

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Димитрије Ј. Манић

ТЕРМОДИНАМИЧКА АНАЛИЗА,
МОДЕЛИРАЊЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА
ДИНАМИЧКОГ ПОНАШАЊА СИСТЕМА
ЗА КЛИМАТИЗАЦИЈУ, ГРЕЈАЊЕ И
ХЛАЂЕЊЕ
У ЈАВНИМ ОБЈЕКТИМА

Докторска дисертација

Београд, 2021.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Dimitrije J. Manic

THERMODYNAMICS ANALYSIS,
MODELING, AND OPTIMIZATION OF
DYNAMICAL
BEHAVIOR OF SYSTEMS FOR
HEATING, VENTILATION, AND AIR
CONDITIONING IN PUBLIC BUILDINGS

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021.

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор: **Проф. др Мирко Коматина,**
редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије: **Проф. др Милош Бањац,**
редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет,
Проф. др Бранислав Живковић,
редовни професор у пензији
Универзитет у Београду, Машински факултет,
др Неџад Рудоња,
доцент
Универзитет у Београду, Машински факултет,
др Биљана Вучићевић,
виши научни сарадник,
Институт за нуклеарне науке Винча.

Датум одбране:

Захвалност

Дисертацију посвећујем најбољем машинском инжењеру којег сам познавао и којем сам захвалан, јер ми је усадио љубав према науци, струци, и критичком мишљењу, свом покојном оцу, Јеленку Б. Манићу.

Велику захвалност за помоћ и подршку на спроведеним истраживањима и изради дисертације дугујем свом ментору проф. др Мирку Коматини, са којим сам годинама сарађивао на тематици енергетске ефикасности и примени обновљивих извора енергије.

Захваљујем се господину Бобану Ратковићу и компанији C.E.S. Engineering Ltd., који су ми омогућили да део својих истраживања спроведем у Канади и пружили техничку подршку при спроведеним мерењима и прикупљању података неопходних за израду дисертације.

Захвалност за успешно спроведена истраживања и научни и стручни развој дугујем и дугогодишњем директору Иновационог центра Машинског факултета, проф. др Александру Седмаку, као и драгим колегама са катедре за термомеханику и из Института за нуклеарне науке Винча.

Сажетак

У контексту повећања ефикасности и одрживости енергетског сектора, један од најзначајнијих проблема представља рационализација и оптимизација потрошње енергије у зградама, јер око 32% глобалне потрошње енергије је у сектору зграда [1]. Значајни напори на глобалном и локалном нивоу улажу се у повећање енергетске ефикасности у зградама, укључујући унапређење индустријских стандарда, међународних уговора, законске регулативе и инвестирање у енергетске санације постојећих зграда и енергетски ефикасне технологије.

Процес унапређења енергетске ефикасности зграда може да делује као једноставан концепт са директним приступом, у којем се просто постојећи елементи термичког омотача замењују елементима са бољим термоизолационим карактеристикама (постојећи прозори новим прозорима, зидови са мало изолације добро изолованим зидовима итд.), а постојеће компоненте енергетских система ефикаснијим и модернијим еквивалентним уређајима (нпр. стари гасни котло, новим кондензационим или чак топлотном пумпом). Овом процесу се у пракси најчешће управо и приступа на овакав начин. Међутим, то није сасвим оправдано. Наиме, свака од поменутих мера унапређења енергетске ефикасности по правилу ће довести до смањења потрошње енергије и емисије гасова стаклене баште, али због ограничених средстава за имплементацију мера, спровођење једне мере најчешће може да значи пропуштену шансу за имплементацију друге мере. Осим тога, уколико се у одређеном периоду планира имплементација више мера за унапређење енергетске ефикасности, поставља се питање које тачно мере треба одабрати, којим редом их треба имплементирати и који ће бити заједнички ефекат имплементације одабраних мера? Дакле, иако је процес имплементације појединачних мера за уштеду енергије релативно једноставан, процес оптимизације енергетских перформанси објекта је веома сложен, недовољно прецизно дефинисан и његов значај није увек препознат. У инжењерској пракси и истраживачкој делатности постоје константни напори да се унапреде различите области енергетске ефикасности у сектору зградарства, али без обзира на то, доносиоцима одлука у области енергетског менаџмента остаје проблем како систематски и методолошки исправно да воде процес оптимизације енергетских перформанси, како да дефинишу оптимизационе критеријуме и како доћи до оптималних сценарија.

У дисертације је развијена и дефинисана методологија за анализу и оптимизацију енергетског понашања зграда. Методологија укључује начин описивања објекта, дефинисање референтних услова и референтне потрошње енергије, детаљну анализу енергетских перформанси објекта, идентификацију потенцијала за уштеду енергије, идентификацију и евалуацију енергетских, економских и еколошких ефеката имплементације потенцијалних мера за уштеду енергије и на крају формирање оптималних сценарија за унапређење енергетске ефикасности.

Методологија је имплементирана и тестирана на примеру постојећег објекта пореске управе у Винипегу (Манитоба, Канада), укључујући мерења енергетских перформанси на постојећем објекту, анализу система и начина коришћења постојећег објекта, израду детаљног физичко-математичког модела за симулацију динамичког понашања објекта и његових енергетских перформанси, идентификацију, симулацију и евалуацију великог броја мера за уштеду енергије и развој конкретних оптималних сценарија за унапређење.

Дисертација приказује методологију и резултат израде физичко-математичког модела за динамичку симулацију енергетског понашања зграде укључујући и калибрацију модела.

Дат је детаљан опис и анализа двадесет и осам мера за уштеду енергије које се односе на омотач објекта, машинске системе, електро системе и примену обновљивих извора енергије, са квантификацијом енергетских, економских и еколошких ефеката њихове имплементације. Енергетски ефекти имплементације мера за уштеду енергије процењени су нумеричком анализом кроз рачунарску симулацију физичко-математичког модела објекта, а евалуирани су и економски аспекти имплементације мера који укључују капиталне трошкове имплементације,

промене трошкова експлоатације објекта итд. Као основни економски критеријум узета је нето садашња вредност пројекта имплементације МУЕ након 25 година.

Као најзначајније мере показале су се мере за уштеду енергије везане за унапређење конфигурације, параметара рада и ефикасности КГХ система, које могу да обезбеде и до 25% уштеде енергије, док мере на побољшању термичког омотача објекта не могу да обезбеде уштеде енергије веће од 5%. Међутим, за развој оптималних пакета мера, неопходно је узети у обзир и мере на КГХ системима и мере на омотачу објекта.

Применом методологије дефинисана су три суштински различита оптимална сценарија односно пакета мера за уштеду енергије и смањење емисије гасова стаклене баште. Први пакет мера обезбеђује минималну жељену уштеду енергије и смањење емисије уз најмање могуће трошкове пројекта током анализираних периода (25 година). Дакле за први пакет услов који се мора задовољити је одређена уштеда енергије дефинисана према захтевима регулативе (или захтевима власника објекта, који могу бити још оштрији од регулативних), док се оптимизација врши према економском критеријуму тј. нето садашњој вредности пројекта. Овај пакет мера за конкретну студију случаја омогућио би смањење финалне потрошње енергије за око 31% уз процењену позитивну нето садашњу вредност након 25 година у износу од око 1,3 милиона долара.

Други пакет мера, услов који се мора задовољити је неутрална економија пројекта тј. нето садашња вредност пројекта након анализираних периода не сме да буде негативна, док је критеријум оптимизације пакета потрошња енергије. Другим речима, тражи се пакет који омогућава максималне могуће уштеде енергије уз поврат инвестиције након 25 година. Овај пакет мера за конкретну студију случаја омогућио би смањење финалне потрошње енергије за око 54% и смањење емисије гасова стаклене баште услед потрошње енергије за 96% уз благо позитивну нето садашњу вредност пројекта након 25 година.

Трећи пакет мера предвиђа максимално могуће смањење емисије гасова стаклене баште, без обзира на трошкове пројекта. Овај пакет обухвата мере које могу да доведу објекат на неутралан ниво емисије угљендиоксида и нуди увид у економске последице таквог приступа.

Овај пакет мера за конкретну студију случаја омогућио би смањење финалне потрошње енергије за око 62% и смањење емисије гасова стаклене баште услед потрошње енергије за 99% уз изразито негативне економске параметре пројекта, што конкретно значи да је нето садашња вредност пројекта након 25 година негативна за 27 милиона долара.

Са једне стране инжењерска пракса по правилу нуди само лимитиран и не довољно детаљан увид у енергетске перформансе објекта, односно нетранспарентне и често арбитрарне процене ефеката мера за уштеду енергије. Са друге стране, истраживачка пракса се по правилу бави развојем, унапређењем и евалуацијом конкретних индивидуалних мера за уштеду енергије, али без разматрања трошкова њихове имплементације и експлоатације или поређења са алтернативним решењима у ширем контексту оптимизације енергетских перформанси зграда са свим њеним системима.

Дакле и у инжењерској пракси и у истраживању постоји потреба за јединственом методологијом која би обухватила све неопходне кораке у оптимизацији енергетских перформанси зграда. Ова дисертација нуди управо то, методологију која је успешно развијена и имплементирана и омогућава, систематичну, детаљну и транспарентну анализу енергетских перформанси зграда, симулације динамичког понашања и евалуације мера за уштеду енергије. То представља суштинско и важно унапређење постојеће индустријске праксе и истраживања.

Осим тога, имплементација развијене методологије на конкретном примеру омогућила је неколико важних закључака. Прво, у супротности са општеприхваћеним ставом који је уврежен пре свега у индустрији, чак и значајно побољшање термичких карактеристика омотача објекта не мора да обезбеди значајне уштеде енергије. Даље, решења која се у индустрији рекламирају и прихватају као „пасивна“, попут расхладних греда, и која би на изглед требало да обезбеде смањење потрошње енергије, заправо не раде то, а анализа која може да обезбеди кредибилне закључке везано за рад КГХ система, могућа је само детаљном калибрисаном симулацијом енергетских перформанси. На крају, чак и изразито значајна унапређења енергетских перформанси објекта, која значе смањење потрошње енергије за преко 50% и смањење емисије гасова стаклене баште и од око 90%, могућа су без финансијских губитака на период од 25. година. За разлику од тога, максимално технички оствариво смањење потрошње енергије и емисије гасова стаклене баште на постојећим објектима, скопчано је са имплементацијом нових и скупих технологија и може имати оправдање само у контексту који није искључиво економски оријентисан.

Кључне речи: енергетске перформансе зграда, термички омотач, КГХ системи калибрисана симулација, мере за уштеду енергије, емисија гасова стаклене баште

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Термомеханика

УДК број: 697:628.8:536.7(043.3)

Abstract

In contexts of sustainability and energy efficiency, one of the most important topics is rationalization and optimization of building energy consumption, since about 32% of total energy consumption in the world is from the building sector [1]. Significant efforts and resources on global and local level are invested in order to increase energy efficiency of the buildings, including improving industrial standards, international agreements, legislation and investment in energy efficient technology, and energy retrofits of existing buildings.

The process of increasing energy efficiency of a building might look like a simple concept with straight forward approach, where existing building elements including envelope and equipment are upgraded with more efficient components (including windows replacement, adding external walls insulation, replacing central heating, or cooling plant equipment with more efficient etc.). In practice this is actually the most common approach. However, this is not completely justified strategy. Namely, every of the aforementioned energy conservation measures (ECM) will probably reduce energy consumption and GHG emission, but due to the limited funds for energy retrofits, implementation of one measure usually means missed opportunity to implement another measure or group of measures. Furthermore, if implementation of multiple ECMs is envisioned, then the question is which measures exactly should be part of the optimal package and what will be the effects of their implementation? Therefore, although the process of implementing individual ECMs is relatively simple, the process of building energy performance optimization is very complex, usually not properly defined and transparent and the importance of the process is not always recognized. In engineering and research practice constant efforts are put into improving various areas of energy efficiency in the building sector, but nevertheless, this it is still very difficult for decision makers to find tools required for systematic and methodologically sound process of building energy optimization, including problems such as how to define optimization criteria and how to define optimum scenarios i.e. ECM packages.

This dissertation develops and defines methodology for analysis and optimization of building energy performance. Methodology includes building description, defining of baseline conditions and baseline energy performance, detailed parametric analysis of energy flows, identification of energy saving potential, identification of individual ECMs and evaluation of energy, economic, and ecological effects of their implementation, and at the end definition of optimal scenarios for improving building energy performance.

The development methodology has been implemented and tested on the example of existing building of Winnipeg Tax Centre (Manitoba, Canada), including measurements of building energy performance, analysis of building energy systems configuration and usage, development of detailed physical-mathematical model for simulation of building energy performance, identification, simulation, and evaluation of number of different ECMs, and development of three different optimal scenarios for building energy performance improvement.

The dissertation presents methodology and results based on developed physical-mathematical model for calibrated simulation of building energy performance.

Detailed description and analysis of twenty-eight different ECMs related to building envelope, HVAC systems, electrical systems, and renewable energy, including detailed quantification of energy, economic, and ecological effect of ECM implementation.

Effects of ECM implementation on building energy performance have been estimated using numerical analysis using physical-mathematical model of the building software tools. Also economical aspects of ECM implementation have been evaluated, including capital costs, costs for energy and maintenance etc. As a key economic evaluation parameter NPV after 25 years.

The analysis has shown that the most promising energy conservation measures are related to changes of configuration, operational parameters, and efficiency of HVAC systems and equipment. Those measures can provide up to 25% of final energy consumption reduction, since measures related to building envelope provide up to 5% energy savings. However, for developing optimal ECM packages i.e. energy performance optimization scenarios, it is necessary to take into account all groups of measures, including envelope, HVAC, and electrical systems.

By implementing developed methodology, three different optimal scenarios or ECM packages have been developed. The first scenario provides minimal required (by legislation or departmental standards) energy savings and emission reduction with highest possible NPV. For Winnipeg Tax Building this scenario provides about 31% final energy savings with 1,3 million dollars NPV after 25 years.

For the second scenario, the requirement is to have neutral NPV after 25 years, while optimization criteria are energy savings, which should be maximized. For the presented case study of Winnipeg Tax Centre, this scenario provides about 54% energy savings, and 96% GHG emission reduction.

The third scenario envisions maximal GHG emission reduction, regardless of the costs. In the specific case of Winnipeg Tax Building this scenario provides about 62% of energy savings and 99% of GHG emission reduction, but with extremely high costs i.e. 27 million dollars negative NPV after 25 years.

From one side, engineering practice offers only limited and enough detailed insight on building energy performance, therefore energy savings estimations are not transparent enough and are often arbitrary. On the other side, research efforts are almost exclusively focused on development, improvement, and evaluation of specific individual ECMs, but with no regard to implementation costs or comparison with alternative solutions in the broader concept of building energy performance optimization.

Therefore, both in engineering practice and research there is a need for universal methodology, which would include all necessary steps in the process of building energy performance optimization. This dissertation offers exactly that, methodology which was successfully developed and implemented, and enables systematical, detailed, and transparent analysis and optimization of building energy performance, including dynamic simulation and ECM evaluation. This represents essential and important improvement to existing practices in research and industry.

Implementation of the developed methodology on case study has enable several important conclusions. First, opposite to generally accepted position in industry, even significant improvement of building thermal envelope does not necessarily yield large energy savings. Furthermore, some solutions which are advertised as “passive” in terms of energy consumption, such as chilled beams, and which should provide significant energy savings, actually provide lower savings compared to conventional technologies such as fan-coils. The only credible way to compare those solutions is using parametric analysis, and full energy breakdown, based on calibrated simulation of building energy performance. Another important conclusion is that even significant improvement of building energy performance providing more than 50% of energy savings and 90% of GHG emission reduction, are possible with cost neutral scenarios over the period of 25 years. On the other hand, maximizing energy savings by using high-end energy efficient technologies requires high investment costs, and it is justified only in context where project economic parameters are not significant. important

Key words: building energy performance, thermal envelope, HVAC systems, calibrated simulation, energy saving measures, greenhouse gasses emission

Scientific discipline: Mechanical Engineering

Scientific subdiscipline: Thermodynamics

UDC classification: 697:628.8:536.7(043.3)

Садржај

1	Увод, опште	1
1.1	Проблем и предмет истраживања	2
1.2	Циљ, метод и допринос истраживања	3
2	Развој методологије ЗА ЕВАЛУАЦИЈУ И ОПТИМИЗАЦИЈУ ЕНЕРГЕТСКОГ ПОНАШАЊА ЗГРАДЕ	5
2.1	Опис објекта.....	5
2.2	Утврђивање и анализа референтних услова и потрошње објекта	7
2.3	Формирање физичко-математичког модела за калибрисану симулацију енергетских перформанси објекта	8
2.3.1	Кондукција и акумулација топлотне енергије	10
2.3.2	Слој ваздуха.....	12
2.3.3	Конвекција	12
2.3.4	Струјање ваздуха у просторијама.....	13
2.3.5	Дуготаласно зрачење	14
2.3.6	Соларно зрачење	14
2.3.7	Унутрашњи добици.....	16
2.3.8	Термо-физичке карактеристике влажног ваздуха.....	16
2.4	Калибрисана симулација објекта и усклађивање референтне потрошње.....	17
2.4.1	Усклађени референтни модел	18
2.5	Идентификација и евалуација индивидуалних мера за уштеду енергије	19
2.6	Развој сценарија за унапређење енергетске ефикасности објекта.....	20
3	Имплементација методологије на реалном објекту.....	20
3.1	Инспекција и анализа објекта ради утврђивања референтног стања и референтне потрошње енергије.....	20
3.1.1	Основне опште информације о објекту	21
3.1.2	Грађевинске конструкције	21
3.1.3	Намена просторија	23
3.1.4	Вентилација и климатизација објекта	24
3.1.5	Топловодно грејање	28
3.1.6	Припрема санитарне топле воде.....	29
3.1.7	Хлађење.....	29
3.1.8	Централни систем за надзор и управљање	31
3.1.9	Расвета.....	32
3.2	Анализа потрошње енергије према измереним подацима	32
3.2.1	Укупна месечна потрошња енергије	32
3.2.2	Потрошња електричне енергије према часовним вредностима	42
3.3	Физичко-математички модел објекта.....	43
3.3.1	Локација и метеоролошки услови	44

3.3.2	Геометрија објекта и грађевинске конструкције	45
3.3.3	Термичке зоне.....	46
3.3.4	Дефинисање улазних параметара	47
3.4	Моделовање КГХ система објекта	47
3.4.1	Ваздушни системи	47
3.4.2	Топловодно грејање	48
3.4.3	Чилери.....	50
3.5	Калибрација физичко-математичког модела објекта.....	51
3.5.1	Калибрација потрошње електричне енергије.....	51
3.5.2	Калибрација потрошње природног гаса	54
3.6	Усклађени референтни модел	57
4	Дефинисање И ЕВАЛУАЦИЈА индивидуалних мера за уштеду енергије	59
4.1	ОМ-1 – Побољшање изолације зидова.....	60
4.2	ОМ-2.1 и ОМ-2.2 – Замена прозора (опција 1 и опција 2)	61
4.3	ОМ-3 – Заптивање омотача (смањење инфилтрације)	62
4.4	ОМ-4.1 и ОМ 4.2 – Побољшање изолације крова (опција 1 и опција 2).....	63
4.5	КГХ-1.1 – DOAS са ротационим регенератором топлоте комбинован са вентилатор-конвекторима, нискотемпературским грејањем и новим чилером са одвојеним кондензатором за зимско хлађење.....	64
4.6	КГХ-1.2 – DOAS са ротационим регенератором топлоте комбинован са VRF системом са рекуперацијом топлоте.	70
4.7	КГХ-1.3 – DOAS са ротационим регенератором комбинован са расхладним гредама 73	
4.8	КГХ-1.4 – Замена постојећих клима комора ефикаснијим системима са ротационим регенератором топлоте отпадног ваздуха и минималном количином свежег ваздуха према ASHRAE стандарду. Задржава се постојећа централна дистрибуције ваздуха. Увођење нискотемпературског грејања. Замена постојећих топловодних калорифера електричним. 76	
4.9	КГХ-2 – КГХ-1.х са двојезгарним регенератором топлоте.....	79
4.10	КГХ-3 – КГХ-1.х са рекуперативним чилером.....	80
4.11	КГХ-4.1 – Замена котлова за грејање на природни гас са електричним.....	82
4.12	КГХ-4.2. – Допунски електрични котао за грејање који ради само мимо вршне потрошње електричне енергије	84
4.13	КГХ-4.3 – Допунски електрични котао за грејање спрегнут са акумулатором топлоте, који ради само мимо вршне потрошње електричне енергије	84
4.14	КГХ-5 – Геотермална топлотна пумпа у комбинацији са КГХ-1.х.....	87
4.15	КГХ-6 – Топлотна пумпа ваздух-вода у комбинацији са КГХ-1.х.....	91
4.16	КГХ-7.1 – Замена парних овлаживача ваздуха на природни гас електричним.....	92
4.17	КГХ-7.2 – Замена парних овлаживача на природни гас адијабатским овлаживачима (ултразвучним)	92

4.18	КГХ-8 – Замена постојећих ваздушно хлађених чилера ефикаснијим водено хлађеним чилерима са магнетним лежачевима	94
4.19	КГХ-9.1 – Замена гасних котлова за припрему санитарне топле воде електричним .	95
4.20	КГХ-9.2 – Замена гасних котлова за припрему санитарне топле воде геотермалном топлотном пумпом	95
4.21	ОИЕ-1 – СОЛАРНИ КОЛЕКТОРИ	96
4.22	ОИЕ-2 – Фотонапонске ћелије на крову	99
4.23	ЕЛ-1 Смањење потрошње електричне енергије канцеларијских уређаја.....	101
4.24	РАС-1 Централизована контрола расвете са поделом на зоне	102
4.25	РАС-2 Контрола расвете сензорима присутности	105
5	Евалуација ЕФЕКТА ИМПЛЕМЕНТАЦИЈЕ индивидуалних мера за уштеду енергије	107
5.1	Анализа резултата симулације мера за побољшање термофизичких карактеристика омотача објекта	109
5.1.1	Ниске уштеде електричне енергије при побољшању изолације објекта.....	109
5.1.2	Уштеде енергије услед изолације крова	117
5.1.3	Мере за уштеду енергије на КГХ системима	119
6	Развој и анализа оптималних пакета мера за уштеду енергије.....	121
6.1	Сценарио 1 – Испуњавање минималних захтева за уштеду енергије уз оптимизацију по економском критеријуму	121
6.1.1	Референтни модел	122
6.1.2	Резултати и анализа	128
6.2	Сценарио 2 – Максимално смањење потрошње и емисије уз неутралне трошкове .	129
6.3	Сценарио 3 – Максимизација смањења потрошње и емисије	131
6.4	Упоредна анализа сценарија	131
7	Закључна разматрања	134
8	Прилози.....	142
8.1	Мере.....	Error! Bookmark not defined.

Списак слика

Слика 2-1 - Дијаграм прикупљања информација о згради која се анализира.....	6
Слика 3-1 – Зграда пореске управе у Винипегу (Google Maps).....	21
Слика 3-2 – Карактеристичан изглед фасаде објекта (северна страна).....	22
Слика 3-3 Конструкција зид завеса са јужне стране објекта.....	23
Слика 3-4 Типична шема клима коморе за јединице КК-1 до КК-15.....	24
Слика 3-5 – Просторни распоред група зона вентилационих које опслужују различити централни системи за вентилацију.....	25
Слика 3-6 Типичан изглед и конфигурација опреме у кровној машинској кућици/соби.....	26
Слика 3-7 Шема котловског постројења за топоводно грејање.....	29
Слика 3-8 Шема чилерског постројења.....	30
Слика 3-9 – Архитектура централног система за надзор и управљање (ЦСНУ).....	31
Слика 3-10 Потрошња електричне енергије према рачунима у односу на степен дане.....	35
Слика 3-11 Линеарна регресија – потрошња електричне енергије према СДХ.....	36
Слика 3-12 Потрошња природног гаса према рачунима у односу на степен дане грејања.....	38
Слика 3-13 Линеарна регресија – потрошња природног гаса према СДГ.....	39
Слика 3-14 Потрошња енергије и трошкови за енергију према енергентима током референтне године.....	39
Слика 3-15 Емисија гасова стаклене баште према енергенту током референтне године.....	40
Слика 3-16 Географска локација зграде Пореске управе у Винипегу (49.901330288269406, - 97.06479502646172).....	44
Слика 3-17 – Приказ 3Д модела објекта Пореског центра у Винипегу.....	45
Слика 3-18 – Термичке зоне у моделу груписане по системима.....	46
Слика 3-19 Типична конфигурација постојеће клима коморе са дистрибуцијом ваздуха у софтверском моделу, а према опису постојећег система (Слика 3-19).....	48
Слика 3-20 Шема котловског постројења у симулационом моделу.....	49
Слика 3-21 Крива ефикасности постојећих котлова AERCO Benchmark 3000 (https://www.aerco.com/).....	49
Слика 3-22 Теоријска крива ефикасности кондензационог котла на природни гас [93].....	50
Слика 3-23 Шема чилерског постројења у симулационом моделу.....	50
Слика 3-24: График потрошње електричне енергије према измереној потрошњи и калибрисаном моделу 2018 године.....	53
Слика 3-25: График потрошње природног гаса према измереној потрошњи и калибрисаном моделу током 2018 године.....	55
Слика 3-26: Калибрација потрошња природног гаса у односу на степен дане за грејање.....	56
Слика 3-27: Поређење потрошње референтног и усклађеног модела.....	59

Слика 4-1: Грађевинска конструкција спољашњег зида а) пре и б) после имплементације ОМ-1.1	60
Слика 4-2: Транспарентне позиције на објекту укључујући а) на јужној страни б) типичан изглед постојећих алуминијумских прозора	61
Слика 4-3: Карактеристична места на омотачу објекта која су циљана мером ОМ-2	62
Слика 4-4: Параметри за моделовања постојеће кровне конструкције	63
Слика 4-5 – Нова дистрибуција ваздуха за типичне зоне према КГХ-1.1	68
Слика 4-6 Типови вентилатор конвектор јединица а) хоризонтална јединица, б) вертикална парапетна јединица (http://usacoil.com/2020/10/04/fan-coil-units/)	68
Слика 4-7 Схематски приказ VRF система са воденим кругом (http://cdn.agilitycms.com/mesca/productdownloadCBds/03-c05_1624_12313_mitsubishi_citymulti_catalogue_outdoor_v3-water.pdf)	71
Слика 4-8 – Типична инсталација централних јединица VRF система са воденим кругом	71
Слика 4-9: а) Дијаграм протока ваздуха за типичну активну расхладну греду; б) Компоненте типичне активне расхладне греде	74
Слика 4-10 – Шематски приказ двојезгарног регенератора (https://www.tempBOBFnorthamerica.com/how-heat-recovery-works/)	79
Слика 4-11 – Схема рада рекуперативног чилера	80
Слика 4-12 – Потенцијалне локације за вертикалне бушотине	87
Слика 4-13: Геотермални круг је моделован помоћу софтвера Gaia Geothermal (www.gaiageo.com)	88
Слика 4-14 Геотермална топлотна пумпа током грејне сезоне	89
Слика 4-15 Геотермална топлотна пумпа током се зоне хлађења	89
Слика 4-16 COP чилера као функција температуре расхладне воде и парцијалног оптерећења	94
Слика 4-17 Соларни колектори инсталирани на крову (http://www.solaramericasolutions.com/tag/solar-thermal-hot-water-systems/)	96
Слика 4-18 Соларна ирадијација за зграду Пореске управе у Винипегу (резултати из SunCast-a)	97
Слика 4-19 Корелација између инсталисане површине соларних колектора, трошкова имплементације и уштеде енергије	97
Слика 4-20 Фотонапонске ћелије HANWHA HSQ-340-72P (http://hespv.ca/all-brands/hanwha-solar/hsl-340-72p)	99
Слика 4-21 Типичан изглед PV фарме на крову (http://uggboots.me/installing-solar-panels-on-a-flat-roof/installing-solar-panels-on-a-flat-roof-solar-panels-on-flat-roof-installing-solar-panels-flat-roof/)	100
Слика 4-22 – Утичница са сензором присутности	101
Слика 4-23 – Конфигурација предложене контроле расвете	103
Слика 4-24 Типична конфигурација контролних зона са сензорима присутности	105
Слика 5-1: Пример осунчаности објекта током 22. Јуна у различита доба дана	110

Слика 5-2 – Типичне температуре у контексту губитака топлоте кроз конструкцију крова током сезоне грејања	118
Слика 6-1 Упоредна анализа потрошње и емисије за три оптимална пакета мера	134
Слика 8-1 Параметри моделовања спољашњег зида	142
Слика 8-2 Параметри моделовања постојећег крова	142
Слика 8-3 Параметри моделовања постојећих прозора	143
Слика 8-4 Параметри моделовања постојеће конструкције типа зид-завеса	143
Слика 8-5 – Листа система и термичких зона у оквиру система	144
Слика 8-6 Параметри рада система топоводног грејања.....	145
Слика 8-7 Моделовање паралелног рада гасних котлова	146
Слика 8-8 Крива ефикасности постојећих кондензационих котлова на природни гас.....	146
Слика 8-9 Моделовање паралелног рада чилера.....	147
Слика 8-10 Параметри рада чилерског постројења	148
Слика 8-11 Крива ефикасности чилера у зависности од режима рада	148
Слика 8-12: Парамтери за моделовање постојећег спољашњег зида.....	Error! Bookmark not defined.
Слика 8-13: Параметри за моделовање спољашњег зида након имплементације МУЕ ОМ-1.1	149

Списак табела

Табела 3-1 Грађевинска конструкција постојећих спољашњих зидова	22
Табела 3-2 Грађевинска конструкција постојећег крова зграде	22
Табела 3-3 Клима коморе у машинској кућици 1	26
Табела 3-4 Клима коморе у машинској кућици 2	26
Табела 3-5 Клима коморе у машинској кућици 3	27
Табела 3-6 Клима коморе у машинској кућици 4	27
Табела 3-7 Вентилатори отпадног ваздуха у машинским кућицама	27
Табела 3-8 Додатна опрема за климатизацију	31
Табела 3-9: Потрошња електричне енергије према рачунима	34
Табела 3-10: Потрошња природног гаса према рачунима	37
Табела 3-11 Потрошња електричне енергије и природног гаса током референтне (2018.) године	39
Табела 3-12 Бенчмаркинг енергетских перформанси према портфолију постојећих зграда ...	41
Табела 3-13 Фактори емисије стаклене баште за природни гас, према локацији	41
Табела 3-14 Фактори емисије гасова стаклене баште за електричну енергију према локацији	42
Табела 3-15 – Мапа средњих часовних вредности ангазоване електричне снаге [kW] 2018. .	43
Табела 3-16: Резултати симулације калибрисаног модела за потрошњу електричне енергије	53
Табела 3-17: Прецизност процене потрошње електричне енергије калибрисаног модела на основу критеријума NMBE и CVRMSE:	53
Табела 3-18: : Резултати симулације калибрисаног модела за потрошњу природног гаса	55
Табела 3-19: Прецизност процене потрошње природног гаса калибрисаног модела на основу критеријума NMBE и CVRMSE:	55
Табела 3-20: Нормализовани нивои расвете	57
Табела 3-21: Годишња потрошња енергије према потрошачима, на основу резултата симулације референтног калибрисаног модела	58
Табела 3-22: Годишња потрошња енергије према потрошачима, на основу резултата симулације усклађеног референтног модела	58
Табела 4-1: Површина омотача укључујући удео транспарентних позиција (прозора)	61
Табела 4-2 Предложена и постојећа опрема за централну вентилацију у МК1	64
Табела 4-3 Предложена и постојећа опрема за централну вентилацију у МК2	65
Табела 4-4 Предложена и постојећа опрема за централну вентилацију у МК3	65
Табела 4-5 Предложена и постојећа опрема за централну вентилацију у МК4	65
Табела 4-6 Постојећи балансни извештај за опрему у машинској кућици 1	66
Табела 4-7 Постојећи балансни извештај за опрему у машинској кућици 2	66
Табела 4-8 Постојећи балансни извештај за опрему у машинској кућици 3	66

Табела 4-9 Постојећи балансни извештај за опрему у машинској кућици 4.....	67
Табела 4-10 Проток ваздуха у пројектним условима за нове јединице.....	67
Табела 4-11 Проток ваздуха у пројектним условима за нове јединице.....	73
Табела 4-12 – Преглед капацитета нових клима комора и придружених вентилатора за отпанди ваздух	77
Табела 4-13 Производња топлотне енергије за грејање рекуперативног чилера	81
Табела 4-14 – максимална електрична снага по месецима за референтну годину и након имплементације мере КГХ-4.1.....	82
Табела 4-15 Зависност кључних радних параметара топлотне пумпе ваздух-вода од температуре спољашњег ваздуха	91
Табела 4-16 Преглед трошкова имплементације за РАС-1	103
Табела 5-1: Резултати процене ефеката имплементације МУЕ.....	108
Табела 5-2: Упоредна анализа трансмисионих, инфилтрационих и соларних добитака кроз прозоре за термичку зону која се налази на фасади са оријентацијом север-североисток, за период хлађења када температура спољашњег ваздуха не прелази температуру у зони.....	113
Табела 5-3: Упоредна анализа трансмисионих, инфилтрационих и соларних добитака кроз прозоре за термичку зону која се налази на фасади са оријентацијом север-североисток, за период хлађења када температура спољашњег ваздуха прелази температуру у зони.....	114
Табела 5-4: Упоредна анализа трансмисионих, инфилтрационих и соларних добитака кроз прозоре за термичку зону која се налази на фасади са оријентацијом југ-југозапад, за период хлађења када температура спољашњег ваздуха не прелази температуру у зони.....	115
Табела 5-5: Упоредна анализа трансмисионих, инфилтрационих и соларних добитака кроз прозоре за термичку зону која се налази на фасади са оријентацијом југ-југозапад, за период хлађења када температура спољашњег ваздуха прелази температуру у зони.....	116
Табела 5-6: Потрошња енергије за хлађење објекта.....	117
Табела 5-7 Потрошња енергије КГХ система за нормализован референтни модел.....	119
Табела 6-1 Поређење параметара NECB модела и параметара нормализованог референтног модела.....	123
Табела 6-2 Поређење резултата нормализованог референтног модела и NECB модела.....	127
Табела 6-3 Референтне вредности потрошње и емисије за сценарио 1	128
Табела 6-4 Пакет мера за уштеду енергије за сценарио 1	128
Табела 6-5 Пакет мера за уштеду енергије за сценарио 2	130
Табела 6-6 Пакет мера за уштеду енергије за сценарио 3	131
Табела 6-7 Упоредна анализа резултата сценарија.....	133

Номенклатура

c	специфични топлотни капацитет [J/(kg·K)]
c_p	специфични топлотни капацитет при константном притиску [J/(kg·K)]
\dot{c}	прираштај масе угљендиоксида у влажном ваздуху [kg/s]
g	апсолутна влажност влажног ваздуха [kg/kg]
k	концентрација угљендиоксида у просторији [kg/kg]
h	коэффицијент прелаза топлоте [W/(m ² K)]
\dot{m}	масени проток [kg/s]
\dot{Q}	топлотни проток (топлотни флуks) [W]
R	комбиновани отпор простирању топлоте механизмима конвекције и зрачења кроз слој вадуха.
r	рефлексивност
T	температура [K]
U	коэффицијент пролаза топлоте [W/(m ² K)]
V	запремина [m ³]
v	брзина [m/s]
\vec{q}	површински топлотни флуks [W/m ²]
\dot{w}	прираштај масеног удела влаге у влажном ваздуху [kg/s]
α	угао висине сунца
β	нагиб површи у односу на хоризонталну раван
Δ	временски корак симулације
ε	емисивност [W/m ²]
Θ	температура површи [K]
θ	упадни угао соларног зрачења
λ	топлотна проводљивост чврстог тела [W/(m K)]
ρ	густина [kg/m ³]
σ	Штефан-Болцманова константа [5,6697x10 ⁻⁸ W/(m ² K ⁴)]

Ђириличне скраћенице

ВОВ	Вентилатор отпадног ваздуха
КЈ	Кровна јединица
КК	Клима комора
МУЕ	Мере за уштеду енергије
НСВ	Нето садашња вредност

Латиничне скраћенице

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Америчко друштво инжењера за грејање, хлађење и климатизацију)
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers (Овлашћена институција инжењера за системе и процесе у зградама)
CV(RMSE)	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (коэффициент варијације средње квадратне грешке)
DOAS	Dedicated Outdoor Air System (Клима комора која ради са 100% свежег ваздуха)
IEA	International Energy Agency (Међународна агенција за енергетику)
IPMVP	International Performance Measurement and Verification Protocol (Међународни протокол за мерење и верификацију)
NMBE	Normalized Mean Bias Error (нормализована средња грешка процене)
VAV	Variable Air Volume (Променљив запремински проток ваздуха)
VRF	Variable refrigerant flow system (Систем са променљивим протоком расхладног флуида)

Основне дефиниције

Референтни: који се односи на референтни период

Референтни период је временски период који се сматра репрезентативним за опис функционисање посматраног објекта пре спровођења МУЕ

Редовна усклађивања су усклађивања за било које факторе који се односе на промене Независних променљивих које утичу на потрошњу Енергије у току Периода гарантовања.

Ванредна усклађивања представљају усклађивања у односу на факторе чије се промене обично не очекују. Она се тичу промена у било каквим карактеристикама Уговорног објекта у мерним границама, осим поменутих Независних променљивих које се користе за Редовна усклађивања.

Референтни услови: вредности свих релевантних параметара, укључујући независно променљиве и статичке величине које описују и дефинишу начин рада објекта током референтног периода. Ту спадају карактеристике објекта и други фактори који можда нису експлицитно дефинисани

Подаци из референтног периода: мерења и квантитативне чињенице које описују рад објекта и дизајн током референтног периода. Ово укључује потрошњу или потражњу енергије и параметре рада објекта, који утичу на потрошњу или потражњу енергије.

Референтна потрошња енергије означава потрошњу Енергије и повезану ангажовану снагу и/или капацитет Уговорног објекта у Референтном периоду.

Усклађена референтна потрошња енергије, јесте потрошња енергије из референтног период усклађена према различитим условима рада

Усклађивања јесу измене референтних вредности ради неутрализације редовних и ванредних промена потрошње Енергије, како би се добила поуздана основа за утврђивање Уштеде енергије као последица имплементације Мера за уштеду енергије (МУЕ) од стране Извршиоца

1 УВОД, ОПШТЕ

Један од основних покретача и стубова савременог технолошког, друштвеног и цивилизацијског развоја је сектор енергетике. Последњих деценија један од главних покретача у развоју овог сектора везан је за напоре да се смањи емисија гасова стаклене баште и тако смањи утицај човека на глобално загревање и климатске промене. Дакле, повећање енергетске ефикасности и смањење емисије гасова стаклене баште (ГСБ) постали су значајни циљеви модерног друштва и модерних законских регулатива. Истраживање и резултати приказани у дисертацији фокусирани су на сектор зградарства и напоре да се у овом сектору смање потрошња енергије и емисија ГСБ.

Око 32% глобалне енергетске потрошње је у сектору зградарства [1]. У Европи зграде су одговорне за око 40% потрошње примарне енергије, што их сврстава у групу највећих потрошача, при чему нестамбене зграде чине око 25% зграда у Европи [2]. У Канади тај проценат износи око 28% потрошње финалне енергије при чему Јавне, пословне и индустријске зграде представљају око 41% потрошње у овом сектору [3]. Континуиран пораст потрошње енергије и повезаних трошкова, као и забринутост због утицаја емисије CO₂ на глобално отопљавање, навеле су законодавце, привредне субјекте и академску заједницу да дефинишу мере за уштеду енергије и алате за њихову евалуацију и имплементацију у сектору зградарства.

Мере за уштеду енергије (у даљем тексту МУЕ) у зградама су постале један од кључних елемената енергетске политике и инжењерске праксе у свету. Регулатива и механизми за њихово промовисање и спровођење су различити, међутим у основи је увек чињеница да је процентуални удео потрошње енергије у сектору зградарства велики, али уз значајан потенцијал за смањење потрошње имплементацијом различитих индивидуалних мера и стратегија.

Међународна агенција за енергетику¹ је описала широк спектар МУЕ за пословне, јавне, стамбене и индустријске зграде. Резултати су објављени у оквиру Протокола за оцену енергетских процеса [4], који описује како проценити које мере за уштеду енергије су прикладне за одређене типове зграда.

Више аутора је радило на томе да дефинишу како треба да се анализирају енергетске перформансе зграда, идентификују потенцијалне МУЕ и оцене ефекти њихове имплементације. Један приступ је да се ради оцене енергетских перформанси зграда користе измерени или израчунати подаци о потрошњи енергије у комбинацији са различитим статистичким методама [5–9]. Други приступ је више фундаменталан и укључује разматрања везана за моделирање енергетских токова и симулацију динамичког понашања објекта [10–12].

Битно је напоменути да постоје одређене специфичности у начину анализе и закључивања о енергетском понашању зграда када поредимо са једне стране стамбене зграде, односно пословне и јавне зграде са друге стране [13–16], с обзиром на то да пословне и јавне зграде имају комплексније КГХ системе са централном вентилацијом, хлађењем, аутоматиком итд.

Један начин оптимизације процеса унапређења енергетских перформанси на примеру реалног објекта приказали су Ascione et al. [17]. Аутори су користили детаљан енергетски преглед зграде, енергетски модел зграде креиран у софтверу EnergyPlus и Парето оптимизациони алгоритам, помоћу којег су дефинисали оптималну комбинацију мера за уштеду енергије.

Chidiac et al. [18] су предложили методологију за евалуацију МУЕ за различите типове пословних зграда. Они су покушали да дефинишу процес заснован на статистичкој анализи и

¹ International Energy Agency, www.iea.org

„архетиповима“ зграда, са циљем да омогуће одабир најефектнијих МУЕ. Исти аутор је у свом другом раду [19] анализирао различите индивидуалне мере за уштеду енергије, као и комбинације индивидуалних мера. Проблематично је што су у својим радовима, базираним на оригиналној методологији, аутори предвидели изразито високе уштеде енергије од појединачних мера, укључујући смањење потрошње природног гаса од 51% до 65% само на основу смањења инфилтрације на објекту, односно уштеде електричне енергије од чак 18% до 24% на основу побољшања изолације крова код вишеспратних зграда.

Nashempour et al. [20] су приредили преглед литературе везан за оптимизацију енергетског понашања постојећих зграда. Један закључака тог прегледа је да будућа истраживања треба да се фокусирају на идентификацији различитих типова зграда и оптималних МУЕ за одређене типове.

Остали аутори су се бавили појединим аспектима процеса оптимизације енергетских перформанси, укључујући евалуацију различитих индивидуалних МУЕ, процес калибрисане симулације енергетског понашања објекта итд. и о тим истраживањима биће речи у даљем тексту дисертације. Међутим, истраживања која се баве свеобухватном методологијом, почев од анализе постојећег стања и перформанси објекта, па до изнајавења оптималних стратегија унапређења, су малобројна.

Ова дисертација дефинише и представља методологију за детаљну оцену енергетског понашања јавних и пословних зграда и потенцијала за смањење потрошње и емисије угљен-диоксида. Дисертација укључује и опис великог броја индивидуалних МУЕ, евалуацију енергетских, еколошких и економских апсеката њихове имплементације, и на крају одабир различитих оптималних стратегија које представљају комбинацију више индивидуалних мера, при чему критеријум оптимизације могу бити енергетски, економски или еколошки параметри.

1.1 Проблем и предмет истраживања

На енергетско понашање зграда утичу бројни фактори. Неки од тих фактора се не мењају током времена, попут локације, оријентације и архитектуре објекта која укључује облик, грађевинску физику и намену простора. Међутим неки од кључних утицајних фактора су променљиви током времена и заправо су стохастичког карактера. Пре свега ту се мисли на метеоролошке услове и број људи у објекту и њихово понашање у контексту потрошње енергије. Међутим, и карактеристике и перформансе енергетских система у згради се мењају у току времена, услед промене режима рада система, промене стања компоненти система услед старења опреме, или чак услед промене самих компоненти енергетских система или читавих система итд.

Због тога, јасно је да енергетско понашање неког објекта у кратком интервалу времена није довољно релевантно. Неопходно је посматрати објекат током дужег, референтног, периода времена и успоставити корелацију између енергетских перформанси зграде и различитих утицајних фактора и потрошњака.

Дакле у полазној поставци постоје два основна општа проблема:

- Дефинисање референтних услова рада објекта и енергетских перформанси
- Идентификација МУЕ и евалуација ефеката њихове имплементације

Мерење и процена остварених уштеда енергије се врши поређењем потрошње енергије у периоду после спровођења МУЕ са оном потрошњом енергије каква би у том периоду била, да нису спроведене МУЕ. Процена каква би потрошња енергије била, да нису спроведене МУЕ захтева анализу података уз увођење корелација и претпоставки о томе како различити

параметри утичу на потрошњу енергије и како су се они променили у односу на референтни период (период пре спровођења МУЕ).

Спровођење мера за уштеду енергије, често се одвија без мерења која би требало да помогну у оцени остварених уштеда. Ипак, уколико је потребно да се оцена остварених уштеда базира на мерењима, онда је неопходно задовољити низ услова, да би се избегло да процес буде само наизглед објективан и прецизан, док заправо може да буде веома непрецизан, произвољан или чак пристрасан.

Процене уштеда енергије морају бити конзистентне и засноване на упоредивим и стандардизованим мерењима и прорачунима. То је од кључног значаја за све чиниоце укључене у процес имплементације МУЕ, а посебно је значајно када су гарантоване уштеде енергије укључене у уговоре везане за имплементацију МУЕ, без обзира да ли се ради о ESCO или неком другом моделу пословања.

Ипак, не постоји начин да се остварене уштеде директно измере, јер мерни уређаји не могу да мере изостанак потрошње или потражње енергије. Због тога се остварене уштеде рачунају на основу обављених мерења. Метод по којем се поређење потрошње енергије спроводи тако што се од измерене потрошње пре спровођења мера просто одузме измерена потрошња после спровођења мера, није добар, јер не омогућава да се одвојено посматра утицај МУЕ од утицаја осталих фактора који дефинишу потрошњу енергије, попут спољашње температуре и броја и понашања корисника. Због тога, да би се правилно оценио утицај МУЕ, неопходно је из разматрања елиминисати остале утицајне факторе.

Начин процене остварених уштеда енергије дефинисани међународним инжењерским стандардима од којих су далеко најзначајнији и опште прихваћени ASHRAE Guideline 14 [21] и IPMVP [22]. Према тим стандардима, да би се ефекат мера за уштеду енергије објективно оценио, неопходно је измерити потрошњу енергије после спровођења мера и упоредити је са измереном потрошњом енергије пре спровођења мера, при чему је та вредност нормализована тако да се у обзир узму утицајни параметри попут метеоролошких услова и броја и понашања корисника објекта, који су се разликовали у та два периода.

Кључни проблеми у процесу евалуације енергетских перформанси објекта и ефеката мера за уштеду енергије су:

- Дефинисање референтних услова и референтне потрошње
- Пројектовање референтне потрошње на период после спровођења мера за уштеду енергије (нормализовање референтне потрошње)
- Идентификација мера за уштеду енергије
- Евалуација ефеката имплементације индивидуалних мера за уштеду енергије
- Евалуација ефекта комбинације више мера за уштеду енергије
- Формирање оптималних пакета мера за уштеду енергије, тј. сценарија за унапређење енергетских перформанси објекта

У дисертацији је дефинисана и анализирана методологија кроз имплементацију на реалном пословном објекту, укључујући спроведена мерења енергетских перформанси и енергетске потрошње објекта у току референтног периода.

1.2 Циљ, метод и допринос истраживања

Постојећа научна и стручна литература се по правилу независно бави само појединим аспектима процеса анализе и оптимизације енергетског понашања зграда, попут утврђивања референтне потрошње [23–28], бенчмаркинга енергетских перформанси, калибрације софтверског симулационог модела зграде и сл. Најчешће теме истраживања су калибрисана симулација енергетског понашања зграде [21,29–43], затим евалуација мера за уштеду енергије [17–19,44–

50], и нешто ређе проблемима проблем вишепараметарске оптимизације дизајна зграде [51–58].

Научно-истраживачки радови који дефинишу различите методе за оптимизацију енергетског понашања објекта [17], по правилу подразумевају интензивна мерења различитих параметара рада објекта и потом статистичку анализу тих података. То укључује инсталацију многобројних сензора и система за аквизицију података и детаљно и дуготрајно праћење и прикупљање података о потрошњи енергије већег броја појединачних потрошача, термичких услова угодности и/или присуства корисника у згради. Међутим, у пракси, овакви подаци углавном нису доступни, јер је њихово прикупљање технички захтевно и по правилу није комерцијално оправдано. Са друге стране, индустријски стандарди или грубо дефинишу методологију за категоризацију зграда на основу њихових енергетских перформанси базирану на квазистационарним прорачунима, или само услове које методологија анализе мора да задовољи у контексту несигурности процењених уштеда, али не дефинишу кораке за спровођење методологије.

Због тога, је основни и општи циљ овог истраживања био да се развије и имплементира цео-вита методологија која дефинише све кораке неопходне детаљну анализу и оптимизацију енергетских перформанси зграда са сложеним КГХ системима, укључујући идентификацију и евалуацију индивидуалних мера за уштеду енергије и разраду оптималних сценарија који обухватају пакете МУЕ. При томе циљ је био да развијена методологија не буде скупа за имплементацију, тј. да не захтева нестандартна мерења параметара рада енергетских система, термичког комфора и енергетских токова у објекту. Дакле, да не захтева мерења мимо уобичајених енергетских прегледа, обрачуна потрошње енергије и рада система за централни надзор и управљање. Да би методологија била апликативна и на научно-истраживачким и на комерцијалним пројектима, и омогућила информисано доношење одлука свима укљученим у процес оптимизације енергетског понашања зграда, неопходно је да омогући детаљну параметарску анализу енергетских токова, потрошње енергије по појединим потрошачима и услова угодности.

Посебни циљеви тезе односе се на дефинисање, разраду и имплементацију појединих корака у оквиру методологије и укључују:

- Дефинисање начина на који треба да се опише објекат који је предмет анализе;
- Утврђивање референтне потрошње енергије објекта и референтних граничних услова;
- Усклађивање референтне потрошње према условима који се очекују у периоду након имплементације МУЕ;
- Развој физичко-математичког и софтверског модела за симулацију енергетског понашања зграде;
- Калибрисана симулација енергетског понашања зграде;
- Идентификација мера за уштеду енергије и квантификација енергетских, еколошких и економских ефеката њихове имплементације;
- Дефинисање три сценарија који су оптимални према економским, енергетским и еколошким параметрима и представљају комбинацију индивидуалних мера за уштеду енергије;

Читава методологија је тестирана на студији случаја кроз имплементацију на постојећи пословни објекат. Студија случаја укључује мерења енергетских перформанси, параметара рада и услова угодности, калибрисану симулацију објекта и анализу имплементације мера. Помоћу студије случаја био је могућ низ значајних закључака везаних за методологију, али и конкретне мере и сценарије за уштеду енергије, који су презентовани у дисертацији.

2 РАЗВОЈ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА ЕВАЛУАЦИЈУ И ОПТИМИЗАЦИЈУ ЕНЕРГЕТСКОГ ПОНАШАЊА ЗГРАДЕ

Методологија презентована у овој дисертацији је развијена у оквиру вишегодишњих истраживања енергетског понашања објеката у контексту симулације енергетских перформанси зграда [59] и анализе мера за уштеду енергије [60,61], а у оквирима научно-истраживачких пројеката финансираних од стране Владе Републике Србије² и Европске Уније³ и у сарадњи са партнерима из привреде који су уступили приступ подацима о комерцијалним објектима на којима је методологија унапређивана, тестирана и верификована.

Основни циљ методологије је да се разуме и квантификује начин на који се енергија у објекту троши, укључујући поделу потрошње према крајњим корисницима, термичке услове угодности у објекту и анализу рада термотехничких система, а да се затим дефинишу и евалуирају мере и стратегије за уштеду енергије.

Полазна претпоставка методологије је да су за анализу објекта доступне уобичајене информације попут основне техничке документације, информација о енергетским прегледима и месечних рачуна за наплату енергије. Са друге стране, циљ је да се дође до што детаљнијих информација о условима термичке угодности и енергетским перформансама објекта, укључујући поделу потрошње енергије према потрошачима. Једини начин да се од података о потрошњи који су доступни само за читав објекат на месечном нивоу, дође до детаљних информација о енергетским токовима и потрошњи према различитим категоријама је израдом детаљног физичко-математичког модела објекта који би био основ за калибрисану симулацију енергетског понашања објекта. Из тог разлога процес прикупљања информација о објекту, описа објекта и описа мера за уштеду енергије потребно је посматрати у контексту израде и калибрације софтверског модела зграде.

У наставку тезе детаљно је приказана методологија укључујући све неопходне улазне податке, кораке за њено спровођење, као и резултате имплементације. Кораци у спровођењу методологије укључују:

1. Опис анализираног објекта
2. Утврђивање референтне потрошње енергије објекта
3. Формирање физичко-математичког симулационог модела
4. Калибрисану симулацију енергетског понашања зграде
5. Идентификацију мера за уштеду енергије
6. Евалуацију енергетских, еколошких и економских последица имплементације мера за уштеду енергије
7. Развој оптималних сценарија за енергетску оптимизацију објекта

2.1 Опис објекта

Полазни основ анализе објекта су детаљан преглед и опис постојећег стања у контексту припреме модела за калибрисану симулацију. Неопходне информације укључују основне карактеристике објекта, начин коришћења просторија и енергетских система и податке о потрошњи енергије. У основне податке за опис објекта и анализу енергетских перформанси, које треба прикупити, спадају:

- Локација и оријентација објекта

² TR 33053 Истраживање и примена обновљивих субгеотермалних подземних водних ресурса у контексту повећања енергетске ефикасности у зградарству, 2011 – 2019

³ Interreg Danube Transnational Programme – 1st call: Smart Building – Smart Grid – Smart City (3 Smart); 2017-2019

- Геометрија
- Грађевинске конструкције и њихове термофизичке карактеристике
- Намена различитих просторија и целина у објекту
- Начин коришћења објекта и његових енергетских система
- Потрошња енергије у објекту у претходном периоду, а најмање за једну календарску годину
- Идентификацију потрошача енергије у објекту
- Шематски приказ и техничке карактеристике машинских и електро система и опреме
- Различите допунске информације



Слика 2-1 - Дијаграм прикупљања информација о згради која се анализира

Слика 2-1 приказује процес прикупљања основних и детаљних података за опис објекта, неопходних за анализу и моделовање његових енергетских перформанси. Техничке карактеристике објекта се прикупљају из више извора, укључујући пројектну документацију, извештаје о стању објекта и опреме, извештаје о енергетском прегледу и сл.

Када су прикупљени основни подаци о објекту, укључујући податке о потрошњи енергије током најмање једне календарске године, потребно је одредити индекс енергетских перформанси (ИЕП) ради поређења са другим објектима истог типа. Поређење се врши у односу на доступне статистичке податке о потрошњи енергије тј. ИЕП-у за одређену групу зграда, или према референтном систему рангирања.

Неки од примера система рангирања су Правилник о енергетској ефикасности зграда који важи у Републици Србији [62], LEED Систем рангирања који сада већ има интернационалну примену, или Национални енергетски правилник за зграде у Канади (National Energy Code for Buildings - NECB) [63] који је у овој дисертацији значајна референца у контексту студије случаја. У зависности од тога да ли се анализирани објекат пореди са портфолијом постојећих зграда или са референтним стандардом, зависи и то како ће ИЕП бити дефинисан, а најчешће се дефинише као укупна потрошња енергије по јединици површине објекта.

Уколико је ИЕП анализираниог објекта значајно другачији од очекиваног, потребно је поново проверити прикупљене податке о објекту са циљем да се или поправи квалитет прикупљених података и поново утврди ИЕП или да се потврди да објекат има потрошњу која значајно одступа од просека. Дакле, можемо да сматрамо да су прикупљени подаци успешно верификовани уколико је ИЕП анализираниог објекта у оквиру очекиваних вредности, или је јасан

разлог зашто објекат има значајно вишу или нижу потрошњу енергије од осталих објеката сличне намене и типа, а из исте климатске области. Неки од основних узрока различитог ИЕП-а могу бити специфичан временски распоред коришћења објекта и енергетских система на објекту, период реконструкције током којег објекат није радио, изразито лоше стање омотача објекта, или застарелост или неисправност неких енергетских система у односу на упоредиве објекте итд.

У другој фази описа објекта приступа се прикупљању детаљних информација о термичком омотачу објекта и машинским и електро системима. Ту спадају информације о објекту које могу да пружи власници објекта, корисници, или служба одржавања, а односе се на специфичности рада различитих система, дефекте, или нарушене услове термичког комфора, који нису документовани. Такође, значајан извор информација о стању термичког омотача објекта може бити извештај термографског испитивања, уколико је доступан.

За машинске системе, укључујући системе за грејање, хлађење и вентилацију, потребно је формирати шематски приказ конфигурације система и идентификовати сву централну и зонску опрему, укључујући модел опреме, капацитет, старост и процењени преостали радни век. Грејање и хлађење простора, припрема санитарне топле воде, вентилација, контрола релативне влажности ваздуха, укључујући рад пумпи и вентилатора, су по правилу највећи потрошачи енергије у јавним, пословним и комерцијалним објектима. Због тога је неопходно посветити посебну пажњу описивању и моделовању ових система.

Што се електричне опреме тиче, потребно је утврдити и описати детаље система унутрашње и спољне расвете, лифтова, покретних степеништа, канцеларијске опреме и осталих потрошача попут серверских центара, расхладне опреме, станица за пуњење електричних возила и сл. уколико постоје.

Систем унутрашње расвете треба да се дефинише на нивоу појединачних просторија, тј. да се идентификује инсталисана снага расвете за сваку просторију понаособ, или бар инсталисана снага по метру квадратном површине за сваки тип просторија (индивидуалне канцеларије, отворене канцеларије, конференцијске сале, оставе, ходници итд.). Потребно је знати и начин контроле паљења и гашења светла: да ли су у питању ручни прекидачи, сензори покрета, ноћна светла итд.

На крају, за правилно и детаљно моделовање машинских система у објекту, кључно је прикупити што детаљније информације о системима и стратегијама управљања у објекту, укључујући секвенце рада система и подешавања локалних контролера и термостата.

2.2 Утврђивање и анализа референтних услова и потрошње објекта

За анализу енергетског понашања објекта, потребно је прикупити податке о потрошњи енергије и граничним условима, укључујући метеоролошке услове и промену броја људи присутних у објекту током времена, који су репрезентативни за период пре спровођења мера за уштеду енергије.

У оквиру овог корака имплементације методологије неопходно је дефинисати референтни период, прикупити податке о потрошњи енергије и идентификовати поремећајне факторе који су у току референтног периода могли да имају значајан утицај на енергетско понашање објекта, попут нетипичних прекида рада објекта, радова на реконструкцији објекта, или замене и крупнијих поправки машинске и електро опреме и система.

С обзиром да се стање објекта енергетских система мења као последица начина и интензитета коришћења и квалитета одржавања, као референтни период треба узети последњу календарску годину која претходи почетку анализе, јер је тај период најрепрезентативнији по питању ефикасности рада система. У случају да је та календарска година атипична и одликује се нпр.

ванредним вишемесечним обуставама рада објекта, као референтан период узима се прва претходна календарска година.

Пошто је циљ методологије практична примена и у истраживачким и у комерцијалним апликацијама, калибрација се врши на основу индустријских стандарда [22,35], који су довољно прецизни и поуздани, а са друге стране нису претерано технички и економски захтевни. До истог закључка је дошао и низ других аутора, који су у својим моделима користили критеријуме калибрације прописане према ASHRAE Guideline-14.

За овакав процес калибрације, неопходни су подаци о потрошњи енергије према различитим енергентима, попут природног гаса и електричне енергије. Информације о потрошњи електричне енергије морају да укључе укупну месечну потрошњу током сваког месеца, али и максималну ангажовану електричну снагу током сваког обрачунског периода.

Уколико су доступни додатни подаци о потрошњи енергије и термичким условима угодности, попут часовне потрошње електричне енергије, часовне температуре у различитим просторијама, параметрима рада машинских система сакупљени преко система за аутоматско управљање и сл. њих је такође неопходно сакупити, сортирати и укључити у квалитативну оцену калибрисаног модела. Међутим, овакви подаци ретко постоје, или су непоуздани (нпр. зонски температурски сензори су често покварени или нису калибрисани), углавном зависе од великог броја непознатих параметара и стохастички су.

Важно је још једном истаћи да се код ове методологије, која се заснива на изради калибрисаног модела објекта, а који треба да пружи детаљан увид у потрошњу енергије по потрошачима, термичке услове угодности и омогући параметарску анализу енергетског понашања зграде. Као референтни период користи једна конкретна календарска година. Пре свега календарска година представља комплетан циклус кретања (положаја) сунца, који је један од кључних фактора, јер директно утиче на соларне добитке и потрошњу енергије за грејање и хлађење, а индиректно на остале метеоролошке услове, укључујући температуру ваздуха, ветар и облачност.

Са друге стране могу се користити и методе евалуације енергетских перформанси, утврђивања референтне потрошње и бенчмаркинга, које се не заснивају на калибрисаној симулацији, а које се користе када не постоји могућност или потреба детаљне анализе рада система у објекту и услова термичке угодности. Те методе се заснивају најчешће на статистичкој анализи великог броја података о параметрима потрошње енергије, који су зависно променљива величина и метеоролошких услова и броја корисника објекта са друге стране, као независно променљивих величина. У том случају се као референтни период узима што дужи временски интервал са великим бројем података, који се различитим математичким моделима своди на једну календарску годину, која се онда узима као референтна.

2.3 Формирање физичко-математичког модела за калибрисану симулацију енергетских перформанси објекта

Физичко-математички модел објекта треба да омогући параметарску термодинамичку анализу и прорачуне везане за енергетске токове и термичке услове угодности унутрашњих просторија у различитим периодима и условима током године. Овакав детаљни физичко-математички модел за симулацију енергетских перформанси зграде могуће је развити једино коришћењем одговарајућих софтверских алата, који дају оквир за дефинисање физичког модела објекта са зависно и независно променљивим величинама које дефинишу рад енергетских система и анализу резултата.

Да би била могућа параметарска анализа енергетског понашања објекта, која је значајна и за анализу референтних услова и референтне потрошње, али и за анализу ефеката имплементације МУЕ, модел објекта мора да се базира на првом закону термодинамике и да укључи прорачун размене енергије и масе у објекту механизмима кондукције, конвекције и зрачења, као и квантификацију ефеката складиштења енергије у термичкој маси објекта или компонентама машинских система, попут акумулатора топлоте или бафера.

Циљ дисертације није био развој нових софтверских алата, већ су анализирани постојећи алати за симулацију динамичког понашања објекта. На располагању је низ познатих и општеприхваћених метода и софтверских пакета. Питања какве су разлике у приступу, прорачунске могућности и област примене различитих метода моделовања и софтверских пакета, од којих се најчешће користе eQuest, EnergyPlus и TRNSYS, била су предмет истраживања различитих аутора [5–9,59,64–70]. Оно што су два најзначајнија закључка ових истраживања, су да динамичка симулација пружа прецизније процене потрошње и параметара рада него анализа на бази квази-стационарних модела, те да је за правилну процену потрошње помоћу динамичке симулације неопходна калибрација динамичког модела објекта (калибрисана симулација) [21,30–33,35,37,38,40,41,43,71–73] [59,69] .

Многа од постојећих софтверских решења која имају широку примену заправо не подржавају моделовање детаљне стратегије контроле и начина коришћења система за грејање, хлађење, климатизацију и производњу санитарне топле воде и што је једнако значајно, не пружају подршку моделовању модерних концепта и система који већ имају широку употребу у савременим енергетски ефикасним објектима, попут топлотних пумпи, система са активним или пасивним расхладним гредама (chilled beams) VRF (variable refrigerant flow)⁴ система и сл.

Због тога је у развијеној методологији модел зграде је формиран помоћу тренутно најробуснијег и најнапреднијег софтвера за моделовање и симулацију зграда IESVE (2019.1.0.0) [74][65], који омогућава детаљно дефинисање термофизичких карактеристика и 3Д геометрије грађевинских конструкција објекта, али и напредан начин моделовања термотехничких система у објекту, укључујући савремене концепте попут расхладних греда, система са променљивим протоком расхладног флуида и рекуперацијом топлоте и сл.

IESVE испуњава све захтеве софтвера за симулацију према CIBSE AM11 и ISO 5200 стандардима и у многим аспектима и превазилази критеријуме стандарда.

Независно од одабира симулационог софтвера, постоје основни критеријуми које би одабрани алат требало да задовољи. Неопходно је обезбедити анализу проблема који укључују:

- Термичку изолацију објекта
- Динамичко понашање објекта и термичку масу
- Конфигурацију и оријентацију објекта
- Метеоролошке услове
- Карактеристике транспарентних површина
- Соларно зрачење укључујући засенченост и продор соларне енергије у објекат
- Унутрашње добитке топлоте
- Ваздушну пропустљивост односно заптивеност зидова и прозора

⁴ Неки произвођачи попут LG-а овакве системе називају VRF (variable refrigerant flow), а други попут Daikin-а BPV (variable refrigerant volume). Оба термина су прихваћена у пракси, али се чешће среће VRF.

- Природну вентилацију
- Принудну вентилацију
- Детаљно дефинисане КГХ системе

Такође, потребно је детаљно моделовање и прорачун преноса топлоте кондукцијом, конвекцијом и зрачењем за све грађевинске конструкције и просторије у објекту. Симулација на основу измерених метеоролошких података треба да омогући анализу понашања објекта најмање на часовном нивоу. Излазни резултати модела треба да укључе:

- Податке о потрошњи енергије
- Податке о емисији угљендиоксида
- Статистику термичких услова угодности
- Статистику топлотног оптерећења за сваку просторију
- Метрику перформанси објекта и термотехничких система укључујући
 - температуре ваздуха у просторијама,
 - влажност ваздуха,
 - унутрашње добитке и
 - пролаз топлоте кроз поједине грађевинске конструкције
 - број измена ваздуха
 - оптерећење КГХ система,

Дакле модел укључује локацију објекта, оријентацију, геометрију, грађевинске конструкције, системе расвете, КГХ системе са подацима о ефикасности рада компоненти и система и управљачким стратегијама. Такође, укључени су и информације о коришћењу зграде укључујући распоред присуства корисника, расвете, рада електричних уређаја и подешавања термостата. Ове улазне параметре је потребно довести у корелацију са локалним метеоролошким подацима и уз коришћење једначина које дефинишу физичке феномене попут различитих механизама преноса топлоте и масе, израчунати топлотна оптерећења и одговор система на та оптерећења, што резултује потрошњом енергије, заједно са повезаном метриком везаном за комфор и потрошњу енергије. Читав прорачун је потребно радити за период од годину дана.

Дакле физичко-математички модел је развијен у складу са захтевима и могућностима IESVE софтверског пакета. У наставку су описани основни принципи који су коришћени при моделовању.

2.3.1 Кондукција и акумулација топлотне енергије

Расподела температурског поља у чврстом телу, где не постоје извори и понори топлоте, дефинисана је парцијалном диференцијалном једначином:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{q} = -\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Где су:

$T(x,y,z,t)$	температура [$^{\circ}\text{C}$] у тачки (x,y,z) и тренутку t
$\vec{q}(x,y,z,t)$	површински топлотни флуks [W/m^2] у тачки (x,y,z) и тренутку t
λ	топлотна проводљивост чврстог тела [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$]
ρ	густина чврстог тела [kg/m^3]
c	специфични топлотни капацитет [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]

Једначине (1) и (2) изражавају основни принцип провођења и акумулације топлоте.

У општем случају коефицијент провођења топлоте, густина и специфични топлотни капацитет су функције просторних координата, па на основу једначина (1) и (2) имамо:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Неопходно је узети у обзир и складиштење топлоте у маси ваздуха који се налази унутар зграде. Једначина који описује овај процес гласи:

$$\dot{Q} = c_p \rho_a V \frac{dT_a}{dt} \quad (4)$$

Где су:

\dot{Q}	топлотни проток на масу ваздуха [W]
c_p	специфични топлотни капацитет ваздуха при константном притиску [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
ρ_a	густина ваздуха [kg/m^3]
V	запремина ваздуха [m^3]
T_a	температура ваздуха [K]

Претпоставке модела

Основна претпоставка, у складу са референтним стандардима, је та да је кондукција у сваком елементу зграде (зид, кров, плафон итд.) једнодимензионална. Даље, термофизичке карактеристике (топлотна проводљивост, густина и специфични топлотни капацитет) сваког слоја неког конструкционог елемента се сматрају униформним и константним у том слоју. Са таквим претпоставкама, имамо

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Овај систем једначина је затворен применом одговарајућих граничних услова и условом да је топлотни флуks континуалан на границама слоја.

Дискретизација

Математички модел користи приступ коначних разлика за решавање једначине провођења топлоте. То подразумева замену елемента коначним бројем дискретних тачака у којима се рачуна температура.

У просторно дискретизованом приказу, једначина (5) има облик

$$\frac{T_{n-1} - 2T_n + T_{n+1}}{\delta_n^2} = -\left(\frac{\rho c}{\lambda}\right) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Где су:

T_n температура тачке n

δ_n растојање између две суседне тачке [m]

Тачке су распоређене унутар слојева на такав начин да обезбеде прецизно моделовање простирања и акумулације топлоте у одабраном временском кораку симулације. Овај избор базира се на ограничењима дефинисаним Фуријеовим бројем

$$F = \left(\frac{\lambda}{\rho C}\right) \frac{\Delta}{\delta_n^2} \quad (7)$$

Где је:

Δ временски корак симулације

У овом поступку сваки слој може бити приказан преко већег броја тачака. Потом се временски зависна променљива дискретизује. Детаљан опис методе коначних разлика је пружио Myers [75].

2.3.2 Слој ваздуха

Слој ваздуха у грађевинској конструкцији

Ваздушни слој у транспарентним и нетранспарентним позицијама се моделује као:

$$W = (T_1 - T_2)/R \quad (8)$$

Где је

\dot{Q} топлотни проток кроз слој ваздуха

T_1 и T_2 температуре површина које се граниче са ваздушним слојем

R комбиновани отпор простирању топлоте механизмима конвекције и зрачења кроз слој вадуха.

2.3.3 Конвекција

Модел разликује и у обзир узима и природну и принудну конвекцију.

Спољашња принудна конвекција (принудна због утицаја ветра), између омотача објекта и спољашњег ваздуха, моделована је на основу једначина које је дефинисао McAdams [71]:

$$h_e = 5,6 + 4,0v \quad (v < 4,88) \quad (9)$$

$$h_e = 7,2v^2 \quad (v \geq 4,88) \quad (10)$$

Где је

v брзина ветра [m/s] дефинисана преко метеоролошких података.

Унутрашња конвекција је дефинисана на основу емпиријских једначина које су дефинисали Almadri и Namond [76]. Њихове емпиријске једначине дефинишу коефицијент прелаза топлоте

као функцију разлике температура. За вертикалне површине и хоризонталне површине када је пренос топлоте „на горе“ израз Almdri и Hamond гласи:

$$h_i = \left[a \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^6 + \left[b \Delta T^{\frac{1}{3}} \right]^6 \quad (11)$$

Где је:

$$\Delta T = |T_a - T_s|$$

L карактеристична дужина површине

a и b коефицијенти

	a	b
Вертикална површина	1,50	1,23
Хоризонтална површина	1,40	1,63

За хоризонталне површине када је пренос топлоте „на доле“, израз гласи

$$h_i = 0.6(\Delta T/L^2)^{1/5} \quad (12)$$

Претпоставка је да коефицијент прелаза топлоте не може бити мањи од 1 W/m²K јер увек постоји неко кретање ваздуха у просторији генерисано конвекцијом на другим површинама или механичком вентилацијом.

2.3.4 Струјање ваздуха у просторијама

Просторије се посматрају као проточни системи. Топлотни проток на основу струјања ваздуха се одређује као

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_i - T_a) \quad (13)$$

Где је

\dot{m} масени проток ваздуха [kg/s]

c_p специфични топлотни капацитет

T_i температура ваздуха који улази у просторију

T_a температура ваздуха у просторији

Једначина (13) се заснива на претпоставци да је температура ваздуха у просторији униформна.

Масени проток ваздуха може да се дефинише на различите начине и укључује механичку и природну вентилацију и инфилтрацију. Може да се дефинише као запремински проток, масени проток, број измена ваздуха на час итд.

Промена количине влаге у ваздуху се дефинише као

$$\dot{w} = \dot{m}(g_i - g) \quad (14)$$

Где је

\dot{w} прираштај масеног удела влаге [kg/s]

g_i апсолутна влажност ваздуха који улази у просторију [kg/kg]

g апсолутна влажност ваздуха у просторији [kg/kg]

Промена масе угљендиоксида у просторији се дефинише као

$$\dot{c} = \dot{m}(k_i - k) \quad (15)$$

Где је

- \dot{c} прираштај масе угљендиоксида [kg/s]
 k_i је концентрација угљендиоксида у струји ваздуха која улази у просторију [kg/kg]
 k је концентрација угљендиоксида у просторији [kg/kg]

2.3.5 Дуготаласно зрачење

Површине зграде емитују апсорбују дуготаласно зрачење. За инфинитезималну површ dA , према Ламбертовом закону, флуks зрачења емитован под углом $d\omega$ на површ која се у налази под углом θ у односу на нормалу

$$d\dot{q} = \frac{1}{\pi} \varepsilon \sigma \theta^4 \cos\theta d\omega dA \quad (16)$$

Где су

- $d\dot{q}$ површински флуks зрачења [W/m^2]
 ε емисивност површи [W/m^2]
 σ Штефан-Болцманова константа [$5,6697 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$]
 θ температура површи [K]
 θ упадни угао зрачења
 $d\omega$ угао зрачења
 dA елемент површи [m^2]

Физичко-математички модел узима у обзир:

- Унутрашње дуготаласно зрачење
- Утицај ваздуха на зрачење унутар просторије
- Спољашње дуготаласно зрачење

За симулацију унутрашњег дуготаласног зрачења усвојен је CIBSE метод средњих температура зрачења [77].

Троатомни гасови који се налазе у ваздуху (пре свега вода, а у мањој мери и угљен-диоксид) учествују у размени енергије зрачењем у оквиру просторије. У симулацији, користи се модел који је развио Hottel [78].

Спољашње дуготаласно зрачење се односи на енергију коју зграда прима од небеског свода и других чврстих тела у околини. Разлика између енергије која је емитована и апсорбована зрачењем представља добитак од дуготаласног зрачења. Модел који је коришћен у симулацији дефинисан је од стране CEC European Solar Radiation Atlas [79], и прихваћен кроз CIBSE Guide A [77].

2.3.6 Соларно зрачење

Приближно, сунце се може апроксимирати као црно тело са температуром на површини од 5.800 K. Енергија коју зрачи производи топлотни флуks на замишљеној површини земљине атмосфере, просечног годишњег интензитета $1.353 W/m^2$. Пошто атмосфера садржи различите гасове, честице и облаке дозрачена енергија на земљину површину је варијабилна и доста нижа

од вредности дозрачене на површину атмосфере. Остали фактори који утичу на дозрачено соларно зрачење на земљиној површини су углови под којима сунце зрачи и дифузија зрачења у атмосфери.

Зрачење инцидентно на површину зграде може да се рашчлани на три основне компоненте: директно (поклапа се за зрацима светла) које проистиче са дела неба око сунчевог диска, дифузно зрачење са читавог небеског свода и зрачење са тла и околних објеката. Директно зрачење се значајно модификује засторима и околним зградама и пејзажом.

Соларно зрачење које улази у објекат кроз транспарентне позиције омотача објекта се апсорбује (после вишеструког рефлектовања и преламања унутар просторија) на унутрашњим површинама. Део ове енергије се потом преда зрачењем кроз транспарентне позиције назад ка спољашњој околини. Ефекти апсорпције и рефлексије зрачења на спољашњим површинама су такође значајни.

Метеоролошке променљиве

Симулација се заснива на часовним вредностима соларног зрачења дефинисаним у фајлу са метеоролошким подацима. Променљиве везане за соларно зрачење су:

- Директно соларно зрачење мерено у равни нормалној на зрак [W/m^2]
- Дифузно соларно зрачење мерено у хоризонталној равни [W/m^2]
- Углови азимута и нагиба (рачунају се на основу координата локације објекта)

Прорачун соларног зрачења

Симулациони модел, током сваког временског корака, прорачунава упадно соларно зрачење на сваку спољашњу површ зграде. Компоненте соларног зрачења се рачунају на следећи начин:

Директно соларно зрачење, I_{dir} :

$$I_{dir} = I_{beam} \cos(\theta) \quad (\cos(\theta) > 0) \quad (17)$$

Где је

I_{dir} директно соларно зрачење (W/m^2)

I_{beam} соларно зрачење на раван нормалну на упадно зрачење (W/m^2)

θ упадни угао соларног зрачења

Дифузно соларно зрачење има компоненту дозрачену са небеског свода и са тла.

$$I_{sdiff} = I_{hdiff} \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (18)$$

$$I_{gdiff} = r_g I_{hglob} \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (19)$$

Где је

I_{sdiff}	дифузно соларно зрачење небеског свода
I_{hdiff}	дифузно соларно зрачење небеског свода на нормалну раван
β	нагиб површи у односу на хоризонталну раван
I_{gdiff}	дифузно соларно зрачење са тла
r_g	рефлексивност околине
$I_{glob} = I_{sdiff} + I_{beam}\sin\alpha$	укупно соларно зрачење на хоризонталну површ
α	угао висине сунца

2.3.7 Унутрашњи добици

Унутрашњи добици топлоте су специфицирани тако да се принципијелно могу сврстати у неколико група:

- Добици од људи
- Инкадесцентно светло
- Флуоресцентно светло
- Рачунарска опрема
- Машинерија
- Уређаји за припремање хране (кување)
- Остало

Генерално, добици имају сензибилни и латентни део. Они могу да се дефинишу преко апсолутне вредности [W] или преко вредности у односу на површину пода [W/m^2]. Свака компонента се специфицира преко максималне вредности и профила варијације у времену.

Осетни добици повећавају осетни део унутрашње енергије просторије. Латентни добици додају водену пару у ваздух у просторији. Сви добици се изражавају као прираштај унутрашње енергије.

2.3.8 Термо-физичке карактеристике влажног ваздуха

Моделовање психрометријских процеса захтева прорачуне конверзије између квантитета као што су

- Температура сувог термометра
- Температура влажног термометра
- Температура тачке росе
- Релативна влажност
- Парцијални притисак водене паре
- Енталпија
- Густина ваздуха
- Атмосферски притисак
- Сатурација

За ове конверзије, користе се процедуре дефинисане у литератури R.W. Hyland et al. [80].

2.4 Калибрисана симулација објекта и усклађивање референтне потрошње

При формирању физичко-математичког модела дефинише се велики број улазних прорачунских параметара, који утичу на потрошњу енергије у објекту. Вредности улазних параметара се најпре дефинишу на основу техничке документације или различитих претпоставки. Ретко су њихове вредности егзактно измерене са дефинисаним степеном мерне несигурности.

Калибрација симулационог модела је процес финог подешавања улазних параметара модела, у границама могућих и очекиваних вредности њихових величина, а са циљем да се резултати модела за референтни период у задовољавајућој мери поклопе са стварно измереним подацима. Калибрисани модели за симулацију драстично повећавају прецизност процене енергетских перформанси зграда и имају могућност да премосте или значајно умање неслагање између предвиђене и измерене потрошње [39,81,82][83]. Модели зграда треба да буду поуздани и због тога је калибрација од фундаменталног значаја [40,82].

Модели зграда успевају да прикажу само ограничен део комплексног скупа динамичких (карактеристике материјала и КГХ система), стохастичких (број људи у објекту) и пробабилистичких (метеоролошки услови) елемената који утичу на потрошњу зграда, а што резултује несигурношћу и непрецизношћу резултата модела. Ограничења софтверских модела, непрецизност улазних параметара у спреси са потешкоћама везаним за прикупљање информација како објекат тачно функционише су главни разлози грешака модела [84].

Калибрација се углавном заснива на усклађивању резултата симулације са измереном потрошњом енергије и проценама онога ко врши анализу.

Преглед различитих техника које су се користиле за калибрацију дали су Coakley et al. [32]. Сличан преглед приредили су и Fabrizio et al. [85].

Још неке интересантне и значајне методе калибрације развили су и верификовали Yang и Veserik-Gerber [36], Kim et al. [21] чија метода калибрације се заснива на броју корисника и распореду коришћења електричне опреме, затим Hong et al. [82] који су такође користили измерену потрошњу електричне енергије као основ за калибрацију. Sacabelos et al. [17] су предложили методологију по којој се зграда дели на посебне целине и под-моделе који се засебно калибришу.

Све ове студије показују да је развој поузданог калибрисаног модела први корак у сложеном процесу оптимизације енергетских перформанси зграде.

Ипак, снажне индикације указују на то да је општи консензус тај да је метод калибрације дефинисан према ASHRAE Guideline 14 [21] и даље најприхватљивији у научно-истраживачком раду и инжењерској пракси [17] [32] [86]. Постоје пре-поруке и да се за калибрацију користе часовне вредности измерене потрошње енергије на свим постојећим електричним бројилима у згради [87,88].

Из наведених разлога калибрација у оквиру методологије развијене у дисертацији се врши према препорукама ASHRAE Guideline 14 [21]. Овај водич је оригинално развијен да би се квантификовале уштеде енергије које проистичу од одређених мера енергетске ефикасности, али се користи и као водич који дефинише критеријуме прихватљивости софтверских модела зграда. Према најчешће коришћеним индикаторима грешке [21][89], а то су средња грешка процене (МБЕ)⁵ и коефицијент варијације корена средње квадратне грешке (CV(RMSE))⁶. МБЕ је параметар који пружа информацију о квалитету нумеричког предвиђања у поређењу

⁵ МБЕ - Mean Bias Error

⁶ CV(RMSE) - Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error

са измереним подацима, али подложен је поништавању грешке услед позитивних и негативних одступања. $CV(RMSE)$ даје увид у несигурност предвиђања на основу модела и исправља могуће комбинације позитивних и негативних одступања који могу да доведу до грешке у калибрацији заснованој само на МВЕ параметру. Да би се модел сматрао задовољавајуће калибрисаним, следећи услови морају да буду задовољени:

- $-5\% \leq MBE \leq 5\%$;
- $CV(RMSE) \leq 15\%$.

Треба напоменути да ови параметри не дефинишу методологију калибрације, већ критеријуме које калибрација треба да задовољи.

Калибрација се обавља користећи податке о потрошњи енергије на месечном нивоу, најчешће на основу рачуна за наплату утрошене енергије. Уколико су доступни и додатни подаци, попут часовне потрошње електричне енергије, температуре у различитим унутрашњим просторијама или параметара рада КГХ система, њих такође треба укључити у процес калибрације.

Овако дефинисан калибрисани референтни модел, који задовољава поменуте критеријуме грешке, довољно прецизно репрезентује понашање реалног објекта у току референтног временског периода тј. референтне календарске године.

Међутим, референтни период одликују специфични услови коришћења објекта и потрошње енергије и он није довољно релевантан за даљу евалуацију мера за уштеду енергије.

2.4.1 Усклађени референтни модел

Адекватно одређивање уштеда енергије поређењем потрошње пре и после имплементације МУЕ је могуће само ако модел узме у обзир и промене свих параметара који утичу на енергетске перформансе, а који нису везани за имплементацију МУЕ. Метеоролошки услови и број корисника објекта су један пример таквих променљивих који се често мења и утиче на потрошњу. Даље, сви пројекти реконструкције објекта који су већ одобрени или започети, а који ће да промене геометрију, термо-физичке карактеристике, намену објекта, енергетске системе итд. такође морају да буду узети у обзир пре евалуације МУЕ. То значи да калибрисани референтни модел може адекватно да користи за оцену ефеката МУЕ, тек када се сви наведени фактори узму у обзир. То се ради кроз процес нормализације референтног модела .

Метод процене уштеда од имплементације МУЕ подразумева да се енергетске перформансе референтног модела репрезентативног за период пре енергетске санације пројектују на период после енергетске санације. Међутим, као што је објашњено, таква пројекција захтева да се референтни модел усклади са условима експлоатације који се могу очекивати у периоду коришћења након имплементације МУЕ. Примера ради потребно је узети у обзир другачије метеоролошке услове, услове коришћења и остале променљиве које утичу на енергетске перформансе. Постоје редовна и ванредна усклађивања.

Редовна усклађивања су усклађивања за било које факторе који се односе на промене независних променљивих које утичу на потрошњу енергије у периоду после имплементације МУЕ.

Ванредна усклађивања представљају усклађивања у односу на факторе чије се промене обично не очекују. Она се тичу промена у било каквим карактеристикама посматраног објекта у мерним границама, осим поменутих независних променљивих које се користе за редовна усклађивања.

Уштеде се одређују на следећи начин:

Уштеде=(Усклађена референтна потрошња пројектована на период после имплементације МУЕ) – (Потрошња објекта после имплементације МУЕ)

Неопходно је у два корака креирати усклађени референтни модел. У првом кораку, врше се ванредна усклађивања која узимају у обзир већ предвиђене пројекте за реконструкцију објекта (нпр. замену расвете, смањење броја запослених, побољшање термичког омотача и сл.). У другом кораку врше се редовна усклађивања тј. узимају се у обзир метеоролошки услови какви могу да се очекују у периоду после имплементације МУЕ, уместо метеоролошких услова какви су забележени током референтног периода, а који се називају „стварна метеоролошка година“ (Actual Meteorological Year – АМУ). Метеоролошки услови који се користе за усклађени модел су дефинисани као „типична метеоролошка година“ (Typical Meteorological Year – ТМУ) и узимају у обзир податке који су прикупљени и статистички обрађени за период од 30 година.

Тако дефинисан нормализовани модел за симулацију енергетских перформанси може да се користи за евалуацију индивидуалних мера за уштеду енергије.

2.5 Идентификација и евалуација индивидуалних мера за уштеду енергије

Повећање енергетске ефикасности зграда помоћу мера за уштеду енергије које се имплементирају кроз енергетске санације и различите стратегије енергетског менаџмента већ дужи низ година је подстакнуто и регулисано различитим стратегијама енергетског развоја, законском регулативом и индустријским стандардима.

Као последица тога, типичне МУЕ које су могуће у оквиру енергетске санације објекта већ су познате и документоване. Примера ради, Међународна агенција за енергију (International Energy Agency – IEA) је описала исцрпну колекцију мера за уштеду енергије за комерцијалне, стамбене и индустријске зграде [4].

Принципијелно, МУЕ можемо да сврстамо у четири основне групе:

- Побољшање термичког омотача објекта
- Унапређење ефикасности машинских и КГХ система
- Унапређење ефикасности електричних система
- Коришћење обновљивих извора енергије

У свакој од ових група потребно је идентификовати мере које су технички и/или економски прихватљиве и изводљиве на конкретном објекту. Када су МУЕ идентификоване, потребно је описати идејно решење за спровођење тих мера, укључујући идентификацију дела потрошње коју мера треба да смањи, затим техничке карактеристике материјала или опреме који ће бити коришћени, стратегије управљања новим системима и трошкове имплементације и одржавања.

На крају, тако дефинисана мера инкорпорира се у нормализовани референтни симулациони модел, што омогућава да се кроз динамичку симулацију оцени потрошња објекта и емисија гасова стаклене баште након имплементације мере, али и да се идентификују и квантификују ефекти које спровођење конкретне МУЕ може да има на остале енергетске системе.

Дакле коначни резултати овог корака методологије су:

- Списак и опис идејних решења потенцијално могућих МУЕ
- Утврђени трошкови имплементације и одржавања везани за конкретну МУЕ
- Оцена уштеда енергије и емисије CO₂ након имплементације МУЕ

2.6 Развој сценарија за унапређење енергетске ефикасности објекта

Крајњи циљ методологије није да се идентификује мера са највећом уштедом енергије, најнижом инвестицијом, или најкраћим периодом отплате, већ да се дефинише пакет мера тј. сценарио имплементације МУЕ који је оптималан по одређеном критеријуму.

Три основна сценарија која су представљена у овој тези су:

1. Сценарио 1 - има за циљ достизање захтева о енергетској ефикасности постављених кроз регулативу или индустријске стандарде, а уз најповољнију економију пројекта
2. Сценарио 2 - има за циљ дефинисање пакета МУЕ са максималним могућим смањењем потрошње, уз неутралну економију пројекта
3. Сценарио 3 - који има за циљ максимално смањење потрошње енергије и емисије угљен-диоксида, без обзира на трошкове

Пошто утицај пакета мера на уштеде енергије није једнак ни сразмеран збирном утицају појединачних мера [19], једини начин да се евалуира ефекат пакета мера је кроз симулацију на референтном моделу зграде. Због тога, проналажење решења за сваки од потенцијалних сценарија представља итеративни процес.

3 ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА МЕТОДОЛОГИЈЕ НА РЕАЛНОМ ОБЈЕКТУ

Методологија презентована у претходним поглављима дисертације је имплементирана и унапређена кроз студију случаја. Објекат који је одабран за студију случаја је зграда Пореске управе у Винипегу (провинција Манитоба, Канада). Овај објекат је изабран због повољне комбинације величине објекта, сложености КГХ и других система који троше енергију, укључујући серверску собу и штампарски центар, а и због чињенице да је изграђен 1979. што опет значи да омотач објекта и системи нису дизајнирани по савременим стандардима енергетске ефикасности, а и да је већи део машинске опреме на истеку радног века.

Имплементација методологије подразумева све описане кораке укључујући детаљну анализу постојећег објекта, услова његовог коришћења и понашања енергетских система, формирање физичко-математичког софтверског модела за калибрисану симулацију која омогућује детаљну параметарску анализу потрошње енергије према потрошачима, а на основу измерених параметара и резултата симулације. Затим идентификацију и евалуацију индивидуалних мера за уштеду енергије и на крају развој оптималних сценарија за унапређење енергетске ефикасности објекта.

3.1 Инспекција и анализа објекта ради утврђивања референтног стања и референтне потрошње енергије.

Основне информације о објекту су прикупљане из техничке и пројектне документације и кроз податке о измереној потрошњи енергије, укључујући месечне рачуне за природни гас и струју и часовне вредности потрошње електричне енергије. Техничка документација укључује:

- Технички опис машинских система у објекту
- Извештаје енергетског прегледа
- Пројектну документацију укључујући
 - Главни пројекат за изградњу објекта
 - Касније пројекте реконструкција и санација

На основу података из техничке документације дефинисане су термо-физичке карактеристике грађевинских конструкција у моделу, електро и машинске инсталације, укључујући централне системе, дистрибуцију, зонске уређаје и контролу. Дакле, на основу доступних података, био је могућ детаљан опис објекта, приказан у наредним поглављима.

3.1.1 Основне опште информације о објекту

Зграда Централне пореске управе у Винипегу (Winnipeg Tax Centre) налази се на адреси Стапон Роуд бр.66 у Винипегу у канадској провинцији Манитоба. Објекат је изграђен 1979. године, са укупном бруто површином од око 31.710 m². Зграду чине два спрата (приземље и први спрат) са канцеларијама, укључујући отворени канцеларијски простор и индивидуалне канцеларије, рачунарски центар (тј. просторију за сервере), просторију за штампање на велико и отпрему пореске документације, просторије за телекомуникациону опрему и електро и машинске собе. Као карактеристичне архитектонске целине још се истичу главни улаз са предворјем и кафетерија. Фасада објекта је сачињена од префабрикованих бетонских панела, са релативно великим перфорацијама за прозоре. На крову се налазе четири машинске кућице са опремом за вентилацију зграде. Током 2018. (референтни период) у Централни пореске управе у Винипегу, радило је око 3.000 запослених.

Објекат се греје помоћу система топловодног грејања, које обезбеђују четири кондензациона котла смештена у машинској соби у приземљу. Механичко хлађење обезбеђују три ваздухом хлађена чилера, који хладном водом снабдевају размењиваче већег броја клима комора.



Слика 3-1 – Зграда пореске управе у Винипегу (Google Maps)

3.1.2 Грађевинске конструкције

Грађевинске конструкције објекта чине:

1. Спољашњи зидови од префабрикованих бетонских панела
2. Кровна конструкција
3. Алуминијумски прозори
4. Зид завеса изнад улазног предворја на јужној страни



Слика 3-2 – Карактеристичан изглед фасаде објекта (северна страна)

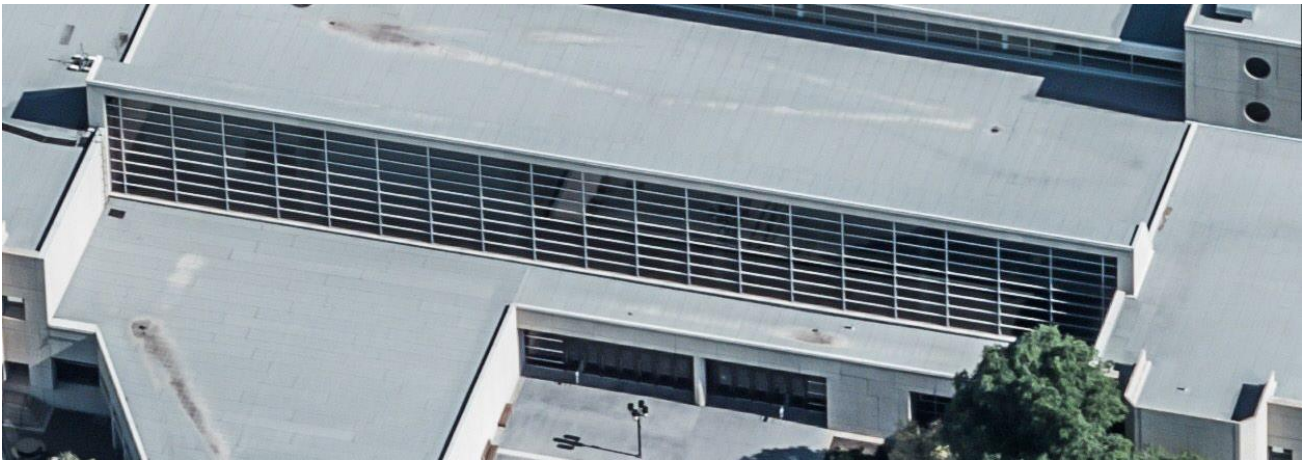
Табела 3-1 Грађевинска конструкција постојећих спољашњих зидова

Слој	Дебљина слоја (mm)	Топлотна проводљивост (W/m ² K)
Префабриковани бетонски блокови	150	1,400
Шупљина	25	
Чврста изолација (стиропор)	100	0,038
Парна баријера	0,012	0,050
Ригипс плоче	13	0,161
Укупни коефицијент пролаза топлоте		0,315

Табела 3-2 Грађевинска конструкција постојећег крова зграде

Слој	Дебљина слоја (mm)	Топлотна проводљивост (W/m ² K)
Шљунак	150	20
Кровна мембрана	25	2
Чврста изолација - XPS	100	100
Ригипс плоче	0,012	13
Метални носећи профили (за ригипс)	13	3
Укупни коефицијент пролаза топлоте		0,279

Изнад улазног предворја са јужне стране, налази се конструкција зид-завеса, која обезбеђује велику количину дневног светла унутар објекта, али и представља критичан део омотача у погледу термо-физичких карактеристика, трансмисије топлоте и соларних добитака.



Слика 3-3 Конструкција зид завеса са јужне стране објекта

3.1.3 Намена просторија

У објекту постоји неколико функционалних целина у којима постоје просторије различитих намена. То су:

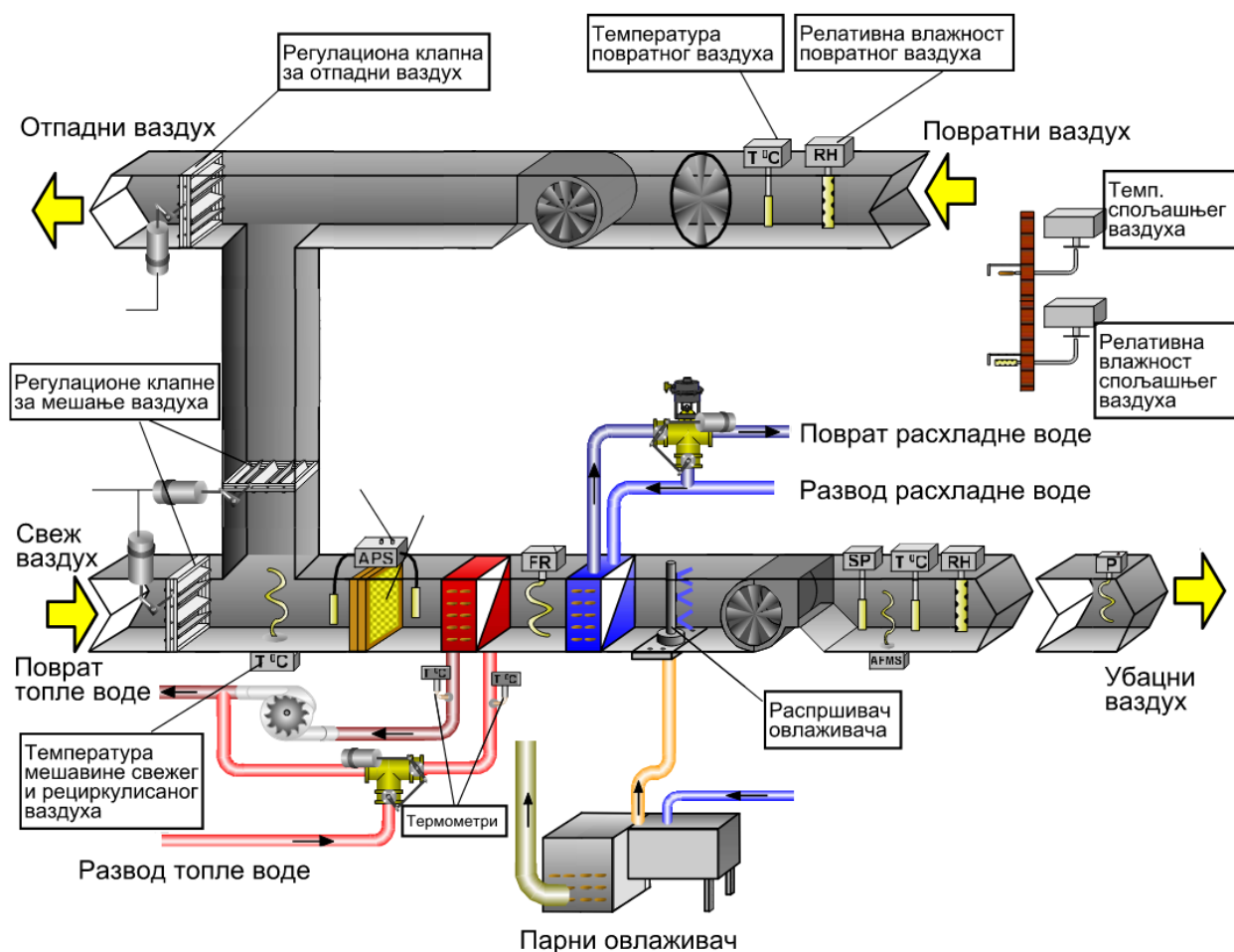
- Канцеларије отвореног типа (open office)
- Индивидуалне канцеларије
- Рачунарски центар
- Штампарииа
- Кафетерија
- Техничке просторије
- Тоалети
- Предворја, степеништа и ходници

Намена просторија дефинише начин њиховог коришћења, инсталирану опрему и захтеване параметре термичког комфора. Све карактеристике просторија везане за њихову намену и начин коришћења су дефинисане на основу техничке документације и испитивања објекта кроз енергетски преглед, обилазак објекта и праћење рада ЦСНУ. Начин моделирања карактеристика просторија различитог типа објашњен је у поглављу 0

Дефинисање улазних параметар.

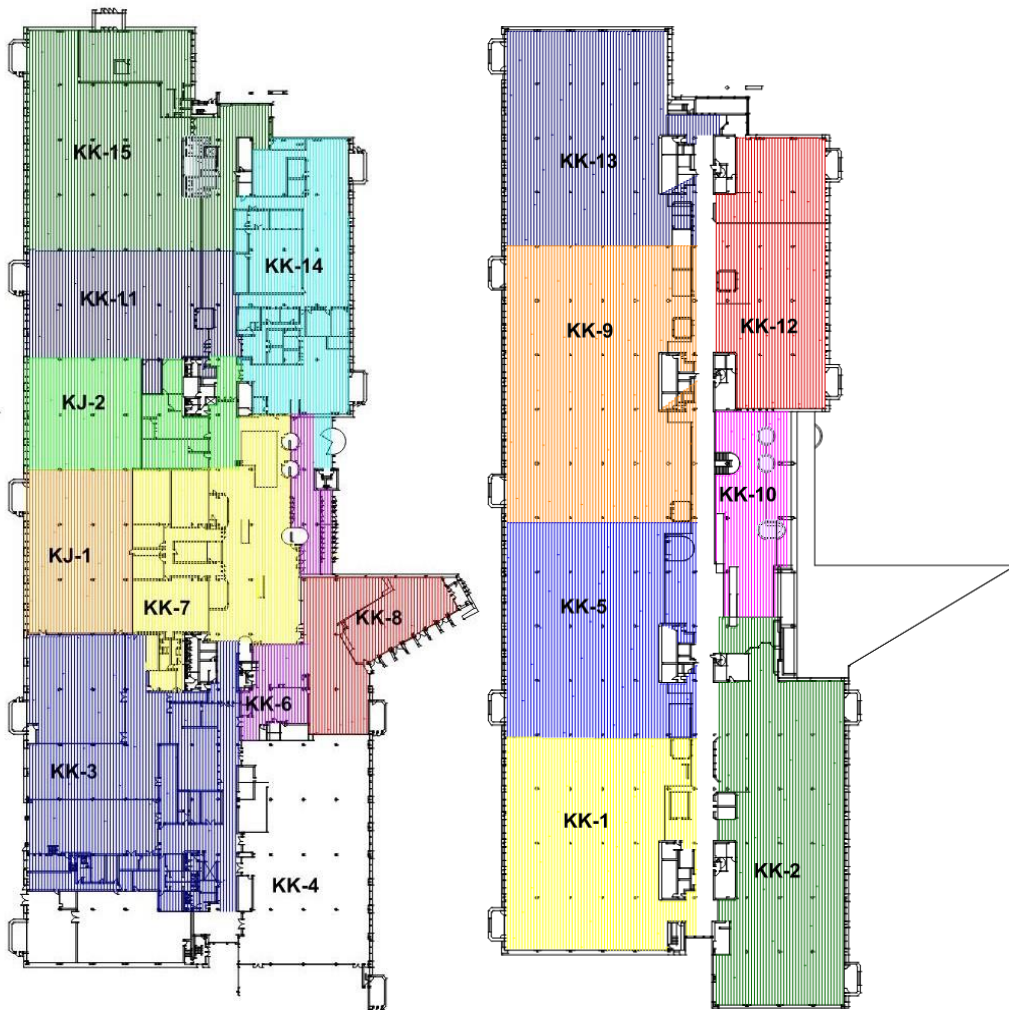
3.1.4 Вентилација и климатизација објекта

Централна припрема ваздуха се врши помоћу петнаест клима комора и две кровне јединице које опслужују различите зоне у објекту. Све клима коморе које су означене са КК-1 (или АНУ-1) до КК-15 имају идентичну конфигурацију, а разликују се само по капацитету. Свака клима комора има вентилатор разводног ваздуха са фреквентном регулацијом и вентилатор повратног ваздуха са фреквентном регулацијом. Мешање свежег и повратног ваздуха се регулише помоћу три спрегнуте регулационе клапне. Температура ваздуха се регулише преко топловодног грејача и преко хладњака са хладном водом. Осим тога клима коморе садрже још и парни овлаживач, филтер и различите сензоре. Парни овлаживачи раде на природни гас, али су поковарени и током 2018. године нису били у функцији.



Слика 3-4 Типична шема клима коморе за јединице КК-1 до КК-15

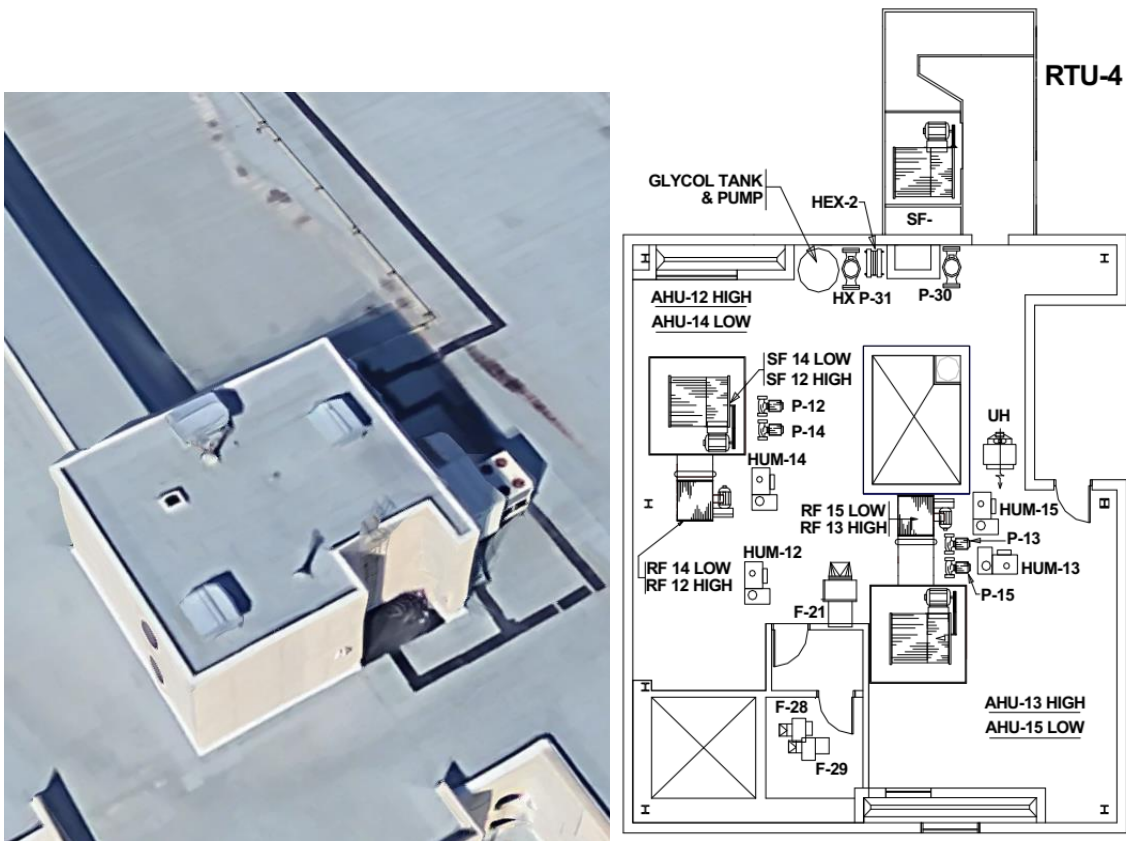
Ваздух се једноканалним системом разводи до зона које се опслужују. Свака зона има регулатор протока (Variable Air Volume Box – VAV кутија) повезан са зонским температурским сензором. Брзина (број обртаја) вентилатора разводног ваздуха клима коморе регулише се тако да се одржава константан надпритисак у главном каналу разводног ваздуха (250 Pa). Са друге стране брзина вентилатора повратног ваздуха се модулише тако да се у каналу повратног ваздуха одржава надпритисак од 25 Pa.



а) приземље

б) први спрат

Слика 3-5 – Просторни распоред група зона вентилационих које опслужују различити централни системи за вентилацију



Слика 3-6 Типичан изглед и конфигурација опреме у кровној машинској кућици/соби

Клима коморе су размештене у четири машинске кућице на крову. Локација сваке од клима комора приказана је у табелама испод.

Табела 3-3 Клима коморе у машинској кућици 1

Машинска кућица 1	
Ознака јединице	Простор који опслужује
КК-1	Северозапад другог спрата
КК-2	Југозапад другог спрата
КК-3	Северозапад првог спрата
КК-4	Југозапад првог спрата

Табела 3-4 Клима коморе у машинској кућици 2

Машинска кућица 2	
Ознака јединице	Простор који опслужује
КК-5	Централни део севера другог спрата
КК-6	Централни део првог спрата
КК-7	Централни део првог спрата
КК-8	Централни део југа првог спрата
КЈ-5 (КЈ-1)	Централни део севера првог спрата

Табела 3-5 Клима коморе у машинској кућици 3

Машинска кућица 3	
Ознака јединице	Простор који опслужује
КК-9	Централни део севера другог спрата
КК-10	Централни део југа другог спрата
КК-11	Централни део севера првог спрата
КЈ-6 (КЈ-2)	Централни део севера првог спрата

Табела 3-6 Клима коморе у машинској кућици 4

Машинска кућица 4	
Ознака јединице	Простор који опслужује
КК-12	Југоисток другог спрата
КК-13	Североисток другог спрата
КК-14	Исток првог спрата
КК-15	Приземље, исток

Све клима коморе су инсталиране 1996. Према индустријским стандардима, оне су прекорачиле свој очекивани радни век⁷.

Кровне јединице КЈ-1 и КЈ-2 су компактне јединице са вентилатором разводног и повратног ваздуха, индиректним гасним грејачем и хладњакком који ради по принципу директне експанзије. Ове кровне јединице су инсталиране 2002. и тренутно су у последњем кварталу теоријског радног века.

Вентилатори отпадног ваздуха су такође груписани у четири кровне машинске кућице. Њихова тачна локација и зоне које опслужују, дефинисани су у табелама испод.

Табела 3-7 Вентилатори отпадног ваздуха у машинским кућицама

Машинска кућица 1

Ознака	Зона коју опслужује	Коментар
ВОВ-18	Тоалети	
ВОВ-22	Пристаниште за камионе	
ВОВ-23	Електро соба	Није у функцији
ВОВ-24	Електро соба	Није у функцији
ВОВ-30	Тамна соба	Није у функцији
ВОВ-33	Електро соба	Није у функцији

Машинска кућица 2

Ознака	Зона коју опслужује	Коментар
ВОВ-16	Кухиња	Није у функцији
ВОВ-17	Кухиња	Није у функцији
ВОВ-19	Тоалет	
ВОВ-25	Електро соба	
ВОВ-31	Соба за састанке	
ВОВ-34	Соба са сечење папира	Није у функцији
ВОВ-35	Соба за отпад	Није у функцији

⁷ ASHRAE Equipment Life Expectancy chart

Машинска кућица 3

Ознака	Зона коју опслужује	Коментар
ВОВ-20	Тоалет	
ВОВ-26	Електро соба	Није у функцији
ВОВ-27	Електро соба	
ВОВ-32	Соба за састанке	

Машинска кућица 4

Ознака	Зона коју опслужује	Коментар
ВОВ-21	Тоалет	
ВОВ-28	Електро соба	Није у функцији
ВОВ-29	Електро соба	Није у функцији

Вентилатори отпадног ваздуха су инсталирани 1979. и прекорачили су типично предвиђени животни век. Многи од вентилатора отпадног ваздуха више нису у функцији, што је показао последњи извештај тестирања и балансирања.

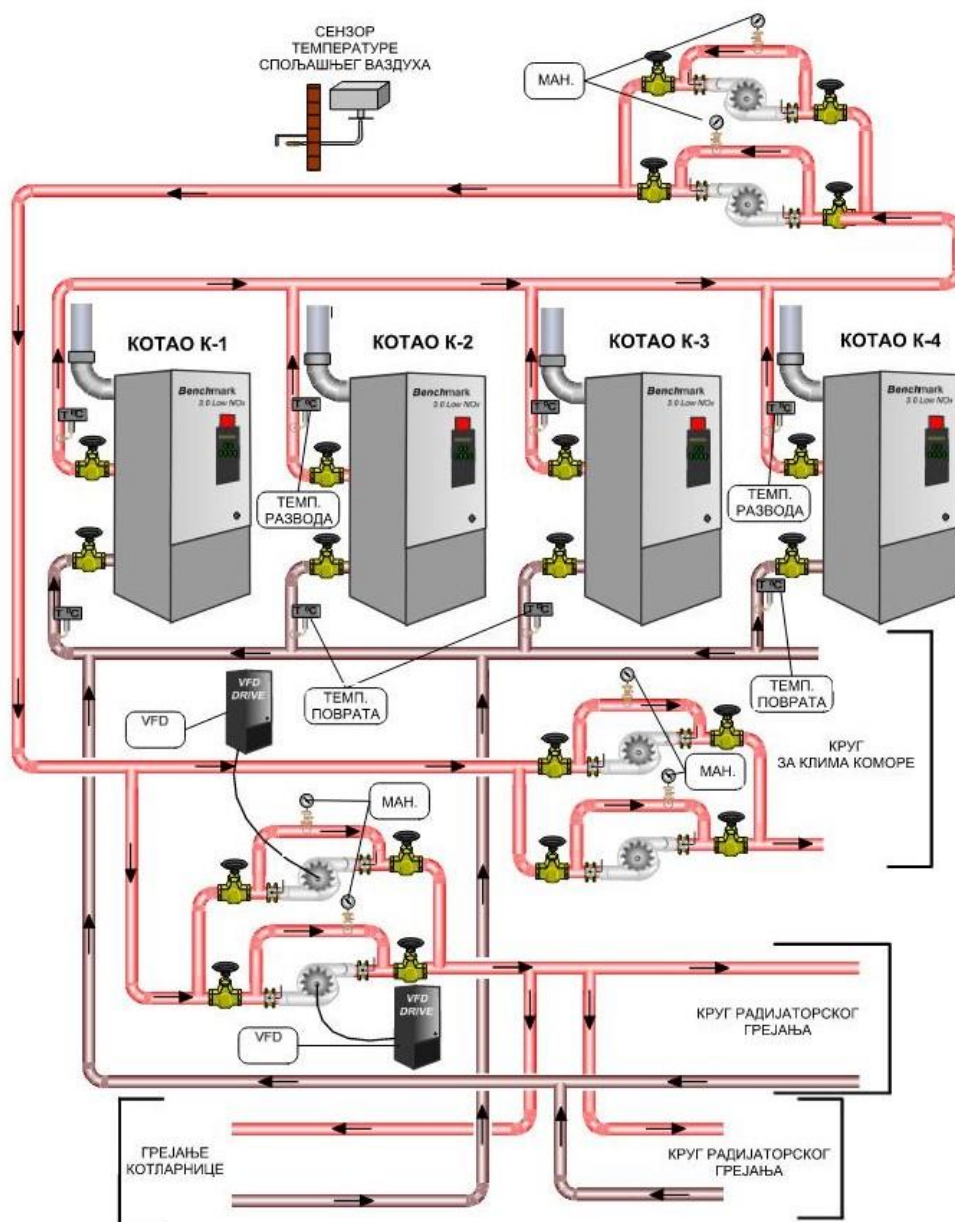
3.1.5 Топловодно грејање

Објекат се греје помоћу четири кондензациона котла на природни гас (Aerco Benchmark 3.0 Low Nox) који су инсталирани 2010. године. Смештени су у котларници у приземљу. Мрежа топоводног грејања се састоји примарног и два секундарна круга.

Примарни круг чине поменута четири котла (К-1, 2, 3 и 4) и две паралелно везане циркулационе пумпе (П-1 и П-2), које раде наизменично као радна и резервна.

Један секундарни круг, помоћу пумпи П-3 и П-4 (смењују се у режиму радна и резервна) снабдева конвекторе смештене уз спољашње зидове канцеларија, калорифере на улазима и степеништима и догрејаче ваздуха смештене у неким од VAV кутија на другом спрату. Температура у овом секундарном кругу се регулише према температури спољашњег ваздуха, помоћу трокраког мешног вентила.

Други секундарни круг помоћу пумпи П-32 и П-33 разводи топлу воду до плочастих размењивача у машинским кућицама на крову, где се топлота предаје круговима који снабдевају грејаче у клима коморама, а раде са мешавином вода-пропилен гликол (35%).



Слика 3-7 Шема котловског постројења за топоводно грејање

3.1.6 Припрема санитарне топле воде

Санитарна топла вода се загрева помоћу два котла на природни гас, сваки капацитета од по 275 kW, два резервоара топле воде са циркулационим пумпама. Систем испоручује топлу воду температура 49°C до slavina у тоалетима и кухињи. Грејачи за санитарну топлу воду су инсталирани 2002, а резервоари су инсталирани 1998.

3.1.7 Хлађење

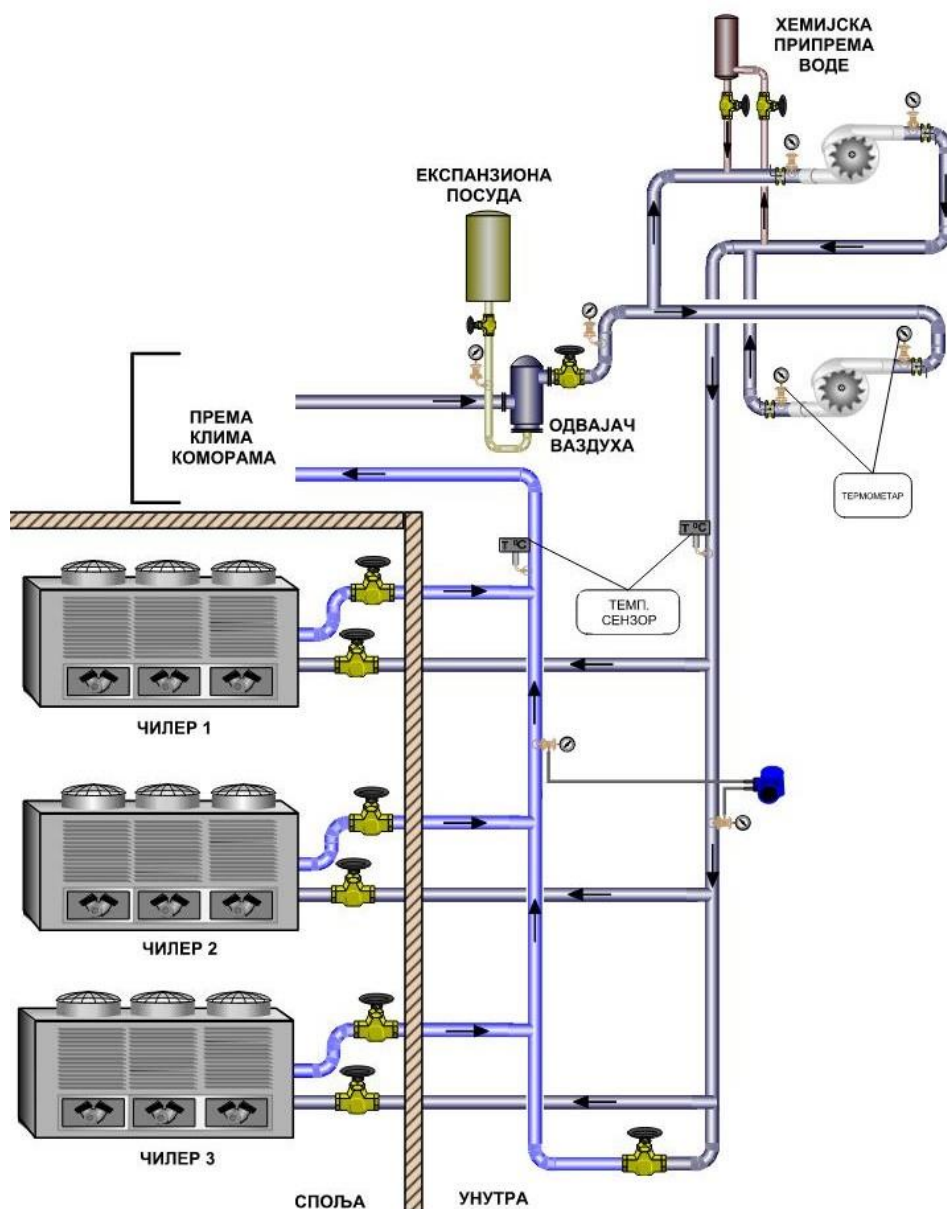
Највећи део објекта, укључујући канцеларијски простор и кафетерију, хлади се преко клима комора односно кровних јединица, које уједно служе и за вентилацију. У свих петнаест клима комора хлађење се обезбеђује помоћу хладне воде која се допрема из три ваздушно хлађена чилера (McQuay AG5250A37-ER1010), сваки са по 960 kW расхладне снаге. Две кровне јединице (KJ-1 и KJ-2) имају размењиваче са директном експанзијом (сваки по 275 kW расхладне снаге). Штампарија и серверска соба се хладе помоћу сопствених сплит система.

Чилерско постројење

Чилерско постројење се састоји од следеће опреме

- Три ваздушно хлађена чилера са вијчаним компресора, сваки капацитета од по 960 kW. Чилери раде са расхладним флуидом R-134A
- Пумпе за хладну воду ХП-1 и ХП-2, које обезбеђују циркулацију воде од чилера до размењивача у клима коморама

Постојећи чилери су инсталирани 2002. и смештени су напољу, са западне стране објекта, непосредно поред машинске собе. Пумпе су инсталиране 1995. и налазе се унутар машинске собе.



Слика 3-8 Шема чилерског постројења

Додатна опрема за хлађење

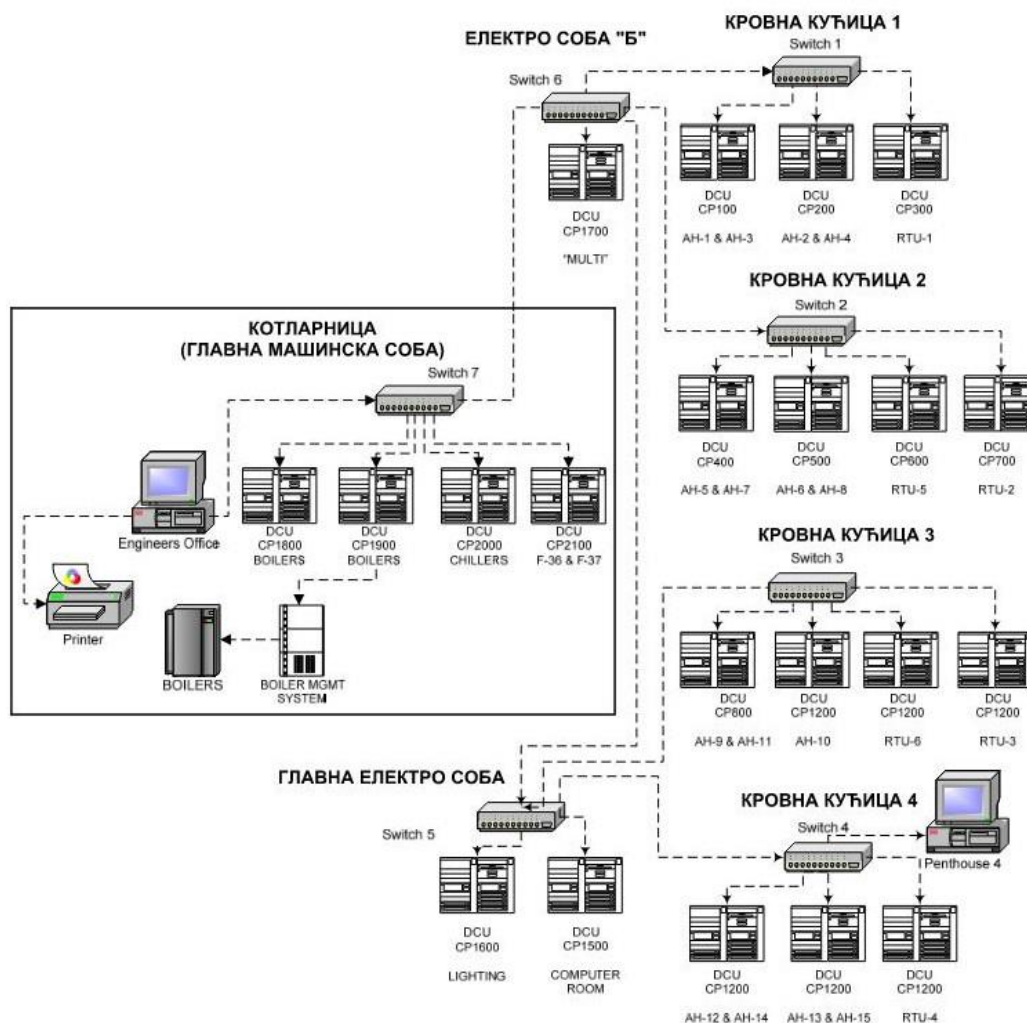
Четири велика сплит система су инсталирана за хлађење просторија посебне намене, према табели испод:

Табела 3-8 Додатна опрема за климатизацију

Ознака	Простор који се хлади	Капацитет
АС-1/СU-1	Соба за сервере	18 kW
АС-2/СU-2	Соба за сервере	18 kW
АС-3/СU-3	Соба за штампу	70 kW
АС-4/СU-4	Соба за штампу	70 kW

3.1.8 Централни систем за надзор и управљање

Контрола и надзор рада термотехничких система у објекту се обавља помоћу централног система за надзор и управљање (ЦСНУ). Систем се састоје од централног рачунара, 21 контролера (DCU - Direct Control Units) и различитих сензора у згради, укључујући сензоре за температуру, релативну влажност ваздуха, и притисак. Преко ЦСНУ се дефинише време рада одређених система и компоненти, жељене вредности температура и влажности ваздуха различитих термичких зона, радни температурски режими котлова и чилера, а врши се и надзор рада свих поменутих компоненти. Архитектура ЦСНУ је приказана на слици испод.



Слика 3-9 – Архитектура централног система за надзор и управљање (ЦСНУ)

3.1.9 Расвета

Расвета објекта укључује систем унутрашње расвете и систем спољне расвете. Унутрашња расвета се готово искључиво састоји од Т8 флуоресцентних сијалица од по 32 W, какве су инсталиране 1978. током изградње објекта. На основу броја и типа сијалица, процењено је да тренутна снага инсталиране унутрашње расвете износи 21 W/m^2 , изузев у ходницима, где износи 15 W/m^2 . Контрола унутрашњег осветљења дефинише 23 зоне са on/off прекидачима који се налазе у канцеларији обезбеђења на првом спрату. Светло се пали и гаси ручно и централно. Најчешће се пали ујутру у 6:30, а гаси увече у 18:30, изузев током сезона интензивне обраде пореске документације током које објекат ради 24 часа дневно.

3.2 Анализа потрошње енергије према измереним подацима

Прелиминарна анализа енергетских перформанси, према подацима о потрошњи енергије, која претходи изради калибрисаног модела, потребна је да би се:

1. Дефинисала базна / референтна година
2. Разумела природа потрошње енергије у објекту
3. Дала потпора процесу калибрације који је аналитички и нумерички поступак итеративног типа. Постоји велики број параметара који могу да се калибришу, а само правилно разумевање природе потрошње енергије даје основ да се правилно одабере који се параметри калибришу и у којим границама, а да би се калибрација обавила у што мањем броју итерација.

Да би била могућа калибрација енергетског модела зграде, неопходно је дефинисати референтну потрошњу на основу измерених података. Током испитивања објекта, прикупљена су сва мерења везана за рачуне за енергију, али и обављена мерења часовне потрошње електричне енергије и мониторинг услова угодности у просторима који се климатизују, као и параметара рада КГХ система. Дакле, основни подаци везани за потрошњу енергије су:

1. Укупни месечни рачуни
 - a. Струја
 - b. Гас
 - c. Вода
2. Часовне вредности потрошње енергије

3.2.1 Укупна месечна потрошња енергије

Табела 3-9 и Табела 3-10 приказују резултате анализе укупне месечне потрошње електричне енергије и природног гаса, везаних трошкова и емисије гасова стаклене баште према рачунима.

Дакле, на потрошњу енергије објекта утиче његова локација, архитектонске и грађевинске карактеристике, конфигурација, ефикасност и начин рада машинских и електричних система, али и читав низ независно променљивих параметара, од којих су најзначајнији број корисника у објекту и метеоролошки услови. Укупна месечна потрошња енергије и број степен дана омогућавају грубу али веома ефективну анализу зависности потрошње енергије објекта од метеоролошких услова.

Степен дани су значајан метрички параметар у енергетској анализи. Чак и у подручјима са умереном климом, промене у топлотном и расхладном оптерећењу узроковане метеоролошким условима представљају 50% до 70% варијације потрошње током типичне године. Другим речима, без обзира на све друго што се дешава у згради или непосредној околини, промене у метеоролошким условима су у највећој мери одговорне за флукуације у потрошњи енергије

које опажамо током дана, недеље, месеца, или године. Постоје две врсте степен дана, степен дани грејања (СДГ) и степен дани хлађења (СДХ).

Потрошња енергије у згради може да се подели на два дела, базну потрошњу и варијабилну потрошњу. Базна потрошња се односи на оне сервисе и системе који се константно користе попут дела расвете који непрекидно ради, система за безбедност, расхладних уређаја, сервера, итд. Варијабилна потрошња је онај део потрошње на који утичу варијабилне независно променљиве, попут броја корисника у објекту (нпр. број гостију у ресторану), интензитета производње и пре свега метеоролошки услови.

Однос базне и варијабилне потрошње у великој мери зависи од типа објекта. Примера ради, и до 98% потрошње енергије у рачунарском центру може да представља базну потрошњу, док у нпр. малопродајном објекту, базна потрошња чини мали део укупне потрошње, а највећи део потрошње зависи од фактора као што су број потрошача у објекту и температура спољашњег ваздуха.

Линеарна регресија је једноставан, али значајан аналитички алат за разумевање везе између степен дана и потрошње енергије, односно утицаја променљивих метеоролошких услова на потрошњу енергије. Применом линеарне регресије на анализу зависности потрошње од броја степен дана могуће је дефинисати три важна параметра везана за потрошњу енергије у објекту.

Тачка пресека је место где линија линеарне регресије пресеца у-осу. У контексту енергетске ефикасности у зградама, то дефинише базну потрошњу, тј. потрошњу која је независна од метеоролошких услова. Уколико је базна потрошња анализираног објекта значајно виша од очекиване (нпр. у поређењу са постојећим портфолиом еквивалентних објеката) то може да значи да контрола система за грејање и хлађење није добра, да они константно раде и да њихов рад улази у базну потрошњу.

R² вредност објашњава значај корелације између две променљиве (степен дани и потрошња енергије). Што је ова вредност већа, то значи да се већи део варијабилне потрошње може објаснити променама у метеоролошким условима. Савршена корелација је представљена бројем 1 и то значи да варијабилна потрошња зависи једино од температуре спољашњег ваздуха. Снажна корелација није увек добра ствар, нпр. када у канцеларијској згради, са израженом варијацијом у броју запослених у току дана, рад система за грејање и хлађење зависи само од спољашње температуре без обзира на број људи у објекту.

Нагиб криве линеарне регресије је индикатор тога какав је одзив енергетског понашања зграде на промену у броју степен дана, тј. на промену спољашње температуре. Што је нагиб већи, то је одзив израженији. Овај параметар може да открије доста тога о згради. Анализа зашто неке на изглед сличне зграде имају различит нагиб криве може да открије могућности за уштеду енергије.

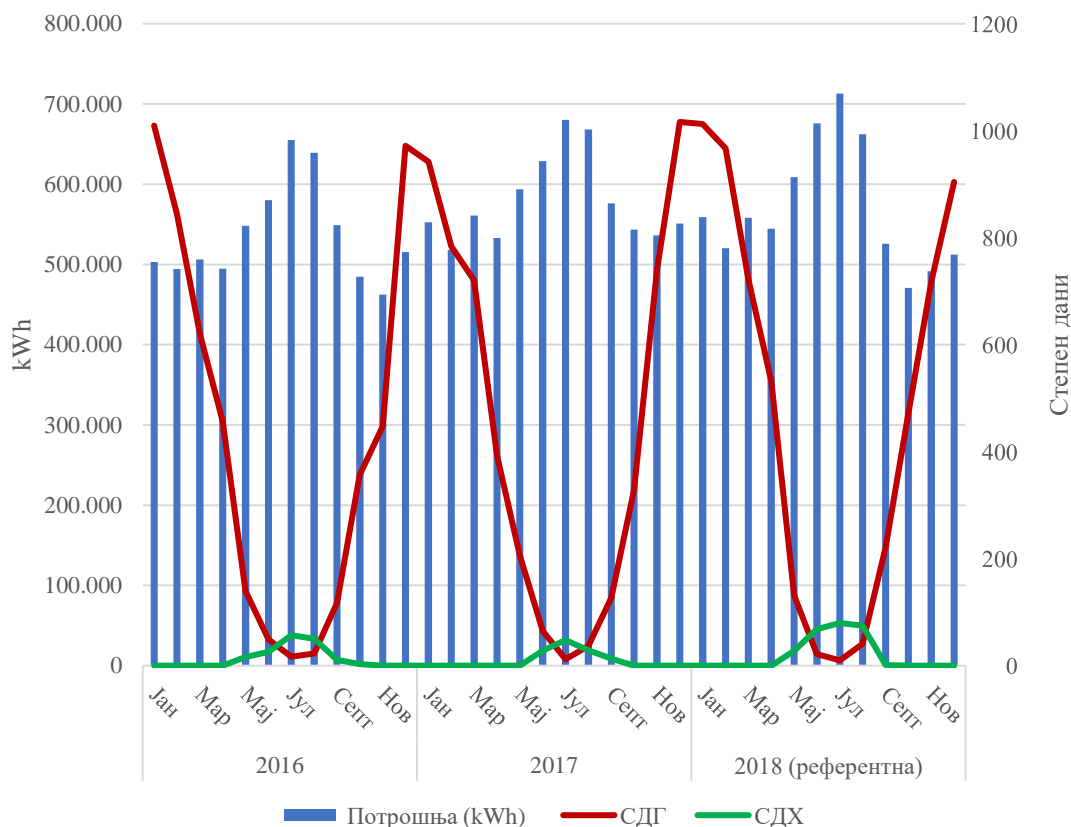
Само подаци о потрошњи енергије не дају довољно информација да би се донеле одлуке у контексту енергетског менаџмента, неопходно је разумевање контекста. Степен дани пружају информацију о условима у којима објекат ради и помажу да се разуме промена у потрошњи енергије, уколико постоји.

Проблем са параметрима који утичу на потрошњу енергије у јавним, пословним, или комерцијалним објектима је то што их је у пракси јако тешко мерити. Постоје проблеми везани за поверљивост података, сами подаци могу бити непотпуни или њихова резолуција није довољно добра. Лош чешћи је случај да је потребна уградња додатних сензора и опреме за мерење, али су спрегнути трошкови сувише велики, тј. не могу се оправдати могућим уштедама. Управо ту се крије значај степен дана као независно променљиве величине која утиче на потрошњу енергије објекта. Могуће је готово бесплатно прикупити податке о степен данима годинама у назад, што није случај са осталим параметрима.

Управо због тога, почетни корак у анализи, пре сложене динамичке симулације енергетског понашања објекта, треба да буде анализа потрошње у зависности од броја степен дана.

Табела 3-9: Потрошња електричне енергије према рачунима

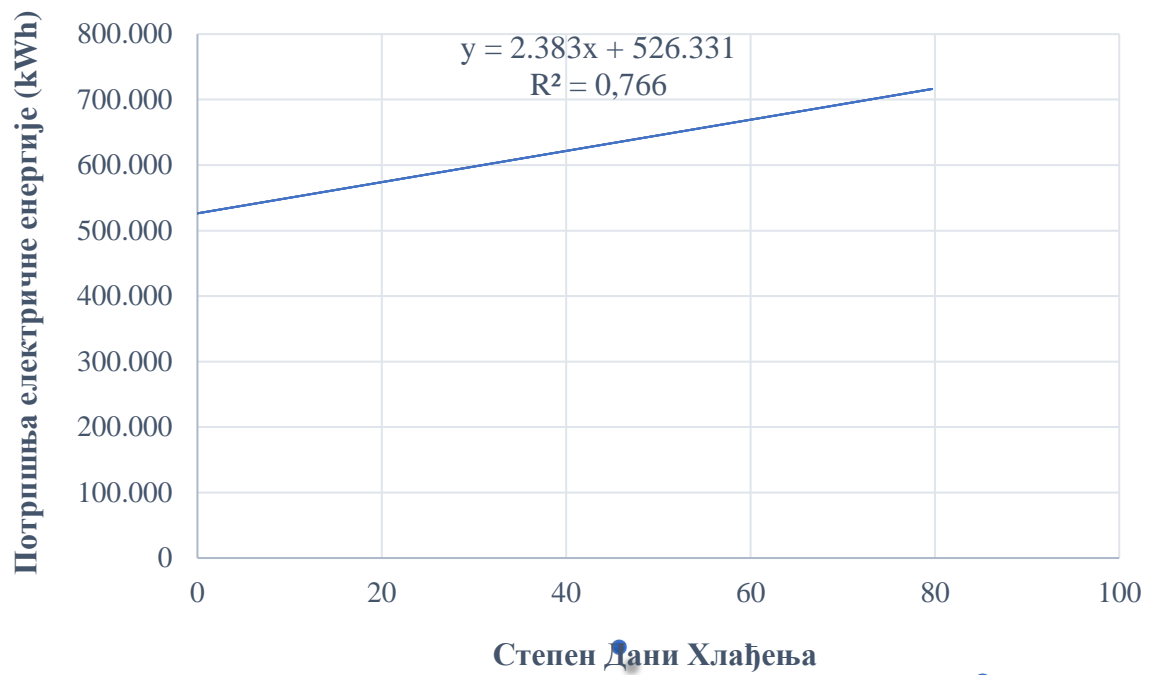
Година	Месец	СДХ	СДГ	Потрошња [kWh]	Трошак [\$]	CO _{2e} [t]
2016	Јан	0,00	1009,80	502.953	26.578,78	0,96
	Феб	0,00	844,30	494.178	25.577,58	0,94
	Мар	0,00	619,30	506.171	25.961,04	0,96
	Апр	0,00	456,60	494.859	27.430,54	0,94
	Мај	16,30	140,30	548.181	30.590,26	1,04
	Јун	26,00	49,20	579.927	32.198,01	1,10
	Јул	57,10	17,00	655.077	37.959,09	1,24
	Авг	50,30	22,60	639.190	36.493,55	1,21
	Септ	10,80	117,60	549.161	30.574,38	1,04
	Окт	2,80	356,70	484.658	27.234,50	0,92
	Нов	0,00	447,70	462.215	25.647,92	0,88
	Дец	0,00	972,00	515.484	27.202,58	0,98
	Тотал	163,30	5.053,10	6.432.053	353.448	12,22
2017	Јан	0,00	941,80	552.716	28.659,04	1,05
	Феб	0,00	783,90	518.095	26.992,60	0,98
	Мар	0,00	720,40	560.814	29.170,94	1,07
	Апр	0,00	392,40	532.826	28.530,27	1,01
	Мај	0,00	206,70	593.784	33.154,38	1,13
	Јун	28,20	64,60	628.857	34.275,85	1,19
	Јул	47,90	11,70	680.368	37.116,11	1,29
	Авг	28,50	36,80	668.426	38.124,21	1,27
	Септ	13,40	127,00	575.913	33.031,62	1,09
	Окт	0,00	328,50	543.266	31.412,90	1,03
	Нов	0,00	740,80	536.269	29.722,03	1,02
	Дец	0,00	1016,40	550.916	29.482,88	1,05
	Тотал	118,00	5.371,0	6.942.249	379.673	13,19
2018	Јан	0,00	1012,70	558.863	30.082,96	1,06
	Феб	0,00	967,30	520.078	28.159,12	0,99
	Мар	0,00	722,70	558.296	30.242,01	1,06
	Апр	0,00	530,60	544.564	30.340,49	1,03
	Мај	27,30	131,70	608.734	35.078,71	1,16
	Јун	68,20	21,30	675.703	39.212,16	1,28
	Јул	79,70	9,90	713.139	40.886,30	1,35
	Авг	74,80	40,50	662.471	38.851,46	1,26
	Септ	1,10	221,20	525.779	32.577,17	1,00
	Окт	0,00	471,50	470.940	28.331,52	0,89
	Нов	0,00	719,00	491.549	27.811,58	0,93
	Дец	0,00	904,10	512.227	28.810,63	0,97
	Тотал	251,10	5.752,5	6.842.344	\$390.384	13,00
Просек		177,50	5.392,2	6.738.882	\$374.502	12,80
Просечна цена kWh					\$0,06	
Просечна цена GJ					\$15,44	



Слика 3-10 Потрошња електричне енергије према рачунима у односу на степен дане

Слика 3-10 даје увид у зависност потрошње електричне енергије у односу на СДГ и СДХ. Са графика је очигледна зависност између пика потрошње електричне енергије и СДХ, док СДГ немају изражен утицај. То је прилично очекивано, с обзиром да систем за грејање ради на природни гас, док систем за хлађење ради на електричну енергију.

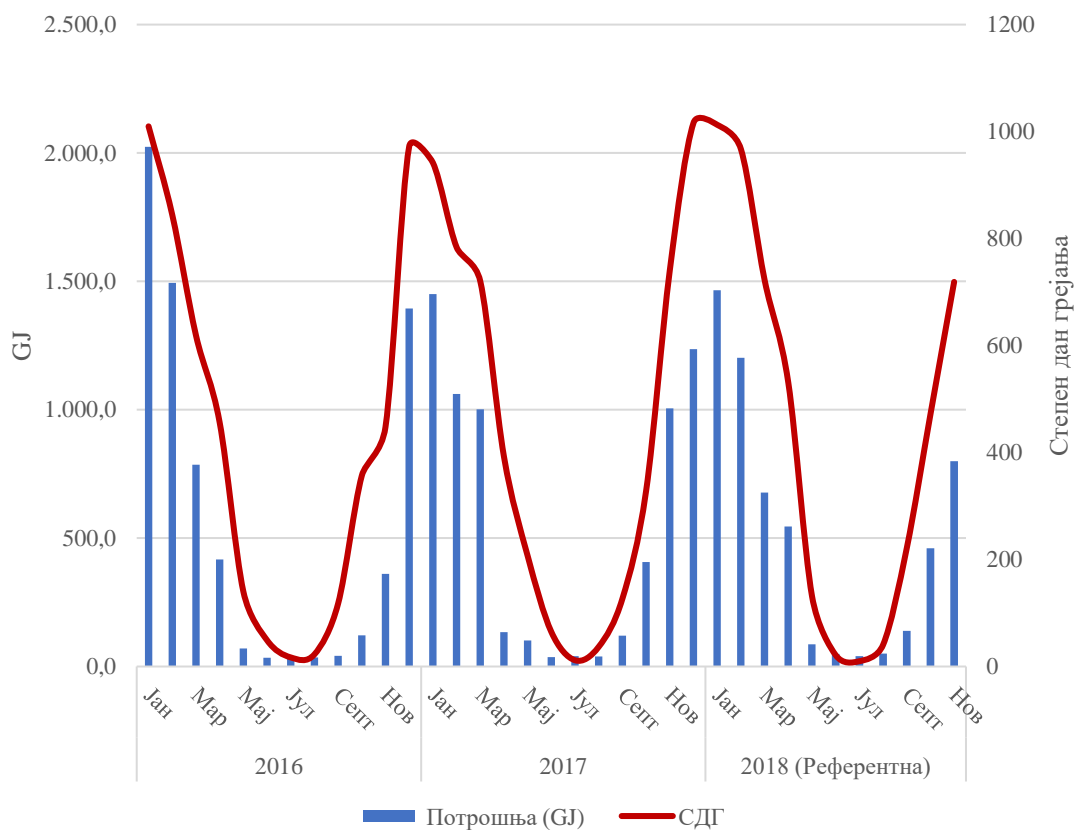
Даља анализа зависности потрошње електричне енергије и СДХ је могућа помоћу линеарне регресије. Слика 3-11 илуструје ову линеарну регресију. Према једначини која дефинише линеарну регресију, вредност R^2 указује да око 76% варијација у потрошњи електричне енергије током периода хлађења (тј. током периода када чилери раде) може да се објасни варијацијом температуре спољашњег ваздуха. Уз то, око 6.315.972 kWh годишње (526.331 kWh месечно), што је око 94% просечне годишње потрошње електричне енергије у посматраном периоду (2016.-2018.), представља базну потрошњу која не зависи од метеоролошких услова.



Слика 3-11 Линеарна регресија – потрошња електричне енергије према СДХ

Табела 3-10: Потрошња природног гаса према рачунима

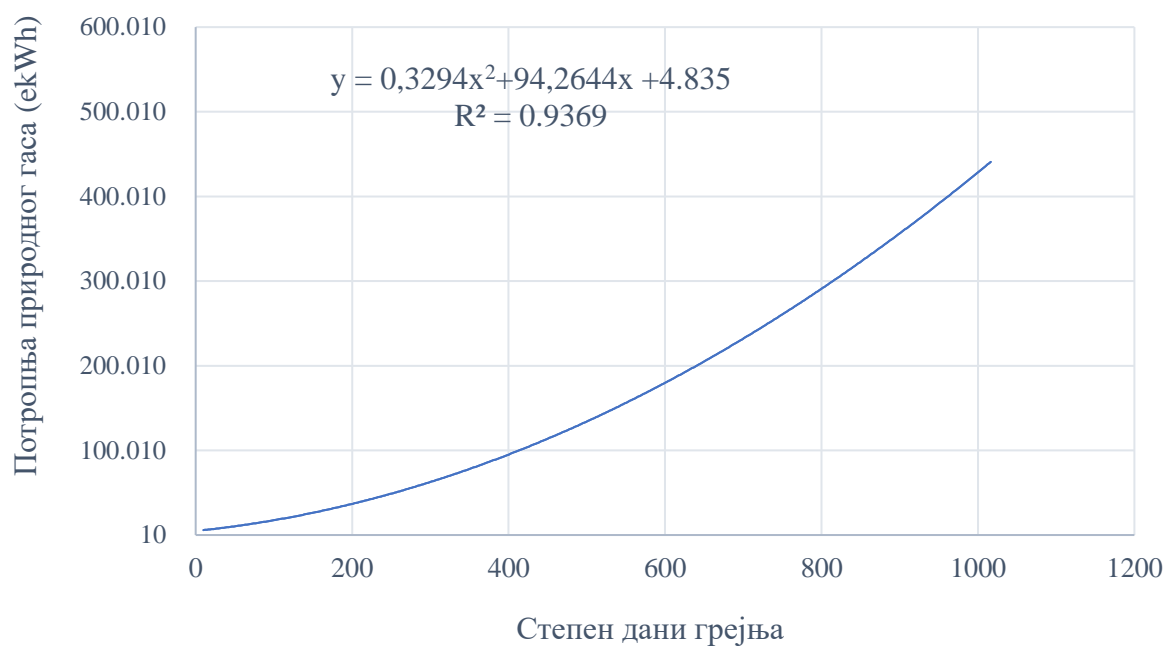
Година	Месец	СДГ	Потрошња [ekWh]	Потрошња [m3]	Трошак [\$]	CO2e [t]
2016	Јан	1009,8	562.080	54.249	12.153,35	102,86
	Феб	844,3	414.909	40.045	8.451,33	75,93
	Мар	619,3	218.217	21.061	4.447,56	39,93
	Апр	456,6	115.626	11.160	2.402,75	21,16
	Мај	140,3	19.463	1.878	463,67	3,56
	Јун	49,2	9.364	904	257,85	1,71
	Јул	17	9.892	955	280,20	1,81
	Авг	22,6	9.695	936	287,55	1,77
	Септ	117,6	11.693	1.129	327,36	2,14
	Окт	356,7	33.851	3.267	794,26	6,19
	Нов	447,7	100.296	9.680	1.909,72	18,35
	Дец	972	387.345	37.385	7.083,10	70,88
Total	5.053,1	1.892.433	182.648	38.858,71	346,30	
2017	Јан	941,8	403.068	38.902	7.420,90	73,76
	Феб	783,9	294.924	28.465	5.707,15	53,97
	Мар	720,4	278.145	26.845	5.419,78	50,90
	Апр	392,4	37.164	3.587	791,00	6,80
	Мај	206,7	28.284	2.730	595,17	5,18
	Јун	64,6	10.224	987	258,50	1,87
	Јул	11,7	11.376	1.098	284,18	2,08
	Авг	36,8	10.709	1.034	256,74	1,96
	Септ	127	33.277	3.212	646,87	6,09
	Окт	328,5	112.960	10.902	1.995,94	20,67
	Нов	740,8	279.336	26.960	4.766,50	51,12
	Дец	1016,4	343.184	33.122	5.826,36	62,80
Total	5.371,0	1.842.651,93	177.842,94	33.969,09	337,19	
2018	Јан	1012,7	406.945	39.276	6.863,75	74,47
	Феб	967,3	334.119	32.247	5.558,40	61,14
	Мар	722,7	188.200	18.164	3.164,67	34,44
	Апр	530,6	151.624	14.634	2.559,62	27,75
	Мај	131,7	24.054	2.322	479,69	4,40
	Јун	21,3	13.601	1.313	314,22	2,49
	Јул	9,9	11.330	1.094	272,19	2,07
	Авг	40,5	13.848	1.337	326,85	2,53
	Септ	221,2	38.674	3.733	784,96	7,08
	Окт	471,5	127.951	12.349	2.381,92	23,41
	Нов	719	222.017	21.428	3.878,53	40,63
	Дец	904,1	365.265	35.253	6.454,73	66,84
Total	4.848,4	1.897.628	183.149	33.039,54	347,25	
Просек	5.090,8	1.877.571	181.213	35.289,11	343,58	
Просечна цена m ³				0,19 \$/m ³		



Слика 3-12 Потрошња природног гаса према рачунима у односу на степен дане грејања

Природни гас у објекту се троши само на рад централног система за грејање и припрему санитарне топле воде. Како не постоји зависност у раду система за хлађење и потрошње природног гаса, ни статистичка анализа зависности потрошње природног гаса и степен дана хлађења нема смисла.

Слика 3-12 илуструје јасно изражену зависност потрошње природног гаса и метеоролошких услова током године, исказаних преко СДГ. Слика 3-13 приказује регресиону анализу, која омогућује дубље разумевање природе те зависности. Вредност R^2 показује да преко 90% варијација у потрошњи природног гаса може да се објасни метеоролошким условима. Преосталих око 10% потрошње везано је за припрему санитарне топле воде и остале факторе који утичу на потрошњу природног гаса.



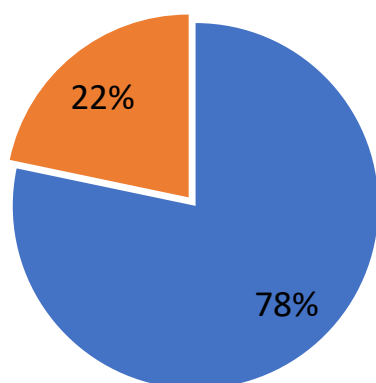
Слика 3-13 Линеарна регресија – потрошња природног гаса према СДГ

Табела 3-11 Потрошња електричне енергије и природног гаса током референтне (2018.) године

Електрична енергија			Природни гас			
Потрошња [kWh]	Цена [\$]	Емисија [t CO ₂ e]	Потрошња [m ³]	Потрошња ekWh	Цена [\$]	Емисија [CO ₂ e]
6.842.344	390.384	13,00	183.149	1.897.628	33.040	347,25

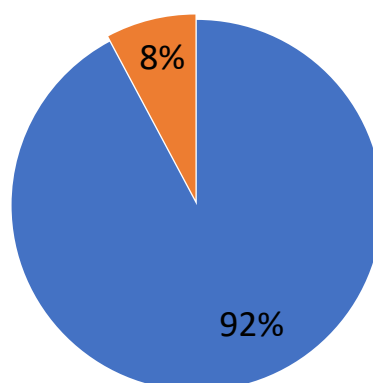
Годишња потрошња енергије, kWh

- Годишња потрошња електричне енергије, kWh
- Годишња потрошња природног гаса, ekWh



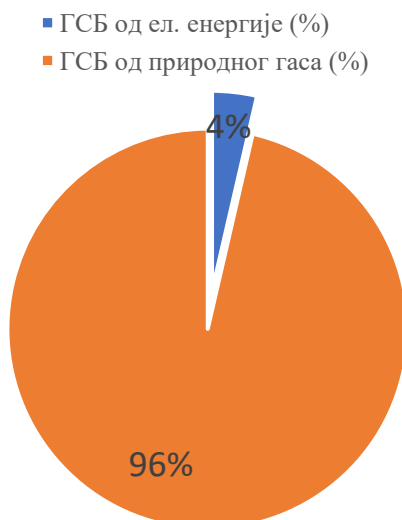
Годишњи трошкови за енергију, \$

- Годишњи трошкови за електричну енергију, \$
- Годишњи трошкови за природни гас, \$



Слика 3-14 Потрошња енергије и трошкови за енергију према енергентима током референтне године

ГСБ према енергенту, %



Слика 3-15 Емисија гасова стаклене баште према енергенту током референтне године

Табела 3-12 показује поређење интензитета потрошње енергије анализираног објекта, у односу на постојећи портфолио зграда сличних карактеристика, тј. намене, величине и климатске области. Са укупним интензитетом потрошње од 275.625 екW/h, према просечном интензитету за зграде из портфолија од 277.778 екW/h, анализирана зграда се може сматрати просечном.

Емисија гасова стаклене услед од потрошње електричне енергије зависи од енергената од којих се електрична енергија производи. Слично је и са природним гасом чији састав није увек идентичан. Табела 3-13 и Табела 3-14 приказују факторе емисије гасова стаклене баште за природни гас и електричну енергију. Провинција Манитоба у којој се налази анализирани објекат има изразито низак фактор емисије ГСБ за електричну енергију, која се махом производи у нуклеарним електранама и хидро централама.

Вреди напоменути да би у Републици Србији природа ових резултата била другачија, јер се електрична енергија у великој мери производи из термоелектрана на лигнит са високим фактором емисије (око 750 g/kWh) [90], тако да је емисија ГСБ услед производње електричне енергије изразито висока.

Табела 3-12 Бенчмаркинг енергетских перформанси према портфолију постојећих зграда

Бруто површина објекта		Електрична енергија	Природни гас	Електрична енергија и природни гас	Просечни интензитет потрошње енергије објеката сличне величине у истој регији*	Просечни интензитет потрошње енергије за објекте исте намене и климатске зоне**
[ft ²]	[m ²]					
341.323	31.710					
m ³ /m ²			5.776			
kWh/m ²		215.779				
GJ/m ²		0.777	0.215	0.992	1.000	1.430
ekWh/m ²		215.779	59.843	275.625	277.778	397.223
*Просечан интензитет потрошње енергије за зграде Преријске регије у Канади које имају површину већу од 200.000 ft ² према испитивању публикованом као „NRCan-a Commercial and Institutional Energy Use - Buildings 2009“, Таблела F.1						
**Просечан интензитет потрошње енергије за канцеларијске зграде (које нису здравствене установе) у климатским зонама категорисаним под „друго“, у оквиру истраживања публикованог као „NRCan-a Commercial and Institutional Energy Use - Buildings 2009“, Таблела 2.4						

Табела 3-13 Фактори емисије стаклене баште за природни гас, према локацији

Гориво	Јед.	Фактори емисије гасова стаклене баште g/јединици			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ еквивалент
Природни гас (Канада)	m ³	1.886	0,037	0,035	1.907
Алберта	m ³	1.928	0,037	0,035	1.938
Манитоба	m³	1.886	0,037	0,035	1.896
Северозападне територије	m ³	1.901	0,037	0,035	1.911
Саскачеван	m ³	1.829	0,037	0,035	1.839
Уље за ложење	L	2.753	0,026	0,031	2.762
Пропан	L	1.515	0,024	0,108	1.544
Биомаса	[-]				0

Табела 3-14 Фактори емисије гасова стаклене баште за електричну енергију према локацији⁸

Област	Фактор емисије гасова стаклене баште за електричну енергију g CO ₂ e/kWh ³			
	2017	2018*	2019*	2020*
Алберта	760	760	760	760
Манитоба	1,9	1,9	1,9	1,9
Северозападне територије	200	200	200	200
Саскачеван	660	660	660	660
*Вредности за 2018., 2019. и 2020. су претпостављене на основу извештаја за 2017.				

3.2.2 Потрошња електричне енергије према часовним вредностима

Потрошња природног гаса је по правилу везана искључиво за загревање простора и/или припрему санитарне топле воде. На основу познавања та два система, укључујући конфигурацију и ефикасност система, режиме рада и време рада, калибрација на основу месечне потрошње гаса је релативно једноставан процес без много степени слободе.

Са друге стране, потрошачи електричне енергије су бројни, укључујући различиту КГХ опрему, унутрашњу расвету, лифтове, све уређаје који се повезују на зидне утичнице итд. и често не постоји довољно знања о томе у којим периодима се одређени потрошачи користе и у којој мери. Часовна потрошња електричне енергије у зградама које нису индустријске је практично стохастичка и у великој мери зависи од понашања корисника, које није предвидиво. Међутим, ако постоји релативно велики број корисника и подаци о измереној часовној потрошњи електричне енергије за дужи период, статистичком анализом је могуће одредити типичну потрошњу електричне енергије у различитим периодима. Ово је од изузетног значаја за правилну калибрацију модела.

Табела 3-15 приказује мапу часовне потрошње електричне енергије по данима у недељи током референтне године (2018.). Ова мапа демонстрира просечан профил потрошње електричне енергије и даје увид у то када се електрична енергија користи у згради.

⁸ National Inventory Report 1990–2017: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada

Табела 3-15 – Мапа средњих часовних вредности ангажоване електричне снаге [kW] 2018.

	НЕД	ПОН	УТО	СРЕ	ЧЕТ	ПЕТ	СУБ	Просек
Поноћ	536	531	588	607	594	611	630	585
1:00 AM	525	530	541	559	539	547	558	543
2:00 AM	516	527	539	550	532	540	537	534
3:00 AM	511	589	620	624	611	617	535	587
4:00 AM	507	692	727	727	724	724	542	663
5:00 AM	505	815	853	855	864	853	631	768
6:00 AM	506	887	932	930	943	917	724	834
7:00 AM	504	917	970	973	987	955	715	860
8:00 AM	509	930	984	988	996	971	724	872
9:00 AM	516	943	1.003	1.001	1.017	989	727	885
10:00 AM	518	949	1.015	1.009	1.027	991	730	891
11:00 AM	529	958	1.027	1.027	1.039	1000	743	903
Подне	520	952	1.028	1.022	1.042	990	741	899
1:00 PM	518	952	1.035	1.030	1.042	991	739	901
2:00 PM	519	937	1.022	1.010	1.008	964	730	884
3:00 PM	515	914	999	986	997	946	653	859
4:00 PM	517	884	957	948	958	920	633	831
5:00 PM	517	864	934	923	931	904	617	813
6:00 PM	513	850	920	908	917	897	605	802
7:00 PM	510	847	918	903	913	891	579	795
8:00 PM	514	841	911	895	906	885	563	788
9:00 PM	523	832	897	885	896	875	549	779
10:00 PM	550	804	868	856	868	846	541	762
11:00 PM	538	684	732	726	735	722	539	668
Просек	518	818	876	873	879	856	637	

Легенда:



3.3 Физичко-математички модел објекта

На основу информација о објекту и енергентима, скупљених кроз анализу техничке документације, испитивања објекта, мерења потрошње енергије и параметара рада система, који су представљени у поглављима 3.1 и 3.2 и у прилогу дисертације, формиран је физичко-математички модел објекта. Као алат за моделовање коришћен је софтверски пакет IES VE [74]. Модел садржи детаљне податке о локацији, архитектури, грађевинској физици, термотехничким системима, електричним системима и начину коришћења објекта.

Динамички модели термичког понашања објекта, до сада су се показали посебно корисним у фази планирања и пројектовања нових зграда или енергетских санација постојећих зграда, јер омогућавају детаљну анализу „шта-ако“ сценарија, а што у теорији омогућује налажење оптималног решења за стратегију и пројекте.

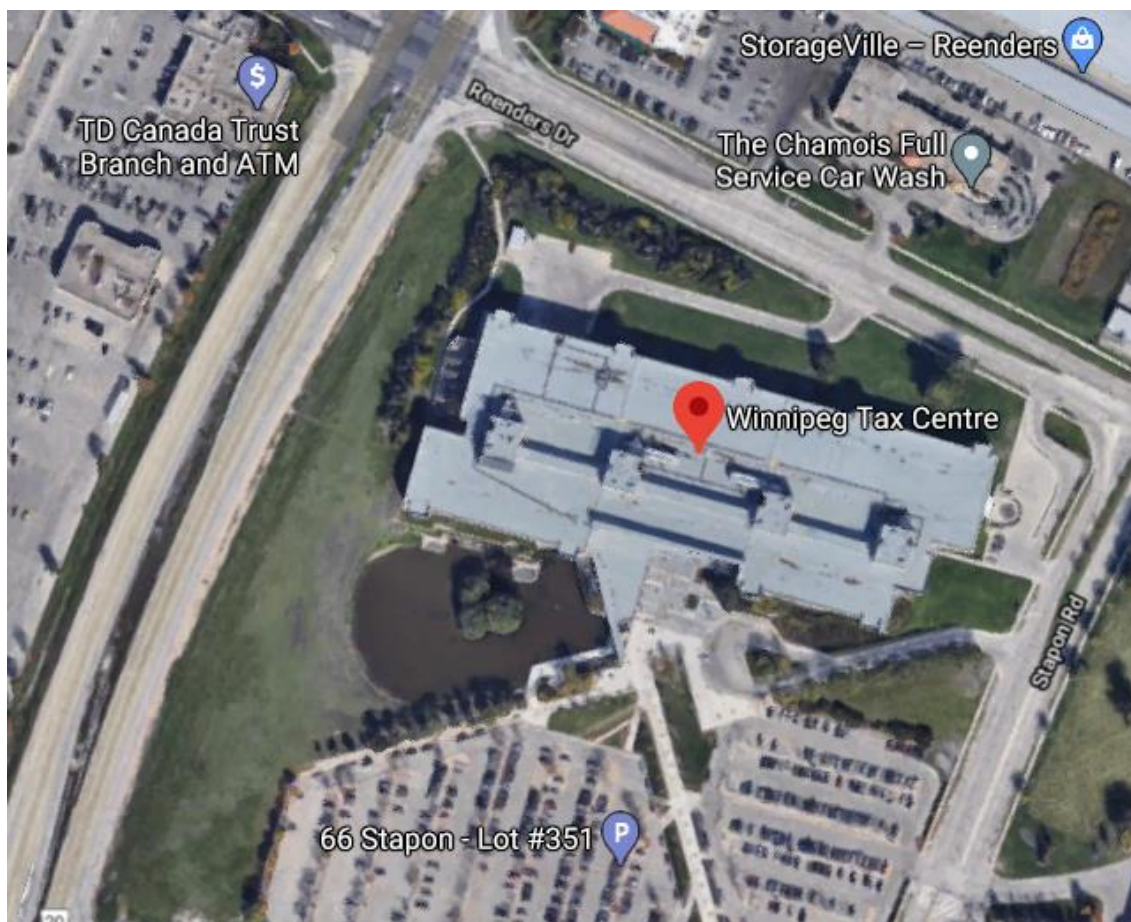
Са друге стране, постоје разлике између предвиђених (очекиваних) и реално остварених енергетских перформанси објекта. То је тзв. раскорак у перформансама (performance gap), који је важан предмет истраживања [91,92]. Постоје различити разлози за „раскорак у перформансама“, али могу бити подељени у три основне категорије: (1) колико детаљно физичке карактеристике зграде могу да буду представљене у моделу; (2) колико су прецизни улазни подаци за моделовање; (3) колике су разлике између стандардизованих метеоролошких података коришћених за динамичку симулацију и стварних метеоролошких услова у периоду коришћења објекта. Екзактно приказивање термо-физичких карактеристика објекта у моделу је практично немогуће, зато сви модели морају да користе одређене претпоставке и упрошћења.

Није реално тежити потпуном елиминисању раскорака перформанси, али минимизација раскорака коришћењем софистициранијих физичких модела и прецизнијих претпоставки при моделовању зграде је веома важна да би се добили резултати модела који су довољно информативни за процес планирања и пројектовања нових зграда или енергетске санације постојећих [83].

Због тога физичко-математички модел објекта укључује детаљну дефиницију статичких и динамичких параметара, од геометрије и грађевинске физике, капацитета машинске опреме, до информација о броју корисника у времену и начина коришћења објекта.

3.3.1 Локација и метеоролошки услови

Локација објекта се дефинише преко географских координата, а битна је за прорачун соларних координата, односно дозрачене соларне енергије. Важни елементи локације су и околни рељеф и суседни објекти, који могу да имају утицај на засенченост објекта. Уколико такви објекти постоје и они треба да буду део геометрије модела.

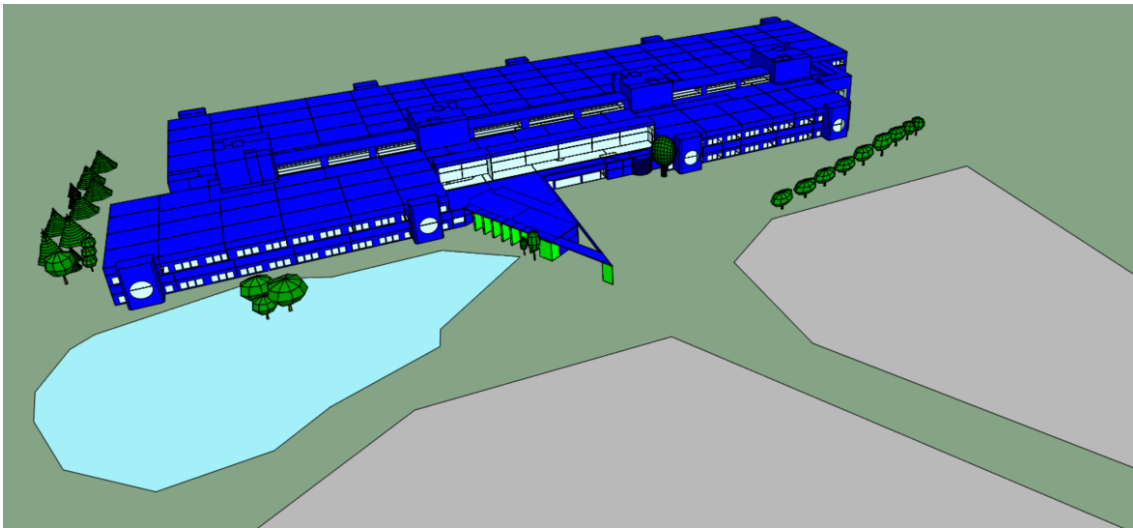


Слика 3-16 Географска локација зграде Пореске управе у Винипегу (49.901330288269406, -97.06479502646172)

Климатски услови имају изражен утицај на енергетске перформансе објекта, зато је важно користити метеоролошке податке за тачну локацију на којој се налази анализирани објекат. За динамичку симулацију неопходна је „метеоролошка датотека“ (weather file). Ове датотеке садрже часовне податке на нивоу календарске године о променљивим величинама које дефинишу климатске услове, попут температуре сувог термометра, температуре влажног термометра, облачности итд.

3.3.2 Геометрија објекта и грађевинске конструкције

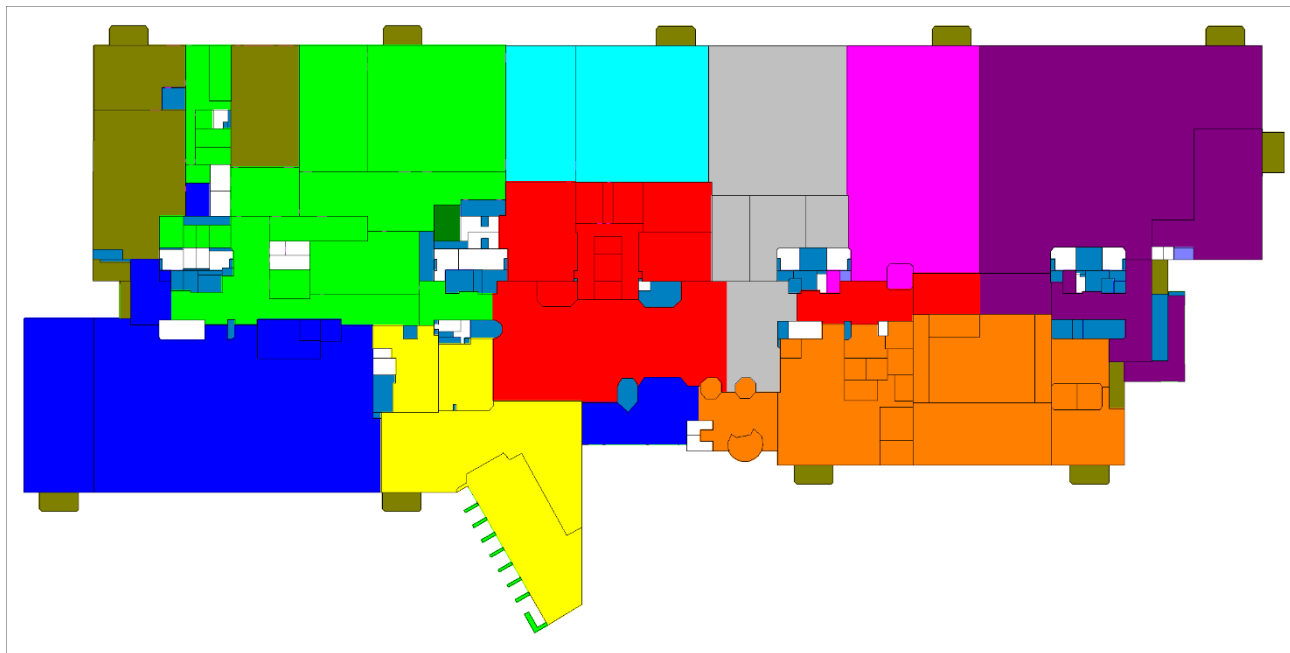
Модел укључује 3Д геометрију објекта са непосредном околином. Све унутрашње просторије објекта у моделу су репрезентоване према својој стварној геометрији и намени. То укључује информације о облику просторије, површинама подова, зидова, плафона и транспарентних позиција. Дефиниција намене просторије подразумева информације о броју корисника простора током времена, захтеваним термичким условима угодности (температура и релативна влажност), начину рада расвете итд.



Слика 3-17 – Приказ 3Д модела објекта Пореског центра у Винипегу

3.3.3 Термичке зоне

Термичке зоне у моделу су направљене према постојећим термичким зонама. Сваки постојећи температурски сензор и припадајућа зонска опрема (нпр. конвектор и кутија за променљив проток ваздуха⁹) су дефинисани и у моделу објекта. То значи да је и у реалном објекту и у моделу објекта могућа независна контрола истих термичких зона. У моделу је такође верно представљено груписање зона по системима, што значи да оне термичке зоне и просторије које у реалном објекту припадају одређеном централно систему (нпр. одређеној клима комори), припадају истом централном систему и у моделу, као што показује Слика 3-18.



Слика 3-18 – Термичке зоне у моделу груписане по системима

Легенда за слику:

Светло зелена – КК-4 (АНУ-4); Плава – КК-3 (АНУ-3); Црвена – КК-7 (АНУ-7); Жута – КК-8 (АНУ-8); Розе – КК-11 (АНУ-11); Наранџаста – КК-14 (АНУ-14); Цијан – КЈ-1 (RTU-1); Сива – КЈ-2 (RTU-1); Љубичаста – КК-15 (АНУ-15); Маслинасто зелена – Калорифери; Морнаричко плава – Негрејане просторије; Тамно зелена – Просторија за штампу; Бело – Само извлачење ваздуха

Сваки од система садржи више зона, као што показује Слика 8-5.

⁹ У инжењерској пракси VAV (Variable Air Volume) кутија

3.3.4 Дефинисање улазних параметара

Улазни параметри динамичког модела дефинисани су према доступној техничкој документацији и подацима прикупљеним помоћу ЦСНУ. Улазни параметри могу се поделити у три групе:

- Параметри везани за термофизичке карактеристике омотача објекта,
- Параметри везани за намену и начин коришћења просторија укључујући дефинисање унутрашњих добитака топлоте од људи и уређаја и
- Параметри везани за техничке карактеристике и начин рада КГХ система

На основу броја рачунара у канцеларијама, процењено је да њихова максимална потрошња износи око $11,75 \text{ W/m}^2$. Услед недостатка тачних података, претпостављено је да је потрошња осталих мањих електричних уређаја у канцеларијама у складу са постојећим индустријским стандардима и да износи $2,75 \text{ W/m}^2$.

Максимална електрична енергија за светло израчуната је на основу постојеће пројектне документације и она износи у просеку 21 W/m^2 за канцеларије, односно 15 W/m^2 за ходнике.

Пре калибрације, количина свежег ваздуха за поједине клима коморе је процењена на основу Извештаја о енергетском прегледу и Извештаја о балансирању.

Од првог марта до дванаестог јуна сваке године је сезона интензивне обраде пореске документације, тако да запослени и системи објекта раде 24/7.

Ван тог периода, регуларни радни сати су од 06:00 до 24:00

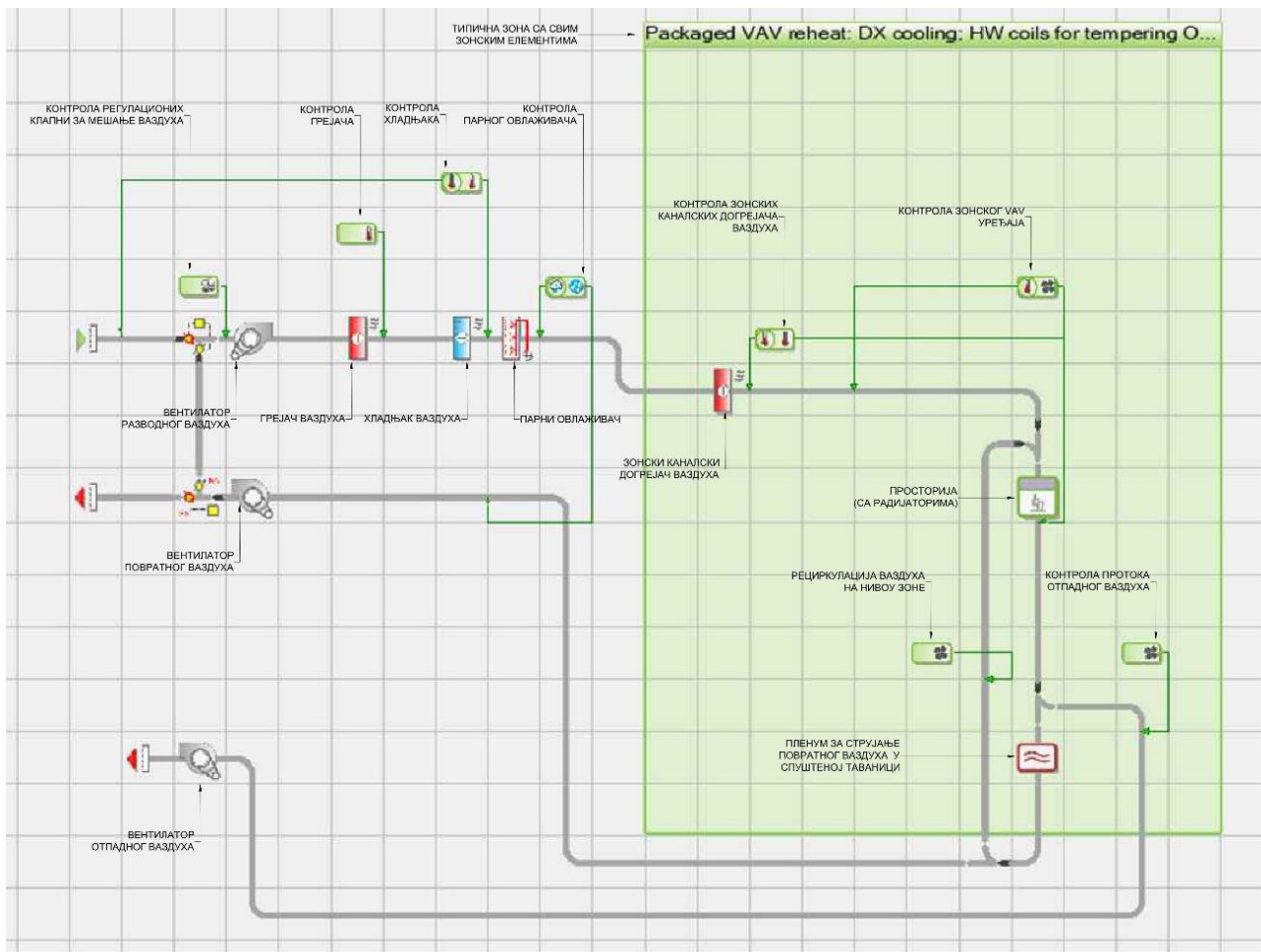
3.4 Моделовање КГХ система објекта

3.4.1 Ваздушни системи

Системи за централну вентилацију моделовани су пратећи детаљну конфигурацију карактеристике компоненти, секвенце и параметре рада и зонирање постојећих система описаних у оквиру поглавља 3.1.4.

Слика 3-19 показује шему типичне клима коморе у симулационом моделу, укључујући и зонске елементе (зелени оквир). Компоненте клима коморе укључују секцију за мешање ваздуха са регулационим клапнама, вентилаторе разводног и повратног ваздуха, грејач клима коморе, хладњак клима коморе и парни овлаживач.

Зонска опрема укључује VAV кутије и конвекторе, односно каналске топоводне догрејаче у одговарајућим зонама.



Слика 3-19 Типична конфигурација постојеће клима коморе са дистрибуцијом ваздуха у софтверском моделу, а према опису постојећег система (Слика 3-19)

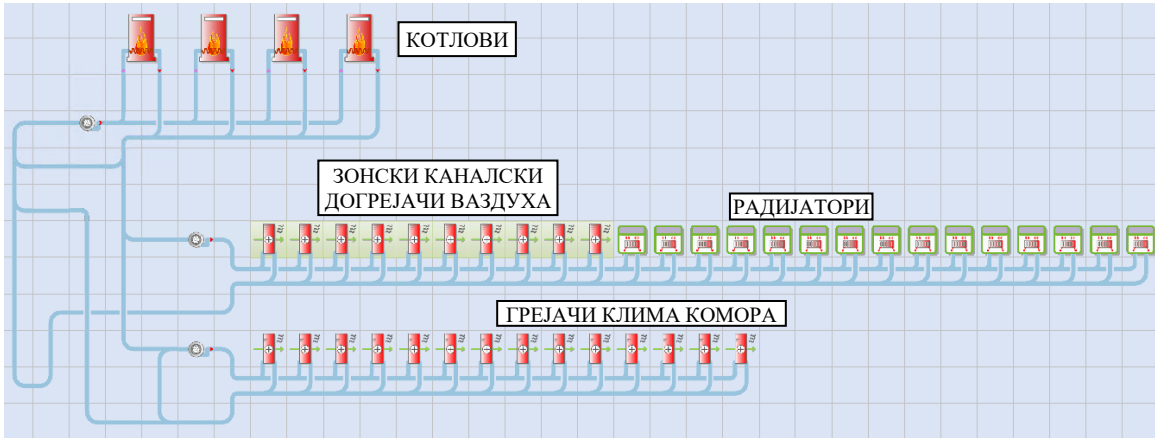
3.4.2 Топловодно грејање

Систем топоводног грејања са гасним котловима је највећи потрошач енергије на објекту, и одговоран је за највећи део емисије гасова стаклене баште. Због тога је адекватно моделовање њиховог рада веома значајно за анализу и оптимизацију енергетских перформанси читавог објекта.

Енергетске перформансе котлова се моделују у складу са следећим:

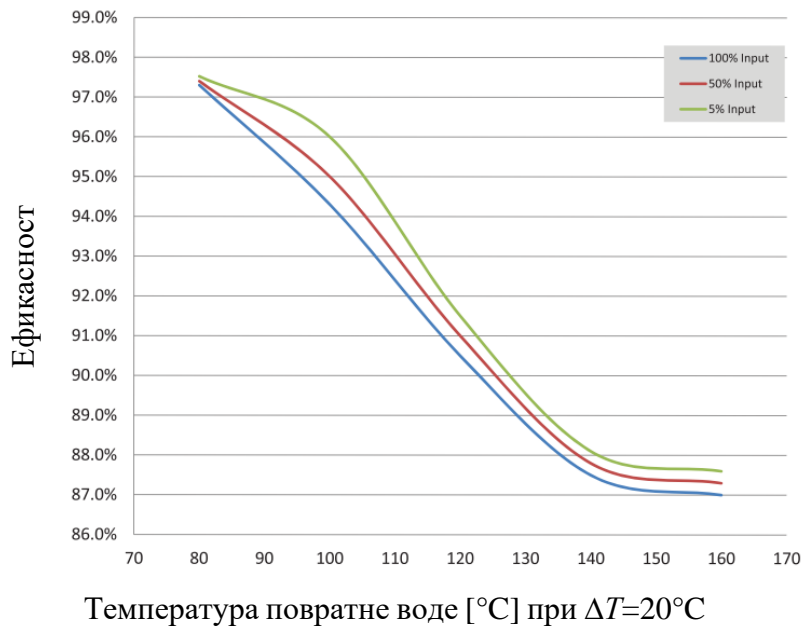
- Подаци произвођача
 - Капацитет котла
 - Ефикасност котлова при номиналном и парцијалном оптерећењу
- Контрола рада котла према изведеном стању
 - Корекција температуре разводне воде према температури спољашњег ваздуха, а према подацима из техничке документације и радне станице ЦСНУ
- Конфигурација компоненти котларнице укључујући
 - Распоред котлова
 - Број и капацитет циркулационих пумпи
 - Начин регулације паралелног рада колтова (каскадно или паралелно)

Крива ефикасности котла је дефинисана као функција трећег реда са две променљиве, при чему су улазни подаци, односно независно променљиве, проценат парцијалног оптерећења котла и температура воде на излазу из котла.

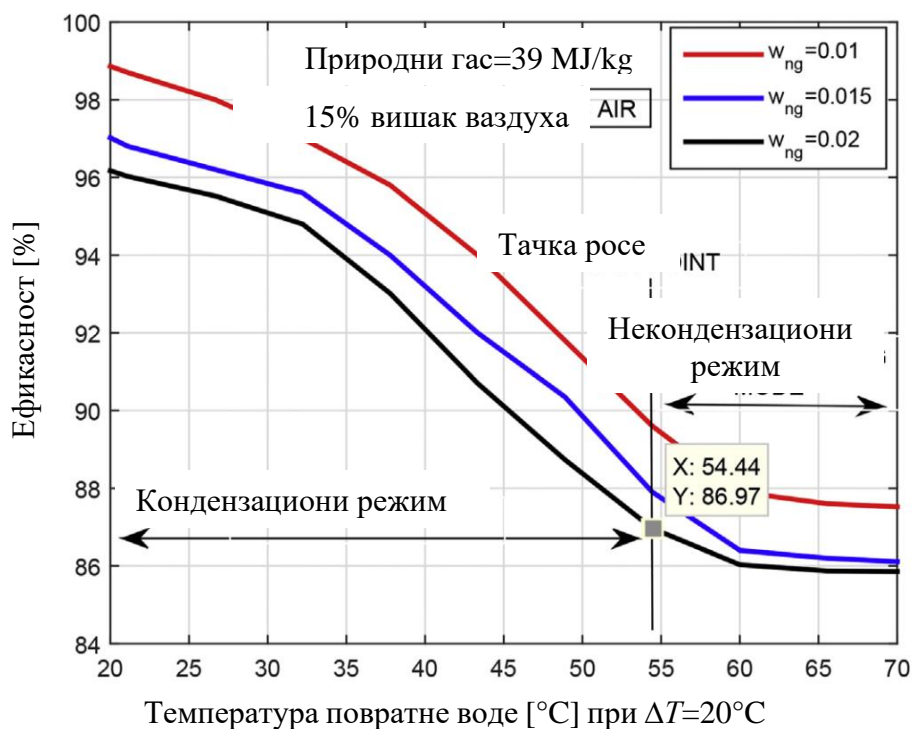


Слика 3-20 Шема котловског постројења у симулационом моделу

Овакав приступ моделовању је у складу са природом криве ефикасности кондензационих котлова на природни гас, а датом од стране произвођача (Слика 3-21). Иста карактеристика криве ефикасности је верификоване и кроз радове различитих аутора, попут Сатијаваде и Балдија [93] - Слика 3-22.



Слика 3-21 Крива ефикасности постојећих котлова AERCO Benchmark 3000 (<https://www.aerco.com/>)



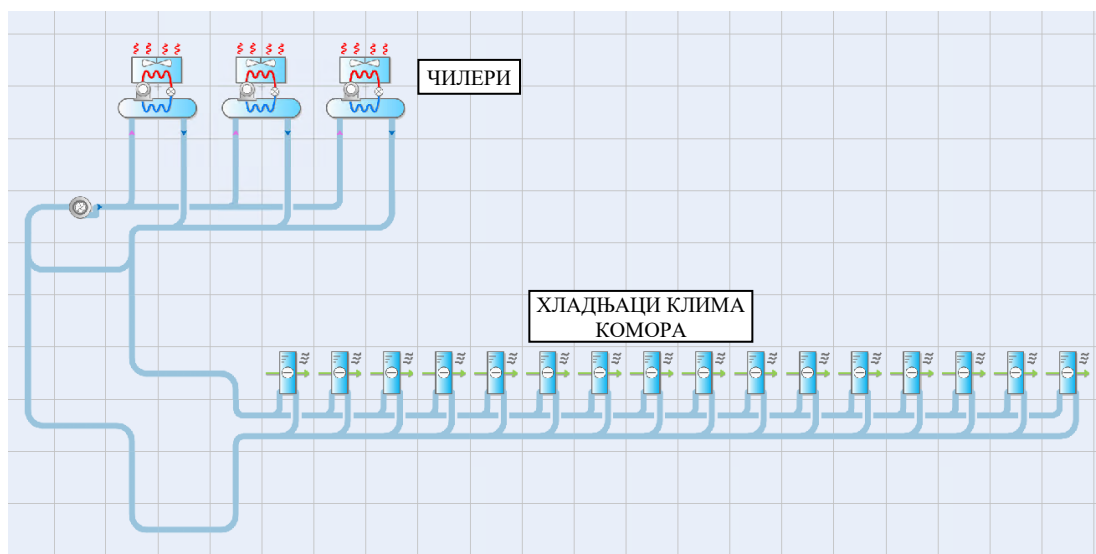
Слика 3-22 Теоријска крива ефикасности кондензационог котла на природни гас [93]

3.4.3 Чилери

Чилери су моделовани према постојећим техничким карактеристикама, укључујући капацитет, број компресора, тип компресора, начин хлађења кондензатора и температурски режими круга воде за хлађење и круга воде за кондензатор (уколико је у питању водом хлађени чилер).

Велики утицај на потрошњу енергије чилера и других расхладних уређаја има њихова ефикасност при парцијалном оптерећењу. однос њиховог номиналног капацитета према свтарном расхладном оптерећењу у радним условима и ефикасност чилера при сниженом оптерећењу која такође мора бити дефинисана као улазни параметар модела.

На основу типа и капацитета чилера, изабрана је функција која дефинише фактор хлађења за различите услове рада, према стандарду ANSI/ASHRAE/IES 90.1 (Слика 8-11).



Слика 3-23 Шема чилерског постројења у симулационом моделу

3.5 Калибрација физичко-математичког модела објекта

Калибрација је процес финог подешавања улазних параметара модела, да би се резултати симулације објекта што више приближили стварно измереној потрошњи. Као што је детаљно објашњено у поглављу 2.4, калибрација је обављена на основу критеријума ASHRAE Guideline 14-2014 [21].

Основни параметри који су били предмет калибрације, фигуришу инфилтрација која је моделована као константна вредност по јединици површине фасаде и профили коришћења расвете и канцеларијских уређаја.

Параметри чије су вредности егзактно утврђене или измерене током испитивања објекта не треба да буду предмет калибрације.

У овом случају ту спадају

- Термофизичке карактеристике омотача објекта
- Ефикасност опреме попут гасних котлова, чилера итд. које су дефинисане према подацима произвођача и према типу опреме.
- Температура воде у системима грејања и хлађења
- Температуре ваздуха у просторијама
- Инсталисана снага расвете, ефикасност опреме итд.

За процес калибрације користе се реални метеоролошки услови измерени на локацији објекта, који обухватају температуру сувог и влажног термометра, брзину и правац ветра, облачност, а све то за референтну годину. Као референтна година за анализу енергетског понашања објекта изабрана је 2018.

Метеоролошки подаци у симулацији су дефинисани преко метеоролошког фајла (weather file) за реалну метеоролошку годину (actual meteorological year – АМУ, 2018): 2378966793_АМУ_01-01-2018_1663406691.epw.

Критични параметри који јесу предмет калибрације су:

- Време рада система за грејање и хлађење
 - Стандардно време рада је познато, али је могуће да је током појединих дана или периода стандардно време продужено на захтев корисника или оператора, што резултује повећаном потрошњом енергије
- Процент инсталираних сијалица који је у неком тренутку упаљен
- Број корисника у објекту током времена

3.5.1 Калибрација потрошње електричне енергије

Главни потрошачи електричне енергије у објекту су систем унутрашње расвете, сервери, рачунари и други прикључни уређаји запослених (мали штампачи, телефони, апарати за кафу и сл.), велики штампачи за штампање пореске документације, системи за хлађење и остали машински системи итд. Низ параметара утиче на потрошњу енергије различитих потрошача, али само неки од њих су део процеса калибрације. Параметри попут инсталисане снаге расвете, инсталисане снаге електричних уређаја које користе запослени, параметара рада система за хлађење итд. нису део процеса калибрације.

Основни параметри који јесу део процеса калибрације су:

Калибрација рада електричних уређаја тј. потрошње електричне енергије, одвија се у три фазе:

1. Дефинисање рада система и потрошње који су егзактно познати
2. Дефинисање и калибрација преостале базне потрошње
3. Дефинисање и калибрација преостале варијабилне потрошње

У првој фази моделују се системи за које су познати инсталисана снага, радни режими рада, ефикасност и време рада. То су нпр. базна расвета, сервери, системи за вентилацију и хлађење итд.

У другој фази дефинише се преостала базна потрошња и врши калибрација према часовним вредностима измерене потрошње електричне енергије током ноћи. Према подацима илустрованим у топлотној мапи - Табела 3-15, вршна потрошња објекта је у периоду од 9:00 до 14:00 и тада је просечна ангажована електрична снага (на нивоу читаве године) око 1.000 kW. Минимална потрошња, односно минимална просечна ангажована снага је око поноћи, али она износи чак око 600 kW, што је указује на то да је велики део потрошње електричне енергије заправо базна потрошња тј. односи се на уређаје и системе који непрекидно раде, попут сервера, система за хлађење, расвете, система за централну вентилацију итд.

У трећој фази калибрације, врши се фино подешавање међусобно спрегнутих параметара који утичу на потрошњу електричне енергије, као што су:

- Број људи у објекту током времена
- Процент упаљених светиљки током времена
- Снага канцеларијских електричних уређаја током времена

Егзактан начин и време рада расвете нису аутоматизовани ни познати. У првој итерацији коришћен је стандардизован распоред рада дефинисан на основу искуства и индустријских стандарда за објекте одговарајућег типа. Током калибрације, овај параметар је фино подешаван.

Резултати процеса калибрације који су задовољили постављене критеријуме [21] су приказани у табелама Табела 3-16 и Табела 3-17.

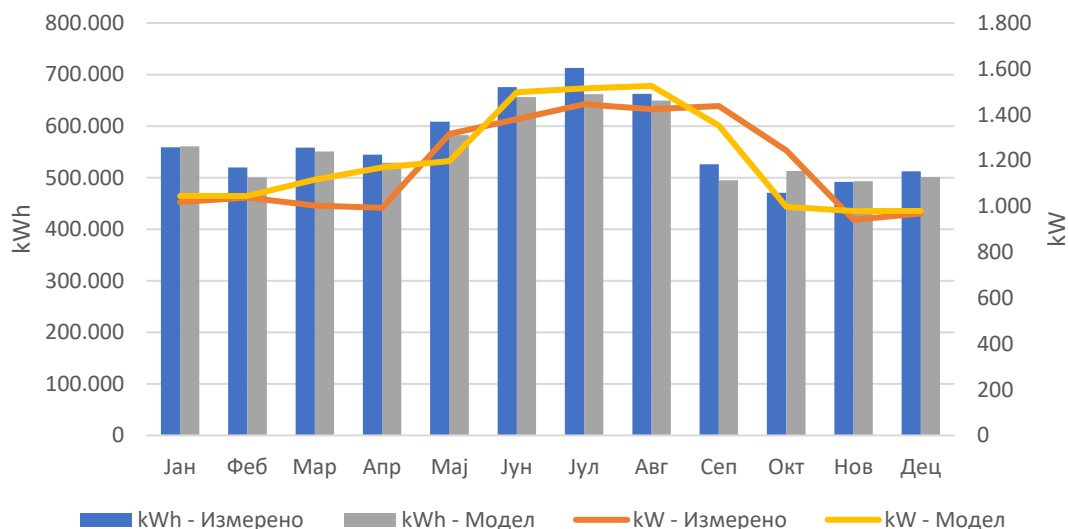
Табела 3-16: Резултати симулације калибрисаног модела за потрошњу електричне енергије

Месец	Измерено		Модел		Одступање			
	Енергија	Макс. снага	Енергија	Макс. снага	Енергија		Макс. снага	
	[kWh]	[kW]	[kWh]	[kW]	[kWh]	[%]	[kW]	[%]
Jan	558.863	1.019	560.463	1.045	-1.600	0%	-26	-3%
Feb	520.078	1.039	500.646	1.045	19.432	4%	-6	-1%
Mar	558.296	1.003	550.625	1.116	7.671	1%	-114	-11%
Apr	544.564	994	529.356	1.169	15.208	3%	-176	-18%
May	608.734	1.316	582.720	1.197	26.014	4%	118	9%
Jun	675.703	1.381	656.686	1.498	19.018	3%	-118	-9%
Jul	713.139	1.445	661.828	1.515	51.311	7%	-142	-10%
Aug	662.471	1.424	649.439	1.525	13.032	2%	-176	-12%
Sep	525.779	1.438	495.051	1.352	30.728	6%	86	6%
Oct	470.940	1.244	512.802	997	-41.862	-9%	247	20%
Nov	491.549	941	493.351	979	-1.802	0%	-38	-4%
Dec	512.227	968	501.170	980	11.057	2%	-12	-1%
Total	6.842.344	1.445	6.694.136	1.525	148.208	2%	-154	-11%

Табела 3-17: Прецизност процене потрошње електричне енергије калибрисаног модела на основу критеријума NMBE и CVRMSE:

	ASHRAE 14-2014	
	NMBE [%]	CVRMSE [%]
Енергија	2.4%	4.5%
Максимална снага	-2.7%	11.2%
Прихватљиво	±5%	±15%

Калибрација - Електрична енергија 2018
Измерена потрошња и резултати модела



Слика 3-24: График потрошње електричне енергије према измереној потрошњи и калибрисаном моделу 2018 године

Модел је задовољио захтеве према ASHRAE Guideline 14-2014, који допуштају максимално одступање према од $\pm 15\%$ за CV(RMSE), односно $\pm 5\%$ за NMBE.

Највише вредности ангазоване електричне снаге забележена су у раним поподневним сатима летњих месеци и износе око 1,400 kWh. Тада је комбинација топлотних добитака укључујући високе вредности спољашње температуре, дозрачене соларне енергије, броја људи у објекту итд., укључујући акумулисани топлотне енергије у термичкој маси објекта неповољна и топлотно оптерећење највише. Висока максимална електрична снага је такође карактеристична за сезону обраде пореске документације, када запослени у објекту бораве дуже него иначе и када канцеларијски уређаји и системи за хлађење и вентилацију раде са већим капацитетом.

3.5.2 Калибрација потрошње природног гаса

Потрошачи природног гаса на објекту током референтног периода у односу на који се врши калибрација су:

- Централни систем за грејање
- Централни систем за припрему санитарне топле воде

Осим тога, објекат има и парне овлаживаче на природни гас, али они нису радили током 2018. године, тако да њихова потрошња није ушла у рачуне за природни гас, и самим тим њихов рад није предмет калибрације.

Потрошња енергије за припрему санитарне топле воде директно зависи од ефикасности система и потрошње санитарне топле воде, а која је функција броја корисника. Средња вредност потрошње енергије за припрему санитарне топле воде током вишегодишњег периода је дефинисана анализом помоћу линеарне регресије, како је показано у поглављу 3.2.1. Током 2018. потрошња санитарне топле воде на месечном нивоу јасно се види у током летњих месеци, када није радио систем за грејање (нпр. јул) и износи између 11.000 kWh и 14.000 kWh месечно.

Преостала потрошња природног гаса је за рад система за грејање, а та потрошња зависи од низа параметара, од који су само неки предмет калибрације. Параметри који утичу на потрошњу гаса, а који нису предмет калибрације:

- Ефикасност котлова
- Режим рада котлова и компензација температуре разводне воде према температури спољашњег ваздуха
- Температура у унутрашњим просторијама

Параметри који утичу на потрошњу а који јесу предмет калибрације, односе се на:

- Период и време рада система за грејање
- Унутрашњи добици од људи, тј. број људи у објекту током времена
- Унутрашњи добици од расвете, тј. проценат упаљених светиљки током времена
- Унутрашњи добици од електричних уређаја

Ови параметри утичу на потрошњу природног гаса, али и на потрошњу електричне енергије, при чему су неки од њих и међусобно спрегнути, као што број људи у објекту, проценат упаљених светиљки и потрошња електричне енергије за рад рачунара.

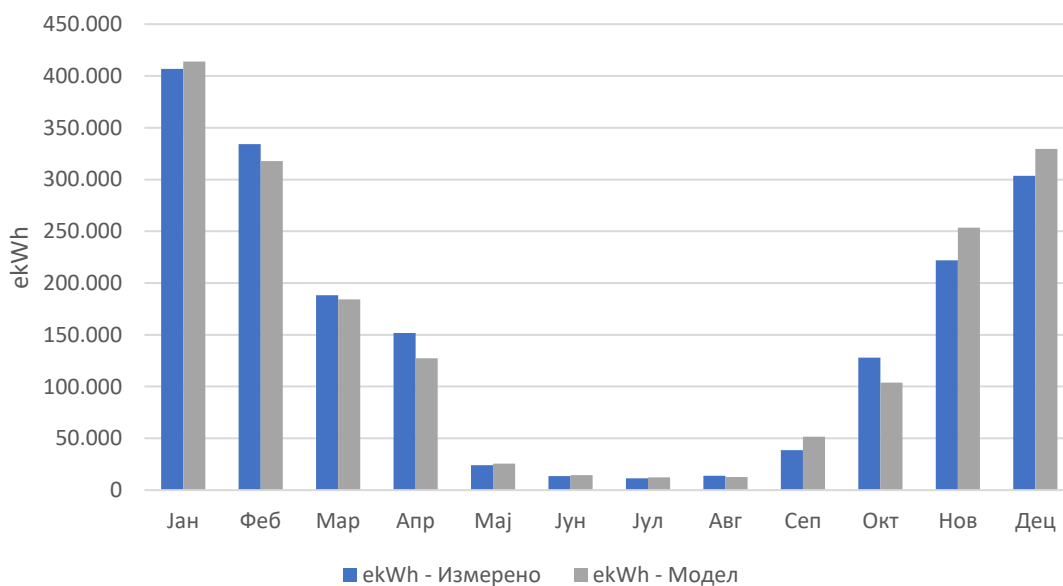
Резултати за месечну потрошњу природног гаса, модела који је задовољио критеријуме калибрације, приказани су у Табела 3-18, и на Слика 3-25. Табела 3-19 показује на који начин су наведени резултати задовољили критеријуме калибрације.

Табела 3-18: : Резултати симулације калибрисаног модела за потрошњу природног гаса

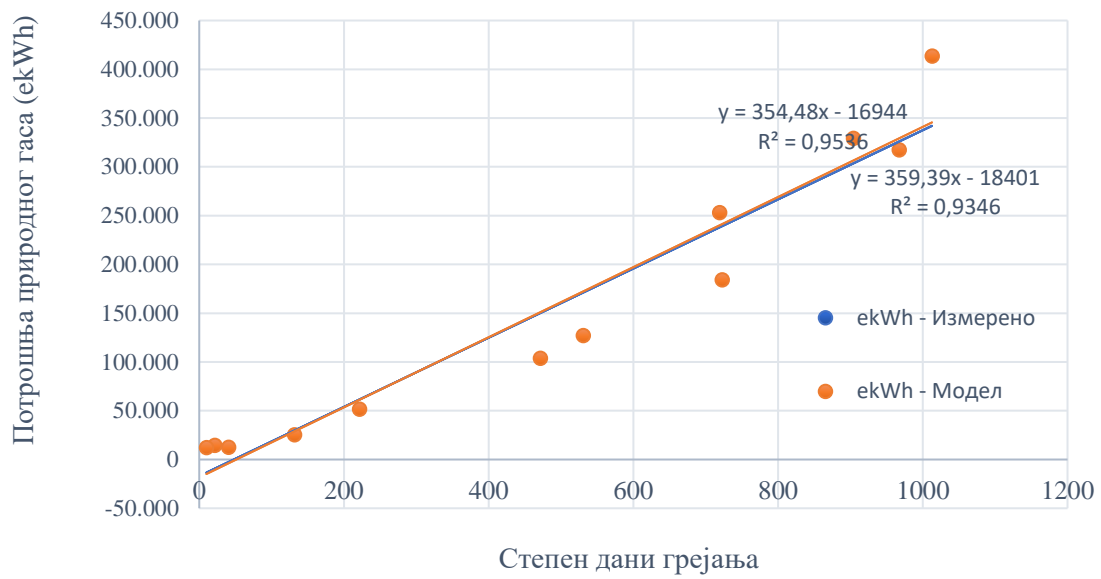
Месец	Измерено	Модел	Одступање	
	Енергија	Енергија	Енергија	
	[ekWh]	[ekWh]	[ekWh]	[%]
Јан	406.945	413.835	-6.890	-2%
Феб	334.119	317.683	16.436	5%
Мар	188.200	184.246	3.953	2%
Апр	151.624	127.280	24.344	16%
Мај	24.054	25.630	-1.576	-7%
Јун	13.601	14.491	-890	-7%
Јул	11.330	12.290	-960	-8%
Авг	13.848	12.630	1.218	9%
Сеп	38.674	51.587	-12.913	-33%
Окт	127.951	104.005	23.946	19%
Нов	222.017	253.358	-31.341	-14%
Дец	303.445	329.515	-26.070	-9%
Тотал	1.835.808	1.846.550	-10.742	-1%

Табела 3-19: Прецизност процене потрошње природног гаса калибрисаног модела на основу критеријума NMBE и CVRMSE:

	ASHRAE 14-2014	
	NMBE [%]	CVRMSE [%]
Природни гас	-0.6%	11.4%
Прихватљив опсег	±5%	±15%



Слика 3-25: График потрошње природног гаса према измереној потрошњи и калибрисаном моделу током 2018 године



Слика 3-26: Калибрација потрошња природног гаса у односу на степен дане за грејање

3.6 Усклађени референтни модел

Калибрисани модел је репрезентативан када је у питању понашање објекта током 2018. године. Међутим, да би се за дужи временски период разумело понашање објекта, као и ефекти имплементације мера за уштеду енергије модел мора да се нормализује за услове који су репрезентативни за дужи период. То подразумева нормализацију метеоролошких услова али и начина коришћења објекта и рада енергетских система.

Формирање нормализованог референтног модела се обавља у складу са процедуром описаном у поглављу 2.4.1.

При формирању нормализованог референтног модела објекта у обзир је узето следеће:

1. Нормализовани метеоролошки подаци, на основу мерања током 30 година, уместо података само за 2018. годину.
2. Укључивање парних овлаживача ваздуха
3. Узимање у обзир осталих промена система и начина коришћења објекта који су у плану што укључује још:
 - а. Смањење броја запослених према важећим регулативама
 - б. Замену постојећих светала расветом која је испуњава важеће стандарде

Метеоролошки подаци за нормализован модел су дефинисани преко типичне метеоролошке године (Typical Meteorological Year – ТМУ) која узима у обзир податке измерене на локацији објекта за период од 30 година.

Такође, узето је у обзир да парни овлаживачи треба да раде, иако су због кварова били ван функције током 2018. године.

Нормализовани модел узима у обзир и започет пројекат замене сијалица, према коме треба да се замене сијалице у читавом објекту, да би ниво инсталираног осветљења био у складу са важећим стандардом NECB 2017 [63], а према табели испод:

Табела 3-20: Нормализовани нивои расвете

Намена простора	Расвета [W/m^2]
Отворена канцеларија	4,35
Индивидуална канцеларија	5
Кухиња	5,7
Електричне/машинске собе	4,6
Гардероба	5,2
Остава	6,8
Серверска соба	7,15
Степениште	3,1
Ходник	4
Тоалет	4,55
Предворје	5,4

Број корисника објекта је такође коригован према GC Workplace Guidelines. То подразумева смањење густине броја корисника на вредност од $12 m^2$ канцеларијског простора по запосленом, што резултује смањењем укупног броја корисника са око 3.000 на око 2.000.

Табела 3-22 приказује резултате симулације нормализованог модела, који узима у обзир ове измене и који је репрезентативан за дужи временски период, од почетка 2019. на даље.

Табела 3-21: Годишња потрошња енергије према потрошачима, на основу резултата симулације референтног калибрисаног модела

Потрошач	Калибрисани модел			
	Ел. енергија	Природни гас	Тотал	Тотал
	[kWh]	[ekWh]	[ekWh]	%
Унутрашња расвета	2.943.104		2.943.104	34,46%
Спољна расвета	281.050		281.050	3,29%
Оптерећење утичница	1.504.771		1.504.771	17,62%
Велики штампачи	304.762		304.762	3,57%
Остали потрошачи	297.992		297.992	3,49%
Грејање простора		1.680.305	1.680.305	19,67%
Овлаживање ваздуха				
Хлађење простора	420.555		420.555	4,92%
Одбацивање топлоте	20.444		20.444	0,24%
Централни вентилатори	588.844		588.844	6,89%
Локални вентилатори	35.498		35.498	0,42%
Вентилатори отпадног ваздуха	15.593		15.593	0,18%
Процесни вентилатори	28.859		28.859	0,34%
Пумпе	165.157		165.157	1,93%
Лифтови и покретна степеништа	66.483		66.483	0,78%
Грејачи за паљење аутомобила	21.024		21.024	0,25%
Припрема санитарне топле воде		166.244	166.244	1,95%
Тотал	6.694.136	1.846.550	8.540.686	100,00%

Табела 3-22: Годишња потрошња енергије према потрошачима, на основу резултата симулације усклађеног референтног модела

Потрошач	Нормализовани референтни модел			
	Ел. енергија	Природни гас	Тотал	Тотал
	[kWh]	[ekWh]	[ekWh]	%
Унутрашња расвета	642.346		642.346	9,34%
Спољна расвета	281.050		281.050	4,09%
Оптерећење утичница	1.374.118		1.374.118	19,97%
Велики штампачи	304.762		304.762	4,43%
Остали потрошачи	220.829		220.829	3,21%
Грејање простора		2.426.882	2.426.882	35,28%
Овлаживање ваздуха		369.725	369.725	5,37%
Хлађење простора	314.096		314.096	4,57%
Одбацивање топлоте	15.898		15.898	0,23%
Централни вентилатори	464.340		464.340	6,75%
Локални вентилатори	34.503		34.503	0,50%
Вентилатори отпадног ваздуха	15.505		15.505	0,23%
Процесни вентилатори	28.859		28.859	0,42%
Пумпе	154.702		154.702	2,25%
Лифтови и покретна степеништа	66.483		66.483	0,97%
Грејачи за паљење аутомобила	21.168		21.168	0,31%
Припрема санитарне топле воде		144.057	144.057	2,09%
Total	3.938.658	2.940.664	6.879.322	100,00%



Слика 3-27: Поређење потрошње референтног и усклађеног модела

На основу података приказаних у табелама Табела 3-21 и Табела 3-22 и на слици Слика 3-27, могу да се донесу неки важни закључци.

Потрошња енергије за унутрашњу расвету код усклађеног модела износи само око 22% од потрошње референтног модела. Даље, као последица смањених добитака топлоте од расвете и људи (с обзиром да се и број запослених у згради смањује), опада енергија неопходна за рад чилера и осталих компоненти расхладних система, али расте потрошња енергије за грејање.

Овај пример добро илуструје зашто је за оцену ефеката МУЕ неопходно користити усклађени, а не референтни модел, јер закључци о уштедама који би се добили анализом на основу структуре потрошње референтног модела, могу бити квантитативно, али и квалитативно погрешни.

4 ДЕФИНИСАЊЕ И ЕВАЛУАЦИЈА ИНДИВИДУАЛНИХ МЕРА ЗА УШТЕДУ ЕНЕРГИЈЕ

Опште о мерама за уштеду енергије било је речи у поглављу 2.5. У оквиру истраживања спроведеног током израде дисертације, размотрен је опсежан скуп мера за уштеду енергије. Текст дисертације даје опис и анализу само оних мера које су се показале као технички изводљиве и које заиста могу да обезбеде одређене уштеде.

МУЕ су сврстане у четири основне групе:

- Група ОМ - Побољшање термичког омотача објекта
- Група КГХ - Унапређење ефикасности КГХ система
- Група ЕЛ - Унапређење ефикасности електричних система попут расвете
- Група ОИЕ - Коришћење обновљивих извора енергије

У поглављима која следе, најпре је дат кратак опис појединих мера за уштеду енергије, укључујући основне принципе уштеде, начин имплементације и основне претпоставке у моделовању мера.

Поглавље 4.25 пружа детаљан приказ резултата симулације, закључке и објашњења везане за ефекте имплементације индивидуалних мера.

4.1 ОМ-1 – Побољшање изолације зидова

Ова мера предвиђа побољшање термичких карактеристика омотача објекта додавањем слоја изолације на спољашње зидове. У жељи да се очува изглед спољашње бетонске фасаде, разматран је случај када се слој изолације додаје са унутрашње стране спољашњег зида.

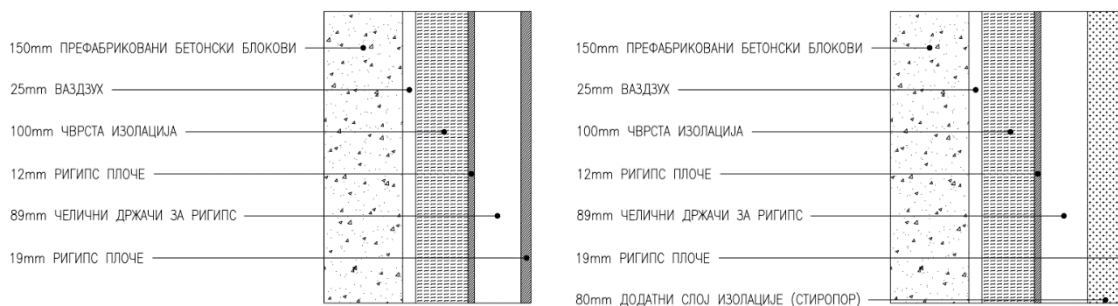
Основна идеја мере је да се дода минимална дебљина изолације неопходна да би се достигла максимална вредност коефицијента пролаза топлоте према важећим стандардима енергетске ефикасности (NECB 2017 [63]).

Постојећу конструкцију зида чине следећи слојеви (споља ка унутра):

- Префабриковани бетонски панели
- Ваздушни зазор
- Чврста термоизолација (полиуретанске плоче)
- Гипсане плоче
- Челична конструкција која носи унутрашње гипсане плоче
- Гипсане плоче

Коефицијент пролаза топлоте за постојеће зидове износи $U=0,315 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Према стандарду [63], максимална дозвољена вредност коефицијента пролаза топлоте износи $U=0,210 \text{ W/m}^2\text{K}$. Да би се достигла та вредност, неопходно је додати термоизолацију. У складу са постојећим индустријским стандардима одабрана изолација је стиропор - 8 cm.



а) постојећи спољашњи зид

б) спољашњи зид након ОМ-1

Слика 4-1: Грађевинска конструкција спољашњег зида а) пре и б) после имплементације ОМ-1.1

4.2 OM-2.1 и OM-2.2 – Замена прозора (опција 1 и опција 2)

4.2.1 Опис мере и принципи моделовања

Као мера уштеде енергије разматрана је замена постојећих прозора енергетски ефикаснијим решењима:

1. OM-1.2 (опција 1) уградња алуминијумских прозора са двоструким стаклом укупног коефицијента пролаза топлоте $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
2. OM-1.3 (опција 2) уградња “ултра ефикасних“ прозора са троструким нискоемисионим стаклом и испуном са аргоном, укупног коефицијента пролаза топлоте $0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$

Све транспарентне позиције на објекту су обухваћене овом мером и њихова оријентација и површина дефинисани су у табели испод.

Табела 4-1: Површина омотача укључујући удео транспарентних позиција (прозора)

Оријентација	Површина спољашњих зидова изнад тла (са прозорима) [m ²]	Површина вертикалних транспарентних позиција [m ²]	Површински удео вертикалних транспарентних позиција [%]
Север	3.213,8	389,1	12,1
Исток	1.620,6	106,7	6,6
Југ	3.197,0	1.017,6	31,8
Запад	1.663,4	90,6	5,4
Укупно	9.694,8	1.604	17%
Хоризонтална	1.6011,9	-	-
Укупно са кровом	25.706,7	1.604	6%



а) зид завеса



б) алуминијумски прозори

Слика 4-2: Транспарентне позиције на објекту укључујући а) на јужној страни б) типичан изглед постојећих алуминијумских прозора

На основу познатих карактеристика постојећих прозора, њихов коефицијент пролаза топлоте и емисивност су моделовани према слици. Укупни коефицијент пролаза топлоте за прозоре је процењен на $U=2,775 \text{ W/m}^2\text{K}$, а за конструкцију зида завесе на јужној фасади $U=2,071 \text{ W/m}^2\text{K}$ уз емисивност спољашњег затамљеног стакла од 0,03.

4.2.2 Процена трошкова

Процена инвестиционих трошкова је извршена на основу актуелних података о ценама у индустрији и у обзир узима:

- Демонтажу и уклањање постојећих прозора
- Постављање нових прозора (материјал и рад)

4.2.3 Предности

- Смањење губитака топлоте током периода грејања
- Смањење добитака топлоте током периода хлађења

4.2.4 Недостаци

- Високи инвестициони трошкови

4.3 ОМ-3 – Заптивање омотача (смањење инфилтрације)

4.3.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера предвиђа заптивање омотача објекта и снижавање инфилтрације. Циљ је поправити заптивање око постојећих прозора (уграђени током градње објекта 1978.) и на спојевима пре-фабрикованих бетонских панела.

Инфилтрација је моделована као константна вредност од 0,3 l/s по m² фасаде. Тачна вредност је дефинисана током процеса калибрације.

Основана претпоставка моделовања ове мере је да би заптивање омотача објекта довело до смањења инфилтрације на ниво предвиђен стандардом о енергетским перформансама зграда [63], што износи 0,25 l/s по m² фасаде.



Слика 4-3: Карактеристична места на омотачу објекта која су циљана мером ОМ-2

4.3.2 Процена трошкова

Процена инвестиционих трошкова је извршена на основу актуелних података о ценама у индустрији и у обзир узима:

- Заптивање на спојевима транспарентних позиција и нетранспарентних позиција
- Заптивање на спојевима фасаде – префабрикованих бетонских елемената

4.3.3 Предности

- Смањење губитака топлоте током периода грејања

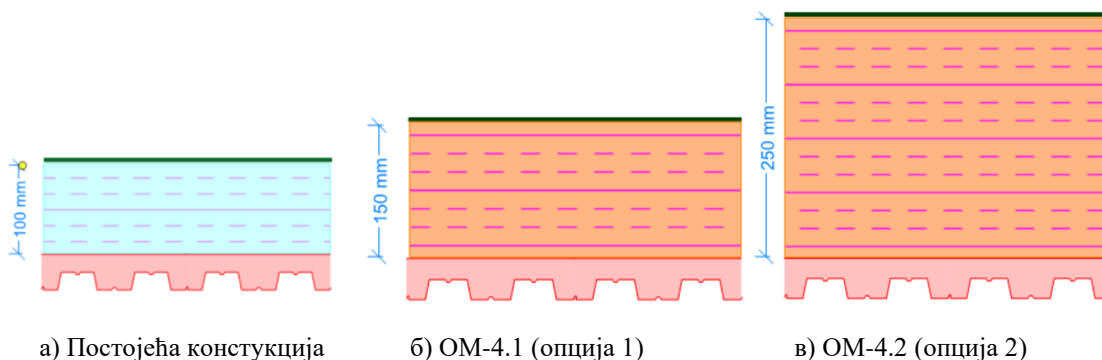
4.3.4 Недостаци

- Смањење природног проветравања услед инфилтрације
- Смањење пасивног хлађења у периоду када се објект хлади а температура спољашњег ваздуха је нижа од температуре ваздуха у простору

4.4 ОМ-4.1 и ОМ 4.2 – Побољшање изолације крова (опција 1 и опција 2)

4.4.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера предвиђа побољшање изолације крова додавањем 150 mm односно 250 mm термичке изолације (полиизоцианурат).



Слика 4-4: Параметри за моделовања постојеће кровне конструкције

На основу топлотне проводљивости плоча од полиизоцианурата која износи око $0,022 \text{ W/(mK)}$, изачунат је коефицијент пролаза топлоте за мере ОМ-3.1, који износи $U_{kr,om3.1}=0,140 \text{ W/m}^2\text{K}$ и ОМ-3.2, који износи $U_{kr,om3.2}=0,086 \text{ W/m}^2\text{K}$.

4.4.2 Процена трошкова

Процена инвестиционих трошкова је извршена на основу актуелних података о ценама у индустрији и у обзир узима:

- Демонтажу и уклањање постојеће кровне термо и хидро изолације
- Постављање хидро и термо изолације на крову

4.4.3 Предности

- Смањење губитака топлоте током периода грејања
- Смањење добитака топлоте током периода хлађења

4.4.4 Недостаци

- Високи инвестициони трошкови
- Повећање потрошње енергије за хлађење објекта у периоду када је температура површине крова нижа од температуре у унутрашњим просторијама

4.5 КГХ-1.1 – DOAS са ротационим регенератором топлоте комбинован са вентилатор-конвекторима, нискотемпературским грејањем и новим чилером са одвојеним кондензатором за зимско хлађење.

4.5.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера предвиђа реконфигурацију постојећих централних клима комора тј. њихову замену са системима који раде са 100% свежег ваздуха (Dedicated Outdoor Air System – DCBS; Наменски систем за свеж ваздух - DOASB). Такви системи спроводе кроз централне канале само 100% свеж ваздух до терминалних јединица у вентилационим зонама у згради, што значи да нема мешања ни рецикулације ваздуха кроз централне клима коморе. Количина свежег ваздуха дефинисана је захтевима за минимум свежег ваздуха у складу са важећим стандардима [94].

Основна идеја ове МУЕ је да се оствари прецизна контрола количине свежег ваздуха који се убацује у зграду кроз централни систем за вентилацију и да се елиминацијом рецикулације ваздуха од зоне до централне јединице и назад, смањи енергија потребна за рад вентилатора у централној вентилационој јединици. Последишно, ова мера такође укључује реконфигурацију терминалне КГХ опреме, односно зонских јединица, јер се сада правилна дистрибуција ваздуха обезбеђује помоћу вентилатора у зонским јединицама (вентилатор конвекторима), а сви губици и добици топлоте, осим вентилационих, покривају на нивоу зоне.

4.5.2 Опис техничких карактеристика КГХ система

Нове централна DOAS јединице имају вентилатор свежег ваздуха у вентилатор отпадног ваздуха, оба са фреквентном регулацијом. Јединице раде са 100% свежег ваздуха и имају регенератор топлоте који омогућава искоришћавање и осетног и латентног дела унутрашње енергије отпадног ваздуха. Централне клима коморе имају још и грејач, хладњак и овлаживач.

По једна DOAS јединица треба да замени следећу КГХ опрему лоцирану у машинским кућицама на крову:

Табела 4-2 Предложена и постојећа опрема за централну вентилацију у МК1

Машинска кућица 1	
Нова опрема	Existing equipment to be replaced
DOAS-1	КК-1
ВОВ-18	КК-2
	КК-3
	КК-4
	КЈ-1
	ВОВ-18

Табела 4-3 Предложена и постојећа опрема за централну вентилацију у МК2

Машинска кућица 2	
Нова опрема	Existing equipment to be replaced
DOAS -2	КК-5
ВОВ-19	КК-6
	КК-7
	КК-8
	КЈ-5
	КЈ-2
	ВОВ-19

Табела 4-4 Предложена и постојећа опрема за централну вентилацију у МК3

Машинска кућица 3	
Нова опрема	Existing equipment to be replaced
DOAS -3	КК-9
ВОВ-20	КК-10
	КК-11
	КЈ-6
	КЈ-3
	ВОВ-20

Табела 4-5 Предложена и постојећа опрема за централну вентилацију у МК4

Машинска кућица 4	
Нова опрема	Existing equipment to be replaced
DOAS -4	КК-12
ВОВ-21	КК-13
	КК-14
	КК-15
	КЈ-4
	ВОВ-21

Тренутно, постојеће клима коморе се користе да:

- Покрију комплетну потребу за свежим ваздухом
- Обезбеде правилну дистрибуцију ваздуха
- У периоду грејања покрију највећи део вентилационих губитака
- У периоду хлађења елиминишу све топлотне добитке (трансмисионе, вентилационе, соларне и унутрашње)
- Обезбеде минималну влажност ваздуха током периода грејања

У постојећој конфигурацији клима комора, удео свежег ваздуха након мешања са повратним ваздухом износи од 10% до 20% у зависности од конкретне коморе, што значи да до 90% од укупног протока убацног ваздуха заправо кружи од зоне, до централне клима коморе, па назад до зоне и за то се троши енергија централног вентилатора.

На основу мерења током тестирања и балансирања система вентилације утврђен је постојећи баланс ваздуха за КГХ опрему у машинским кућицама 1 до 4 како је приказано у табелама:

Табела 4-6 Постојећи балансни извештај за опрему у машинској кућици 1

	ВУВ [l/s]	ВПВ / ВОВ [l/s]	min СВ [l/s]	min СВ [%]	Напомена
КК-1	8.937	7.566	1.371	15%	
КК-2	10.166	7.667	2.499	25%	
КК-3	8.128	6.315	1.813	22%	
КК-4	9.293	5.524	3.769	41%	
КЈ-1	Ван функције				
ВОВ-18	-	1173	-	-	Тоалет
ВОВ-22	-	1524	-	-	Камионски утовар
ВОВ-23	Ван функције				Електро соба, отпадни ваздх
ВОВ-24	Ван функције				Електро соба, отпадни ваздх
ВОВ-30	Ван функције				Тамна соба
ВОВ-33	Ван функције				Соба за акумулатор

Табела 4-7 Постојећи балансни извештај за опрему у машинској кућици 2

	ВУВ [l/s]	ВПВ / ВОВ [l/s]	min СВ [l/s]	min СВ [%]	Напомена
КК-5	9.415	7.262	1.371	15%	
КК-6	2.840	2.130	2.499	25%	
КК-7	5.806	4.539	1.813	22%	
КК-8	7.191	6.147	3.769	41%	
КЈ-2	Ван функције				
КЈ-5	3715	3847	-	-	Тоалети
ВОВ-16	Ван функције				Кухиња
ВОВ-17	Ван функције				Кухиња
ВОВ-19		951			Тоалети
ВОВ-25		1.414			Електро соба
ВОВ-31		271			Конференцијска соба

Табела 4-8 Постојећи балансни извештај за опрему у машинској кућици 3

	ВУВ [l/s]	ВПВ / ВОВ [l/s]	СВ [l/s]	min СВ [%]	Напомена
КК-9	11.864	7.954	3.910	33%	
КК-10	10.137	6.287	3.850	38%	
КК-11	5.590	5.977	-387	-7%	
КЈ-3	Ван функције				
КЈ-6	3.710	5.267	3.710	100%	
ВОВ-20	-	1.141	-	-	Тоалет
ВОВ-26	Ван функције				Електро соба
ВОВ-27	-	660	-	-	Електро соба
ВОВ-32	-	206	-	-	Канцеларија

Табела 4-9 Постојећи балансни извештај за опрему у машинској кућици 4

	ВУВ [l/s]	ВПВ / ВОВ [l/s]	СВ [l/s]	min СВ [%]	Напомена
КК-12	6.169	4.463	1.706	28%	
КК-13	6.298	3.169	3.129	50%	
КК-14	6.272	3.117	3.155	50%	
КК-15	9.476	4.475	5.001	53%	
КЈ-4	Ван функције				
ВОВ-21	-	1.144	-	-	Тоалет
ВОВ-28	Ван функције				Електро соба
ВОВ-29	Ван функције				Електро соба

Нове DOAS јединице су димензиониране с обзиром на минималну потребу свежег ваздуха за вентилацију и потребама за изbacивањем отпадног ваздуха према ASHRAE 62.1, али и са циљем да се зграда задржи у надпритиску према постојећем стању.

Табела 4-10 Проток ваздуха у пројектним условима за нове јединице

	Свеж ваздух [l/s]	Отпадни ваздух [l/s]	Отпадни ваздух из тоалета [l/s]
DOAS-1	9.020	7.847	1.173 (ВОВ-18)
DOAS-2	5.770	4.837	933 (ВОВ-19)
DOAS-3	3.910	2.769	1.141 (ВОВ-20)
DOAS-4	6.436	5.292	1.144 (ВОВ-21)

Ротациони регенератор је интегрални део сваке DOAS јединице и он обезбеђује искоришћење топлоте отпадног ваздуха и то:

- Отпадног ваздуха из вентилационих зона
- Отпадног ваздуха из тоалета који се спроводи постојећим каналима отпадног ваздуха.

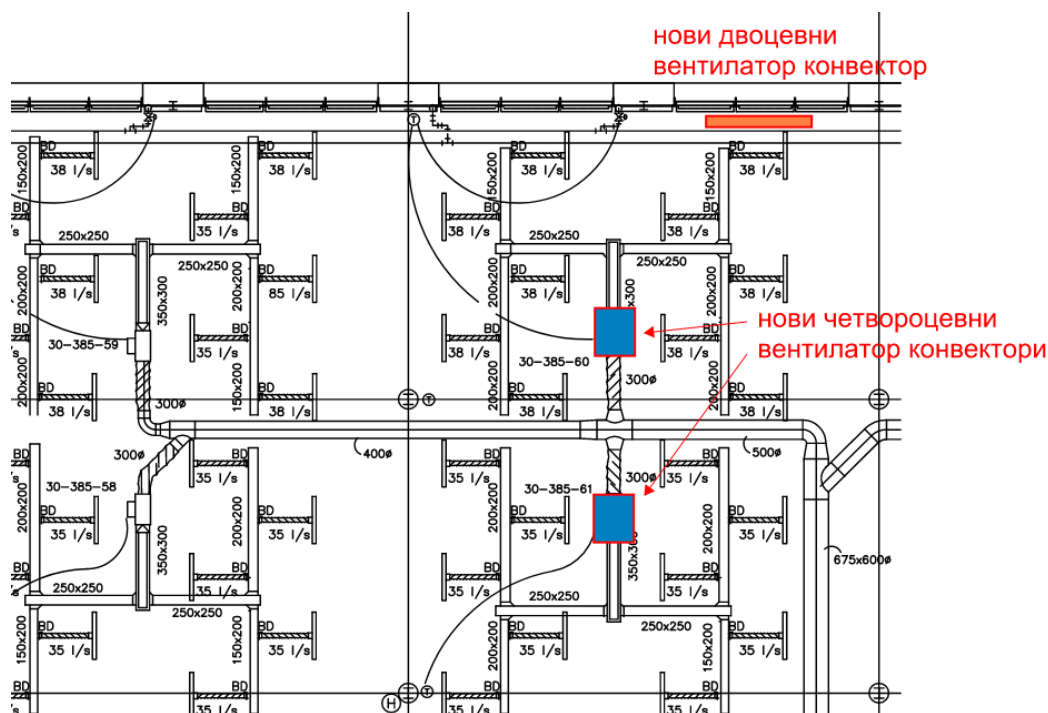
DOAS јединице укључују следеће компоненте:

- Ротациони регенератор топлоте (75% сензибилне ефикасности и 90% латентне ефикасности)
- Тепловодни (35% раствор етилен-гликола) грејач ваздуха повезан са централном котларницом преко размењивача топлоте.
- Хладњак са хладном водом повезан на постојеће чилере
- Вентилатор за свеж ваздух са фреквентном регулацијом
- Вентилатор за отпадни ваздух са фреквентном регулацијом
- Постојећи парни овлаживач

Постојећи канали за развод и поврат ваздуха могу у највећој мери да се искористе за нови систем вентилације. Само мрежа канала која повезује главне канале са новим терминалним јединицама у зонама треба да буде реконфигурисана. Постојећи канали за отпадни ваздух такође могу да се користе без икаквих измена.

Слика 4-5 приказује типичан распоред опреме на нивоу типичних зона. DOAS дистрибуира ваздух до усиса плафонских вентилатор конвектора. Вентилатор конвектори мешају свеж

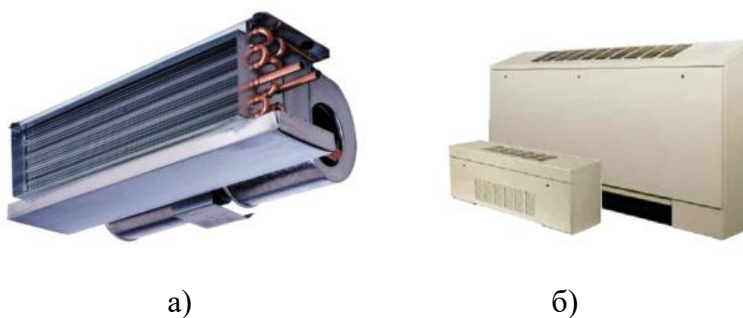
ваздух из DOAS јединице са локално рециркулисаним ваздухом из просторије. Потом се мешавина ваздуха у вентилатор ковенктору загрева или хлади и дистрибуира у просторију преко постојећих анемостата.



Слика 4-5 – Нова дистрибуција ваздуха за типичне зоне према КГХ-1.1

Опис зонских уређаја

Мера захтева уградњу 139 двоцевна парапетна вентилатор-конвектора за грејање који би били смештени испод прозора спољашњих зидова и 223 плафонска вентилатор-конвектора (193 двоцевна за хлађење и 30 четвороцевних за хлађење и грејање) који би били инсталирани у простору спуштеног плафона.



Слика 4-6 Типови вентилатор конвектор јединица а) хоризонтална јединица, б) вертикална парапетна јединица (<http://usacoil.com/2020/10/04/fan-coil-units/>)

За овакав систем са минимумом свежег ваздуха је неопходно обезбедити водено хлађење и у зимском периоду. Пошто постојећи чилери не могу да раде при ниским температурама, неопходна инсталација додатног чилера смештеног у машинској соби (котларници) са одвојеним ваздушно хлађеним кондензатором, укупног капацитета од 700 kW.

4.5.3 Процена трошкова

Процена трошкова ове мере узима у обзир следеће кораке:

- Демонтажа постојећих клима комора КК-1 до 15 и кровних јединица КЈ-1 и КЈ-2 и пра-теће опреме.
- Демонтажа и уклањање постојећих VAV кутија.
- Демонтажа и уклањање постојећих калорифера
- Инсталација 4 нове DOAS јединице.
- Инсталација новог чилера са одвојеним кондензатором за хлађење зими и током дела прелазног периода.
- Реконфигурација постојећег система за дистрибуцију ваздуха.
- Инсталација нове терминалне опреме за грејање и хлађење
 - 193 плафонска двоцевна вентилатор-конвектора за хлађење који ће бити пове-зани са плафонским анемоштатима у одговарајућој зони.
 - 139 парапетних двоцевних вентилатор-конвектора на месту постојећих ниско-температурских радијатора.
 - 30 плафонских четвороцевних вентилатор-конвектора за грејање и хлађење у зо-нама у којима тренутно постоје VAV кутије са догрејачима ваздуха (део зона на другом спрату).
 - 31 нови електрични калорифер на месту постојећих топловодних калорифера.
- Цевовод за развод хладне воде до вентилатор конвектора.
- Реконфигурација топловодног цевовода.
- Реконфигурација постојећег система ЦСНУ укључујући нове локалне и централне кон-тролере.

4.5.4 Предности

- Значајно смањење потрошње енергије за рад система за централну вентилацију.
- Додатно смањење потрошње енергије коришћењем контроле вентилације на основу концентрације угљендиоксида у одређеним зонама.
- Регенерација топлоте отпадног ваздуха.
- У највећој мери је могуће искористити постојећи систем канала за ваздух
- Смањење енергије за рад централних вентилатора.
- Регулација температуре у ноћном режиму не захтева рад централних вентилатора.
- Предложена опрема је индустријски прихваћена и једноставна за инсталацију, уз мо-гућност набавке по конкурентним тржишним ценама и ниске трошкове одржавања.
- Највећи део опреме која се мења у оквиру ове мере је већ при крају радног века или је теоријски радни век већ прошао.

4.5.5 Недостаци

- Иако би се емисија гасова стаклене баште смањила у односу на тренутну ситуацију, ова мера и даље користи природни гас за грејање.
- Механичко хлађење на нивоу зоне захтева нову мрежу цеви за хладну воду и посебан систем за одвод кондензата у читавој згради.
- Кровне јединице КЈ-1 и 2 су релативно нове и нису при крају животног века.
- Повећање потрошње енергије за рад локалних вентилатора (у вентилатор конвектор је-диницама).

4.6 КГХ-1.2 – DOAS са ротационим регенератором топлоте комбинован са VRF системом са рекуперацијом топлоте.

4.6.1 Опис мере и принципи моделовања

Мера је веома слична као и мера КГХ 1.1 и укључује следеће модификације система за КГХ:

- Замена централних клима комора новим DOAS јединицама које раде са 100% свежег ваздуха
- Замена постојећих топоводних калорифера на степеништима и предворјима са електричним
- Уградња VRF система укључујући спољашње и унутрашње јединице
- Коришћење постојеће котларнице као извора топлоте за водени круг VRF система
- Уградња ваздушног хладњака (dry cooler) за водени круг VRF система
- Демонтажа постојећих чилера

Концептуално решење централног система за вентилацију

Централни систем за вентилацију је идентичан као за меру КГХ 1.1, с тим што су хладњак и грејач у централним DOAS јединицама део VRF система.

Зонска терминална опрема

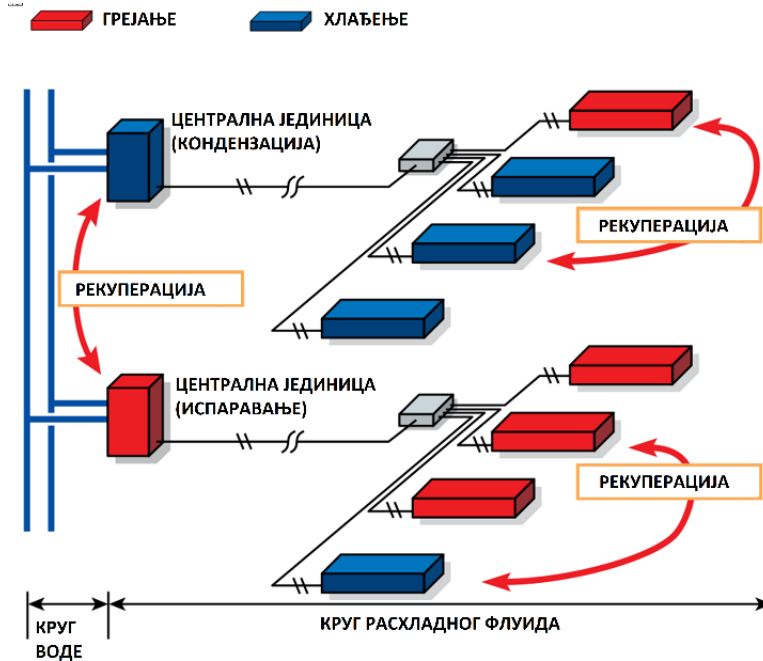
Замена постојећих калорифера електричним на идентичан начин као за меру КГХ 1.1.

Опис зонских терминалних јединица VRF система

Зонске јединице укључују разлите типове унутрашњих јединица троцевног VRF система које могу да се користе за активну рекуперацију топлоте.

Унутрашње јединице могу да се инсталирају као каналске, плафонске, парапетне итд.

Рекуперација топлоте у оквиру троцевних VRF система омогућава да се топлота из зона које се хладе директно пребаци у зоне у којима је потребно грејање. Ово омогућава симултано грејање и хлађење различитих просторија у оквиру једног VRF система уз минималну потрошњу енергије, јер просторија која се хлади представља извор топлоте за просторију која се греје, при чему се потребан рад компресора централне (спољашње) јединице значајно смањује или у појединим случајевима потпуно елиминише.



Слика 4-7 Схематски приказ VRF система са воденим кругом
http://cdn.agilitycms.com/mesca/productdown/CBds/03-c05_1624_12313_mitsubishi_citymulti_catalogue_outdoor_v3-water.pdf

Централне јединице VRF система су повезане на водени круг који служи као топлотни извор у периоду грејања, односно као топлотни понор у периоду хлађења. Предност VRF система са воденим кругом у односу на ваздушне VRF системе је несметан рад током читаве године, док је рад ваздушних система неефикасан или је потпуно обустављен при ниским спољашњим температурама (испод -12°C).



Слика 4-8 – Типична инсталација централних јединица VRF система са воденим кругом

Конфигурација VRF система у оквиру мере КГХ-1.2 укључује 17 централних VRF јединица које су повезане са укупно 139 парпетних и 223 каналске унутрашње јединице.

Уз то 4 централне VRF јединице опслужују грејаче и хладњаке централних клима комора.

4.6.2 Процена трошкова

Процена трошкова ове мере узима у обзир следеће кораке:

- Демонтажа постојећих клима комора КК-1 до 15 и КЈ-1 и 2 и пратеће опреме.
- Демонтажа и уклањање постојећих VAV уређаја.
- Демонтажа и уклањање постојећих калорифера
- Демонтажа топоводне мреже
- Демонтажа цеви за расхладну воду
- Демонтажа постојећих чилера
- Инсталација нових јединица DOAS-1 до 4.
- Инсталација VRF система
 - 17 централних јединица које снабдевају
 - 223 плафонске зонске јединице
 - 139 парапетне зонске јединице
 - 4 централне јединице које снабдевају грејаче/хладњаке у новим централним клима коморама
- Цевна мрежа за расхладни флуид VRF система
- Цевна мрежа за одвод кондензата
- Реконфигурација топоводног цевовода у примарном кругу.
- Реконфигурација постојећег система ЦСНУ укључујући нове локалне и централне контролере.

4.6.3 Предности

- Значајно смањење потрошње енергије за рад система за централну вентилацију.
- Рекулпација топлоте отпадног ваздуха у централним јединицама за вентилацију.
- У највећој мери је могуће искористити постојећи систем канала за ваздух
- Смањење енергије за рад централних вентилатора.
- Регулација температуре у ноћном режиму не захтева рад централних вентилатора.
- Предложена опрема се често среће у пракси и једноставна за инсталацију, уз могућност набавке по компететивним тржишним ценама и ниске трошкове одржавања.
- Највећи део опреме која се мења у оквиру ове мере је већ при крају животног века или је теоријски животног век већ прошао.
- Смањење захтеваног капацитета котларнице и потрошње гаса
- Рекулпација топлоте на нивоу зона, када неке зоне траже грејање, а неке хлађење.
- Уклањање постојећег чилерског постројења

4.6.4 Недостаци

- Иако би се емисија гасова стаклене баште смањила у односу на тренутну ситуацију, ова мера и даље користи значајне количине природног гаса за одржавање температуре воденог круга у периоду када је загревање простора доминантно у односу на хлађење.
- Механичко хлађење на нивоу зоне захтева нову мрежу цеви за одвод кондензата у читавој згради.
- КЈ-1 и 2 су релативно нове и нису при крају животног века.
- Повећање потрошње енергије за рад локалних вентилатора (у унутрашњим VRF јединицама)
- Релативно висока цена периметарских парапетних јединица у односу на топоводне радијаторе или конвекторе.

4.7 КГХ-1.3 – DOAS са ротационим регенератором комбинован са расхладним гредама

4.7.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера укључује следеће:

- Замена постојећих централних клима комора са новим јединицама
- Замена постојећих топоводних калорифера електричним
- Уградња расхладних греда у плафон првог и другог спрата
- Замена постојећих радијатора новим, предвиђеним за нискотемпературско грејање
- Уградња новог чилера за хлађење унутрашњих зона током зимског и прелазног периода

Пројектовање и извођење система за централну вентилацију

Централни систем за вентилацију који је предвиђен у оквиру ове мере има суштинску разлику у односу на DOAS описане у мерама КГХ 1.1 и КГХ 1.2. Разлика је у томе, што су за систем који ради у комбинацији са расхладним гредама рециркулација и мешање ваздуха неопходни. Наиме, систем активних расхладних греда функционише без локалних вентилатора у зонама, какве имају вентилатор-конвектори или зонске јединице ВРВ система. Примарна струја ваздуха која се допрема од централне клима коморе, индукује секундарно струјање ваздуха из просторије. Струја коју чине помешани примарни ваздух и секундарни ваздух има довољан запремински проток и брзину да обезбеди адекватно хлађење простора и дистрибуцију ваздуха. Међутим, постоје ограничење везано за минимални неопходни проток примарног ваздуха неопходног за адекватно индуковање секундарне струје, које износи 30 l/s по дужном метру расхладне греде. Због тога, од централне јединице до зоне је неопходно допремити више ваздуха него што је минимално неопходна количина за вентилацију, тако да централне клима коморе не могу да раде само са 100% свежег ваздуха, већ је неопходна и рециркулација.

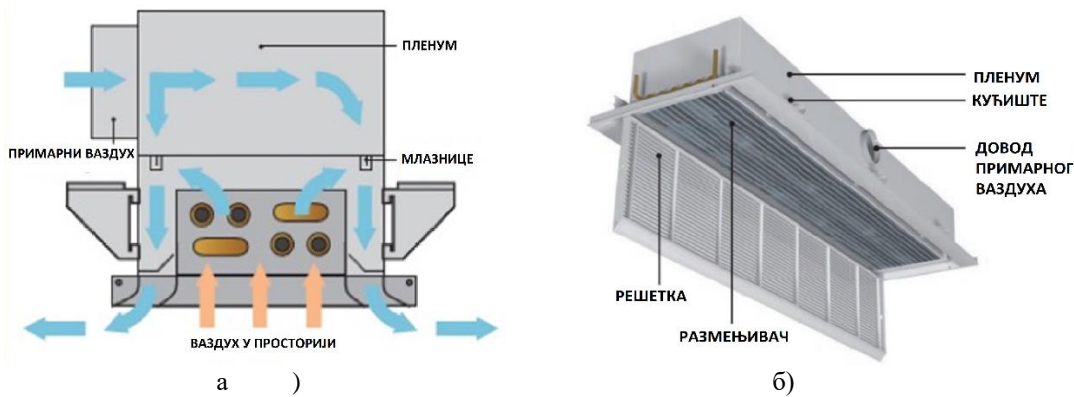
С обзиром на то клима коморе за ову меру су димензионисане према табели:

Табела 4-11 Проток ваздуха у пројектним условима за нове јединице

	свеж ваздух [l/s]	разводни ваздух [l/s]	повратни ваздух [l/s]	отпадни ваздух [l/s]	Отпадни ваздух из тоалета [l/s]
КК-1	9,020	10,765	1,745	7,847	1,173
КК-2	5,770	6,886	1,116	4,837	933
КК-3	3,910	4,666	756	2,769	1,141
КК-4	6,436	7,681	1,245	5,292	1,144

Зонске терминалне јединице

Од терминалних јединица у овој мери се користе активне расхладне греде, нискотемпературски радијатори по периметру зграде и електрични калорифери у одговарајућим просторима (степеништа, машинска соба и сл.).



Слика 4-9: а) Дијаграм протока ваздуха за типичну активну расхладну греду; б) Компоненте типичне активне расхладне греде

Примарни ваздух који пролази кроз млазницу расхладне греде индукује већу количину ваздуха из просторије да почне да струји кроз елемент. Мешавина примарног (из система за вентилацију) и индукованог (из просторије) ваздуха прелази преко размењивача топлоте. Тај ваздух се потом дистрибуира у просторији.

Расхладне греде у оквиру ове мере су само двоцевне, за хлађење. Изузетак су оне греде које се налазе у просторима испод плафона другог спрата, где су предвиђене четвороцевне греде, за хлађење и грејање.

На спољашњим зидовима, где се тренутно налазе конвектори, они треба да буду замењени нискотемпературским јединицама.

У овој мери хладну воду би обезбеђивали постојећи чилери, при чему температура хладне воде у секундарном кругу који снабдева расхладне греде не сме да буде нижа од 16°C , да би се избегла појава кондензата на расхладним гредама. При таквој температури расхладне воде, чилери раде са нижим степеном компресије, односно са знатно вишом ефикасношћу у односу на случај када је температура расхладне воде 7°C , као при референтним условима рада објекта.

Међутим, да би се обезбедило сушење ваздуха на централним клима коморама, потребно је да се расхладни систем раздвоји на два круга, при чему би један са вишом температуром расхладне воде опслуживао расхладне греде, док други круг опслужује хладњаке клима комора температура воде буде 7°C . Због тога, постојећи чилери ипак морају да раде са нижом температуром расхладне воде, без повећања ефикасности.

Осим тога, неопходно је обезбедити додатни чилер који би покрио потребе за хлађењем током зимског периода у унутрашњим просторијама, с обзиром на то да постојећи чилери не могу да раде при ниским температурама спољашњег ваздуха.

Топла вода за активне греде, радијаторе и остале грејне уређаје и даље ће бити обезбеђена постојећом котларницом, али у другачијем, нискотемпературском режиму (50/40) који треба да обезбеди рад топловодних котлова на природни гас у кондезнационом режиму током читаве грејне сезоне, а самим тим и вишу ефикасност.

За овакав систем са минимумом свежег ваздуха је неопходно обезбедити водено хлађење и у зимском периоду. Пошто постојећи чилери не могу да раде при ниским температурама, неопходна инсталација додатног чилера смештеног у машинској соби (котларници) са одвојеним ваздушно хлађеним кондензатором, укупног капацитета од 700 kW .

4.7.2 Процена трошкова

Процена трошкова имплементације ове мере узима у обзир следеће кораке:

- Демонтажа и уклањање постојећих клима комора КК-1 до 15.
- Демонтажа и уклањање постојећих кровних јединица КЈ-1 и 2
- Демонтажа и уклањање ВАВ кутија
- Демонтажа и уклањање постојећих топоводних калорифера.
- Демонтажа и уклањање постојећих радијатора из ободних просторија
- Монтажа нових кровних јединица КК-1 до 4, по једна у свакој машинској кућици на крову.
- Инсталација додатног чилера капацитета 700 kW за хлађење зими.
- Инсталација 1,350 расхладних греада
 - 300 четвороцевних за хлађење и грејање у унутрашњим просторијама другог спрата (без фасадних зидова, али под кровом)
 - 1.050 двоцевних само за хлађење
- Повезивање расхладних греада са каналима за дистрибуцију ваздуха
- Нови круг за дистрибуцију хладне воде од чилера до расхладних греада
- Реконструкција цефног система за дистрибуцију топле воде
- Монтажа нових нискотемпературских радијатора
- Повезивање канала за отпадни ваздух на централне клима коморе, да би се искористила топлота отпадног ваздуха
- Надоградња ЦСНУ да би се инкорпорирала постојећа опрема

4.7.3 Предности

- Искоришћавање топлоте отпадног ваздуха
- Могућност да се делимично искористе постојећи канали за развод и поврат ваздуха
- Могућност да се делимично искористи постојећа цевна мрежа за дистрибуцију топле воде
- Смањење енергије за рад централних вентилатора
- У односу на мере КГХ-1.1 и КГХ-1.2 предност је што нема вентилатора у зонској опреми; тако да је избегнута потрошња енергије за рецикулацију ваздуха у оквиру зоне, а уз то зонски елементи не захтевају повезивање на електричну мрежу.
- Предложена опрема је у употреби у инжењерској пракси већ годинама и једноставна је за инсталацију и одржавање
- Већина централне и термиланле КГХ опреме која би била замењена у оквиру ове мере, већ је прекорачила или је при крају свог теоријског животног века

4.7.4 Недостаци

- И поред смањења емисије гасова стаклене баште, ова мера и даље захтева употребу природног гаса
- Кровне јединице КЈ-1 и 2 су релативно нове, инсталиране 2002.
- Влажност ваздуха у згради и температура расхладне воде морају да буду пажљиво контролисани да не би дошло до појаве кондензата на расхладним гредама.

4.8 КГХ-1.4 – Замена постојећих клима комора ефикаснијим системима са ротационим регенератором топлоте отпадног ваздуха и минималном количином свежег ваздуха према ASHRAE стандарду. Задржава се постојећа централна дистрибуције ваздуха. Увођење нискотемпературског грејања. Замена постојећих топоводних калорифера електричним.

4.8.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера укључује следеће основне измене на КГХ системима:

- Замена централних клима комора и повезаних вентилатора отпадног ваздуха новим јединицама
- Замена постојећих топоводних калорифера електричним
- Замена постојећих VAV кутија новим, истих карактеристика
- Замена постојећих конвектора и каналских догрејача ваздуха нискотемпературским јединицама.

Идејно решење централног система за вентилацију

Централни систем за вентилацију укључује замену свих постојећих јединица КК-1 до 15 и КЈ-1 и 2 са четири нове јединице.

Потребна минимална количина свежег ваздуха за вентилацију је за сваку нову клима комору дефинисана према ASHRAE 62.1 2016 стандарду. Пошто ове нове клима коморе треба да обезбеде и вентилацију и хлађење (укључујући вентилационе, соларне, трансмисионе и унутрашње добитке), оне морају да раде са мешавином свежег и повратног ваздуха, а укупан проток ваздуха је одређен према потребама хлађења и знатно је већи од минимално потребног за вентилацију. Уколико се инсталира по једна нова клима комора по свакој машинској кућици, тада капацитет вентилатора треба да буде око 30.000 l/s. Пошто је ово висока вредност за стандардне комерцијалне системе, препоручује се употреба две клима коморе по једној машинској кућици, тј. за једну групу зона. Капацитети јединица укључујући потребе за свежим ваздухом, приказани су у Табела 4-12.

Табела 4-12 – Преглед капацитета нових клима комора и придружених вентилатора за отпанди ваздух

	КК СВ [l/s]	КК SA [l/s]	КК EA [l/s]	WR Отпадни ваздзх [l/s]
КК-1.1	4.510	18.262	3.924	1173 (BOB-18)
КК-1.2	4.510	18.262	3.924	
КК-2.1	2.885	14.483	2.419	933 (BOB-19)
КК-2.2	2.885	14.483	2.419	
КК-3.1	1.955	15.650	1.385	1.141 (BOB-20)
КК-3.2	1.955	15.650	1.385	
КК-4.1	3.218	14.108	2.646	1.144 (BOB-21)
КК-4.2	3.218	14.108	2.646	

Свака клима комора садржи ротациони регенератор топлоте за искоришћење отпадне топлоте ваздуха из две струје:

- Струје отпадног ваздуха из тоалета.
- Струје отпадног ваздуха који се извлачи директно из вентилисаног простора

Главне компоненте нових клима комора су

- Ротациони регенератор топлоте (75% ефикасност регенерације осетног дела топлотне енергије и 90% ефикасност регенерације латентног дела)
- Топловодни грејач ваздуха који се снабдева из котларнице, преко размењивача.
- Хладњак који је повезан са чилерским постројењем
- Вентилатор разводног ваздуха са фреквентном регулацијом и
- Вентилатор повратног ваздуха са фреквентном регулацијом
- Парни овлаживач

Постојећи канали разводног и повратног ваздуха не би били модификовани у оквиру имплементације ове мере, него би се користили онакви какви јесу.

Постојеће ВАВ кутије се замењују по идентичним, само новим. Нови актуатори и локални ЦСНУ контролери такође су укључени у ову меру.

Замена терминалних зонских јединца система топоводног грејања, које раде у високотемпературском режиму, нискотемпературским моделима.

Замена постојећих калорифера се спроводи на идентичан начин као у мери КГХ 1.1

Ова мера укључује замену постојећих догрејача ваздуха и конвектора по периметру зграде нискотемпературским јединицама.

Чилер са одвојеним кондензатором за хлађење током зимске сезоне

Ова мера укључује и уградњу чилера од 1.000 kW са одвојеним ваздушно хлађеним кондензатором, који ће бити коришћен током зимског периода, када постојећи чилери не могу да раде.

4.8.2 Процена трошкова

Процена трошкова обухвата следеће:

- Демонтажа постојећих клима комора КК-1 до 15 и КЈ-1 и 2 и пратеће опреме.
- Демонтажа и уклањање постојећих ВАВ кутија.
- Демонтажа и уклањање постојећих калорифера
- Демонтажа и уклањање постојећих конвектора

- Инсталација нових јединица КК-1 до 8.
- Инсталација нових ВАВ кутија на месту постојећих.
- Инсталација нових нискотемпературских каналских догрејача ваздуха
- Инсталација нове терминалне опреме за грејање и хлађење
 - 193 плафонска двоцевна вентилатор конвектор уређаја за хлађење који ће бити повезани са плафонским анемоштатима у одговарајућој зони.
 - 139 парпетних двоцевних вентилатор конвектор уређаја на месту постојећих радијатора.
 - 30 плафонских четвороцевних вентилатор конвектор уређаја за грејање и хлађење у зонама у којима тренутно постоје ВАВ кутије са догрејачима ваздуха (део зона на другом спрату).
 - 31 нови електрични калорифер на месту постојећих топловодних калорифера.
- Цевовод за развод хладне воде до вентилатор-конвектора.
- Реконфигурација топловодног цевовода.
- Реконфигурација постојећег система ЦСНУ укључујући нове локалне и централне контролере.

4.8.3 Предности

- Рекуперација топлоте отпадног ваздуха обезбеђује уштеде енергије.
- Потпуно искоришћење постојећих канала за ваздух и топловодне мреже уз минималне модификације у зони прикључивања нових клима комора
- Предложена опрема је индустријски прихваћена и једноставна за инсталацију, уз могућност набавке по компететивним тржишним ценама и ниске трошкове одржавања.
- Највећи део опреме која се мења у оквиру ове мере је већ при крају животног века или је теоријски животно век већ прошао.

4.8.4 Недостаци

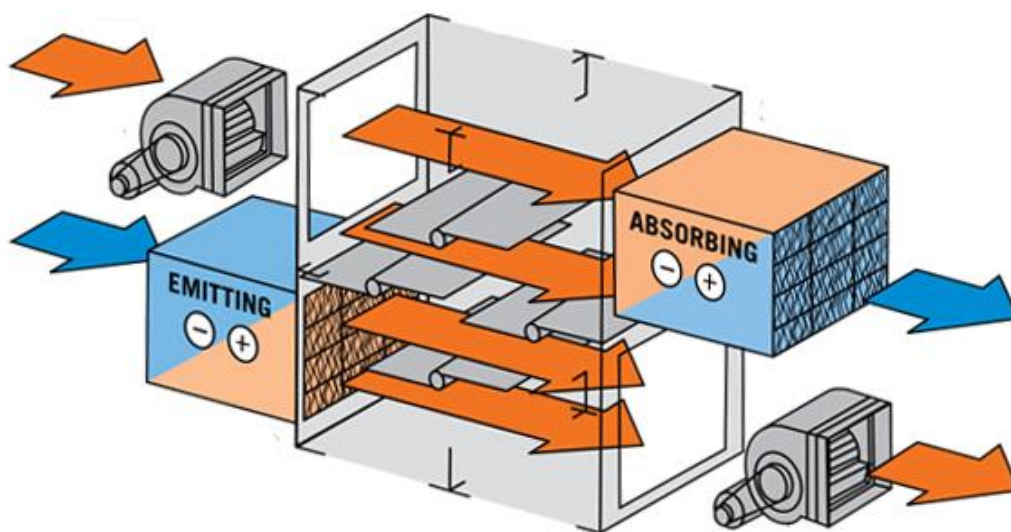
- И поред смањења емисије гасова стаклене баште и даље је изражена употреба природног гаса.
- КЈ-1 и 2 су релативно нове и нису при крају радног века.

4.9 КГХ-2 – КГХ-1.x са двојезгарним регенератором топлоте.

4.9.1 Опис мере и основни принципи моделовања

Ова мера подразумева исту конфигурацију свих система, централне и зонске опреме као код мера КГХ-1.1 до КГХ-1.4, осим што се за искоришћење топлоте отпадног ваздуха уместо ротационог користи двојезгарни регенератор.

Двојезгарни регенератор користи два алуминијумска језгра тако што помоћу сета клапни са моторима периодично (сваког минута) мења путању струјања ваздуха, тако да се језгра, која су заправо акумулатори топлоте, наизменично пуне и празне.



Слика 4-10 – Шематски приказ двојезгарног регенератора (<https://www.tempBOBnorthamerica.com/how-heat-recovery-works/>)

Јединица је моделована са 89% ефикасности рекулериције сензибилног дела топлоте и 75% ефикасности рекулериције латентног дела топлоте. Због тога, уштеде су у одређеној мери другачије него када се користи ротациони регенератор који има нижу ефикасност коришћења осетног дела топлотне енергије, али вишу ефикасност коришћења латентног дела топлотне енергије.

4.9.2 Предности

- Боље искоришћење осетног дела топлотне енергије у регенератору, што доводи до додатног смањења потрошње енергије за грејање и хлађење
- Овакав регенератор може да ради и при нижим температурама спољашњег ваздуха него ротациони регенератор

4.9.3 Недостаци

- Нижа ефикасност рекулериције латентног дела топлотне енергије
- Инвестициони трошкови и трошкови током животног века су нешто виши код двојезгарног регенератора а него код ротационог

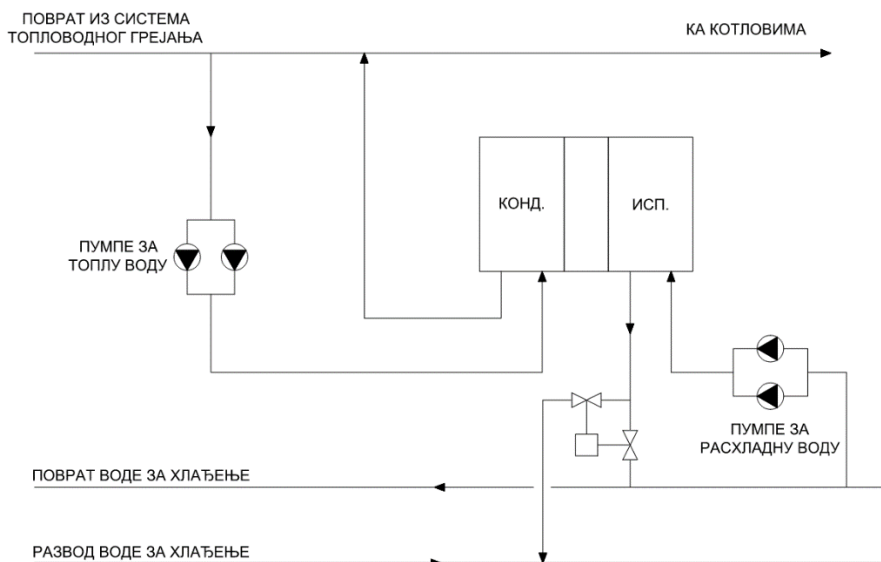
4.10 КГХ-3 – КГХ-1.x са рекуперативним чилером

4.10.1 Опис мере и основни принципи моделовања

Ова мера за уштеду енергије и смањење емисије гасова стаклене баште има смисла само у регијама и државама тј. електро-енергетским системима где је фактор емисије гасова стаклене баште за електричну енергију низак, тј. уколико се електрична енергија производи претежно из обновљивих извора енергије или из нуклеарне енергије.

Ова мера подразумева исту конфигурацију свих система, централне и зонске опреме као код мера КГХ-1.1, КГХ-1.3 и КГХ-1.4. Разлика је у начину хлађења у зимском периоду.

Уместо чилера са ваздушно хлађеним кондензатором какав се користи код мера КГХ-1.1 и КГХ-1.3, односно економајзера („бесплатно хлађење“ повећањем количине спољашњег ваздуха) код мере КГХ-1.4, уграђује се рекуперативни чилер, који са једне стране хлади разводни ваздух, док се отпадна топлота са кондензатора предаје у систем топловодног грејања.



Слика 4-11 – Схема рада рекуперативног чилера

Основне претпоставке коришћење при моделовању ове мере су следеће:

- Номинални фактор грејања рекуперативног чилера у пројектним условима износи 4,9 (на основу података произвођача)
- Пројектни услови:
 - Температура воде на улазу у кондензатор 39°C
 - Температура воде на изласку из кондензатора 49°C
 - Разводна температура расхладне воде је 7°C
 - Повратна температура расхладне воде је 12°C

У табели је приказ укупне топлотне енергије на месечном нивоу коју рекуперативни чилер испоручује систему за грејање:

Табела 4-13 Производња топлотне енергије за грејање рекуперативног чилера

Период	Топлотна енергија (kWh)
Јануар	81,981
Фебруар	74,558
Март	50,8306
Април	27,8303
Мај	1,650
Јун	0
Јул	0
Август	0
Септембар	33,094
Октобар	54,337
Новембар	78,894
Децембар	83,047
Укупно	486,223

4.10.2 Процена трошкова

Процена трошкова за имплементацију ове мере узима у обзир следеће:

- Набавка и монтажа рекуперативног чилера капацитета 1,000 kW
- Повезивање новог чилера на постојећи круг воденог хлађења
- Повезивање новог чилера (са стране кондензатора) на постојећи топоводни систем за грејање
- Набавка и монтажа две циркулационе пумпе за круг између кондензатора и система за грејање
- Интеграција новог чилера на ЦСНУ

4.10.3 Предности

- Рекуперативни чилер ради по принципу топлотне пумпе уз релативно висок фактор грејања, што смањује укупну потрошњу енергије потребне за грејање.
- Коришћењем рекуперативног чилера смањује се потрошња природног гаса за грејање, што је предност у случајевима када се електрична енергија производи из извора/енергената чија је еквивалентна емисија гасова стаклене баште је нижа него за природни гас

4.10.4 Недостаци

- Овом мером је могуће само смањити потрошњу природног гаса за грејање, али не и потпуно је елиминисати

4.11 КГХ-4.1 – Замена котлова за грејање на природни гас са електричним

4.11.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера подразумева замену постојећих кондензационих котлова на природан гас електричним котловима, јер је коефицијент емисије гасова стаклене баште у посматраној области далеко мањи за електричну енергију него за природни гас.

На основу референтног модела објекта, утврђено је да је потребан капацитет електричног котла износи 1,700 kW.

Ова мера укључује демонтажу и уклањање постојећа четири котла на природни гас (880 kW сваки) са два електрична котла еквивалентног укупног капацитета.

Постојеће електричне инсталације објекта имају довољан капацитет да подрже пораст у потражњи дефинисан овом мером.

Основе претпоставке моделовања:

- Ефикасност електричних котлова процењена је као константна вредност од 99%
- Након имплементације мере, максимална потребна снага електричне енергије на месечном нивоу се значајно мења, што је приказано у Табела 4-14

Табела 4-14 – максимална електрична снага по месецима за референтну годину и након имплементације мере КГХ-4.1

Месец	Измерено [kW]	Усклађени референтни модел [kW]	КГХ 4.1 [kW]
JAN	1.019	731	2716
FEB	1.039	730	2665
MAR	1.003	792	2194
APR	994	884	1656
MAY	1.316	1164	1164
JUN	1.381	1203	1203
JUL	1.445	1143	1143
AUG	1.424	1145	1145
SEP	1.438	1142	1161
OCT	1.244	729	1440
NOV	941	701	2279
DEC	968	695	2573

4.11.2 Процена трошкова

Процена трошкова у оквиру ове мере обухвата:

- Демонтажу и уклањање четири постојећа гасна котла
- Инсталацију два електрична котла од по 1.600 kW
- Модификацију цевне мреже примарног круга топле воде ради прилагођавању новој конфигурацији котловског постројења
- Реконфигурација постојећег система ЦСНУ укључујући нове локалне и централне контролере.

4.11.3 Предности

- Уобичајени тип КГХ опреме, једноставан за монтажу и руковање. Опрема је лако доступна на тржишту по компетитивним ценама.

4.11.4 Недојтаци

- Максимална ангажована електрична снага је екстремно повећана имплементацијом ове мере
- Електрични котло је мање ефикасан од топлотних пумпи или ВРВ система који такође користе електричну енергију
- Постојећи котлови су релативно нови, у првој половини свог животног века (инсталирани 2010.)

4.12 КГХ-4.2. – Допунски електрични котло за грејање који ради само мимо вршне потрошње електричне енергије

4.12.1 Опис мере и принципи моделовања

Основна идеја ове мере је да се у периоду са нижом ангажованом електричном снагом, користи електрични котло за загревање простора и припрему санитарне топле воде.

Капацитет електричног котла у овој мери је ограничен тренутном потражњом електричне енергије од осталих потрошача.

Потрошња електричне енергије котла је процењена на основу:

- Губитака топлоте које систем за грејање треба да покрије
- Електричне снаге ангазоване од стране осталих потрошача у објекту
- Максималне месечне ангазоване електричне снаге (за одговарајући месец у референтном периоду)

На основу ове анализе утврђено је да максимални капацитет електричног котла који се користи с обзиром на наведена ограничења износи 698 kW.

Електрични котло који ради на овакав начин, био би ангажован током читавог периода грејања (5,084 часова годишње) покривајући 37% годишњих потреба за топлотном енергијом. Постојећи гасни котлови би морали да раде током 37% грејне сезоне (1.863 часова годишње) да би покрили преосталих 63% потреба за топлотном енергијом

4.12.2 Процена трошкова

Процена трошкова ове мере укључује следеће кораке:

- Набавка и уградња електричног котла капацитета 698 kW
- Повезивање електричног котла на постојећи примарни круг топле воде
- Уградња нових контролера за интеграцију котла у систем ЦСНУ

4.12.3 Предности

- Уобичајен тип опреме, једноставан за монтажу и руковање. Опрема је доступна на тржишту по компетитивним ценама.
- Нижи капацитет електричног котла него у мери КГХ 4.1
- Трошкови имплементације и експлоатације су значајно нижи у односу на меру КГХ-4.1

4.12.4 Недостаци

- Веома мале уштеде енергије
- Електрични котло је мање ефикасан од других електричних уређаја за производњу топлоте, попут топлотних пумпи или ВРВ система.
- Смањење емисије гасова стаклене баште је ниже него код осталих мера
- Повећање трошкова за енергију у односу на референтни сценарио

4.13 КГХ-4.3 – Допунски електрични котло за грејање спрегнут са акумулатором топлоте, који ради само мимо вршне потрошње електричне енергије

4.13.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера је идентична као КГХ-4.2 осим што је придодат акумулатор топлоте .

Додатни електрични котло спрегнут са акумулатором топлоте, функционисаће у три фазе.

ПРВА ФАЗА

Када се појави потреба за грејањем, електрични котло ће да се покрене да би покрио губитке топлоте, али само до те мере да не прекорачи максимално дозвољену ангажовану снагу на месечном нивоу. Уколико електрични котло задовољи потребе за топлотном енергијом са мање од 100% свог капацитета, а да максимална дозвољена ангажована електрична снага није достигнута, додатна снага електричног котла ће да буде искоршћена за пуњење акумулатора топлоте

Друга фаза

Када електрични котло ради са максималним дозвољеним капацитетом, а не успева да покрије укупну потребу за топлотном енергијом објекта, топлотна енергија из акумулатора биће додата у систем да би се покриле додатне потребе за грејањем

Трећа фаза

Уколико потребе за грејањем и даље нису у потпуности покривене, гасни котлови ће да стартују и покрију преосталу потребу за грејањем

4.13.2 Процена трошкова

Процена трошкова ове мере укључује следеће кораке:

- Набавка и уградња електричног котла капацитета 698 kW
- Повезивање електричног котла на постојећи примарни круг топле воде
- Уградња нових контролера за интеграцију котла у систем ЦСНУ
- Уградња акумулатора топлоте укупног капацитета 320 kWh (процењено на основу слободног простора у машинској соби) спрегнутог са електричним котлом и примарним кругом топле воде за грејање

4.13.3 Уштеда енергије – претпоставке и прорачун

Следеће основне претпоставке су коришћене при моделовању уштеда

- Ограничен капацитет електричног котла, с обзиром на часовну количину енергије потребну за грејање током референтног периода и ангажовану електричну снагу (часовну и максималну месечну) током истог периода
- Ограничен простор за смештање акумулатора топлоте
- Акумулатор топлоте је моделован као скуп резервоара (укупно 5) појединачне запремине од 1,57 m³ са температуром воде од 80°C.
- Губици топлоте у акумулатору топлоте су моделовани на основу дебљине изолације од 15 cm и часовних вредности температуре воде у акумулатору и котларнице
- Максимално топлотно оптерећење објекта је 1.700 kW

Према резултатима симулације, електрични котлови спрегнути са акумулатором топлоте, радили би током читавог периода грејања (5.084 часова годишње), покривајући 37% годишњих потреба за топлотном енергијом за грејање простора. Постојећи котлови на природни гас радили би токо 1.863 сати годишње, да покрију преосталих 63% потреба за топлотном енергијом за грејање простора.

4.13.4 Предности

- Опрема једноставна за инсталацију, руковање и одржавање.
- Релативно ниски инвестициони трошкови

- Електрични котлови су ефикаснији од гасних
- Нижи капацитет електричних котлова у поређењу са мером КГХ-4.1
- Повећана искоришћеност електричних котлова у поређењу са мером КГХ-4.2, услед коришћења акумулатора топлоте.
- Трошкови за енергију су доста нижи у поређењу са мером КГХ-4.1

4.13.5 Недостаци

- Услед ограничења у електричној снази, акумулатори топлоте се користе само током 159 сати годишње.
- Недовољно повећање уштеда енергије у односу на меру КГХ-4.2
- Електрични котло је мање ефикасан од других електричних уређаја за производњу топлоте, попут топлотних пумпи или ВРВ система.
- Смањење емисије гасова стаклене је релативно мало.
- Повећани трошкови енергије

4.14 КГХ-5 – Геотермална топлотна пумпа у комбинацији са КГХ-1.x

4.14.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера предвиђа коришћење геотермалне топлотне пумпе као примарног извора топлоте за грејање објекта. Услед ограниченог простора на парцели, разматран је само концепт са вертикалним бушотинама.

Ова мера је евалуирана у комбинацији са мерама КГХ-1.1 до КГХ-1.4 које раде са нискотемпературским топоводним грејањем.

Слика 5 идентификује зоне на парцелу у којима је могуће извођење вертикалних сонди. На основу расположиве површине, само зоне са зеленим површинама источно и северно од објекта (означене наранџастом и жутом бојом) су узете у разматрање.



Слика 4-12 – Потенцијалне локације за вертикалне бушотине

Могућа вредност топлоте која се узима из бушотине одређена је на основу следећих претпоставки:

- Свака бушотина је дубока 150 m
- Топлотна издашност појединачне бушотине је процењена на 12,5 kW, коришћењем специјализованог, индустријски прихваћеног, софтвера Gaia Geothermal¹⁰
- Слика 4-12 приказује површину доступна за вертикалне бушотине
- Уколико се 10 m усвоји као минимално растојање између две бушотине, максимални број вертикалних бушотина на овој локацији износи преко 300
- Слика 4-13 приказује укупан процењени капацитет геотермалног круга

¹⁰ www.gaiageo.com

Borehole Design Project Report - 2019-10-30

Project Name:

Loads File: Untitled.con

Project Start Date: 2019-10-30

Calculation Results

Design Method:	Design Day	COOLING	HEATING
Total Bore Length (ft):		9500.0	9500.0
Borehole Number:		19	19
Borehole Length (ft):		500.0	500.0
Ground Temperature Change (°F):		+0.2	+0.2
Unit Inlet (°F):		94.0	32.1
Unit Outlet (°F):		104.4	26.9
Peak Load (kBtu/Hr):		813.5	549.6
Total Unit Capacity (kBtu/Hr):		813.5	745.6
Peak Demand (kW):		72.7	55.7
Heat Pump EER/COP:		11.2	2.9
System EER/COP:		11.2	2.9
System Flow Rate (gpm):		203.4	137.4

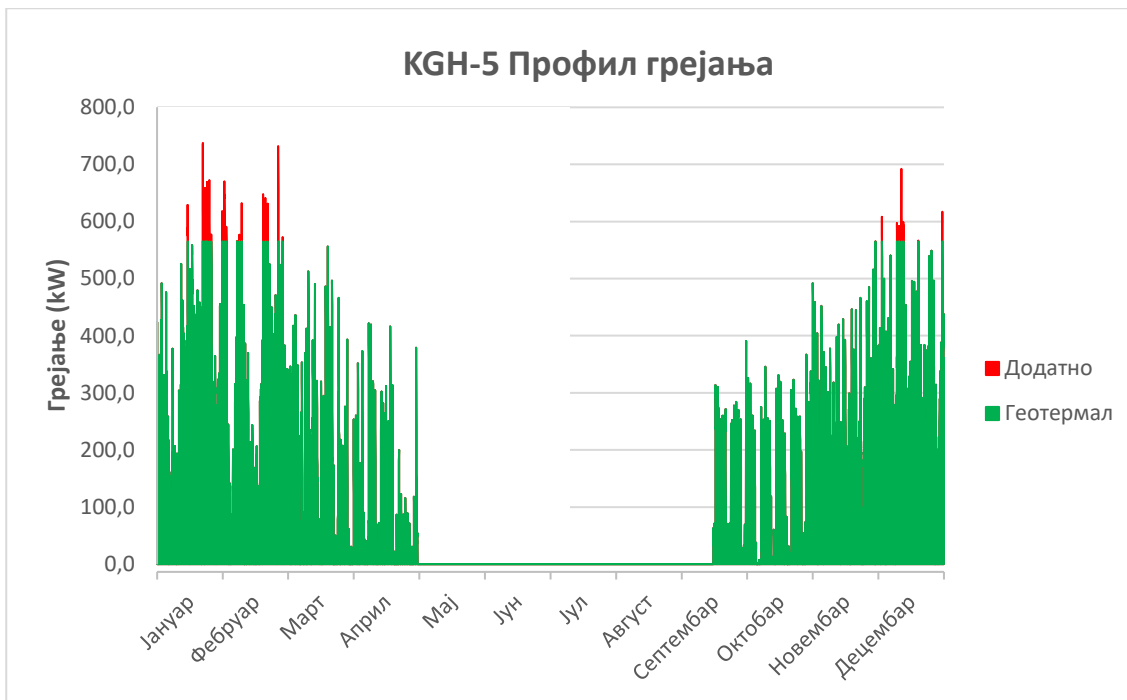
Input Parameters

Fluid		Soil	
Flow Rate	3.0 gpm/ton	Ground Temperature:	50.0 °F
Fluid:	25.0% Propylene Glycol	Thermal Conductivity:	1.50 Btu/(h*ft*°F)
Specific Heat (Cp):	1.01 Btu/(°F*lbm)	Thermal Diffusivity:	1.00 ft ² /day
Density (rho):	62.4 lb/ft ³		
Piping			
Pipe Type:	1 1/4 in. (32 mm)	Radial Pipe Placement:	Along Outer Wall
Flow Type:	Transition - SDR11	Borehole Diameter:	6.00 in
Pipe Resistance:	0.115 h*ft*°F/Btu	Grout Thermal Conductivity:	0.96 Btu/(h*ft*°F)
U-Tube Configuration:	Single	Borehole Thermal Resistance:	0.192 h*ft*°F/Btu
Pattern	Modeling Time Period		Extra kW
Vertical Grid Arrangement:	File	Prediction Time: 10.0 years	Pump Power 0.0 kW
Borehole Separation:	File	Long Term Soil Temperatures:	Cooling Tower Pump: 0.0 kW
Bores Per Circuit	File	Cooling: 50.2 °F	Cooling Tower Fan: 0.0 kW
Fixed Length Mode	On	Heating: 50.2 °F	Additional Power 0.0 kW
Default Heat Pumps		Optional Hybrid Loads	
Manufacturer:	WaterFurnace	Geo Peak (%)	Cooling 35% Heating 15%
Series:	NXW Reversible Chiller	Geo Total (%)	80% 59%
Design Heat Pump Inlet Load Temperatures:		Hybrid Peak (%)	65% 85%
	Cooling (WB) Heating (DB)	Hybrid Total (%)	20% 41%
Water to Air:	67 °F 70 °F		
Water to Water:	55 °F 100 °F		

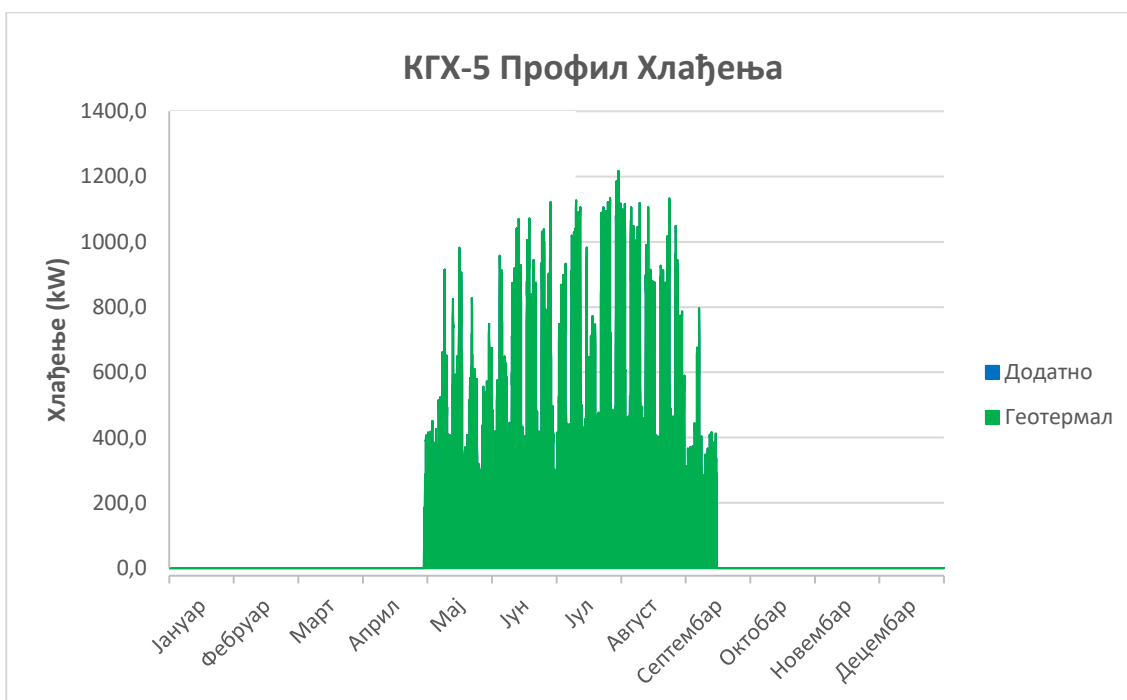
Слика 4-13: Геотермални круг је моделован помоћу софтвера Gaia Geothermal (www.gaiageo.com)

Према овој мери, геотермална топлотна пумпа треба да ради заједно са постојећим гасним колтовима, јер при ниским спољшњим температурама нема довољан капацитет да покрије укупне потребе за грејањем.

Слика 4-14 и Слика 4-15 илуструју резултате мере КГХ-5 у комбинацији са мером КГХ-1.4.



Слика 4-14 Геотермална топлотна пумпа током грејне сезоне



Слика 4-15 Геотермална топлотна пумпа током се зоне хлађења

Постојеће електричне инсталације имају довољан капацитет да подрже пораст инсталисане електричне снаге потребне за ову меру. Укупан капацитет који тренутне инсталације могу да подрже је 6.400 А. Са друге стране максимална измерена ангажована електрична снага у објекту износи 1.355,5 kW, што је око 37% капацитета инсталиране дистрибутивне мреже.

4.14.2 Процена трошкова

Процена капиталних трошкова за имплементацију ове мере укључује следеће ставке:

- 67 вертикалних бушотина равномерно распоређених северно и источно на парцели
- Монтажа цеви за геотермални круг комбиновано са два разводна и повратна колектора за источну и северну зону бушотина
- Две топлотне пумпе вода-вода.
- Две циркулационе пумпе за примарни круг геотермалних пумпи са стране потрошача
- Размењивач топлоте плочастог типа

4.14.3 Основне претпоставке за процену уштеда

Основне претпоставке за моделовање уштеда енергије:

- Излазна температура воде из топлотне пумпе треба да се одржава у границама између 49°C и 38°C са стране потрошача
- Одржати 7°C температуру воде за хлађење објекта са стране потрошача
- 92,1% годишње потребне енергије за грејање би било обезбеђено радом геотермалних топлотних пумпи. Постојећа котларница би радила да покрије преосталих 7,9% (Слика 4-14).
- Геотермална топлотна пумпа би могла да покрије све постојеће потребе за хлађењем (Слика 4-15).
- Геотермални круг ће да ради када год топлотно оптерећење постоји и биће коришћен као примарни извор грејања.
- Постојећи котлови на гас ће бити задржани као допунски извор топлоте када капацитет топлотних пумпи није довољан

4.14.4 Предности

- Замена фосилних горива (природни гас) обновљивим изворима енергије и електричном енергијом
- Стабилан рад геотермалних топлотних пумпи услед малих варијација у температури топлотног извора
- Смањење трошкова за енергију као последица коришћења обновљивих извора
- Значајно смањење емисије угљендиоксида

4.14.5 Недостаци

- Високи инвестициони трошкови за радове на прављењу геотермалног круга
- Недовољан капацитет да би се у потпуности заменила употреба гаса

4.15 КГХ-6 – Топлотна пумпа ваздух-вода у комбинацији са КГХ-1.х

4.15.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера се од мере КГХ-5 разликује само по томе што се уместо геотермалне топлотне пумпе (вода-вода) користи аеротермална топлотна пума (ваздух-вода). С обзиром да ефикасност (COP) и капацитет топлотне пумпе ваздух-вода опадају са снижавањем температуре спољашњег ваздуха и да је при ниским температурама (често већ испод -10°C) рад ових топлотних пумпи често онемогућен или није препоручен од стране произвођача, одабир је извршен тако да топлотна пумпа покрива целокупан топлотни капацитет објекта на температури до -5°C , јер је до приближно те температура могуће остварити довољно високу температуру разводне воде у систему топловодног грејања, уз стабилан рад топлотне пумпе и COP преко 2. При температурама испод -5°C топлотне пумпе се потпуно гасе, а грејање преузимају гасни котлови.

Табела 4-15 Зависност кључних радних параметара топлотне пумпе ваздух-вода од температуре спољашњег ваздуха

Спољна јединица			Ел. Карактеристике		Унутрашња јединица					
Темп. Спољ. Вазд. [$^{\circ}\text{C}$]	Темп. Исп. [$^{\circ}\text{C}$]	Топлотни проток на испаривачу [W]	Струја на комп. [A]	Ел. снага [W]	Темп. Конд. [$^{\circ}\text{C}$]	Проток воде [l/s]	Темп. воде из конд [$^{\circ}\text{C}$]	ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	Грејање [W]	Фактор грејања [-]
-21	-27	2.320	23,1	5.140	43	1	40,5	1,7	7.350	1,43
-15	-22	4.360	21,5	4.820	43			2,2	9.070	1,88
-9	-18	6.320	20,9	4.690	43			2,6	10.900	2,32
-4	-13	852	19,6	4.440	43			3	12.900	2,89
2	-8	10.700	18,8	4.270	43			3,5	14.800	3,48
7	-4	12.900	18,1	4.120	42			4	16.900	4,09
13	1	15.100	17,5	3.980	42			4,5	19.000	4,77
18	6	17.600	16,9	3.820	42			5,1	21.300	5,58
-21	-27	-	-	-	-			1	49	-
-15	-22	-	-	-	-	-				
-9	-18	5.590	24,3	5.540	51	2,6	10.900			1,99
-4	-13	7.580	22,9	5.250	51	3	12.700			2,42
2	-8	9.530	22	5.050	51	3,4	14.500			0,86
7	-4	11.500	21,2	4.890	51	3,9	16.300			3,33
13	1	13.600	20,6	4.730	51	4,3	18.200			3,85
18	6	15.900	19,8	4.540	50	4,8	20.300			4,47

4.15.2 Процена трошкова

Процена инвестиционих трошкова за имплементацију ове мере узима у обзир следеће:

- Набавка и уградња топлотне пумпе ваздух-вода капацитета 800 kW на температури од -5°C .
- Размењивач топлоте плочастог типа и циркулационе пумпе за спрезање постојећег система топловодног грејања и топлотне пумпе
- Размењивач топлоте плочастог типа и циркулационе пумпе за спрезање постојећег система воденог хлађења и топлотне пумпе
- Проширење ЦСНУ да би се интегрисала нова топлотна пумпа и пратећа опрема

4.15.3 Предности

- Смањење потрошње природног гаса за грејање простора
- Коришћење обновљивих извора енергије на локацији објекта
- Значајно смањење емисије гасова стаклене баште
- Значајно ниже инвестиције у односу на геотермалну топлотну пумпу

4.15.4 Недостаци

- Немогућност рада на ниским температурама због чега је неопходно користити и топловодне котлове

4.16 КГХ-7.1 – Замена парних овлаживача ваздуха на природни гас електричним

4.16.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера предвиђа замену постојећих парних овлаживача који раде на природни гас са електричним. Тренутно има 17 идентичних парних овлаживача, од којих сваки има капацитет по 25 kg/h.

Анализом постојећег стања укључујући тип и старост постојећих парних овлаживача на природни гас и кроз процес калибрације, њихова ефикасност је оцењена на 80%.

Претпостављена ефикасност нових електричних парних овлаживача износи 95%, на основу каталога различитих произвођача.

4.16.2 Процена трошкова

Процена инвестиционих трошкова за ову меру укључује следеће кораке:

- Набавка и монтажа 17 електричних парних овлаживача
- Демонтажа и уклањање постојећих парних овлаживача на природни гас
- Повезивање нових овлаживача на ЦСНУ

4.16.3 Предности

- Смањење потрошње финалне енергије услед повећања ефикасности парних овлаживача
- Смањење емисије гасова стаклене баште
- Постојећи парни овлаживачи су на истеку животног века и непоуздани у раду

4.16.4 Недостаци

- Повећани трошкови за енергију, јер је цена kWh електричне енергије виша него цена kWh од природног гаса.

4.17 КГХ-7.2 – Замена парних овлаживача на природни гас адијабатским овлаживачима (ултразвучним)

4.17.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера подразумева замену постојећих парних овлаживача ваздуха у клима коморама (укупно 17 јединица) са адијабатским овлаживачима еквивалентног капацитета.

Циљ ове мере је смањење потрошње електричне енергије у односу на меру КГХ 8.1 где се користи електрични овлаживач.

Адијабатски овлаживачи користе 93% мање електричне енергије у поређењу са електроотпорним или инфрацрвеним овлаживачима. Код конвенционалних парних овлаживача енергија се најпре троши на загревање и испаравање воде, која се онда у облику водене паре распршује у струју ваздуха. Код адијабатских овлаживача, вода се директно распршује у ваздушну струју у облику изразито ситних капи, тако да се енергија не троши на претходно загревање и испаравање. Међутим, пошто је енталпија воде која се распршује у ваздушну струју је нижа него код парних овлаживача, то значи да је и енталпија, односно температура влажног ваздуха низструјно од овлаживача нижа у случају адијабатских него код конвенционалних. Због тога је потребно предати додатну количину топлоте на загрејачу ваздуха клима коморе, како би се добила жељена вредност температуре убацног ваздуха.

4.17.2 Процена трошкова

Процена трошкова ове мере подразумева следеће:

- Демонтажа и уклањање 17 постојећих парних овлаживача
- Инсталација 17 ултразвучних адијабатских овлаживача
- Реконфигурација постојећег ЦСНУ укључујући нове локалне и централне контролере.

4.17.3 Предности

- Смањење потрошње природног гаса у односу на парне овлаживаче на природни гас.
- Нижа потрошња електричне енергије у односу на електричне парне овлаживаче.
- Постојећи парни овлаживачи су близу истека животног радног века.

4.17.4 Недостаци

- Високи инвестициони трошкови у поређењу са електричним парним овлаживачима
- У поређењу са парним овлаживачима ваздуха, потребно је повећање радног капацитета грејача ваздуха да би се остварила жељена температура убацног ваздуха

4.18 КГХ-8 – Замена постојећих ваздушно хлађених чилера ефикаснијим водено хлађе-ним чилерима са магнетним лежајевима

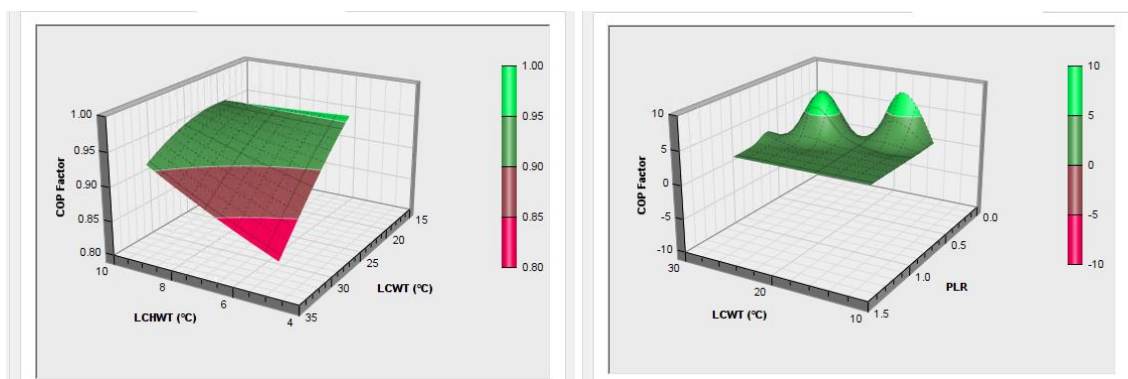
4.18.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера подразумева замену постојећих ваздушно хлађених чилера са јединицама истог капацитета, али више ефикасности.

Заменски чилери су изабрани према највишем стандарду ефикасности комерцијалних чилера. Тренутно, то су чилери који раде са компресионом технологијом заснованом на променљивом запреминском уделу (Variable Volume Ratio – VVR) расхладног флуида. Употреба ове технологије омогућава да степен компресије у чилерима буде увек прилагођен топлотном оптерећењу у објекту, тј. да се избегне виши степен компресије од минимално неопходног, што је код конвенционалних чилера вероватан случај током 95% радних сати. VVR технологија пружа оптималну ефикасност при свим радним условима.

У поређењу са постојећим чилерима нови чилери имају значајно побољшане перформансе при парцијалном оптерећењу.

Нови чилери имају побољшане перформансе при пуном и парцијалном оптерећењу. При моделовању ефикасности чилера, коришћени су подаци произвођача, како показује Слика 4-16.



Слика 4-16 COP чилера као функција температуре расхладне воде и парцијалног оптерећења

4.18.2 Процена трошкова

Евалуација трошкова имплементације ове мере обухвата:

- Демонтажу и уклањање три постојећа ваздухом хлађена чилера
- Инсталација три водом хлађена чилера високе ефикасности
- Инсталација нове расхладне куле
- Повезивање нових чилера на постојећи круг хладне воде
- Реконфигурација постојећег система ЦСНУ укључујући нове локалне и централне контролере.

4.18.3 Предности

- Предложена опрема представља индустријски стандард, тако да набавка, уградња и одржавање могу да се обезбеде под конкурентним условима.
- Смањење потрошње енергије за хлађење
- Поједностављено одржавање

4.18.4 Недостаци

- Високи инвестициони трошкови да би се повећала ефикасност процеса који је одговоран за мање од 5% укупне потрошње финалне енергије у објекту

4.19 КГХ-9.1 – Замена гасних котлова за припрему санитарне топле воде електричним

4.19.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера предвиђа замену енергента за припрему санитарне топле воде, тако што се постојећи котло на природни гас замењује електричним.

Претпостављена је ефикасност електричног котла од 98%.

4.19.2 Процена трошкова

Процена трошкова за имплементацију мере укључује:

- Набавку и монтажу два електрична котла капацитета 275 kW за припрему санитарне топле воде

4.19.3 Предности

- Опрема која се користи за имплементацију је уобичајена у пракси и једноставна за одржавање
- Електрични котлови су ефикаснији од гасних

4.19.4 Недостаци

- Максимална ангажована електрична снага се повећава
- Постојећи гасни котлови за припрему санитарне топле воде су на средини свог радног века и у релативно добром стању

4.20 КГХ-9.2 – Замена гасних котлова за припрему санитарне топле воде геотермалном топлотном пумпом

4.20.1 Опис мере и принципи моделовања

Ова мера предвиђа предгревање санитарне топле воде помоћу геотермалне топлотне пумпе. Пошто је цена постављана геотермалног круга сувише висока у односу на потенцијалне уштеде енергије за припрему санитарне топле воде, ова мера има текно-економског смисла само у комбинацији са мером КГХ-5.

Ипак, да би се јасно разумеле уштеде енергије везане за ову меру, она је евалуирана засебно.

4.20.2 Процена трошкова

Процена трошкова за имплементацију ове мере је идентична као за меру КГХ-5.

4.20.3 Предности

- Користи се опрема која већ има широку примену и позната је пројектантима, извођачима и једноставна за руковање и одржавање
- Топлотна пумпа троши значајно мање енергије у односу на електрични или гасни котло

4.20.4 Недостаци

- Максимална ангажована електрична снага се повећава
- Конвенционалне топлотне пумпе не могу да загреју санитарну топлу воду на неопходних 60°C, па је неопходно користити додатни извор топлоте, тј. гасни котлови и даље остају у употреби.

4.21 ОИЕ-1 – Соларни колектори

4.21.1 Опис мере

Основна идеја ове мере је да се смањи употреба природног гаса за припрему санитарне топле воде, коришћењем соларне енергије - локално доступног обновљивог извора енергије.

Соларни колектори апсорбују топлотну енергију сунца и преносе је на флуид или ваздух унутар колектора.



Слика 4-17 Соларни колектори инсталирани на крову (<http://www.solaramericasolutions.com/tag/solar-thermal-hot-water-systems/>)

Количина топлоте која се добија из соларних колектора у јединици времена веома варира и зависи од различитих фактора, укључујући време, облачност, температуру спољашњег ваздуха итд. [95].

Соларни колектори су интересантно решење јер производе топлотну енергију практично без икаквих оперативних трошкова и додатне потрошње енергије (осим циркулационе пумпе). Додатни проблем је што уколико је доступно више сунчеве енергије него што тренутно може да се искористи, долази до прегревања воде у резервоарима и колектори морају да се искључе. Већи акумулатори топлоте и резервоари топле воде могу да се користе, али су скупи и захтевају простор.

Други проблем што је највећа продукција топлотне енергије у летњем периоду, када су потребе за топлотом најниже. Због тога, соларни системи се обично димензионишу према потребама за припрему санитарне топле воде, да би се избегло прегревање резервоара.

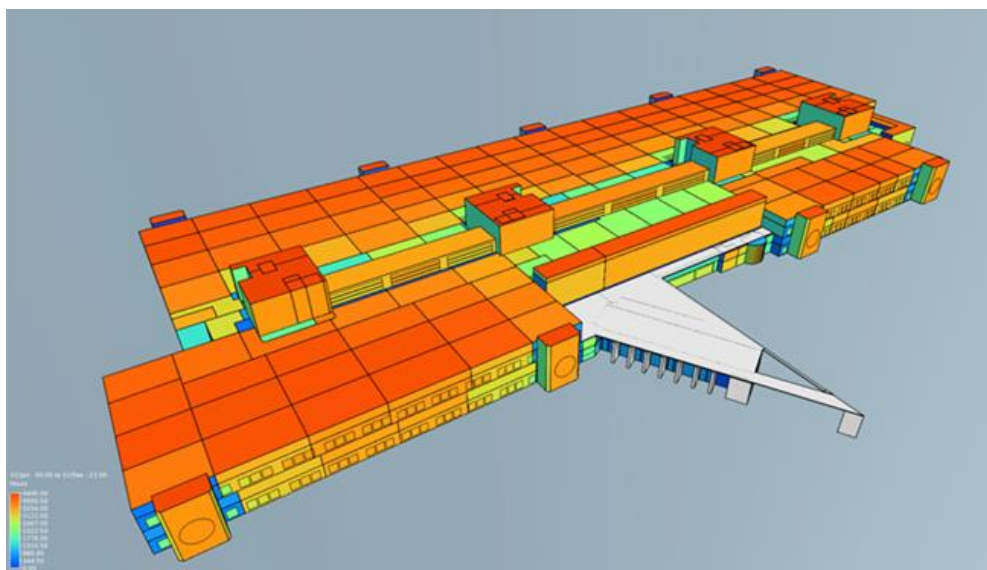
На згради Пореске управе у Винипегу, површина доступна за колекторе је довољно велика у поређењу са потребама за припрему санитарне топле воде. Просечна количина топлоте неопходна за производњу санитарне топле воде износи 350 kW. У априлу је могуће остварити ту производњу помоћу 150 m² соларних колектора.

Kingspan тридесетоцевни систем са вакумираним цевима је разматран. Часовна симулација за типичну годину је спроведена да се процени произведена енергија

На згради има око 12.000 m² слободног простора за постављање соларних колектора, када се у обзир узму остале инсталације на крову и препреке.

Према симулацији у софтверу IES VE (SunCast module) узимајући у обзир колекторе постављене под углом од 45° и окренуте ка југу, они би примали око 5 kWh/m² током првог априла, односно око 178.22 kWh/m² током читавог месеца.

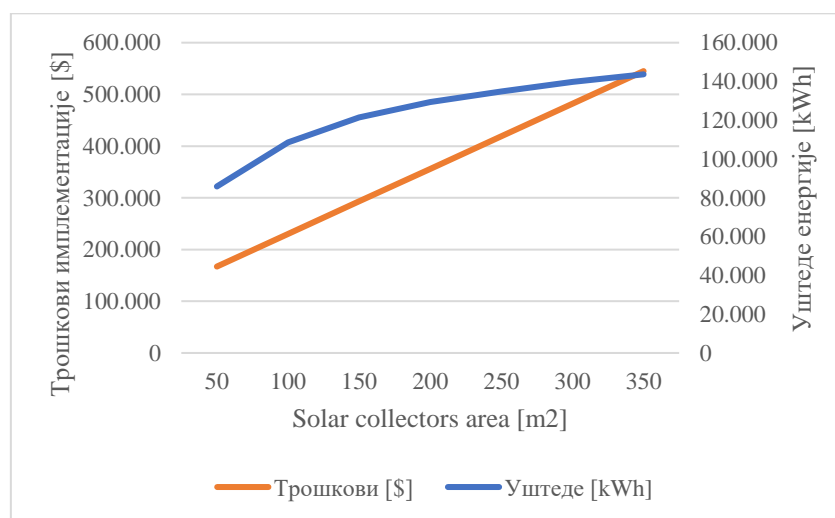
Претпостављајући ефикасност колектора од око 50% (што је конзервативна претпоставка), 150 m² соларних колектора би могло да буде довољно да покрије дневне потребе за санитарном топлом водом од око 350 kWh..



Слика 4-18 Соларна ирадијација за зграду Пореске управе у Винипегу (резултати из SunCast-a)

Већи број симулација је урађен да би се утврдила функционална зависност површине инсталираних соларних колектора и енергије која у њима може да се поризведе и искористи у објекту.

Резултати приказани на слици Слика 4-19 показују да је оптимална величина соларних колектора око 100 m², јер даљим повећањем инсталиране површине, трошкови расту много брже него уштеде и период отплате се продужава изван животног века соларних колектора.



Слика 4-19 Корелација између инсталисане површине соларних колектора, трошкова имплементације и уштеде енергије

Приказана анализа је спроведена према постојећим потребама за санитарну топлу воду и секвенцама рада опреме, што подразумева непрекидан рад (24/7) рециркулационе пумпе и употребу постојећег, неизолованог резервоара за премине 570 l.

Додатна уштеда може да се оствари искључивањем рециркулационе пумпе у периоду када се објект не користи и заменом резервоара за топлу воду већим, који је изолован.

4.21.2 Процена трошкова

Процена инвестиционих трошкова за имплементацију ове мере узима у обзир:

- Набавку и монтажу 100 m² соларних колектора са вакуумираним цевима и пратећу опрему

4.21.3 Предности

- У потпуности обновљив извор енергије се користи за производњу санитарне топле воде, уз минималне експлоатационе трошкове
- Елиминише се око 50% емисије гасова стаклене баште везаних за припрему санитарне топле воде
- Сва опрема и системи се већ дуг временски период стандардно користе у пракси и познати су и пројектантима и извођачима радова

4.21.4 Недостаци

- Прекидан и непоуздан извор енергије, који захтева да постоји додатни електрични
- Топлотна енергија се производи онда када има сунца, уместо када је потребна, а треба да се потроши практично одмах.
- Чак и током летњих месеци, услед облачног времена соларна ирадијација је често недовољна и соларни колектори не могу да покрију потребе за топлотном енергијом, већ помоћни систем мора да се користи.

4.22 ОИЕ-2 – Фотонапонске ћелије на крову

4.22.1 Опис мере

Објекат се снабдева електричном енергијом из Манитоба Хидро дистрибутивне мреже. Електрична енергија коју производи та компанија производи минималну количину гасова стаклене баште.

Фотонапонске ћелије омогућавају трансформисање соларне енергије у електричну. Када се монтирају потребно им је само соларно зрачење да производе електричну енергију. Немају покретних делова и практично не захтевају никакво одржавање. Систем може да се састоји од једног до неколико хиљада панела.

У Винипегу, фотонапонске ћелије номиналног капацитета 1 kW окренуте према југу, постављене под углом од 45° могу да произведу око 1.300 kWh електричне енергије годишње.



Слика 4-20 Фотонапонске ћелије HANWHA HSQ-340-72P
(<http://hespv.ca/all-brands/hanwha-solar/hsl-340-72p>)

Фотонапонске ћелије разматране у оквиру ове анализе имају номинални капацитет од 340 W_{DC} (Hanwha HSQ-340-72P) и површину од 2 m². Систем номиналног капацитета од 1 W_{DC} састоји се од три PV панела. Различити произвођачи имају панеле готово идентичних карактеристика (нпр. Heliene 72M-370W-Mono или LG 320W-N1C).

Произведена електрична енергија је једносмерна струја (DC), а када се изврши конверзија у наизменичну струју која може да се користи у згради, снага је око 2/3 једносмерне. То значи да панели који производе око 150 kW_{DC}, дају 100 kW_{AC} која може да се користи у објекту или да се преда мрежи.



Слика 4-21 Типичан изглед PV фарме на крову (<http://uggboots.me/installing-solar-panels-on-a-flat-roof/installing-solar-panels-on-a-flat-roof-solar-panels-on-flat-roof-installing-solar-panels-flat-roof/>)

Узимајући у обзир конфигурацију крова и постојећу опрему и препреке, око 40% површине може да буде ефективно искоришћено за постављање фотонапонских хелија.

Моделовање мере узима у обзир следеће претпоставке:

- Панели су окренути према југу са нагибом од 45°
- Производња електричне енергије је процењена на основу карактеристика фото-напонских панела и дозрачене соларне енергије процењене на основу симулационог модела, који укључује и облачност за типичну метеоролошку годину.
- Радни животног век фото-напонског система износи 33 године. После истека тог периода он нема никакву економску вредност.
- Годишњи трошкови експлоатације и одржавања су процењени на основу индустријске праксе.

4.22.2 Процена трошкова

Трошкови фото-напонског система су процењени на основу номиналног капацитета. Трошкови за имплементацију ове мере подразумевају:

- Набавку и монтажу панела укупног номиналног капацитета од 1,156 kW_{DC}, укључујући пратећу електро опрему и инсталације и носећу конструкцију на крову
- У оквиру ове мере није разматрана батерија, већ је претпоставка да се вишак електричне енергије може предати електродистрибутивној мрежи, по истој цени по којој се електрична енергија купује

4.22.3 Предности

- Производња електричне енергије без емисије гасова стаклене баште
- Смањена максимална ангажована електрична снага на објекту током летњих месеци
- Честа и позната технологија за коришћење обновљивих извора енергије
- Ниски трошкови одржавања
- Искоришћена површина крова
- Смањени соларни топлотни добици на крову

4.22.4 Недостаци

- Висока цена електричне енергије у поређењу са оном из мреже
- Количина произведене електричне енергије је функција соларне ирадијације. Фото-напонске ћелије су бескорисне током ноћи и драстично мање енергије производе када је облачно
- Заузимају велику површину на крову
- Могуће је да би била потребна структурна ојачања на крову да би могао безбедно да носи масу фото-напонских ћелија

4.23 ЕЛ-1 Смањење потрошње електричне енергије канцеларијских уређаја

4.23.1 Опис Мере

Снабдевање објекта електричном енергијом обезбеђује компанија Манитоба Хидро, која производи и дистрибуира електричну енергију. Потрошњу је могуће смањити искључивањем уређаја на појединачним радним местима у периоду када нико не користи то конкретно радно место.

Један од начина за спровођење ове мере су утичнице са интегрисаним сензорима присутности, које се гасе када за радним местом нема никога. Овакви уређаји могу да буду интегрисани у канцеларијски намештај или одвојени. Слика 2-1 приказује пример овакве утичнице, на којој је шест утичних места контролисано помоћу сензора, а два нису контролисана.



https://www.legrand.ca/-/media/brands/wattstopper/resources/cut-sheet/ws-cutsheet-isole-idp-3050-plug-load-control_11909.ashx

Слика 4-22 – Утичница са сензором присутности

4.23.2 Процена трошкова

Утичница са контролом присутности ће помоћи у смањењу потрошње електричне енергије прикључних уређаја. Трошкови имплементације мере су процењени према броју потребних уређаја. Број радних места је процењен на основу важеће регулативе¹¹

Назив	Укупан број	Цена јединице [\$]	Јединична цена монтаже [\$]	Укупан трошак [\$]
Утичница са контролом присутности	1.919	150	50	383.800

4.23.3 Предности

- Смањује се нежељена потрошња електричне енергије за рачунаре и другу канцеларијску опрему у периодима када их нико не користи
- Смањује инвестиционе трошкове у односу на алтернативно решење у којем се користи собни сензор присутности и ожичена конекција са зидном утичницом.
- Заштита уређаја од пренапона

4.23.4 Недостаци

- Инвестициони трошкови
- Неопходна је обука запослених за правилно коришћење ових уређаја и имплементација мере зависи од њиховог понашања.

4.24 РАС-1 Централизована контрола расвете са поделом на зоне

Постојећи систем контроле расвете на објекту се састоји од 23 зоне, које контролише мастер он/оф прекидач монтиран у портирници у приземљу. Расвета се ручно пали и гаси према потребама запослених.

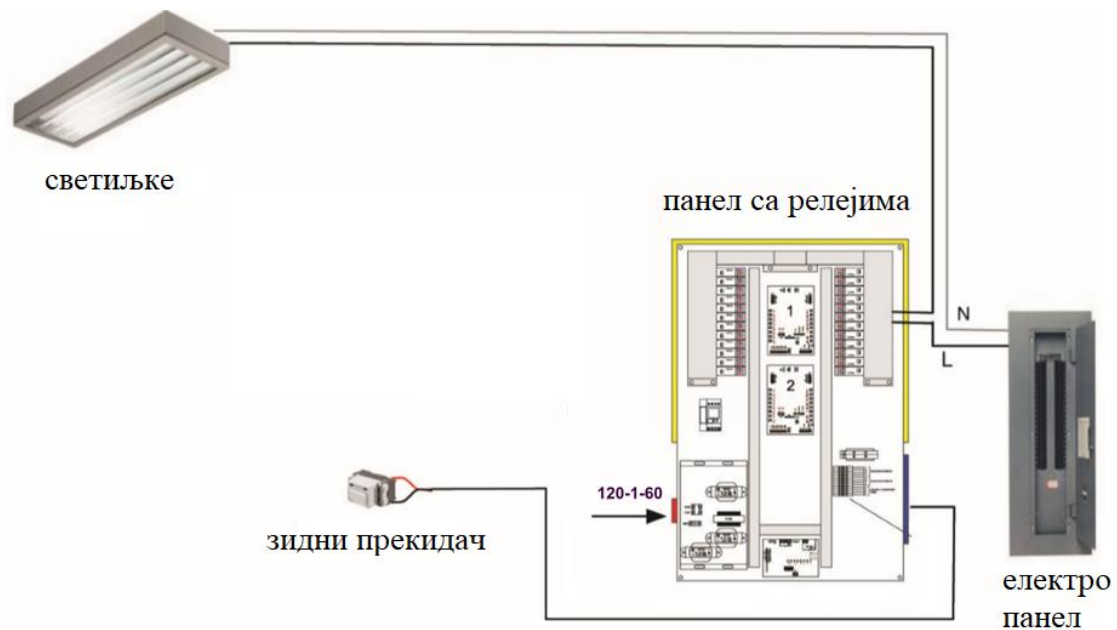
Ова мера предвиђа уградњу нисконапонских релеја смештених у интелигентне контролне панеле са интегрисаним процесором и тајмером за програмабилним функцијама.

Предвиђено је аутоматско подешавање светла према радном времену, уз могућност премошћавања временског распореда помоћу ручних контрола или сензора покрета.

Ради прецизније контроле рада расвете, неопходно је повећати број, а смањити величину зона.

- Постојећа расвета је LED са највећом снагом сијалице од 28 W
- У новом распореду, највише 20 светиљки по зони
- Сваки панел за релеје има максимални капацитет од 48 релеја
- Неопходни су радови на свим постојећим зонама расвете

¹¹ GC Workplace - www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/biens-property/mt-wp/mt-wp-eng.html



Слика 4-23 – Конфигурација предложене контроле расвете

4.24.1 Процена трошкова

Процена трошкова је изведена на основу јединичне цене опреме коју је потребно уградити и трошкова монтаже, приказаних у табели испод.

Табела 4-16 Преглед трошкова имплементације за РАС-1

Елемент	Ком.	Јединична цена [\$]	Јединична цена монтаже [\$]	Укупни трошкови [\$]
Панел за релеје	10	7000	9.600	166.000
Реконфигурација постојећих струјних кола	1		12.000	12.000
Нисконапонски он/оф зидни прекидачи	454	90	100	86.260
Контролна радна станица са графичким интерфејсом	1		30.000	30.000
Каблови (m)	6.900	1,4	2,4	33.250
Додатни трошкови (контрола квалитета и исправности)	1		7.000	7.000
Укупни инвестициони трошкови				334.510
30% Трошкови пројектовања				100.353
Укупни трошкови имплементације				434.863

4.24.2 Процена уштеда

- Уштеде енергије ове мере су израчунати смањењем вршног оптерећења расвете у референтном профилу за 15%
- Животни век централизованог контролног система са релејима је процењен на 20 година.

4.24.3 Предности

- Могућност прилагођавања начина рада расвете конкретним потребама корисника (специфичан начин рада расвете за мале канцеларије, канцеларије отвореног типа, конференцијске сале, заједничке просторије итд.).
- Смањење енергије за расвету смањује годишњу енергију потребну за хлађење
- Могућа интеграција са ЦСНУ

4.24.4 Недостаци

- Инвестициони трошкови
- Лимитиран број зона и контролних стратегија
- Смањење енергије расвете повећава годишњу енергију потребну за грејање

4.25 РАС-2 Контрола расвете сензорима присутности

4.25.1 Опис мере

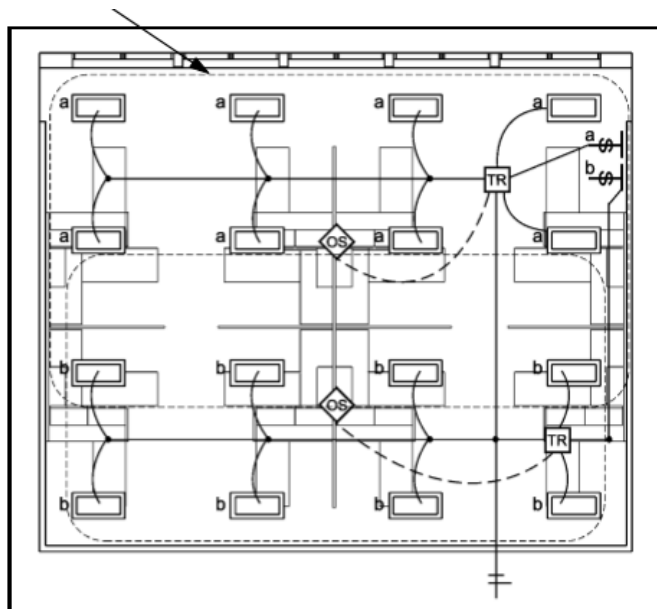
Контрола расвете помоћу сензора присутности је прикладна за окружење попут канцеларија отвореног типа (open office) које се не користе искључиво у оквиру стандардног радног времена, а карактерише их и променљив број запослених у простору. Без адекватне контроле, расвета у канцеларијама ради углавном дуже него што је неопходно, укључујући и периоде када је само један запослени у просторији или када је ван радног времена ту особље које чисти канцеларију.

Већи отворени простори могу да се поделе на зоне које се контролишу помоћу сензора присутности, тако да се светла аутоматски гасе у оним зонама у којима нема никога. Највеће уштеде енергије имплементацијом овакве мере очекују се у периоду ван регуларног радног времена. У принципу, смањење потрошње електричне енергије за расвету на овакав начин може да буде од 15% до 25%.

Највеће уштеде енергије се остварују имплементацијом контроле која предвиђа ручно паљење и аутоматско гашење светла. На тај начин се избегава непотребан рад светиљки и смањује учесталост циклуса паљења и гашења. У канцеларијама отвореног типа ултразвучни сензори треба да буду постављени на плафону и повезани са аутоматским прекидачем.

Важне претпоставке:

- Ова мера омогућава да је временски профил коришћења светла практично идентичан као и временски профил присутности корисника у простору
- Подела већих простора на мање зоне обезбеђује максимизацију уштеда



Слика 4-24 Типична конфигурација контролних зона са сензорима присутности

4.25.2 Процена трошкова

Елемент	Ком.	Јединична цена [\$]	Јединична цена монтаже [\$]	Укупни трошкови [\$]
Сензор присутности	908	175	200	340,500
Релеји и трансформатори	454	150	150	136,200
Нисконапонски ON/OFF зидни прекидач	454	90	100	86,260
Реконфигурација постојећих струјних кола	80		250	20,000
Технички пријем	1			7,000
Цена пројектовања				176,988
Субвенција	908	60		-54,480
Укупан инвестициони трошак				712,468

4.25.3 Процена уштеда

Осим наведених, при процени уштеда енергије коришћене су и додатне претпоставке

- Временски профил коришћења расвете је исти као временски профил присутности корисника у простору
- Мера не узима у обзир замену сијалица

4.25.4 Предности

- Контрола сензорима присутности обезбеђује уштеду енергије, тако што се избегава коришћење сијалица које нису неопходне
- Употреба сензора присутности је у складу са релевантним стандардима о енергетској ефикасности у зградама ASHRAE 90.1-2016 и NECB 2017.

4.25.5 Недостаци

- Велики инвестициони трошкови
- Тешко је открити кварове и грешке у раду оваквог система
- Уколико подешавања осетљивости сензора и њихова калибрација нису адекватни, неће бити остварене очекиване уштеде енергије

5 ЕВАЛУАЦИЈА ЕФЕКТА ИМПЛЕМЕНТАЦИЈЕ ИНДИВИДУАЛНИХ МЕРА ЗА УШТЕДУ ЕНЕРГИЈЕ

Оцена индивидуалних мера за уштеду енергије треба да се заснива на анализи ефекта њихове имплементације и то:

- Енергетских
- Економских
- Еколошких

Енергетски ефекти се односе на промену у потрошњи укупне енергије и у потрошњи појединих енергената.

Економски ефекти су цена инвестиције за имплементацију мере, али и утицај мере на промену трошкова експлоатације, укључујући трошкове одржавања, амортизацију опреме, и трошкове за енергију.

Конвенционални начин за изражавање еколошких ефеката се огледају у квантификацији емисије гасова стаклене баште, који се изражавају кроз еквивалентну емисију CO₂.

Табела 5-1 приказује резултате анализе енергетског понашања објекта описаног у поглављу 3 при имплементацији мера описаних у поглављу 4. Резултати укључују резултат енергетске симулације и прорачун трошкова и емисије на основу података добијених из симулације.

Динамичка симулација сложеног модела објекта, каква је спроведена током истраживања у оквиру дисертације, омогућава детаљну анализу свих енергетских токова и параметара рада објекта и система, укључујући температуре, протоке, ефикасност тид.

У даљем тексту дисертације детаљно ће анализирани резултати симулације карактеристичних мера. У одређеним случајевима, резултати симулације нису очигледни или очекивани (нпр. драстично побољшање изолације крова, не доводи до значајне промене у потрошњи енергије) и зато је њихово разумевање и прихватање могуће само на основу детаљније анализе енергетских токова.

Табела 5-1: Резултати процене ефеката имплементације МУЕ

Број	МУЕ	Референтна потрошња				Имплементација МУА				Енергетска матрица										Економска матрица						
		Електрична Енергија (kWh)	Кумулативна вршна електрична снага (kW)	Природни гас (kWh)	Природни гас (m3)	Електрична Енергија (kWh)	Кумулативна вршна електрична снага (kW)	Природни гас (kWh)	Природни гас (m3)	Смањење кумулативне вршне електричне снаге (kW)	Годишња уштеда електричне енергије (kWh)	% уштеде електричне енергије	Годишња уштеда природног гаса (kWh)	% уштеде природног гаса	Годишња уштеда финалне енергије (kWh)	% уштеде финалне енергије	Годишња уштеда природног гаса (m3)	Смањење емисије гасова стаклене баште (t CO2e)	Статус квота (t CO2e)	Смањење емисије гасова стаклене баште %	Инвестициони трошкови	Годишње смањење трошкова за енергију (\$)	Годишње смањење оперативних трошкова (\$)	НСВ (\$, 25 година)	LCC Референтна (\$)	LCC МУЕ (\$)
OM-1	Побољшање изолације зидова	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.941.353	8.474	2.892.480	274.820	-10,4	-2.690	-0,1%	48.184	1,6%	45.494	0,7%	4.578	8,7	537,2	1,6%	7.150.000	658	0	-1.218.103	9.555.590	10.773.693
OM-2.1	Замена прозора (Опција 1)	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.931.871	8.398	2.875.532	273.209	66,0	6.792	0,17%	65.132	2,2%	71.924	1,0%	6.188	11,7	537,2	2,2%	3.575.000	2.006	0	-941.342	9.154.481	10.095.823
OM-2.2	Замена прозора (Опција 2) - (with EN-4 as option)	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.934.230	8.393	2.792.322	265.304	71,2	4.433	0,11%	148.342	5,0%	152.775	2,2%	14.094	26,7	537,2	5,0%	4.400.000	3.436	0	-1.555.271	9.154.481	10.709.752
OM-3	Заптиванње (смањење инфилтрације)	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.941.262	8.463	2.884.356	274.048	1,4	-2.599	-0,1%	56.308	1,9%	53.709	0,8%	5.350	10,1	537,2	1,9%	170.000	910	0	-85.538	7.671.773	7.757.311
OM-4	External window shades/canopies (evaluated with high perf. glazing)	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.940.681	8.463	2.905.663	276.072	1,5	-2.018	-0,1%	35.001	1,2%	32.983	0,5%	3.326	6,3	537,2	1,2%	130.000	556	-3.000	-114.946	7.121.542	7.236.488
OM-5.1	Изолација крова (Опција 1)	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.948.221	8.473	2.872.918	272.961	-8,7	-9.558	-0,2%	67.746	2,3%	58.187	0,8%	6.437	12,2	537,2	2,3%	6.240.000	755	0	-4.524.424	8.874.078	13.398.502
OM-5.2	Изолација крова (Опција 2)	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.950.989	8.474	2.856.888	271.438	-9,8	-12.326	-0,3%	83.776	2,8%	71.451	1,0%	7.960	15,1	537,2	2,8%	6.955.000	922	0	-5.232.399	8.874.078	14.106.477
КГХ-1.1	DOAS систем комбинован са фен-којп апаратима. Рекулерирање топлоте отпадног ваздуха ротационим размењивачем. Нискотемпературско грејање. Чилер са оплављеним кондензатором за зимско хлађење	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.082.946	8.402	1.071.789	101.833	61,8	-144.283	-3,7%	1.868.875	63,6%	1.724.592	25,1%	177.565	336,4	537,2	62,6%	10.456.414	28.123	29.945	814.294	18.657.240	17.842.946
КГХ-1.2	DOAS систем комбинован са распадним гредама	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.199.220	8.858	936.288	88.956	-393,6	-260.557	-6,6%	2.004.396	68,2%	1.743.839	25,3%	190.441	360,6	537,2	67,1%	11.907.480	21.977	39.605	-7.997	18.657.240	18.665.237
КГХ-1.3	DOAS систем комбинован са VRF системом са рекулерирањем топлоте	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.301.392	10.022	650.868	61.840	-1.558,0	-362.730	-9,2%	2.289.796	77,9%	1.927.066	28,0%	217.558	411,9	537,2	76,7%	12.793.235	12.709	22.865	-5.919.817	18.657.240	24.577.057
КГХ-1.4	Замена постојећих клима комора ефикаснијим системима са ротационим регенератором топлоте и минималном количином свежег ваздуха према ASHRAE стандарду. Задржава се постојећа централна дистрибуција ваздуха. Увођење нискотемпературског грејања. Замена постојећих топоводних капорифера електричним.	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.627.525	9.029	1.155.539	109.790	-565,0	-688.862	-17,5%	1.785.125	60,7%	1.096.264	15,9%	169.608	320,3	537,2	59,6%	7.662.590	31	28.730	2.605.290	18.657.240	16.051.950
КГХ-2	КГХ-1.4 са двојезгарним регенератором топлоте.	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.619.123	9.021	1.141.172	108.425	-556,7	-680.460	-17,3%	1.799.493	61,2%	1.119.033	16,3%	170.973	322,9	537,2	60,1%	7.808.190	685	35.130	2.521.302	18.657.240	16.135.938
КГХ-3	КГХ-1.4 са рекулерирањем ваздуха.	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.695.368	9.078	629.100	59.772	-613,9	-756.705	-19,2%	2.311.564	78,6%	1.554.859	22,6%	219.626	415,0	537,2	77,3%	8.180.640	6.312	28.730	2.289.102	18.657.240	16.368.137
КГХ-4.1	Замена гасних котлова за грејање електричним	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	6.098.588	19.468	513.782	48.815	-11.003,8	-2.159.925	-54,8%	2.426.882	82,5%	266.957	3,9%	230.582	433,1	537,2	80,6%	495.300	-138.471	10.000	-3.083.598	7.721.085	10.804.683
КГХ-4.2	Допунски електрични коџао за грејање који ради само мимо вршне потрошње електричне енергије	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.326.249	8.464	2.504.680	237.974	0,0	-387.586	-9,8%	435.984	14,8%	48.398	0,7%	41.424	77,8	537,2	14,5%	228.020	-7.226	-3.000	-515.822	7.121.542	7.637.364
КГХ-4.3	Допунски електрични коџао за грејање спрегнут са акумулатором топлоте, који ради само мимо вршне потрошње електричне енергије	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.455.743	8.464	2.375.148	225.667	0,0	-517.080	-13,1%	565.516	19,2%	48.436	0,7%	53.731	100,9	537,2	18,8%	286.390	-9.926	-3.000	-570.295	7.121.542	7.691.836
КГХ-5	Геотермална топлотна пумпа у комбинацији са КГХ-1.4	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.947.731	11.895	216.681	20.585	-3.431,1	-1.009.068	-25,6%	2.724.003	92,6%	1.714.935	24,9%	258.812	488,9	537,2	91,0%	1.444.820	-21.242	4.130	-1.593.332	18.665.237	20.250.572
КГХ-6	Топлотна пумпа ваздух-вода у комбинацији са КГХ-1.4	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.770.370	9.971	862.505	81.948	-1.506,8	-831.707	-21,1%	2.078.159	70,7%	1.246.452	18,1%	197.450	372,8	537,2	69,4%	7.566.390	-8.686	32.130	-1.491.668	18.657.240	20.148.908
КГХ-7.1	Замена парних опаживача ваздуха на природни гас електричним	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.203.016	10.281	2.570.940	244.270	-1.816,6	-264.353	-6,7%	369.725	12,6%	105.371	1,5%	35.128	66,1	537,2	12,3%	618.930	-19.849	35.600	48.260	8.633.422	8.585.161
КГХ-7.2	Замена парних опаживача ваздуха на природни гас адјабатским (ултра звучним)	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.967.532	8.636	2.570.940	244.270	-172,5	-28.869	-0,7%	369.725	12,6%	340.856	5,0%	35.128	66,6	537,2	12,4%	568.880	3.903	36.800	712.360	8.633.422	7.921.062
КГХ-8	Замена постојећих ваздушно хлађених чилера ефикаснијим водено хлађеним чилерима са магнетним лежаревима	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.912.528	8.559	2.940.664	279.398	-94,7	26.135	0,7%	0	0,0%	26.135	0,4%	0	0,0	537,2	0,0%	1.573.000	164	-6.000	-838.167	7.997.956	8.836.123
КГХ-7.1	Замена гасних котлова за припрему санитарне топле воде електричним	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.053.909	9.184	2.796.607	265.711	-720,3	-115.246	-2,9%	144.057	4,9%	28.811	0,4%	13.687	25,7	537,2	4,8%	232.700	-8.318	-1.400	-475.326	7.312.177	7.787.504
КГХ-7.2	Замена гасних котлова за припрему санитарне топле воде геотермалном топлотном пумпом	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.977.078	8.850	2.796.607	265.711	-386,1	-38.415	-1,0%	144.057	4,9%	105.642	1,5%	13.687	25,9	537,2	4,8%	540.800	-2.372	-3.000	-528.433	7.121.542	7.649.975
ЕЛ-1	Смањење потрошње електричне енергије канцеларијских уређаја	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.774.408	8.464	2.965.819	281.788	0,0	164.255	4,2%	-25.155	-0,9%	139.100	2,0%	-2.390	-4,2	537,2	-0,8%	383.800	5.893	-2.879	-292.902	7.263.622	7.556.524
РАС-1	Централизована контрола расвете са поделом на зоне	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.771.102	8.088	2.958.483	281.091	375,8	167.561	4,3%	-17.819	-0,6%	149.743	2,2%	-1.693	-2,9	537,2	-0,5%	434.863	9.503	-2.958	-329.638	7.193.403	7.523.040
РАС-2	Контрола расвете сензорима присутности	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.701.435	7.925	2.966.816	281.883	538,9	237.228	6,0%	-26.152	-0,9%	211.076	3,1%	-2.485	-4,3	537,2	-0,8%	766.948	13.498	-5.512	-1.000.599	7.241.219	8.241.818
ОИЕ-1	Соларни колектори	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.943.515	8.492	2.832.144	269.067	-28,0	-4.852	-0,1%	108.520	3,7%	103.668	1,5%	10.311	19,5	537,2	3,6%	281.671	1.487	0	-205.985	7.121.542	7.327.527
ОИЕ-2	Фотонапонске ћелије	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	2.438.163	3.146	2.940.664	279.398	5.318,0	1.500.500	38,1%	0	0,0%	1.500.500	21,8%	0	2,9	537,2	0,5%	3.005.600	105.341	-694	2.137.367	9.088.574	6.951.207
1	Сценарио 1	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	4.299.839	8.938	469.910	44.647	-474,5	-361.176	-9,2%	2.470.754	84,0%	2.109.579	30,7%	234.751	444,5	537,2	82,7%	14.714.518	29.813	52.818	1.335.127	44.116.916	42.806.433
2	Сценарио 2	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	3.130.464	8.429	70.509	6.699	35,4	808.199	20,5%	2.870.155	97,6%	3.678.354	53,5%	272.699	518,7	537,2	96,5%	23.501.941	151.408	63.795	-742.562	107.954.873	109.021.140
3	Сценарио 3	3.938.663	8.464	2.940.664	279.398	2.608.355	4.168	0	0	4.296,0	1.330.308	33,8%	2.940.664	100,0%	4.270.972	62,1%	279.398	532,3	537,2	99,1%	36.975.030	104.129	23.048	-27.965.892	128.279.713	156.927.514

5.1 Анализа резултата симулације мера за побољшање термофизичких карактеристика омотача објекта

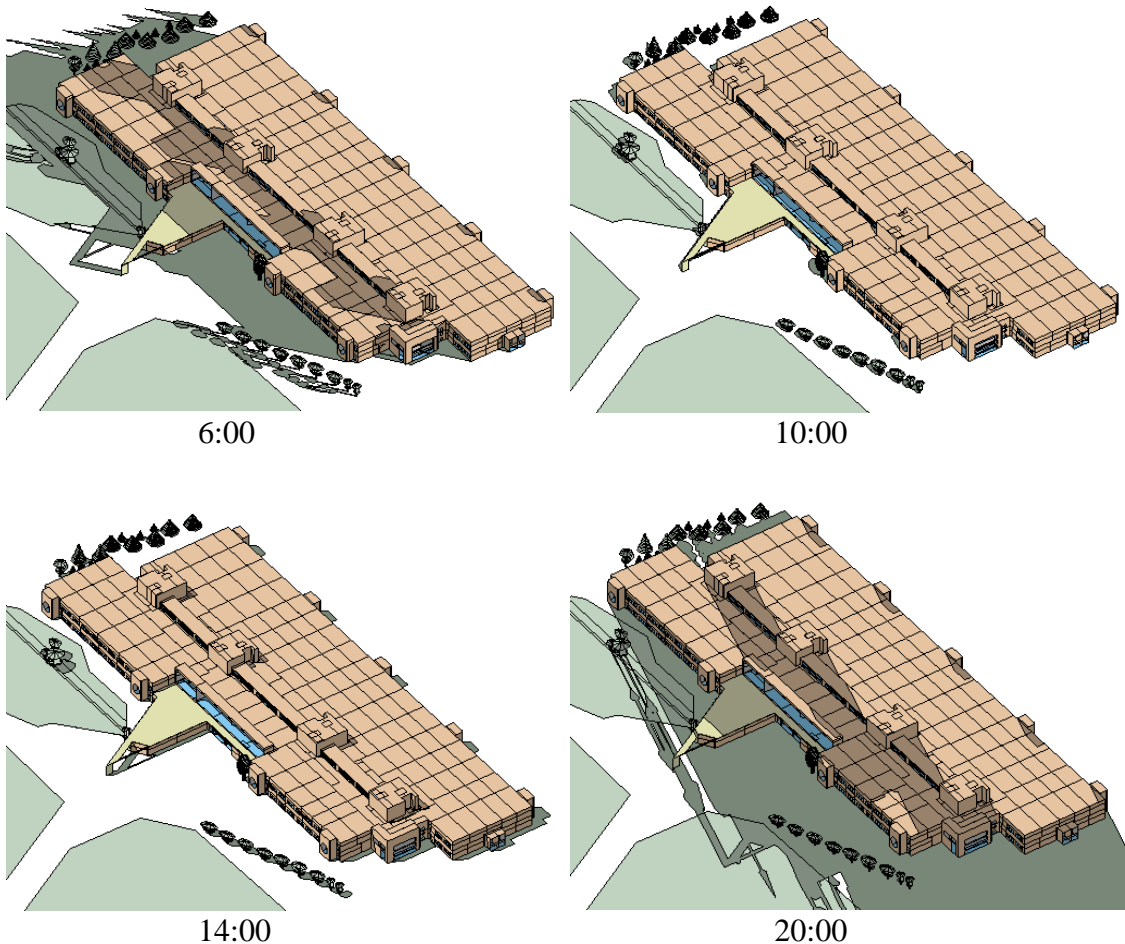
Побољшање термичке изолације омотача објекта спадају у групу мера за уштеду енергије, које су у инжењерској пракси и регулативи [96] често промовисане су као кључне. Међутим, то није нужно тачно у случају објеката са великим унутрашњим добицима топлоте и/или великим бројем измена ваздуха услед потреба за вентилацијом. За разлику од стамбених објеката, који по правилу немају систем за механичку вентилацију, и које одликују са релативно мали добици топлоте (релативно мала површина транспарентних позиција на омотачу и мала количина електричних уређаја и људи у објекту), комерцијални, пословни и јавни објекти су у суштини проточни системи са релативно великим унутрашњим добицима топлоте од људи и електричних уређаја.

У складу са тим, као што показује Табела 5-1, побољшање термичке изолације омотача објекта кроз мере ОМ-1 до ОМ-4, готово да не обезбеђује никакве уштеде електричне енергије. Са друге стране, остварују се одређене уштеде у енергији потребној за грејање.

5.1.1 Ниске уштеде електричне енергије при побољшању изолације објекта

При побољшању изолације термичког омотача објекта, очекивани исход је да се смање трансмисиони губици енергије током периода грејања, односно соларни и трансмисиони добици топлоте током периода хлађења, што би последично довело до смањења потрошње енергије за грејање и хлађење. Међутим, резултати симулација за потрошњу енергије за мере ОМ-1, ОМ-2, ОМ-3 и ОМ-4, показују да ово није случај када је у питању хлађење. Напротив, потрошња електричне енергије је често виша након поправке омотача.

Овај феномен објаснићемо на карактеристичном примеру замене прозора, тј. анализирајући меру ОМ-2.1 (замена постојећих прозора).



Слика 5-1: Пример осунчаности објекта током 22. Јуна у различита доба дана

Са једне стране услед употребе ефикасних прозора са нискоемисионим стаклима соларни добици су мањи. Са друге стране имамо и нижу вредност коефицијента пролаза топлоте у односу на референтни модел, као и мању инфилтрацију. Дакле, укупан топлотни биланс кроз прозоре се мења, али то само по себи не значи да је и енергија потребна за хлађење током године нижа. Она је нижа у пројектним условима, али у прелазном периоду, а често и током лета, дешава се да је температура спољашњег ваздуха испод 23°C ¹², док је у истом периоду, услед великих унутрашњих и/или соларних добитака, објекту потребно хлађење. У том случају, побољшана термичка изолација објекта заправо значи да се просторије мање хладе преко фасаде, и да топлотно оптерећење у већој мери прелази на системе за механичко хлађење и вентилацију.

Слика 5-1 показује резултате симулације осунчаности објекта, који се користе у прорачуну соларних топлотних добитака. Ова слика јасно илуструје да су прозори на објекту распоређени на фасадним зидовима са оријентацијом југ-југозапад и север-североисток. Преостале две оријентације практично немају прозоре. Анализа осунчаности прозора и соларних добитака у односу на трансмисију кроз прозоре показују да је код високо ефикасних прозора ефекат „заробљавања“ топлоте у објекту у одређеним периодима израженији од ефекта смањења соларних добитака.

Табела 5-2 даје упоредну анализу која показује како се трансмисија, инфилтрација и соларни добици мењају имплементацијом мере ОМ-2.1, за случај термичке зоне са оријентацијом север-североисток током периода хлађења (18. јул), у току дана када је температура спољашњег

¹² Задата вредност температуре ваздуха у просторијама, за хлађење

ваздуха нижа од температуре ваздуха у хлађеној просторији. Из табеле се види да се у билансу, након имплементације МУЕ, укупно тоplotно оптерећење повећало за око 2 kWh током једног дана за посматрану зону.

Табела 5-3, Табела 5-4 и Табела 5-5, приказују резултате еквивалентних анализа за период хлађења када је температура спољашњег ваздуха нижа, односно виша од температуре хлађења, при томе посматрајући просторије са северном, односно јужном оријентацијом.

Анализа показује да су се за обе просторије током типичног летњег дана, са јаком осунчаношћу и релативно високом спољашњом температуром укупни (нето) добици топлоте током дана смањили након имплементације ОМ-2.2. Међутим, уколико је температура спољашњег ваздуха нижа него унутар објекта, нето добици топлоте су се повећали након имплементације ОМ-2.1.

Табела 5-6 показује да када се узму у обзир све просторије на објекту и читава година, смањење укупне потрошње енергије за хлађење је веома мало и износи мање од 1% референтне потрошње енергије за хлађење.

Еквивалентна анализа показује исту природу резултата и за остале мере поправљања термичке изолације, с тим што мере побољшања крова или зидова не утичу на смањење соларних добитака.

Табела 5-2: Упоредна анализа трансмисионих, инфилтрационих и соларних добитака кроз прозоре за термичку зону која се налази на фасади са оријентацијом север-североисток, за период хлађења када температура спољашњег ваздуха не прелази температуру у зони

Време	Темп. споља [°C]	Усклађен референтни модел				ОМ-2.1					
		Темп. у зони [°C]	Инф. доб. [kW]	Добици конд. [kW]	Солар добици [kW]	Темп. у зони [°C]	Инф. доб. [kW]	Добици конд. [kW]	Солар добици [kW]		
0:00	9.5	21.51	-0.503	-0.529	0.000	21.6	-0.455	-0.166	0.000		
1:00	8.8	21.32	-0.506	-0.532	0.000	21.4	-0.458	-0.167	0.000		
2:00	9	21.23	-0.511	-0.536	0.000	21.3	-0.462	-0.168	0.000		
3:00	8.4	21.1	-0.534	-0.559	0.000	21.2	-0.484	-0.176	0.000		
4:00	7.6	20.93	-0.560	-0.586	0.000	21.0	-0.508	-0.184	0.000		
5:00	6.8	20.77	-0.581	-0.612	0.000	20.9	-0.528	-0.192	0.000		
6:00	6.2	20.84	-0.548	-0.565	0.124	21.0	-0.497	-0.178	0.068		
7:00	8.6	21.72	-0.459	-0.372	0.754	21.7	-0.413	-0.117	0.416		
8:00	12.3	22.54	-0.379	-0.255	0.722	22.5	-0.339	-0.080	0.407		
9:00	14.2	22.98	-0.323	-0.234	0.392	22.9	-0.289	-0.074	0.224		
10:00	15.9	23.26	-0.290	-0.214	0.397	23.2	-0.258	-0.067	0.224		
11:00	16.4	23.47	-0.280	-0.173	0.564	23.3	-0.247	-0.054	0.318		
12:00	16.8	23.7	-0.247	-0.117	0.721	23.5	-0.215	-0.037	0.408		
13:00	18.5	24.25	-0.218	-0.085	0.637	24.0	-0.188	-0.027	0.360		
14:00	19.3	23.8	-0.194	-0.076	0.607	23.6	-0.166	-0.024	0.341		
15:00	18.8	23.77	-0.184	-0.078	0.583	23.5	-0.157	-0.025	0.328		
16:00	19.7	23.59	-0.171	-0.082	0.558	23.4	-0.145	-0.026	0.310		
17:00	19.1	23.32	-0.170	-0.129	0.435	23.1	-0.146	-0.041	0.242		
18:00	19.2	22.71	-0.155	-0.130	0.391	22.6	-0.136	-0.041	0.215		
19:00	18.6	22.54	-0.175	-0.183	0.195	22.5	-0.155	-0.057	0.106		
20:00	17.9	22.43	-0.193	-0.220	0.075	22.4	-0.172	-0.069	0.041		
21:00	17.5	22.36	-0.212	-0.249	0.009	22.3	-0.190	-0.078	0.004		
22:00	16.8	22.36	-0.219	-0.256	0.000	22.3	-0.196	-0.081	0.000		
23:00	17.2	22.31	-0.208	-0.246	0.000	22.3	-0.187	-0.077	0.000		
Збир [kWh]:			-7.818	-7.016	7.163				-6.989	-2.206	4.011
Него добици кроз прозоре [kWh]:					-7.167					-5.184	

Табела 5-3: Упоредна анализа трансмисионих, инфилтрационих и соларних добитака кроз прозоре за термичку зону која се налази на фасади са оријентацијом север-североисток, за период хлађења када температура спољашњег ваздуха прелази температуру у зони

Време	Темп. споља [°C]	Усклађен референтни модел				ОМ-2.1				
		Темп. у зони [°C]	Инф. доб. [kW]	Добици конд. [kW]	Солар добици [kW]	Темп. у зони [°C]	Инф. доб. [kW]	Добици конд. [kW]	Солар добици [kW]	
0:00	17.8	22.44	-0.197	-0.237	0.000	22.3	-0.174	-0.074	0.000	
1:00	17.4	22.26	-0.202	-0.241	0.000	22.2	-0.180	-0.076	0.000	
2:00	17.2	22.23	-0.199	-0.239	0.000	22.2	-0.178	-0.075	0.000	
3:00	17.5	22.24	-0.212	-0.251	0.000	22.2	-0.189	-0.079	0.000	
4:00	16.6	22.19	-0.248	-0.286	0.000	22.2	-0.222	-0.090	0.000	
5:00	15.6	22.1	-0.281	-0.318	0.000	22.1	-0.252	-0.100	0.000	
6:00	14.8	22.15	-0.287	-0.305	0.128	22.1	-0.258	-0.096	0.072	
7:00	15.4	22.57	-0.253	-0.167	0.752	22.5	-0.225	-0.053	0.420	
8:00	17.3	23.55	-0.214	-0.091	0.673	23.4	-0.186	-0.029	0.379	
9:00	19.3	23.26	-0.116	-0.037	0.388	23.1	-0.098	-0.012	0.220	
10:00	21.5	22.97	-0.009	0.049	0.358	22.9	-0.004	0.015	0.203	
11:00	24	23.1	0.067	0.143	0.414	23.0	0.066	0.045	0.234	
12:00	25.5	23.18	0.138	0.225	0.445	23.0	0.131	0.071	0.250	
13:00	27.6	23.46	0.189	0.285	0.427	23.2	0.182	0.090	0.240	
14:00	28.6	24	0.187	0.285	0.417	23.7	0.182	0.090	0.236	
15:00	28.6	24.3	0.185	0.280	0.448	23.9	0.180	0.088	0.253	
16:00	29.1	24.54	0.204	0.295	0.554	24.2	0.198	0.093	0.312	
17:00	30	24.31	0.234	0.298	0.474	23.9	0.226	0.094	0.266	
18:00	30.1	23.41	0.212	0.234	0.390	23.0	0.204	0.074	0.219	
19:00	27.1	22.72	0.144	0.114	0.165	22.6	0.136	0.036	0.093	
20:00	25.4	22.43	0.074	0.054	0.205	22.3	0.071	0.017	0.116	
21:00	23.1	22.3	0.012	-0.032	0.092	22.2	0.014	-0.010	0.052	
22:00	22.1	22.2	-0.028	-0.083	0.000	22.1	-0.023	-0.026	0.000	
23:00	20.9	22.13	-0.024	-0.078	0.000	22.1	-0.020	-0.025	0.000	
Збир [kWh]:			-0.625	-0.103	6.330			-0.421	-0.032	3.562
Нето добици кроз прозоре [kWh]:										3.108

Табела 5-4: Упоредна анализа трансмисионих, инфилтрационих и соларних добитака кроз прозоре за термичку зону која се налази на фасади са оријентацијом југ-југозапад, за период хлађења када температура спољашњег ваздуха не прелази температуру у зони

Време	Темп. споља [°C]	Усклађен референтни модел				ОМ-2.1					
		Темп. у зони [°C]	Инф. доб. [kW]	Добици конд. [kW]	Солар добици [kW]	Темп. у зони [°C]	Инф. доб. [kW]	Добици конд. [kW]	Солар добици [kW]		
0:00	9.5	21.85	-0.455	-1.028	0.000	21.7	-0.405	-0.323	0.000		
1:00	8.8	21.46	-0.450	-1.017	0.000	21.2	-0.397	-0.320	0.000		
2:00	9	21.15	-0.446	-1.011	0.000	20.9	-0.393	-0.318	0.000		
3:00	8.4	20.78	-0.458	-1.043	0.000	20.6	-0.405	-0.328	0.000		
4:00	7.6	20.37	-0.471	-1.083	0.000	20.2	-0.419	-0.341	0.000		
5:00	6.8	19.98	-0.483	-1.121	0.000	19.9	-0.430	-0.353	0.000		
6:00	6.2	19.99	-0.451	-1.053	0.045	19.9	-0.403	-0.331	0.025		
7:00	8.6	21.1	-0.381	-0.827	0.332	21.0	-0.338	-0.260	0.190		
8:00	12.3	22.65	-0.337	-0.668	0.452	22.5	-0.299	-0.210	0.264		
9:00	14.2	23.72	-0.311	-0.566	0.521	23.5	-0.273	-0.178	0.307		
10:00	15.9	24.52	-0.300	-0.420	0.777	24.3	-0.261	-0.132	0.458		
11:00	16.4	25.18	-0.307	-0.279	1.535	24.8	-0.265	-0.088	0.909		
12:00	16.8	25.76	-0.290	-0.176	2.173	25.3	-0.246	-0.055	1.280		
13:00	18.5	25.7	-0.243	0.025	2.909	25.1	-0.199	0.008	1.707		
14:00	19.3	23.2	-0.149	0.159	3.119	22.8	-0.122	0.050	1.819		
15:00	18.8	22.93	-0.132	0.147	2.908	22.7	-0.112	0.046	1.699		
16:00	19.7	22.81	-0.122	0.072	2.320	22.6	-0.104	0.023	1.345		
17:00	19.1	22.5	-0.120	-0.193	0.912	22.4	-0.104	-0.061	0.528		
18:00	19.2	22.24	-0.120	-0.224	0.697	22.1	-0.105	-0.071	0.397		
19:00	18.6	22.12	-0.138	-0.334	0.332	22.1	-0.122	-0.105	0.189		
20:00	17.9	22.03	-0.155	-0.404	0.128	22.0	-0.138	-0.127	0.073		
21:00	17.5	22.15	-0.179	-0.467	0.015	22.1	-0.160	-0.147	0.008		
22:00	16.8	22.99	-0.215	-0.520	0.000	22.9	-0.189	-0.163	0.000		
23:00	17.2	23.22	-0.215	-0.518	0.000	23.1	-0.189	-0.163	0.000		
Збир [kWh]:			-6.926	-12.550	19.174				-6.078	-3.946	11.197
Него добици кроз прозоре [kWh]:									-0.30	1.173	

Табела 5-5: Упоредна анализа трансмисионих, инфилтрационих и соларних добитака кроз прозоре за термичку зону која се налази на фасади са оријентацијом југ-југозапад, за период хлађења када температура спољашњег ваздуха прелази температуру у зони

Време	Темп. споља [°C]	Усклађен референтни модел				ОМ-2.1					
		Темп. у зони [°C]	Инф. доб. [kW]	Добици конд. [kW]	Солар добици [kW]	Темп. у зони [°C]	Инф. доб. [kW]	Добици конд. [kW]	Солар добици [kW]		
0:00	17.8	21.89	-0.154	-0.044	0.000	21.7	-0.133	-0.140	0.000		
1:00	17.4	22.01	-0.169	-0.459	0.000	21.9	-0.149	-0.144	0.000		
2:00	17.2	22	-0.166	-0.457	0.000	22.0	-0.148	-0.144	0.000		
3:00	17.5	22.3	-0.188	-0.491	0.000	22.2	-0.167	-0.154	0.000		
4:00	16.6	23	-0.247	-0.594	0.000	22.8	-0.217	-0.187	0.000		
5:00	15.6	23.04	-0.281	-0.663	0.000	22.8	-0.246	-0.209	0.000		
6:00	14.8	23.09	-0.286	-0.666	0.038	22.9	-0.251	-0.210	0.022		
7:00	15.4	23.56	-0.258	-0.543	0.294	23.3	-0.225	-0.171	0.170		
8:00	17.3	24.29	-0.215	-0.397	0.445	24.0	-0.185	-0.125	0.260		
9:00	19.3	22.11	-0.061	-0.100	0.540	21.9	-0.049	-0.032	0.317		
10:00	21.5	22.22	0.019	0.186	0.744	22.2	0.017	0.059	0.441		
11:00	24	22.35	0.086	0.497	1.521	22.2	0.082	0.156	0.904		
12:00	25.5	22.4	0.149	0.753	2.524	22.3	0.138	0.237	1.492		
13:00	27.6	22.51	0.200	0.958	3.359	22.4	0.185	0.301	1.974		
14:00	28.6	22.61	0.215	1.006	3.656	22.5	0.198	0.316	2.155		
15:00	28.6	22.62	0.223	0.972	3.428	22.5	0.206	0.306	2.020		
16:00	29.1	22.58	0.250	0.866	2.456	22.4	0.231	0.272	1.450		
17:00	30	22.35	0.276	0.824	1.810	22.2	0.252	0.259	1.065		
18:00	30.1	22.12	0.232	0.537	0.836	22.0	0.213	0.169	0.489		
19:00	27.1	21.96	0.154	0.251	0.283	21.8	0.144	0.079	0.166		
20:00	25.4	21.82	0.087	0.105	0.186	21.5	0.090	0.033	0.108		
21:00	23.1	21.52	0.039	-0.031	0.025	21.2	0.046	-0.010	0.015		
22:00	22.1	21.26	0.009	-0.102	0.000	21.0	0.017	-0.032	0.000		
23:00	20.9	21.05	0.018	-0.084	0.000	20.8	0.025	-0.026	0.000		
Збир [kWh]:			-0.071	2.327	22.146				0.074	0.606	13.047
Него добици кроз прозоре [kWh]:					24.40					13.726	

Табела 5-6: Потрошња енергије за хлађење објекта

Месец	Референтни модел [MWh]	Након имплементације ОМ-2.2 [MWh]
Јануар	10.350	10.402
Фебруар	9.537	9.563
Март	12.278	12.335
Април	13.021	13.028
Мај	14.561	14.574
Јун	47.888	47.558
Јул	78.304	77.481
Август	66.502	65.794
Септембар	27.141	27.055
Октобар	12.519	12.538
Новембар	11.288	11.372
Децембар	10.711	10.777
Сума	314.100	312.476

5.1.2 Уштеде енергије услед изолације крова

Прорачун уштеда енергије на основу изолације крова показује релативно мале вредности које износе мање од 1% укупне потрошње објекта током године, односно 2% до 2,6% потрошње природног гаса током године. Ово се чини ниским, посебно с обзиром на то да кровна конструкција чини око 38% термичког омотача зграде (укључујући под, фасадне зидове, прозоре и врата).

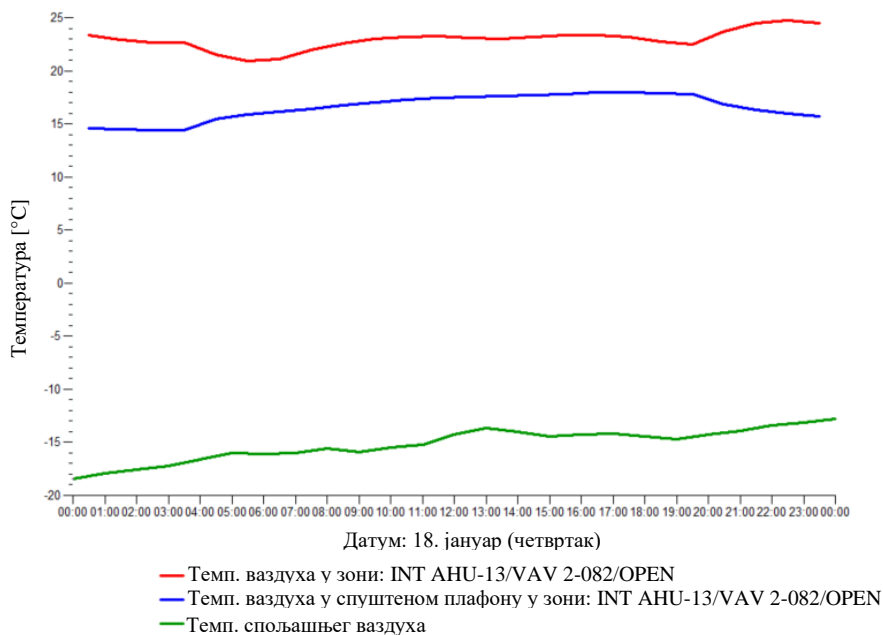
При оцени уштеда ове мере, као и за друге мере, претпоставља се да су осим изолације крова, све остале карактеристике објекта, тј. параметри модела, идентични као за усклађени референтни модел. То подразумева да је број корисника, начин коришћења објекта, системи и начин њиховог рада, исти као за усклађени референтни модел.

У случају КГХ система, то значи да системи за механичку вентилацију раде тако што се ваздух разводи системом канала до ВАВ кутија и вентилационих зона, а одатле враћа до клима комора кроз пленум тј. спуштен плафон. Један део повратног ваздуха у клима коморама се меша са свежим ваздухом, док се остатак избацује напоље као отпадни ваздух. Посебан систем за извлачење ваздуха имају само тоалети. Даље, око четрдесет ВАВ кутија под плафоном другог спрата, које снабдевају унутрашње зоне на другом спрату, имају топоводне догрејаче ваздуха.

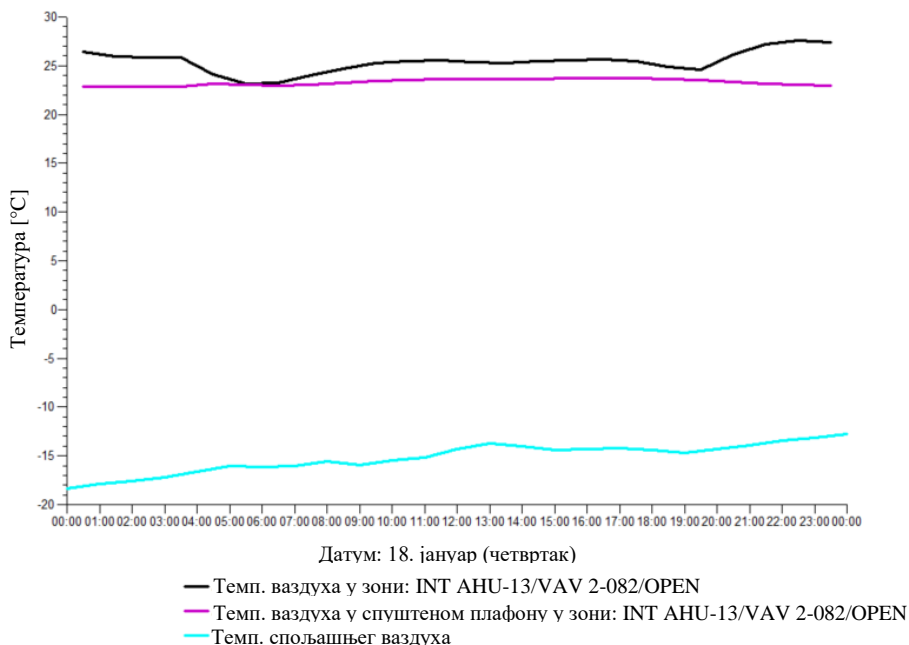
Повратни ваздух у простору спушеног плафона другог спрата спречава директну размену топлоте између спољашњег ваздуха и ваздуха у просторији. Дакле пролаз топлоте кроз кровну конструкцију се дешава са повратног ваздуха у пленуму на спољашњи ваздух.

Тренутна секвенца рада клима комора, која је верификована током референтног периода, је таква да се најчешће скоро сав повратни ваздух избацује напоље (мешни дампер је по правилу затворен). То значи да губици или добици топлоте повратног ваздуха који струји кроз простор спушеног плафона готово да не представљају директно топлотно оптерећење за КГХ системе у згради. Осим тога, догрејачи ваздуха у ВАВ кутијама под плафоном другог спрата одговорни су за само око 2% укупне потрошње гаса на објекту. Овако ниска потрошња енергије тих догрејача је последица чињенице да унутрашње зоне на другом спрату имају велике топлотне добитке током читаве године и ретко захтевају догревање.

Слика 5-2 представља типичну расподелу температура током грејне сезоне у унутрашњим зонама под плафоном другог спрата, које чине канцеларије отвореног типа. Расподела температура је резултат динамичке симулације објекта и у складу је са температурама измереним на самом објекту (које у том периоду износе нешто преко 23°C. Са слике се види да побољшање изолације крова доводи до повишења температуре ваздуха који струји у простору спуштеног плафона (са око 15°C на око 20°C). То индиректно значи и повећање топлотног оптерећења.



а) Температуре у референтном моделу



б) Температуре после имплементације ОМ-4

Слика 5-2 – Типичне температуре у контексту губитака топлоте кроз конструкцију крова током сезоне грејања

Током периода хлађења, побољшана изолација крова ће у довести до благог смањења топлотних добитака у периоду када је температура спољашње површине крова виша од температуре на коју се простор хлади. Међутим у периодима када је температура спољашње површине крова нижа од температуре простора који се хлади, побољшана изолација спречава пасивно хлађење кроз омотач објекта и пребацује топлотно оптерећење на машинске системе објекта. У овој климатској области, коју одликује релативно мали број сунчаних сати и температура спољашњег ваздуха које су преко 23°C то је чест случај. То значи да побољшана изолација крова у мањем броју сати смањује топлотне добитке, а у већем бројем сати „заробљава“ топлотну енергију унутар објекта.

Из наведених разлога, уштеде које може да омогући побољшање изолације крова само по себи су релативно мале, док већи утицај изолације крова на уштеде може да се очекује у ситуацији када се посматра спрегнут ефекат ове мере заједно са мерама које укључују рекуперацију топлоте отпадног ваздуха.

5.1.3 Мере за уштеду енергије на КГХ системима

Мере за уштеду енергије на КГХ системима имају за циљ оптимизацију система за вентилацију, укључујући регулацију количине свежег ваздуха и дистрибуције ваздуха, затим оптимизацију система за грејање и оптимизацију система за хлађење, укључујући централну и зонску опрему.

Што се тиче потрошње енергије КГХ система, према Табела 3-22 :

Табела 5-7 Потрошња енергије КГХ система за нормализован референтни модел

Потрошач	Нормализовани референтни модел			
	Ел. енергија	Природни гас	Тотал	Тотал
	[kWh]	[ekWh]	[ekWh]	%
Грејање простора		2.426.882	2.426.882	35,28
Овлаживање ваздуха		369.725	369.725	5,37
Хлађење простора	314.100		314.100	4,57
Одбацивање топлоте	15.898		15.898	0,23
Централни вентилатори	464.340		464.340	6,75
Локални вентилатори	34.503		34.503	0,50
Вентилатори отпадног ваздуха	15.505		15.505	0,23
Процесни вентилатори	28.859		28.859	0,42
Пумпе	154.702		154.702	2,25
Припрема санитарне топле воде		144.057		2,09
Тотал	1.027.907	2.796.607	3.824.514	55,60

Пошто је потрошња енергије за грејање простора највећа и највећи је и потенцијал за уштеду мера које циљају на смањење потрошње енергије за грејање. То су мере које укључују:

- Смањење количине свежег ваздуха
- Рекуперацију топлоте отпадног ваздуха
- Рекуперацију топлоте из унутрашњих зона (без спољашњих зидова) које се хладе за грејање зона по ободу објекта.

То су мере КГХ-1.х и КГХ-2.х. После тога следе мере које се односе на смањење потребне енергије за овлаживање ваздуха, хлађење и рад централних вентилатора.

Највеће уштеде енергије могуће је остварити имплементацијом система за вентилацију са минимумом свежег ваздуха¹³ у комбинацији са ВРВ системом са рекуперацијом топлоте на нивоу

¹³ Централни систем за вентилацију допрема до појединих вентилационих зона само онолико свежег ваздуха колико је минимално неопходно према одговарајућим стандардима, нпр. ASHRAE-62.1.

зона (КГХ-1.3). Међутим инвестициони трошкови за имплементацију ове мере су веома високи, тако да је НПВ за 25 година негативан. Са друге стране имплементацијом решења која омогућују нешто мање уштеде енергије, али се заснивају на јефтинијим технологијама, могуће је остваривање позитивне вредности за НПВ након 25 година (КГХ-1.4).

6 РАЗВОЈ И АНАЛИЗА ОПТИМАЛНИХ ПАКЕТА МЕРА ЗА УШТЕДУ ЕНЕРГИЈЕ

Имплементација сваке од анализираних индивидуалних мера за уштеду енергије, које се одnose на омотач објекта, КГХ системе, електричне системе и употребу обновљивих извора енергије, има економске, енергетске и еколошке последице. Наравно, ефекти имплементације више мера, нису једнаки простом збиру ефеката индивидуалних мера.

Крајњи циљ процеса планирања енергетске оптимизације није одабир једне „најбоље“ мере (без обзира шта је критеријум), већ дефинисање сценарија и стратегије енергетске оптимизације. У различитим случајевима, различити актери, укључујући кориснике и власнике објекта, инвестиционе фондове, локална, државна, или међународна регулативна тела итд. могу да буду заинтересовани за процес енергетске оптимизације објекта. Сходно томе и циљеви оптимизације могу бити различити. Због тога је неопходно разумети економске, енергетске и еколошке аспекте имплементације пакета мера за уштеду енергије и омогућити одабир пакета мера тј. сценарија који би обезбедио оптимизацију по тим критеријумима. Дакле, неопходно је развити три основна сценарија енергетске оптимизације објекта:

- Сценарио 1 - обезбеђује минималну жељену уштеду енергије и смањење емисије уз најмање могуће трошкове пројекта током анализираног периода (25 година);
- Сценарио 2 - омогућава максимално могуће смањење потрошње енергије и емисије гасова стаклене баште, уз неутралне трошкове након 25 година;
- Сценарио 3 - обезбеђује максимално технички изводљиво смањење потрошње енергије и емисије гасова стаклене баште, без обзира на економски критеријум тј. цену имплементације и трошкове експлоатације (НСВ – нето садашња вредност).

Наравно, енергетски и еколошки ефекти пакета мера (сценарија) не представљају прост збир учинка индивидуалних мера [19]. Примера ради, уградња регенератора топлоте отпадног ваздуха на постојећи систем вентилације обезбеђује одређене уштеде у енергији. Међутим, уколико се пре уградње регенератора прво оптимизује систем за вентилацију и смањи количина свежег ваздуха која се током године убацује у објекат, у том случају ће уградња регенератора обезбедити мање уштеде енергије, него ако се уградња обави пре него што се смањи количина ваздуха за вентилацију. Такође, ако се прво имплементирају мере које побољшавају термички омотач објекта, онда имплементација мера које побољшавају ефикасност система за грејање и хлађење неће обезбедити толике уштеде енергије као када би имплементирале директно на референтно стање, и обрнуто.

Овакви квалитативни закључци нису увек очигледни и интуитивни као у претходна два примера, а осим тога, неопходна је и квантификација спрегнутог ефекта МУЕ. Због тога, до оптималног одабира комбинације мера које чине пакет тј. сценарио, могуће је доћи само итеративним путем, испробавајући и симулирајући различите технички могуће комбинације индивидуалних МУЕ.

6.1 Сценарио 1 – Испуњавање минималних захтева за уштеду енергије уз оптимизацију по економском критеријуму

Сценарио 1 представља комбинацију МУЕ, оптимизоване по економском параметру, уз услов испуњавања минимума регулативних и/или индустријских стандарда везаних за потрошњу енергије.

Као параметар економске оптимизације узима се нето садашња вредност (НСВ). Вредност НСВ у неком пресеку времена представља разлику прихода (тј. уштеда) и расхода на пројекту и суштински представља меру исплативости пројекта. Конкретно, НСВ је збир дисконтованих новчаних прилива и одлива у економском веку пројекта. Економски најбољи пројекат је онај

који има највећу НСВ на 25 година¹⁴. Са друге стране, имплементација пакета мера које треба да чине Сценарио 1, мора да обезбеди да објекат задовољи критеријуме везане за остваривање минималних прихватљивих уштеда у потрошњи енергије уз поштовање постојећих стандарда и регулативе. У конкретном случају, циљ је да после имплементације пакета мера Сценарија 1, потрошња енергије на објекту буде најмање 24% нижа у односу на референтну вредност према одговарајућем стандарду о енергетским перформансама NECB-2017 [63]¹⁵.

Дакле, критеријуми за дефинисање Сценарија 1 гласе:

- Максимална потрошња енергије објекта не сме да пређе 76% од референтног објекта према NECB-2017 [63].
- Највиша могућа вредност НСВ уз остварен претходни услов

6.1.1 Референтни модел

Референтни модел објекта у односу на неки енергетски стандард, у овом случају NECVB-2017 [63] је заправо постојећа зграда која је модификована тако да испуњава све критеријуме одабраног енергетског стандарда, попут термо-физичких карактеристика омотача објекта, услова угодности у објекту, минималне ефикасности машинске опреме, максималне инсталисане снаге расвете итд.

NECB модел је дефинисан према путањи извођења која је у складу са поглављима 3.2; 4.2; 5.2; 6.2, 7.2 [63].

¹⁴ Период од 25 година за оцену исплативости пројекта представља индустријску праксу и заснива се на просечном животном веку опреме и система у објекту.

¹⁵ Према регулативи Републике Србије, пандан би био „Правилник о енергетској ефикасности зграда“

Табела 6-1 Поређење параметара NECB модела и параметара нормализованог референтног модела

Табела 6-Параметри модела	NECB 2017 модел	Нормализовани референтни модел
Распореди	Сви времена рада опреме и система, као и периоди у којима корисници бораве у објекту су идентични за NECB и нормализовани модел	
Подови-врата-Прозори-кров односи	Однос површине отвора за врата и прозоре према површини нетранспарентних позиција на објекту је у складу са захтевима NECB стандарда према члану 3.2.1.4. што значи да је NECB модел наследио геометрију постојећег објекта без корекција, тј. да је однос тих површина исти за NECB и нормализован модел.	
Метеоролошки услови	CAN_MB_Winnipeg-Richardson.Intl.AP.718520_CWEC2016.epw	
Површина пода	Укупна површина пода је идентична за NECB модел и за нормализовани модел.	
Region NECB	Region 7A with (5000<HDD<5999). Winnipeg Tax Centre 2018 HDD: 5670	
Спољашњи зидови	<p>Према табели 3.2.2.2. дебљине изолације и укупни топлотна проводљивост су подешени да буду у складу са NECB стандардом .</p> <p>Сви спољашњи зидови изнад нивоа тла: U-0.210 W/m²K</p>	Спољашњи зидови: U-0.292 W/m²K
Кровне конструкције и под на тлу	<p>Дебљине изолације и коефицијенти пролаза топлоте су према табели 3.2.2.2 референтног стандарда.</p> <p>Кров: U-0.138 W/m²K Под на тлу: U-0.162 W/m²K</p>	<p>Кров: U-0.290 W/m²K Под на тлу: U-0.220 W/m²K</p>
Транспарентне позиције (прозори)	<p>Термофизичке карактеристике транспарентних позиција су моделоване према табели 3.2.2.3 стандарда:</p> <p>Алуминијумски рам U-1.90 W/m²K g=0.4029 VLT=0.71</p>	<p>Алуминијумски рам U-2.940 W/m²K, g=0.7075 VLT=0.71</p>
Врата	Спољашња врата – U-1.9a0 W/m²K	Спољашња врата – U-2.20 W/m²K
Застори	Геометрија застора је идентична у оба модела	
Инфилтрација	табела А-8.4.3.3.(3) константна вредност 0.25 l/(s·m²)	константна вредност 0.30 l/(s·m²)
Температуре и остали радни	Захтевани услови угодности у оба модела су идентични, као и радни режими система за КГХ.	

Табела 6-Параметри модела	NECB 2017 модел	Нормализовани референтни модел																								
параметри КГХ система																										
Добици од људи	Добици од људи у објекту су идентични за NECB и нормализовани модел.																									
Електрична опрема и при- кључни уре- ђаји	Снаге и добици од електричне опреме и прикључних уређаја су идентични у оба модела																									
Свеж ваздух	Количина неопходног свежег ваздуха за вентилацију је дефинисана према ASHRAE 62.1 стандарду. Веће вредности свежег ваздуха су дозвољене само у случају хлађења.	Количине свежег ваздуха за вентилацију су у складу са калибрисаним моделом.																								
Вентилатори отпадног ваз- духа	Exhaust fans are set identically for NECB model and adjusted baseline model.																									
Снага унутрашње расвете	Густина инсталисане снаге унутрашње расвете је моделована методом појединачних просторија према NECB 2017 / 4.2.1.4 а према вредностима из табеле 4.2.1.6 сдандарда <table border="1" data-bbox="389 1128 890 1697"> <tr><td>Класична канцеларија: 10 W/m²</td></tr> <tr><td>Отворена канцеларија (опен офис): 8.7 W/m²</td></tr> <tr><td>Свлачионица: 5.2 W/m²</td></tr> <tr><td>Кухиња: 6.8 W/m²</td></tr> <tr><td>Остава < 5m²: 10.4 W/m²</td></tr> <tr><td>Остава > 5m²: 6.8 W/m²</td></tr> <tr><td>Степеништа: 6.2 W/m²</td></tr> <tr><td>Ходници: 6.9 – 7.1 W/m²</td></tr> <tr><td>Тоалети: 9.1 W/m²</td></tr> <tr><td>Серверске собе: 14.3 W/m²</td></tr> <tr><td>Електро и машинске собе: 4.6 W/m²</td></tr> <tr><td>Предворја: 10.8 W/m²</td></tr> </table>	Класична канцеларија: 10 W/m ²	Отворена канцеларија (опен офис): 8.7 W/m ²	Свлачионица: 5.2 W/m ²	Кухиња: 6.8 W/m ²	Остава < 5m ² : 10.4 W/m ²	Остава > 5m ² : 6.8 W/m ²	Степеништа: 6.2 W/m ²	Ходници: 6.9 – 7.1 W/m ²	Тоалети: 9.1 W/m ²	Серверске собе: 14.3 W/m ²	Електро и машинске собе: 4.6 W/m ²	Предворја: 10.8 W/m ²	Густина инсталисане снаге расевте у просторима еквивалентне намене у нормализованом референтном моделу <table border="1" data-bbox="932 1160 1433 1727"> <tr><td>Класична канцеларија: 5 W/m²</td></tr> <tr><td>Отворена канцеларија (опен офис): 4.35 W/m²</td></tr> <tr><td>Свлачионица: 5.2 W/m²</td></tr> <tr><td>Кухиња: 5.7 W/m²</td></tr> <tr><td>Остава < 5m²: 6.8 W/m²</td></tr> <tr><td>Остава > 5m²: 6.8 W/m²</td></tr> <tr><td>Степеништа: 3.1 W/m²</td></tr> <tr><td>Ходници: 4 W/m²</td></tr> <tr><td>Тоалети: 4.55 W/m²</td></tr> <tr><td>Серверске собе: 7.15 W/m²</td></tr> <tr><td>Електро и машинске собе: 4.6 W/m²</td></tr> <tr><td>Предворја: 5.4 W/m²</td></tr> </table>	Класична канцеларија: 5 W/m ²	Отворена канцеларија (опен офис): 4.35 W/m ²	Свлачионица: 5.2 W/m ²	Кухиња: 5.7 W/m ²	Остава < 5m ² : 6.8 W/m ²	Остава > 5m ² : 6.8 W/m ²	Степеништа: 3.1 W/m ²	Ходници: 4 W/m ²	Тоалети: 4.55 W/m ²	Серверске собе: 7.15 W/m ²	Електро и машинске собе: 4.6 W/m ²	Предворја: 5.4 W/m ²
Класична канцеларија: 10 W/m ²																										
Отворена канцеларија (опен офис): 8.7 W/m ²																										
Свлачионица: 5.2 W/m ²																										
Кухиња: 6.8 W/m ²																										
Остава < 5m ² : 10.4 W/m ²																										
Остава > 5m ² : 6.8 W/m ²																										
Степеништа: 6.2 W/m ²																										
Ходници: 6.9 – 7.1 W/m ²																										
Тоалети: 9.1 W/m ²																										
Серверске собе: 14.3 W/m ²																										
Електро и машинске собе: 4.6 W/m ²																										
Предворја: 10.8 W/m ²																										
Класична канцеларија: 5 W/m ²																										
Отворена канцеларија (опен офис): 4.35 W/m ²																										
Свлачионица: 5.2 W/m ²																										
Кухиња: 5.7 W/m ²																										
Остава < 5m ² : 6.8 W/m ²																										
Остава > 5m ² : 6.8 W/m ²																										
Степеништа: 3.1 W/m ²																										
Ходници: 4 W/m ²																										
Тоалети: 4.55 W/m ²																										
Серверске собе: 7.15 W/m ²																										
Електро и машинске собе: 4.6 W/m ²																										
Предворја: 5.4 W/m ²																										
Контрола унутрашње расвете	Према NECB 2017 за посебне просторе према табели 4.2.1.6 стандарда, моделован је профил контроле помоћу димера и сензора присутности у канцеларијама односно сензора присутности у машинским и електро собама	Нормализовани модел нема аутоматску контролу расвете																								

Табела 6-Параметри модела	NECB 2017 модел	Нормализовани референтни модел
Снага спољашње расвете	Иста инсталисана снага као за нормализован модел (55 kW), али је време рада моделовано према поглављима 4.3.2.1.-А, 4.3.2.1.-В и 4.3.2.1.-С стандарда.	Спољна расвета је моделована према постојећој документацији. Укључује ЛЕД светла на прилазима згради, паркингу и фасади. Укупна инсталисана снага спољашње расвете износи: 55 kW
Централни системи за вентилацију и климатизацију	<u>NECB 8.4.4.7.-А и 8.4.4.7.-В</u> NECB КГХ систем за референтне зграде HVAC тип 6, према 8.4.4.7.-В.	Опис система је дат у поглављу 3.4.
Вентилатори за отпатни ваздух	Систем вентилатора за отпадни ваздух је идентичан у NECB и нормализованом моделу	
Жељени услови угодности	Температуре до којих се простори загревају и преко којих се хладе, као и релативна влажност ваздуха у простору, идентични су за NECB и нормализовани модел	
Котларница	2 кондензациона котла на природни гас моделована према табели 5.2.12.1 (1) стандарда: капацитет >733kW, ефикасност 83.3% Према 8.4.4.9.h контрола температуре разводне воде са компензацијом према температури спољашњег ваздуха: 82°C при спољној температури до -16°C, 60°C при спољној температури изнад 0°C. Линеарна зависност између ове две тачке	Опис система је дат у поглављу 3.4
Чилерско постројење	NECB – Два електрична водом хлађена чилера / константна температура разводне воде / циркулационе пумпе са константним бројем обртаја Два водом хлађена чилера капацитета > 2100kW моделована према 8.4.4.10.6 10% степен сигурности при димензионасању. Температура разводне воде 7 °C, уз ΔT=6°C и могућност рада у парцијалном оптерећењу до 25% капацитета	Опис система је дат у поглављу 3.4

Табела 6-Параметри модела	NECB 2017 модел	Нормализовани референтни модел
	Ефикасност чилера дефинисана је према 5.2.12.1.	
Отпадна топлота	Тип опреме је расхладна кула моделована према поглављу 8.4.4.11.2 стандарда NECB Температура воде на улазу у расхладну кулу је 35°C, а на излазу из куле 29°C Снага вентилатора: 13.612W	Опрема за одбацивање отпадне топлоте укључује вентилаторе ваздухом хлађених кондензатора на чилерима и сплит системима за серверску собу и штампарију.
Санитарна топла вода	Систем и потрошња санитарне топле воде су идентични за NECB и нормализовани модел	
Рекулерација топлоте отпадног ваздуха	Регенератор топлоте отпадног ваздуха у клима комори је моделован према табели 8.4.4.19 стандарда.	Нормализовани модел не садржи регенератор топлоте отпадног ваздуха

Поређење потрошње NECB референтног модела и нормализованог референтног модела, приказани су у табели испод.

Табела 6-2 Поређење резултата нормализованог референтног модела и NECB модела

Потрошач	Нормализовани референтни			NECB 2017		
	Електрична енергија	Природни гас	Укупно	Е-лектрична енергија	Природни гас	Укупно
	[kWh]	[ekWh]	[ekWh]	[kWh]	[ekWh]	[ekWh]
Унутрашња расвета	642,346	-	642,346	1,214,052		1,214,052
Спољна расвета	281,050	-	281,050	274,578		274,578
Прикључни уређаји	1,374,118	-	1,374,118	1,374,118		1,374,118
Лифтови и покретна степеништа	66,483	-	66,483	66,483		66,483
Остали потрошачи	220,829	-	220,829	220,829		220,829
Грејачи мотора аутомобила	21,168	-	21,168	21,168		21,168
Велики штампачи	304.762	-	304.762	304.762		304.762
Грејање	-	2.426.882	2.426.882	8.227	1.338.178	1.346.405
Овлаживање ваздуха	-	369.725	369.725		109.143	109.143
Хлађење	314.100	-	314.100	238.664		238.664
Вентилатори и пумпе хладњака кондензатора	15.898	-	15.898	76.131		76.131
Пумпе	154.702	-	154.702	219.095		219.095
Централни вентилатори	464.340	-	464.340	599.638		599.638
Локални вентилатори	34.503	-	34.503	37.538		37.538
Вентилатори отпадног ваздуха	15.505	-	15.505	15.505		15.505
Процесни вентилатори	28.859	-	28.859	28.859		28.859
Санитарна топла вода	-	144.057	144.057		141.978	141.978
Тотал	3.938.663	2.940.664	6.879.327	4.699.647	1.589.299	6.288.946

6.1.2 Резултати и анализа

Дакле циљеви Сценарија 1 су смањење емисије гасова стаклене баште на највише 60% од референтне вредности, тј емисије из 2005 и смањење укупне потрошње енергије на највише 75% од референтног NECB стандарда (25% бољи него NECB).

Табела 6-3 Референтне вредности потрошње и емисије за сценарио 1

Граница укупне потрошње за Сценарио 1, 24% боље него NECB (kWh)	Сценарио 1 граница за емисију (tCO ₂ e)
4,779,599	511

При разматрању мера за Сценарио 1 у обзир су узете само оне са позитивном НСВ након 25 година, јер је НСВ критеријум оптимизације.

Итеративним поступком, дефинисане је следећи пакет мера:

Табела 6-4 Пакет мера за уштеду енергије за сценарио 1

Број	Опис мере за уштеду енергије
ОМ-2.1	Замена прозора (Опција 1) уз побољшање заптивања омотача
КГХ-1.4	Замена постојећих клима комора ефикаснијим системима са рекуперацијом топлоте и минималном количином свежег ваздуха према ASHRAE стандарду. Задржава се постојећа дистрибуције ваздуха. Увођење нискотемпературског грејања. Замена постојећих топловодних калорифера електричним.
КГХ-3	Рекуперативни чилер за хлађење у зимском периоду
КГХ-1.4	Замена парних овлаживача на природни гас електричним
КГХ-8	КГХ-8 – Замена постојећих ваздушно хлађених чилера ефикаснијим водено хлађеним чилерима са магнетним легајевима
РАС-2	Контрола расвете помоћу сензора присутности

6.2 Сценарио 2 – Максимално смањење потрошње и емисије уз неутралне трошкове

Сценарио 2 представља пакет мера који обезбеђује економски неутралан начин да се током 25 година остваре максималне могуће уштеде енергије и смањење емисије гасова стаклене баште. Дакле, полазни услов при креирању пакета мера је да НСВ након 25 година треба да буде практично нула, док је критеријум оптимизације потрошња финалне енергије.

Табела 6-2 Поређење резултата нормализованог референтног модела и NECB модела приказује пакет мера за сценарио 2 који је дефинисан итеративним поступком.

Табела 6-5 Пакет мера за уштеду енергије за сценарио 2

Број	Опис мере за уштеду енергије
ОМ-2.2	ОМ-2.1 и ОМ-2.2 – Замена прозора (опција 1 и опција 2)
КГХ-1.1	DOAS са ротационим регенератором топлоте комбинован са вентила-тор конвекторима, нискотемпературским грејањем и новим чилером са одвојеним кондензатором за зимско хлађење. КГХ-1.3 – DOAS са ротационим регенератором комбинован са расхладним гредама
КГХ-5	КГХ-5 – Геотермална топлотна пумпа у комбинацији са КГХ-1.
КГХ-9.1	КГХ-9.1 – Замена гасних котлова за припрему санитарне топле воде електричним
КГХ-7.2	КГХ-7.2 – Замена парних овлаживача на природни гас адијабатским овлаживачима (ултразвучним)
ЕЛ-1	ЕЛ-1 Смањење потрошње електричне енергије канцеларијских уређаја
РАС-1	РАС-1 Централизована контрола расвете са поделом на зоне
РАС-2	Контрола расвете сензорима присутности
ОИЕ-2	ОИЕ-2 – Фотонапонске ћелије на крову

Као обавезне мере, узете су оне које су неопходне због задовољавања минимума регулативних захтева, попут замене прозора на објекту.

Због ниског фактора емисије гасова стаклене баште за електричну енергију у провинцији Манитоба, у којој се налази објекат, основна идеја при формирању пакета је била да се користе мере које омогућавају релативно економичну замену природног гаса као енергента електричном енергијом.

Вреди напоменути да овакав приступ обезбеђује смањење емисије гасова стаклене баште на локацији објекта. Разлог томе је што већина регулативних механизма који се примењују у свету не узима у обзир емисију гасова стаклене баште при производњи опреме, већ се фокусира на смањење емисије гасова стаклене баште проистекле из потрошње енергије код крајњег корисника.

Примера ради, производња фото-напонских ћелија захтева велику количину ресурса. На основу истраживања, процењено је да производња и рециклажа фото напонских ћелија номиналног капацитета од 1 kWDC генерише између 0,5 и 2 тоне гасова стаклене баште. Панели произведени коришћењем термо електрана на угаљ, какав је случај у Кини, производе још већу емисију гасова стаклене баште. У случају анализираних зграда пореске управе у Винипегу, предложени систем од 1.156 kWDC би на глобалном нивоу довео до повећања емисије стаклених гасова од најмање 578 t, док би на локалном нивоу (што укључује електро-дистрибутивну мрежу и објекат) довео до смањења емисије у износу од 71 t. Емисија гасова стаклене баште услед производње опреме није била разматрана у оквиру овог истраживања. Ипак, важно је имати холистички приступ и перспективу када се говори о „зеленој“ енергији.

На основу резултата симулације и економске анализе, процењено је да пакет мера за сценарио 2 може да обезбеди смањење потрошње природног гаса од 97,6% и смањење потрошње електричне енергије од 20,5%, што представља укупно смањење потрошње финалне енергије од 53,5%. На основу тога, процењено смањење емисије гасова стаклене баште износи 96,5%. Економском анализом трошкова пројекта и уштеде у смислу избегнутих трошкова за одржавање и замену постојеће опреме и потрошњу енергије, утврђена је НСВ од 79.729 \$.

6.3 Сценарио 3 – Максимизација смањења потрошње и емисије

Сценарио 3 представља пакет МУЕ које обезбеђује максимално технички изводљиво смањење потрошње енергије и емисије гасова стаклене баште, без обзира на трошкове имплементације и експлоатације, односно НСВ.

Овај пакет предвиђа имплементацију свих мера на омотачу објекта укључујући побољшање изолације крова и зидова, као и замену прозора уз смањење инфилтрације.

Као и код пакета мера за сценарио 2, и овде је фокус био на коришћењу енергента са најмањим фактором емисије ГСБ.

Табела 6-6 Пакет мера за уштеду енергије за сценарио 3

Број	Опис мере за уштеду енергије
ОМ-1	Побољшана изолација спољашњих зидова
ОМ-2.2	ОМ-2.1 и ОМ-2.2 – Замена прозора (опција 1 и опција 2)
ОМ-4.1	Побољшана изолација крова (опција 2)
КГХ-1.2	КГХ-1.2 – DOAS са ротационим регенератором топлоте комбинован са VRF системом са рекуперацијом топлоте.
КГХ-5	КГХ-5 – Геотермална топлотна пумпа у комбинацији са КГХ-1.
КГХ-9.1	КГХ-9.1 – Замена гасних котлова за припрему санитарне топле воде електричним
КГХ-7.2	КГХ-7.2 – Замена парних овлаживача на природни гас адијабатским овлаживачима (ултразвучним)
ЕЛ-1	ЕЛ-1 Смањење потрошње електричне енергије канцеларијских уређаја
РАС-1	РАС-1 Централизована контрола расвете са поделом на зоне
РАС-2	Контрола расвете сензорима присутности
ОИЕ-2	ОИЕ-2 – Фотонапонске ћелије на крову

С обзиром на то да спрегнути ефекат више МУА није једнак простом збиру појединачних МУА и овде је процес дефинисања пакета био итеративни поступак кроз који су евалуиране различите комбинације мера.

Са циљем остварења сценарија у којем објекат при експлоатацији готово да не узрокује емисију ГСБ, неопходна је интензивна примена обновљивих извора енергије, тако да су у обзир узети геотермална топлотна пумпа и фотонапонске ћелије на крову.

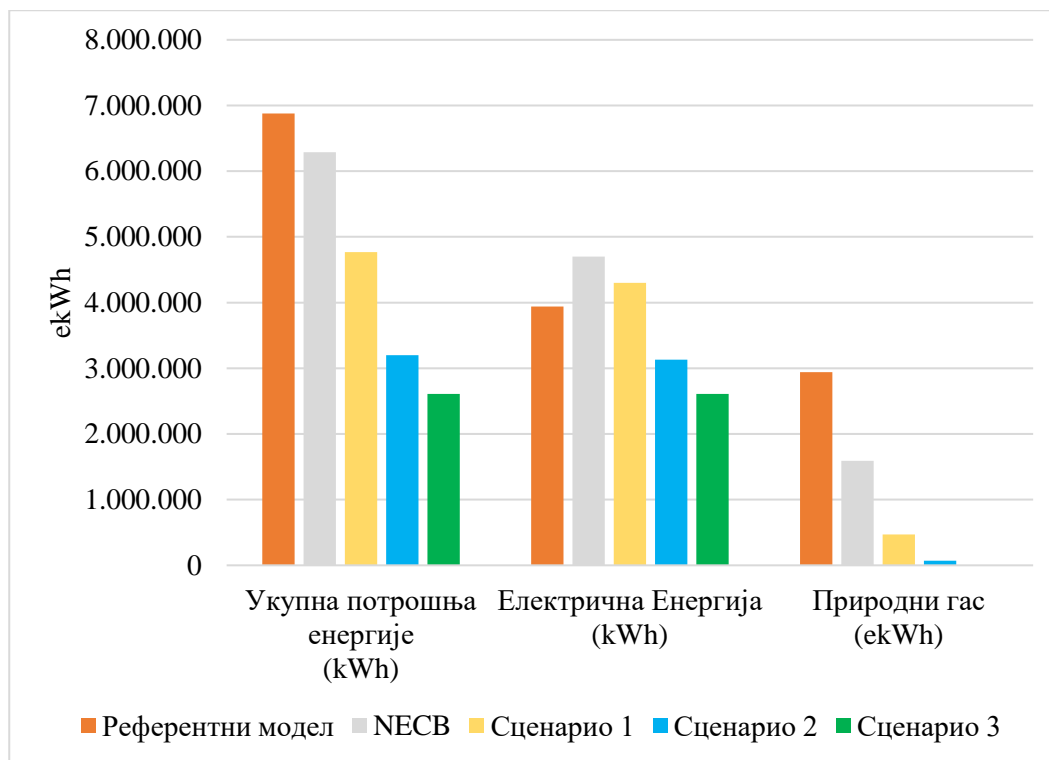
Помоћу анализе методологијом дефинисаном у овој дисертацији, процењено је да пакет мера за сценарио три може у потпуности да елиминира употребу природног гаса и да обезбеди 53,5% уштеде финалне енергије у односу на нормализовани референтни модел. Међутим, НСВ након 25 година је изразито неповољна и изно-си -27,480,737 \$.

6.4 Упоредна анализа сценарија

Табела 6-7 приказује резултате моделирања и симулације Сценарија 1, Сценарија 2 и Сценарија 3. Приказани су кључно енергетски параметри које чини укупна потрошња финалне енергије према енергентима, економски параметри изражени преко НСВ након 25 година и еколошки параметри изражени преко еквивалентне емисије ГСБ.

Табела 6-7 Упоредна анализа резултата сценарија

	Сценарио 1	Сценарио 2	Сценарио 3
Електрична Енергија (kWh)	4.299.839	3.130.464	2.608.355
Кумулативна вршна електрична снага (kW)	8.938	8.429	4.168
Природни гас (ekWh)	469.910	70.509	0
Приодни гас (m3)	44.647	6.699	0
Укупна потрошња енергије (kWh)	4.769.748	3.200.972	2.608.354
Сценарио 1 емисија (tCO2e)	94,9	18,5	4,9
Смањење кумулативне вршне електричне снаге (kW)	-447,4	35,4	4.295,6
Годишња уштеда електричне енергије (kWh)	-361.175	808.199	1.330.308
% уштеде електричне енергије	-9,17%	20,52%	33,78%
Годишња уштеда природног гаса (kWh)	2.470.754	2.870.155	2.940.664
% уштеде природног гаса	84,0%	97,6%	100,0%
Годишња уштеда финалне енергије (kWh)	2.109.578	3.678.354	4.270.972
% уштеде финалне енергије	30,7%	53,5%	62,1%
Годишња уштеда природног гаса (m3)	224.965,4	272.698,6	279.397,8
Смањење емисије гасова стаклене баште (t CO2e)	425,9	518,7	532,3
Статус кво (t CO2e)	520,8	537,2	537,2
Процентуално смањење емисије гасова стаклене баште %	81,8%	96,5%	99,1%
НСВ (\$, 25 година)	1.335.127	79.729	-27.480.737



Слика 6-1 Упоредна анализа потрошње и емисије за три оптимална пакета мера

Сценарио 1 представља економски оптимално решење. Очекивано је да такав приступ буде најприхватљивији за приватне инвеститоре који морају да задовоље минимум регулативних захтева, при чему теже за максимизацијом економских параметара пројекта.

Сценарио 2 представља решење које је вероватно оптимално за јавне објекте у власништву органа јавне управе и непрофитних организација. Обезбеђује економски неутрално решење током 25 година, уз максимизацију смањења потрошње енергије и емисије гасова стаклене баште. Додатно смањење потрошње енергије и загађења свакако имају низ бенефита на енергетски сектор, локалне еколошке у слове и климатске промене, а решење је економски неутрално.

Сценарио 3 представља решење са изразито неповољном економијом пројекта, али обезбеђује максимално могуће смањење потрошње и емисије. Овакав приступ може да има смисла у случају показних објеката или у случају да нема другог начина да се остваре регионалне или међународне квоте и циљеви везани за смањивање емисије гасова стаклене баште.

7 ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Приступ какав се по правилу сусреће у инжењерској пракси пракса нуди само ограничен и недовољно детаљан увид у енергетске перформансе објекта, односно нетранспарентне и често арбитрарне процене ефеката мера за уштеду енергије. Са друге стране, истраживачка пракса се највише бави развојем алата за калибрисану симулацију динамичког понашања објекта, или развојем, унапређењем и евалуацијом конкретних индивидуалних мера за уштеду енергије, али без разматрања трошкова њихове имплементације и експлоатације или поређења са алтернативним решењима у ширем контексту оптимизације енергетских перформанси зграде са свим њеним системима.

Дисертација је дефинисала кораке у методологији за евалуацију и оптимизацију енергетског понашања зграда. Методологија тестирана на конкретном постојећем објекту обухвата начин испитивања постојећег стања зграде, укључујући њене архитектонске, термо-физичке и техничке карактеристике, затим израду физичко-математичког модела и калибрисане

симулације енергетског понашања објекта, идентификацију, опис, симулацију и евалуацију низа индивидуалних мера за уштеду енергије и на крају развој оптималних сценарија за унапређење енергетске ефикасности зграде.

Осим што је у дисертацији развијена методологија, њеном имплементацијом на конкретном примеру дошли смо до неких интересантних закључака.

У зависности од типа објекта, његових термотехничких система и начина коришћења, имплементација мера за унапређење термичког омотача објекта, не мора имати значајне енергетске ефекте.

За објекте са механичком вентилацијом, највећи потенцијал за оптимизацију потрошње често је везан управо за конфигурацију, ефикасност и начин рада система за климатизацију, грејање и хлађење.

Унапређење енергетске ефикасности постојећих објеката који су грађени у периоду пре енергетске кризе и пре него што је развијена савремена регулатива и стандарди у области енергетске ефикасности у зградама, могућа је уз позитивне економске параметре пројекта и на ниво који је значајно изнад постојећих регулативних минимума.

Уз неутралне економске параметре, могуће је значајно унапређење енергетске ефикасности и смањење емисије постојећих објеката.

Унапређење енергетских перформанси постојећих објеката до нивоа који их чини нето неутралним у погледу емисије гасова стаклене баште, могуће је само уз изразито негативне економске параметре пројекта тј. само уз веома висока улагања.

Дакле и у индустрији и у истраживању постоји потреба за јединственом и практичном методологијом која би обухватила све неопходне кораке у оптимизацији енергетских перформанси зграда. Ова дисертација нуди управо то, методологију која је успешно развијена и имплементирана и омогућава, систематичну, детаљну и транспарентну анализу енергетских перформанси зграда, симулације динамичког понашања и евалуације мера за уштеду енергије. То представља суштинско и важно унапређење постојеће индустријске праксе и истраживања.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] D. Sánchez-García, C. Rubio-Bellido, J.J.M. del Río, A. Pérez-Fargallo, Towards the quantification of energy demand and consumption through the adaptive comfort approach in mixed mode office buildings considering climate change, *Energy Build.* 187 (2019) 173–185.
- [2] Eurostat, Final Energy Consumption by Sector, 2014 (available at: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database), (n.d.).
- [3] [<https://www.nrcan.gc.ca/home>], (n.d.).
- [4] IEA, [IEA ECBCS Programme Annex 46, Energy Process Assessment Protocol, Annex 46, 2009], (n.d.).
- [5] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, C. Pout, A review on buildings energy consumption information, *Energy Build.* 40 (2008) 394–398.
- [6] T. Olofsson, S. Andersson, J.-U. Sjögren, Building energy parameter investigations based on multivariate analysis, *Energy Build.* 41 (2009) 71–80.
- [7] T. Catalina, J. Virgone, E. Blanco, Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings, *Energy Build.* 40 (2008) 1825–1832.
- [8] B.B. Ekici, U.T. Aksoy, Prediction of building energy consumption by using artificial neural networks, *Adv. Eng. Softw.* 40 (2009) 356–362.
- [9] Z. Yu, F. Haghghat, B.C.M. Fung, H. Yoshino, A decision tree method for building energy demand modeling, *Energy Build.* 42 (2010) 1637–1646.
- [10] Crawley, *EnergyPlus*, (2001).
- [11] W.A.B. S.A. Klein, J.A. Duffie, TrnsysA–transient simulation program, *ASHRAE Trans.* 82 623–633. (1976).
- [12] S.G. F.C. Winkelmann, B.E. Birsdall, W.F. Buhl, K.L. Ellington, A.E. Erdem, J.J. Hirsch, DOE-2 Supplement Version 2.1E, Technical Report, (1993).
- [13] C. Hachem, A. Athienitis, P. Fazio, Energy performance enhancement in multistory residential buildings, *Appl. Energy.* 116 (2014) 9–19.
- [14] U.Y. Ayikoe Tettey, L. Gustavsson, Energy savings and overheating risk of deep energy renovation of a multi-storey residential building in a cold climate under climate change, *Energy.* 202 (2020) 117578.
- [15] K.N. Streicher, S. Mennel, J. Chambers, D. Parra, M.K. Patel, Cost-effectiveness of large-scale deep energy retrofit packages for residential buildings under different economic assessment approaches, *Energy Build.* 215 (2020) 109870.
- [16] M. Ghajarkhosravi, Y. Huang, A.S. Fung, R. Kumar, V. Straka, Energy benchmarking analysis of multi-unit residential buildings (MURBs) in Toronto, Canada, *J. Build. Eng.* 27 (2020) 100981.
- [17] F. Ascione, N. Bianco, T. Iovane, G.M. Mauro, D.F. Napolitano, A. Ruggiano, L. Viscido, A real industrial building: Modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit, *J. Build. Eng.* 29 (2020) 101186.
- [18] S.E. Chidiac, E.J.C. Catania, E. Morofsky, S. Foo, A screening methodology for implementing cost effective energy retrofit measures in Canadian office buildings, *Energy Build.* 43 (2011)

614–620.

- [19] S.E. Chidiac, E.J.C. Catania, E. Morofsky, S. Foo, Effectiveness of single and multiple energy retrofit measures on the energy consumption of office buildings, *Energy*. 36 (2011) 5037–5052.
- [20] N. Hashempour, R. Taherkhani, M. Mahdikhani, Energy performance optimization of existing buildings: A literature review, *Sustain. Cities Soc.* 54 (2020) 101967.
- [21] ASHRAE Guideline 14-2014, Guideline 14-2014. Measurement of Energy, Demand, and Water Savings, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2014.
- [22] R.S. Kaplan, International Performance Measurement and Verification Protocol Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings Volume 1, 2012.
- [23] X. Liang, T. Hong, G.Q. Shen, Improving the accuracy of energy baseline models for commercial buildings with occupancy data, *Appl. Energy*. 179 (2016) 247–260.
- [24] F. Lei, P. Hu, A baseline model for office building energy consumption in hot summer and cold winter region, in: 2009 Int. Conf. Manag. Serv. Sci., IEEE, 2009: pp. 1–4.
- [25] J.-H. Ko, D.-S. Kong, J.-H. Huh, Baseline building energy modeling of cluster inverse model by using daily energy consumption in office buildings, *Energy Build.* 140 (2017) 317–323.
- [26] J. Granderson, P.N. Price, Development and application of a statistical methodology to evaluate the predictive accuracy of building energy baseline models, *Energy*. 66 (2014) 981–990.
- [27] B. Dong, C. Cao, S.E. Lee, Applying support vector machines to predict building energy consumption in tropical region, *Energy Build.* 37 (2005) 545–553.
- [28] B. Dong, C. Cao, S.E. Lee, Applying support vector machines to predict building energy consumption in tropical region, *Energy Build.* 37 (2005) 545–553.
- [29] J. Yoon, E.J. Lee, D.E. Claridge, Calibration Procedure for Energy Performance Simulation of a Commercial Building, *J. Sol. Energy Eng.* 125 (2003) 251–257.
- [30] Y. Heo, R. Choudhary, G.A. Augenbroe, Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty, *Energy Build.* 47 (2012) 550–560.
- [31] K. Van Den Djunaedy, Ery; Wymelenberg, Targeted Calibration of Energy Models for Existing Building, *ASHRAE Annu. Conf.* C038 (2014) 1–8. <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA394346917&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=00012505&p=AONE&sw=w> (accessed April 13, 2020).
- [32] D. Coakley, P. Raftery, M. Keane, A review of methods to match building energy simulation models to measured data, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37 (2014) 123–141.
- [33] G. Chaudhary, J. New, J. Sanyal, P. Im, Z. O’Neill, V. Garg, Evaluation of “Autotune” calibration against manual calibration of building energy models, *Appl. Energy*. 182 (2016) 115–134.
- [34] J. Brouns, A. Nassiopoulos, F. Bourquin, K. Limam, Dynamic building performance assessment using calibrated simulation, *Energy Build.* 122 (2016) 160–174.
- [35] undefined ASHRAE, ASHRAE Guideline 14–2014, Measurement of Energy, Demand, and Water Savings, (2014).

- [36] Z. Yang, B. Becerik-Gerber, A model calibration framework for simultaneous multi-level building energy simulation, *Appl. Energy*. 149 (2015) 415–431.
- [37] T. Yang, Y. Pan, J. Mao, Y. Wang, Z. Huang, An automated optimization method for calibrating building energy simulation models with measured data: Orientation and a case study, *Appl. Energy*. 179 (2016) 1220–1231.
- [38] Z. Wang, L. Wang, A.I. Dounis, R. Yang, Multi-agent control system with information fusion based comfort model for smart buildings, *Appl. Energy*. 99 (2012) 247–254.
- [39] K. Sun, T. Hong, S.C. Taylor-Lange, M.A. Piette, A pattern-based automated approach to building energy model calibration, *Appl. Energy*. 165 (2016) 214–224.
- [40] M. Royapoor, T. Roskilly, Building model calibration using energy and environmental data, *Energy Build.* 94 (2015) 109–120.
- [41] Y. Pan, Z. Huang, G. Wu, Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai, *Energy Build.* 39 (2007) 651–657.
- [42] G. Mustafaraj, D. Marini, A. Costa, M. Keane, Model calibration for building energy efficiency simulation, *Appl. Energy*. 130 (2014) 72–85.
- [43] J. Hu, P. Karava, A state-space modeling approach and multi-level optimization algorithm for predictive control of multi-zone buildings with mixed-mode cooling, *Build. Environ.* 80 (2014) 259–273.
- [44] G. Kumbaroğlu, R. Madlener, Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings, *Energy Build.* 49 (2012) 327–334.
- [45] E. Asadi, M.G. da Silva, C.H. Antunes, L. Dias, Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application, *Energy Build.* 44 (2012) 81–87.
- [46] E. Asadi, M.G. da Silva, C.H. Antunes, L. Dias, A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB, *Build. Environ.* 56 (2012) 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.005>.
- [47] T. Hong, M.A. Piette, Y. Chen, S.H. Lee, S.C. Taylor-Lange, R. Zhang, K. Sun, P. Price, Commercial building energy saver: an energy retrofit analysis toolkit, *Appl. Energy*. 159 (2015) 298–309.
- [48] Y. Shao, P. Geyer, W. Lang, Integrating requirement analysis and multi-objective optimization for office building energy retrofit strategies, *Energy Build.* 82 (2014) 356–368.
- [49] C.E. Kontokosta, Modeling the energy retrofit decision in commercial office buildings, *Energy Build.* 131 (2016) 1–20.
- [50] F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G.M. Mauro, G.P. Vanoli, Artificial neural networks to predict energy performance and retrofit scenarios for any member of a building category: A novel approach, *Energy*. 118 (2017) 999–1017.
- [51] J.A. Wright, H.A. Loosemore, R. Farmani, Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm, *Energy Build.* 34 (2002) 959–972.
- [52] W. Wang, R. Zmeureanu, H. Rivard, Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization, *Build. Environ.* 40 (2005) 1512–1525.
- [53] D. Tuhus-Dubrow, M. Krarti, Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings, *Build. Environ.* 45 (2010) 1574–1581.

- [54] I. Steponavičė, S. Ruuska, K. Miettinen, A solution process for simulation-based multiobjective design optimization with an application in the paper industry, *Comput. Des.* 47 (2014) 45–58.
- [55] A.-T. Nguyen, S. Reiter, P. Rigo, A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, *Appl. Energy.* 113 (2014) 1043–1058.
- [56] L. Magnier, F. Haghghat, Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network, *Build. Environ.* 45 (2010) 739–746.
- [57] V. Machairas, A. Tsangrassoulis, K. Axarli, Algorithms for optimization of building design: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 31 (2014) 101–112.
- [58] R. Evins, A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 22 (2013) 230–245.
- [59] D.J. Manic, M.S. Komatina, B.S. Vucicevic, M.P. Jovanovic, ENERGY PERFORMANCE OF SINGLE FAMILY HOUSES IN SERBIA—ANALYSIS OF CALCULATION PROCEDURES, *Therm. Sci.* 23 (2019) S1695–S1705.
- [60] D.L. Antonijević, D.J. Manić, M.S. Komatina, N.R. Rudonja, Groundwater heat pump selection for high temperature heating retrofit, *Energy Build.* 49 (2012) 294–299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.028>.
- [61] M.L. D. Manic, M. Komatina, Evaluation and Optimization of Office Buildings Energy Performance in Cold Climate., in: *Altern. Energy Sources, Mater. Technol.*, 2020: pp. 49, 50.
- [62] M. and S.P. Ministry of Environment, Rulebook on Energy Efficiency of Buildings, Republic of Serbia, 2011.
- [63] C.C. on B. and F. Codes, N.R.C. of Canada, National Energy Code of Canada for Buildings, 2017.
- [64] S.A. Klein, TRNSYS-A transient simulation program, *Ashrae Trans.* 82 (1976) 623.
- [65] A. Al-janabi, M. Kavgic, A. Mohammadzadeh, A. Azzouz, Comparison of EnergyPlus and IES to model a complex university building using three scenarios: Free-floating, ideal air load system, and detailed, *J. Build. Eng.* 22 (2019) 262–280.
- [66] P. Mehta, D.X. Zhang, R. Thomas, N. Jadhav, J. Lee, C. Conaghan, R. Rawte, Harvesting 3D Multiphysics Modeling Techniques for Smart and Sustainable University Campus, *Energy Procedia.* 143 (2017) 851–858. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.773>.
- [67] T. Ahmad, H. Chen, Y. Guo, J. Wang, A comprehensive overview on the data driven and large scale based approaches for forecasting of building energy demand: A review, *Energy Build.* 165 (2018) 301–320.
- [68] M. Trčka, J.L.M. Hensen, Overview of HVAC system simulation, *Autom. Constr.* 19 (2010) 93–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.019>.
- [69] R. De Lieto Vollaro, C. Guattari, L. Evangelisti, G. Battista, E. Carnielo, P. Gori, Building energy performance analysis: A case study, *Energy Build.* 87 (2015) 87–94.
- [70] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y.J. Huang, C.O. Pedersen, R.K. Strand, R.J. Liesen, D.E. Fisher, M.J. Witte, EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy Build.* 33 (2001) 319–331.
- [71] W.H. McAdams 3rd, *Heat Transmission* McGraw-Hill New York, (1954).

- [72] G.D. Kontes, C. Valmaseda, G.I. Giannakis, K.I. Katsigarakis, D. V Rovas, Intelligent BEMS design using detailed thermal simulation models and surrogate-based stochastic optimization, *J. Process Control*. 24 (2014) 846–855.
- [73] M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, J.L.M. Hensen, Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty, *Appl. Therm. Eng.* 56 (2013) 134–151.
- [74] URL <https://www.iesve.com>
- [75] G.E. Myers, *Analytical methods in conduction heat transfer*, (1971).
- [76] F. Alamdari, G.P. Hammond, Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 4 (1983) 106–112.
- [77] CIBSE Guide A Environmental Design. The Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 1999, (n.d.).
- [78] H.C. Hottel, Radiant-Heat Transmission' in W.H. McAdams, Ed., *Heat Transmission*, 3rd ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1954.
- [79] F. Kasten, H.J. Golchert, R. Dogniaux, M. Lemoine, J. Page, K. Scharmer, *European solar radiation atlas: solar radiation on horizontal and inclined surfaces*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [80] A. Wexler, R.W. Hyland, *Thermodynamic Properties of Dry Air, Moist Air and Water and SI Psychrometric Charts* ed A Wexler et al, (1984).
- [81] A. Marshall, R. Fitton, W. Swan, D. Farmer, D. Johnston, M. Benjaber, Y. Ji, Domestic building fabric performance: Closing the gap between the in situ measured and modelled performance, *Energy Build.* 150 (2017) 307–317.
- [82] T. Hong, J. Kim, J. Jeong, M. Lee, C. Ji, Automatic calibration model of a building energy simulation using optimization algorithm, *Energy Procedia*. 105 (2017) 3698–3704.
- [83] Y. Ji, A. Lee, W. Swan, Building dynamic thermal model calibration using the Energy House facility at Salford, *Energy Build.* 191 (2019) 224–234.
- [84] L. Wang, P. Mathew, X. Pang, Uncertainties in energy consumption introduced by building operations and weather for a medium-size office building, *Energy Build.* 53 (2012) 152–158.
- [85] E. Fabrizio, V. Monetti, Methodologies and advancements in the calibration of building energy models, *Energies*. 8 (2015) 2548–2574.
- [86] S. Bertagnolio, Evidence-based model calibration for efficient building energy services, (2012).
- [87] T. Reddy, Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools., *ASHRAE Trans.* Vol. 112 (2006) 226–240.
- [88] P. Raftery, M. Keane, J. O'Donnell, Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology, *Energy Build.* 43 (2011) 2356–2364.
- [89] M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts Version 4.0. U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program (2015).
- [90] Р. Србија, Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2025. године са пројекцијама до 2030. године: 101/2015-36, брoј 101 о (2015).
- [91] C. Trust, *Closing the Gap—Lessons Learned on Realising the Potential of Low Carbon*

Building Design, Carbon Trust London London, UK. (2011).

- [92] A.C. Menezes, A. Cripps, D. Bouchlaghem, R. Buswell, Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap, *Appl. Energy*. 97 (2012) 355–364.
- [93] H. Satyavada, S. Baldi, Monitoring energy efficiency of condensing boilers via hybrid first-principle modelling and estimation, *Energy*. 142 (2018) 121–129.
- [94] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 62.1: Ventilation for Acceptable Indoor AirQuality, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2016..
- [95] M. Gojak, N. Rudonja, Solarni Termicki Sistemi, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Beograd, 2020.
- [96] M. of M. Energy, Rulebook on Model Energy Service Contracts for the Implementation of Energy Efficiency when Users are from Public Sector, Off. Gaz. RS. (2015).

8 ПРИЛОГ А – ПАРАМЕТРИ СОФТВЕРСКОГ МОДЕЛА

Project Construction (Opaque: External Wall)

Description: Winnipeg Tax External Wall ID: WALL1 External Internal

Performance: EN-ISO

U-value: 0.3155 W/m²K Thickness: 288.100 mm Thermal mass Cm: 9.0901 kJ/(m²K)

Total R-value: 3.0000 m²K/W Mass: 366.8930 kg/m² Very lightweight

Surfaces Functional Settings Regulations RadianceIES

Outside Emissivity: 0.900 Resistance (m²K/W): 0.0400 Default Solar Absorptance: 0.700

Inside Emissivity: 0.900 Resistance (m²K/W): 0.1300 Default Solar Absorptance: 0.550

Construction Layers (Outside To Inside) System Materials... Project Materials...

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Density kg/m ³	Specific Heat Capacity J/(kg·K)	Resistance m ² K/W	Vapour Resistivity GN·s/(kg·m)	Category
[CCD1] CAST CONCRETE (MEDIUM)	150.0	1.4000	2350.0	840.0	0.1071	500.000	Concretes
Cavity	25.0	-	-	-	0.1800	-	-
[USIN0002] RIGID INSULATION	100.0	0.0380	32.0	837.0	2.6316	238.000	Insulating Materials
[SM1] VAPOUR BARRIER	0.1	0.1900	7800.0	480.0	0.0005	10000.000	Unknown
[USGP0001] GYPSUM/ PLASTER BOARD - HF-E1 (ASHRAE)	13.0	0.1610	801.0	837.0	0.0808	45.000	Plaster

Copy Paste Cavity Insert Add Delete Flip

Condensation Analysis... Derived Parameters... OK Cancel

Слика 8-1 Параметри моделовања спољашњег зида

Project Construction (Opaque: Roof)

Description: Winnipeg Tax Roof ID: ROOF1 External Internal

Performance: EN-ISO

U-value: 0.2788 W/m²K Thickness: 138.000 mm Thermal mass Cm: 16.2421 kJ/(m²K)

Total R-value: 3.5917 m²K/W Mass: 89.4130 kg/m² Very lightweight

Surfaces Regulations RadianceIES

Outside Emissivity: 0.750 Resistance (m²K/W): 0.0400 Default Solar Absorptance: 0.320

Inside Emissivity: 0.400 Resistance (m²K/W): 0.1000 Default Solar Absorptance: 0.550

Construction Layers (Outside To Inside) System Materials... Project Materials...

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Density kg/m ³	Specific Heat Capacity J/(kg·K)	Resistance m ² K/W	Vapour Resistivity GN·s/(kg·m)	Category
[GRVL] GRAVEL	20.0	0.3600	1840.0	840.0	0.0556	250.000	Sands, Stones and Soils
[RFIN1] Roof Membrane	2.0	0.0500	4900.0	837.0	0.0400	500.000	Unknown
[USPH0000] Rigid Insulation - XPS	100.0	0.0306	240.0	700.0	3.2709	450.000	Insulating Materials
[USGP0001] GYPSUM/ PLASTER BOARD - HF-E1 (ASHRAE)	13.0	0.1610	801.0	837.0	0.0808	45.000	Plaster
[MD] Metal Deck (ASHRAE)	3.0	150.0000	2800.0	896.0	0.0000	10000000.000	Metals

Copy Paste Cavity Insert Add Delete Flip

Condensation Analysis... Derived Parameters... OK Cancel

Слика 8-2 Параметри моделовања постојећег крова

Project Construction (Glazed: External Window)

Description: Winnipeg Tax Window ID: GD47 External Internal

Performance: EN-ISO

Net U-value (including frame): 2.7750 W/m²·K U-value (glass only): 2.7834 W/m²·K
 Net R-value: 0.3593 m²·K/W g-value (EN 410): 0.7075 Visible light normal transmittance: 0.71

Surfaces Frame Shading Device RadianceIES

Percentage: 10.00 Absorptance: 0.7 Outside surface area ratio: 1.00 Type: Aluminium
 U-value: 2.6991 W/m²·K Resistance: 0.2005 m²·K/W Inside surface area ratio: 1.00
 LCA Frame Materials: Edit

Construction Layers (Outside to Inside): System Materials... Project Materials...

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Angular Dependence	Gas	Convection Coefficient W/m ² ·K	Resistance m ² ·K/W	Transmittance	Outside Reflectance	Inside Reflectance	Refractive Index	Outside Emissivity	Inside Emissivity	Visible Light Specified
[CF6] CLEAR FLOAT 6MM	6.0	1.0600	Fresnel	-	-	0.0057	0.780	0.070	0.070	1.526	-	-	No
Cavity	12.0	-	-	-	1.9200	0.1779	-	-	-	-	-	-	-
[CF6] CLEAR FLOAT 6MM	6.0	1.0600	Fresnel	-	-	0.0057	0.780	0.070	0.070	1.526	-	-	No

Copy Paste Insert Add Delete Flip Electrochromic More Data...

Condensation Analysis... Derived Parameters... OK Cancel

Слика 8-3 Параметри моделовања постојећих прозора

Project Construction (Glazed: External Window)

Description: South Glass Wall ID: STD_EXTW External Internal

Performance: EN-ISO

Net U-value (including frame): 1.4253 W/m²·K U-value (glass only): 1.2507 W/m²·K
 Net R-value: 0.7996 m²·K/W g-value (EN 410): 0.1676 Visible light normal transmittance: 0.71

Surfaces Frame Shading Device RadianceIES

Percentage: 5.00 Absorptance: 0.7 Outside surface area ratio: 1.00 Type: Metal
 U-value: 4.7438 W/m²·K Resistance: 0.0408 m²·K/W Inside surface area ratio: 1.00
 LCA Frame Materials: Edit

Construction Layers (Outside to Inside): System Materials... Project Materials...

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Angular Dependence	Gas	Convection Coefficient W/m ² ·K	Resistance m ² ·K/W	Transmittance	Outside Reflectance	Inside Reflectance	Refractive Index	Outside Emissivity	Inside Emissivity	Visible Light Specified
[STD_EXW] Outer Pane	6.0	1.0600	Fresnel	-	-	0.0057	0.200	0.800	0.414	1.526	0.837	0.042	No
Cavity	12.0	-	-	Argon	1.4033	0.6183	-	-	-	-	-	-	-
[STD_INW] Inner Pane	6.0	1.0600	Fresnel	-	-	0.0057	0.200	0.072	0.072	1.526	0.837	0.837	No

Copy Paste Insert Add Delete Flip Electrochromic More Data...

Condensation Analysis... Derived Parameters... OK Cancel

Слика 8-4 Параметри моделовања постојеће конструкције типа зид-завеса

- ⊞ AHU-1 INT (18)
- ⊞ AHU-1 PER (9)
- ⊞ AHU-2 INT (18)
- ⊞ AHU-2 PER (10)
- ⊞ AHU-5 INT (24)
- ⊞ AHU-5 PER (4)
- ⊞ AHU-9 INT (30)
- ⊞ AHU-9 PER (5)
- ⊞ AHU-13 INT (14)
- ⊞ AHU-13 PER (11)
- ⊞ AHU-12 INT (9)
- ⊞ AHU-12 PER (7)
- ⊞ AHU-10 INT (5)
- ⊞ AHU-3 INT (29)
- ⊞ AHU-3 PER (4)
- ⊞ AHU-4 INT (16)
- ⊞ AHU-4 PER (9)
- ⊞ AHU-7 INT (13)
- ⊞ AHU-8 INT (4)
- ⊞ AHU-8 PER (5)
- ⊞ AHU-11 INT (10)
- ⊞ AHU-11 PER (2)
- ⊞ AHU-14 INT (21)
- ⊞ AHU-14 PER (7)
- ⊞ RTU-5 INT (6)
- ⊞ RTU-5 PER (3)
- ⊞ RTU-6 INT (9)
- ⊞ RTU-6 PER (2)
- ⊞ AHU-15 INT (16)
- ⊞ AHU-15 PER (11)
- ⊞ UH (28)
- ⊞ Unconditioned (45)
- ⊞ AHU-1 EXH (2)
- ⊞ AHU-2 EXH (2)
- ⊞ AHU-4 EXH (3)
- ⊞ AHU-5 EXH (4)
- ⊞ AHU-8 EXH (4)
- ⊞ AHU-9 EXH (3)
- ⊞ AHU-10 EXH (1)
- ⊞ AHU-12 EXH (4)
- ⊞ AHU-13 EXH (3)
- ⊞ AHU-14 EXH (3)
- ⊞ AHU-15 EXH (5)
- ⊞ AHU-3 EXH (5)
- ⊞ RTU-5 EXH (8)
- ⊞ RTU-6 EXH (4)
- ⊞ AHU-16 (1)
- ⊞ Unconditioned (14)
- ⊞ PRINT SHOP (1)

- ⊞ AHU-1 INT (18)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-006/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-019/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-017/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-014/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-018/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-013/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-012/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-009/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-008/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-007/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-159/CORRIDOR (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-160/2-214_WOMENS REST RM (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-011/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-020/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-148/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-150/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-162/2-102 (1)
 - ⊞ INT AHU-1/VAV 2-149/2-102 (1)
- ⊞ AHU-1 PER (9)
 - ⊞ PER AHU-1/VAV 2-001/2-102 (1)
 - ⊞ PER AHU-1/VAV 2-005/2-102 (1)
 - ⊞ PER AHU-1/VAV 2-002/2-102 (1)
 - ⊞ PER AHU-1/VAV 2-003/2-102 (1)
 - ⊞ PER AHU-1/VAV 2-004/2-102 (1)
 - ⊞ PER AHU-1/VAV 2-010/2-102 (1)
 - ⊞ PER AHU-1/VAV 2-015/2-102 (1)
 - ⊞ PER AHU-1/VAV 2-016/2-102 (1)
 - ⊞ PER AHU-1/VAV 2-161/2-102 (1)
- ⊞ AHU-2 INT (18)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-152/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-157/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-156/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-131/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-138/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-143/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-153/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-142/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-139/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-128/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-144/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-146/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-151/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-147/2-204 (1)
 - ⊞ INT AHU2/VAV 2-132 (1)
 - ⊞ INT AHU2/VAV 2-133 (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-136/2-204_LOUNGE (1)
 - ⊞ INT AHU-2/VAV 2-137/FILE_STORAGE (1)

а) листа система

б) парцијална листа термичких зона у оквиру система

Слика 8-5 – Листа система и термичких зона у оквиру система

Reference: 4 Low Nox, condensing boilers, Primary-Sec HW Loop, OA reset, Const-speed pump

Hot water loop Pre-heating Heating equipment set Sizing status:

Hot water loop capacity: 3399.00 kW A

Oversizing factor for loop autosizing: 1.25

Force loop capacity to suit only heating equipment that will operate in the max part-load range

Loop configuration: Primary-Secondary Distribution losses: 2.00 %

Primary supply Primary demand Secondary Loops (2)

Design loop capacity: 3399.00 kW A

Design loop flow rate: 40.64 l/s

Primary loop flow control: Constant flow

Supply water temperature control

Design hot water supply temperature, Tbt des: 80.00 °C

Supply temperature setpoint: Reset per outdoor temperature None

Outdoor temperature low threshold: -30.00 °C

Supply temperature at or below low threshold: 80.00 °C

Outdoor temperature high threshold: 4.00 °C

Supply temperature at or above high threshold: 35.00 °C

Design hot water temperature difference, DeltaTbt des: 20.00 K

Pumps

Primary loop pump configuration: Single pump 1 Pump(s)

Specific pump power: Detailed inputs Edit 301.16 W/(l/s) Electricity: Meter 1

Pump heat gain to loop (fraction): 0.90

Performance curve: Constant speed pump riding curve Edit constant speed

Optional loads

Distribution branch for coupling loads directly to primary loop

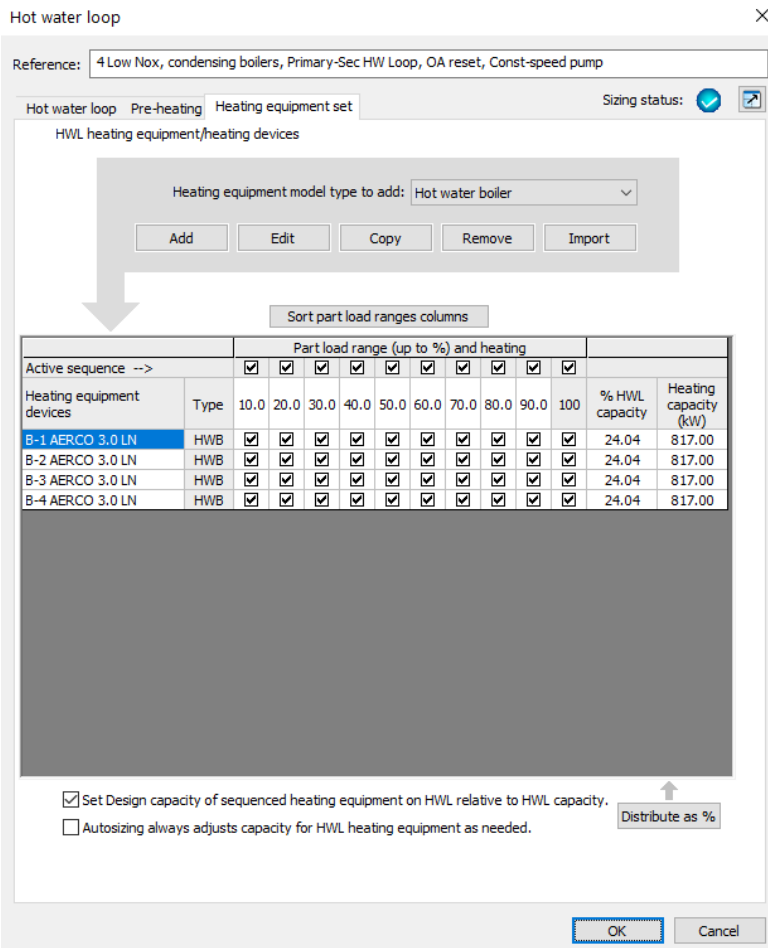
DHW branch: -

Scheduled load Design Load: 0.00 kW Profile: constant 0 kW

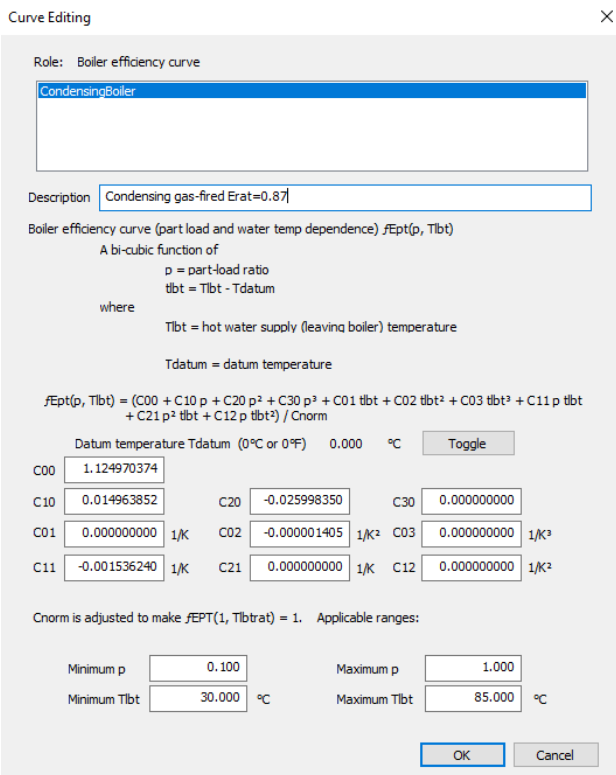
Delta-T: 20.00 K Min leave temp: 60.00 °C Location: Parallel

OK Cancel

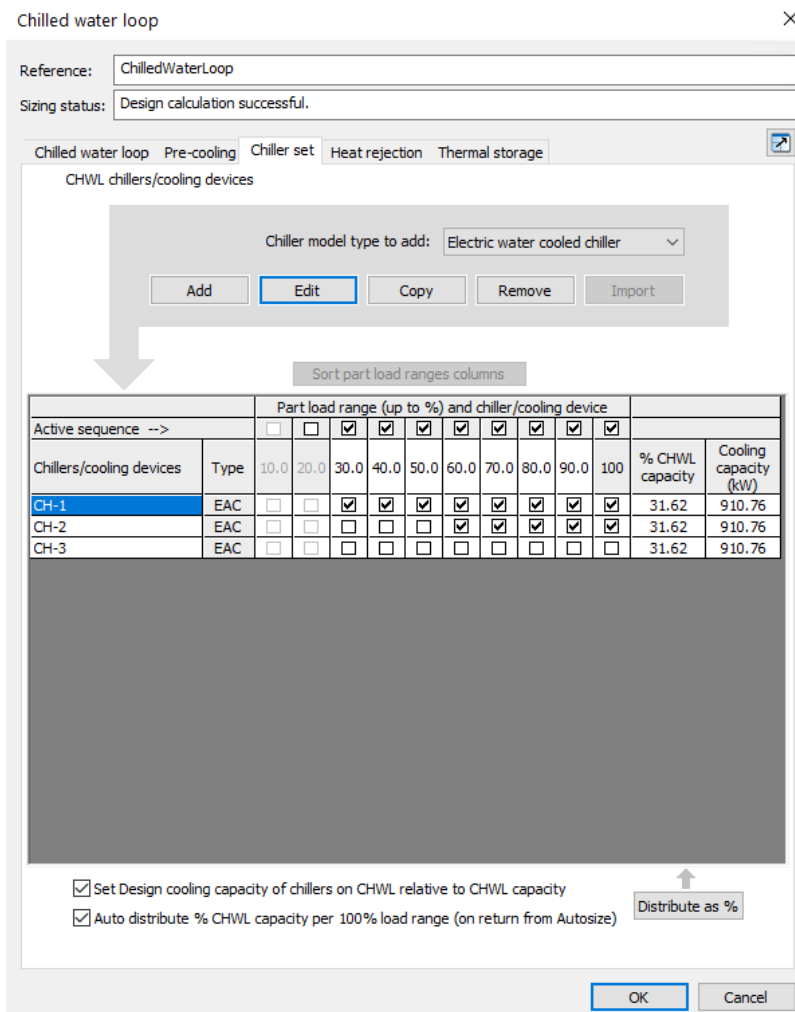
Слика 8-6 Параметри рада система топловодног грејања



Слика 8-7 Моделовање паралелног рада гасних котлова



Слика 8-8 Крива ефикасности постојећих кондензационих котлова на природни гас



Слика 8-9 Моделовање паралелног рада чилера

Chilled water loop

Reference: ChilledWaterLoop

Sizing status: Design calculation successful.

Chilled water loop Pre-cooling Chiller set Heat rejection Thermal storage

Design parameters

Chilled water loop capacity: 2880.00 kW A

Chilled water loop flow rate: 103.29 l/s A

Force loop capacity to suit only chillers that operate in max part-load range

Oversizing factor for loop autosizing: 1.15

Distribution losses: 0.00 %

Scheduled load Location: Primary parallel Profile: constant 0 kW

Loop configuration: Primary only

Loop flow control: Variable flow

Primary circuit Secondary circuit

Chilled water temperatures

Chilled water supply temperature reset type: Outdoor dry-bulb te

Chilled water supply temperature: 6.67 °C

Outdoor dry-bulb temperature high threshold: 16.00 °C

Supply temperature at/above high threshold: 6.67 °C

Outdoor dry-bulb temperature low threshold: 14.00 °C

Supply temperature at/below low threshold: 12.22 °C

Design chilled water loop temperature difference, DeltaTedes: 6.67 K

Chilled water pump

Primary circuit pump configuration: Single pump

Number of primary circuit pumps: 1

Specific pump power at design flow: Detailed inputs Edit 362.00 W/(l/s)

Pump heat gain to chilled water loop (fraction): 0.10

Performance curve: Constant speed pump riding curve Edit Constant speed

Pump meter: Electricity: Meter 1

OK Cancel

Слика 8-10 Параметри рада чилерског постројења

Curve Editing

Name: Screw/1Compressor

Description: Electric air cooled screw

Chiller cooling capacity (temp dependence) fCAPtt(Tlet, Todb)

A biquadratic function of

$$tlet = Tlet - Tdatum$$

$$todb = Todb - Tdatum$$

where

Todb = outdoor air dry bulb temperature
Tlet = chilled water supply (leaving evaporator) temperature
Tdatum = datum temperature

$$fCAPtt(Tlet, Todb) = (C00 + C10 tlet + C20 tlet^2 + C01 todb + C02 todb^2 + C11 tlet todb) / Cnorm$$

Datum temperature Tdatum (0°C or 0°F) -17.778 °C Toggle

C00 0.67083991 C10 0.00494894 1/K C20 0.00058712 1/K²

C01 0.00587117 1/K C02 -0.00011155 1/K² C11 -0.00010984 1/K²

Cnorm is adjusted to make fCAPtt(Tletrat, Todbrat) = 1

Applicable Ranges

Minimum Tlet 4.000 °C Maximum Tlet 18.000 °C

Minimum Todb 19.000 °C Maximum Todb 40.000 °C

OK Cancel

Слика 8-11 Крива ефикасности чилера у зависности од режима рада

Project Construction (Opaque: External Wall)

Description: ID: WALL 1 External Internal

Performance: EN-ISO

U-value: W/m²K Thickness: mm Thermal mass Cm: kJ/(m²K)

Total R-value: m²K/W Mass: kg/m² Very lightweight

Surfaces Functional Settings Regulations RadianceIES

Outside Emissivity: Resistance (m²K/W): Default Solar Absorptance:

Inside Emissivity: Resistance (m²K/W): Default Solar Absorptance:

Construction Layers (Outside To Inside) System Materials... Project Materials...

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Density kg/m³	Specific Heat Capacity J/(kg·K)	Resistance m²K/W	Vapour Resistivity GN·s/(kg·m)	Category
[CCD 1] CAST CONCRETE (MEDIUM)	150.0	2.4000	2350.0	840.0	0.0625	500.000	Concretes
[USIN0003] Air Gap	25.0	0.3130	1.3	1000.0	0.0799	1.000	Insulating Materials
[USIN0002] RIGID INSULATION	100.0	0.0380	32.0	837.0	2.6316	238.000	Insulating Materials
[USGP0001] GYPSUM/ PLASTER BOARD - HF-E1 (ASHRAE)	12.0	0.1610	801.0	837.0	0.0746	45.000	Plaster
[SM 1] Iron Studs & Air Gaps	89.0	8.7857	1115.0	922.0	0.0101	71421.000	Unknown
[USIN0002] RIGID INSULATION	80.0	0.0380	32.0	837.0	2.1053	238.000	Insulating Materials
[USGP0001] GYPSUM/ PLASTER BOARD - HF-E1 (ASHRAE)	19.0	0.1610	801.0	837.0	0.1180	45.000	Plaster

Copy Paste Cavity Insert Add Delete Flip

Condensation Analysis... Derived Parameters... OK Cancel

Слика 8-12: Параметри за моделовање спољашњег зида након имплементације МУЕ ОМ-1.1

Биографија аутора

Димитрије Ј. Манић, дипл. маш. инж, рођен је 1983. године у Лазаревцу. Основну школу и гимназију природно-математичког смера завршио је у Лазаревцу са одличним успехом.

Школске 2002/03. године уписује Машински факултет Универзитета у Београду, где 2009. године стиче звање дипломираног машинског инжењера, са одбрањеним дипломским радом са оценом 10.

Докторат на Машинском факултету у Београду уписује 2009. године, а од 01.09.2009. је запослен у Иновационом центру Машинског факултета, где и даље ради. Упоредо са својим студијским обавезама, испитним активностима и експерименталним истраживањима, током докторских и мастер студија имао је прилику да учествује на студентским разменама и програмима.

За време докторских студија, 2012. године, преко организације ЈСА, четири месеца је боравио у Јапану на обуци и пракси везаној за менаџмент у производњи и заштиту животне средине. Такође, током периода докторских студија и рада у Иновационом центру машинског факултета био је на научно-истраживачким разменама у земљама ЕУ и више недеља учествовао у заједничком раду на пројектима и припремама пројектних пријава на Technische Universität Hamburg (Хамбург, Немачка, осам недеља), Technische Universität Wien (Беч, Аустрија, четири недеље), Universidad Nueve de Lisboa (Лисабон, Португалија, шест недеља), KTH Royal Institute of Technology in Stockholm (Стокхолм, Шведска, две недеље) итд.

У току докторских студија био је ангажован и на настави. Школске године 2010/2011 држао је вежбе из предмета Термодинамика Б (код проф. др Мирка коматине) и Простирање топлоте и супстанце (код проф. др Александра Саљникова).

Аутор је десет (10) научних публикација, учествовао је на реализацији великог броја домаћих и међународних научно-истраживачких пројеката, пројеката технолошког развоја, пројеката развоја образовања и пројеката сарадње са привредом.

Осим научно-истраживачког рада у протеклих дванаест (12) још интензивније се бавио инжењерском струком, укључујући домаће и међународне пројекте везане за енергетске студије, анализу енергетских перформанси зграда, техничког надзора, израде енергетских модела и симулација нових и постојећих зграда и израде главних машинских пројеката везаних за реконструкције постојећих зграда и изградњу нових објеката.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани: Димитрије Манић

број индекса: Д23/09

Изјављујем

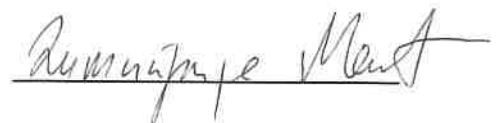
да је докторска дисертација под насловом

„Термодинамичка анализа, моделирање и оптимизација динамичког понашања система за климатизацију, грејање и хлађење у јавним објектима“

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

Потпис докторанда

У Београду, 20.08.2021.



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Димитрије Манић

Број индекса: Д23/09

Студијски програм: Докторске студије

Наслов рада: Термодинамичка анализа, моделирање и оптимизација динамичког понашања система за климатизацију, грејање и хлађење у јавним објектима

Ментор: Проф. др Мирко Коматина

Потписани/а Димитрије Манић

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

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

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

Потпис докторанда

У Београду, 20.08.2021.

Димитрије Манић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

„Термодинамичка анализа, моделирање и оптимизација динамичког понашања система за климатизацију, грејање и хлађење у јавним објектима“

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).

Потпис докторанда

У Београду, 20.08.2021.

Зимирчић Милош

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.