

Кратко или претходно саопштење, рад примљен: април 2020., рад прихваћен: јун 2020.

Стеван Вукадиновић*

АПСТРАКТ

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 годишњу количину енергије која потиче од добитака услед сунчевог зрачења), употребом метахеурстичког оптимизацијског метода – *генетског алгоритма (genetic algorithm)*. На основу валоризације резултата, одабира се најефикасније решење. Резултати свих оптимизација се користе за креирање три хипотетичка 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 и компаративну анализу добијених резултата.

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

ABSTRACT

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 (solar radiation), using metaheuristic optimization method - genetic algorithm. Examining the results, the most efficient solution was chosen. The results from all of the optimizations were used to create three 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 and analysis of the results.

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

УВОД

Циљ овог истраживања је приказивање 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 има за циљ и да покаже да је оптимизацијским процесом могуће унапредити енергетска својства хипотетичког модела објекта.

Задаци истраживања су фокусирани на: идентификацију променљивих параметара фасада, креирање програма који врши оптимизацију употребом генетског алгоритма, користећи променљиве параметре са њиховим граничним вредностима, вршење оптимизације за дефинисане функције циља, употребу добијених резултата за креирање хипотетичких модела и, финално, енергетске симулације тих модела.

* Стеван Вукадиновић, студент докторских студија на Архитектонском факултету Универзитета у Београду
stevan.vukadinovic.af@gmail.com

Тема оптимизације употребом генетског алгоритма, као метода за изналагање адекватног решења, позната је 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 изналагања решења везаних за форму, конструкцију, енергетске перформансе објекта, просторне шеме и друго.

ТЕОРИЈСКИ ОКВИР

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. Процес пројектовања фасада се током времена усложњавао, те резултовао великим бројем јединствених приступа и стилова. Један од приступа, који се посебно издваја и у новије време привлачи све већу пажњу стручне и шире јавности, јесте параметарско моделовање. Параметарско моделовање је процес при којем добијена геометрија има променљива својства, дефинисана параметрима и правилима који владају између елемената (*Woodbury, 2010*). 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. Параметарски моделиране 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. Основна предност параметарског моделовања је једноставна могућност креирања великог броја потенцијалних решења. Недостаци су углавном техничке природе, јер је тренутни софтвер врло лимитиран, нема могућности креирања комплексних енергетских, структуралних, механичких и других симулација, често је комплексан за учење, финансијски неприступачан и захтева велику снагу рачунара.

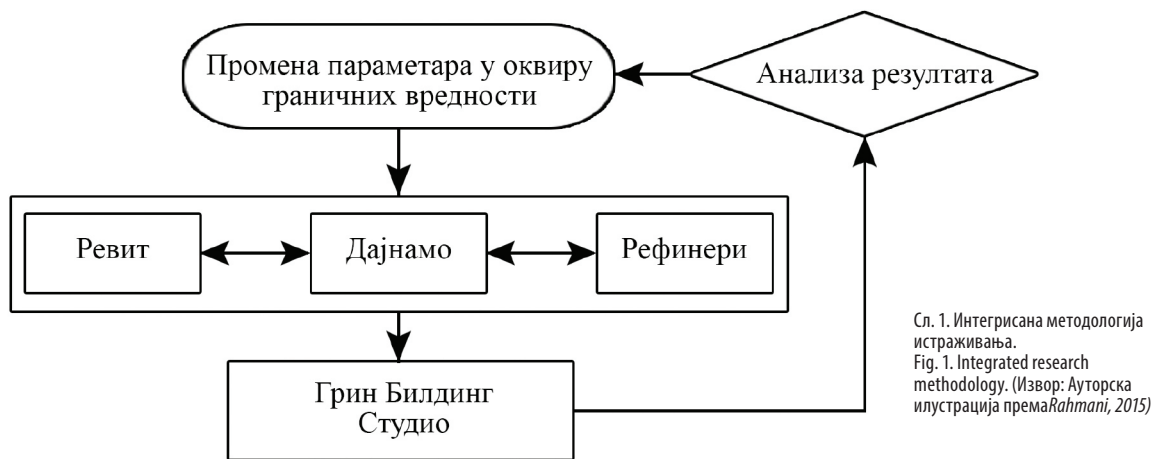
БИМ (енг. *Building Information Modeling*) је реална дигитална репрезентација физичких и функционалних карактеристика неког објекта. Он је дељени извор информација о објекту, који формира поуздану основу за одлуке током свог животног циклуса, од ране фазе пројектовања до рушења (*NBIMS-US, 2016*). На интелигентан начин омогућава планирање, дизајн, конструкцију и менаџмент објекта или инфраструктуре. Пружа додатан сет информација везаних за елементе модела (подови, зидови, прозори, врата) и системске информације (структурална оптерећења, проток ваздуха итд.). 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.

Креирање комплексних форми 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. „визуелно 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 прилагођенији 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*). Софтвер за визуелно програмирање који архитекте тренутно користе се зове *Дајнамо* (енг. *Dynamo*) и заснован је на *Пајтон* (енг. *Python*) програмском језику. Финално креирани програм у Дајнаму се назива *скрипта* (енг. *script*). Информације из скрипте употребљава софтвер који се назива *Рефинери* (енг. *Refinery*), а који омогућава изналагање оптималних решења употребом генетског алгоритма, у оквиру Ревит и Дајнамо окружења.

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 *DOE-2.2* (енг. *DOE-2.2*) симулациони метод. *DOE-2.2* је широко прихваћен и коришћен симулациони метод за прорачуне енергетских анализа објекта 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.

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 креирање хипотетичког модела са реалним карактеристикама, док Рефинери врши оптимизацију употребом генетског алгоритма. Дајнамо користи информације из Ревита за креирање променљивих параметара, које су неопходне Рефинерију у процесу оптимизације. Добијени оптимизовани хипотетички модел



Сл. 1. Интегрисана методологија истраживања.
Fig. 1. Integrated research methodology. (Извор: Ауторска илустрација према Rahmani, 2015)

се тестира за енергетска својства, преко Грин билдинг студија. Резултати симулација показују да ли су неопходне додатне корекције зарад унапређења решења, те се потенцијално мењају основни параметри и процес почиње испочетка (Сл.1).

ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ

Одређени специфични проблеми се, због своје комплексности, не могу 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*). Оне испитују само одређени број решења, али по унапред дефинисаним правилима према којима бирају решења за која потенцијално сматрају да могу бити исправна.

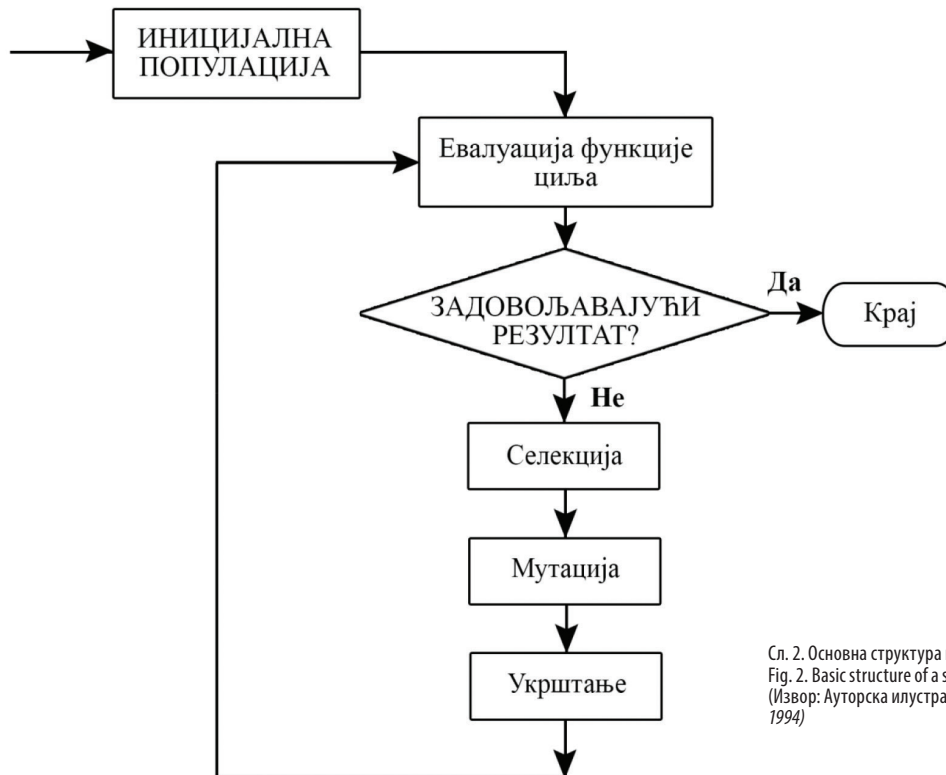
Генетски алгоритам је оптимизацијски метод који имитира природни еволуцијски процес при добијању одговарајућег решења (Mitchell, 1996). Структуру генетског алгоритма чине процеси селекције, укрштања и мутације по унапред дефинисаним правилима, који се понављају до тренутка изналажења најбољег решења. 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 (John Holland) у својој књизи *Адаптација природних и вештачких система (Adaptation in Natural and Artificial System)* (Holland, 1975). Генетски алгоритам има широку примену у различитим научним областима, а због великог потенцијала све више налази своју примену и у архитектури.

Генетски алгоритам почиње формирањем скупа почетних решења, односно скупа јединки, чији домен (укупан број) одређује корисник. Он 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 (Сл. 2). 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 особина и тај процес се назива мутација. Она омогућава да се врате одређена решења која су током процеса селекције изгубљена и на тај начин „освежи“ и финално побољша квалитет следећих генерација.

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). Фитнес неке јединке је дефинисан на основу особина неког решења. Њега одређује функција која оцењује квалитет јединке и назива се *фитнес функција* или *функција циља* (енг. *fitness function*). Функција циља је најзначајнији део генетског алгоритма, али је њено дефинисање најкомплекснији задатак који корисник мора да уради. Њена правилна поставка је врло важна, јер директно утиче на процес селекције и на тај начин генетски алгоритам одређује које ће се јединке елиминисати, а које оставити у популацији. Јединке са бољим фактором фитнеса (јединке које су прилагођеније, квалитетније) 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.

Селекција је први оператор у генетском алгоритму. Њен циљ је да бира јединке са што бољим особинама за касније укрштање. Увек даје већу шансу за одабир јединки са већим фитнес фактором (Goldberg, Deb, 1991). Како би се имитирала природна селекција, током усавршавања генетског алгоритма развили су се различити типови



Сл. 2. Основна структура простог генетског алгоритма
 Fig. 2. Basic structure of a simple genetic algorithm
 (Извор: Ауторска илустрација према Srinivas, Patnaik, 1994)

селекције. Два основна и најзаступљенија типа су *рулет-селекција* (енг. roulette wheel selection) и *турнирска селекција* (енг. tournament selection). Укрштање или репродукција је основни оператор генетског алгоритма. 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). 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). Мутација је најзначајнији оператор унутар генетског алгоритма. Као имитација природног процеса, она шири претрагу за потенцијалним решењима тако што ојачава популацију јединки и чини је разноврснијом. На овај начин враћа потенцијално добар материјал који је изгубљен током селекције и укрштања, те умањује шансу да генетски алгоритам погрешно. Она је промена или грешка у решењу, при којој се једна особина насумично замени неком другом.

Генетски алгоритам може имати једну или више функција циља. Уколико постоји више функција циља генетски алгоритам врши *вишекритеријумску оптимизацију* (енг. Multi-Objective Optimization – MOO). Вишекритеријумска оптимизација је знатно сложенија, те посебно служи за решавање комплекснијих проблема. Функције циља могу

имати исте тенденције – 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 које 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. У простору претраге за две опречне функције циља, налази се скуп оптималних решења који је 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 назива *Паретов фронт* (енг. Pareto frontier) (Dimic, 2011). Није могуће пронаћи решења која су оптималнија од оних којасе 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.

КРЕИРАЊЕ ХИПОТЕТИЧКИХ МОДЕЛА

Прву фазу чини креирање реалистичног виртуелног окружења, 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, који одговара намени пословног објекта. 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. Другу фазу чини креирање параметарски променљивих фасада, које 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. Креира се основни хипотетички модел М1, који има средње вредности параметара. Након тога, у Рефинерију се врши оптимизација фасаде употребом генетског алгорита. На основу добијених резултата, бирају се оптимална решења која формирају хипотетичке моделе О1 и О2. Трећу фазу чине енергетске симулације свих хипотетичких модела и упоређивање добијених резултата. Модел се тестирају за количину потрошње годишње финалне енергије за грејање и хлађење. Све симулације се врше у Ревиту и Грин Билдинг Студију.

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 равной парцели, без могућности заклањања од стране других објеката. Има јужну оријентацију, са нагибним углом од 90° и азимутом од 0°. 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. Хипотетички модел се тестира у виртуелним условима, који симулирају реалне временске прилике за град Београд. Програм аутоматски преузима све неопходне информације из хидрометеоролошке станице која је најближа одабраној локацији. Креирање окружења обухвата и: дефинисање режима коришћења простора, које се односи на број људи који бораве 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).

Унутрашњу структуру објекта треба конципирати тако да 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*), у недостатку јасно дефинисане типологије пословних објеката на територији Републике Србије (*Deru et al.*, 2011). Поштујући локацијске услове и смернице за пројектовање дефинисане наведеним истраживањем, креирана је унутрашња структура пословног објекта спратности Пр+2, димензија основе 32m*48m, површине основе 1536m², односно 4608m² укупно за сва три спрата. Ова ширина матрице дозвољава да јужна и северна фасада имају по 16 поља (32/2), а источна и западна фасада по 24 (48/2), ширине 2m. Спратна висина је 4m, те је укупна висина 12m за сва три спрата, што је неопходно како би фасадна матрица по вертикали такође била 2m, односно садржала 6 поља, по два за сваки спрат (Табела 1). Укупно застакљење ће варирати од модела до модела, у зависности од изгледа параметарски променљивих фасада.

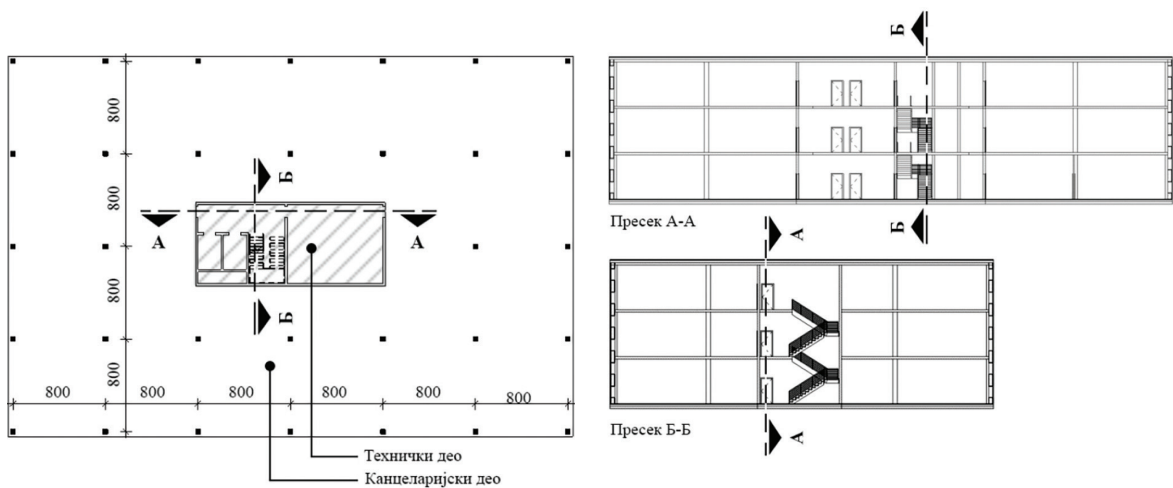
Конструкцију објекта чини структурални склоп са армирано-бетонским стубовима димензија 40cm*40cm, на међусобном растојању од 8m. У средини објекта се налазе армирано-бетонско језгро, укупних димензија 16,4m*7,2m, са простором предвиђеним за лифт, и армирано-бетонско ступениште (Сл. 3). Међуспратна таваница је такође армирано-бетонска, дебљине 20cm, са ослањањем у оба правца, док су греде армирано-бетонске, димензија 40cm*40cm. 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 20cm од горње коте армирано-бетонске плоче за пролаз инсталација, као и плафон, спуштен на висину од 20cm од доње коте армирано-бетонске плоче, такође за пролаз инсталација.

Под на тлу се састоји од армирано-бетонске плоче дебљине 20cm, термоизолације од камене вуне дебљине 15cm, свих потребних фолија и мембрана, цементне кошуљице и завршне обраде од мермерних плоча на лепку, коефицијента пролаза топлоте $U=0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, што је мање од $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, колико је максимално дозвољено према *Правилнику о енергетској ефикасности зграда* (2011). Раван кров се састоји од армирано-бетонске плоче дебљине 20cm, термоизолације од камене вуне дебљине 20cm,

Таб. 1. Основне димензионалне карактеристике хипотетичког модела

Однос страница основе	Површина основе [m ²]	Укупна површина објекта [m ²]	Површина омотача [m ²]	Број спратова	Спратна висина [m]	Светла висина [m]
1,5	1536	4608	1920	3	4	3,4

Tab. 1. Basic dimensional characteristics of hypothetical model



Сл. 3. Основа и пресеци унутрашње структуре хипотетичког модела
Fig. 3. Ground floor and sections of hypothetical model

свих потребних фолија и мембрана, цементне кошуљице и слоја шљунка који штити хидроизолацију, $U=0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (макс. $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Фасадни зид се састоји од Итонг (YTONG) фасадног блока дебљине 30см, термоизолације од камене вуне дебљине 5см, као и потконструкције на коју се монтира облога од керамичких панела, $U=0,26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (макс. $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Основни фасадни елемент чини прозор алуминијумског оквира, са трослојним нискоемисионим стаклом, $U=1,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (макс. $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). 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.

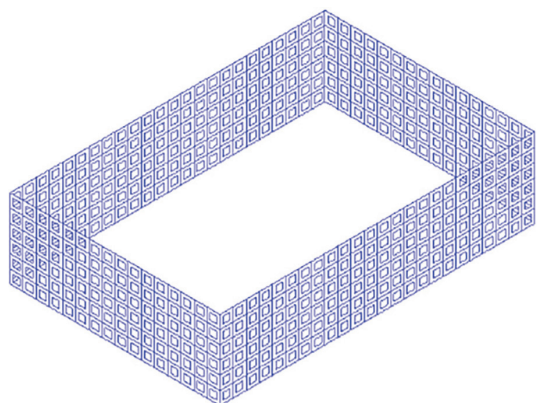
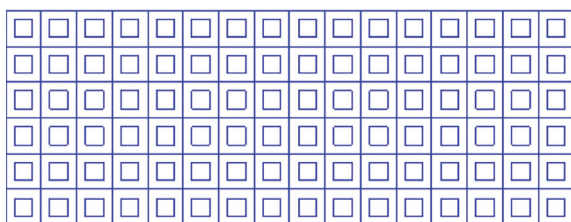
Креирање параметарске фасаде почиње успостављањем матрице коју чини 480 поља једнаке ширине и висине од два метра. Ова матрица је подељена тако да се на јужној и северној фасади уклопи по 96 поља – $16*6$ поља на површини фасаде од $32\text{m}*12\text{m}$; а на источној и западној фасади по 144 поља – $24*6$ поља на површини фасаде од $48\text{m}*12\text{m}$. Ова матрица је дефинисана тако да се у сваком пољу позиционира по један параметарски променљив фасадни елемент, укупно 480 елемената. Свим правоугаонцима из матрице је додељена команда по којој се они умножавају унутар себе за одређену вредност. Ова вредност је променљива и јединствена за сваки

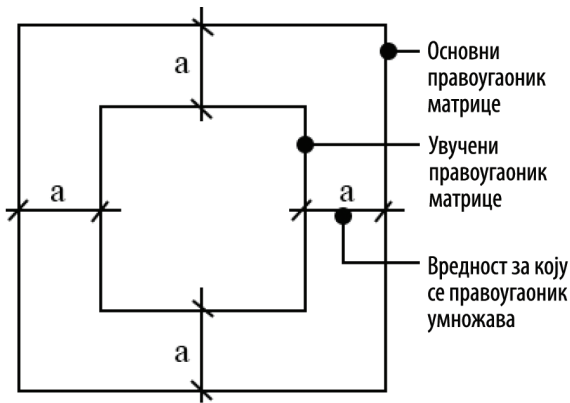
правоугаоник. Вредности одређује генетски алгоритам, те ће након процеса оптимизације неки правоугаоници бити различитих димензија од других. На тај начин настаје 480 нових правоугаоника (Сл. 4). Димензије и позиција правоугаоника након оптимизације представљају величину и позицију прозора на фасади хипотетичког модела.

Вредности за које 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 $0,7\text{m}$, на сваких $0,05\text{m}$ (Сл. 5). Из претходно наведеног закључује се да вредности растојања могу бити $0,2, 0,25, 0,3 \dots 0,6, 0,65$ и $0,7\text{m}$. Пошто је вредност смицања подједнака са свих страна, нови правоугаоници могу бити димензија између $0,6\text{m}$ ($2-2*0,7$) и $1,6\text{m}$ ($2-2*0,2$), на сваких $0,1\text{m}$ ($2*0,05$) (Сл. 5). Финално се закључује да величина прозора на параметарски променљивој фасади може бити $0,6, 0,7, 0,8 \dots 1,4, 1,5$ и $1,6\text{m}$, а генетски алгоритам у процесу оптимизације ће одабрати неку од ових димензија индивидуално за сваки елемент.

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

Сл. 4. Изглед и аксонометријски приказ увучених правоугаоника унутар матрице фасаде / Fig. 4. Elevation and axonometric view of offsetted rectangles inside the façade matrix





Сл. 5. Вредност за коју се правоугаоник умножава
Fig.5. The rectangle offset value

Канцеларијама је неопходно обезбедити што је могуће већу количину природног осветљења у току дана. Међутим, велики отвори на фасади резултирају и повећаном потрошњом енергије, јер је коефицијент пролаза топлоте прозора вишеструко већи у односу на коефицијент пролаза топлоте зидова. 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 утрошак енергије. Прва функција циља дефинисана је укупном површином увучених правоугаоника који представљају прозоре на хипотетичком моделу фасаде и она тежи минималној вредности. На основу сагледавања коефицијента пролаза топлоте прозора и зидова, закључено је да мањи прозори на фасади резултирају умањеном потрошњом енергије за грејање и хлађење објекта. Прву функцију циља је неопходно поставити тако да индиректно утиче на енергетска својства објекта, услед недостатка унапред програмираних поља која врше енергетске симулације директно у Дајнаму. Очекује се појава ових пакета у блиској будућности, што би сигурно покренуло читав низ нових истраживања на ову тему. Друга функција циља дефинисана је годишњом количином енергије која потиче од добитака услед сунчевог зрачења. У процесу оптимизације, ова функција циља тежи максималној вредности. Њу је такође неопходно поставити тако да индиректно утиче на осветљеност објекта, јер

тренутно не постоје унапред програмирана поља која врше калкулације директно у Дајнаму. Однос између дефинисаних функција циља и посредних утицаја на дневну осветљеност и потрошњу енергије приказан је на слици 6.

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 пропорционално 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 (Сл. 7).

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 (Сл. 8).

2. Компактност отвора на фасади – као што је наведено, све вредности параметара за које 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 (Сл. 9). Када параметар има вредност -0,2, онда је распон вредности максималан (100%) и креће се у интервалу од -0,7 до -0,2 (Сл. 9а). Када параметар има вредност -0,6, онда је распон вредности минимална (0%) и

**функција циља 1 се минимизује
зарад побољшања потрошње
енергије**

смањује се
годишња
потребна
финална
енергија за
грејање и
хлађење
објекта

смањење
вредности

укупна
површина
свих
отвора на
фасади
(функција
циља 1)

повећање
вредности

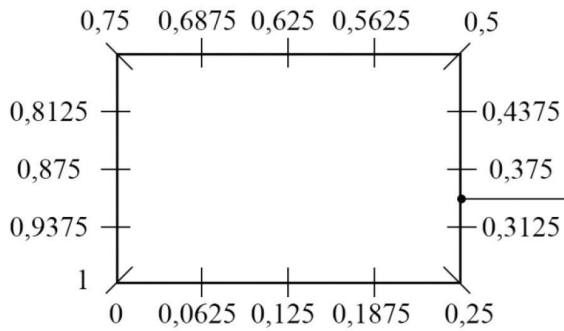
**функција циља 2 се максимизује
зарад побољшања дневног
осветљења**

повећава се
годишња
количина
енергије која
потиче од
добитака услед
сунчевог
зрачења
(функција
циља 2)

(последично)
унапређује се
дистрибуција
дневног
осветљења

Сл. 6. Однос функција циља и њиховог утицаја на дневну осветљеност и потрошњу енергије

Fig. 6. The connection between fitness functions and their impact on daylight and energy use



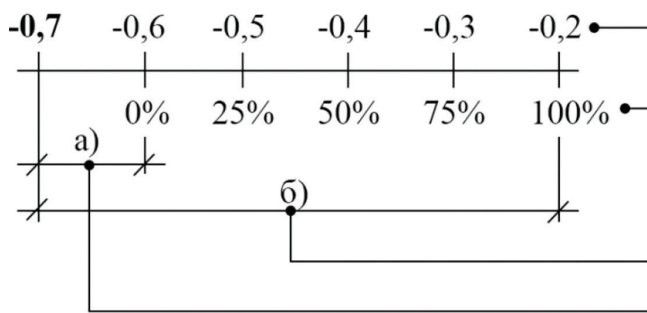
степен, растојање
између вредности
параметара = 0,0625

Сл. 7. Претрага тачке привлачења у
хоризонталној равни фасаде
Fig. 7. The search for an attractor point
in the horizontal façade plane



степен, растојање
између вредности
параметара = 0,25

Сл. 8. Претрага тачке привлачења у
вертикалној равни фасаде
Fig. 8. The search for an attractor point
in the vertical façade plane



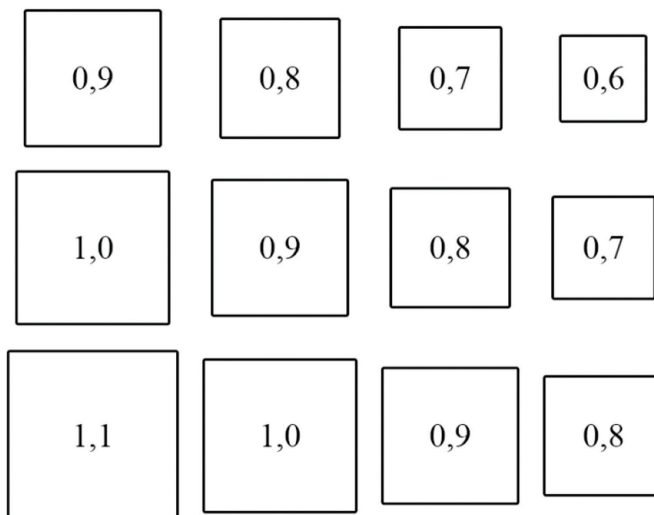
вредности параметара

процентуални распон вредности
параметара

максимални распон вредности
параметара

минимални распон вредности
параметара

Сл. 9. Распон вредности параметара а) минимални и б)
максимални / Fig. 9. a) minimum and b) maximum range of
parameter values



Сл. 10. Величина отвора на фасади са вредностима
параметара -1, 0 и +1 / Fig. 10. The facade opening size
with parameter values -1, 0 and +1

вредност
параметра
-0,1

вредност
параметра
0

вредност
параметра
+0,1

креће се у интервалу од -0,7 до -0,6 (Сл. 9б). Граничне вредности параметара су намерно одабране тако да вредности у било ком опсегу не прелазе -0,2, односно отвор величине 1,6m и -0,7, односно отвор величине 0,6m.

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 (Сл.10).

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:

- 0,7 (мин. гранична вредност) - 0,5 (мин. вредност параметра) = -1,2;
- 0,7 (мин. гранична вредност) + 0,5 (макс. вредност параметра) = -0,2;
- 0,2 (макс. гранична вредност) - 0,5 (мин. вредност параметра) = -0,7;
- 0,2 (макс. гранична вредност) + 0,5 (макс. вредност параметра) = 0,3.

Закључујемо, било да је вредност за коју се умножавају правоугаоници матрице минимална (-0,7), било 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 (нпр., ако вредност параметра са увећањем износи 0,1, том параметру се додељује максимална гранична вредност од -0,2).

Оптимизација употребом генетског алгоритма се врши директно у Рефинерију. Величина популације је дефинисана са 20 јединки, а оптимизација је подешена да траје 40 генерација. Оваква поставка резултира приказом 8.000 различитих решења. Након истека 40 генерација, добијен је скуп оптималних решења. Као што је било очекивано, решења су током генерација формирала Паретов фронт оптималних решења (Дијаграм 1). Раније је већ наведено да није могуће пронаћи решења која су оптималнија од оних које се налазе на Паретовом фронту. Другим речима, свако од решења које се налази на Паретовом фронту има одређене вредности за две функција циља, те није могуће унапредити вредност једне функције, а да се

притом не уназади вредност друге функције. На почетку и крају Паретовог фронта налазе се екстремна оптимална решења, са вредностима најповољнијим за једну функцију циља, али најнеповољнијим за другу. Одабир оптималног решења увек је део субјективне процене, а критеријум на основу којег се решење бира зависи од пројектантског задатка, дизајна које то решење креира, личних аспирација особе која бира итд.

Пре одабира оптималних решења дефинише се референтно решење, које служи за накнадно упоређивање резултата добијених из енергетских симулација. Како би резултати били што меродавнији, усваја се решење које има средње фиксне вредности прозора од 1,1*1,1m и које формира хипотетички модел М1. Раније је наведено да генетски алгоритам у процесу оптимизације бира вредности између 0,6 и 1,6m за димензије прозора, те се из тог разлога усваја 1,1m као аритметичка средина.

Оптимизација је показала да, за дефинисане функције циља, отвори највећих димензија треба да се налазе на јужној фасади, док величина отвора опада према северној фасади. На основу детаљног увида у скуп оптималних решења бирају се три оптимална решења са Паретовог фронта, која формирају три хипотетичка модела:

- Модел О1 – оптимално решење које има приближно исту годишњу количину енергије која потиче од добитакa услед сунчевог зрачења као и референтни модел М1;
- Модел О2 – оптимално решење које има приближно исту укупну површину отвора на фасади као и референтни модел М1;
- Модел О3 – оптимално решење које има већу годишњу количину енергије која потиче од добитакa услед сунчевог зрачења, а мању површину отвора на фасади у односу на референтни модел М1.

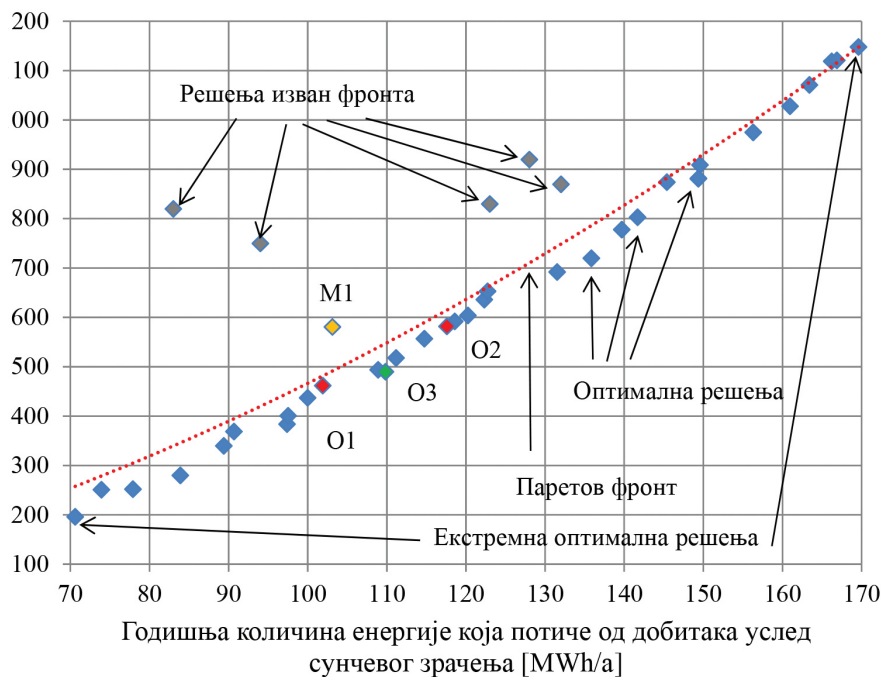
Хипотетички модели не могу имати исте, већ приближно исте вредности функције циља, јер комбинација параметара који креирају ова решења даје јединствене вредности функција циља (Табела 2).

Захваљујући компаративној анализи хипотетичких модела М1 и О1, закључује се да је оптимизацијским процесом могуће остварити приближно исту годишњу количину енергије која потиче од добитакa услед сунчевог зрачења са 20,5% мањом укупном површином свих отвора на фасади (Табела 2). На исти начин, захваљујући поређењу хипотетичких модела М1 и О2, закључује се да је могуће остварити 12,4% већу годишњу количину енергије која потиче од добитакa услед сунчевог зрачења за исту

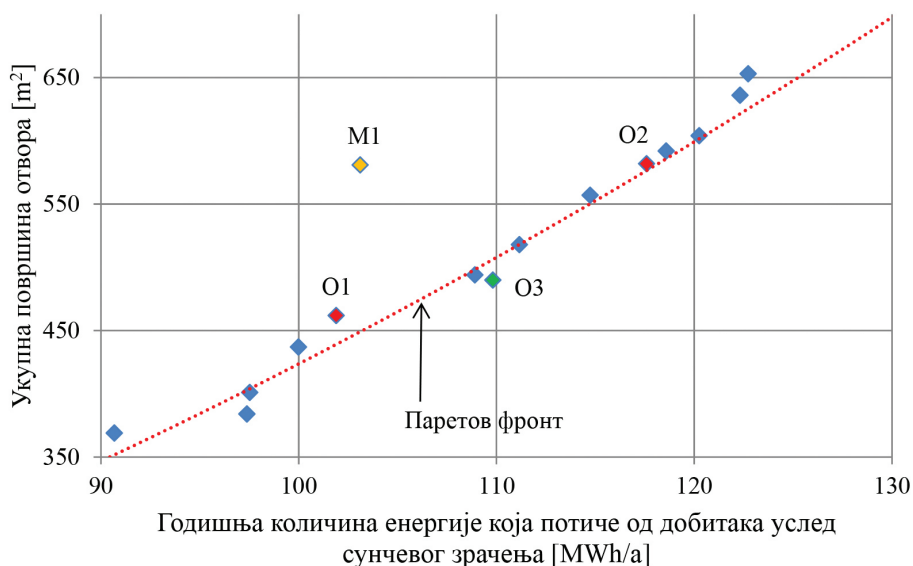
Таб. 2. Упоредни приказ вредности функција циља креираних модела

Tab. 2. Comparison of fitness function values of the created models

Функције циља	М1	О1	О1	О3
Годишња количина енергије која потиче од добитакa услед сунчевог зрачења [MWh/a]	103,1	101,89	101,89	109,81
Укупна површина свих отвора на фасади [m ²]	581	462	462	490



Дијаграм 1. Паретов скуп оптималних решења (горе) и увећани приказ одабраних решења (доле)
 Chart 1. Pareto's optimal solutions (upper image) and enlarged display of chosen solutions (lower image)



укупну површину свих отвора на фасади. Хипотетички модел O3 доказује да је адекватним одабиром вредности променљивих параметара могуће наћи оптимално решење које унапређује обе функције циља, у односу на референтно решење које има средње вредности параметара.

Дефинисани хипотетички модели имају следеће вредности параметара:

МОДЕЛ M1. Референтни хипотетички модел на чијој фасади сви прозори имају средње, фиксне димензије од 1,1*1,1m (Сл. 11 горе).

МОДЕЛ O1. Хипотетички модел добијен на основу одабира оптималног решења, са приближно истом годишњом количином енергије која потиче од добитака услед сунчевог зрачења као и референтни модел. Вредности променљивих параметара овог решења су: 0,4375 – позиција тачке привлачења по хоризонталној равни. Тачка привлачења у

хоризонталној равни је на $\frac{3}{4}$ дужине јужне фасаде; 0,75 – позиција тачке привлачења по вертикалној равни. Тачка привлачења у вертикалној равни је на $\frac{3}{4}$ висине фасаде; -0,3 – компактност отвора. Распон вредности компактности отвора је 75%; 0,1 – величина отвора. Сви отвори на фасади су увећани за 0,1m.

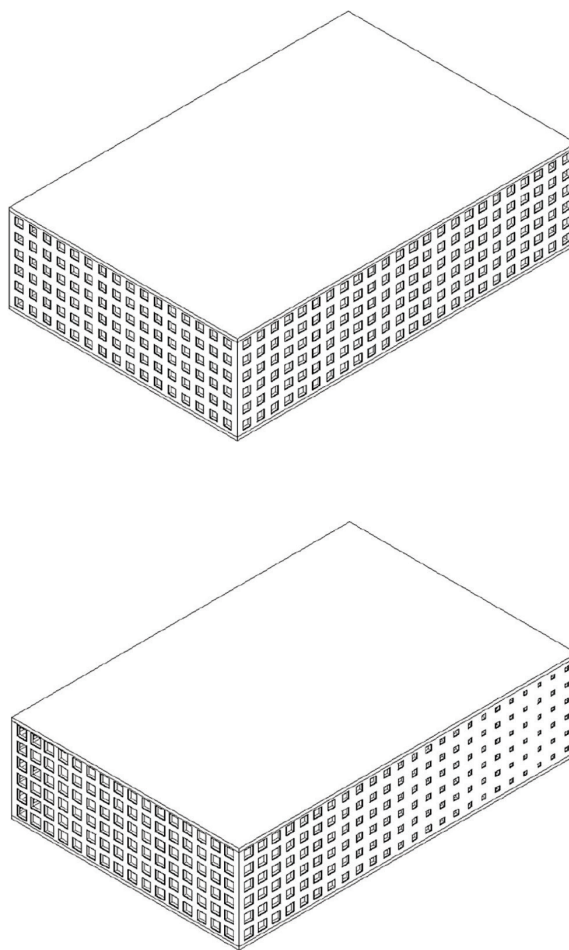
МОДЕЛ O2. Хипотетички модел добијен на основу одабира оптималног решења, са приближно истом укупном површином свих отвора на фасади као и референтни модел. Вредности променљивих параметара овог решења су: 0,375 – позиција тачке привлачења по хоризонталној равни. Тачка привлачења у хоризонталној равни је на $\frac{1}{2}$ дужине јужне фасаде; 0,5 – позиција тачке привлачења по вертикалној равни. Тачка привлачења у вертикалној равни је на $\frac{1}{2}$ висине фасаде; -0,3 – компактност отвора. Распон вредности компактности отвора је 75%; 0,1 – величина отвора. Сви отвори на фасади су увећани за 0,1m.

МОДЕЛ ОЗ. Хипотетички модел добијен на основу одабира оптималног решења, са унапређене обе функције циља у односу на референтни модел (Сл.11 доле). Вредности променљивих параметара овог решења су: 0,375 – позиција тачке привлачења по хоризонталној равни. Тачка привлачења у хоризонталној равни је на $\frac{1}{2}$ 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 0,1m.

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 7 до 56% (Табела 3). Хипотетички модел фасаде са фиксним димензијама отвора има исти удео застакљења на свим фасадама, док решења добијена из оптимизације имају различити удео застакљења, осим код источне и западне фасаде хипотетичких модела О2 и О3, јер, услед одабира тачке привлачења на средини јужне фасаде, отвори се равномерно умањују ка северној фасади.

Сва решења добијена из процеса оптимизације, услед различитих комбиновања вредности променљивих параметара, резултују различитим изгледом фасаде. Последице, сви модели имају и различиту осветљеност унутар објекта.

Осветљеност је физичка величина која представља однос светлосног флукса и површине коју осветљава и њена јединица је лукс [lux] (Veličković i drugi, 2002). За добијање LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) 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 у 3 сата поподне (The U.S. Green Building Council, 2019). Ревит има могућност да визуелно прикаже површине које испуњавају и које не испуњавају овај услов, као и градијацијске разлике између различитих



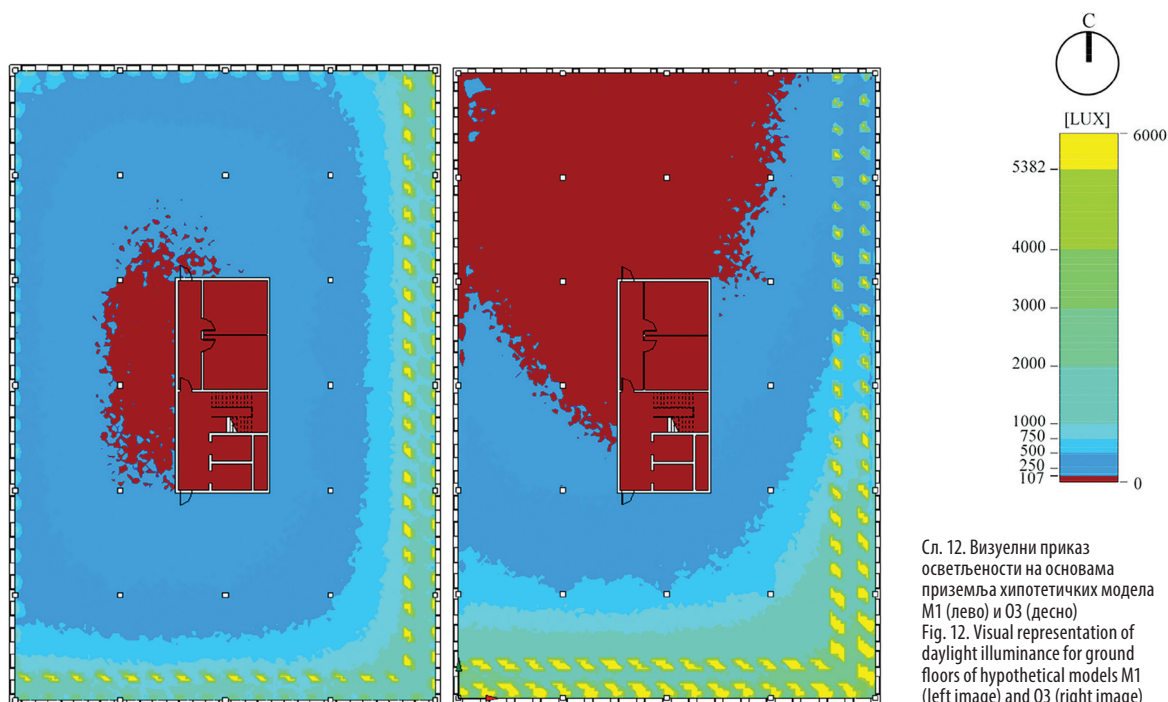
Сл. 11. Аксинометријски приказ јужне и источне фасаде модела М1 (горе) и О3 (доле) / Fig. 11. An axonometric view of southern and eastern façades of created models M1 (upper image) and O3 (lower image)

нивоа осветљења. Компаративна анализа ових резултата показује да, зарад добијања што веће годишње количине енергије која потиче од добитакa услед сунчевог зрачења на што мањој укупној површини свих отвора на фасади, генетски алгоритам је у процесу оптимизације одабрао највеће отворе на јужној страни. То показује хоризонтална вредност позиције тачке привлачења свих одабраних оптималних модела (за модел О1 тачка привлачења је на $\frac{3}{4}$ дужине јужне фасаде, док је код модела О2 и О3 она на средини дужине јужне фасаде). Последица тога је боља осветљеност јужне и југоисточне стране објекта, али на штету северне и северозападне стране (Сл.12).

Таб. 3. Површине омотача и удео застакљења фасада креираних модела

Омотач [m ²] / застакљење [m ²] / удео застакљења [%]	M1	O1	O2	O3
Укупно фасада	1920/580,80/30,25	1920/461,95/24,05	1920/581,7/30,3	1920/489,95/25,5
Јужна фасада	384/116,16/30,25	384/167,65/43,65	384/216/56,25	384/188,15/49
Источна фасада	576/174,24/30,25	576/107,45/18,65	576/166,4/28,9	576/137,6/23,9
Северна фасада	384/116,16/30,25	384/31,1/8,1	384/32,85/8,55	384/26,65/6,95
Западна фасада	576/174,24/30,25	576/155,75/27,05	576/166,4/28,9	576/137,6/23,9

Таб. 3. Area of the building envelope and percentage of glazing of the created models



РЕЗУЛТАТИ ЕНЕРГЕТСКИХ СИМУЛАЦИЈА ИЗАБРАНИХ 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 електроопреми, уређајима и начину коришћења објекта.

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.

Енергетске симулације омогућавају увид у нумеричке резултате свих хипотетичких модела, како на годишњем, тако и на месечном нивоу. Програм има могућност приказивања: вредности потребне годишње финалне енергије за грејање и хлађење објекта, али и потребне месечне финалне енергије за грејање и хлађење објекта, укупне потрошње енергије одвојене према системима, топлотних оптерећења и емисије угљен-диоксида. Резултати енергетских симулација се приказују у јединици киловат-час (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 се одржала унутрашња пројектована температура. Годишња финална енергија се односи искључиво на климатизацију, без обзира на врсту погонског горива.

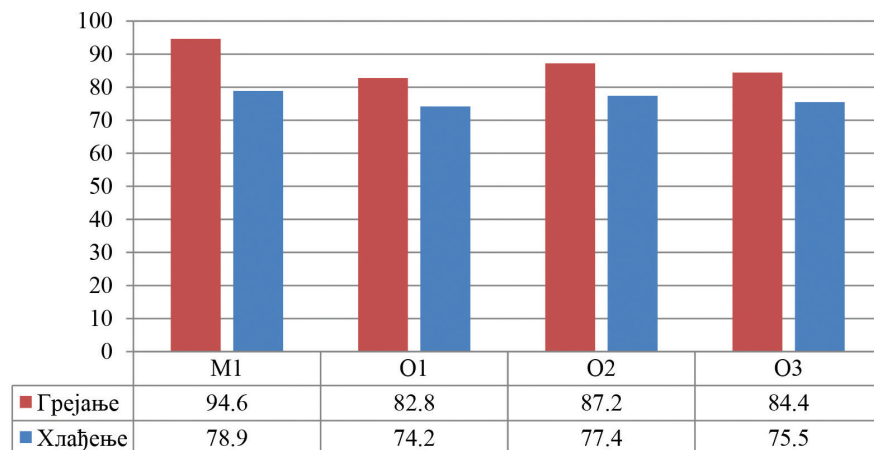
Резултати енергетских симулација свих хипотетичких модела за потребну укупну годишњу финалну енергију за грејање и хлађење приказани су у Табели 4.

Резултати потребне годишње финалне енергије за грејање и хлађење објекта упоређени су на дијаграму 2.

Резултати су показали да мањи, али и специфично дистрибуирани отвори на фасади резултују мањим утрошком финалне енергије, првенствено за грејање објекта. Захваљујући компаративној анализи хипотетичких модела М1 и О1, закључује се да оптимално решење троши 12,5% мање енергије за грејање и 6% мање енергије за хлађење од референтног примера за исту укупну количину директног сунчевог зрачења (Табела 4). Генетски алгоритам је ово решење дефинисао повећањем отвора на деловима фасада где је сунчево зрачење интензивније током године, како би могао да смањи укупну површину свих отвора на фасади. Последица тога је умањена потрошња енергије за грејање и хлађење, али и другачија осветљеност унутрашњег простора. Слично, на основу компаративне анализе модела М1 и О2, закључује се да оптимално решење троши 7,8% мање енергије за грејање и 2% мање енергије за хлађење од референтног примера за исту укупну површину свих отвора на фасади. Другачија дистрибуција величине отвора резултирала је и повећањем укупне количине директног сунчевог зрачења у односу на референтни пример. На основу компаративне анализе хипотетичких модела М1 и О3 закључује се да оптимално решење троши 10,8% мање енергије за грејање и 4,3% мање енергије за хлађење од референтног примера за већу укупну количину директног сунчевог зрачења и мању

	M1	O1	O2	O3
Годишња потребна финална енергија за грејање објекта [MWh/a]	94,6	82,8	87,2	84,4
Годишња потребна финална енергија за хлађење објекта [MWh/a]	78,9	74,2	77,4	75,5

Таб. 4. Годишња потребна финална енергија за грејање и хлађење објекта [MWh/a]
Table. 4. Annual heating and cooling energy requirements for buildings [MWh/a]



Дијаграм 2. Годишња потребна финална енергија за грејање и хлађење објекта [MWh/a]
Chart. 2. Annual heating and cooling energy requirements for buildings [MWh/a]

укупну површину свих отвора на фасади. Ово решење је најоптималније јер побољшава вредности обе функције циља, а последично побољшава и енергетске перформансе у односу на референтни пример. Непропорционално смањење утршка енергије између оптималних модела у односу на функције циља је последица различитих вредности променљивих параметара које креирају хипотетичке моделе. Могуће је одабрати више оптималних модела са различитим вредностима параметара, тако да јединствене комбинације њихових вредности резултују приближно истом вредношћу барем једне функције циља.

Одабир оптималних решења је извршен субјективном проценом у односу на вредности функције циља референтног модела. Могуће је одабрати и друга решења са Паретовог фронта, која би имала још више унапређене вредности једне функције циља, али у исто време погоршане вредности друге функције циља. Овај одабир је валидан све до одабира екстремних решења на крајевима Паретовог фронта, при којима једна од функција циља има најповољнију, а друга најнеповољнију вредност. У конкретном случају, могућ је одабир великог броја других решења која повећавају укупну количину директног сунчевог зрачења које упада у објекат, али самим тим и резултују повећањем утршка енергије за грејање и хлађење, и обрнуто.

Суштина генетског алгоритма је да свако од одабраних решења са Паретовог фронта има најбољи однос између две функције циља, а то које ће се решење одабрати за финални дизајн, увек зависи од субјективне процене.

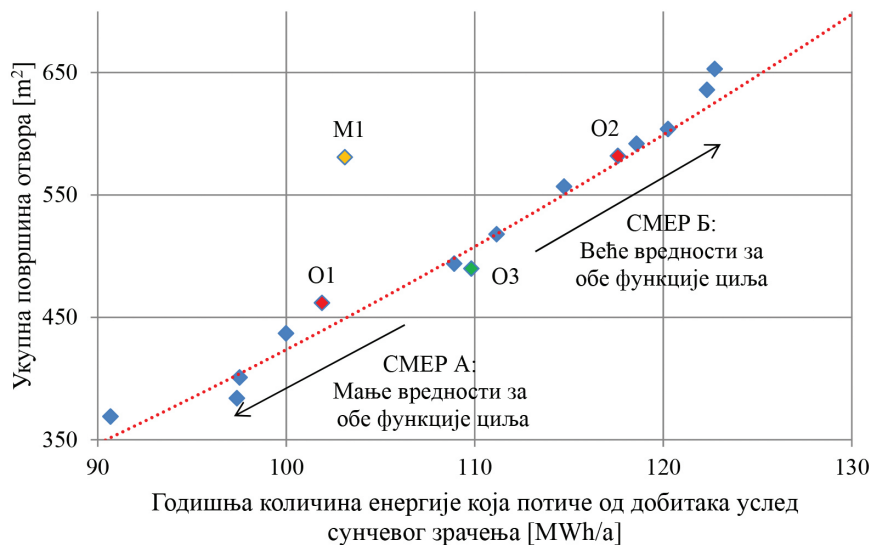
ЗАКЉУЧАК

Резултати су показали да је, уз помоћ оптимизације употребом генетског алгоритма, могуће пронаћи решење које за исте вредности једне функције циља, као и референтни пример, има бољу вредност друге функције циља. Оптимизација је показала и да је могуће пронаћи оптимално решење које има унапређене вредности за обе функције циља, у односу на референтни пример.

Резултати истраживања су показали да хипотетички модели са специфично дистрибуираном, променљивом величином отвора, креирани на основу резултата добијених из оптимизације, мање троше енергије у односу на референтни модел са фиксним отворима, посебно за грејање објекта.

Истраживање показује и начин на који одабир оптималног решења директно утиче на вредности за обе функције циља, а посредно на дистрибуцију дневног осветљења и потрошњу годишње потребне финалне енергије за грејање и хлађење објекта, и то на следећи начин (Дијаграм 3):

СМЕР А. Одабир оптималних решења са Паретовог фронта, са мањим вредностима за обе функције циља. Приликом смањења вредности функције циља укупне површине отвора на фасади, пропорционално се смањује и вредност функције циља годишње количине енергије која потиче од сунчевог зрачења. Одабиром ових решења, посредно се смањује годишња потребна финална енергија за грејање и хлађење објекта, док се ниво осветљености повећава на јужној и источној страни (повећавају се отвори на јужној и источној фасади), а смањује на северној и западној страни објекта (смањују се отвори на северној и западној фасади).



Дијаграм 3. Утицај одабира решења из Паретовог скупа на функције циља
Chart 3. The impact of choosing solutions from Pareto's frontier on fitness functions

СМЕР Б. Одабир оптималних решења са Паретовог фронта, са већим вредностима за обе функције циља. Приликом повећања вредности функције циља укупне површине отвора на фасади, пропорционално се повећава и вредност функције циља годишње количине енергије која потиче од сунчевог зрачења. Одабиром ових решења, посредно се повећава годишња потребна финална енергија за грејање и хлађење објекта, док се ниво осветљености смањује на јужној и источној страни (смањују се отвори на јужној и источној фасади), а повећава на северној и западној страни објекта (повећавају се отвори на северној и западној фасади).

Оваква поставка оставља самом кориснику могућност да одреди приоритете приликом одабира оптималног решења и на тај начин направи компромис који му за конкретан случај највише одговара.

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 су досад били нерешиви. 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 визуелног програмирања у аутоматизацији процеса пројектовања, креирања планова и вршење калкулација, са једне, и истраживање параметарских форми и облика, са друге стране. Истраживање се може фокусирати на оптимизацијске методе и њихову примену у изналажењу оптималних решења везаних за: структурална, механичка, акустична и енергетска својства објекта, организацију простора, визуелни комфори друго. Финално, истраживање се може проширити на детаљну анализу енергетских симулација.

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 да би унапредили сопствену праксу. 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.

ЛИТЕРАТУРА

- Baluja, S., R. Caruana (1995) *Removing the genetics from the standard genetic algorithm*, International Conference on Machine Learning
- Dimčić, M. (2001) *Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms*, PhD Thesis, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen Universität Stuttgart
- Deru, M., K. Field, D. Studer, K. Benne, B. Griffith, P. Torcellini, B. Liu, M. Halverson, D. Winiarski, M. Rosenberg, M. Yazdani, J. Huang, D. Crawley, (2011) *U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock: Technical Report*, Colorado, National Renewable Energy Laboratory
- Goldberg, D., K. Deb (1991) *A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms*, *Foundations of Genetic Algorithms*, San Mateo, California, Morgan Kaufmann
- Holland, H. J. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Massachusetts, The MIT Press
- Mitchell, M., J.H., Holland, S. Forrest (1994) *When will a genetic algorithm outperform hill climbing?*, *Advances in Neural Information Processing Systems* 6, San Mateo, CA, Morgan Kaufmann
- Mühlenbein, H. (1997) *Genetic Algorithms, Local Search in Combinatorial Optimization*, New Jersey, John Wiley & Sons
- National BIM Standard – United States (2016) Washington DC, National Institute of Building Sciences
- Правилник о енергетској ефикасности зграда (2011) Београд, Службени гласник РС, 61/2011.
- Rahmani, A. M. (2015) *A Building Information Model (BIM) Based Framework for Performance Optimization*, PhD thesis, Texas A & M University
- Srinivas, M., L.M. Patnaik (1994) *Genetic Algorithms: A Survey*, *IEEE Computer*
- The U.S. Green Building Council (2019) *LEED v4 for Building Design And Construction*
- U.S. Department of Energy (2019) *Building Energy Data Book*
- Veličković, M., J.D. Lenard, L. Mudri (2010) *Природно осветљење – зашто, како и колико?*, *Savetovanje o osvetljenju 2009*, Divčibare, Srpsko društvo za osvetljenje
- Woodbury, R. (2010) *Elements of parametric design*, London, Routledge