнатно веће вредности годишње потрошње енергије за грејање у односу на модел O1 (2,5% за модел A1 и 4 % за модел A2). Из наведеног се

закључује да сенила немају велики утицај на потрошњу енергије за грејање објекта. Претпоставља се да би хипотетички модели са сенилима А1 и А2, заједно са моделом О2, који има највеће отворе на северној, а најмање на јужној страни, значајну позитивну разлику могли да остваре при утрошку годишње финалне енергије потребне за хлађење објекта, јер сва три модела спречавају директан упад какх сунчевих зрака у летњем периоду.

Табела 31. Годишња потребна финална енергија за грејање објекта [MWh/a]

Годишња потребна финална енергија за грејање објекта [MWh/a]	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Укупно	38,36	136,30	71,35	54,41	88,25	55,80	56,59

Годишња потребна финална енергија за грејање по јединици површине свих модела приказана је у табели 32. С обзиром на чињеницу да је унутрашња организација свих хипотетичких модела једнака, те укупна површина иста, процентуални однос између модела је остао непромењен (дијаграм 7). Просечна вредност годишње потребне финалне енергије за грејање по јединици површине између модела износи 15,6 kWh/(m²a).

Табела 32. Годишња потребна финална енергија за грејање по јединици површине [kWh/(m²a)]

Годишња потребна финална енергија за грејање објекта по јединици површине [kWh/(m ² a)]	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Укупно	8,38	29,78	15,59	11,89	19,28	12,19	12,36

Резултати годишње потребне финалне енергије за грејање по јединици површине, неопходни су како би се одредио енергетски разред хипотетичких модела. На основу Правилника о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда (2012), модел са минималном величином отвора М1, оптимално решење са највећим отворима на јужној фасади О1 и алтернативна решења са фиксним и променљивим сенилима А1 и А2 имају енергетски разред „А“, јер, на основу Правилника, захтевају годишњу потребну

финалну енергију за грејање по јединици површине $\leq 14 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Хипотетички модел са средњом величином отвора М3 и оптимално решење са највећим отворима на северној фасади О2, имају енергетски разред „В“, јер захтевају годишњу потребну финалну енергију за грејање по јединици површине $\leq 28 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Финално, хипотетички модел са максималном величином отвора М2 има енергетски разред „С“, јер захтева годишњу потребну финалну енергију за грејање по јединици површине $\leq 55 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, (табела 33).

Табела 33. Енергетски разред објекта

	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Енергетски разред	A	C	B	A	B	A	A

Закључује се да хипотетички модели генерално имају добар енергетски разред. Сви модели се, према Правилнику, сматрају као енергетски ефикасни.

Резултати су показали да хипотетички модел са средњим вредностима М3 има енергетски разред „В“, док оптимално решење са највећим отворима на јужној страни О1 има енергетски разред „А“ иако оба модела имају приближно исту укупну количину дневне светлости која упада у објекат током године и сличну укупну површину отвора. То значи да је процес оптимизације употребом генетског алгоритма унапредио енергетска својства хипотетичког модела.



Дијаграм 7. Годишња потребна финална енергија за грејање објекта по јединици површине [kWh/(m²a)]

Годишња потребна финална енергија за грејање објекта по јединици запремине свих хипотетичких модела приказана је у табели 34. Просечна вредност између модела износи $4,11 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{a})$.

Табела 34. Годишња потребна финална енергија за грејање објекта по јединици запремине [$\text{kWh}/(\text{m}^3\text{a})$]

Годишња потребна финална енергија за грејање објекта по јединици запремине [$\text{kWh}/(\text{m}^3\text{a})$]	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Укупно	2,20	7,83	4,1	3,12	5,07	3,20	3,25

6.2.2 Годишња финална енергија за хлађење зграде

Резултати енергетских симулација свих хипотетичких модела, за укупну годишњу финалну енергију за хлађење, приказани су у табели 35. Хипотетички модели са минималном и максималном величином отвора (M1 и M2), резултирали су минималном и максималном потребном енергијом за хлађење објекта. Модел M3 са средњом величином отвора, резултирао је и приближно средњом вредности потребне енергије за хлађење.

Резултати су показали да оптимално решење O1, са највећим отворима на јужној страни фасаде, захтева 2 % мању потрошњу финалне енергије за хлађење у односу на модел са средњим вредностима M3. Оптимално решење O2, са највећим отворима на северној страни, захтева 1 % мању потрошњу финалне енергије за хлађење у односу на модел M3. Закључак је да оба оптимална решења незнатно унапређују енергетска својства модела везана за потрошњу укупну финалне енергије за хлађење, те да дистрибуција величине отвора на фасади нема значајан утицај.

Са друге стране, алтернативни хипотетички модели A1 и A2, праве значајну разлику у потрошњи укупне финалне енергије за хлађење, јер сенилима спречавају директан упад јаким сунчевих зрака током летњег периода. Алтернативни модел са фиксном дужином сенила A1, омогућава 13,74 % мање потрошње енергије за хлађење у односу на оптимални модел O1. Алтернативни

модел А2 са променљивом, оптимизованом дужином сенила, омогућава 16,34 % мање потрошње енергије за хлађење у односу на оптимални модел О1 и 3,12 % мање у односу на модел са фиксним сенилима А1. Алтернативни модели А1 и А2 имају исту изглед фасаде као оптимални модел О1, те се на овај начин директно уочава разлика коју сенила праве. Количина светлости која упада у објекат са сенилима је мања него код оптималног модела О1, али је претпоставка да је би могла бити једнака или чак већа са сенилима начињених од рефлектујућег материјала. Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта код алтернативних модела је толико редукована сенилима, да је готово идентична вредности коју захтева модел са минималном величином отвора М1.

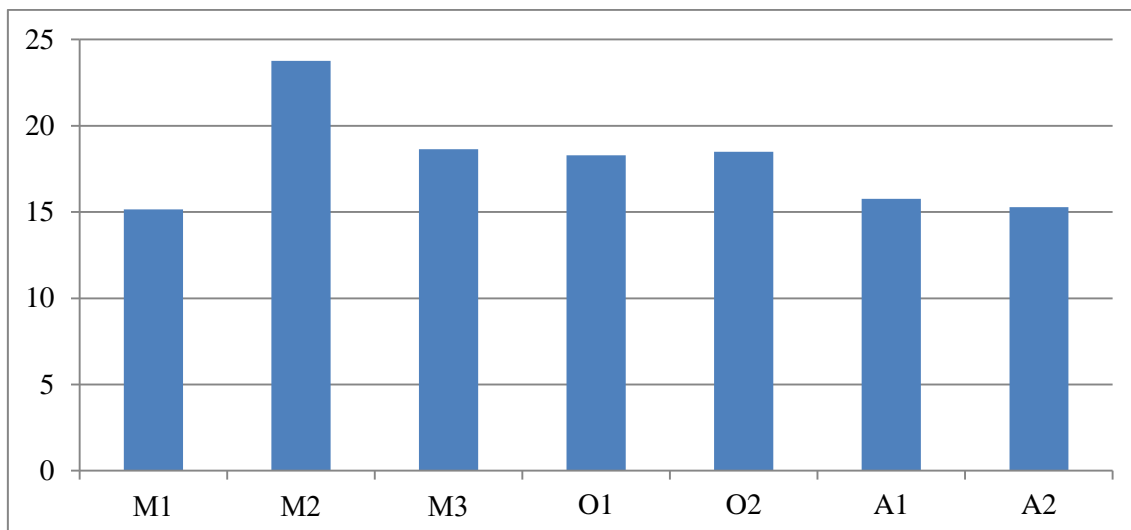
Табела 35. Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта [MWh/a]

Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта [MWh/a]	М1	М2	М3	О1	О2	А1	А2
Укупно	69,37	108,81	85,39	83,66	84,62	72,17	69,99

Годишња потребна финална енергија за хлађење по јединици површине свих модела приказана је у табели 36. Као што је раније наведено, унутрашња организација свих хипотетичких модела је једнака, те укупна површина иста, па је процентуални однос између модела и у овом случају остао непромењен (дијаграм 8). Просечна вредност годишње потребне финалне енергије за хлађење по јединици површине између модела износи 17,91 kWh/(m²a).

Табела 36. Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта по јединици површине [kWh/(m²a)]

Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта по јединици површине [kWh/(m ² a)]	М1	М2	М3	О1	О2	А1	А2
Укупно	15,15	23,77	18,65	18,28	18,49	15,77	15,29



Дијаграм 8. Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта по јединици површине [kWh/(m²a)]

Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта по јединици запремине свих хипотетичких модела приказана је у табели 37. Просечна вредност између модела износи 4,71 kWh/(m³a).

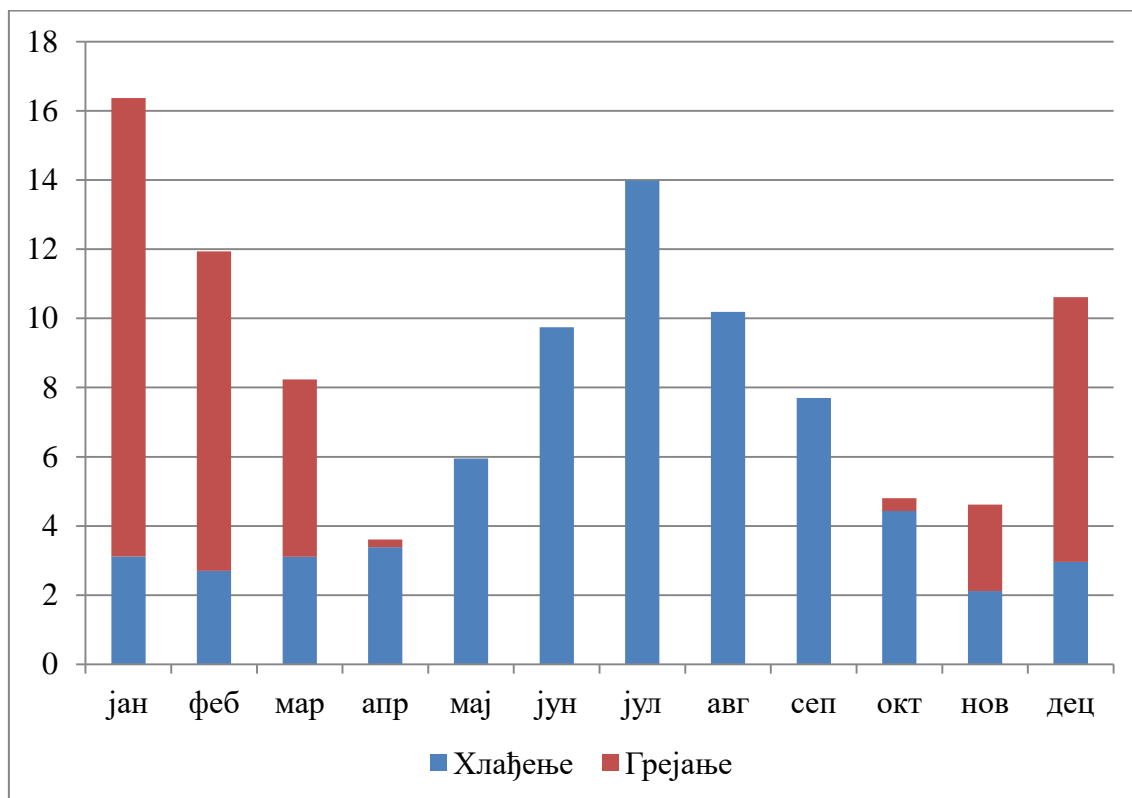
Табела 37. Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта по јединици запремине [kWh/(m³a)]

Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта по јединици запремине [kWh/(m ³ a)]	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Укупно	3,98	6,25	4,90	4,80	4,86	4,14	4,02

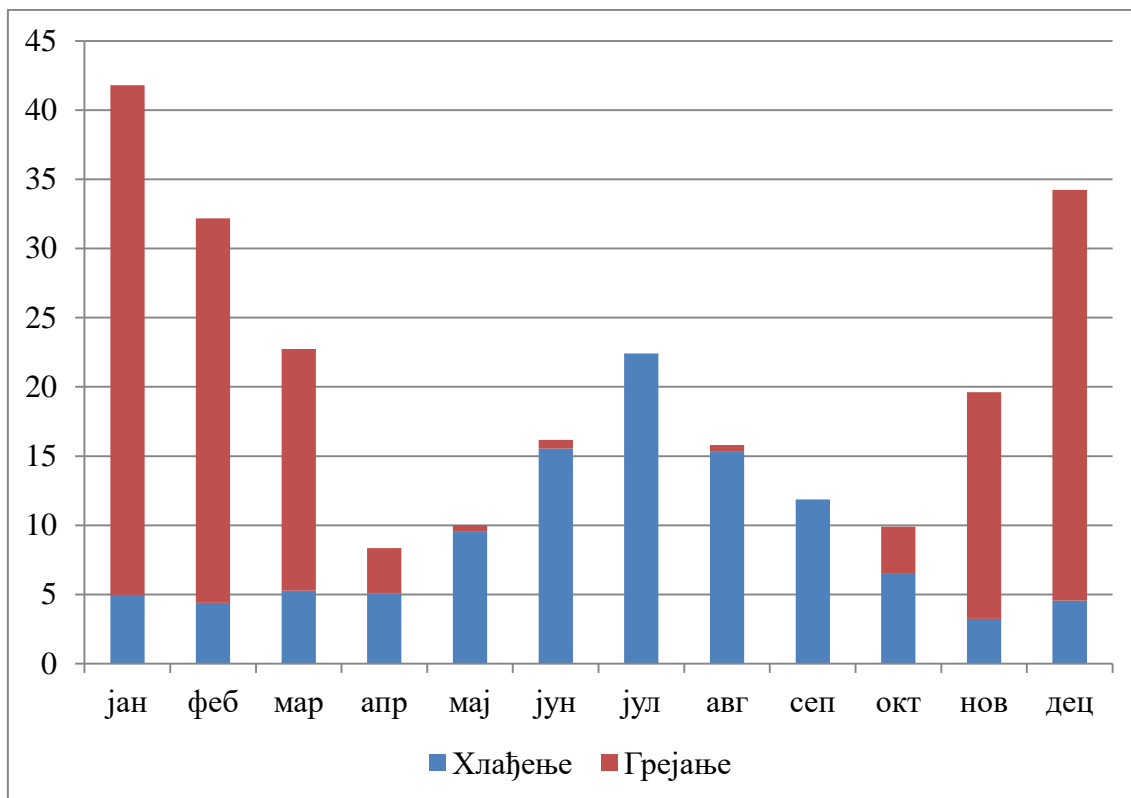
6.2.3 Месечна финална енергија за грејање и хлађење зграде

Месечна потребна финална енергија за грејање и хлађење објекта модела М1, М2, М3, О1, О2, А1 и А2 приказана је у дијаграмима 9, 10, 11, 12, 13, 14 и 15 за сваки модел посебно. Резултати енергетских симулација приказују да се потреба за грејањем објекта поклапа са грејном сезоном Београда, од октобра до априла. Највише енергије за грејање објекта је потребно у јануару, што се поклапа са чињеницом да је јануар најхладнији месец. Потреба за хлађењем објекта је најизраженија од маја до септембра. Највише енергије за хлађење објекта је потребно у јулу, који јесте најтоплији месец. Прелазни период у априлу и октобру, захтева најмање енергије за одржавање пројектних температура.

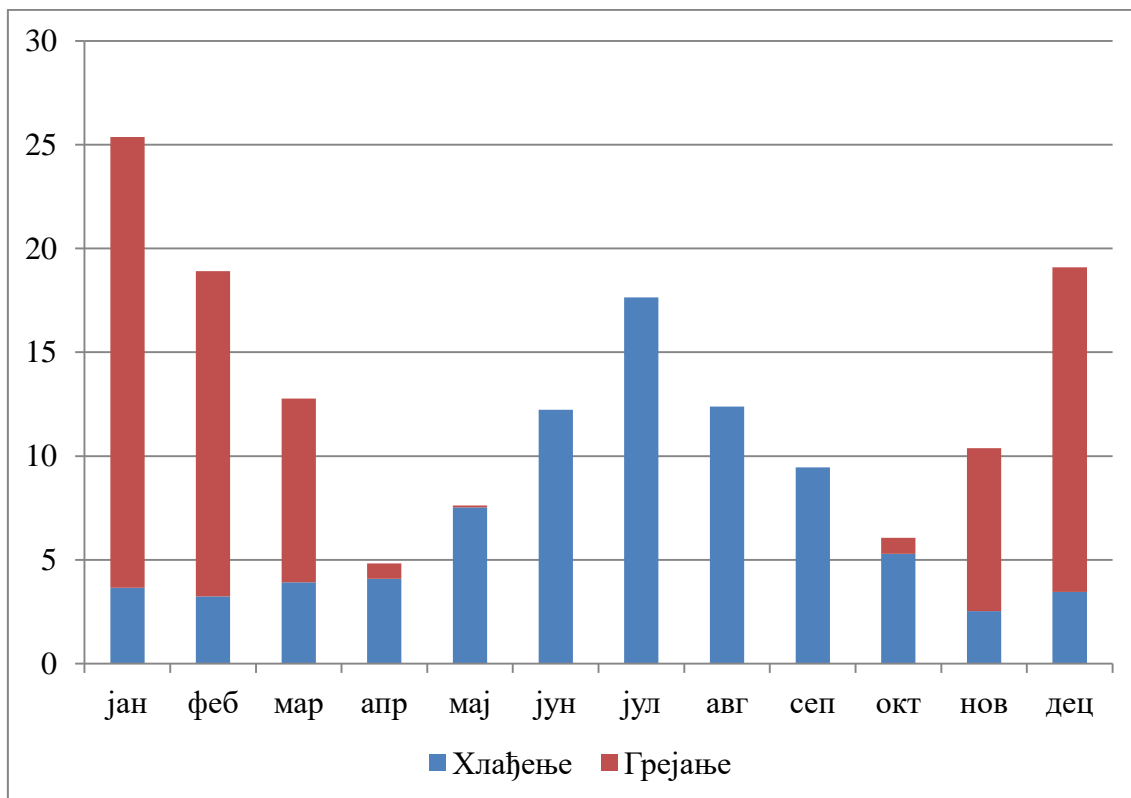
Резултати потрошње месечне финалне потребне енергије за грејање и хлађење објекта се пропорционално осликавају и на резултате годишње финалне енергије, те алтернативни модел са променљивом дужином сенила А2, мање захтева енергије од модела са фиксном дужином сенила А1, али и оптималних модела без сенила (О1 и О2) и модела са средњим димензијама отвора (М3).



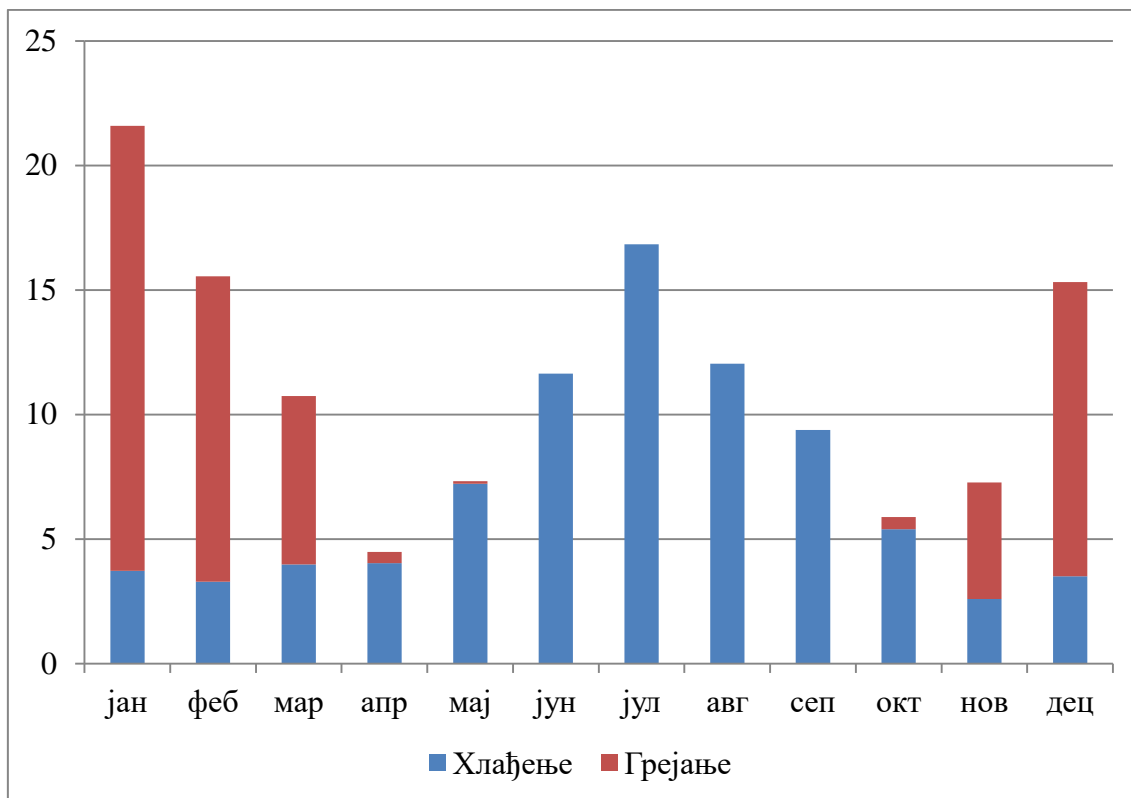
Дијаграм 9. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта М1 [MWh/a]



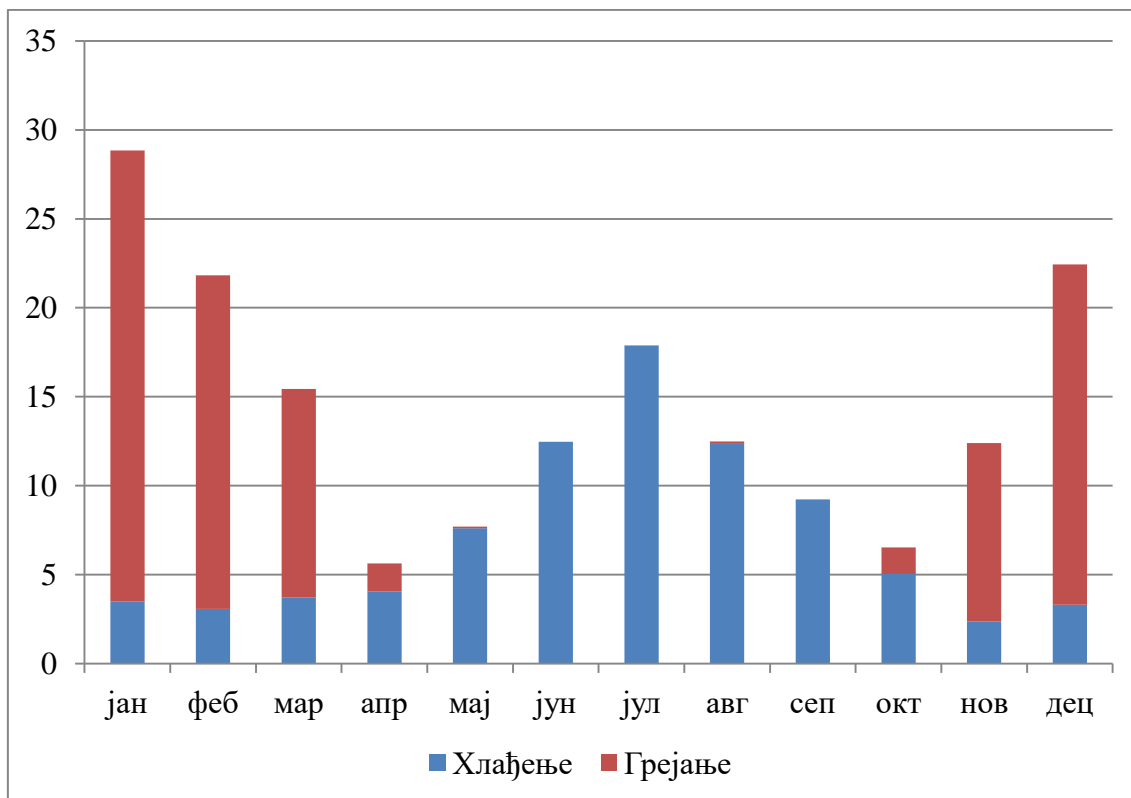
Дијаграм 10. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта М2 [MWh/a]



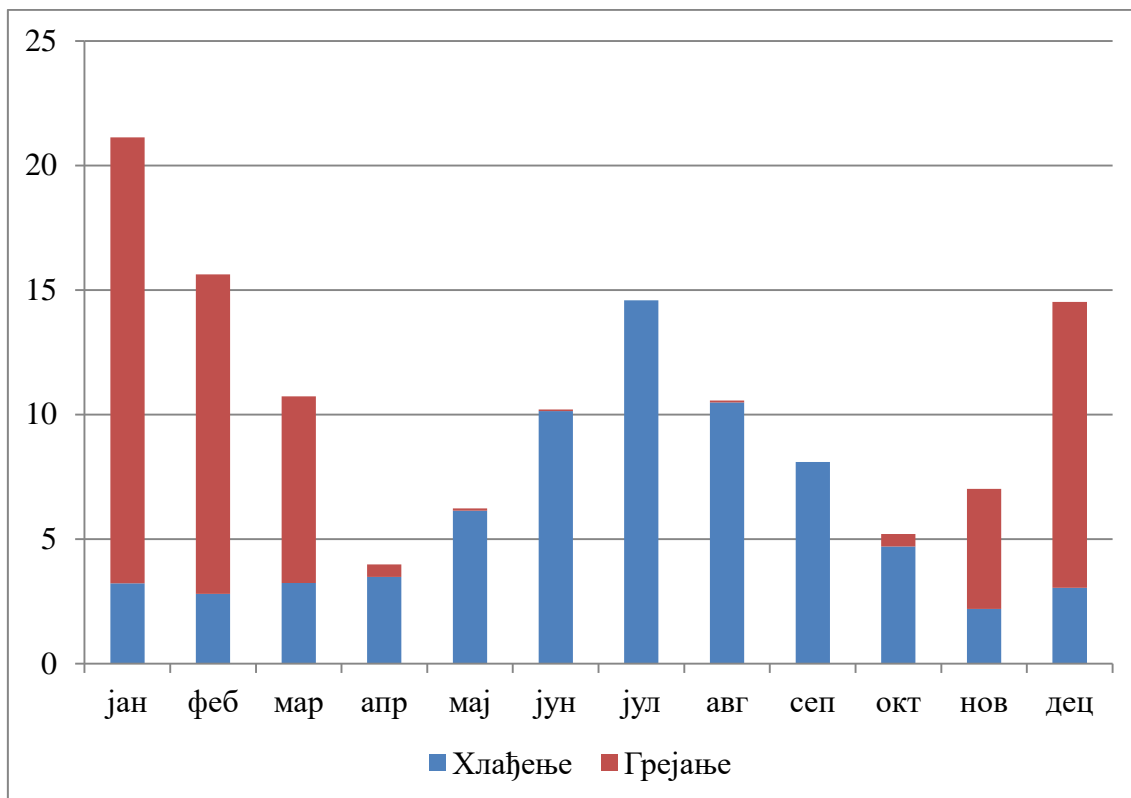
Дијаграм 11. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта М3 [MWh/a]



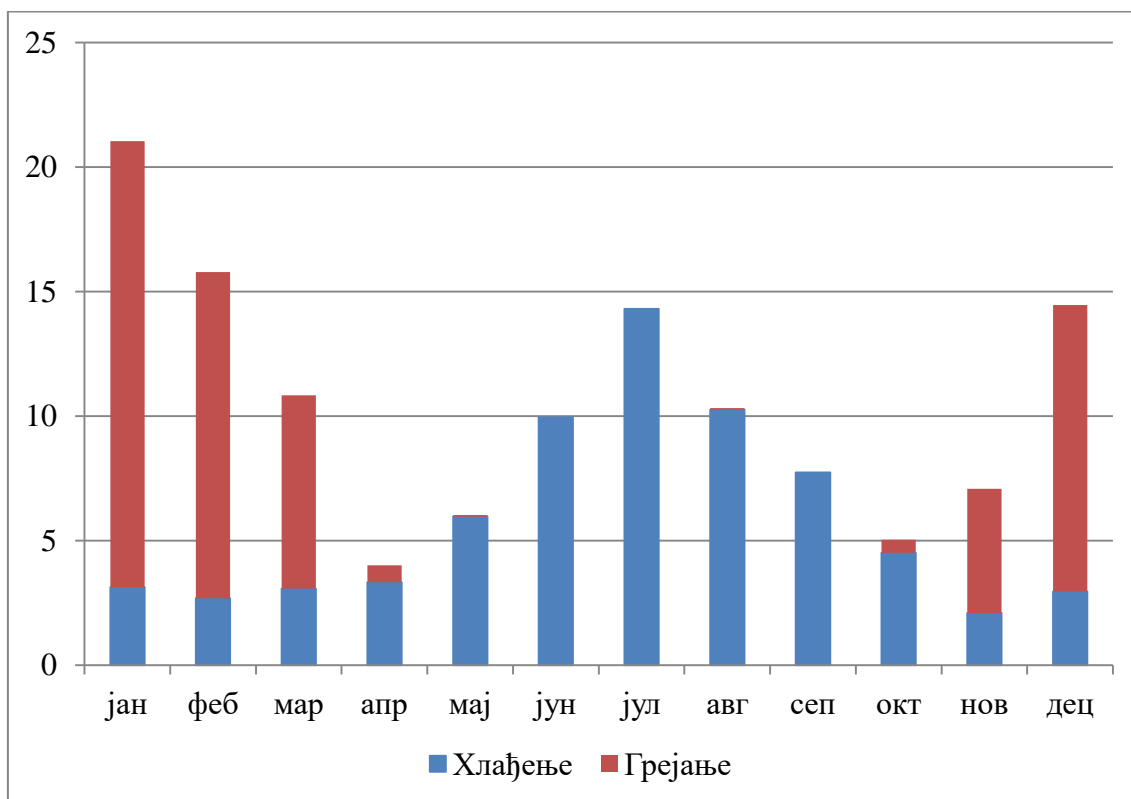
Дијаграм 12. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта О1 [MWh/a]



Дијаграм 13. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта О2 [MWh/a]



Дијаграм 14. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта А1 [MWh/a]



Дијаграм 15. Месечна финална енергија за грејање и хлађење објекта А2 [MWh/a]

6.2.4 Укупна годишња финална енергија раздвојена по системима

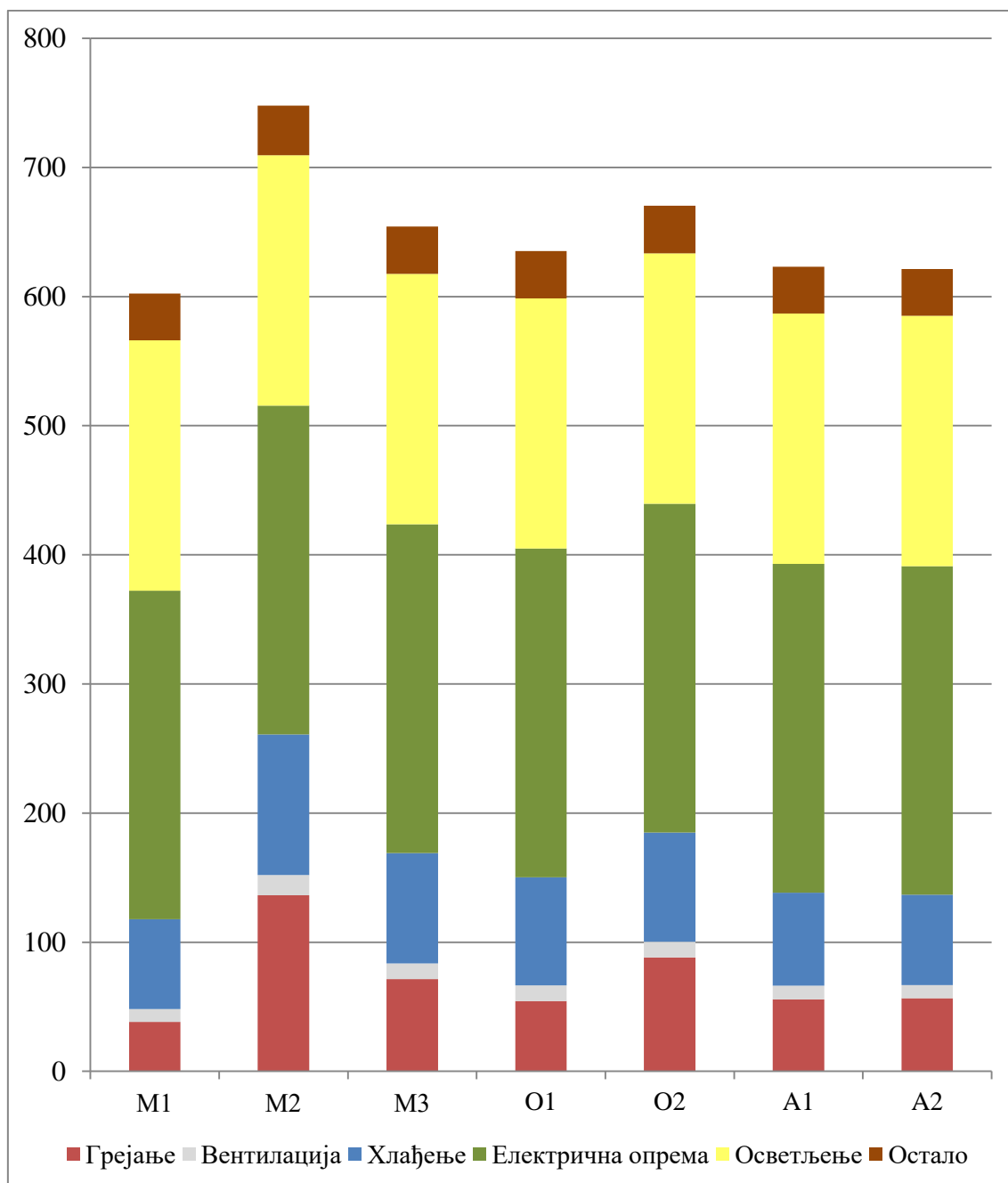
Резултати енергетских симулација свих хипотетичких модела, за укупну годишњу финалну енергију раздвојену по системима, приказани су у табели 38. Резултати су приказани одвојено за компоненте грејања, вентилације, хлађења, електричне опреме и осветљења, као и укупно. Сви хипотетички модели имају исту унутрашњу структуру и режим коришћења простора, па су из тог разлога енергетске симулације дале једнаке вредности потрошње енергије неопходне за осветљење и електричну опрему.

Оптимални хипотетички модел са највећим отворима на јужној фасади О1, укупно троши 5,26 % мање енергије од хипотетичког модела са највећим отворима на северној фасади О2, а 2,91 % мање од модела са отворима средњих димензија М3 и 15,06 % мање од модела са отворима максималних димензија М2. Алтернативни хипотетички модел са променљивим димензијама сенила А2, троши приближно исто енергије током године као и модел са фиксним димензијама сенила А1, али 2,17 % мање од оптималног модела О1 и 5,02 % мање од модела са средњим димензијама отвора М3 (дијаграм 16).

Табела 38. Годишња потребна финална енергија по системима и укупно [MWh/a]

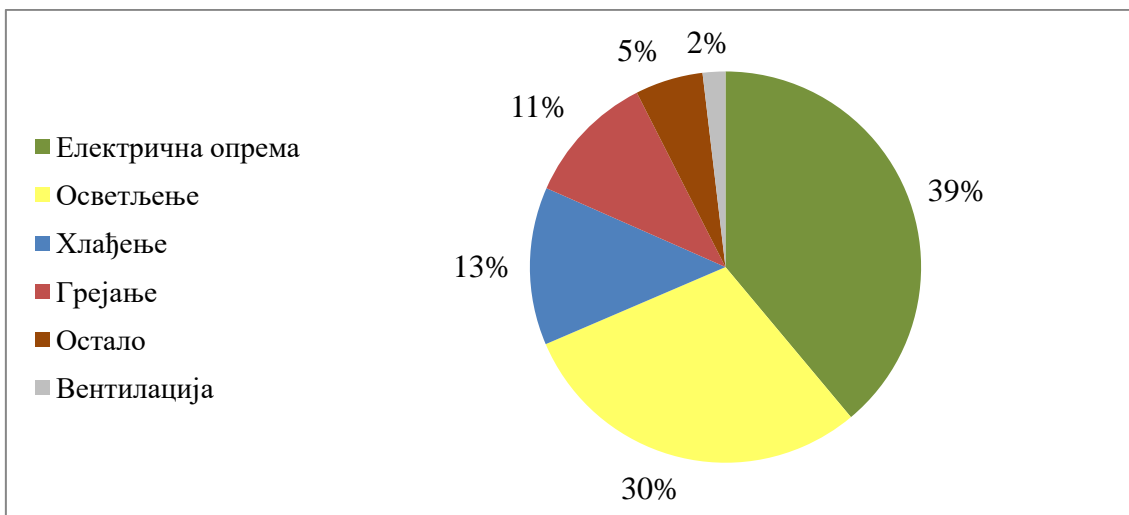
Укупна годишња потребна финална енергија [MWh/a]	М1	М2	М3	О1	О2	А1	А2
Грејање	38,36	136,30	71,35	54,41	88,25	55,80	56,59
Вентилација	9,95	15,77	12,28	12,11	12,15	10,44	10,09
Хлађење	69,37	108,81	85,39	83,66	84,62	72,17	69,99
Електрична опрема	254,61	254,61	254,61	254,61	254,61	254,61	254,61
Осветљење	193,89	193,89	193,89	193,89	193,89	193,89	193,89
Остало*	36,06	38,43	36,72	36,53	36,90	36,30	36,27
Укупно	602,24	747,81	654,24	635,21	670,42	623,21	621,44

*У „остало“ спадају енергија потребна за покретање пумпи за загревање воде и специјалних система за климатизацију, који нису део овог истраживања

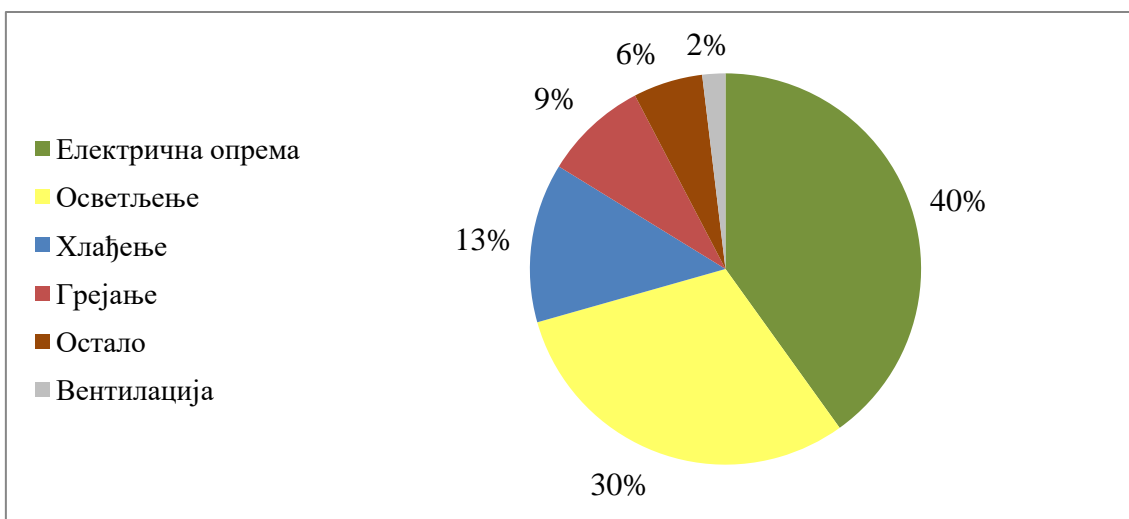


Дијаграм 16. Годишња потребна финална енергија по системима [MWh/a]

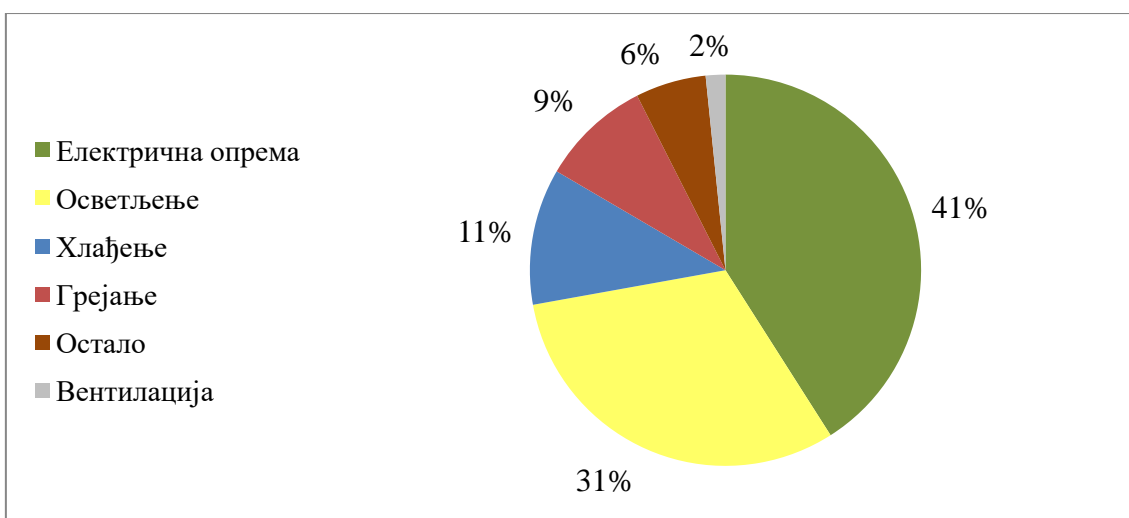
Мање разлике у укупној потрошњи енергије између хипотетичких модела, резултат су великог удела потрошње енергије за електричну опрему (око 40%) и осветљење (око 30%), (дијаграми 17, 18 и 19). Резултати показују да хлађење објекта обухвата око 12 % укупне потрошње енергије, док грејање објекта обухвата око 10 %.



Дијаграм 17. Удео свих система у укупној потрошњи енергије модела М3 [%]



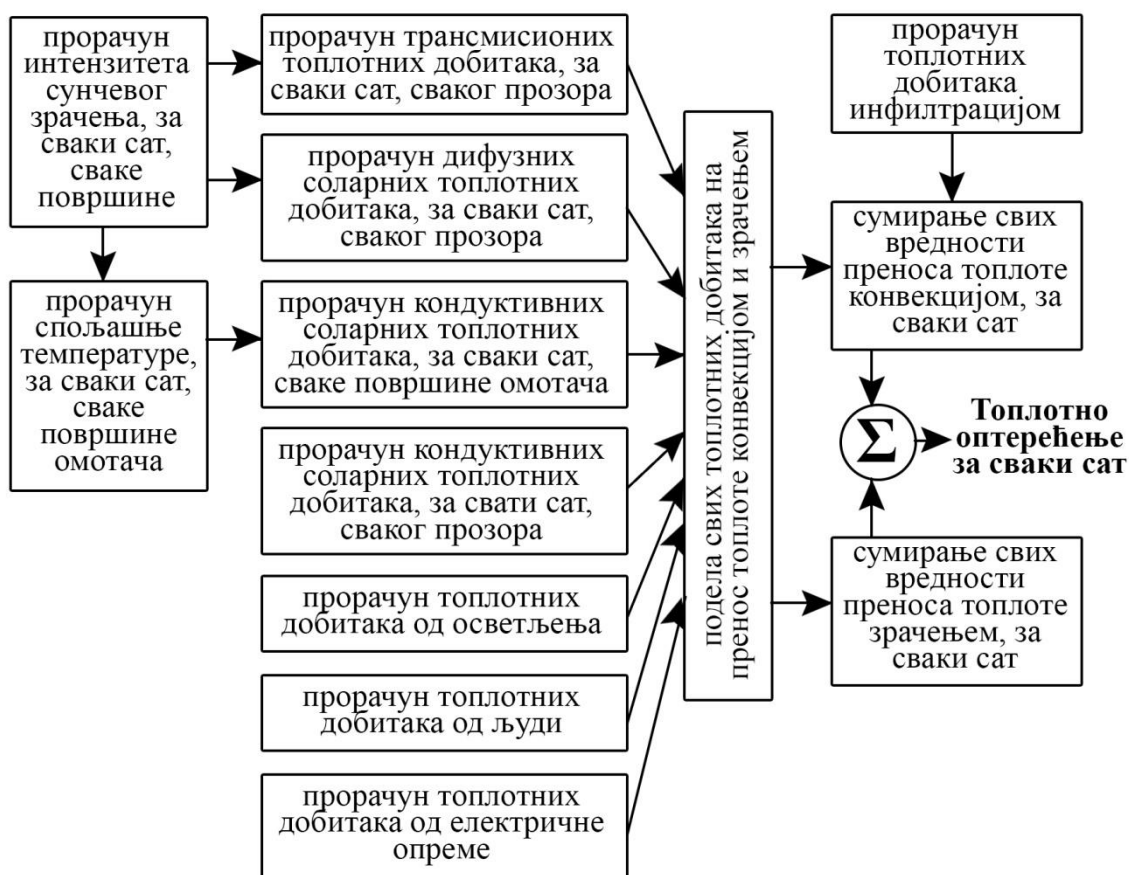
Дијаграм 18. Удео свих система у укупној потрошњи енергије модела О1 [%]



Дијаграм 19. Удео свих система у укупној потрошњи енергије модела А2 [%]

6.3 Топлотна оптерећења

Савремена архитектонска пракса, најчешће захтева прорачуне топлотних оптерећења, како би се према добијеним резултатима планирали грејни и расхладни капацитети елемената опреме термотехничких инсталација. Топлотно оптерећење представља количину енергије коју током најтоплијег периода године треба одвести из објекта, односно током најхладнијег периода године довести у објекат, како би се одржале унутрашње пројектоване температуре (*Todorović et al.*, 2015, стр. 117). Прорачун топлотних оптерећења је сложен процес и обухвата топлотне добитке, односно губитке, свих елемената који утичу на промену температуре, као и друге физичке факторе (променљив интензитет сунчевог зрачења на омотач објекта током дана, акумулациона својства материјала, топлотни добици од осветљења, људи и електричне опреме итд.), (слика 114).



Слика 114. Прорачун топлотног оптерећења за најтоплији период године у „Ревит“-у.
Извор: Ауторска илустрација према *Autodesk Knowledge Network*

Јединица за тоplotно оптерећење је ват (W). Резултати симулација показују која је максимална количина енергије изражена овом јединицом, потребна климатизацији да у најтоплијем, односно најхладнијем периоду одржи пројектне температуре. Најхладнији период године се дефинише преко спољних очекиваних температура, док се за најтоплији период усваја тзв. „летњи пројектни дан“. Летњи пројектни дан дефинишу вредности температура спољашњег ваздуха за сваки сат у периоду од 24 часа (*Todorović et al.*, 2015, стр. 118). Вредности тоplotних оптерећења се приказују за цео објекат, али и делове објекта и индивидуалне просторије, уз приказ елемента који директно утичу на њих (зидови, прозори и врата, кровови, осветљење, вентилација, проветравање, електрична опрема, људи итд). Посебно је значајан приказ вредности тоplotних оптерећења од зидова и прозора за сваку фасаду понаособ. На овај начин, може да се анализира утицај оријентације, као и величине отвора на потрошњу енергије за грејање и хлађење.

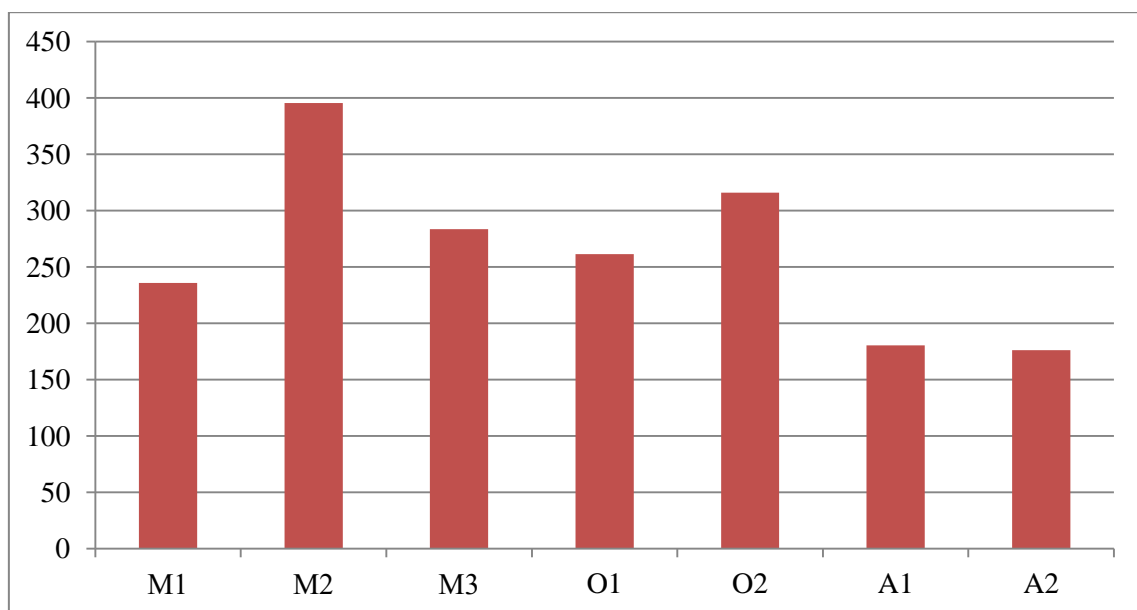
6.3.1 Топlotно оптерећење за најтоплији период године

Резултати тоplotних оптерећења за најтоплији период године, приказани су у табели 39. Урачуната су и тоplotна оптерећења од људи, осветљења и електричне опреме. Резултати показују да је алтернативном хипотетичком моделу са променљивом дужином сенила А2, потребно 32,63% мање енергије за одржавање пројектне температуре током најтоплијег периода у години, у односу на исти такав модел без сенила О1. Правилно постављена сенила на основу резултата добијених из оптимизације, директно су утицала на смањење тоplotних оптерећења прозора (чак 85,59 % за тоplotне добитке преко кондукције* прозора и 81,2 % за директне соларне добитке, у односу на модел О1) и зидова. Са друге стране, модел са највећим отворима на јужној страни О1, захтева 5,45 % мање енергије за хлађење у најтоплијем периоду године у односу на модел са највећим отворима на северној страни О2, што показује да је оптимизација фасаде дала резултате (дијаграм 20).

*Кондукција или провођење је процес преноса топлоте директно кроз материјал при чему не долази до премештања саставних делова материјала. (*Welty et al.*, 1976)

Табела 39. Топлотно оптерећење за најтоплији период године [kW]

Компоненте	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Људи	63,96	75,12	65,25	59,27	65,15	67,87	65,57
Осветљење	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31
Електрична опрема	43,50	43,50	43,50	43,50	43,50	43,50	43,50
Проветравање	6,40	6,46	6,49	6,52	6,26	3,11	3,22
Вентилација	25,63	26,38	26,06	26,07	24,77	25,00	25,20
Кров	9,51	9,78	9,76	9,61	9,56	9,36	9,50
Међуспратне таванице	8,02	47,80	23,68	21,78	25,67	3,21	2,80
Спољашњи зидови	-1,43	-17,35	-7,00	1,09	-7,14	-18,55	-16,81
Преградни зидови	-1,53	2,19	-0,01	-0,01	-0,11	-2,12	-2,20
Готови подови	-1,17	-7,14	-3,55	-3,73	-2,98	-2,03	-1,61
Под на тлу	-0,25	-0,42	-0,33	-0,33	-0,32	-0,24	-0,23
Прозори - кондукција	4,15	21,47	12,57	9,09	15,99	1,41	1,31
Прозори – директни соларни добици	16,51	106,60	53,93	49,99	57,15	13,24	9,40
Врата	-0,85	-0,75	-0,80	-0,82	-0,81	-0,94	-0,95
Укупно	205,79	346,95	262,80	255,30	270,01	176,14	172,01



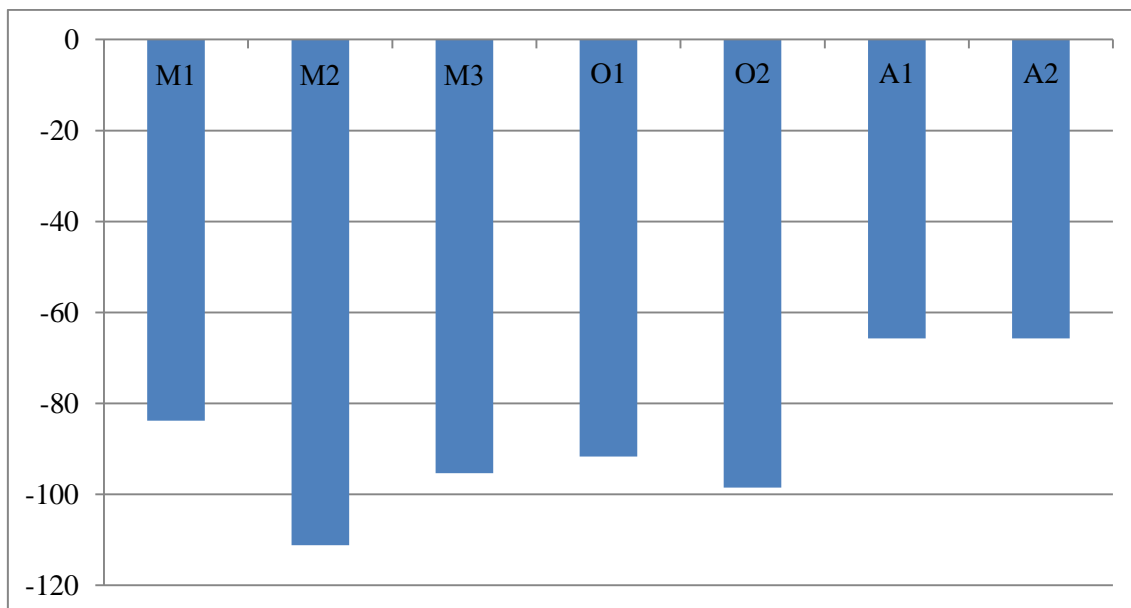
Дијаграм 20. Топлотно оптерећење за најтоплији период године [kW]

6.3.2 Топлотно оптерећење за најхладнији период године

Резултати топлотних оптерећења за најхладнији период године, приказани су у табели 40. Топлотна оптерећења од људи, осветљења и електричне опреме се не рачунају најхладнији период године, јер ове компоненте не могу да смањују температуру простора. Резултати показују да алтернативни модели А1 и А2 захтевају 31,09 % мање енергије за темперирање простора, у односу на оптимални хипотетички модел са највећим отворима на јужној фасади О1, што значи да постојање сенила, спречава и одавање топлоте. Модели са фиксном дужином сенила А1 и променљивом дужином сенила А2 имају приближно исто оптерећење прозора и спољашњих зидова, па је закључак да оптимизација дужине сенила нема великог утицаја. Са друге стране, топлотно оптерећење прозора хипотетичког модела са највећим отворима на јужној страни О1, је 32,34% мање у односу на хипотетички модел са највећим отворима на северној страни О2, док је топлотно оптерећење од зидова модела О1, за 14, 22 % веће од модела О2 (дијаграм 21). Ови резултати показују да површине на јужној фасади одају мање топлоте од истих површина на северној фасади у најхладнијем периоду године, јер чак и тада примају одређену количину топлоте од сунчевог зрачења.

Табела 40. Топлотно оптерећење за најхладнији период године [kW]

Компоненте	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Проветравање	-16,70	-16,38	-16,60	-16,65	-16,86	-8,40	-8,64
Вентилација	-39,90	-40,03	-40,10	-40,04	-40,15	-39,77	-39,75
Кров	-7,83	-7,67	-7,76	-7,78	-7,74	-7,86	-7,87
Међуспратне таванице	-0,23	-0,14	-0,20	-0,19	-1,86	-0,34	-0,33
Спољашњи зидови	-15,59	-5,16	-9,49	-10,48	-8,99	-6,45	-6,73
Преградни зидови	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Готови подови	0,23	0,14	0,20	0,19	0,19	0,34	0,33
Под на тлу	0,06	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06
Прозори - кондукција	-6,85	-41,71	-21,48	-16,80	-24,83	-3,27	-2,80
Укупно	-83,80	-111,20	-95,35	-91,69	-98,50	-65,70	-65,72



Дијаграм 21. Топотно оптерећење за најхладнији период године [kW]

6.4 Анализа емисије угљен-диоксида

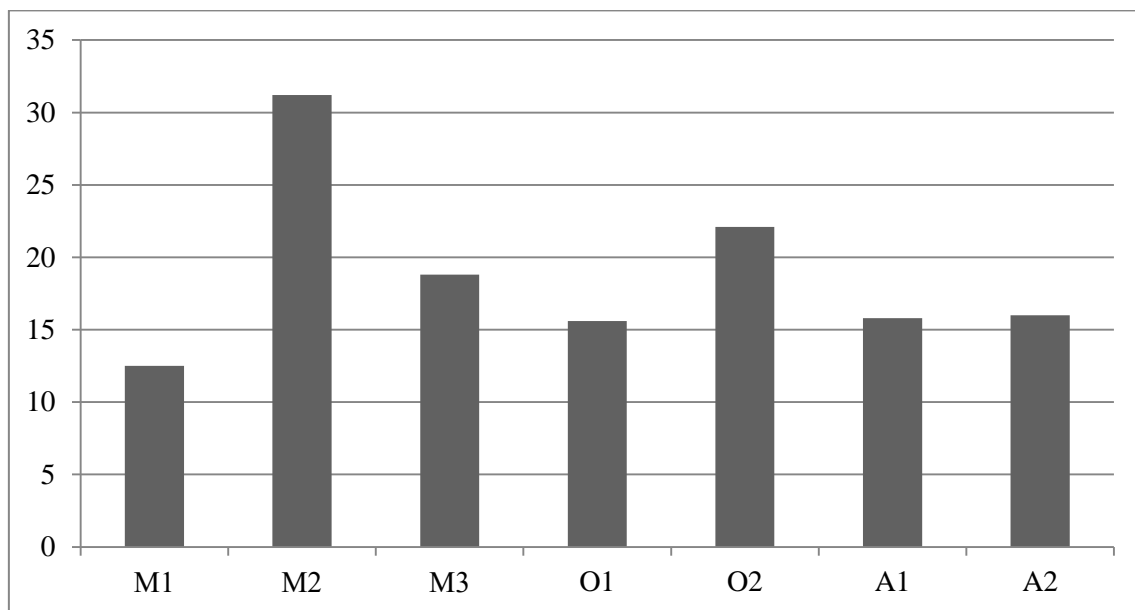
Количина утрошене енергије је важна и са еколошког аспекта. Производња енергије за грејање, односно производња електричне енергије, захтева сагоревање фосилних горива, те резултира емисијом угљен-диоксида. За изабрану локацију и намену објекта, претпоставља се, да се грејање обавља путем природног гаса, док се за хлађење користи електрична енергија. Према Правилнику о енергетској ефикасности зграда (2011), емисија угљен-диоксида се изражава у метричким тонама и килограму по метру квадратном површине објекта. Програм аутоматски рачуна ове вредности на основу задате локације, климатских услова, режима коришћења простора, физичке структуре објекта, као и типа горива које се користи за грејање објекта.

Резултати емисије угљен-диоксида свих хипотетичких модела, приказани су у табели 41. Резултати показују да најмање угљен-диоксида емитује модел са минималном величином отвора М1. Након модела М1, најмању емисију угљен-диоксида остварује оптимално решење са највећим отворима на јужној страни О1. Модел О1 остварује за нијансу боље резултате и од алтернативних решења са

фиксном и променљивом дужином сенила А1 и А2, док емитује чак 17,03 % мање угљен-диоксида у односу на модел са средњом величином отвора М3 и 29,42 % мање у односу на оптимално решење са највећим отворима на северној страни О2. Највише угљен-диоксида емитује модел са максималном величином отвора М2, чак duplo више у односу на оптимални модел О1 (дијаграм 22).

Табела 41. Годишња емисија угљен-диоксида

Годишња емисија угљен-диоксида	М1	М2	М3	О1	О2	А1	А2
Емисија CO ₂ [t]	12,5	31,2	18,8	15,6	22,1	15,8	16,0
Емисија CO ₂ [kg/m ²]	2,71	6,77	4,08	3,38	4,80	3,43	3,47



Дијаграм 22. Годишња емисија угљен-диоксида

6.5 Дискусија

Енергетске симулације су урађене на седам хипотетичких модела пословних објеката, са различитим варијантама изгледа фасада.

- Модел М1: хипотетички модел објекта са фасадом која има минималне фиксне димензије отвора од 0,6 метара,

- Модел М2: хипотетички модел објекта са фасадом која има максималне фиксне димензије отвора од 1,6 метара,

- Модел М3: хипотетички модел објекта са фасадом која има средње фиксне димензије отвора од 1,2 метара,

- Модел О1: хипотетички модел објекта са оптималним изгледом фасаде, која има највеће димензије отвора на јужној фасади,

- Модел О2: хипотетички модел објекта са оптималним изгледом фасаде, која има највеће димензије отвора на северној фасади,

- Модел А1: хипотетички модел објекта изведен од модела О1, са фиксном дужином сенила од 0,35 метара,

- Модел А2: хипотетички модел објекта изведен од модела О1, са оптималном променљивом дужином сенила од 0,1 до 0,6 метара.

Резултати енергетских симулација, недвосмислено су показали да правилним позиционирањем променљивих елемената на фасади, могу се побољшати енергетска својства хипотетичких модела.

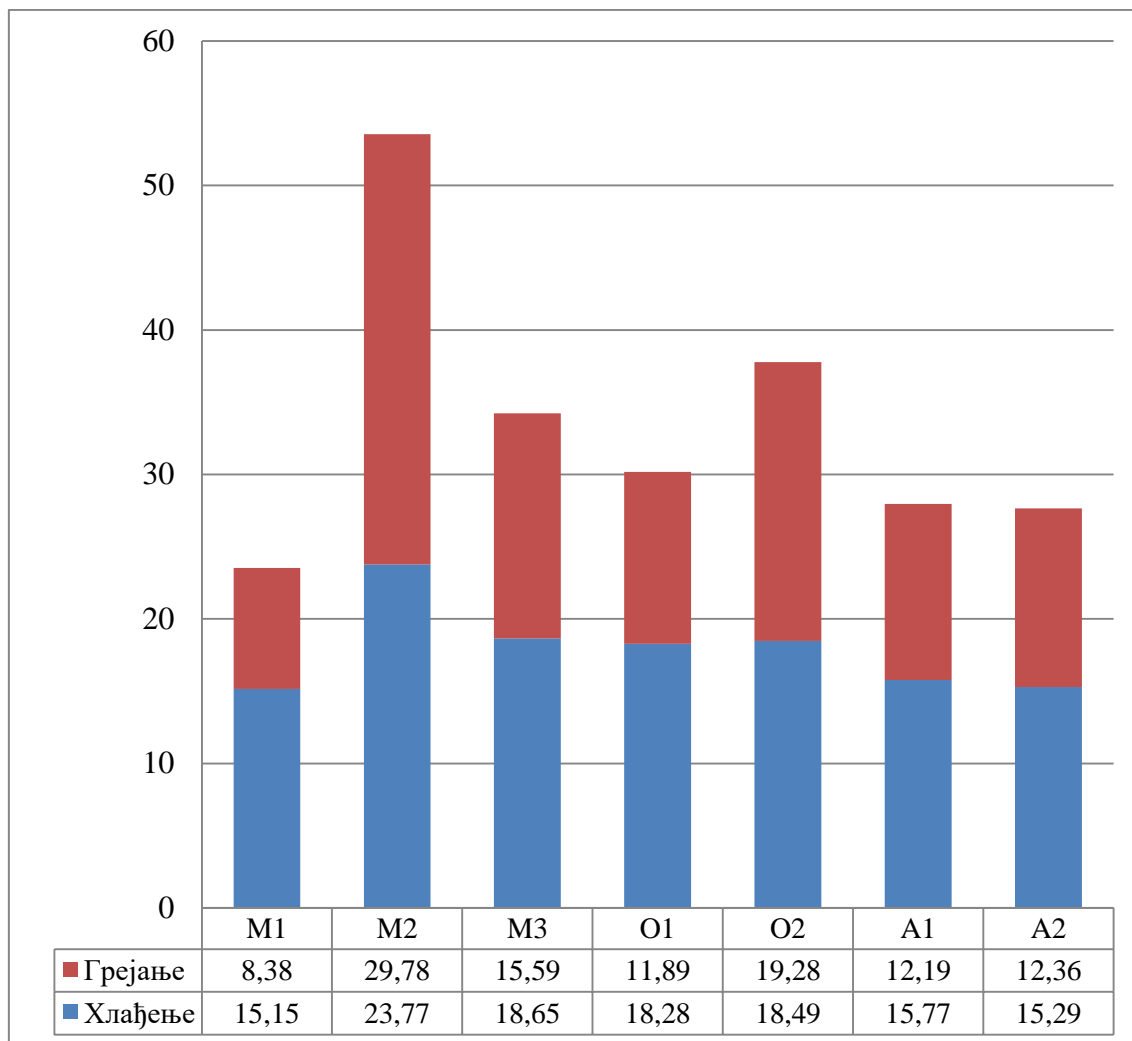
Хипотетички модел са минималним фиксним димензијама отвора М1 и хипотетички модел са максималним фиксним димензијама отвора М2, показали су да величина отвора директно утиче на количину енергије потребну за грејање и хлађење објекта. Хипотетички модел М1 троши најмање, а хипотетички модел М2 највише енергије током године. Последице, хипотетички модел са минималном димензијом отвора, прима најмању количину дневне светлости унутар објекта, док модел са максималном димензијом отвора, прима највише светлости. Модел

са средњим вредностима величине отвора М3, захтева приближно исто више количине енергије од модела М1, а мање од модела М2. Решења са екстремним вредностима М1 и М2, као и решење са средњим вредностима М3, послужила су као референтан оквир за валоризацију добијених оптималних решења.

Хипотетички модел О1, настао из процеса оптимизације, при којој је генетски алгоритам одредио највеће димензије отвора на јужној страни, са градацијским опадањем димензија ка северној страни, резултирао је знатно мањом количином енергије потребном за грејање од других хипотетичких модела. Истраживање је показало, да алтернативна решења са фиксном и променљивом дужином сенила А1 и А2, настала од изгледа фасаде модела О1, не захтевају мање енергије за грејање објекта од модела О1. Закључак је да постојање сенила не умањује потрошњу енергије за грејање објекта. Оптимално решење са највећим отворима на северној страни О2, захтева знатно више енергије за грејање од модела О1, А1, А2 и М3, што показује да правилно позиционирање отвора на фасади, директно утиче на потрошњу енергије за грејање објекта.

Са друге стране, алтернативни хипотетички модели А1 и А2 су знатно умањили потребу за хлађењем објекта. Количина упада директног сунчевог зрачења је најмања код ових модела, али је претпоставка да се знатно може поправити, уколико су сенила начињена од рефлектујућег материјала. Хипотетички модел А2 са променљивом дужином сенила добијеном из процеса оптимизације, захтева најмање енергије за хлађење објекта, јер правилно позиционирање сенила пружа заштиту од директних јаких сунчевих зрака током лета. Оптимално решење са највећим отворима на јужној страни О1, захтева мање енергије и за хлађење од оптималног решења са највећим отворима на северној страни О2, с тим што је сада та разлика занемарљива. Из тога се закључује да распоред величине отвора на фасади нема много утицаја на утрошак енергије за хлађење објекта.

Резултати годишње финалне енергије за грејање и хлађење објекта међусобно су упоређени на дијаграму 23.



Дијаграм 23. Годишња финална енергија за грејање и хлађење објекта [MWh/a]

Топлотна оптерећења за најтоплији и најхладнији период године, у највећој мери осликавају односе укупне потрошње енергије за грејање и хлађење хипотетичких модела на годишњем нивоу. Специфично, резултати су показали да алтернативни хипотетички модели А1 и А2, знатно редукују топлотна оптерећења компоненти зидова и прозора за хлађење објекта, јер појава сенила умањује топлотне добитке од директног сунчевог зрачења на овим површинама.

Укупно, најмању количину енергије троши модел М1, затим следи модел са променљивом дужном сенила А2, те А1, О1, М3, О2 и финално М2.

На основу свих резултата добијених из оптимизације и енергетских симулација извршено је рангирање модела и приказано у табели 42.

Табела 42. Ранг хипотетичких модела према резултатима добијених из оптимизације и енергетских симулација

	M1	M2	M3	O1	O2	A1	A2
Укупна количина директне светлости [kWh/m ²]	3,27	9,28	5,61	5,56	5,93	3,03	2,51
	5	1	3	4	2	6*	7*
Укупна површина свих отвора на фасади [m ²]	173	1229	581	720	463	720	720
	5	1	3	2	4	2	2
Годишња потребна финална енергија за грејање објекта по јединици површине [kWh/(m ² a)]	8,38	29,78	15,59	11,89	19,28	12,19	12,36
	1	7	5	2	6	3	4
Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта по јединици површине [kWh/(m ² a)]	15,15	23,77	18,65	18,28	18,49	15,77	15,29
	1	7	6	4	5	3	2
Топлотно оптерећење за најтоплији период године [kW]	205,79	346,95	262,80	255,30	270,01	176,14	172,01
	3	7	5	4	6	2	1
Топлотно оптерећење за најхладнији период године [kW]	-83,80	-111,20	-95,35	-91,69	-98,50	-65,70	-65,72
	3	7	5	4	6	1	2
Укупна годишња потребна финална енергија [MWh/a]	602,24	747,81	654,24	635,21	670,42	623,21	621,44
	1	7	5	4	6	3	2
Емисија CO ₂ [t]	12,5	31,2	18,8	15,6	22,1	15,8	16,0
	1	7	5	2	6	3	4

**Претпоставка је да се количина осветљења знатно може унапредити, уколико су сенила начињена од рефлектујућег материјала*

Узимајући у обзир све резултате добијене из оптимизације и енергетских симулација, закључује се да је најоптималније решење хипотетички модел са променљивом дужином сенила А2, затим следи хипотетички модел са фиксном дужином сенила А1, те оптимални хипотетички модел са највећим отворима на јужној фасади О1, затим модели М3, О2, М1 и М2. (табела 43). Модел са највећом фиксном величином отвора М2, троши највише енергије и емитује највише угљен-диоксида, па је из тог разлога означен као најнеефикаснији, док модел са најмањом фиксном величином отвора М1, не задовољава минималну неопходну количину дневне светлости која упада у објекат.

Табела 43. Коначан ранг хипотетичких модела

	1	2	3	4	5	6	7
Коначан ранг модела	А2	А1	О1	М3	О2	М1	М2

Алтернативни хипотетички модел са променљивом дужином сенила А2, изведен од оптималног хипотетичког модела са највећим отворима на јужној страни О1, укупно је остварио најбољи однос између количине осветљења и утрошка финалне енергије. Алтернативни модел А2 троши 20,72 % мање енергије за грејање и 18,02 % мање енергије за хлађење од хипотетичког модела са средњом фиксном величином отвора М3, за приближно исту укупну површину отвора. Хипотетички модел А2 емитује и 14,9 % мање угљен-диоксида од модела М3.

7. ЗАКЉУЧАК

Коришћење рачунара, већ одавно је неизоставан део савремене архитектонске праксе. Међутим, пребацивање процеса пројектовања са дводимензионалног на тродимензионални ниво је релативно нова појава, посебно у домаћим условима. Раније су рачунари служили само као алат за бржу израду архитектонских планова, док сада пружају могућност свеобухватног приказивања реалних карактеристика будућег објекта, креирањем хипотетичких модела. Хипотетички модел даје увид у стварне карактеристике предвиђене локације и временских услова везаних за ту локацију, режима коришћења простора, физичке структуре објекта итд. Над хипотетичким моделом могу да се врше разне симулације, које приказују механичка, енергетска и друга својства објеката. Унапређење ових својства, до сада је било могуће једино методом по којој корисник сваки пут мануелно мења одређене елементе у моделу, те поново врши симулације и анализира добијене резултате. Овај процес је веома спор, али и неизван, јер није увек случај да одређена промена на моделу резултира његовим бољим карактеристикама.

Оптимизација употребом генетског алгоритма унапређује ову методологију, јер пружа могућност да програм самостално тражи боља решења, на основу услова и ограничења која је поставио корисник. На овај начин, аутоматски се анализира много већи број решења, за знатно краће време. Финално, корисник треба само да одабере једно од понуђених оптималних решења на основу захтева пројекта, изгледа решења или личних аспирација.

Циљ овог истраживања је био приказ методологије оптимизације употребом генетског алгоритма интегрисане у једном БИМ програму. Предност ове методологије је преузимање свих информација неопходних за вршење симулација, директно из модела. Интегрисан приступ је посебно користан, јер не дозвољава губитак информација између процеса моделовања, оптимизације и енергетских симулација, као што би то био случај употребом више програма. Истраживање је имало за циљ и да покаже да је оптимизацијским процесом могуће унапредити енергетска својства хипотетичког модела.

Задаци истраживања су били фокусирани на идентификацију променљивих параметара фасада, креирање скрипте која врши оптимизацију употребом генетског алгорита, користећи променљиве параметре са њиховим граничним вредностима, вршење оптимизације за дефинисане функције циља, употреба добијених резултата за креирање хипотетичких модела и финално, енергетске симулације тих модела.

У раду је приказан повод за истраживање предложене теме, као што су климатске промене, велика потрошња енергије пословних објеката, као и одговор на ове проблеме кроз перформативни дизајн. Уочени су енергетски ефикасни пословни објекти на територији Београда и закључено је да се највећи број ових објеката налази на територији општине Нови Београд. Управо из тог разлога је одабрана локација истраживања у Блоку 68. Дефинисане су параметарски променљиве фасаде и уочени параметри који директно утичу њихов изглед. На основу дефинисаних параметара извршена је оптимизација, која је резултирала креирањем хипотетичких модела. Финално, испитана су енергетска својства формираних хипотетичких модела.

Оптимизација фасаде је започета креирањем скрипте у Дајнаму, која садржи променљиве параметре са својим граничним вредностима и дефинисане функције циља, неопходне како би генетски алгоритам тестирао добијена решења. Оптимизација везана за величину отвора на фасади и дужину сенила око отвора извршена у Рефинерију, а добијени резултати су употребљени за креирање хипотетичких модела. Креирање хипотетичких модела са реалним физичким својствима и подешавање свих неопходних информација везаних за информације о локацији, временске прилике и режим коришћења простора, остварено је у Ревиту. Финално, над хипотетичким моделима су извршене енергетске симулације преко Аутодескове интернет платформе Грин билдинг студио, која користи *DoE-2.2* симулациони метод прорачуна.

Добијени резултати енергетских симулација су критички анализирани, за потрошњу енергије целог објекта, али и индивидуално за грејање и хлађење на годишњем и месечном нивоу, топлотна оптерећења за најтоплији и најхладнији период године, као и емисију угљен-диоксида. Сви резултати су међусобно

валоризовани, а на основу добијених закључака, хипотетички модели су рангирани и финално је одабрано најоптималније решење.

Резултати истраживања су показали да хипотетички модели са специфично дистрибуираном, променљивом величином отвора, креирани на основу резултата добијених из оптимизације, знатно мање троше енергије у односу на референтне моделе са фиксним отворима, посебно за грејање објекта. Закључено је и да се ови модели могу унапредити, увођењем сенила око отвора, чија променљива величина и позиција је такође одређена на основу резултата добијених из оптимизације. Увођењем параметарски променљивих сенила, хипотетички модели додатно умањују утрошак финалне енергије, првенствено за хлађење објекта.

Обе хипотезе постављене на почетку рада, доказане су током истраживачког и аналитичког процеса у раду.

Хипотеза 1: *Могуће је формирати методолошки поступак који у раној фази пројектовања омогућава креирање сета оптималних решења параметарски моделираних фасада употребом генетског алгоритма, за климатске услове Београда, која у исто време омогућавају одговарајући природни осветљај унутар објекта и минимизују потрошњу енергије потребну за грејање и хлађење.*

Прва хипотеза је доказана на основу резултата добијених из оптимизације фасада, за функције циља укупне количине директног сунчевог зрачења и укупне површине отвора на фасади. Одабрано оптимално решење, омогућава већи упад дневне светлости на мањој површини отвора, те последично троши мање енергије за грејање и хлађење. Хипотеза је доказана критичким упоређивањем резултата енергетских симулација, са укупном количином сунчевог зрачења за све хипотетичке моделе.

Хипотеза 2. *Енергетска ефикасност параметарски моделиране фасаде директно зависи од одабира параметара (као што су величина, облик, заротираност и материјал панела, као и позиција на фасади на којој се панел налази) и њихових граничних вредности.*

Друга хипотеза је доказана на основу увида у резултате енергетских симулација, за различите вредности променљивих параметара који су били део процеса оптимизације. Резултати су показали да енергетска својства објекта директно зависе од величине отвора на фасади, позиције на фасади (јасно је уочена разлика између величине отвора на јужној, северној источној и западној фасади), постојања сенила око отвора, као и дужине сенила.

Истраживање је доказало да је могуће креирати оптимизацију, која правилним одабиром вредности параметара, за исту количину упада директне сунчеве светлости у објекат, захтева мању укупну површину отвора на фасади. У раду је доказано да је могуће, на основу резултата добијених из ове оптимизације, креирати хипотетичке моделе, који за приближно исту укупну површину отвора и количину директне дневне светлости као и референтни модели са фиксним димензијама отвора, троше мање енергије за грејање и хлађење објекта, те последично емитују мање угљен-диоксида.

Посебно треба нагласити допринос овог истраживања, који показује колико оптимизацијске методе могу унапредити енергетска својства објеката. Допринос истраживања се огледа и у креирању методологије која омогућава вршење оптимизацијских процеса, конкретно за функцију циља укупне количине директне сунчеве светлости, али и генерално за оптимизације које испитују енергетска, структурална, механичка и друга својства објеката.

Значај овог истраживања, огледа се у примени ове методологије у савременој архитектонској пракси. Конкретно, ово истраживање пружа егзактне информације за дизајнирање енергетски ефикасних параметарски променљивих фасада пословних објеката у београдским климатским условима. Уопштено, ово истраживање пружа све информације потребне за моделовање параметарских форми, независно од намене објекта.

Визуелно програмирање представља моћан алат за унапређење процеса пројектовања, како са аспекта аутоматизације свакодневних репетитивних задатака, тако и са аспекта истраживања форми, вршења калкулација и различитих типова анализа. Визуелно програмирање наставља тамо где је

ограничење БИМ програма и има могућност да реши проблеме који досад нису били могући. Специфично, оптимизацијске методе иду корак даље, јер креирају систем који максимално користи снагу рачунара при аутоматском изналажењу најбољих решења, док је улога корисника само да одабере оно које жели.

Даље истраживања на ову тему могу кренути у различитим правцима. Једна од тема је истраживање употребе БИМ-а, у унапређењу продуктивности архитектонске праксе, могућностима примене у свим фазама пројектантског процеса, управљање временом и ресурсима, координацијом са другим струкама и учесницима итд. Друга тема је истраживање визуелног програмирања у аутоматизацији процеса пројектовања, креирања планова и вршење калкулација са једне стране и истраживање параметарских форми и облика са друге стране. Специфично истраживање се може фокусирати на оптимизацијске методе и њихову примену у изналажењу оптималних решења везаних за структурална, механичка, акустична и енергетска својства објеката, организацију простора, визуелни комфор и друго. Финално, истраживање се може проширити на детаљну анализу енергетских симулација, потребне енергије за грејање и хлађење објекта, топлотних оптерећења, емисије угљен-диоксида итд.

Аутор сматра да нове генерације архитеката треба да уче визуелно програмирање, јер су могућности примене неограничене. Програмирање више није тренд, већ потреба друштва да истражује. Јасно је да архитекте нису програмери, али могу имати увид у ту област довољно да унапреде сопствену праксу. Специфично, архитекте треба да се упознају и са оптимизацијским техникама и методама, јер је будућност праксе у искоришћавању снаге рачунара за брже и ефикасније изналажење решења. Оптимизацијске методе су основа свих пројеката вештачке интелигенције, јер дозвољавају програму да током времена, као и људско биће, „учи“ на сопственим грешкама, те поучен новим искуствима доноси боље одлуке.

ИЗВОРИ И ЛИТЕРАТУРА

Референтна литература

(Попис цитиране и позивне литературе у дисертацији, библиографске јединице наведене по абecedном реду)

- Baluja, S., Caruana, R. (1995). Removing the genetics from the standard genetic algorithm, u *International Conference on Machine Learning*.
- Barrios, C. (2005). *Transformations on Parametric Design Models*. Springer - CAAD Futures.
- Beasley, D., Bull, D.R., Martin, R.R. (1993). An Overview of Genetic Algorithms, Part 1, Fundamentals, u *University Computing*, 15, 58-69.
- Bianchi, L., Dorigo, M., Luca M.G., Gutjahr, W.J. (2009). A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization, u *Natural Computing: an international journal*, 8 (2), 239—287.
- Blum, C., Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison, u *ACM Computing Surveys* 35 (3), 268—308.
- Borak, B. (2009). *Genetski algoritam za rešavanje lokacijskog problema snabdevaca ogranicenog kapaciteta u više nivoa*. Master rad. Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet.
- Caetano, I., Santos, L., Leitão, A. (2015). From Idea to Shape, From Algorithm to Design: A Framework for the Generation of Contemporary Facades, u *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Architectural Design Futures*, 527-546.
- Chinchuluun, A., Pardalos, P.M., Migdalas, A. (2008). *Pareto Optimality, Game Theory and Equilibria*. Berlin:Springer.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or preservation of favoured races in the struggle for life*. London:John Murray.

- Deru, M., Field, K., Studer, D., Benne, K., Griffith, B., Torcellini, P., Liu, B., Halverson, M., Winiarski, D., Rosenberg, M., Yazdanian, M., Huang, J., Crawley, D. (2011). *U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock: Technical Report*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings - EPBD. (2010). *Official Journal of the European Union*, 153, 13-35.
- Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., Yessios, C. (1974). *An Outline of the Building Description System*. Carnegie:Mellon University, Institute of Physical Planning.
- European Environment Agency. (2012). *Building the future we want*. Copenhagen:European Environment Agency.
- Facility Information Council (FIC). (2016). *National Building Information Model Standard - NBIMS*.
- Ford, S., Aouad, G., Kirkham, J., Brandon, P., Brown, F., Child, T., Cooper, G., Oxman, R., Young, B. (1995). An information engineering approach to modelling building design, u *Automation in Construction*, 4 (1), 5-15.
- Glover, F., Kochenberger, G. (2003). *Handbook of metaheuristics*. New York:Springer.
- Goldberg, D., Deb, K. (1991). A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms, u *Foundations of Genetic Algorithms*, (69-93). San Mateo, California: Morgan Kaufmann.
- Hensel, M., Menges, A. (2008). Form Follows Performance, u *Zur Wechselwirkung von Material, Struktur und Umwelt*, 188.
- Holger, H. H., Stützle, T. (2005). *Stochastic Local Search, Foundations and Applications*. Burlington, Massachusetts:Morgan Kaufmann Publishers
- Holland, H. J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Massachusetts:The MIT Press.
- Jabi, W. (2013). *Parametric Design for Architecture*. London:Laurence King.
- Kirk, J. T. O. (2007). *Science & Certainty*. Clayton:Csiro Publishing
- MacLeamy, P. (2010). *Bim-Bam-Boom! How to Build Greener, Highperformance Buildings*. HOK Renew.

- Malkawi, A. M. (2004). Developments in Environmental Performance Simulation, u *Automation in Construction*, 13, 437–445.
- Moretti, L. (1971). Ricerca Matematica in Architettura e Urbanisticâ, u *Moebius IV*, 1 (30-53). New York: Princeton Architectural Press.
- Mühlenbein, H. (1997). *Genetic Algorithms, Local Search in Combinatorial Optimization* (137-172). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Myerson, R. B. (1991). *Game Theory: Analysis of Conflict*. Harvard University Press.
- Osman, I. H., Kelly, J. P. (1996). *Metaheuristics: Theory and Applications*. Norwell: Kluwer Academic Publisher.
- Oxman, R., Hammer, R., Ben, A. S. (2007). Performative Design in Architecture, u *Predicting the Futures, ECAADE07*, 227 – 234.
- Padua, D. (2011). *Encyclopedia of Parallel Computing*. Springer Science & Business Media.
- Paulson, B. (1976). Designing to Reduce Construction Costs, u *Journal of the Construction Division*, 102 (4), 587–592.
- Pell, B. (2010). The Articulate Surface - Ornament and technology, u *Contemporary Architecture*. Basel: Birkhauser.
- Poirier, E. A., Staub-French, S., Forgues, D. (2015). Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action-research, u *Automation in Construction*, 5, 74–84.
- Правилник о енергетској ефикасности зграда*. (2011). Београд: Службени гласник Републике Србије, бр. 61/2011.
- Правилник о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда*. (2011). Београд: Службени гласник Републике Србије, бр. 61/2011.
- Rahmani, A. M. (2015). *A Building Information Model (BIM) Based Framework for Performance Optimization*. PhD thesis. Texas A & M University.
- Rosenfeld, G. D. (2000). *Munich and Memory: Architecture, Monuments, and the Legacy of the Third Reich* (153-154). Los Angeles: University of California.
- Rosenthal, R. W. (1973). A class of games possessing pure-strategy Nash equilibria, u *International Journal of Game Theory*, 2 (1), 65–67.

- Ruffle, S. (1986). Architectural design exposed: from computer-aided-drawing to computer-aided-design, u *Environments and Planning B: Planning and Design*, 385-389.
- Sert, J. L. (1972). *Cripta Colonia Güell* (26–31). Barcelona, Spain: Ediciones Poligrafa.
- Shea, K., Aish, R., Gourtovaia, M. (2003). Towards Integrated Performance-based Generative Design Tools, u *Digital Design, ECAADE* (253-264). Graz, Austria.
- Spears, W., De Jong, K. (1991). On the Virtues of Parametrized Uniform Crossover, u *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms* (230-236). San Mateo, California: Morgan Kaufmann.
- Srinivas, M., Patnaik, L.M. (1994). Genetic Algorithms: A Survey, u *IEEE Computer*, 17-26.
- Stiles, R. (2006). *Aggregation Strategies*. Masters dissertation. University of Bath.
- Touloupaki, E., Theodosiou, T. (2017). Performance Simulation Integrated in Parametric 3D Modeling as a Method for Early Stage Design Optimization—A Review, u *Energies, MDPI, Open Access Journal*, 10 (5), 1-18.
- Todorović, M., Ristanović, M. (2015). *Efikasno korišćenje energije u zgradama*. Univerzitet u Beogradu.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2014). *The World Population Situation in 2014, A Concise Report*. New York: United Nations.
- United Nations Human Settlements Programme - UN Habitat. (2006). *State of the World's Cities Report (2006/2007), 30 Years of Shaping the Habitat Agenda*. United Nations Human Settlements Programme - UN Habitat.
- US EIA. (2011). *Primary energy use in US commercial and residential buildings in 2010*. United States Energy Information Administration.
- Van Nederveen, G. A., Tolman, F. P. (1992). Modelling Multiple Views on Buildings, u *Automation in Construction*, 1, 215-224.
- Veličković, M., Lenard, J. D., Mudri, L. (2010). Prirodno osvetljenje - zašto, kako i koliko?, u *Savetovanje o osvetljenju 2009*. Divčibare: Srpsko društvo za osvetljenje.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E. (1976). *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. New York: Wiley.

- Wilkes, M. V. (1956). *Automatic digital computers*. Londond:Methuen Publishing Ltd / New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of parametric design*. London: Routledge.
- Wright, J. A., Loosemore, H. A., Farmani, R. (2002). Optimization of Building Thermal Design and Control by Multi-criterion Genetic Algorithm, u *Energy and Buildings*, 34, 959–972.
- Закон о планирању и изградњи. (2011). Београд: Службени гласник Републике Србије, бр. 24/2011.

Коришћена литература

(Попис литературе која је коришћена током рада на дисертацији, библиографске јединице наведене по абecedном реду)

- Abrishami, S., Goulding, J., Pour, R. F., Ganah, A. (2015). Integration of BIM and Generative Design to exploit AEC conceptual design innovation, u *Construction Innovation*, 15 (1), 24–41.
- Addington, M., Schodek, D. (2005). *Smart Materials and Technologies for the architecture and design professions*. Oxford: Architectural Press, Elsevier.
- Ahn, K. U., Kim, Y. J., Park, C. S., Kim, I., Lee, K. (2014). BIM Interface for Full vs. Semi-automated Building Energy Simulation, u *Energy Buildings*, 68, 671–678.
- Aish, R., Woodbury, R. (2005). Multi-level Interaction in Parametric Design, u *Smart Graphics: 5th International Symposium* (151–162). Frauenwörth Cloister: Springer.
- Aish, R. (2011). DesignScript: Origins, Explanation, Illustration, u *Computational Design Modelling* (1-8). Springer Science + Business Media.
- Aish, R., Woodbury, R. (2005). Multi level interaction in parametric design, u *Lecture notes in computer science*, 3638 (151–162). Berlin: Springer.
- Akin, O. (1986). *Psychology of architectural design*. London: Pion.
- Akos, G., Parsons, R. (2014). *Foundations the Grasshopper Primer*. ModeLab.
- Alexander, C. (1964). *Notes on the synthesis of form*. Cambridge. Massachusetts: Harvard University Press.
- Amorim, S. R. L., Souza, L. L. A., Lyrio, A. D. M. (2009). Impact from use of BIM in architectural design offices: real estate market oportunities, u *Gestão & Tecnologia de Projetos*, 4 (2), 15.
- Arida, S. (2004). *Contextualizing Generative Design*. Master thesis. Massachusetts Institute of Technology
- Asci, A., Schwinn, T. (2008). Algorithmic design at SOM, u *World architecture*, 215, 34–35.

- Augenbroe, G. (2002). Trends in Building Simulation, u *Building Environment*, 37, 891–902.
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry, u *Leadership Manage*, 11 (3), 241–252.
- Azhar, S., Brown, J. (2009). BIM for Sustainability Analyses, u *International Journal of Construction Education*, 5, 276–292.
- Azhar, S., Carlton, W., Olsen, D., Ahmad, I. (2011). Building Information Modeling for Sustainable Design and LEED® Rating Analysis, u *Automation in Construction*, 20, 217–224.
- Baluja, S., Caruana, R. (1995). Removing the genetics from the standard genetic algorithm, u *International Conference on Machine Learning*.
- Banham, R. (1969). *The Architecture of the Well-tempered Environment*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Barrios, C. (2005). *Transformations on Parametric Design Models*. Springer - CAAD Futures.
- Bazjanac, V. (2001). Acquisition of Building Geometry in the Simulation of Energy Performance, u *Building Simulation*, 305–311.
- Bazjanac, V. (2008). IFC BIM-based Methodology for Semi-automated Building Energy Performance Simulation, u *Improving the Management of Construction Projects through IT Adoption*, 292–299.
- Bazjanac, V., Crawley, D. B. (1999). Industry Foundation Classes and Interoperable Commercial Software in Support of Design of Energy-efficient Buildings, u *Proceedings of Building Simulation '99*, 661–667.
- Beasley, D., Bull, D.R., Martin, R.R. (1993). An Overview of Genetic Algorithms, Part 1, Fundamentals, u *University Computing*, 15, 58-69.
- Bianchi, L., Dorigo, M., Luca M. G., Gutjahr, W. J. (2009). A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization, u *Natural Computing: an international journal*, 8 (2), 239—287.
- Blum, C., Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison, u *ACM Computing Surveys* 35 (3), 268—308.
- Boeykens, S., Neuckermans, H. (2009). Visual Programming in Architecture: Should Architects Be Trained As Programmers?, u *Proceedings CAAD-Future*.

- Borak, B. (2009). *Genetski algoritam za rešavanje lokacijskog problema snabdevaca ograničenog kapaciteta u više nivoa*. Master rad. Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet.
- Broadbent, G. (1973). *Design in architecture*. London: Wiley.
- Butcher, J. C. (1996). General linear methods, u *Computers & Mathematics with Applications*, 31 (4–5), 105–112.
- Bukhari, F. A. (2011). *A Hierarchical Evolutionary Algorithmic Design (HEAD) System for Generating and Evolving Buildings Design Models*. Queensland University of Technology.
- Burry, J., Burry, M. (2008). The bonds of spatial freedom, working around the constraints of parametric design, u *Education in computer aided architectural design in Europe, 1* (301–308). Antwerp Belgium: Antilope.
- Burry, M. (1996). Parametric Design and the Sagrada Família, u *Architectural Research Quarterly*, 1, 70-80.
- Burry, M. (2003). Between intuition and process: Parametric design and rapid prototyping, u Kolarevic, B. (ed), *Architecture in the digital age - design and manufacturing*. Abingdon: Taylor and Francis.
- Burry, M. (2006). Parametric design, associative geometry, u Chaszar, A. (ed), *Blurring the lines*. London: Wiley.
- Caetano, I., Santos, L., Leitão, A. (2015). From Idea to Shape, From Algorithm to Design: A Framework for the Generation of Contemporary Facades, u *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Architectural Design Futures*, 527-546.
- Che, L., Gao, Z., Chen, D., Nguyen, T. H. (2010). Using building information modeling for measuring the efficiency of building energy performance, u *International Conference on Computing in Civil Engineering and Building Engineering* (165–171). Nottingham University Press.
- Chien, S. F., Su, H. P., Huang, Y. W. (2015). PARADE A pattern-based knowledge repository for parametric designs, u *Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRRIA 2015)*, (375–384). Daegu, Republic of Korea.

- Chinchuluun, A., Pardalos P. M., Migdalas, A. (2008). *Pareto Optimality, Game Theory and Equilibria*. Berlin:Springer.
- Clayton, M., Haberl, J., Yan, W. (2009). Development of a Reference Building Information Model (BIM) for Optimization, u *Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*. Cambridge, Ontario, Canada.
- Coley, D. A., Schukat, S. (2002). Low-energy Design: Combining Computer-based Optimisation and Human Judgement, u *Building Environment*, 37, 1241–1247.
- Converso, S., Bonatti, F. (2006). Parametric Model for Architectural Design, u *Game Set and Match: On Computer Games, Advanced Geometries, and Digital Technologies*, 242–247.
- Cormier, A., Robert, S., Roger, P., Stephan, L., Wurtz, E. (2011). Towards a BIM-based Service Oriented Platform: Application to Building Energy Performance Simulation, u *Building Simulation*, 2309–2316.
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., Griffith, B. T. (2008). Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs, u *Building and Environment* 43 (4), 661–673.
- Cuff, D. (1991). *Architecture : the story of practice*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or preservation of favoured races in the struggle for life*. London :John Murray.
- Davis, D. (2013). *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. School of Architecture and Design College of Design and Social context RMIT University.
- Deb, K., (2001). *Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, u *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6, 182–197.
- Deru, M., Field, K., Studer, D., Benne, K., Griffith, B., Torcellini, P., Liu, B., Halverson, M., Winiarski, D., Rosenberg, M., Yazdanian, M., Huang, J., Crawley, D. (2011). *U.S. Department of Energy Commercial Reference Building*

- Models of the National Building Stock: Technical Report*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Dimčić, M. (2001). *Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms*. PhD Thesis. Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen Universität Stuttgart.
- Dino, I. (2012). Creative Design Exploration by Parametric Generative Systems in Architecture, u *METU Journal of Faculty of Architecture*, 29 (1), 207–224.
- Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings - EPBD. (2010). *Official Journal of the European Union*, 153, 13-35.
- Eastman, C. M., Sacks, R., Liston, K., Teicholz, P. (2008). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., Yessios, C. (1974). *An Outline of the Building Description System*. Carnegie Mellon University, Institute of Physical Planning.
- EEA (European Environment Agency). (2015). *Atmospheric Greenhouse Gas Concentrations*. Copenhagen: European Environment Agency.
- Egan, J. (1998). *Rethinking Construction*. London: DETR.
- Encarnaçao, J. L., Lindner, R., Schlechtendahl, E. G. (1990). *Computer Aided Design Fundamentals and System Architectures*. Heidelberg: Springer Berlin.
- Estkowski, T. (2013). *Towards a Generative Design System Based on Evolutionary Computing*. PhD Thesis. Oslo School of Architecture and Design.
- European Commission. (2011). *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*. Brussels: European Commission.
- European Environment Agency. (2012). *Building the future we want*. Copenhagen: European Environment Agency.
- European Environment Agency. (2012). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012*. Copenhagen: European Environment Agency.
- European Environment Agency. (2012). *Environmental indicator report 2012*. Copenhagen: European Environment Agency.

- Evins, R. (2013). A Review of Computational Optimisation Methods Applied to Sustainable Building Design, u *Renewable Sustainable Energy*, 22, 230–245.
- Facility Information Council (FIC). (2016). *National Building Information Model Standard - NBIMS*.
- Fasoulaki, E. (2008). *Integrated Design A Generative Multi-Performative Design Approach*. Master thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Fischer, M. (2006). Formalizing Construction Knowledge for Concurrent Performance-based Design, u *Intelligent Computing in Engineering and Architecture* (186–205). Springer.
- Flager, F., Basbagill, J., Lepech, M., Fischer, M. (2012). Multi-objective Building Envelope Optimization for Life-cycle Cost and Global Warming Potential, u *Proceedings of ECPPM*, 193–200.
- Fonseca, C. M., Fleming, P. J. (1995). An Overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization, u *Evolutionary Computation*, 3, 1–16.
- Ford, S., Aouad, G., Kirkham, J., Brandon, P., Brown, F., Child, T., Cooper, G., Oxman, R., Young, B. (1995). An information engineering approach to modelling building design, u *Automation in Construction*, 4 (1), 5-15.
- Frazer, J. H. (2002). Creative Design and the Generative Evolutionary Paradigm, u *Bentley and Come*, 253-274.
- Gagne, J., Andersen, M. (2010). Multi-objective facade optimization for daylighting design using a genetic algorithm, u *Fourth National Conference of IBPSA - USA*, 110-117.
- Gane, V. (2004). *Parametric Design: A Paradigm Shift?*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Gane, V., Haymaker J. (2007). Conceptual Design of High-Rises with Parametric Methods, u *Predicting the Future, 25th eCAADe Conference Proceedings*, 978–980.
- Генерални урбанистички план Београда до 2021. године. (2003). Београд: Урбанистички завод.
- Gerber, D. (2007). *Parametric Practices: Models for Design Exploration in Architecture*. PhD dissertation. Harvard University.
- Glover, F., Kochenberger, G. (2003). *Handbook of metaheuristics*. New York:Springer.

- Goldberg, D., Deb, K. (1991). A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms, u *Foundations of Genetic Algorithms*, (69-93). San Mateo, California: Morgan Kaufmann.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston: Addison Wesley.
- Gossard, D., Lartigue, B., Thellier, F. (2013). Multi-objective Optimization of a Building Envelope for Thermal Performance Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Network, u *Energy Buildings*, 67, 253–260.
- Gross, M. D. (1985). *Design as exploring constraints*. Ph.D. thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Heath, T. (1984). *Method in architecture*. Chichester: Wiley.
- Hensel, M. (2010). Performance-oriented architecture - towards a biological paradigm for architectural design and the built environment, u *FORMakademisk*, 3 (1), 36-56.
- Hensel, M., Menges, A. (2008). Form Follows Performance, u *Zur Wechselwirkung von Material, Struktur und Umwelt*, 188.
- Hensel, M. (2013). *Performance-oriented Architecture – Rethinking Architectural Design and the Built Environment*. London: AD Wiley.
- Hensel, M., Nilsson, F. (2014). *Integrating Research and Design in Architectural Practice*. London: Routledge.
- Hoffmeister, F. (1991). Genetic Algorithms and Evolution Strategies: Similarities and Differences, u *Lecture Notes in Computer Science*, 496, 681–689.
- Holger, H. H., Stützle, T. (2005). *Stochastic Local Search, Foundations and Applications*. Burlington, Massachusetts: Morgan Kaufmann Publishers
- Holland, H. J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Massachusetts: The MIT Press.
- Holland, J. (2000). *Emergence; from chaos to order*. Oxford: Oxford University Press.
- Holzer, D., Hough, R., Burry, M. (2007). Parametric Design and Structural Optimisation for Early Design Exploration, u *International Journal of Architectural Computing*, 5 (4), 625-644.

- Hopgood, A., Mierzejewska, A. (2008). Transform ranking: a new method of fitness scaling in genetic algorithms, u *Research and Development in Intelligent Systems*, 25, 349–354.
- Hudson, R. (2008). Knowledge acquisition and parametric model development, u *International journal of architectural computing*, 6 (4), 435–451.
- Hudson, R. (2009). Parametric development of problem descriptions, u *International journal of architectural computing*, 2 (7), 199–216.
- Hudson, R. (2010). *Strategies for Parametric Design in Architecture: An application of practice led research*. PhD Dissertation. University of Bath.
- IMF (International Monetary Fund). (2015). *World Economic Outlook - Update January 2015*. Washington, DC.
- International Energy Agency. (2006). *Key World Energy Statistics*.
- International Energy Agency. (2012). *CO₂ Emissions from fuel combustion: Highlights*. Paris: The International Energy Agency.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). *Climate Change 2014, u Synthesis Report: Contribution of Working Group I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva.
- Jabi, W. (2013). *Parametric Design for Architecture*. London: Laurence King.
- Jeong, W., Kim, J., Clayton, M., Haberl, J., Yan, W. (2013). Visualization of Building Energy Performance in Building Information Models, u *Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*. Cambridge, Ontario, Canada.
- Jones, J. C. (1992). *Design methods*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Kensek, K. (2011). Design Computation: Parametrics, Performance, Pedagogy and Praxis, u *March ACSA Annual Meeting on Digital Aptitudes*.
- Kilian, A. (2006). *Design exploration through bidirectional modeling of constraints*. Ph.D. thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Kilian, A. (2006). Design innovation through constraint modeling, u *International journal of architectural computing*, 4, 87–105.
- Kim, J. B., Jeong, W., Clayton, M. J., Haberl, J. S., Yan, W. (2015). Developing a Physical BIM Library for Building Thermal Energy Simulation, u *Automation in Construction*, 50, 16–28.

- Kirk, J. T. O. (2007). *Science & Certainty*. Clayton:CSIRO Publishing
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the Digital Age Design and Manufacturing*. New York & London: Spon Press.
- Kolarevic, B. (2005). *Computing the performative. Performative Architecture – Beyond Instrumentality*. New York & London: Spon Press.
- Konak, A., Coit, D. W., Smith, A. E. (2006). Multi-objective Optimization Using Genetic Algorithms: A Tutorial, u *Reliable Energy Systems*, 91, 992–1007.
- Krauss, R. I., Myer, R. M. (1970). Design a case history, u *Emerging methods in environmental design and planning* (11-20). Massachusetts: MIT Press.
- Krish, S. (2011). A Practical Generative Design Method, u *Computer-Aided Design*, 43 (1), 88–100.
- Krstić-Furundžić, A., Kosorić, V. (2009). Improvement of energy performances of existing buildings by application of solar thermal systems, u *Spatium International Review*, 20, 19-22.
- Kumar, S. (2008). *Interoperability Between Information Models (BIM) and Energy Analysis Programs*. University of Southern California.
- Leitão, A., Santos, L., Lopes, J. (2012). Programming languages for generative design: A comparative study, u *International Journal of Architectural Computing*, 10 (1), 139-162.
- Lin, S. H. E., Gerber, D. J. (2014). Designing-in Performance: A Framework for Evolutionary Energy Performance Feedback in Early Stage Design, u *Automation in Construction*, 38, 59–73.
- Lynn, G. (1999). *Animated Form*. New York: Princeton Architectural Press.
- Machairas, V., Tsangrassoulis, A., Axarli, K. (2014). Algorithms for Optimization of Building Design: A Review, u *Renewable Sustainable Energy*, 31, 101–112.
- MacLeamy, P. (2010). *Bim-Bam-Boom! How to Build Greener, Highperformance Buildings*. HOK Renew.
- Maile, T., Fischer, M., Bazjanac, V. (2007). Building Energy Performance Simulation Tools-a Life-cycle and Interoperable Perspective, u *Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Working Paper*, 107.
- Malkawi, A. M. (2004). Developments in Environmental Performance Simulation, u *Automation in Construction*, 13, 437–445..

- Malkawi, A. M. (2005). Performance simulation: research and tools, in *Performative Architecture – Beyond Instrumentality*. New York & London: Spon Press
- Ministry of Environment and Spatial Planning. (2010). *Initial national communication of the Republic of Serbia under the United Nations framework convention on climate change*. Belgrade: The Ministry of Environment and Spatial Planning.
- Monedero, J. (1997). Parametric Design. A Review and Some Experiences, u *Challenges of the Future: 15th eCAADe Conference Proceedings, edited by Bob Martens, Helena Linzer, and Andreas Voigt..* Vienna: Österreichischer Kunstund Kulturverlag.
- Moretti, L. (1971). Ricerca Matematica in Architettura e Urbanisticâ, u *Moebius IV, 1*, 30-53. New York: Princeton Architectural Press.
- Mühlenbein, H. (1997). *Genetic Algorithms, Local Search in Combinatorial Optimization* (137-172). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Myers, B. A. (1990). Taxonomies of Visual Programming and Program Visualization, u *Journal of Visual Language Computation*, 1, 97–123.
- Myerson, R. B. (1991). *Game Theory: Analysis of Conflict*. Harvard University Press.
- Naboni, E., Zhang, Y., Maccarini, A., Hirsch, E., Lezzi, D. (2013). Extending the Use of Parametric Simulation in Practice Through a Cloud Based Online Service, u *IBPSA Italy - Conference of International Building Performance Simulation Association*. Bozen, Italy.
- Национална стратегија одрживог развоја*. (2008). Београд: Службени гласник Републике Србије, бр. 57/2008.
- Национални програм заштите животне средине и Стратегија биолошке разноврсности*. (2011). Београд: Службени гласник Републике Србије, бр. 13/2011.
- Nguyen, A., Reiter, S., Rigo, P. (2014). A Review on Simulation-based Optimization Methods Applied to Building Performance Analysis, u *Applied Energy*, 113, 1043–1058.
- Nicholas, P. (2008). *Something about architects engineers and computers*. Ph.D. thesis. Royal Melbourne Institute of Technology.

- Ong, Y. S., Nair, P. B., Keane, A. J. (2003). Evolutionary Optimization of Computationally Expensive Problems via Surrogate Modeling, u *AIAA Journal*, 41, 687–696.
- Osman, I. H., Kelly, J. P. (1996). *Metaheuristics: Theory and Applications*. Norwell: Kluwer Academic Publisher.
- Oxman, R., Hammer, R., Ben, A. S. (2007). Performative Design in Architecture, u *Predicting the Futures, ECAADE07*, 227 – 234.
- Padua, D. (2011). *Encyclopedia of Parallel Computing*. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Paulson, B. (1976). Designing to Reduce Construction Costs, u *Journal of the Construction Division*, 102 (4), 587–592.
- Pell, B. (2010). The Articulate Surface - Ornament and technology, u *Contemporary Architecture*. Basel: Birkhauser.
- Poirier, E. A., Staub-French, S., Forgues, D. (2015). Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action-research, u *Automation in Construction*, 5, 74–84.
- Powell, D., Skolnick, M. (1993). Using Genetic Algorithms in Engineering Design Optimization with Non-Linear Constraints, u *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers.
- Pratt, K. B., Bosworth, D. E. (2011). A Method for the Design and Analysis of Parametric Building Energy Models, u *International Building Performance Simulation Association Conference*.
- Правилник о енергетској ефикасности зграда*. (2011). Београд: Службени гласник Републике Србије, бр. 61/2011.
- Правилник о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда*. (2011). Београд: Службени гласник Републике Србије, бр. 61/2011.
- Qian, C. Z., Chen, V. Y., Woodbury, R. (2007). Participant observation can discover design patterns in parametric modeling, u *Proceedings of the 27th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*.

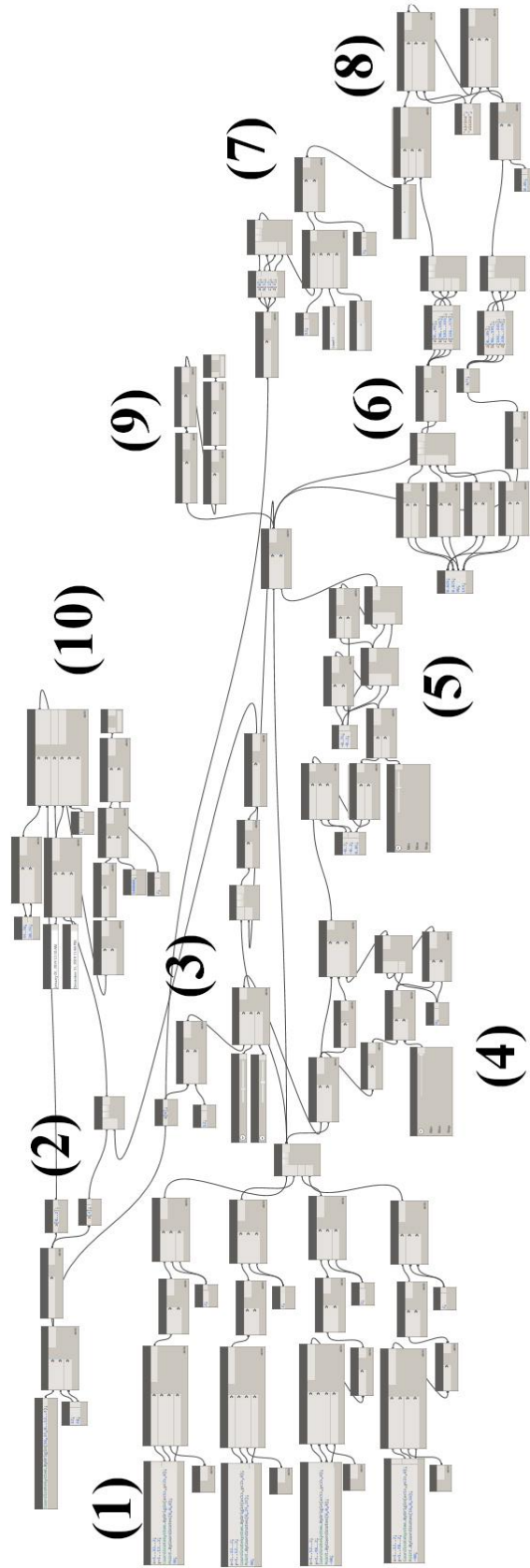
- Rahmani, A. M. (2015). *A Building Information Model (BIM) Based Framework for Performance Optimization*. PhD thesis. Texas A & M University.
- Rahmani, A. M., Zarrinmehr, S., Yan, W. (2013). Towards BIM-based Parametric Building Energy Performance Optimization, u *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 101-108.
- Rasheed, K. (1998). *A Genetic Algorithm for Continuous Design Optimization*. PhD thesis. New Jersey: The State University
- Rosenfeld, G. D. (2000). *Munich and Memory: Architecture, Monuments, and the Legacy of the Third Reich (153-154)*. Los Angeles : University of California.
- Rosenthal, R. W. (1973). A class of games possessing pure-strategy Nash equilibria, u *International Journal of Game Theory*, 2 (1), 65–67.
- Rowe, P. G. (1987). *Design thinking*. Cambridge Massachusetts: The MIT Press.
- Ruffle, S. (1986). Architectural design exposed: from computer-aided-drawing to computer-aided-design, u *Environments and Planning B: Planning and Design*, 385-389.
- Schaffer, J. D. (1985). Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms, u *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms* (93–100). Pittsburgh, PA, USA.
- Schlueter, A., Thesseling, F. (2009). Building Information Model Based Energy/Exergy Performance Assessment in Early Design Stages, u *Automation in Construction*, 18, 153–163.
- Schumacher, P. (2014). Tectonic Articulation: Making Engineering Logics Speak, u *Architectural Design*, 84, 44–51.
- Sert, J. L. (1972). *Cripta Colonia Güell (26–31)*. Barcelona, Spain: Ediciones Poligrafa.
- Shea, K., Aish, R., Gourtovaia, M. (2003). Towards Integrated Performance-based Generative Design Tools, in *Digital Design, ECAADE* (253-264). Graz, Austria.
- Shen, H., Tzempelikos, A., (2010). A Parametric Analysis for the Impact of Facade Design Options on The Daylighting Performance of Office Spaces, u *International High Performance Buildings Conference* (1-8). Purdue University.

- Shi, X., Yang, W. (2013). Performance-driven Architectural Design and Optimization Technique from a Perspective of Architects, u *Automation in Construction*, 32, 125–135.
- Simon, H. A. (1996). *The sciences of the artificial*. Cambridge Massachusetts: The MIT Press.
- Spears W., De Jong, K. (1991). On the Virtues of Parametrized Uniform Crossover, u *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms* (230-236). San Mateo, California: Morgan Kaufmann.
- Srinivas, M., Patnaik, L.M. (1994). Genetic Algorithms: A Survey, u *IEEE Computer*, 17-26.
- Stevanović, S. (2013). Optimization of Passive Solar Design Strategies: A review, u *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 177–196.
- Stiles, R. (2006). *Aggregation Strategies*. Masters dissertation. University of Bath.
- Stojanović, Đ. (2013). *Adaptivni principi u arhitektonskom projektovanju*. Doktorska disertacija. Beograd:Arhitektonski fakultet.
- Stumpf, A., Kim H., Jenicek, E. M. (2011). Early design energy analysis using building information modeling technology, u *Construction Engineering Research Laboratory – CERL*, 11-41.
- Touloupaki, E., Theodosiou, T. (2017). Performance Simulation Integrated in Parametric 3D Modeling as a Method for Early Stage Design Optimization—A Review, u *Energies, MDPI, Open Access Journal*, 10 (5), 1-18.
- Todorović, M., Ristanović, M. (2015). *Efikasno korišćenje energije u zgradama*. Univerzitet u Beogradu..
- U.S. Department of Energy. (2003). *Energy Information Administration, Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS)*.
- U.S. Department of Energy. (2006). *Energy Information Administration, International Energy Outlook*.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2014). *The World Population Situation in 2014, A Concise Report*. New York: United Nations.
- United Nations Human Settlements Programme - UN Habitat. (2006). *State of the World's Cities Report (2006/2007), 30 Years of Shaping the Habitat Agenda*. United Nations Human Settlements Programme - UN Habitat.

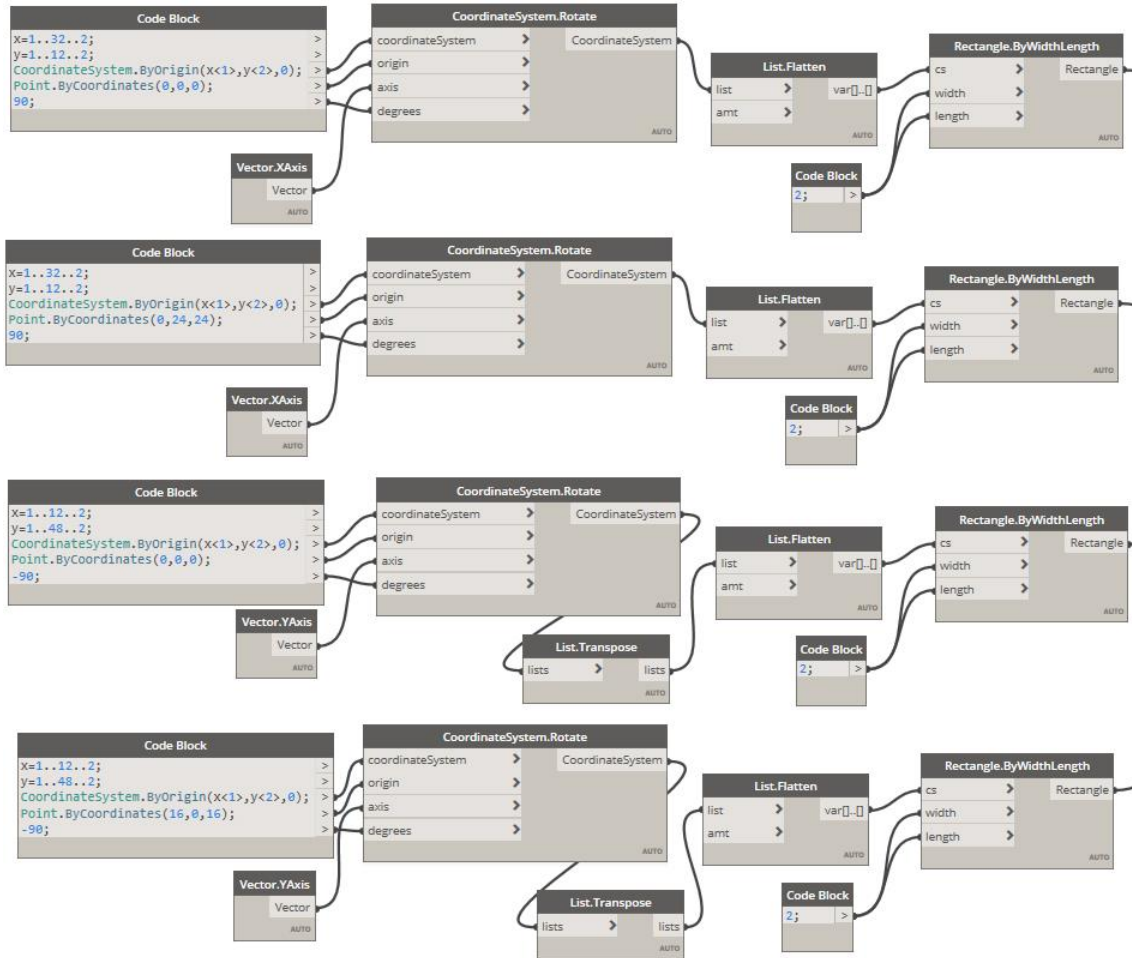
- United Nations. (1992). *Agenda 21*. New York: United Nations.
- United Nations. (1992). *Rio declaration on environment and development*. New York: United Nations.
- United Nations. (1992). *United Nations framework convention on climate change*. New York: United Nations.
- United Nations. (1998). *Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change*. New York: United Nations.
- United Nations. (2012). *The future we want*. New York: United Nations.
- US Dept. of Energy. (2012). *Building Energy Data Book*.
- US EIA. (2011). *Primary energy use in US commercial and residential buildings in 2010*. United States Energy Information Administration.
- Van Nederveen, G. A., Tolman, F. P. (1992). Modelling Multiple Views on Buildings, u *Automation in Construction, 1*, 215-224.
- Veličković, M., Lenard, J. D., Mudri, L. (2010). Prirodno osvetljenje - zašto, kako i koliko?, u *Savetovanje o osvetljenju 2009*. Divčibare: Srpsko društvo za osvetljenje.
- Venturi, R. (1966). *Complexity and Contradiction in Architecture*. New York: Doubleday & Company.
- Wade, J. W. (1977). *Architecture, problems and purposes*. London: Wiley.
- Wang, W., Zmeureanu, R., Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization, u *Building Environment, 40*, 1512–1525.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E. (1976). *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. New York: Wiley.
- Wilkes, M. V. (1956). *Automatic digital computers*. London: Methuen Publishing Ltd / New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Woodbury, R. (2007). *Design patterns*. Canadian Design Research Network.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of parametric design*. London: Routledge.
- Woodbury, R., Aish, R., Kilian, A. (2007). Some Patterns for Parametric Modeling, u *Expanding Bodies: 27th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (222–229)*. Halifax, Nova Scotia: Dalhousie University.

- Woodbury, R., Marques, D. (2006). Using rule based selection to support change in parametric cad models, u *Lecture notes in computer science*, 4073 (230–235). Berlin: Springer.
- Woodbury, R. F., Burrow, A. L. (2003). Notes on the structure of design space, u *International journal of architectural computing*, 1 (4), 517–532.
- Wright, J. A., Loosemore, H. A., Farmani, R. (2002). Optimization of Building Thermal Design and Control by Multi-criterion Genetic Algorithm, u *Energy and Buildings*, 34, 959–972.
- Yalcinkaya, M., Singh, V. (2015). Patterns and trends in building information modeling(BIM) research: A latent semantic analysis, u *Automation in Construction*, 59, 68–80.
- Yan, W., Clayton, M., Haberl, J., Jeong, W., Kim, J. B., Kota, S., Alcocer, J. L. B., Dixit, M. (2013). Interfacing BIM with Building Thermal and Daylighting Modeling, u *13th International Conference of IBPSA*. Chambéry, France.
- Закон о планирању и изградњи*. (2011). Београд: Службени гласник Републике Србије, бр. 24/2011.

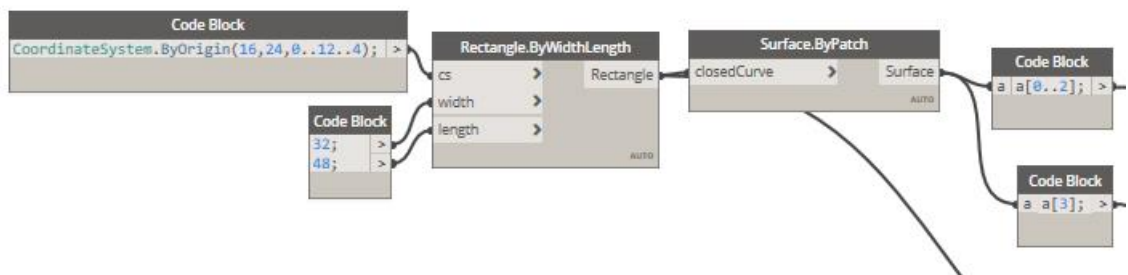
ПРИЛОГ 1: Финални изглед Дајнамо скрипте оптимизације параметраски променљивих фасада употребом генетског алгоритма



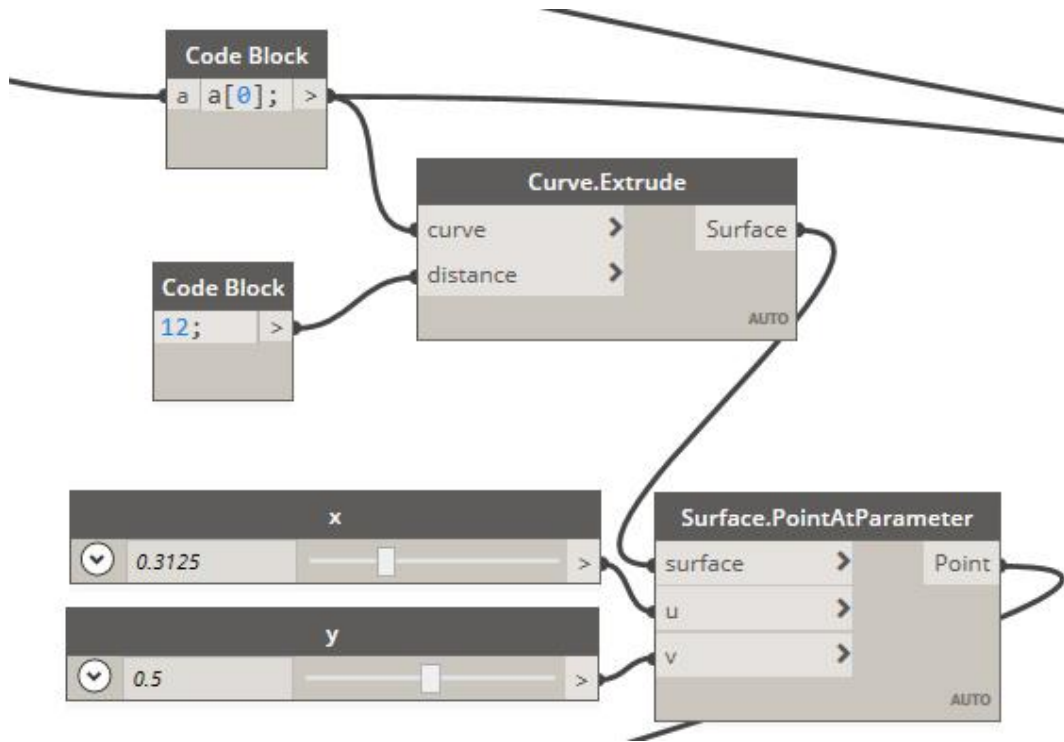
Финални изглед скрипте оптимизације фасаде



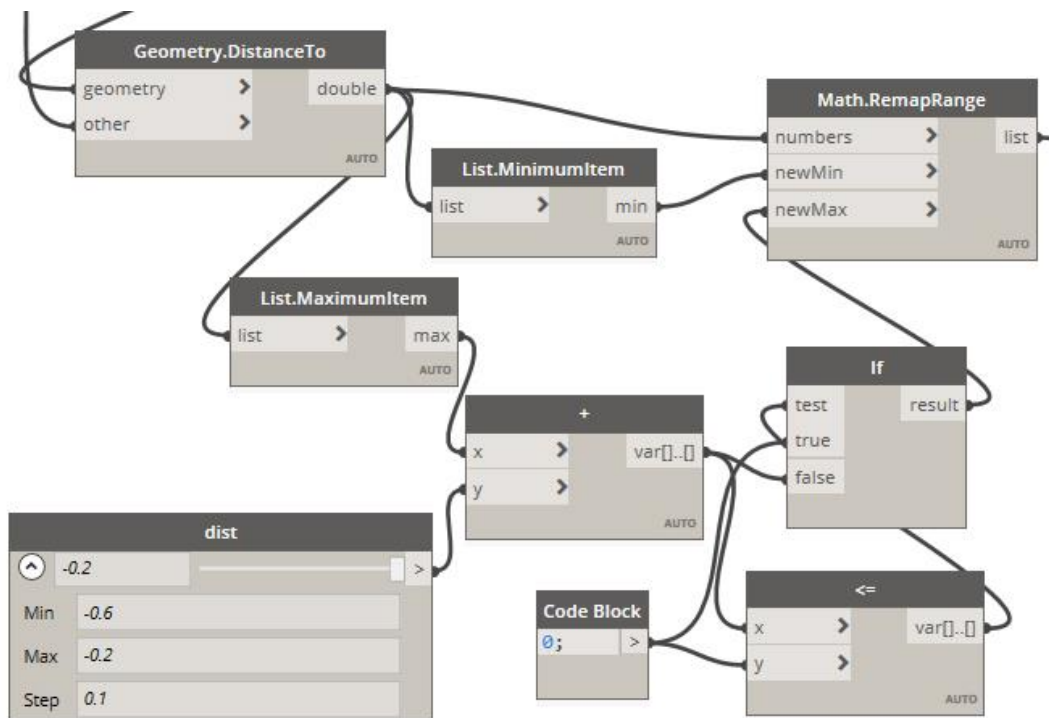
(1) Креирање матрице јужне, северне источне и западне фасаде



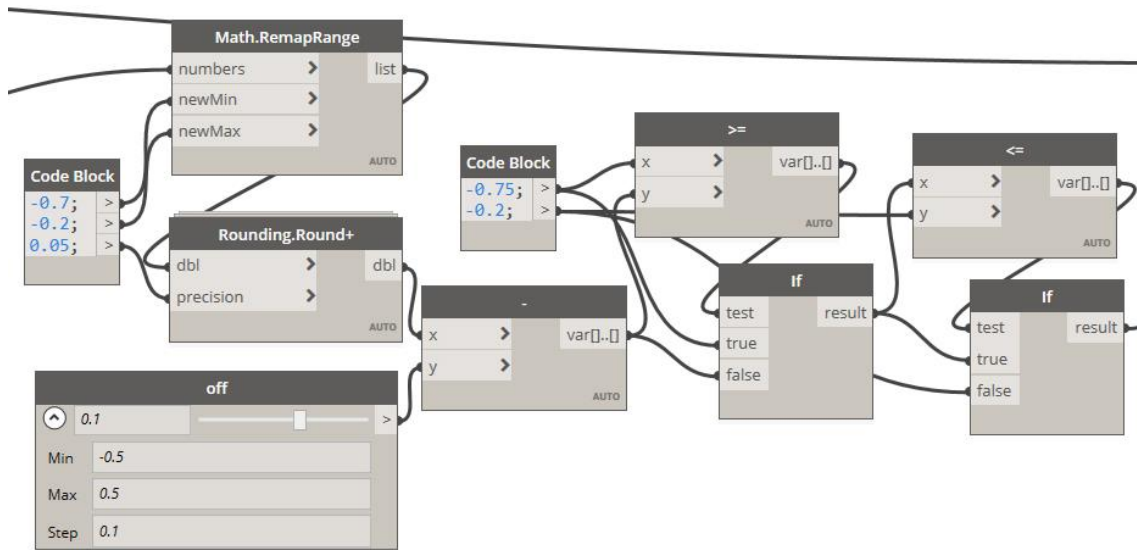
(2) Креирање аналитичких површина подова и крова



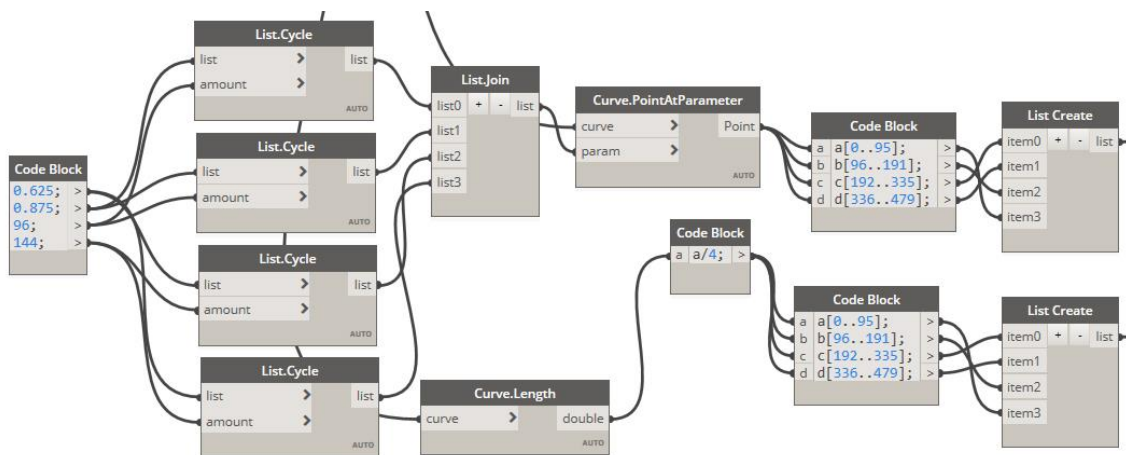
(3) Креирање порменљивог параметра тачке привлачења



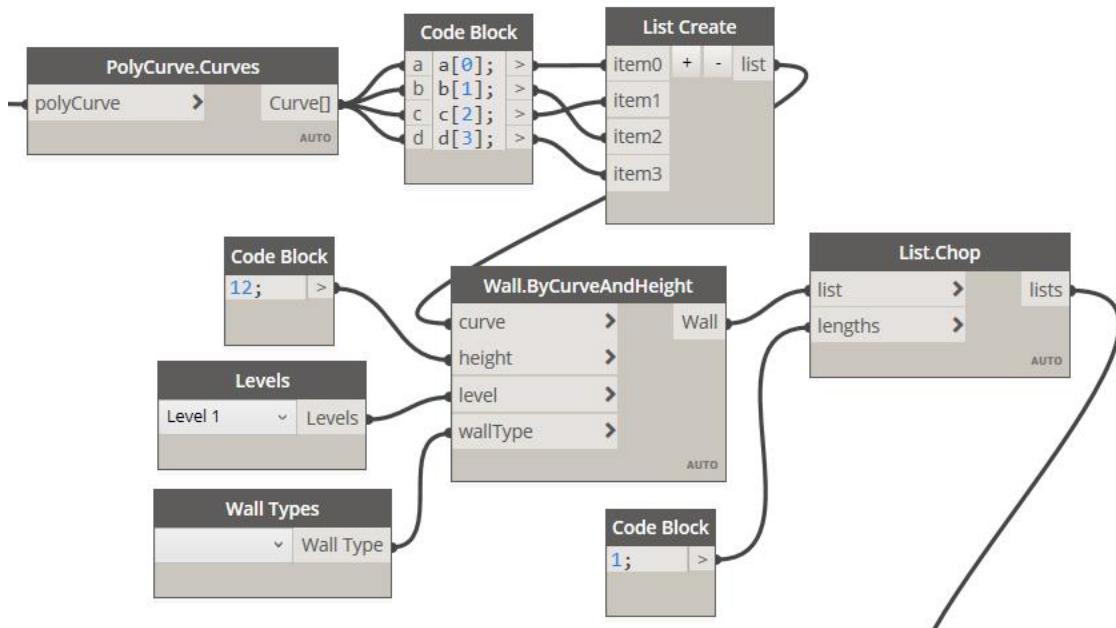
(4) Креирање порменљивог параметра компактности отвора



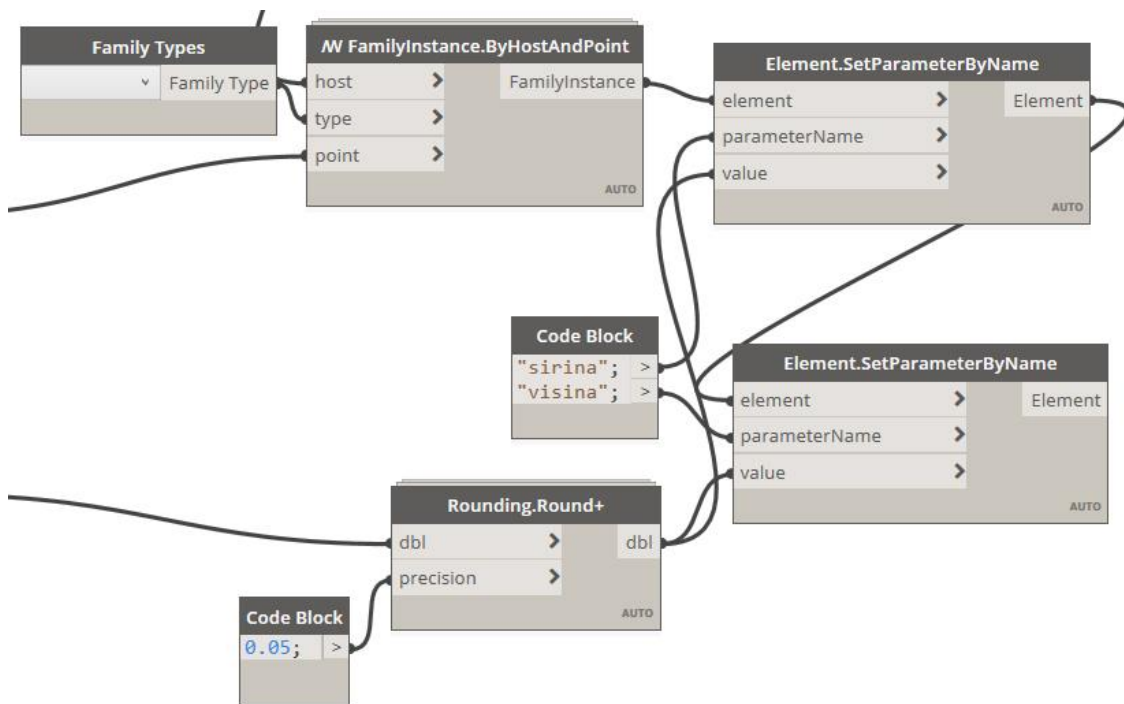
(5) Креирање порменљивог параметра величине отвора



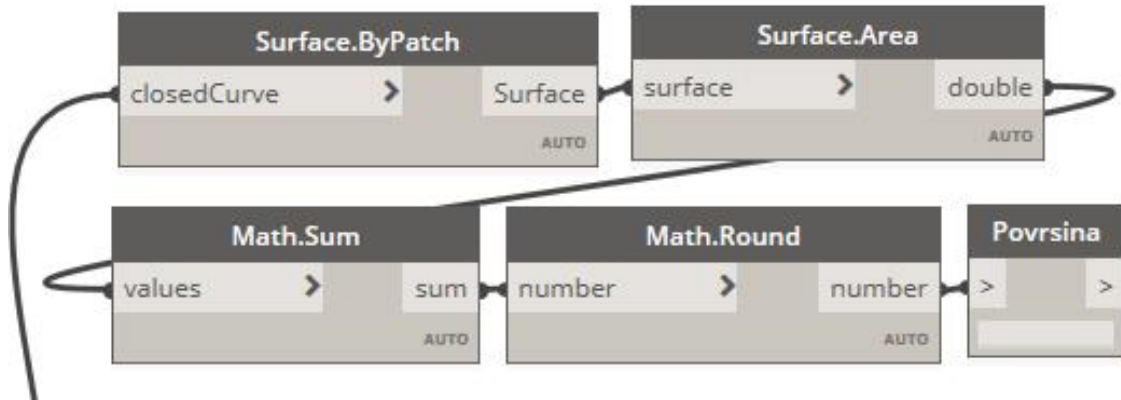
(6) Креирање тачке уметања елемената прозора



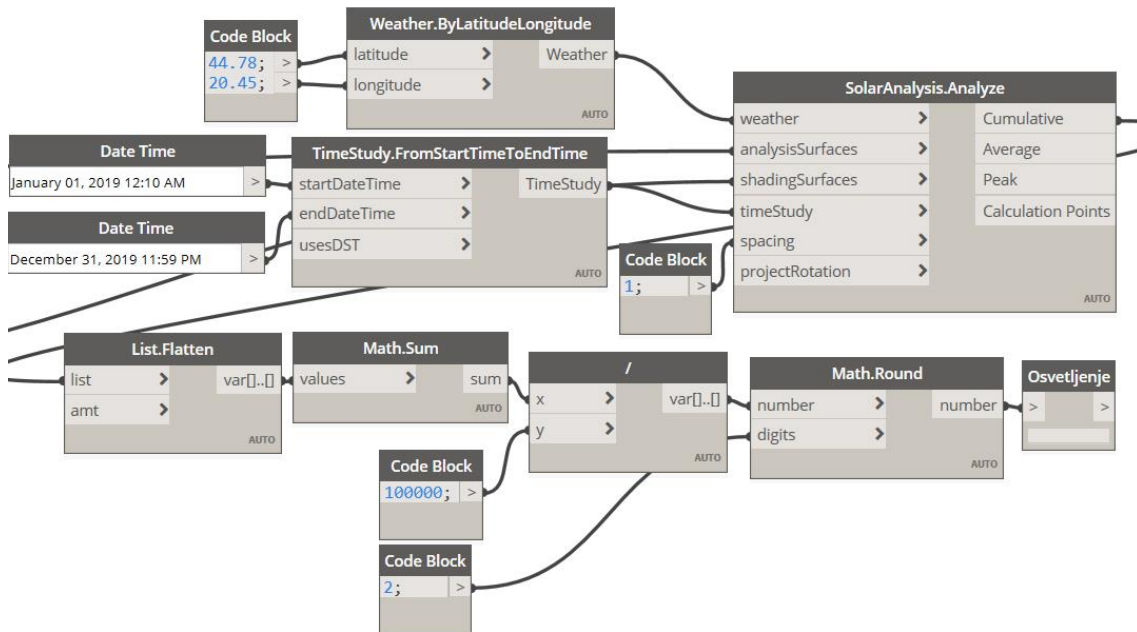
(7) Креирање елемената зидова



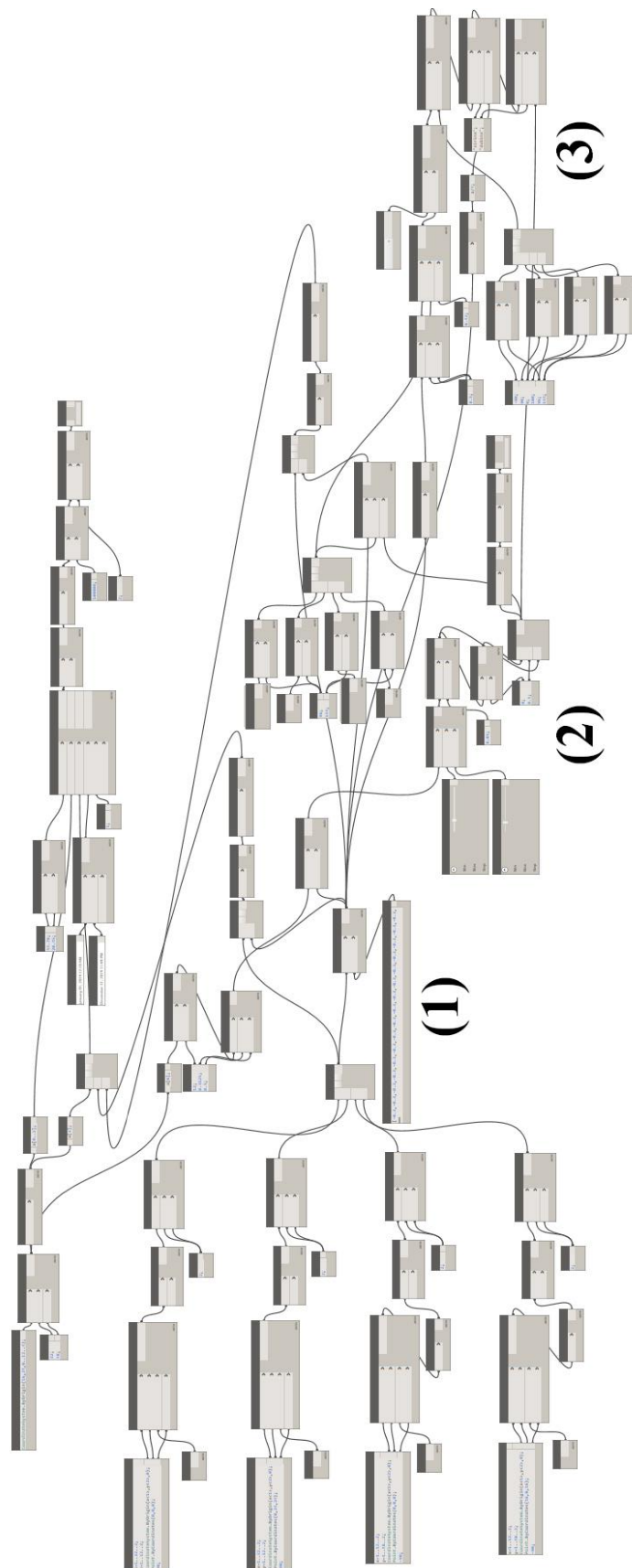
(8) Креирање елемената прозора



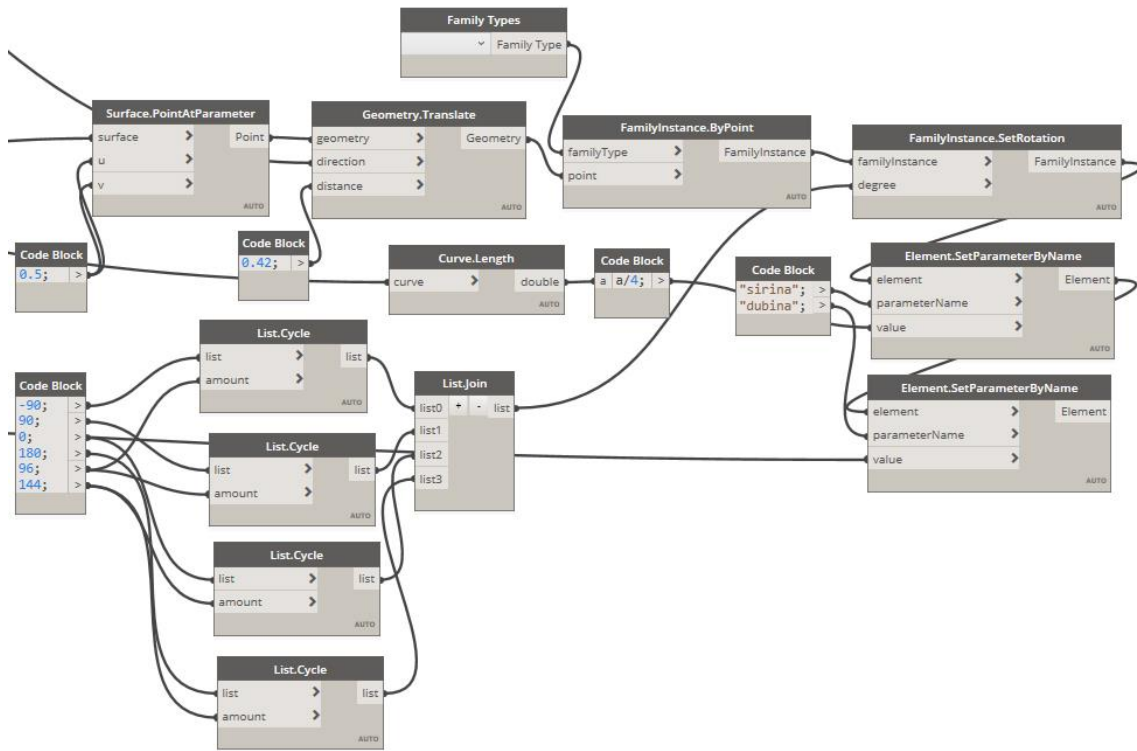
(9) Креирање функције циља укупне површине отвора



(10) Креирање функције циља укупне количине дневне светлости



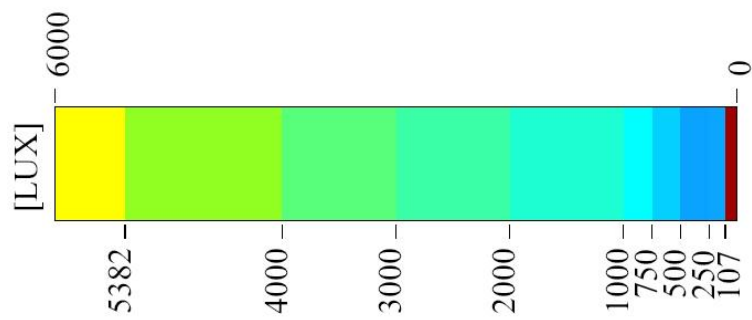
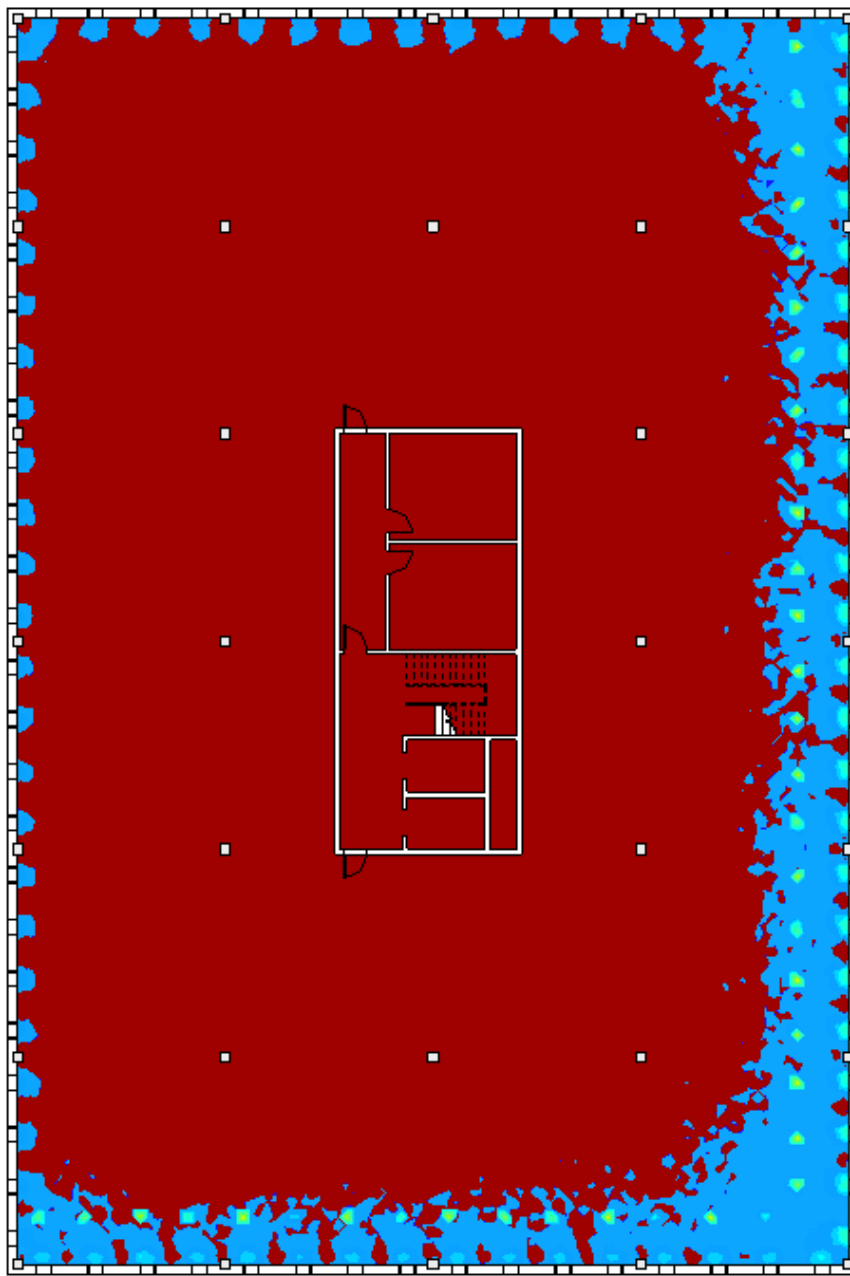
Финални изглед скрипте оптимизације сенила



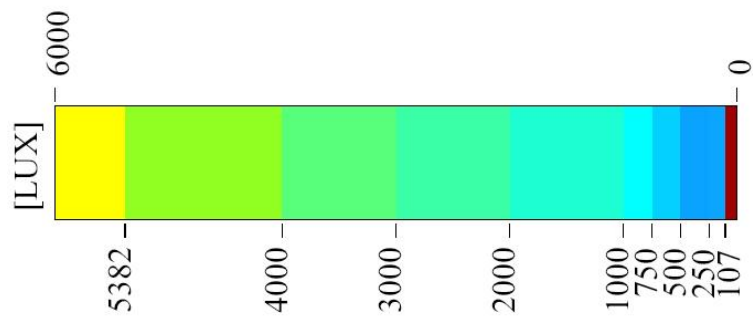
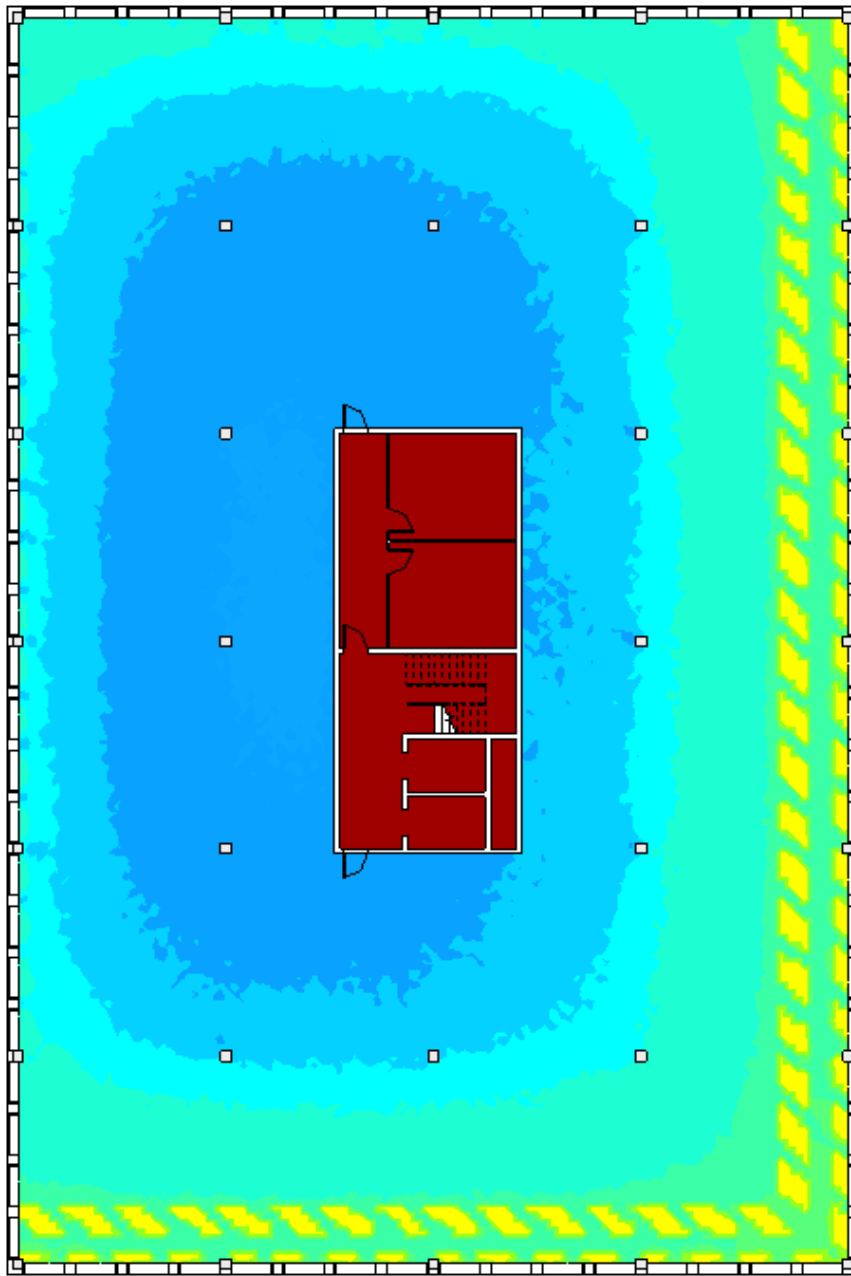
(3) Креирање елемената сенила

**ПРИЛОГ 2: Визуелни приказ дистрибуције дневне светлости на основама
приземља хипотетичких модела**

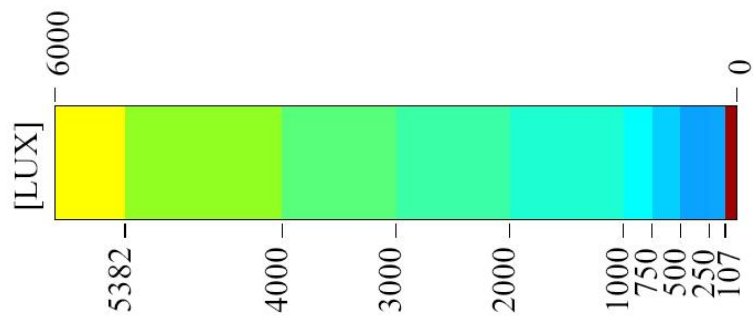
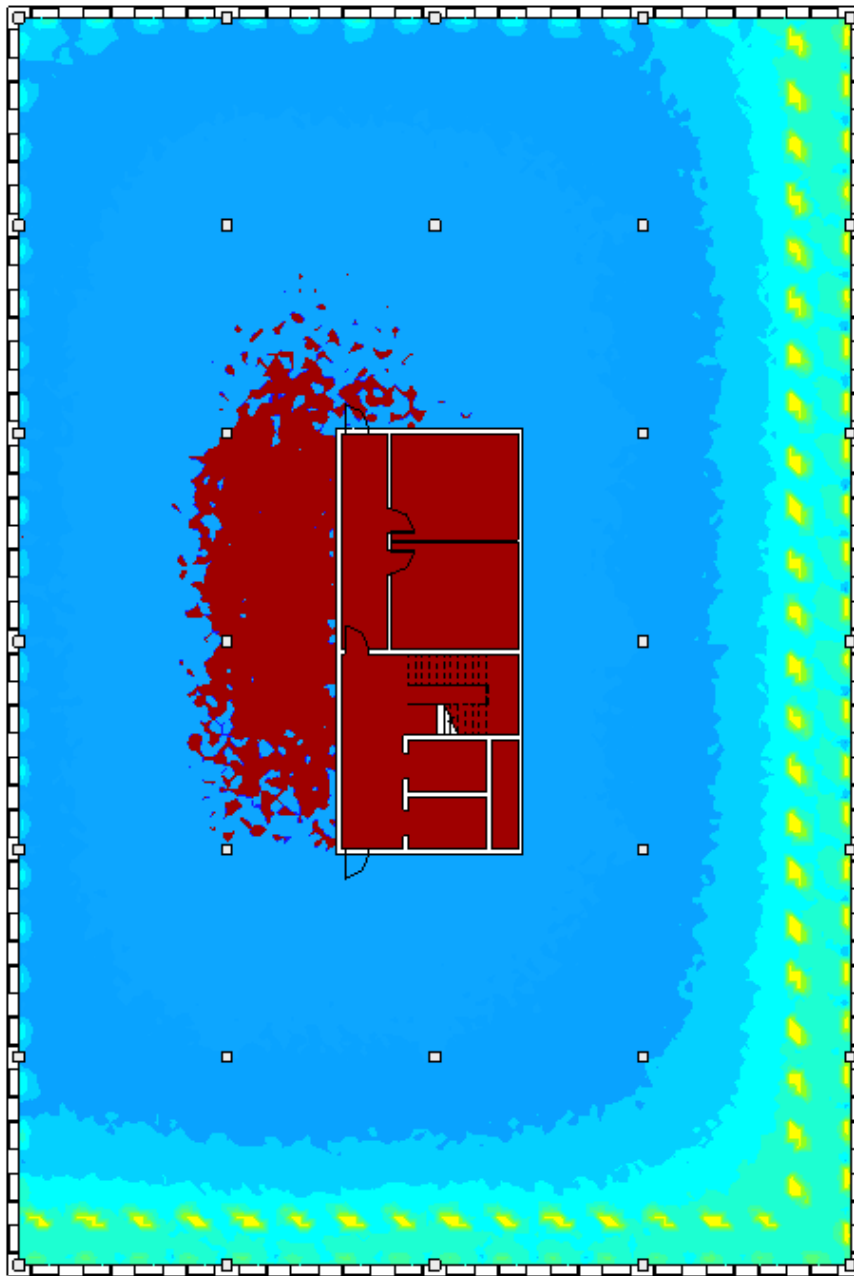
Модел М1 – основа приземља



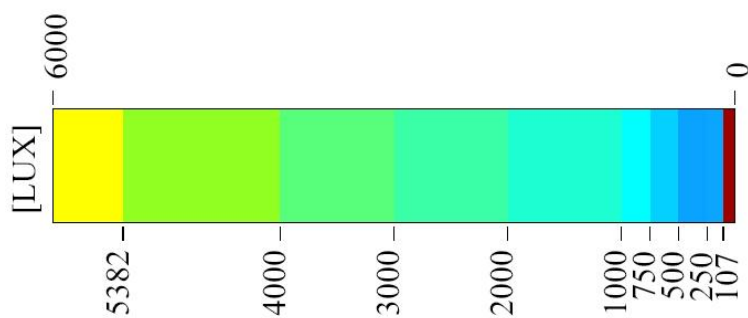
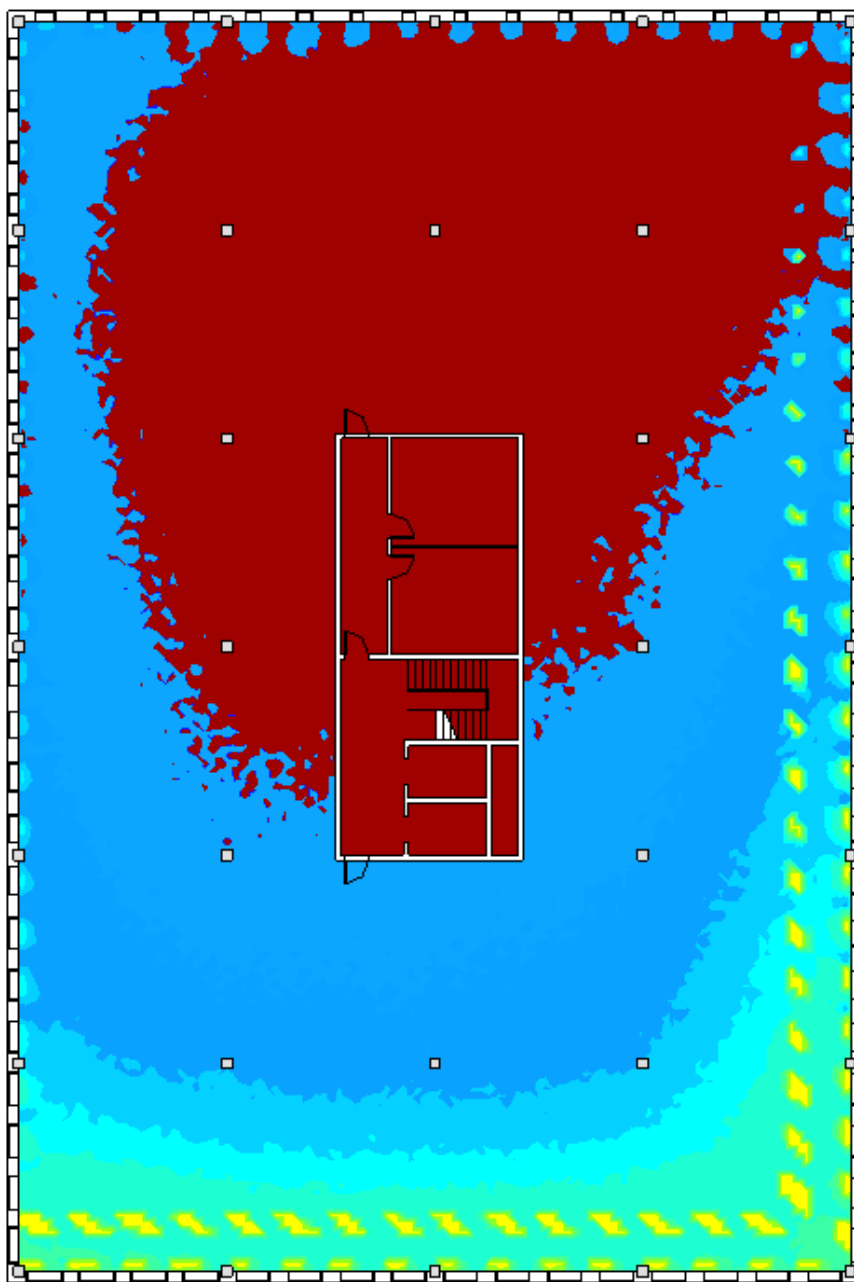
Модел М2 – основа приземља



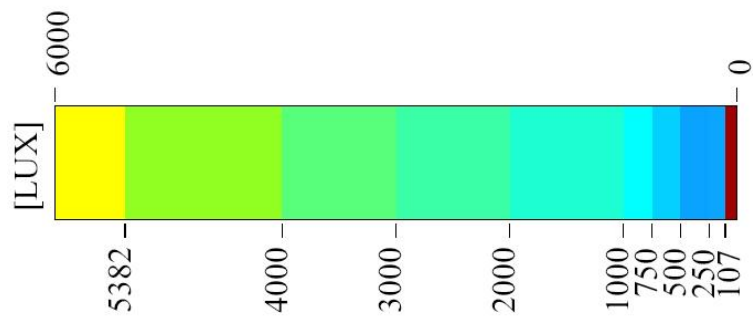
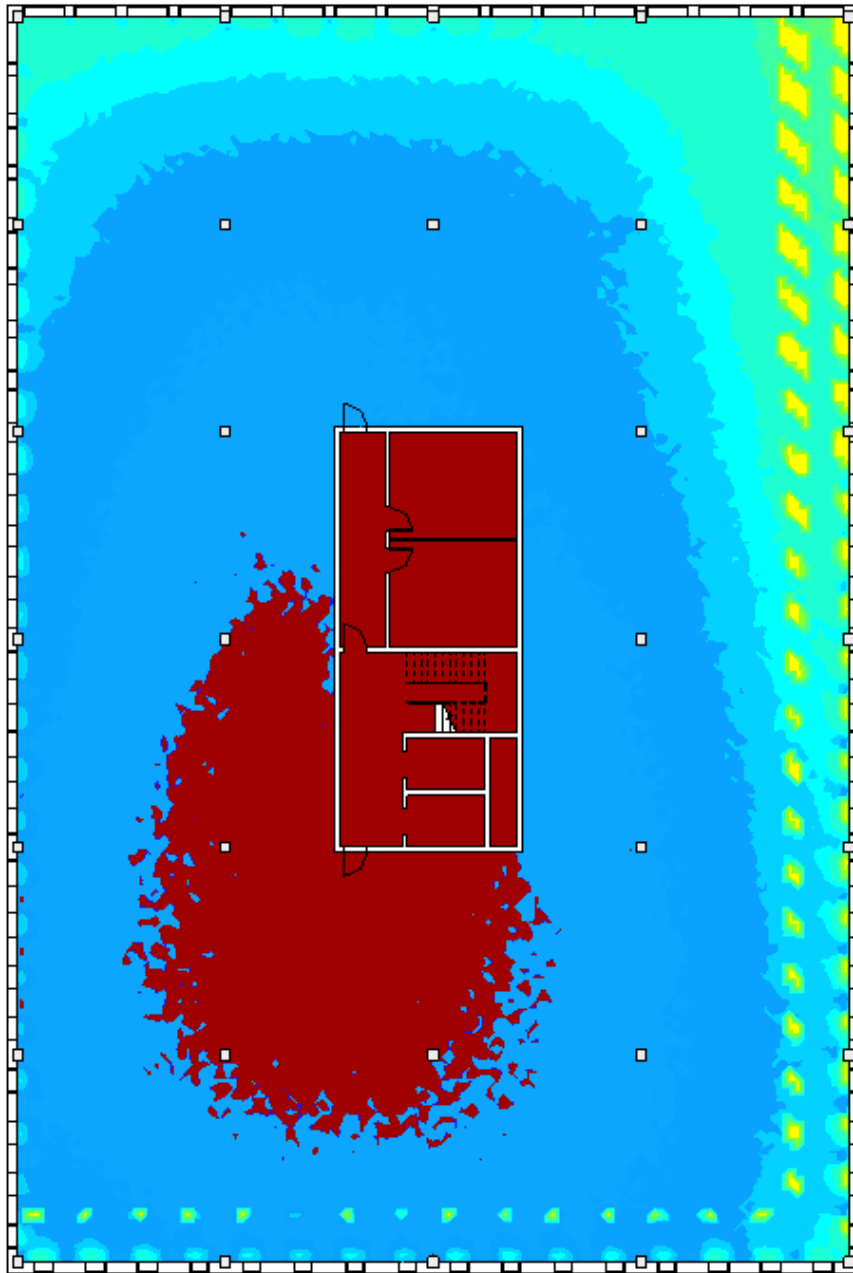
Модел М3 – основа приземља



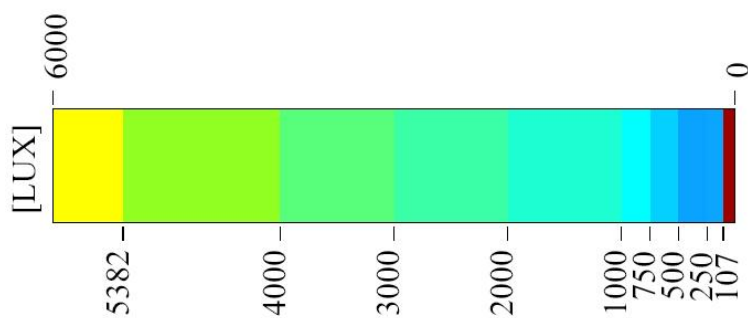
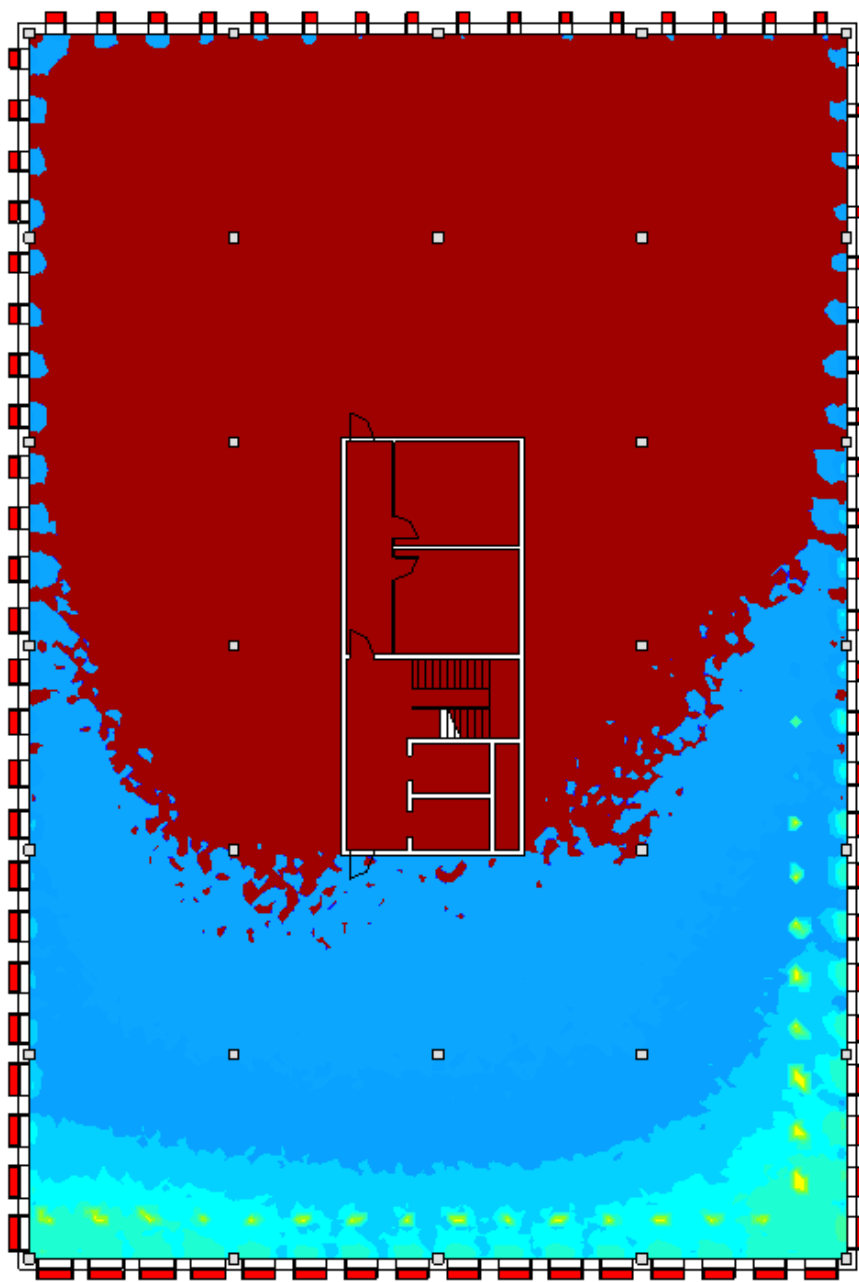
Модел О1 – основа приземља



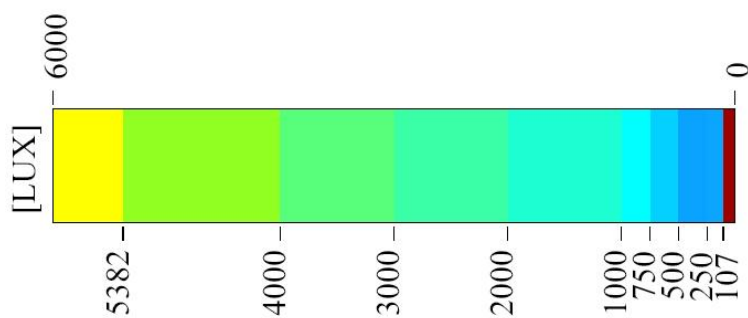
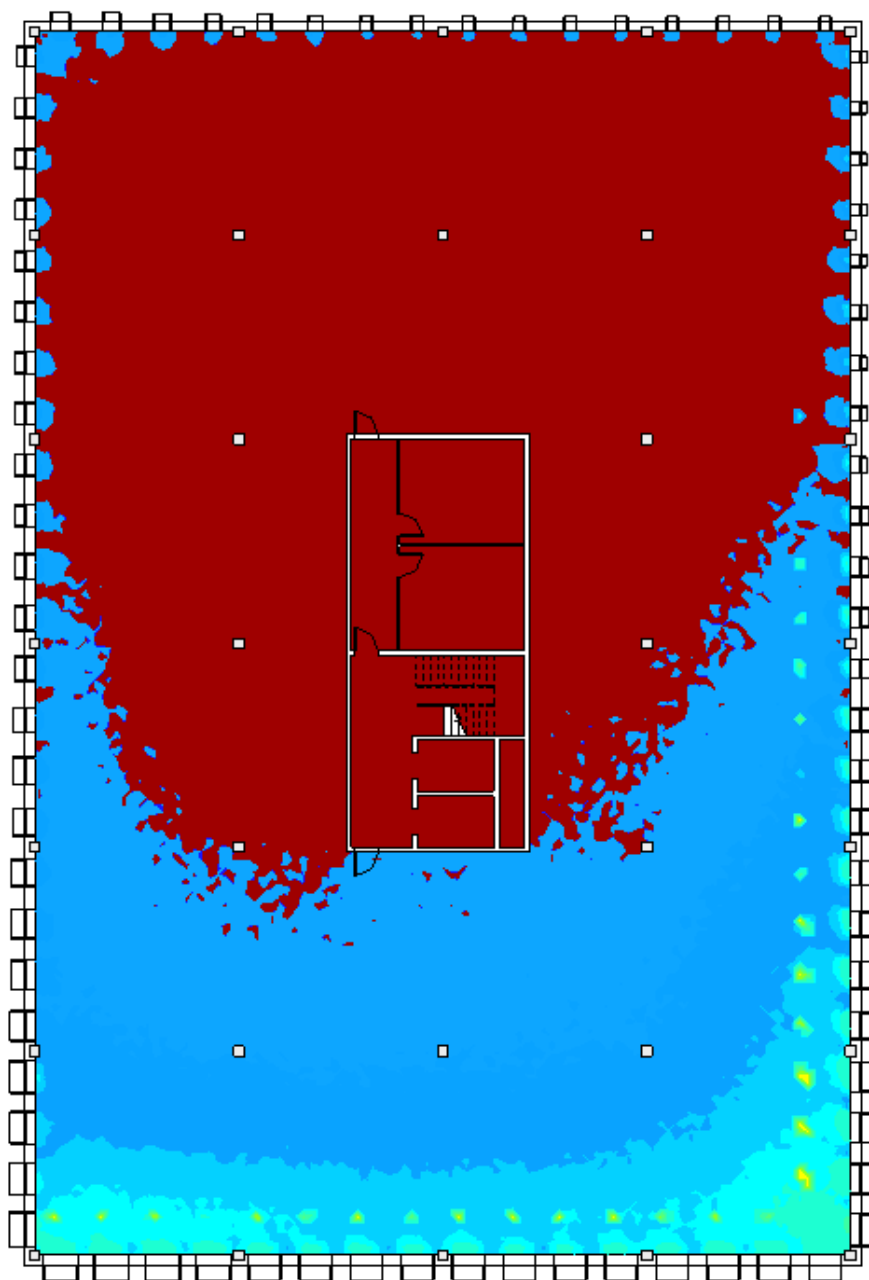
Модел О2 – основа приземља



Модел А1 – основа приземља



Модел А2 – основа приземља



ПРИЛОГ 3: Топлотна оптерећења хипотетичких модела

МОДЕЛ М1 – тоplotно оптерећење за најтоплији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	11949.97	38354.31	13657.12	63961.39	31.08	2792.84	22.90
Осветљење	33312.14	0.00	/	33312.14	16.19	2792.84	11.93
Електрична опрема	43505.95	0.00	0.00	43505.95	21.14	2792.84	15.58
Поветравање	5490.73	/	914.40	6405.14	3.11	1835.00	3.49
Вентилација	21709.67	/	3924.02	25633.69	12.46	/	/
Кров	/	9514.26	/	9514.26	4.62	1561.93	6.09
Међуспратна конструкција	/	8024.90	/	8024.90	3.90	2679.44	2.99
Спољшњи зидови	/	-1426.6	/	-1426.6	-0.7	1835.00	-0.8
Преградни зидови	/	-1526.0	/	-1526.0	-0.7	1135.28	-1.3
Готови подови	/	-1171.3	/	-1171.3	-0.6	2679.44	-0.4
Под на тлу	/	-249.5	/	-249.5	-0.1	113.40	-2.2
Прозори - кондукција	4152.48	/	/	4152.48	2.02	168.49	24.65
Прозори – соларни добаци	/	16512.13	/	16512.13	8.02	168.49	98.00
Врата		-854.3		-854.3	-0.4	22.55	-37.9
Укупно	120120.95	67177.97	18495.54	205794.45	/	/	/

МОДЕЛ М1 – топлотно оптерећење за најхладнији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Осветљење	0.00	0.00	/	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Електрична опрема	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Поветравање	-14020.0	/	-2682.5	-16702.5	19.93	1835.00	-9.1
Вентилација	-33702.8	/	-6193.9	-39896.7	47.61	/	/
Кров	/	-7827.4	/	-7827.4	9.34	1561.93	-5.0
Међуспратна конструкција	/	-231.2	/	-231.2	0.28	2679.44	-0.1
Спољшњи зидови	/	-12588.5	/	-12588.5	15.02	1835.00	-6.9
Преградни зидови	/	0.91	/	0.91	-0.0	1135.28	0.00
Готови подови	/	231.38	/	231.38	-0.3	2679.44	0.09
Под на тлу	/	63.73	/	63.73	-0.1	113.40	0.56
Прозори - кондукција	-6846.8	/	/	-6846.8	8.17	168.49	-40.6
Прозори – соларни добаци	/	0.00	/	0.00	-0.00	168.49	0.00
Врата	/	0.03	/	0.03	-0.0	22.55	0.00
Укупно	-54569.6	-20351.1	-8876.3	-83797.1	/	/	/

МОДЕЛ М2 – тоplotно оптерећење за најтоплији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	11949.97	49514.18	13657.12	75121.27	21.65	2792.84	26.90
Осветљење	33312.14	0.00	/	33312.14	9.60	2792.84	11.93
Електрична опрема	43505.95	0.00	0.00	43505.95	12.54	2792.84	15.58
Поветравање	5298.76	/	1163.57	6462.33	1.86	1775.45	3.64
Вентилација	21652.24	/	4728.04	26380.28	7.60	/	/
Кров	/	9780.33	/	9780.33	2.82	1561.93	6.26
Међуспратна конструкција	/	47797.46	/	47797.46	13.78	2679.44	17.84
Спољшњи зидови	/	-17350.2	/	-17350.2	-5.0	1775.45	-9.8
Преградни зидови	/	2187.92	/	2187.92	0.63	1135.28	1.93
Готови подови	/	-7138.7	/	-7138.7	-2.1	2679.44	-2.7
Под на тлу	/	-423.8		-423.8	-0.1	113.40	-3.7
Прозори - кондукција	21470.14		/	21470.14	6.19	1072.50	20.02
Прозори – соларни добаци	/	106596.92	/	106596.92	30.72	1072.50	99.39
Врата	/	-749.2	/	-749.2	-0.2	22.55	-33.2
Укупно	137189.20	190214.89	19548.73	346952.82	/	/	/

МОДЕЛ М2 – топлотно оптерећење за најхладнији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Осветљење	0.00	0.00	/	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Електрична опрема	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Поветравање	-13564.6	/	-2821.1	-16385.7	14.74	1775.45	-9.2
Вентилација	-33702.7	/	-6648.3	-40351.0	36.29	/	/
Кров	/	-7674.4	/	-7674.4	6.90	1561.93	-4.9
Међуспратна конструкција	/	-140.2	/	-140.2	0.13	2679.44	-0.1
Спољшњи зидови	/	-5163.2	/	-5163.2	4.64	1775.45	-2.9
Преградни зидови	/	0.91	/	0.91	-0.0	1135.28	0.00
Готови подови	/	140.28	/	140.28	-0.1	2679.44	0.05
Под на тлу	/	81.35	/	81.35	-0.1	113.40	0.72
Прозори - кондукција	-41710.1	/	/	-41710.1	37.51	1072.50	-38.9
Прозори – соларни добаци	/	0.00	/	0.00	-0.00	1072.50	0.00
Врата	/	0.03	/	0.03	-0.0	22.55	0.00
Укупно	-88977.4	-12755.2	-9469.4	-111202.0	/	/	/

МОДЕЛ МЗ – тоplotно optерећење за најтоплији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	11949.97	39642.44	13657.12	65249.52	24.83	2792.84	23.36
Осветљење	33312.14	0.00	/	33312.14	12.68	2792.84	11.93
Електрична опрема	43505.95	0.00	0.00	43505.95	16.55	2792.84	15.58
Поветравање	5405.31	/	1086.94	6492.25	2.47	1811.24	3.58
Вентилација	21652.32	/	4405.65	26057.96	9.92	/	/
Кров	/	9762.00	/	9762.00	3.71	1561.93	6.25
Међуспратна конструкција	/	23685.43	/	23685.43	9.01	2679.44	8.84
Спољшњи зидови	/	-7004.5	/	-7004.5	-2.7	1811.24	-3.9
Преградни зидови	/	-67.1	/	-67.1	-0.0	1135.28	-0.1
Готови подови	/	-3554.5	/	-3554.5	-1.4	2679.44	-1.3
Под на тлу	/	-332.0	/	-332.0	-0.1	113.40	-2.9
Прозори - кондукција	12574.13		/	12574.13	4.78	540.17	23.28
Прозори – соларни добици	/	53927.12	/	53927.12	20.52	540.17	99.83
Врата	/	-802.9	/	-802.9	-0.3	22.55	-35.6
Укупно	128399.82	115256.06	19149.70	262805.58	/	/	/

МОДЕЛ М3 – топлотно оптерећење за најхладнији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Осветљење	0.00	0.00	/	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Електрична опрема	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Поветравање	0.00	/	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Вентилација	-13838.5	/	-2763.0	-16601.5	17.41	1811.24	-9.2
Кров	-33702.8	/	-6402.1	-40104.9	42.06	/	/
Међуспратна конструкција	/	-7757.1	/	-7757.1	8.13	1561.93	-5.0
Спољшњи зидови	/	-198.7	/	-198.7	0.21	2679.44	-0.1
Преградни зидови	/	-9487.3	/	-9487.3	9.95	1811.24	-5.2
Готови подови	/	0.91	/	0.91	-0.0	1135.28	0.00
Под на тлу	/	198.78	/	198.78	-0.2	2679.44	0.07
Прозори - кондукција	/	71.34	/	71.34	-0.1	113.40	0.63
Прозори – соларни добаци	-21477.4	/	/	-21477.4	22.52	540.17	-39.8
Врата	/	0.00	/	0.00	-0.00	540.17	0.00
Укупно	/	0.03	/	0.03	-0.0	22.55	0.00

МОДЕЛ О1 – тоplotно оптерећење за најтоплији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	11949.97	33665.86	13657.12	59272.95	23.22	2792.84	21.22
Осветљење	33312.14	0.00	/	33312.14	13.05	2792.84	11.93
Електрична опрема	43505.95	0.00	0.00	43505.95	17.04	2792.84	15.58
Поветравање	5445.24	/	1078.28	6523.52	2.56	1819.77	3.58
Вентилација	21709.54	/	4362.42	26071.96	10.21	/	/
Кров	/	9610.93	/	9610.93	3.76	1561.93	6.15
Међуспратна конструкција	/	21783.10	/	21783.10	8.53	2679.44	8.13
Спољшњи зидови	/	1091.52	/	1091.52	0.43	1819.77	0.60
Преградни зидови	/	-63.4	/	-63.4	-0.0	1135.28	-0.1
Готови подови	/	-3727.8	/	-3727.8	-1.5	2679.44	-1.4
Под на тлу	/	-335.1	/	-335.1	-0.1	113.40	-3.0
Прозори - кондукција	9088.57	/	/	9088.57	3.56	420.65	21.61
Прозори – соларни добаци	/	49986.24	/	49986.24	19.58	420.65	118.83
Врата	/	-820.1	/	-820.1	-0.3	22.55	-36.4
Укупно	125011.42	111191.25	19097.81	255300.48	/	/	/

МОДЕЛ О1 – тоplotно оптерећење за најхладнији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Осветљење	0.00	0.00	/	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Електрична опрема	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Поветравање	-13903.4	/	-2742.6	-16646.0	18.16	1819.77	-9.1
Вентилација	-33702.8	/	-6340.6	-40043.4	43.67	/	/
Кров	/	-7784.3	/	-7784.3	8.49	1561.93	-5.0
Међуспратна конструкција	/	-195.4	/	-195.4	0.21	2679.44	-0.1
Спољшњи зидови	/	-10483.1	/	-10483.1	11.43	1819.77	-5.8
Преградни зидови	/	0.91	/	0.91	-0.0	1135.28	0.00
Готови подови	/	195.51	/	195.51	-0.2	2679.44	0.07
Под на тлу	/	69.22	/	69.22	-0.1	113.40	0.61
Прозори - кондукција	-16800.0		/	-16800.0	18.32	420.65	-39.9
Прозори – соларни добаци	/	0.00	/	0.00	-0.00	420.65	0.00
Врата	/	0.03	/	0.03	-0.0	22.55	0.00
Укупно	-64406.3	-18197.1	-9083.2	-91686.6	/	/	/

МОДЕЛ О2 – тоplotно оптерећење за најтоплији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	11949.97	39544.73	13657.12	65151.82	24.13	2792.84	23.33
Осветљење	33312.14	0.00	/	33312.14	12.34	2792.84	11.93
Електрична опрема	43505.95	0.00	0.00	43505.95	16.11	2792.84	15.58
Поветравање	5256.87	/	1005.92	6262.79	2.32	1836.95	3.41
Вентилација	20762.43	/	4008.19	24770.62	9.17	/	/
Кров	/	9558.87	/	9558.87	3.54	1561.93	6.12
Међуспратна конструкција	/	25670.49	/	25670.49	9.51	2679.44	9.58
Спољшњи зидови	/	-7141.8	/	-7141.8	-2.6	1836.95	-3.9
Преградни зидови	/	-114.2	/	-114.2	-0.0	1135.28	-0.1
Готови подови	/	-2980.3	/	-2980.3	-1.1	2679.44	-1.1
Под на тлу	/	-325.7	/	-325.7	-0.1	113.40	-2.9
Прозори - кондукција	15995.02	/	/	15995.02	5.92	628.10	25.47
Прозори – соларни добаци	/	57151.77	/	57151.77	21.17	628.10	90.99
Врата	/	-807.2	/	-807.2	-0.3	22.55	-35.8
Укупно	130782.38	120556.63	18671.23	270010.24	/	/	/

МОДЕЛ О2 – тоplotно оптерећење за најхладнији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Осветљење	0.00	0.00	/	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Електрична опрема	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Поветравање	-14034.8	/	-2822.2	-16857.0	17.11	1836.95	-9.2
Вентилација	-33702.7	/	-6448.9	-40151.6	40.76	/	/
Кров	/	-7742.8	/	-7742.8	7.86	1561.93	-5.0
Међуспратна конструкција	/	-186.5	/	-186.5	0.19	2679.44	-0.1
Спољшњи зидови	/	-8995.3	/	-8995.3	9.13	1836.95	-4.9
Преградни зидови	/	0.91	/	0.91	-0.0	1135.28	0.00
Готови подови	/	186.67	/	186.67	-0.2	2679.44	0.07
Под на тлу	/	73.19	/	73.19	-0.1	113.40	0.65
Прозори - кондукција	-24832.3	/	/	-24832.3	25.21	628.10	-39.5
Прозори – соларни добаци	/	0.00	/	0.00	-0.00	628.10	0.00
Врата	/	0.03	/	0.03	-0.0	22.55	0.00
Укупно	-72569.8	-16663.9	-9271.1	-98504.9	/	/	/

МОДЕЛ А1 – тоplotно оптерећење за најтоплији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	11949.97	42266.44	13657.12	67873.53	38.53	2792.84	24.30
Осветљење	33312.14	0.00	/	33312.14	18.91	2792.84	11.93
Електрична опрема	43505.95	0.00	0.00	43505.95	24.70	2792.84	15.58
Поветравање	2736.45	/	371.60	3108.05	1.76	926.82	3.35
Вентилација	21423.11	/	3583.27	25006.38	14.20	/	/
Кров	/	9361.28	/	9361.28	5.31	1561.93	5.99
Међуспратна конструкција	/	3211.21	/	3211.21	1.82	2679.44	1.20
Спољшњи зидови	/	-18548.0	/	-18548.0	-10.5	926.82	-20.0
Преградни зидови	/	-2123.8	/	-2123.8	-1.2	1135.28	-1.9
Готови подови	/	-2033.5	/	-2033.5	-1.2	2679.44	-0.8
Под на тлу	/	-238.3	/	-238.3	-0.1	113.40	-2.1
Прозори - кондукција	1408.19	/	/	1408.19	0.80	80.25	17.55
Прозори – соларни добаци	/	13239.09	/	13239.09	7.52	80.25	164.97
Врата	/	-945.4	/	-945.4	-0.5	22.55	-41.9
Укупно	114335.81	44189.10	17611.99	176136.90	/	/	/

МОДЕЛ А1 – тоplotно оптерећење за најхладнији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Осветљење	0.00	0.00	/	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Електрична опрема	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Поветравање	-7081.5	/	-1322.5	-8404.0	12.79	926.82	-9.1
Вентилација	-33703.0	/	-6065.3	-39768.2	60.53	/	/
Кров	/	-7865.7	/	-7865.7	11.97	1561.93	-5.0
Међуспратна конструкција	/	-336.5	/	-336.5	0.51	2679.44	-0.1
Спољшњи зидови	/	-6448.2	/	-6448.2	9.81	926.82	-7.0
Преградни зидови	/	0.93	/	0.93	-0.0	1135.28	0.00
Готови подови	/	336.72	/	336.72	-0.5	2679.44	0.13
Под на тлу	/	57.18	/	57.18	-0.1	113.40	0.50
Прозори - кондукција	-3274.2	/	/	-3274.2	4.98	80.25	-40.8
Прозори – соларни добаци	/	0.00	/	0.00	-0.00	80.25	0.00
Врата	/	0.03	/	0.03	-0.0	22.55	0.00
Укупно	-44058.6	-14255.6	-7387.7	-65701.9	/	/	/

МОДЕЛ А2 – тоplotно оптерећење за најтоплији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	11949.97	39967.35	13657.12	65574.44	38.12	2792.84	23.48
Осветљење	33312.14	0.00	/	33312.14	19.37	2792.84	11.93
Електрична опрема	43505.95	0.00	0.00	43505.95	25.29	2792.84	15.58
Поветравање	2844.21	/	374.88	3219.09	1.87	952.72	3.38
Вентилација	21661.83	/	3535.12	25196.95	14.65	/	/
Кров	/	9496.77	/	9496.77	5.52	1561.93	6.08
Међуспратна конструкција	/	2808.86	/	2808.86	1.63	2679.44	1.05
Спољшњи зидови	/	-16812.3	/	-16812.3	-9.8	952.72	-17.6
Преградни зидови	/	-2201.4	/	-2201.4	-1.3	1135.28	-1.9
Готови подови	/	-1614.5	/	-1614.5	-0.9	2679.44	-0.6
Под на тлу	/	-228.9	/	-228.9	-0.1	113.40	-2.0
Прозори - кондукција	1306.09	/	/	1306.09	0.76	68.91	18.95
Прозори – соларни добици	/	9399.62	/	9399.62	5.46	68.91	136.40
Врата	/	-952.5	/	-952.5	-0.6	22.55	-42.2
Укупно	114580.19	39863.08	17567.12	172010.39	/	/	/

МОДЕЛ А2 – тоplotно оптерећење за најхладнији период

Компоненте	Сензитивно - инстант [W]	Сензитивно - одложено [W]	Латентно [W]	Укупно [W]	Удео [%]	Површина [m ²]	Укупно по површини [W/m ²]
Људи	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Осветљење	0.00	0.00	/	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Електрична опрема	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	2792.84	0.00
Поветравање	-7279.5	/	-1357.6	-8637.1	13.14	952.72	-9.1
Вентилација	-33703.0	/	-6051.9	-39754.9	60.49	/	/
Кров	/	-7864.9	/	-7864.9	11.97	1561.93	-5.0
Међуспратна конструкција	/	-334.7	/	-334.7	0.51	2679.44	-0.1
Спољшњи зидови	/	-6730.0	/	-6730.0	10.24	952.72	-7.1
Преградни зидови	/	0.93	/	0.93	-0.0	1135.28	0.00
Готови подови	/	334.91	/	334.91	-0.5	2679.44	0.12
Под на тлу	/	56.96	/	56.96	-0.1	113.40	0.50
Прозори - кондукција	-2796.9	/	/	-2796.9	4.26	68.91	-40.6
Прозори – соларни добаци	/	0.00	/	0.00	-0.00	68.91	0.00
Врата	/	0.03	/	0.03	-0.0	22.55	0.00
Укупно	-43779.4	-14536.8	-7409.5	-65725.8	/	/	/

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Образовање

Стеван Вукадиновић је рођен 2. августа 1990. године, у Косовској Митровици. Услед сложене политичке ситуације у земљи, 1999. године се са породицом сели у Краљево, где завршава основну и средњу школу. Краљевачку гимназију (природно-математички смер) завршава са одличним успехом. Током школовања, учествовао је на многим такмичењима из математике. Архитектонски факултет Универзитета у Београду је уписао 2009. године, а основне академске студије завршава три године касније. Након тога уписује мастер студије на истом факултету (смер архитектонске технологије), које завршава са просечном оценом 9,55. Дипломирао је 2014. године, код професора Владимира Лојанице са пројектом „Потенцијал празног - Денсификација као метод ревитализације браунфилд локација“. Годину дана касније уписује докторске академске студије на Архитектонском факултету у Београду (основна област истраживања-архитектура, ужа област истраживања - технологије у архитектури и менаџмент и биоклиматска и еколошка архитектура). Положио је све испите предвиђене студијским програмом докторских студија.

Током школовања, за свој рад, био је награђен студентском стипендијом Министарства за просвету и спорт Републике Србије.

Стручна биографија

Своју стручну каријеру Стеван Вукадиновић започиње априла 2015. године у аустријском архитектонском бироу „У.М.А. Архитектен“ (*U.M.A. Architekten*), најпре као млађи помоћник архитекте, а затим као сарадник главног архитекте. Учествовао је у реализацији на десетине великих пројеката објеката различите намене, углавном на територији Аустрије и Немачке. Фебруара 2016. године, одлази у Беч на усваршавање у матичном бироу, кроз непосредну праксу на градилишту стамбеног комплекса у месту Нојзидл, у околини Беча.

Неки од пројеката на којима је активно радио:

- Израда идејног и главног пројекта стамбеног комплекса у месту Марија Енцерсдорф, Аустрија, којег чини пет објеката спратности од Пр+1+Пк до По+Пр+3+Пк и реконструкција и надоградња постојећег објекта под заштитом државе, површине 10.500 m²;

- Израда главног пројекта хотела „Мокси“ (*Моху*) у оквиру „Мериот“ (*Marriott*) групације, на Интернационалном аеродрому у Швехату, у околини Беча, у Аустрији, спратности Пр+6, површине 14.100 m²;

- Израда главног пројекта хотела „Мокси“ у Минхену, у Немачкој, спратности Пр+6, површине 15.700 m².

Јануара 2018. године, Стеван Вукадиновић прелази у српски архитектонски биро „Д. А. - Дизајнархитектура д.о.о.“, као сарадник водећег пројектанта. Због изузетног познавања „БИМ“ програма „Ревит“ и визуелног програмирања „Дајнамо“, од маја 2018. године је на позицији БИМ менаџера.

Активно је радио на идејном пројекту новог стамбено-пословно-продајног комплекса „БИГ фешн парк“ (*BIG fashion park*), у Вишњичкој улици на Карабурми, бруто површине око 200.000 m².

Стеван Вукадиновић, тренутно ради на главном пројекту пословног комплекса намењеног највећој финансијској групацији у Баден-Вутембергу (*Wüstenrot & Württembergische - W&W*). Пројекат се тренутно реализује у Лудвигсбургу, у околини Штутгарта, у Немачкој, а простор од 95.800 m², биће радно место за 5.000 запослених. На овом пројекту, „Д. А. - Дизајнархитектура д.о.о.“ активно сарађује са великим немачким архитектонским бироом „Фихтнер Бауконсалтинг“ (*Fichtner Bauconsulting*), а Стеван често одлази у Штутгарт да директно учествује у раду на пројекту, са својим немачким колегама.

Паралелно са сталним запослењем, Стеван се бави научно-истраживачким радом, учествује на конкурсима и бави се сопственом приватном праксом.

Научни рад

Vukosavljević, K., Joksimović, O., Vukadinović, S. (2016). Green roof retrofit potential in a densely populated belgrade municipality, u *Conference proceedings of the 3rd International Academic Conference: Places and Technologies*. Belgrade:University of Belgrade – Faculty of Architecture.

Учешће на научним скуповима националног карактера:

- ISSUES? Concerning The Projects Of Peter Eisenman, 11. 11. 2013.
- Architecture of Deconstruction The Specter of Jacques Derrida, 25, 26. i 27. 10.2011.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Потписани _____ Стеван Вукадиновић

број индекса _____ Д15/2014

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

_____ ЕНЕРГЕТСКА ОПТИМИЗАЦИЈА

_____ ПАРАМЕТАРСКИ МОДЕЛИРАНИХ ФАСАДА

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

У Београду, _____

Потпис докторанда

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКОГ РАДА**

Име и презиме аутора _____ Стеван Вукадиновић _____

Број индекса _____ Д15/2014 _____

Студијски програм _____ Архитктура и урбанизам _____

Наслов рада _____ ЕНЕРГЕТСКА ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРСКИ
_____ МОДЕЛИРАНИХ ФАСАДА _____

Ментор _____ Проф. др Александра Крстић-Фурунџић _____

Потписани _____ Стеван Вукадиновић _____

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.

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

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

У Београду, _____

Потпис докторанда

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

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

- ЕНЕРГЕТСКА ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРСКИ

МОДЕЛИРАНИХ ФАСАДА

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, _____

Потпис докторанда

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