



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА



Марко М. Милетић

**ОПТИМИЗАЦИЈА УПОТРЕБЕ ТОПЛОТНЕ
ИЗОЛАЦИЈЕ КОД КУЋА НЕТО-НУЛТЕ
ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2015.

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ***I. Аутор***

Име и презиме: **Марко Милетић**
Датум и место рођења: **27.02.1986. Крагујевац**
Садашње запослење: **FCA Srbija**

II. Докторска дисертација

Наслов: **ОПТИМИЗАЦИЈА УПОТРЕБЕ ТОПЛОТНЕ ИЗОЛАЦИЈЕ КОД КУЋА НЕТО-НУЛТЕ ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ**
Број страница: **167**
Број слика: **151**
Број библиографских података: **172**
Установа и место где је рад израђен: **Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**
Научна област (УДК): **620.9:699.86**
Ментор: **др Милорад Бојић, ред. проф. Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**

III. Оцена и одбрана

Датум пријаве теме: **2013. год**
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације: **01-1/2922-8 од 24. 10. 2013.**
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:

1. **Др Милорад Бојић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
2. **Др Небојша Лукић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу
3. **Др Велимир Стефановић**, ред. проф., Машински факултет у Нишу

Комисија за оцену докторске дисертације:

1. **Др Милорад Бојић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
2. **Др Небојша Лукић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу
3. **Др Јасна Радуловић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу
4. **Др Гордана Богдановић**, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу
5. **Др Велимир Стефановић**, ред. проф., Машински факултет у Нишу

Комисија за одбрану докторске дисертације:

1. **Др Милорад Бојић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
2. **Др Небојша Лукић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу
3. **Др Јасна Радуловић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу
4. **Др Гордана Богдановић**, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу
5. **Др Велимир Стефановић**, ред. проф., Машински факултет у Нишу

Датум одбране дисертације: **2015. година**

Мојој мајци Боси

ЗАХВАЛНИЦА

Ова докторска дисертација је настала као резултат истраживања на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије „Истраживања и развој српске нето-нулте енергетске куће“, под руководством проф. др Милорада Бојића.

Овом приликом желим да се захвалим:

- пре свих, ментору професору Милораду Бојићу на свему што је учинио за мене. Хвала Вам што сте ми посветили пуно времена и пажње да би ми показали пут којим треба ићи да би се ушло у свет науке.
- Професору Јасни Радуловић и професору Небојши Лукићу дугујем захвалност за све сугестије и помоћ у раду, не само око израде ове докторске дисертације већ и у нашој целокупној сарадњи.
- Велику захвалност дугујем и професору Гордани Богдановић и професору Велимиру Стефановићу на сугестијама и разумевању.
- За помоћ око реализовања и обраде резултата анкете желим да се захвалим професору Драгану Адамовићу.
- За помоћ око реализације експерименталног дела рада захваљујем се др Драгану Цветковићу, за помоћ при изради физичког модела, и професору Драгану Тарановићу за помоћ око инсталирања мерне опреме и реализације софтвера за праћење и прикупљање података.
- За помоћ, подршку и савете при изради ове дисертације велику захвалност дугујем и др Данијели Николић.

На крају желим да се захвалим својој породици, мајци Боси и брату Ивану, као и мом синовцу Ђорђу. Уз њих бих се захвалио још и девојци Неди. Ви сте ти који сте ми давали снагу и ветар у леђа, а имали довољно стрпљења, разумевања и подршке за мене све ове године.

Октобар 2015.
Крагујевац

Аутор

РЕЗИМЕ

ОПТИМИЗАЦИЈА УПОТРЕБЕ ТОПЛОТНЕ ИЗОЛАЦИЈЕ КОД КУЋА НЕТО-НУЛТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ПОТРОШЊЕ

У свету, Европској унији и код нас удео потрошње енергије зграда у односу на целокупну потрошњу енергије (рачунајући индустрију и саобраћај) је велики. Сходно томе, државе се оријентишу ка њеном смањењу, као и смањењу емисије штетних гасова који утичу на ефекат стаклене баште.

Развој кућа нето-нулте енергетске потрошње уводи нове, ефикасније куће, чија је потрошња мања или једнака енергији коју та кућа производи. Такве куће растеређују енергетски систем, раде са мањом потрошњом енергије него обичне куће, производе потребну енергију из обновљивих извора и доводе до умањене емисије штетних гасова. Један од најефикаснијих начина редукције потрошње енергије је унапређење топлотне изолације омотача зграде, док је тренутно најпопуларнији начин производње електричне енергије из обновљивих извора енергије код крајњих корисника коришћење фотонапонских панела.

Предмет рада ове докторске дисертације је развој нових динамичких модела симулације и оптимизације топлотног понашања кућа са нето-нултом енергетском потрошњом. Ови модели су развијени у циљу одређивања оптималне дебљине и врсте материјала топлотне изолације, при чему су оптимизоване употреба примарне енергије и ексергије, као и економска исплативост, у току животног циклуса зграде. За калибрацију ових модела коришћени су експериментално добијени подаци термичког понашања зграда у реалним условима. За пројектовање понашања потрошње енергије за потребе укућана коришћена је анкета прикупљена међу студентима у околини Крагујевца, а који живе у ниским кућама.

Зграде су симулиране у окружењу софтвера *EnergyPlus*. Ради лакшег цртања геометријског облика зграде коришћен је додатак *Open Studio* за *Google SketchUp*, *Hooke-Jeeves* оптимизациони алгоритам, а *GenOpt* софтвер за извршну контролу софтвера при оптимизацији.

Оптимизација је укључила различите врсте термоизолационих материјала и животних циклуса. Приказане су оптималне дебљине свих термоизолационих материјала, а посебна пажња је дата при коришћењу стиропора и минералне вуне. Представљени су периоди повраћаја уложене примарне енергије и новца. Ради верификације резултата извршена је евалуација грешке.

Добијени резултати су дали оптималне дебљине термоизолационог слоја омотача зграде при енергетској, ексергетској и економској анализи и представљене су потребне процентуалне вредности површине крова под фотонапонским панелима како би зграде биле нето-позитивне енергетске потрошње.

Кључне речи: зграде нето-нулте енергетске потрошње, динамички симулациони модели, *Hooke-Jeeves* оптимизација, примарна енергија, животно циклус зграде, термоизолација

ABSTRACT

OPTIMISATION OF THERMAL INSULATION APPLICATION ON ZERO NET ENERGY BUILDINGS

Energy consumed by buildings takes big share of total energy consumption (also including industry and transport) in the world, the European Union and Serbia. Accordingly, governments are oriented towards its reduction along with reduction of CO₂ emissions which influence greenhouse effect.

The development of the Zero Net Energy Buildings introduce new, more efficient houses, which consume less or equal amount of energy compared to the amount they produce. Those houses relieve energy net, consume less energy than normal houses and produce energy from renewable energy sources. Also, they have reduced CO₂ emissions. One of the most efficient ways to reduce energy consumption is to improve thermal insulation of the envelope, while the most popular way of producing energy from renewable sources of energy is the use of PV panels.

The development of new dynamic simulation models and optimisation of thermal behaviour of the zero net energy building is the theme of this PhD dissertation. These models are developed to determine the optimal thickness of thermal insulation and thermal insulation materials, while the primary energy consumption, exergy consumption, and economic profitability are optimized during the lifecycle of the building. The experimental data of building thermal behaviour in real situation is used for calibration of these models. Survey collected among the students living in small buildings in Kragujevac surrounding was used for prediction of the energy use needs of the house inhabitants.

The building model is simulated in *EnergyPlus*, *Open Studio* plugin for *Google SketchUp* is used for easier drawing of the building, *Hooke-Jeeves* optimisation algorithm is used, and *GenOpt* is used as software for optimisation control.

Optimisation included different thermal insulation materials and lifecycles. Optimal thickness of all materials are shown and special attention is given to polystyrene and mineral wool. Energy and economic payback period are shown. Error evaluation is presented for the results verification.

The results give optimal thickness of the building envelope thermal insulation for energy, exergy and economic analysis, and the percentage of the roof area that needs to be under PV panel for buildings to achieve Positive Net Energy Building concept is given.

Keywords: *Zero Net Energy Buildings, Dynamic simulation models, Hooke-Jeeves optimisation, primary energy, Building lifecycle, Thermal Insulation*

САДРЖАЈ

| | |
|--|----|
| Списак коришћених ознака | I |
| Списак слика | IV |
| Списак табела | XI |
| 1. Увод | 1 |
| 2. Куће нето-нулте енергетске потрошње | 6 |
| 2.1. Концепт нето-нулте енергетске потрошње | 6 |
| 2.2. Принципи примене технологија код извођења нето-нултих енергетских кућа | 9 |
| 2.3. Енергетски пасош у Србији | 14 |
| 3. Термоизолациони материјали | 16 |
| 3.1. Стиропор | 17 |
| 3.2. Стаклена минерална вуна | 18 |
| 3.3. Камена вуна | 19 |
| 3.4. Полиуретан | 19 |
| 3.5. Фиберглас | 20 |
| 3.6. Плута | 20 |
| 3.7. Аерогел | 21 |
| 3.8. Упоредни приказ термоизолационих материјала | 21 |
| 4. Преглед литературе о истраживањима утицаја термоизолације на енергетски биланс куће | 23 |
| 5. Симулациони софтвери и динамички модели | 26 |
| 5.1. Динамички модели | 26 |
| 5.2. Софтверски пакет <i>EnergyPlus</i> | 27 |
| 5.3. Оптимизација при коришћењу динамичких симулација - <i>Genopt</i> | 29 |
| 5.4. Нооке-Јеевс оптимизациона метода | 31 |
| 6. Обрада анкетних података ради дефинисања начина коришћења ниских кућа у Крагујевцу | 33 |
| 6.1. Примена анкета у енергетско ефикасне сврхе у свету | 33 |
| 6.2. Примена анкете за развој нето-нулте куће у Србији | 34 |
| 6.3. Детаљан опис анкете | 35 |
| 6.4. Код анкете | 41 |
| 6.5. Резултати анкете | 43 |
| 6.5.1. Основи подаци о анкетираним кућама | 43 |
| 6.5.2. Подаци о станарима анкетираних кућа | 45 |
| 6.5.3. Подаци о материјалима и термоизолацији куће | 47 |
| 6.5.4. Подаци о начинима грејања и утисак комфора испитаника | 52 |
| 6.5.5. Подаци о свесности о штедњи енергије и употреби модерних технологија испитаника | 57 |
| 6.6. Закључци изведени анкетирањем | 61 |
| 7. Метеоролошки подаци за град Крагујевац | 63 |
| 7.1. Град Крагујевац | 63 |
| 7.2. Клима Крагујевца | 63 |
| 7.2.1. Температурни подаци | 63 |
| 7.2.2. Подаци о падавинама | 65 |
| 7.2.3. Влажност ваздуха | 67 |
| 7.2.4. Специфични подаци о данима | 68 |
| 7.2.5. Соларна радијација | 70 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 8. | Моделирање кућа нето-нулте енергетске потрошње | 72 |
| 8.1. | Геометријски подаци куће | 72 |
| 8.2. | Грејање куће | 73 |
| 8.3. | Спољашњи зид | 73 |
| 8.4. | Распореда потрошње електричних уређаја и осветљења у кући | 75 |
| 8.5. | Примењени фотонапонски панели | 76 |
| 9. | Експериментално истраживање | 77 |
| 9.1. | Инсталација експерименталне кућице и коришћена мерна опрема | 77 |
| 9.2. | Резултати добијени испитивањем експерименталне кућице | 85 |
| 9.2.1. | Анализа експерименталних резултата на примеру дебљине термоизолације од 5 cm и спољне температуре од 4°C | 85 |
| 9.2.2. | Поређење резултата за примењене дебљине термоизолационог слоја и спољашње температуре | 90 |
| 9.2.3. | Упоредна анализа резултата добијених експериментом и моделом у софтверу EnergyPlus | 91 |
| 10. | Компјутерске симулације и оптимизације | 93 |
| 10.1. | Кућа коришћена у симулацијама | 93 |
| 10.2. | Математички модели | 93 |
| 10.2.1. | Математички модел оптимизације укупне количине примарне енергије | 93 |
| 10.2.2. | Математички модел оптимизације економске добити | 95 |
| 10.3. | Genopt код | 98 |
| 10.3.1. | Genopt код код оптимизације укупне количине примарне енергије ... | 98 |
| 10.3.2. | Genopt код код оптимизације економске добити | 100 |
| 11. | Резултати симулација и оптимизација и њихова анализа | 103 |
| 11.1. | Резултати оптимизације термоизолације са аспекта примарне енергије код нето-нултих енергетских кућа | 103 |
| 11.1.1. | Перформансе различитих врста термоизолационих материјала | 103 |
| 11.1.2. | Минерална вуна као термоизолациони материјал | 105 |
| 11.1.3. | Стиропор као термоизолациони материјал | 109 |
| 11.1.4. | Поређење оптималних дебљина термоизолационог слоја за укупну искоришћену примарну енергију при коришћењу минералне вуне и стиропора у функцији од животног циклуса | 112 |
| 11.1.5. | Евалуација грешке | 113 |
| 11.1.6. | Закључци везани за оптимизацију дебљине термоизолације у функцији од укупне искоришћене примарне енергије | 114 |
| 11.2. | Резултати оптимизације термоизолације са економског аспекта код нето нултих енергетских кућа | 115 |
| 11.2.1. | Перформансе различитих врста термоизолационих материјала | 115 |
| 11.2.2. | Минерална вуна као термоизолациони материјал | 118 |
| 11.2.3. | Стиропор као термоизолациони материјал | 123 |
| 11.2.4. | Поређење оптималних дебљина термоизолационог слоја за укупан трошак грејања при коришћењу минералне вуне и стиропора у функцији од животног циклуса | 128 |
| 11.2.5. | Евалуација грешке | 128 |
| 11.2.6. | Закључци везани за оптимизацију дебљине термоизолације у функцији од економске анализе | 129 |
| 11.3. | Достизање принципа нето нулте енергетске куће код примењеног модела | 130 |
| 12. | Закључак | 132 |
| 13. | Литература | 134 |

СПИСАК КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

| | |
|------------------|--|
| $E_{em,ti}$ | уложена енергија у термоизолацију |
| A_{ti} | површина коју заузима термоизолациони слој |
| δ_{ti} | дебљина термоизолационог слоја |
| ρ_{ti} | густину термоизолационог материјала |
| E_{em} | специфичну уложену примарну енергију за производњу једног килограма изабраног термоизолационог материјала |
| $E_{a,em,ti,y}$ | Укупна количина годишње уложене енергије у термоизолацију |
| L_y | број година животног циклуса |
| $E_{u,h,d}$ | топлотну потрошњу у сату h , дана d |
| $E_{u,p}$ | годишња потрошња оперативне примарне енергије |
| $E_{a,u,y}$ | годишња искоришћена примарна енергија |
| $E_{t,u,p}$ | укупна искоришћена примарна енергија |
| $COP_{n,o}$ | кофицијент уштеде енергије када се на кућу која нема претходну термоизолацију наноси слој термоизолације оптималне дебљине |
| $E_{t,u,p,y,o}$ | укупна искоришћена примарну енергија код куће са слојем оптималне дебљине термоизолације |
| $E_{t,u,p,y,n}$ | укупна искоришћена примарна енергија код куће без термоизолационог слоја |
| $E_{em,ti,o}$ | количина уложене примарне енергије у оптимални термоизолациони слој |
| $COP_{s,o}$ | кофицијент уштеде енергије када се термоизолациони слој оптималне дебљине наноси на већ изоловану кућу по старом стандарду |
| $E_{t,u,p,y,s}$ | укупна искоришћена примарна енергија код куће са слојем дебљине термоизолације по старом стандарду |
| $E_{em,ti,s}$ | уложена примарну енергију у термоизолациони слој по старом стандарду |
| $COP_{n,nr}$ | кофицијент уштеде енергије када се изолација наноси на неизоловану кућу |
| $E_{t,u,p,y,nr}$ | укупна искоришћена примарна енергија код куће са слојем дебљине термоизолације која задовољава нову регулативу |
| $E_{em,ti,nr}$ | уложена примарна енергија у термоизолациони слој по новој регулативи |
| $COP_{s,nr}$ | кофицијент уштеде енергије када се на кућу која задовољава старе стандарде додаје термоизолациони слој који задовољава нову регулативу |

| | |
|-----------------|--|
| $COP_{s,x}$ | коэффицијент уштеде енергије када се на кућу која задовољава старе стандарде додаје термоизолациони слој дебљине x |
| x | задата дебљина термоизолационог слоја |
| $E_{t,u,p,y,x}$ | укупна искоришћена примарна енергија код куће са слојем задате дебљине термоизолационог слоја |
| $E_{em,ti,x}$ | уложена примарна енергија у термоизолациони слој задате дебљине |
| $Payback_y$ | период повраћаја енергије уложене у термоизолациони слој |
| $E_{el,u,y}$ | годишња потрошња струје |
| $C_{el,u,y}$ | Годишња цена грејања |
| C_{ti} | цена термоизолације |
| C_{tis} | цена избраног термоизолационог материјала по m^3 |
| $C_{ti,y}$ | годишња цена термоизолационог материјала |
| $C_{u,y}$ | годишњи трошак грејања |
| $C_{t,u}$ | укупни трошак грејања |
| $COP_{c,n,o}$ | коэффицијент уштеде новца када се на кућу која нема претходну термоизолацију наноси слој термоизолације оптималне дебљине |
| $C_{t,u,o}$ | укупни трошак грејања код куће са слојем оптималне дебљине термоизолације који је нанет при реновирању |
| $C_{t,u,n}$ | укупни трошак грејања код куће код куће без термоизолационог слоја |
| $C_{ti,o}$ | уложени новац у оптимални термоизолациони слој |
| $COP_{c,s,o}$ | коэффицијент уштеде новца када се термоизолациони слој оптималне дебљине наноси на већ изоловану кућу по старој регулативи |
| $C_{t,u,s}$ | укупни трошак грејања код куће са слојем дебљине термоизолације која задовољава старе стандарде |
| $C_{ti,s}$ | представља уложени новац у термоизолациони слој по старом стандарду |
| $COP_{c,s,nr}$ | коэффицијент уштеде новца Када се изолација по новој регулативи наноси на неизоловану кућу |
| $C_{t,u,nr}$ | укупни трошак грејања код куће са слојем дебљине термоизолације који задовољава нову регулативу |
| $C_{ti,nr}$ | уложени новац у термоизолациони слој по новој регулативи |
| $COP_{c,s,nr}$ | коэффицијент уштеде новца када се на кућу која задовољава старе стандарде додаје термоизолациони слој како би она задовољила нову регулативу |

| | |
|-----------------|--|
| $Payback_{c,y}$ | Период повраћаја уложеног новца у термоизолациони слој |
| $C_{el,u,y,x}$ | годишња грејања код куће са слојем дебљине термоизолације од x центиметара |
| $C_{ti,x}$ | уложени новац у термоизолациони слој по новој регулативи од x центиметара |

СПИСАК СЛИКА

- Слика 2.1.** *Идејни изглед нето-нулте енергетске куће*
- Слика 2.2.** *Скица везе између куће и мреже са релевантом терминологијом*
- Слика 2.3.** *График који представља коцнеп балансa нето нултих енергетских кућа*
- Слика 2.4.** *Три врсте баланса који се могу користити: месечна производња и потрошња, извезена и преузета енергија од мреже, произведена и потрошена енергија*
- Слика 2.5.** *Хибридни фотонапонски панели на кући у Холандији*
- Слика 2.6.** *Шематски приказ система хибридни фотонапонски панели на кући у Холандији*
- Слика 2.7.** *Основа нето-нулте куће у Швајцарској*
- Слика 2.8.** *Нето-нулта енергетска кућа у Калгарију*
- Слика 2.9.** *Шематски приказ система код куће у Калгарију*
- Слика 2.10.** *Нето-нулта енергетска кућа у хладном климату Колорада*
- Слика 2.11.** *Нето-нулта енергетска кућа у Јапану*
- Слика 2.12.** *Шематски приказ нето-нулте енергетске куће у Јапану*
- Слика 2.13.** *Веб страница са нето-нултим енергетским кућама у свету*
- Слика 2.14.** *Класе кућа по новом правилнику о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда*
- Слика 2.15.** *Формулар енергетског пасоша у Србији*
- Слика 3.1.** *Места на којима се поставља изолација на кући*
- Слика 3.2.** *Подела термоизолационих материјала*
- Слика 3.3.** *Стиропорске плоче за изолацију*
- Слика 3.4.** *Стаклена минерална вуна*
- Слика 3.5.** *Камена вуна*
- Слика 3.6.** *Полиуретанска пена*
- Слика 3.7.** *Фиберглас*
- Слика 3.8.** *Плута у облику а) плоче, б) растресита, ц)на битуменској траци*
- Слика 3.9.** *Карактеристике и примена Аерогела*
- Слика 5.1.** *Уводни прозор EnergyPlus*

- Слика 5.2.** *Прозор за унос података у EnergyPlus*
- Слика 5.3.** *Прозор Google SketchUp са OpenStudio додатком*
- Слика 5.4.** *Графички приказ у Genopt-у током оптимизације*
- Слика 5.5.** *Начин повезивања и симулације коришћењем Genopt софтвера*
- Слика 5.6.** *Пример претраге Нооке-Јеевс методом*
- Слика 6.1.** *Изглед корисничког интерфејса*
- Слика 6.2.** *Приказ прозора са анкетним целинама*
- Слика 6.3.** *Приказ дела „Опити подаци“*
- Слика 6.4.** *Приказ дела „Подаци о објекту“*
- Слика 6.5.** *Приказ дела „Подаци о енергентима“*
- Слика 6.6.** *Приказ дела „Комфор и коришћење објеката“*
- Слика 6.7.** *Приказ дела „Топла вода“, „Електрични уређаји у кући“, „ТВ, аудио и ИТ“ и „Мали кућни апарати“*
- Слика 6.8.** *Приказ дела „Осветљење“*
- Слика 6.9.** *Приказ дела „Свесност о штедњи енергије“*
- Слика 6.10.** *Приказ дела „Упознатост са ценама енергената“*
- Слика 6.11.** *Приказ дела „Модерне технологије“*
- Слика 6.12.** *Изглед листа у Excel фајлу*
- Слика 6.13.** *Изглед VBA прозора*
- Слика 6.14.** *Део VBA кода*
- Слика 6.15.** *Локација куће испитаника у анкети*
- Слика 6.16.** *Старост куће испитаника у анкети*
- Слика 6.17.** *Величина куће испитаника у анкети*
- Слика 6.18.** *Спратност куће испитаника у анкети*
- Слика 6.19.** *Породична примања испитаника у анкети*
- Слика 6.20.** *Број чланова породице испитаника у анкети*
- Слика 6.21.** *Однос старости чланова у кући испитаника у анкети*
- Слика 6.22.** *Изолациони материјал зидова кућа испитаника у анкети*
- Слика 6.23.** *Изолациони материјал плафона кућа испитаника у анкети*
- Слика 6.24.** *Изолациони материјал пода кућа испитаника у анкети*

- Слика 6.25.** *Основни материјал зидова кућа испитаника у анкети*
- Слика 6.26.** *Основни материјал плоче кућа испитаника у анкети*
- Слика 6.27.** *Под дневних соба кућа испитаника у анкети*
- Слика 6.28.** *Под спаваћих соба кућа испитаника у анкети*
- Слика 6.29.** *Завршеност кућа испитаника у анкети*
- Слика 6.30.** *Начин грејања кућа испитаника у анкети*
- Слика 6.31.** *Употреба енергената за грејање кућа испитаника у анкети*
- Слика 6.32.** *Осећај комфора зими у дневној соби испитаника у анкети*
- Слика 6.33.** *Процењена температура зими у дневној соби испитаника у анкети*
- Слика 6.34.** *Осећај комфора лети у дневној соби испитаника у анкети*
- Слика 6.35.** *Процењена температура лети у дневној соби испитаника у анкети*
- Слика 6.36.** *Осећај комфора зими у спаваћој соби испитаника у анкети*
- Слика 6.37.** *Процењена температура зими у спаваћој соби испитаника у анкети*
- Слика 6.38.** *Осећај комфора лети у спаваћој соби испитаника у анкети*
- Слика 6.39.** *Процењена температура лети у спаваћој соби испитаника у анкети*
- Слика 6.40.** *Свесност о штедњи енергије испитаника у анкети*
- Слика 6.41.** *Упознатост о начинима штедње енергије испитаника у анкети*
- Слика 6.42.** *Разлози за штедњу енергије испитаника у анкети*
- Слика 6.43.** *Упознатост са односом скупља/јефттинија струја испитаника у анкети*
- Слика 6.44.** *Доминантан начин штедње енергије испитаника у анкети*
- Слика 6.45.** *Примена модерних технологија испитаника у анкети*
- Слика 6.46.** *Потенцијално инвестирање у нето нулту енергетску кућу испитаника у анкети*
- Слика 7.1.** *Средња температура у Крагујевцу по месецима*
- Слика 7.2.** *Екстремне температуре у Крагујевцу по месецима*
- Слика 7.3.** *Просечан број дана са температуром преко 21 °C*
- Слика 7.4.** *Падавине кише по месецима*
- Слика 7.5.** *Средњи број дана са кишом, снегом и залеђавањем*
- Слика 7.6.** *Највеће падавине забележене у једном дану по месецу*
- Слика 7.7.** *Средњи број дана са кишом и снегом преко 10 mm*

- Слика 7.8.** *Просечна влажност ваздуха у Крагујевцу*
- Слика 7.9.** *Број специфичних дана у Крагујевцу*
- Слика 7.10.** *Средње трајање дневнице у часовима*
- Слика 7.11.** *Просечан број сунчаних часова у месецу*
- Слика 7.12.** *Средњи број ведрих, облачних и магловитих дана*
- Слика 7.13.** *Средња дневна соларна радијација – глобална*
- Слика 7.14.** *Средња дневна соларна радијација – дифузна*
- Слика 7.15.** *Средња дневна соларна радијација директна*
- Слика 7.16.** *Средња дневна соларна радијација – рефлектована*
- Слика 8.1.** *Геометријска дефиниција куће (Br-спаваћа соба, Lr-дневна соба, WC-купатило) (a) јужна страна света; (b) северна страна света*
- Слика 8.2.** *Спољни зид (лево) и кров (десно) по препоруци URSA*
- Слика 8.3.** *Потребне дебљине термоизолационог слоја по старом стандарду и новој регулативи у зависности од коефицијента пролаза топлоте*
- Слика 8.4.** *Цена струје у Србији за домаћинства у динарима по kWh*
- Слика 8.5.** *Распоред потрошње електричних уређаја и осветљења, са бројем људи у дневној соби току радног дана*
- Слика 8.5.** *Распоред потрошње електричних уређаја и осветљења, са бројем људи у спаваћој соби у току радног дана*
- Слика 9.1.** *Клима комора*
- Слика 9.2.** *Пид регулатор ХМТФ-308 за одржавање температуре у клима комори*
- Слика 9.3.** *Испаривачи унутар клима коморе*
- Слика 9.4.** *Експериментални модел кућице*
- Слика 9.5.** *Конструкција грејача*
- Слика 9.6.** *Монтажа грејног кабла*
- Слика 9.7.** *Грејни кабл*
- Слика 9.8.** *Мерна опрема*
- Слика 9.9.** *Регулатор температуре ХМТФ - 308*
- Слика 9.10.** *Аутотрансформатор*
- Слика 9.11.** *Софтвер за прикупљање података екперименталних испитивања*
- Слика 9.12.** *Пример резултата добијених мерењем у оквиру текстуалног фајла*

- Слика 9.13.** *Обрада резултата у Excel фајлу када се резултати преведу у форму*
- Слика 9.14.** *Достизање температуре на почетку мерења у доњој комори при температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm*
- Слика 9.15.** *Достизање температуре на почетку мерења у горњој комори при температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm*
- Слика 9.16.** *Одржавање температуре у доњој комори при температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm*
- Слика 9.17.** *Укључивање и искључивање грејача у зависности од унутрашње температуре у доњој комори при спољној температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm*
- Слика 9.18.** *Укупна потрошња енергије у доњој комори при температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm*
- Слика 9.19.** *5-минутни интензитет потрошње енергије у доњој комори при спољашњој температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm*
- Слика 9.20.** *Одржавање температуре у горњој комори при температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm*
- Слика 9.21.** *Укључивање и искључивање грејача у зависности од унутрашње температуре у горњој комори при спољној температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm*
- Слика 9.22.** *Укупна потрошња енергије у горњој комори при температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm*
- Слика 9.23.** *5-минутни интензитет потрошње енергије у горњој комори при спољашњој температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm*
- Слика 9.24.** *Потрошња на месечном нивоу за све дебљине термоизолационог слоја при различитим температурама спољашње средине*
- Слика 9.25.** *Модел експерименталне кућице у Energy Plus-у*
- Слика 9.26.** *Поређење резултата добијених експериментом и симулационим моделом*
- Слика 11.1.** *Оптимальна дебљина термоизолационог слоја у зависности од врсте материјала и животног циклуса*
- Слика 11.2.** *Годишња потрошња оперативне примарне енергије у зависности од врсте термоизолационог материјала и животног циклуса*
- Слика 11.3.** *Годишња укупна оперативна енергија за грејање, годишња уложена енергија у термоизолацију, и годишња примарна енергија уложена у циглу за а) животно циклус од 50 година, б) животно циклус од 10 година*
- Слика 11.4.** *Укупна искоришћена енергија у зависности од животног циклуса. Линије представљају куће без изолације, са изолацијом по старом стандарду, са*

изолацијом по новој регулативи, и са изолацијом оптималне дебљине. Термоизолациони материјал је минерална вуна.

- Слика 11.5.** *Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију до оптималне дебљине када се као материјал користи минерална вуна*
- Слика 11.6.** *Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију до дебљине нове регулативе када се као материјал користи минерална вуна*
- Слика 11.7.** *Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију на слој термоизолације по старом стандарду за животни циклус од 10 година када се као материјал користи минерална вуна*
- Слика 11.8.** *Оптимална дебљина термоизолације од минералне вуне за животни циклус од 10 година када се оптимизација врши на основу укупне искоришћене примарне енергије*
- Слика 11.9.** *Укупна искоришћена енергија у зависности од животног циклуса. Линије представљају куће без изолације, са изолацијом по старом стандарду, са изолацијом по новој регулативи, и са изолацијом оптималне дебљине. Термоизолациони материјал је стиропор*
- Слика 11.10.** *Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију до оптималне дебљине када се као материјал користи стиропор*
- Слика 11.11.** *Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију до дебљине нове регулативе када се као материјал користи стиропор*
- Слика 11.12.** *Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију на слој термоизолације по старом стандарду за животни циклус од 10 година када се као материјал користи стиропор*
- Слика 11.13.** *Оптимална дебљина термоизолације од стиропора за животни циклус од 10 година када се оптимизација врши на основу укупне искоришћене примарне енергије*
- Слика 11.14.** *Оптимална дебљина термоизолационог слоја са економског аспекта у зависности од врсте материјала и животног циклуса*
- Слика 11.15.** *Годишњи трошак грејања са економског аспекта у зависности од врсте термоизолационог материјала и животног циклуса*
- Слика 11.16.** *Годишња цена грејања и годишња цена термоизолације код куће са оптималном дебљином слоја термоизолације за а) животни циклус од 50 година, б) животни циклус од 10 година*
- Слика 11.17.** *Укупна трошак грејања у зависности од животног циклуса. Линије представљају куће без изолације, са изолацијом по старом стандарду, са*

изолацијом по новој регулативи, и са изолацијом оптималне дебљине. Термоизолациони материјал је минерална вуна.

- Слика 11.18.** *Укупни трошак грејања рашчлањен на годишњу цену термоизолације и годишњу цену струје у зависности од животног циклуса када је термоизолациони материјал минерална вуна оптималне дебљине*
- Слика 11.19.** *Уштеда новца по јединици уложеног новца у термоизолацију до оптималне дебљине када се као материјал користи минерална вуна*
- Слика 11.20.** *Уштеда новца по јединици уложеног новца у термоизолацију до дебљине нове регулативе када се као материјал користи минерална вуна*
- Слика 11.21.** *Оптимална дебљина термоизолације од минералне вуне за животни циклус од 10 година када се оптимизација врши на основу укупног трошка грејања*
- Слика 11.22.** *Укупна трошак грејања у зависности од животног циклуса. Линије представљају куће без изолације, са изолацијом по старом стандарду, са изолацијом по новој регулативи, и са изолацијом оптималне дебљине. Термоизолациони материјал је минерална вуна.*
- Слика 11.23.** *Укупни трошак грејања рашчлањен на годишњу цену термоизолације и годишњу цену струје у зависности од животног циклуса када је термоизолациони материјал стиропор оптималне дебљине*
- Слика 11.24.** *Уштеда новца по јединици уложеног новца у термоизолацију до оптималне дебљине када се као материјал користи стиропор*
- Слика 11.25.** *Уштеда новца по јединици уложеног новца у термоизолацију до дебљине нове регулативе када се као материјал користи стиропор*
- Слика 11.26.** *Оптимална дебљина термоизолације од стиропора за животни циклус од 10 година када се оптимизација врши на основу укупног трошка грејања*
- Слика 11.27.** *Укупна искоришћена примарна енергија укључујући и ел. уређаје и ФН панеле у односу на произведену примарну енергију куће са термоизолацијом од минералне вуне на годишњем нивоу, за животни циклус од 10 година*
- Слика 11.28.** *Укупна искоришћена примарна енергија укључујући и ел. уређаје и ФН панеле у односу на произведену примарну енергију куће са термоизолацијом од стиропор на годишњем нивоу, за животни циклус од 10 година*

СПИСАК ТАБЕЛА

- Табела 3.1.** *Основне карактеристике термоизолационих материјала*
- Табела 3.2.** *Цене термоизолационих материјала (1 cm дебљине по 1 m²)*
- Табела 8.1.** *Површине просторија и спољних зидова*
- Табела 8.2.** *Уграђена енергија и енергетски период отплате за различите врсте фотонапонских модула*
- Табела 9.1.** *Карактеристика ауотрансформатора*
- Табела 9.2.** *Карактеристика терморегулатора*
- Табела 9.3.** *Поређење резултата потрошње на месечном нивоу добијених експериментом и симулационим моделом, kWh*
- Табела 11.1.** *Оптимальна дебљина термоизолационог слоја од минералне вуне и стиропора за укупну искоришћену примарну енергију у зависности од животног циклуса. Период енергетског повраћаја уложене енергије је за реновирање куће по старом стандарду са оптимальном дебљином термоизолационог слоја*
- Табела 11.2.** *Разлика у резултатима са стиропором као материјалом када се уведе грешка од 10% у специфичну уложену примарну енергију*
- Табела 11.3.** *Оптимальна дебљина термоизолационог слоја од минералне вуне када се оптимизује укупни трошак грејања са економског аспекта у зависности од животног циклуса*
- Табела 11.4.** *Укупни трошак грејања код кућа без изолације, са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптимальном дебљином термоизолације са економског аспекта када је минерална вуна термоизолациони материјал изражен у динарима*
- Табела 11.5.** *Укупна цена термоизолације код кућа са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптимальном дебљином термоизолације са економског аспекта када је минерална вуна термоизолациони материјал изражена у динарима*
- Табела 11.6.** *Оптимальна дебљина термоизолационог слоја од стиропора када се оптимизује укупни трошак грејања са економског аспекта у зависности од животног циклуса*
- Табела 11.7.** *Укупни трошак грејања код кућа без изолације, са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптимальном дебљином термоизолације са економског аспекта када је стиропор термоизолациони материјал изражен у динарима*
- Табела 11.8.** *Укупна цена термоизолације код кућа са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптимальном*

дебљином термоизолације са економског аспекта када је стиропор термоизолациони материјал изражена у динарима

Табела 11.9. *Оптимальна дебелина термоизолационог слоја од минералне вуне и стиропора за укупни трошак грејања у зависности од животног циклуса. Период повраћаја новца уложеног у термоизолацију за реновирање куће по старом стандарду са оптимальном дебелином термоизолационог слоја*

Табела 11.10. *Разлика у резултатима са стиропором као материјалом када се уведе грешка од 10% у цену термоизолационог материјала*

1. Увод

У свету, Европској унији и код нас удео потрошње енергије зграда у односу на целокупну потрошњу енергије (рачунајући индустрију и саобраћај) је велики. Сходно томе, државе се оријентишу ка њеном смањењу као и смањењу емисије штетних гасова који утичу на ефекат стаклене баште. Према подацима америчке Енергетске информативне администрације (*EIA – U.S. Energy Information Administration*), годишње потребе планете 2012. године су износиле 524,076 квадриљона Btu (1 квадриљон = 10^{15}), односно 17,53 ТWуr [1]. Исте године у Европи годишње потребе примарне енергије су биле 2,73 ТWуr. Од укупних годишњих потреба примарне енергије у свету, око 34% се користи за стамбене и пословне зграде, услужне делатности и пољопривреду [2]. Остатак потрошње одлази на индустрију и транспорт. Међутим, главни проблем представља константан раст потреба за енергентима. Процене су да ће 2050. године укупне потребе за примарном енергијом износити око 29,84 ТWуr [3]. Да би се превентивно избегао проблем недостатка примарне енергије, као и проблем глобалног загревања планете, бројне државе и међународне организације подстичу редукцију потрошње енергије, побољшавање ефикасности њене употребе, као и окретање ка обновљивим изворима енергије.

Постоје одређени споразуми међу којима се истичу директива 2009/28/ЕС позната као *EU „20-20-20“* [4], *Kyoto* протокол [5] и *Climate Change Act 2008 (UK 2008 chapter 27)* [6]. Да би наведени споразуми били додатно подстицани, спороводе се под пројектом *CERT (Carbon Emission Reduction Target)* [7].

Идеја *EU 20-20-20* је да се до 2020. године:

- смањи емисија гасова за 20% у односу на 1990. годину,
- да 20% укупне енергије долази из обновљивих извора
- да се смањи за 20% однос између потребне примарне енергије и пројектоване финалне енергије.

Пројекат *Kyoto* протокола је да се емисија гасова смањи за 12% у периоду од 2008-2012. у односу на 1990. годину. По договору из 2008. идеја је да се емисија до 2050. године смањи за 80%. Један од новијих је и Копенхаген 450 протокол [8].

У свету се сваке године поново објављују подаци о потребама и потрошњи енергије који се представљају кроз примарну енергију, енергију употребљену по секторима, врсту извора енергије појединачно за сваку земљу као и нова предвиђања и развој енергетске ситуације како тренутне, тако и у будућности [9].

Тренутно се тежи ка томе да се драстично смањи потрошња у домаћинствима. Широм света се доносе нови закони везани за енергетску ефикасност кућа, зграда и пословних простора. Ово такође важи и за Србију, која је 2012. донела нови правилник за енергетску ефикасност кућа [10].

Развој кућа нето-нулте енергетске потрошње уводи нове, ефикасније куће, чија је потрошња мања или једнака енергији коју та кућа производи. Такве куће растеређују

енергетски систем, раде са мањом потрошњом енергије него обичне куће, производе потребну енергију из обновљивих извора и доводе до умањене емисије штетних гасова.

У данашње време енергетска ефикасност зграда се постиже помоћу стандардизованих вредности омотача зграда које су добијене на основу задатих услова годишње потрошње оперативне енергије која мора да буде мања од дозвољене. Међутим, не узима се у обзир микро-клима, начин коришћења зграда, као ни енергија која је коришћена за производњу омотача зграда. Проблем је у томе што недостају одговарајући модели за симулацију и оптимизацију потрошње енергије у зградама током животног циклуса, а и параметри у експлоатацији зграда имају своју статичку природу. Укупна потрошња енергије у кућама и зградама се предвиђа коришћењем статистичких модела, статичких линеарних и динамичких детаљних модела. Међутим, уочена је велика разлика између предвиђене и реалне потрошње енергије у зградама, јер се понашање самих укућана не узима у обзир.

Да би се повећала тачност предвиђања потрошње енергије потребно је направити математичке моделе који би, осим тога што би били довољно детаљни, узели у обзир и реалну потрошњу енергије кроз њихову калибрацију. Самим тим, неопходно је праћење понашања и прикупљање резултата потрошње правих зграда (у реалном окружењу) као и предикција (у виртуелном окружењу) употребе енергије помоћу динамичких модела зграда. Упоредивањем ових резултата се врши калибрација динамичког модела.

Предмет рада ове докторске дисертације је развој нових динамичких модела симулације и оптимизације топлотног понашања кућа са нето-нултом енергетском потрошњом. Ови модели ће бити развијени у циљу одређивања оптималне дебљине положаја и врсте топлотне изолације, при чему ће бити оптимизована употреба примарне енергије и ексергије, као и економска исплативост, у току животног циклуса зграде. За калибрацију ових модела користиће се експериментално добијени подаци термичког понашања зграда у реалним условима.

Научни циљ дисертације је развој и добијање нових динамичких модела за симулацију и оптимизацију термичког понашања кућа нето-нулте енергетске потрошње, којима се остварује реално предвиђање потрошње енергије и осталих термичких параметара у зградама. Ови модели би обухватили све факторе који утичу на енергетски биланс зграде, како спољне, тако и унутрашње, али уједно и утицај људи на потрошњу енергије током животног циклуса куће. Да би се тај циљ постигао најпре је потребно развити математичке моделе, методологију и алгоритам за динамичку симулацију, извршити калибрацију резултата са стварним подацима и на основу тога додатно дефинисати факторе који утичу на енергетски биланс зграде. Све ово се ради како би се добили модели који дају готово реално предвиђање потрошње енергије и осталих термичких параметара у зградама.

Појавом и развојем кућа са нето-нултом потрошњом енергије намећу се суштински проблеми, и потребно је развити што ефикасније системе, оптимизовати омотач зграде, али и направити добар математички модел за испитивање свих потенцијалних решења како би се достигла оправданост економских инвестиција по важећим стандардима и скратило време потребно за испитивање квалитета изведених зграда. Да би се ово постигло, неопходно је развити квалитетне динамичке моделе, а

затим је потребно добијене резултате упоредити са реалном ситуацијом и калибрисати модел.

Пројектовање потрошње и предикција понашања укућана зграде се врло ефикасно истражује динамичком симулацијом коришћења куће нето-нулте енергетске потрошње. Коришћење адекватних оптимизационих метода омогућава оптималну употребу и пројектовање куће.

Када је реч о кућама са нултом енергетском потрошњом, у Центру за грејање, климатизацију и соларну енергију на Факултету инжењерских наука се реализују два пројекта: пројекат технолошког развоја (33015) „Истраживање и развој српске нето-нулте енергетске куће“ и пројекат интегралних и интердисциплинарних истраживања (42006) „Истраживање и развој енергетски и еколошки високо-ефективних система полигенерације заснованих на обновљивим изворима енергије“. Истраживања наведених пројеката се у појединим деловима ослањају на истраживања ове дисертације.

Највећи део истраживања је моделског карактера уз уважавање научних принципа и процедура енергетског моделирања, тј. преласка са реалног енергетског система на енергетски модел. Потребно је да развијени математички модел успостави релације између параметара зграда, грејне инсталације и параметара потрошње енергије. Уједно, неопходно је да развијени модел узме у обзир и динамичко понашање осталих параметара који утичу на укупну потрошњу енергије.

Коришћена је *Hook-Jeeves* оптимизациона метода да се одреди оптимална дебљина изолације, за различите врсте термоизолационих материјала, а на основу употребљене количине примарне енергије и економског становишта, као што је на пример време повраћаја уложених инвестиција. Основни начин решавања тог задатка блиско је повезан са развојем и унапређењем оптимизационих метода и алгоритама.

У оквиру истраживања вршена је анкета међу студентима Факултета инжењерских наука. На основу резултата добијених анкетом постављени су основи понашања укућана током дана и године, који су касније коришћени при динамичким симулацијама. Анкета је узела у обзир ниске кућице које имају приземље или приземље са још једним спратом, у околини Крагујевца, као региона на којем се врши целокупно истраживање ове дисертације. Из истог разлога су и анализирани метеоролошки подаци у последњих 30 година, који су коришћени за подешавање метеоролошког фајла који се употребљава у динамичким симулацијама.

Софтверски програм *EnergyPlus* је коришћен за извођење динамичких симулација. *EnergyPlus* је програм који је у научном свету прихваћен као довољно прецизан и коришћен је у преко 1200 научних радова. Програмски код за оптимизацију је написан у софтверском пакету *GenOpt*, који прво користи излазне податке из *EnergyPlus*-а, а затим на основу упоређивања резултата динамичких симулација одређује даљи правац оптимизације и мења улазне податке динамичких симулација.

Динамичке симулације су коришћене како би се оптимизовала дебљина термоизолационог слоја код једносратне куће са кровом који је нагнут под оптималним углом. Прво је испитиван утицај избора врсте материјала на потрошњу примарне енергије за загревање простора. Коришћен је приступ минимизације збира

примарне енергије уложене у термоизолациони слој и примарне енергије потребне за загревање простора. При томе је анализирано шест термоизолационих материјала са својим специфичним количинама енергије. Добијене су оптималне дебљине термоизолационих слојева у зависности од врсте изабраног материјала, као и од предвиђеног животног циклуса куће. У оквиру анализе је такође испитан период повраћаја уложене енергије, као и евалуација грешке.

Затим је испитана економска исплативост увођења термоизолационог слоја и оптимизована је дебљина термоизолације у зависности од животног циклуса. Коришћене су три врсте материјала, које је могуће набавити у свим стовариштима у Србији. Анализирани су укупни годишњи трошкови грејања, као и периоди повраћаја уложеног новца у термоизолацију. Евалуација грешке је показала мала одступања у односу на основну симулацију.

У свим примерима анализа коришћена су четири основна типа унапређења термоизолационог слоја. Прва два типа унапређења представљају унапређење куће која нема термоизолациони слој на кућу са оптималном дебљином термоизолационог слоја или на кућу са дебљином термоизолационог слоја прописаном по новој регулативи (11 центиметара). Преостала два типа унапређења представљају унапређење куће са дебљином термоизолационог слоја по старом стандарду (8 центиметара) на кућу са оптималном дебљином термоизолационог слоја или на кућу са дебљином термоизолационог слоја прописаном по новој регулативи.

У оба случаја, односно и при оптимизацији потрошње примарне енергије и оптимизацији по економској исплативости, анализирано је да ли кућа потпада под куће нето-нулте енергетске потрошње и које су границе дебљине термоизолационих слојева у сваком од случајева како би кућа била позитивна нето енергетска кућа.

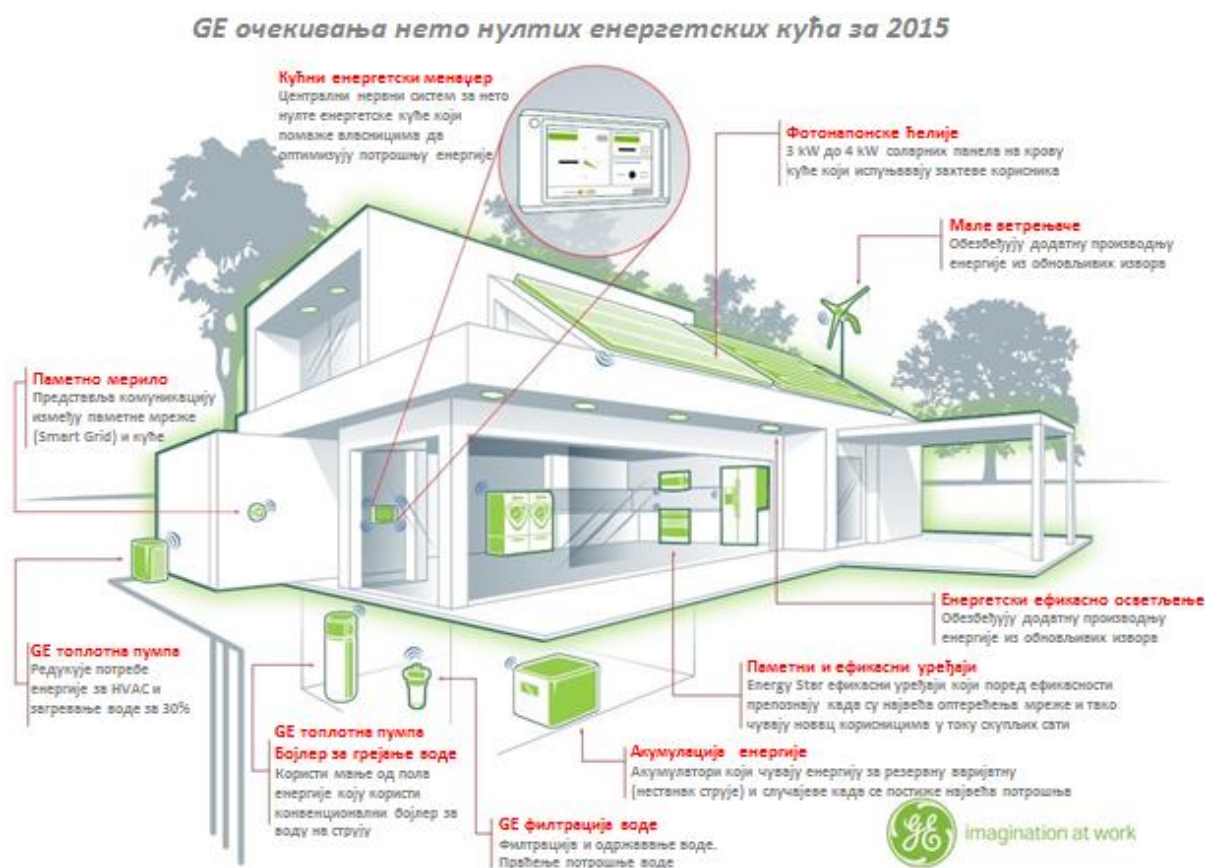
Овако добијени резултати довешће до појаве нове методологије процене укупне потрошње енергије у домаћинствима и тачнијег дефинисања потрошње током животног циклуса. Такође, може се очекивати да ће употреба оваквих модела помоћи при даљим истраживањима на пољу енергетске ефикасности, а све то ће имати велики утицај на смањење потрошње фосилних горива односно смањење емисије гасова који утичу на појаву стаклене баште.

2. Куће нето-нулте енергетске потрошње

2.1. Концепт нето-нулте енергетске куће

Развој кућа нето-нулте енергетске потрошње доноси нове, ефикасније куће чија је потрошња мања или једнака енергији коју та кућа производи. Као такве оне растеређују енергетски систем, раде са мањом потрошњом енергије него обичне куће, производе потребну енергију из обновљивих извора и доводе до умањене емисије штетних гасова.

Идејни пример једне куће нето-нулте енергетске потрошње је дат на слици 2.1. Нето-нулта енергетска кућа би требало да користи ефикасне системе грејања, обновљиве изворе енергије за производњу како електричне енергије тако и за грејање топле воде, и да, уколико је могуће, користи топлоту земље. Такође је потребно да буде правилно оријентисана, а уједно ефикасна и са правилним избором и врстом омотача куће који се користи. Како би се редуковала потрошња, нето-нулта енергетска кућа би требало да поседује интелигентне системе за праћење потрошње енергије, енергетски ефикасне уређаје, као и ефикасно осветљење у виду лед сијалица.



Слика 2.1. Идејни изглед нето-нулте енергетске куће [11]

Потребу за оваквим ефикасним кућама је вероватно најбоље описао *Daniel M. Kramer*, директор Лабораторије обновљиве и примењене енергије на Универзитету Калифорнија, Беркли, у часопису *Nature* [12]:

„До 2020. неопходно је да човечанство сигурно гази стопама нискокарбонског друштва – превасходно вођено ефикасношћу и технологијама чисте енергије. Неколико обновљивих технологија су спремне за огроман развој. Енергетски ефикасни циљеви би могли помоћи да се смање потребе за енергијом тако што би се подстицале иновације као што су *PNEB* и возила на електрични погон. Истраживања на пољу соларне енергије – нарочито она како је правилно складиштити и равноправно дистрибуирати представљају циљ који је једнако важан како за богата тако и сиромашна друштва. Ако се свуда истражују, добијена решења би довела до развоја паметних мрежа – *smart grids*, што би значило да ће човечанство до 2020. бити на путу да има енергетски систем у којем би преко 80% електричне енергије било произведено из соларне енергије, енергије ветра, нуклеарне енергије, геотермалне енергије и енергије добијене из хидроелектрана.“

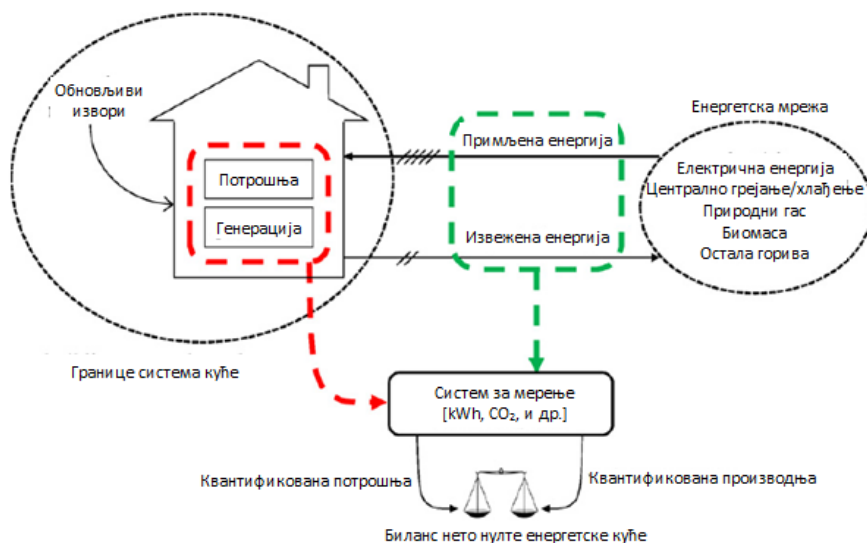
Везано за енергетски ефикасне куће постоји и неколико дефиниција које описују принципе ових кућа у литератури [13, 14, 15, 16]:

- **Нето-нулта енергетска кућа (ZNEB – Zero Net Energy Building)** – код ове куће је количина енергије коју производи из обновљивих извора једнака њеној потрошњи на годишњем нивоу.
- **Нето-позитивна енергетска кућа (PNEB – Positive Net Energy Building)** – код ове куће је количина енергије коју производи из обновљивих извора већа од њене потрошње на годишњем нивоу.
- **Нето-нулта енергетска локација (Net Zero Site Energy)** – под овом дефиницијом се сматра да се на локацији на којој се налази кућа производи иста количина енергије коју кућа троши током године.
- **Нето-позитивна енергетска локација (Positive-Net Site Energy)** – под овом дефиницијом сматра се да се на локацији на којој се налази кућа производи већа количина енергије од оне коју кућа троши током године.
- **Нето-нулта енергија извора (Net Zero Source Energy)** - ова дефиниција се односи на примарну енергију коју производи и троши кућа. Овде је већ ситуација другачија, јер се у обзир узима примарна енергија која се троши, а која је од 2 до 4 пута већа од финалне енергије која се троши у кући. Потребно је да примарна произведена енергија из обновљивих извора енергије на кући буде једнака примарној енергији коју потроши кућа у току једне године.
- **Нето-позитивна енергија извора (Positive-Net Source Energy)** – Количина примарне произведене енергије из обновљивих извора енергије на кући је већа од примарне енергије коју потроши кућа у току једне године.
- **Нето-нулти трошкови енергије (Zero Net Energy Cost)** – Трошкови за енергију су на крају године једнаки нули, тј. сума коју корисник плаћа за искоришћену енергију мрежи је једнака суми коју мрежа плаћа кориснику за продати вишак количине енергије који је кућа направила.
- **Нето-позитивни трошкови енергије (Positive-Net Energy Cost)** – Сума коју корисник плаћа за искоришћену енергију мрежи је мања од суме коју мрежа плаћа кориснику за продати вишак количине енергије који је кућа направила. То значи да је на крају године власник куће у финансијској добити.
- **Нето-нулта енергетска емисија (Net Zero Energy Emission)** – ова кућа производи најмање исту количину енергије која не емитује штетне гасове у односу на енергију коју троши која емитује штетне гасове при својој трансформацији.

- **Нето-позитивна енергетска емисија (Positive-Net Energy Emission)** – ова кућа производи већу количину енергије која не емитује штетне гасове у односу на енергију коју троши која емитује штетне гасове при својој трансформацији.
- **Нето-нулта енергија животног века (Net Zero Life-cycle Energy)** – код ове куће је сума количине енергије коју потроши кућа и количине уграђене енергије у кућу при њеном прављењу једнака количини енергије коју кућа произведе за свој животни век.
- **Нето-позитивна енергија животног века (Positive-Net Life-cycle Energy)** – код ове куће је сума количине енергије коју потроши кућа и количине уграђене енергије у кућу при њеном прављењу мања од количине енергије коју кућа произведе за свој животни век.

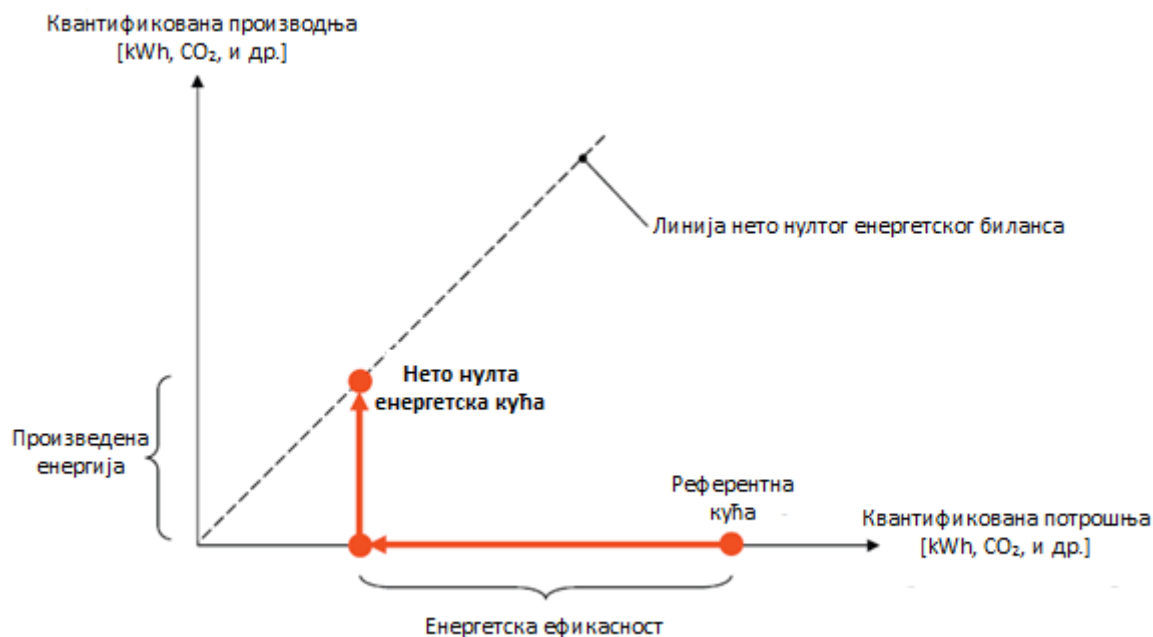
Потребно је нагласити да нето-нулта енергетска кућа производи енергију из обновљивих извора најчешће када чланови домаћинства нису у кући. То се дешава у току дана нарочито у периоду између 8 и 17 часова. Тада су старији укућани на послу, док су млађи чланови у школи или на факултету. У том периоду кућа добијену енергију предаје електродистрибуцији, а од ње узима енергију у поподневним и вечерњим сатима када су укућани код куће, а сама кућа не може да производи енергију. Исто важи и за годишња доба. На пример, у току лета се производи огромна количина енергије путем фотонапонских ћелија, која се предаје мрежи, међутим, током зиме је производња енергије драстично мања за исти временски период. Због свега наведеног се енергетски биланс куће посматра на годишњем нивоу.

Најбољи опис целокупног принципа рада нето-нултих енергетских кућа дала је група аутора коју чине професори *Santori, Napolitano* и *Voss* [15]. На слици 2.2 је приказано да се у оквиру граница куће налазе обновљиви извори енергије, потрошња и генерација енергије. Са друге стране се налази енергетска мрежа која даје струју, централно грејање и хлађење, природни гас, биомасу и остала горива. На вези између мреже и куће се налазе две линије – прва, која представља предату енергију кући од стране мреже, и друга, која представља извежену енергију од стране куће ка мрежи. Све то се на крају сабере и упореди преко система за мерење, где се упоређују исте величине (kWh, CO₂ и остале). Уколико су вредности са леве и десне стране једнаке кућа је нето-нулте енергетске потрошње.



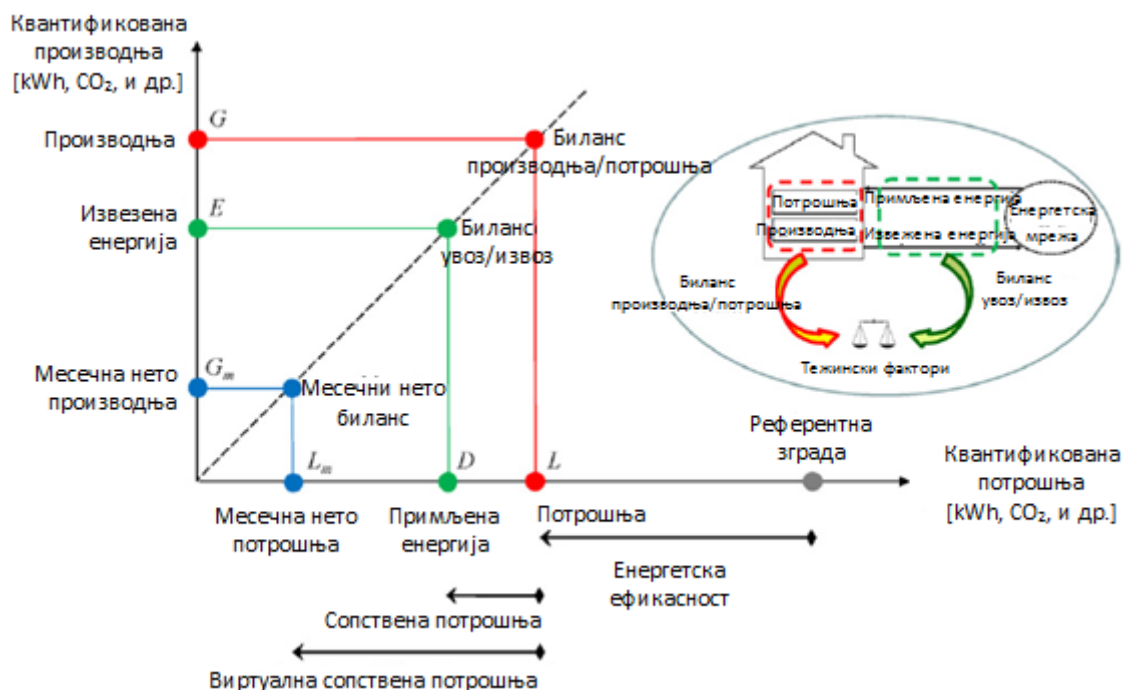
Слика 2.2. Скица везе између куће и мреже са релевантом терминологијом [15]

На слици 2.3 је представљен концепт баланса код нето-нултих енергетских кућа. На апциси се налази потрошња куће гледана кроз мерне јединице, док се на ординати налази производња енергије куће гледана кроз исте мерне јединице. Уколико је у питању нето нулта енергетска кућа њен однос ће се налазити на симетрали овог графика као што је приказано на слици. Насупрот томе, код референтне куће се виде две битне ствари. Прво – кућа не ствара никакву количину енергије, и друго – разлика у потрошњи ове две куће је драстична и огледа се у повећању енергетске ефикасности куће.



Слика 2.3. График који представља концепт баланса нето нултих енергетских кућа [15]

На слици 2.4 је дат пример три врсте баланса који се могу разматрати. Однос на нивоу месечне потрошње и производње узима укупну потрошњу куће и пореди је са производњом енергије. Такав систем се примењује у Немачкој код њиховог правилника за енергетски код [17, 18]. Стандардни рачун код нето-нултих кућа се односи на укупну произведену и потрошену енергију куће [13, 16]. Међутим, већину међународних правилника и кодова не интересује колико ће кућа потрошити енергије коју произведе сама за себе, већ однос колико ће енергије преузети из мреже и колико ће вратити назад у мрежу [14]. Овакав приступ производње и потрошње система се не користи углавном зато што електродистрибуција нема приступ томе колико се троши коначне енергије, ако се она директно узима из фотонапонских ћелија и соларних колектора и користи директно без предаје електродистрибуцији (нпр. за осветљење, електричне уређаје, кување, коришћење топле воде), јер та количина енергије не пролази кроз електрично бројило. Електродистрибуција у том случају само мери количину енергије преузете из мреже.



Слика 2.4. Три врсте биланса који се могу користити: месечна производња и потрошња, извезена и преузета енергија од мреже, произведена и потрошена енергија [15]

2.2. Принципи примене технологија код извођења нето-нултих енергетских кућа

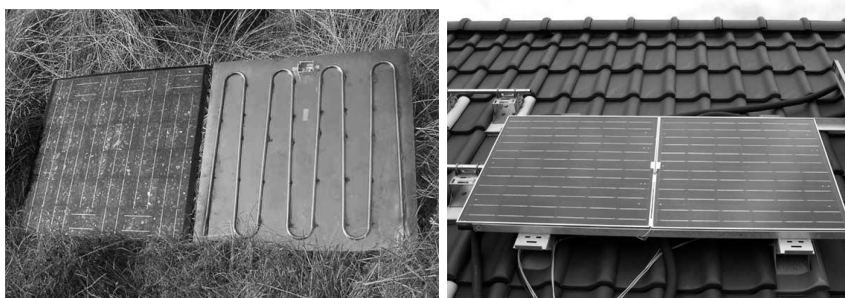
Истраживање и достизање концепта нето-нултих енергетских кућа је један од циљева готово свих држава на свету. Оне улажу пуно новца у развој оваквих кућа како би на време утицале на свеопшти проблем глобалног загревања и повећане потребе за енергијом у свету. Међународни монетарни фонд и банке кроз разне пројекте улажу средства у унапређење технологија и повећање свести о овом проблему у свету. И Република Србија се не издваја по томе, па тако постоји неколико пројеката који се баве облашћу повећања енергетске ефикасности у Србији. Ова дисертација представља део пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја (ТР 33015) „Истраживање и развој српске нето-нулте енергетске куће“.

Концепт развоја нето-нултих енергетских кућа утемељен је на директиви 2010/31/EU [19] по којој је неопходно да свака кућа која буде изграђена после 31. децембра 2018. сама производи потребну количину енергије за самостално функционисање [20]. Овакве куће морају да производе енергију из обновљивих извора енергије, што захтева повећана претходна улагања, која ће се временом вратити, али гледано са аспекта очувања животне средине постоје велике предности овакве градње. Почев од 2020. све нове савезне зграде у САД ће бити пројектоване као зграде нето-нулте енергетске потрошње [21].

Ове иницијативе и директиве довеле су до убрзаног истраживања како у Европи [22, 23], тако и у САД [24, 25], Јапану [26] и другим земљама у виду великих пројеката. И код нас постоје истраживања на пољу нето-нултих енергетских кућа [27]. Детаљан преглед нето-нултих енергетских кућа је дало неколико аутора [28, 29, 30]. У већини ових примера, када је у питању енергетска ефикасност, ради се о побољшању термоизолације, дуплим прозорима, као и прозорима са ниском емисијом. Код

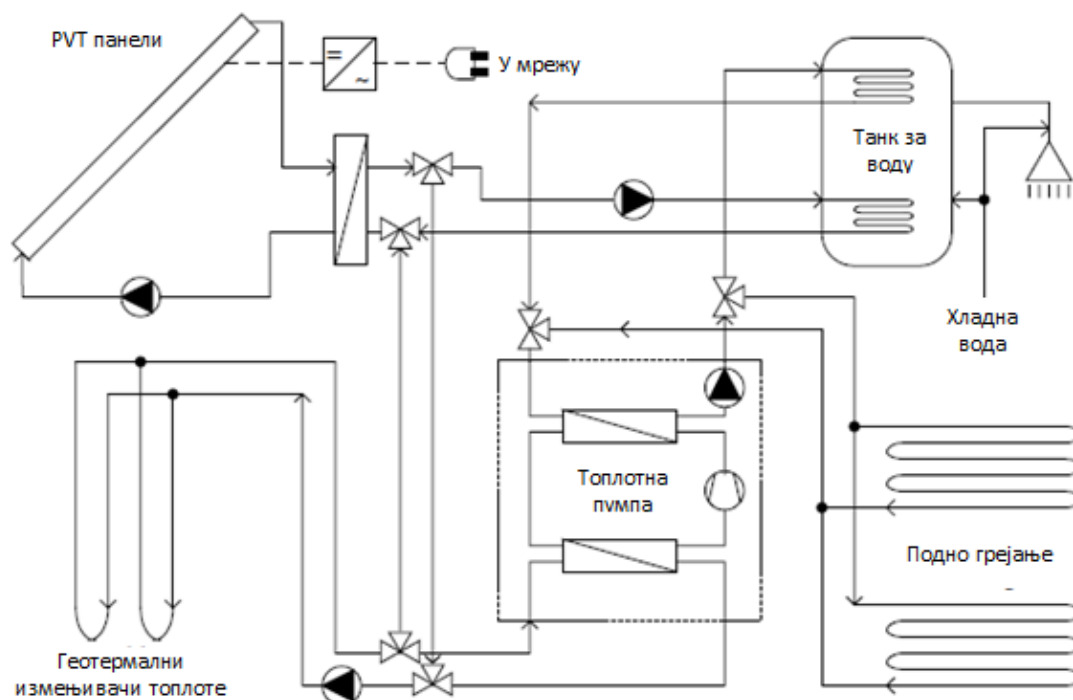
појединих се помиње ЛЕД осветљење и добро коришћење надстрешница ради засенчивања просторија.

На слици 2.5 су приказани хибридни фотонапонски панели на кући нето-нулте енергетске потрошње у Европи [22]. Тај пример куће је послужио за сакупљање података о перформансама и трошковима коришћења хибридних фотонапонских панела на кућама.



Слика 2.5. Хибридни фотонапонски панели на кући у Холандији [22]

На слици 2.6 је дат шематски приказ система који је коришћен код поменуте куће. Електрична енергија и топла вода се добијају помоћу хибридних панела, па се потребна топла вода само догрева до жељене температуре. За грејање куће се користи подно грејање и геотермална енергија. Део вишка произведене струје се предаје мрежи.



Слика 2.6. Шематски приказ система хибридни фотонапонски панели на кући у Холандији [22]

Citherlet и *Defaux* су своја истраживања спровели у Швајцарској, где су поређене потрошње и утицај на животну средину за три варијанте породичних кућа током њиховог животног циклуса [23]. На слици 2.7 је приказана кућа која је дала најбоље резултате у њиховом истраживању.



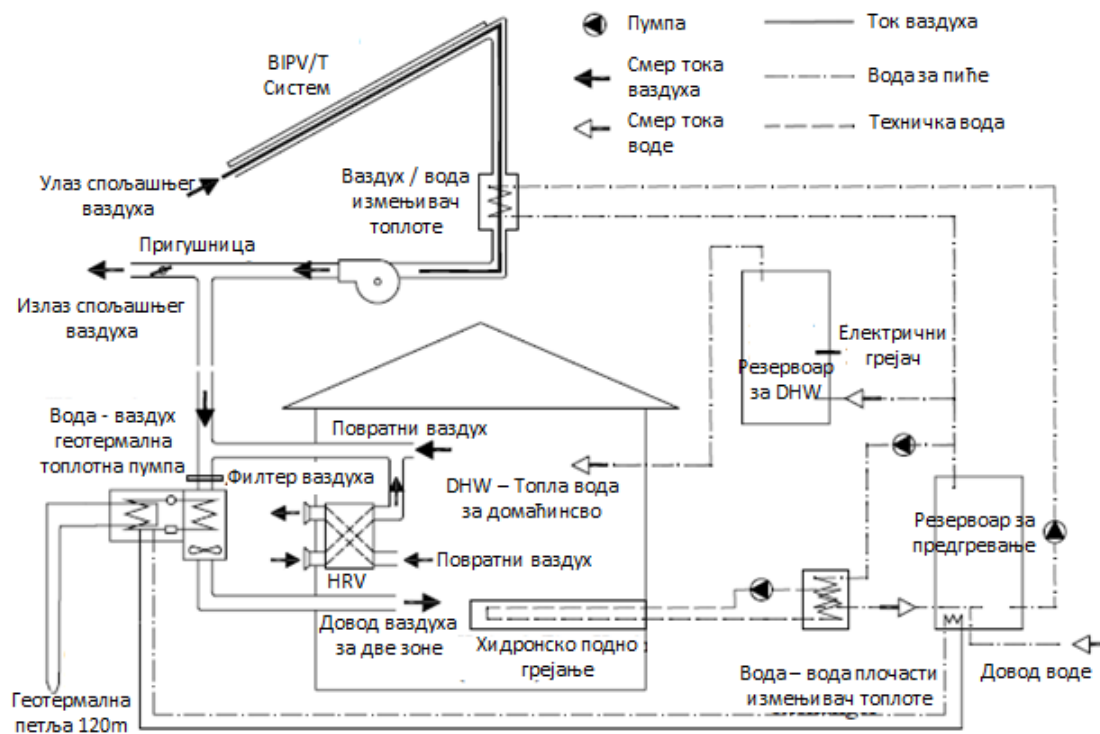
Слика 2.7. Основа нето-нулте куће у Швајцарској [23]

На слици 2.8 је приказана кућа са нето-нултом енергетском потрошњом која поседује интегрисане термалне и фотонапонске ћелије у омотачу куће [24].



Слика 2.8. Нето-нултна енергетска кућа у Калгарију [24]

Ова кућа такође има и систем геотермалне топлотне пумпе и њен принцип рада је приказан на слици 2.9.



Слика 2.9. Шематски приказ система код куће у Калгарију [24]

На слици 2.10 је приказана кућа нето-нулте енергетске потрошње у хладној клими Колорада [25]. Ова кућа користи фотонапонске панеле за стварање електричне енергије и фосилна горива за загревање простора, што је релативно јефтино али и дискутабилно решење.



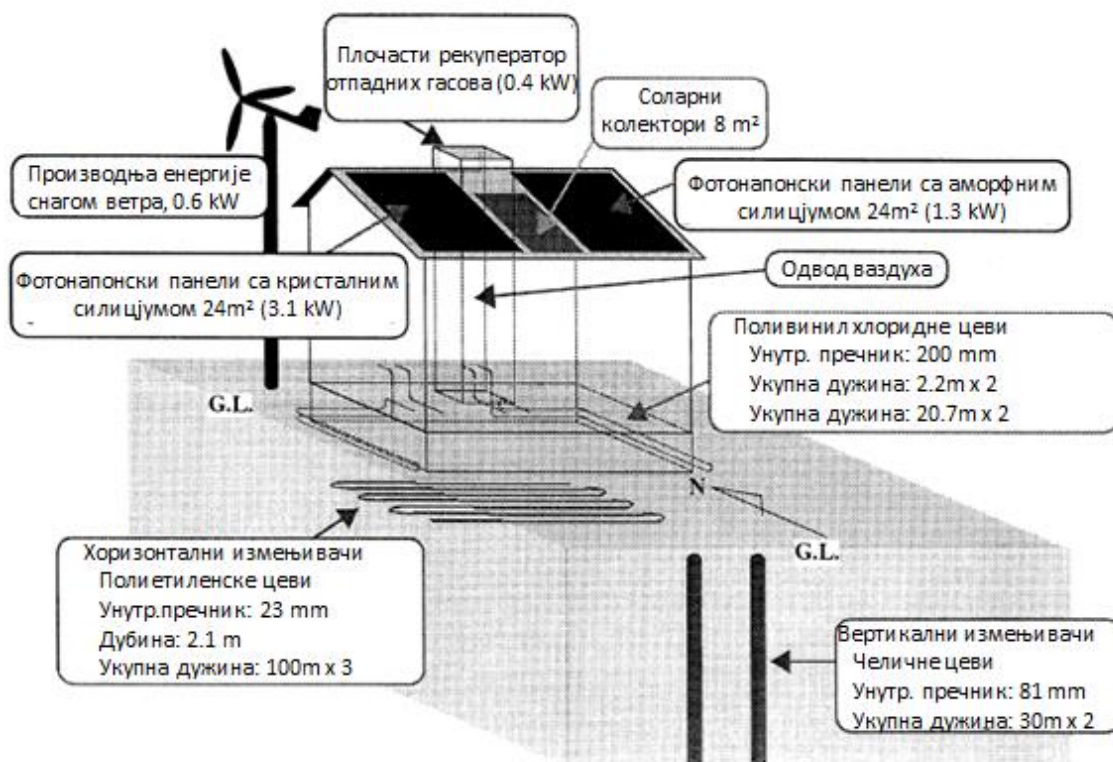
Слика 2.10. *Нето-нулта енергетска кућа у хладном климату Колорада [25]*

На слици 2.11 је приказана кућа нето-нулте енергетске потрошње у Јапану. У овој кући се користи геотермална топлотна пумпа, одлично је термички изолована, непропусна за ваздух, вентилира се преко димњака, користи фотонапонске панеле, ветрењаче, и соларне колекторе да задовољи потребе за грејањем и хлађењем животног простора и употребом топле санитарне воде [26].



Слика 2.11. *Нето-нулта енергетска кућа у Јапану [26]*

На слици 2.12 је дат шематски приказ ове куће у Јапану.



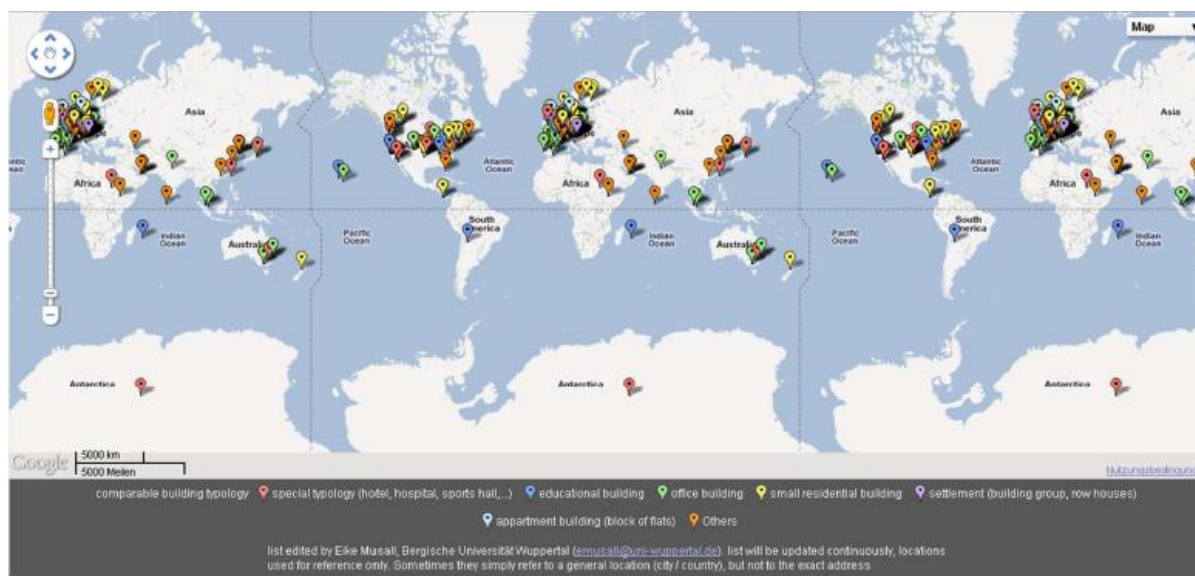
Слика 2.12. Шематски приказ нето-нулте енергетске куће у Јапану [26]

Код нас у Србији је једна од првих кућа истраживана кроз модел развијен на Машинском факултету Крагујевцу од стране проф. Бојића и групе аутора [27]. Енергија добијена из фотонапонских ћелија се користи за грејање простора, осветљење и кућне уређаје и за загревање топле воде. Систем за грејање простора се састоји од подног грејања, пумпе вода-вода и измењивача топлоте. У овом раду се налазе три различите врсте куће. Код једне се не производи довољна количина струје из фотонапонских панела, па је ово нето-негативна кућа. Код друге има толико панела на крову куће који производе потпуно исту количину енергије колико кућа и троши, па је то нето-нулта енергетска кућа. Код треће куће је читав кров у фотонапонским панелима па кућа прави већу количину енергије него што је потребно и то је нето-позитивна енергетска кућа.

Danny H. W. Lee је у свом раду који је прегледног карактера приказао примере још неких кућа [28]. Ту су представљена новија истраживања нето-нултих енергетских кућа које су испитиване широм света. Фабрика и канцеларије су испитиване у Синсинатију [31]. Ова публикација је битна јер се заснива на *LEED EB Platinum* стандарду [32]. Стамбене куће су испитиване у Данској [33], Хонг Конгу [34], Лас Вегасу [35], Мадриду и Шангају [36].

Karsten Voss је објавио књигу о нето-нултим енергетским кућама [29]. У њој је представио принципе нето-нулт кућа, како раде и где се налазе. У овој књизи он је такође представио различите примере нето-нултих енергетских кућа широм света. У својој презентацији [37] за конференцијски рад [38] је дао примере у ком правцу у будућности треба да иде развој нето-нултих енергетских кућа. Такође, у овој

презентацији је представљен по први пут сајт [39] на коме се могу наћи све активне нето-нулте енергетске куће у свету. На слици 2.13 је дат приказ овог сајта.



Слика 2.13. Веб страница са нето-нултим енергетским кућама у свету [39]

Најопширнији опис принципа рада, примењених технологија и могућности нето-нултих енергетских кућа је дао *Karsten Voss* у финалном извештају пројекта који је укључио скоро све европске државе [30]. У оквиру овог извештаја дати су и сви примери и резултати на нето-нултим енергетским кућама широм Европе.

2.3. Енергетски пасош у Србији


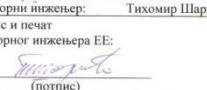
Нови правилник о енергетској ефикасности [40] који је ступио на снагу од 2009. године захтева да нове куће имају коефицијент пролаза топлоте мањи од 0,3 док старе куће на којима се ради поправка термоизолације имају максимум 0,4. Као што је приказано на слици 2.14, да би стара кућа била у С класи потребно је да има максимум потрошње $75 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, док би нове куће требало да имају максимум од $65 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

| Зграде са једним станом | | нове | постојеће |
|-------------------------|-----------------------|---|---|
| Енергетски разред | $Q_{H,nd,rel}$ (%) | $Q_{H,nd}$ ($\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) | $Q_{H,nd}$ ($\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) |
| A+ | ≤ 15 | ≤ 10 | ≤ 12 |
| A | ≤ 25 | ≤ 17 | ≤ 20 |
| B | ≤ 50 | ≤ 33 | ≤ 38 |
| C | ≤ 100 | ≤ 65 | ≤ 75 |
| D | ≤ 150 | ≤ 98 | ≤ 113 |
| E | ≤ 200 | ≤ 130 | ≤ 150 |
| F | ≤ 250 | ≤ 163 | ≤ 188 |
| G | > 250 | ≤ 163 | > 188 |

Слика 2.14. Класе кућа по новом правилнику о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда [41]

На слици 2.15 је дат један пример енергетског пасоша.

ЕНЕРГЕТСКИ ПАСОШ ЗА СТАМБЕНЕ ЗГРАДЕ

| | | | | |
|--|--|--|--|---|
| фотографија зграде (једна могућност) | ЗГРАДА | | <input checked="" type="checkbox"/> нова | <input type="checkbox"/> постојећа |
| | Категорија зграде | | 1. Зграда са једним станом ② Зграда са више станова | |
| | Место, адреса: | | Нови Сад, Станоја Станојевића 8 | |
| | Катастарска парцела: | | 728/38 К.О. Нови Сад IV | |
| | Власник/инвеститор/правни заступник: | | „ТЕХНИКИНВЕСТ“ ДОО, Београд | |
| | Извођач: | | | |
| | Година изградње: | | 2012. | |
| | Година реконструкције/енергетске санације: | | - | |
| | Нето површина A_n [m ²]: | | 1022 | |
| Енергетски пасош за стамбене зграде | Прорачун | | $Q_{H,ref}$ [%] | $Q_{H,ref}$ [kWh/(m ² a)] |
| | | | 92,85 | 55,71 |
| | A+ | | ≤ 15 | |
| | A | | ≤ 25 | |
| | B | | ≤ 50 | |
| | C | | ≤ 100 | C |
| | D | | ≤ 150 | |
| | E | | ≤ 200 | |
| | F | | ≤ 250 | |
| | G | | > 250 | |
| Подаци о лицу које је издало енергетски пасош | | | | |
| Овлашћена организација: „Институт за безбедност и сигурност на раду“ Нови Сад | | | | |
| Потпис овлашћеног лица и печат организације: | | | | |
|  | | | | |
| (потпис) | | | | |
| Одговорни инжењер: Тихомир Шариф | | | | |
| Потпис и печат одговорног инжењера ЕЕ: | | | | |
|  | | | | |
| (потпис) | | | | |
| Број пасоша: | | | | |
| Датум издавања/рок важења: 2013. | | | | |

Слика 2.15. Формулар енергетског пасоша у Србији

3. Термоизолациони материјали

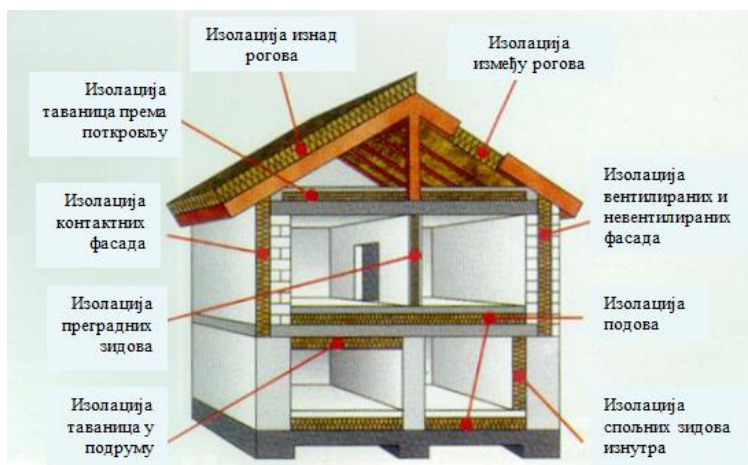
Истраживања у оквиру примарне енергије се огледају у смањењу укупне потрошње енергије за грејање, али уједно и енергије уложене да се произведе термоизолација. Сваком власнику куће или стана економска анализа је једна од најбитнијих активности при избору типа и дебљине термоизолације током реновирања или изградње куће. И коначно утицај ексергије, енергије корисног рада да би се систем довео у равнотежу је данас једна од најактуелнијих тема у модерној термодинамици. При избору термоизолационог материјала који ће бити коришћен потребно је водити рачуна о [42]:

- Анализи својстава термоизолационих материјала у односу на својства осталих материјала који се користе за поједине делове конструкције,
- Анализи положаја елемената конструкције у односу на окружење
- Анализи термо – хигрометријских услова средине .

Како би савремени грађевински материјали били конкурентни на тржишту неопходно је да испуни низ строго постављених захтева, међу којима су [42]:

- Ниска запреминска маса,
- Задовољавајуће механичке чврстоће,
- Мало упијање воде,
- Добра термоизолациона својства,
- Задовољавајућа проводљивост паре и гасова,
- Отпорност на дејство мрза,
- Хемијска и биолошка постојаност,
- Отпорност на дејство пожара,
- Нетоксичност,
- Прихватљива цена
- Могућност рециклирања.

При прављењу кућа потребно је правилно изоловати све спољне зидове, кров, унутрашње зидове, као и подове и основу куће. Један такав приказ дат је на слици 3.1.



Слика 3.1. Места на којима се поставља изолација на кући [42]

У свету, па тако и у Србији, најчешће коришћени материјали за термоизолацију објеката су:

- Стиропор (*Polystyrene*),
- Минерална вуна (*Glass mineral wool*),
- Камена вуна (*Rock mineral wool*),
- Полиуретан (*Polyurethane*),
- Фиберглас (*Fiberglass*)
- Плуца (*Cork*).

Термоизолациони материјали се могу поделити на материјале:

- Минералног порекла,
- Органског порекла
- Малтере и бетоне.

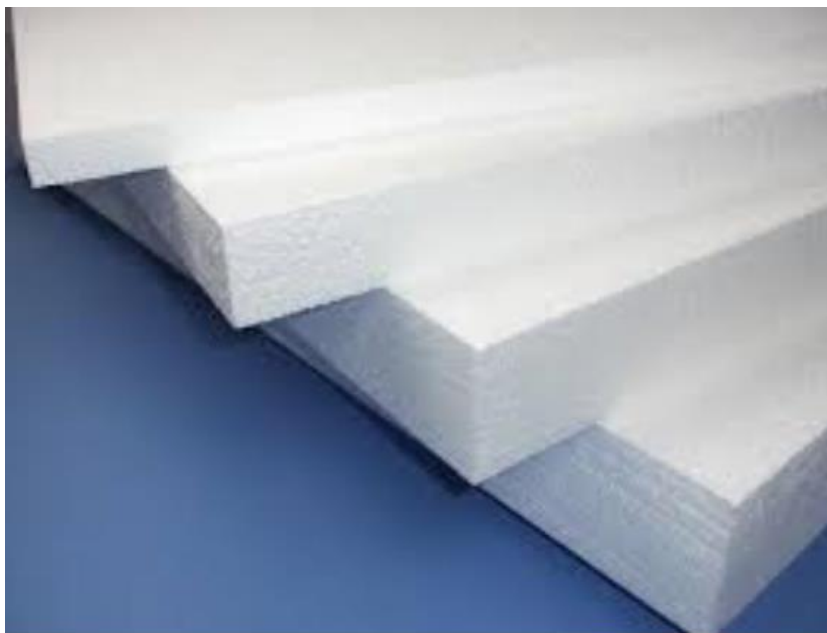
Њихова адекватна подела је дата на слици 3.2 [42].



Слика 3.2. Подела термоизолационих материјала

3.1 Стиропор

Полистирен (стиропор) је један од најкоришћенијих и најпопуларнијих термоизолационих материјала данас [43]. Због своје распрострањености, релативно је ниске цене и лако се уграђује. Најчешће се користи за изолацију спољних зидова, али се користи и као пливајући под на међуспратовима. У поређењу са каменом вуном, поседује слабија противпожарна својства и на температурама преко 80 °С се мења. На слици 3.3 могу се видети стиропорске плоче које се користе за изолацију.



Слика 3.3. Стиропорске плоче за изолацију

3.2 Стаклена минерална вуна

Стаклена минерална вуна је један од најбољих топлотних изолатора. Минералног је порекла и њена примена је широка. Изузев у грађевинарству користи се и у индустрији и бродоградњи. Њена изолациона својства нису само топлотног карактера, већ има и добре звучне и противпожарне изолационе карактеристике [43].

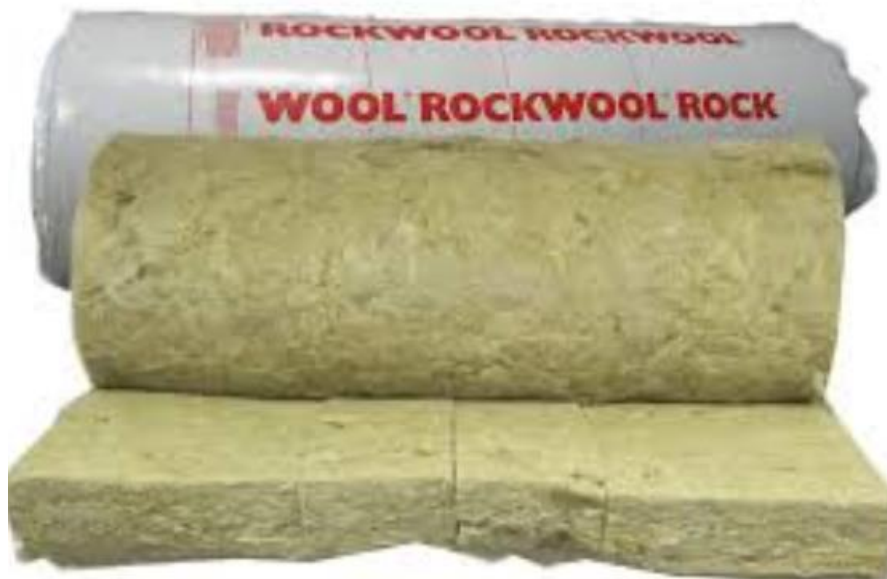
У грађевинарству се користи за изолацију спољних зидова и кровних конструкција, али као добар звучни изолатор се користи и за унутрашње зидове између соба и станова. За разлику од стиропора, отпорна је на инсекте и микроорганизме. Једино место где није препоручљиво користити минералну вуну као термоизолациони материјал је код зидова подрума. На слици 3.4 је дат пример стаклене минералне вуне.



Слика 3.4. Стаклена минерална вуна

3.3 Камена вуна

Камена вуна је као и стаклена минералног порекла [43]. Разлике између ове две вуне су у поступку којим се добијају, сировинама из којих се добијају и крајњим особинама материјала. Стаклена вуна се добија из кварцног песка којем се додаје рециклирано стакло. Камена вуна се добија од камених минерала, доломита, базалта и диабаза са додатком кокса. На слици 3.5 је приказана камена вуна.



Слика 3.5. Камена вуна

3.4 Полиуретан

Полиуретанска пена се најчешће користи за санације кровова. У поређењу са стиропором и минералном вуном има боља својства што се тиче коефицијента топлотне проводљивости [43]. Њене карактеристике су нарочито добре на температурне промене и влагу. Није превише распрострањена услед повећане цене у поређењу са минералном вуном и стиропором. Њена велика предност због које се се користи у санацијама је у томе што се може наносити на површине, али и у шупљине. На слици 3.6 је дат изглед полиуретанске пене.



Слика 3.6. Полиуретанска пена

3.5 Фиберглас

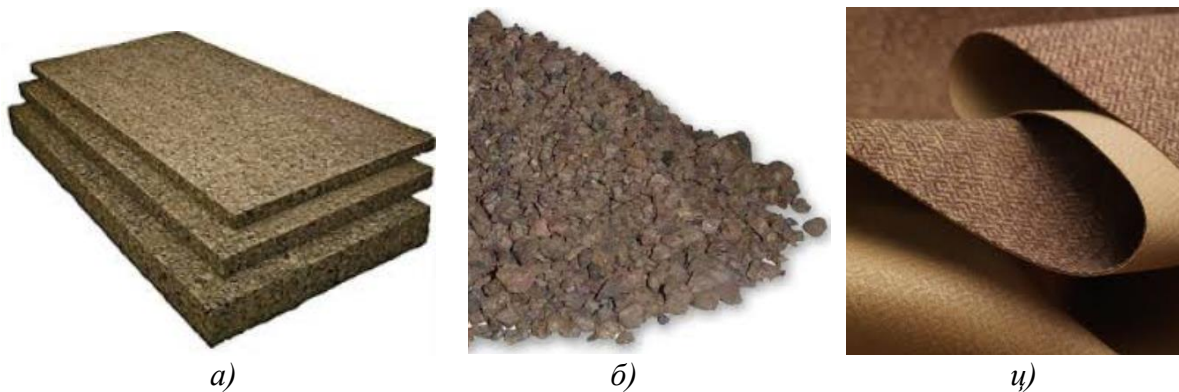
Фиберглас представља стаклом ојачану пластику и и у њему се најчешће налази око 20-30% рециклираног материјала [43]. Није запаљив осим у директном контакту наличја са ватром. Понекад произвођачи модификују наличје како би и оно било незапаљиво. Фиберглас се најчешће користи као паронепропусни материјал при изолирању куће. При његовом постављању потребно је водити рачуна о оријентацији. На слици 3.7 је дат приказ фибергласа.



Слика 3.7. Фиберглас

3.6 Плута

Плута се добија од коре храста плутњака, а представља одличан топлотни изолатор [43]. Највећа мана плуте као топлотне изолације је њена густина која је од 200 - 250 kg/m³. То значи да може да наруши статику спољашње конструкције. Плута се испоручује или у плочама или у гранулама у растреситом стању или залепљена за неку траку (најчешће је то битуменска трака). Када се употребљава за облагање унутрашњих зидова делује као топлотни и звучни изолатор, али уједно и као естетски детаљ у самој кући. На слици 3.8 су дати примери плуте.



Слика 3.8. Плута у облику а) плоче, б) растресита, ц) на битуменској траци

3.7. Аерогел

Аерогел вероватно представља будућност термоизолације, али не само у грађевинарству, већ у свим научним гранама [43]. Најбитније одлике су му јако мала маса и до сада незабележене карактеристике као топлотног изолатора. Најбољи пример његових карактеристика као топлотног изолатора дат је на слици 3.9. Настао је као гел у коме је течни састојак гас. Зову га још и смзрнути дим, плави дим или крути дим. Користи га највише NASA због већ наведених карактеристика.



Слика 3.9. Карактеристике и примена Аерогела

Он је добар топлотни изолатор јер се скоро у целости састоји од гаса, а густина му је само $0,3-3 \text{ g/dm}^3$. Његова највећа мана је слаба отпорност на савијање. Отпоран је на притисак и може да носи тежину и до 2000 пута већу од сопствене. Силицијумски аерогелови су постојани до температуре топљења силицијума која износи $1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.8. Упоредни приказ термоизолационих материјала

Разлике између ових термоизолационих материјала се огледају у коефицијенту топлотне проводљивости и густини материјала. Хамонд и Џонс су највише допринели на овом пољу и њихови резултати су вероватно и најбољи, јер се поновно мере и обнављају сваке године. Поред тога, резултати које су они добили имају своју додатну вредност јер су добијени у сарадњи са индустријом. Њиховом извештају [44, 45] се може слободно приступити, а он садржи податке и о осталим материјалима. Основне карактеристике наведених термоизолационих материјала који ће бити испитивани у овом раду су дате у табели 3.1.

Табела 3.1. Основне карактеристике термоизолационих материјала [44, 45]

| Материјал | Уграђена енергија, E_{em} (MJ/kg) | Густина, ρ_m (kg/m ³) | Коефицијент проводљивости топлоте, k (W/mK) |
|----------------|--|---|---|
| Минерална вуна | 16.6 | 16 | 0.038 |
| Камена вуна | 16.8 | 23 | 0.037 |
| Плута | 4 | 110 | 0.040 |
| Фиберглас | 28 | 24 | 0.036 |
| Стиропор | 86.4 | 16 | 0.037 |
| Полиуретан | 101.5 | 24 | 0.028 |

Подаци о ценама ових материјала су узети са наших простора на основу тренутног стања 2014. године у продавницама у Србији и приказани су у табели 3.2.

Табела 3.2. Цене термоизолационих материјала (1 cm дебљине по 1 m²) [46]

| Материјал | Цена 1cm / 1m ² , динара |
|----------------|--|
| Минерална вуна | 18 |
| Камена вуна | 51,1 |
| Стиропор | 48,9 |

4. Преглед литературе о истраживањима утицаја термоизолације на енергетски биланс куће

Када се сагледа стање научних истраживања у свету последњих година о утицају термоизолације на енергетски биланс куће у зградарству, увиђа се да се већина може поделити на три основне групе. Те групе су у складу са новим трендовима који захтевају смањење употребе непотребног вишка енергије, оптимизацију са економског аспекта док трећу групу чине радови везани за ексергију код термоизолације. Истраживања у оквиру примарне енергије се огледају у смањењу укупне потрошње енергије за грејање, али уједно и у енергији уложеној да се произведе термоизолација. Сваком власнику куће или стана економска анализа је једна од најбитнијих активности при избору типа и дебљине термоизолације током реновирања или изградње куће. И коначно утицај ексергије, енергије корисног рада да би се систем довео у равнотежу, данас је једна од најактуелнијих тема у модерној термодинамици.

Истраживања на тему термоизолационих материјала и њихове уложене енергије у грађевини су у пуном јеку. Ово је изазвано свеопште приступим ефектом стаклене баште услед чега се води рачуна о смањењу укупне потрошње енергије, као и о редукцији емисије штетних гасова. *Monahan* и *Powell* [47] су разматрали уложену енергију и енергетску анализу током животног циклуса куће. У овом раду они нису обратили пажњу само на термоизолационе материјале, већ на све материјале од којих је кућа направљена. *Yu* и *Kang* [48], *Upton* [49], *Thomark* [50] и *Gustavsson* [51] су истраживали материјале, њихову уложену енергију као и емисију штетних гасова током животног циклуса. *Milutienė* [52] је изучавао уложену енергију у пројектовању нето-нултих енергетских кућа.

Међутим, нико од њих није оптимизовао дебљину термоизолације како би се минимизовала укупна примарна енергија која се троши током животног циклуса куће, узимајући у обзир и потрошњу енергије за грејање и количину енергије уложене у термоизолацију куће. Термоизолациони материјали који ће бити коришћени у истраживању у оквиру овог рада, представљају најчешће коришћене материјале у те сврхе у садашњем времену. То су стаклена минерална вуна, камена вуна, стиропор, полиуретан, плута и фиберглас. Иако су њихове карактеристике разматране кроз литературу за различите регионе, укључујући и Нови Зеланд [53], Сједињене Америчке Државе [54, 55] и Велику Британију [56, 57], ипак су резултати истраживања везаних за уложену енергију од стране *Hammond*-а и *Jones*-а [44] у Великој Британији узети као релевантни за даља истраживања у овом раду. То је учињено јер не постоје ни експериментални, а ни званични подаци о уложеној енергији у материјале у Србији. Подаци *Hammond*-а и *Jones*-а су производ дугогодишњег истраживања, и резултати су константно ажурирани и поновно рачунати у сарадњи са њиховом индустријом. Њихов рад на пројекту *Inventory of Carbon & Energy (ICE)* даје податке о уложеној енергији за сваки тип материјала [44], и ови подаци су презентовани у њиховом извештају [45].

Ако се у обзир узму приоритети просечног власника куће, најбитнији фактор за њега је повраћај уложене инвестиције гледано са економског аспекта. Постоји пуно радова на ову тему јер је јако интересантна, и постоји неколико фактора који се при овој анализи узимају у обзир, као што је на пример планирани животни циклус те изолације. *Dylewski* и *Adamczyk* су у свом раду [58] испитивали економске и добити

окружења кроз обнављање и побољшање термоизолације спољних зидова. Примећено је да се повећањем дебљине термоизолације смањује потрошња енергије за грејање као и емисија штетних гасова. Економски аспект се може посматрати као једна инвестиција. Ова инвестиција узима у обзир куповину, транспорт и постављање изолације. Аутори су утврдили која је оптимална дебљина термоизолације која даје најбоље економске резултате инвестиције. У самом раду је постојало неколико верзија различитих термоизолација. Разлика је била у изворима енергије, материјалима зидова и термоизолационим материјалима.

У свом раду *Kaynakli* [59] је дао преглед већине радова заснованих на економској анализи термоизолације и оптималне дебљине термоизолације. У оквиру свог рада дао је преглед различитих материјала који су коришћени за ове симулације, примену два модела рачуна економске анализе – PWF и P_1-P_2 , као и примену различитих апликација за одређивање оптималне дебљине изолације у односу на животни циклус. Уопштено узевши, у литератури постоји више економских модела за повраћај инвестиције у термоизолацију који узимају у обзир новац уложен у термоизолацију и време за који ће тај новац бити повраћен гледано кроз цену оперативне енергије потребне за грејање и хлађење куће. Ово јесте добар модел, по аспекту корисника, међутим има једну ману. Такав модел не узима у обзир животни циклус и вредност новца уложеног у инвестицију који се мења током времена услед инфлације. Због тога су развијена два модела - PWF и P_1-P_2 . Код PWF (*present worth factor*) модела узима се у обзир животни циклус. Овај модел је примењен у литератури [60, 61, 62, 63, 64]. Животни циклус се разликује од аутора до аутора и код неких је 10 година [61, 65, 66, 67, 68, 69], 20 година [70, 71, 72, 73], 25 година [74] или 30 година [60, 75, 76]. Када се израчуна PWF фактор, укупна цена се рачуна на основу броја грејних (HDD – *heating degree days*) и хлађених (CDD – *cooling degree days*) дана. После овога је могуће рачунати време повраћаја новца (*payback period*), који овде у обзир узима већину потребних фактора. Време повраћаја новца се рачуна у годинама, а када се ради у односу на неизоловану кућу упоредна дебљина изолације износи 0. Неколико студија користи $P_1 - P_2$ модел економске анализе да би се израчунала уштеда [70, 72, 73, 77, 78, 79].

Основе ексергије је 1969. поставио *Evans* у својој докторској дисертацији [80], као ексергетску анализу, а заснива се на комбинацији првог и другог закона термодинамике. Њен оптимизациони део се зове термодинамичка оптимизација, а он ју је још и назвао минимизација генерисања ентропије (*entropy generation minimization* – EGM). Уследила је брза експанзија на овом пољу и већ у наредних неколико година је ова грана термодинамике придобила велику пажњу [81, 82, 83, 84, 85]. У новије време, од деведесетих, овом граном термодинамике се највише баве *Bejan* [86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94], и *Shukuya* [95, 96, 97, 98]. Они су у својим радовима независно описали основе и дефиниције ексергије [99, 100]. У новије време постоји доста радова који се односе на енергију потрошену за загревање простора, из којих се да закључити да последњи стадијум у потрошњи ексергије одлази кроз омотач зграде. *Yucer* и *Hepbasli* [101] су описали један систем куће у којој су упоредно мерили потрошњу енергије и ексергије. Они су пратили ексергетски ток од конвенционалног котла, преко измењивача топлоте и ваздуха у просторији до губитка енергије кроз омотач зграде. Услед самог побољшања омотача зграде, као и понашања корисника може се драстично побољшати ексергетско стање куће. То је у свом раду приказао *Shukuya* [102]. Примећено је да утицај понашања човека у односу на спољашње услове има

много већи добитак него само побољшање термоизолације. У осталим радовима [103, 104, 105, 106, 107] је примећен исти тренд.

Поред наведених радова потребно је поменути да се код целокупног побољшања енергетске ефикасности нарочито истиче утицај термоизолације, као једног од потенцијално највећих штедиша енергије. У тим радовима се изузев термоизолације примењују побољшања као што су дупло или троструко застакљење прозора, понегде ниско емисиона стакла, као и високо енергетско ефикасни уређаји и лед светла за осветљење. Међутим, поједине мере су понекад ефикасније од побољшања термо изолације у зависности од климе и климатских услова тог региона [108, 109]. Примећено је да је у хладним просторима утицај термоизолације незаменљив, док се у топлијим просторима више обраћа пажња на потенцијалне изворе топлоте, као на пример прозоре, уређаје или осветљење. *Ren* и остали [110] су описали стамбени објект у Аустралији са побољшаном термоизолацијом, дуплим нискоемисионим прозорима, као и енергетски ефикасним уређајима. *Guan* [111] је описао пословни објект у Аустралији са добром изолацијом, смањеним односом стакла и зида (*WWR*—*window-to-wall ratio*), рефлексивним стаклима, као и побољшаним осветљењем (*LLD* – *Lighting load density*). Треба напоменути да у топлим крајевима као што је Аустралија термоизолација има мањи утицај, а већи утицај има ефикасан избор прозора или осветљења да не би дошло до додатног загревања просторија у летњем периоду. У Кини је закључено да су код пословног простора најбоље мере побољшање термоизолације, смањење *WWR*-а, смањење *LLD*-а, као и подизање жељене температуре хлађења током лета [112, 113]. У Хонг Конгу су вршена испитивања са побољшаном термоизолацијом, термалном масом, рефлексивним прозорима, смањеним *WWR*-ом, засенчењима и смањивањем оптерећења система за хлађење [114, 115, 116]. У Уједињеним Арапским Емиратима вршена су испитивања на пословном објекту са побољшаном термоизолацијом, термалном масом, са дуплим стаклима исмањеним *WWR*-ом [117]. У Сједињеним Америчким Државама је у осам зона испитиван утицај термоизолације, нискоемисионих стакала и коришћења затамњивања и надстрешница пословним објектима [118]. У Великој Британији је код стамбених објеката примећен утицај побољшања коришћењем правилне термоизолације и нарочито коришћењем дуплих стакала код прозора [119, 120]. У истом региону је испитан и утицај на пословним просторима током летњег периода, па су коришћени боља изолација, трострука стакла, нискоемисиона стакла, као и ЛЕД осветљење са засенчивањем простора [121]. У једном раду су упоређени исти услови и утицај побољшања на објекте у Берлину где је хладно, Барселони где је умерено и у Палерму на Сицилији где је топло [122]. Коришћени су стандардни зидови, додатно термално изоловани зидови и вентилисани зидови. У Грчкој је извршено једно исцрпно и темељно истраживање по питању утицаја термоизолације на енергетску ефикасност и извршена је њена оптимизација [123].

5. Симулациони софтвери и динамички модели

5.1. Динамички модели

У данашње време енергетска ефикасност зграда се рачуна помоћу стандардизованих вредности омотача зграда који су добијени на основу граничних вредности да годишња потрошња оперативне енергије буде мања од дозвољене. Међутим, не узима се у обзир микро клима, начин коришћења зграда као и енергија која је коришћена за производњу омотача зграда. Проблем је у томе што недостају одговарајући модели за симулацију и оптимизацију потрошње енергије у зградама током животног циклуса, а и параметри у експлоатацији зграда имају своју статистичку природу.

У данашње време укупна потрошња енергије у кућама и зградама се предвиђа коришћењем статистичких модела, статичких линеарних и динамичких детаљних модела. Међутим, уочена је велика разлика између предвиђене и реалне потрошње енергије у зградама. То се дешава из разлога што се понашање самих укућана не може тачно узети у обзир. Остали спољни фактори као што је микро клима (ентеријер и спољашњи услови око зграде) се често не узимају у обзир, или се узимају недовољно детаљно.

Да би се повећала тачност предвиђања потрошње енергије потребно је направити математичке моделе који би, осим тога што су довољно детаљни, узели у обзир и реалну потрошњу енергије кроз њихову калибрацију. То би даље водило ка праћењу понашања и прикупљању резултата потрошње правих зграда (реално окружење) као и предикцији (виртуелно окружење) употребе енергије помоћу динамичких модела зграда. Упоредивањем ових резултата се врши калибрација динамичког модела [124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132].

Постоји више софтвера, као и принципа који омогућавају динамичке симулације понашања кућа. Одређени број студија се бави овим динамичким моделима уместо моделима који се заснивају на броју грејних и хлађених дана (*HDD – Heating Degree Days*, *CDD – Cooling Degree Days*). Примера ради, *Al Sanea* [133, 134, 135] је користио динамичке моделе засноване на методи коначних запремина (*Finite-volume procedure*), док је *Ozel* [136] користио методе засноване на методи коначних разлика.

Поједини аутори су користили методе комплексних коначних Фуријеових трансформација (*CFFT – Complex Finite Fourier Transformation*) [137, 138, 139]. Развојем *EnergyPlus* – а на Берклију дошло је до употребе овог софтвера, јер у себи он садржи више метода, а између осталог је признат и од *DOE – Department of Energy*, Министарства енергије Сједињених Америчких Држава, као валидан софтвер за вршење динамичких симулација. Овај софтвер се користи у великом броју радова [140, 141, 142, 143, 144].

За симулирање грејања, хлађења, осветљења, вентилације, коришћења и примене воде, и осталих енергетских токова у моделираном окружењу може се користити *EnergyPlus* [145]. *EnergyPlus* узима у обзир све факторе који могу да утичу на топлотно оптерећење у кући, поред стандардних који се подразумевају, и то могу да

буду електрични уређаји, осветљење, соларна радијација, ветар, инфилтрација и засенчење [146].

Појавом и развојем кућа са нето-нултом потрошњом енергије намећу се суштински проблеми, и потребно је развити што ефикасније системе, оптимизовати омотач зграде, али и направити добар математички модел за испитивање свих потенцијалних решења како би се видела оправданост економских инвестиција по важећим стандардима и скратило време потребно за испитивање квалитета изведених зграда. Да би се ово постигло, неопходно је развити квалитетне динамичке моделе који у обзир узимају све факторе који утичу на зграде у реалним условима. Затим је потребно добијене резултате упоредити са реалном ситуацијом и калибрисати модел.

Основни параметри који утичу на термичко понашање зграда, а који су описани помоћу динамичких модела у овом раду су:

- Временске прилике за задату локацију,
- Геометријски опис зграде,
- Термички опис зграде,
- Коришћење уређаја за грејање,
- Коришћење електричних уређаја,
- Начин експлоатације куће,
- Животни циклус куће и уређаја у њој,
- Реконструкција куће ради увећања енергетске ефикасности,
- Примењени омотач куће,
- Уграђена енергија у омотач куће,
- Термичка угодност у просторијама,
- Енергетска анализа
- Утицај изградње и експлоатације куће на животну средину.

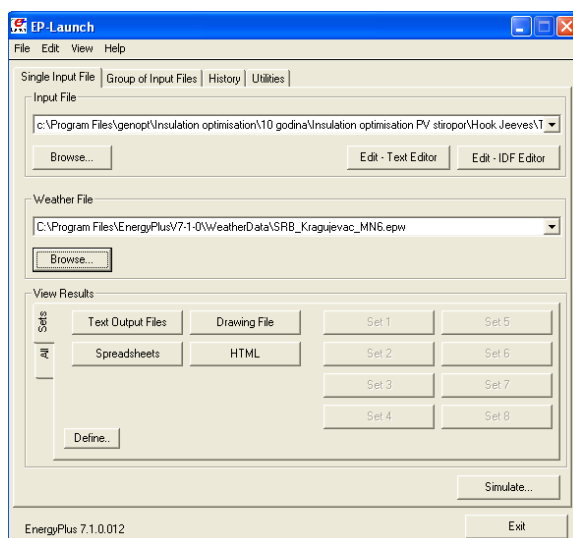
Све ово се врло ефикасно истражује динамичком симулацијом коришћења куће нето-нулте енергетске потрошње. Коришћење адекватних оптимизационих метода омогућава оптималну употребу и пројектовање куће. У оквиру овог истраживања коришћен је софтверски пакет *EnergyPlus*. Да би се кућа лакше нацртала и њена геометрија пренела у *EnergyPlus*, коришћен је *Google SketchUp* са додатком *OpenStudio plugin-a* [147].

5.2. Софтверски пакет *EnergyPlus*

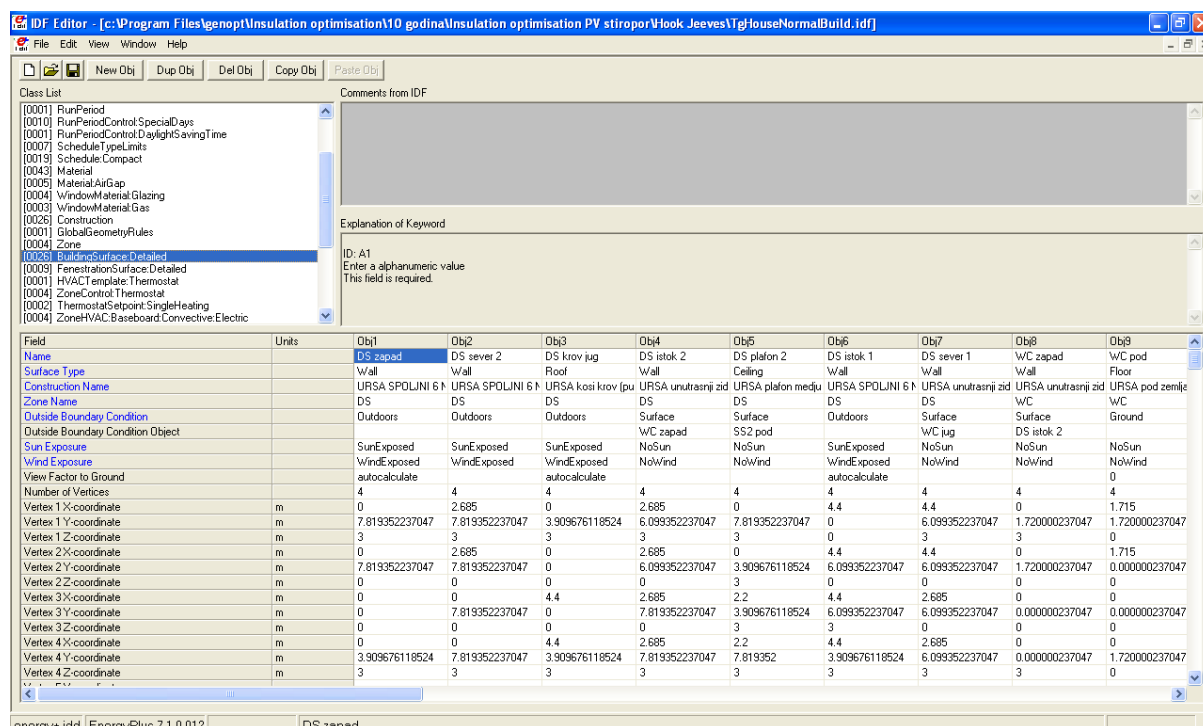
EnergyPlus је софтверски пакет који омогућава извођење динамичких симулација на објектима како би се утврдио целокупни енергетски ток у датом објекту. Користе га сви од инжењера, архитеката до истраживача како би симулирали потрошњу енергије и воде у грађевинама. Помоћу њега је могуће усвојити правилан и оптималан дизајн којим се користи мање енергије и воде. Програм је редовно и често ажуриран, најмање 2-3 пута годишње. Свака верзија се посебно тестира и унапређује. Такође, постоји добра група подршке помоћу које корисници широм света помажу једни другима и дају корисне савете.

EnergyPlus као што је већ речено има могућност да симулира грејање, хлађење, вентилацију и остале енергетске токове, као и коришћење воде. Међутим, код њега се

додатно могу дефинисати и навике станара и њихов начин коришћења и употребе самог објекта. Овај софтвер поседује могућност симулације која даје међурезултате у временским периодима краћим од 1 сата (*timestep*). То значи да корисник може да прати понашање куће на сваких 5 минута, што је изузетно. У оквиру њега се могу поставити и модуларни системи, протоци између различитих зона, термички комфор, природна вентилација, фотонапонски панели, соларни колектори и многе друге иновативне технологије. Једна од великих предности овог програма је и постојање лоцирања места објекта и коришћења метеоролошких фајлова (*weather file*). Помоћу њих се симулира понашање климатских услова на датој локацији и тиме се добијају реални резултати. На слици 5.1. дат је приказ уводног прозора у *EnergyPlus*, док је на слици 5.2 приказан прозор у који се уносе сви битни параметри везани за симулацију у оквиру *EnergyPlus* – а.

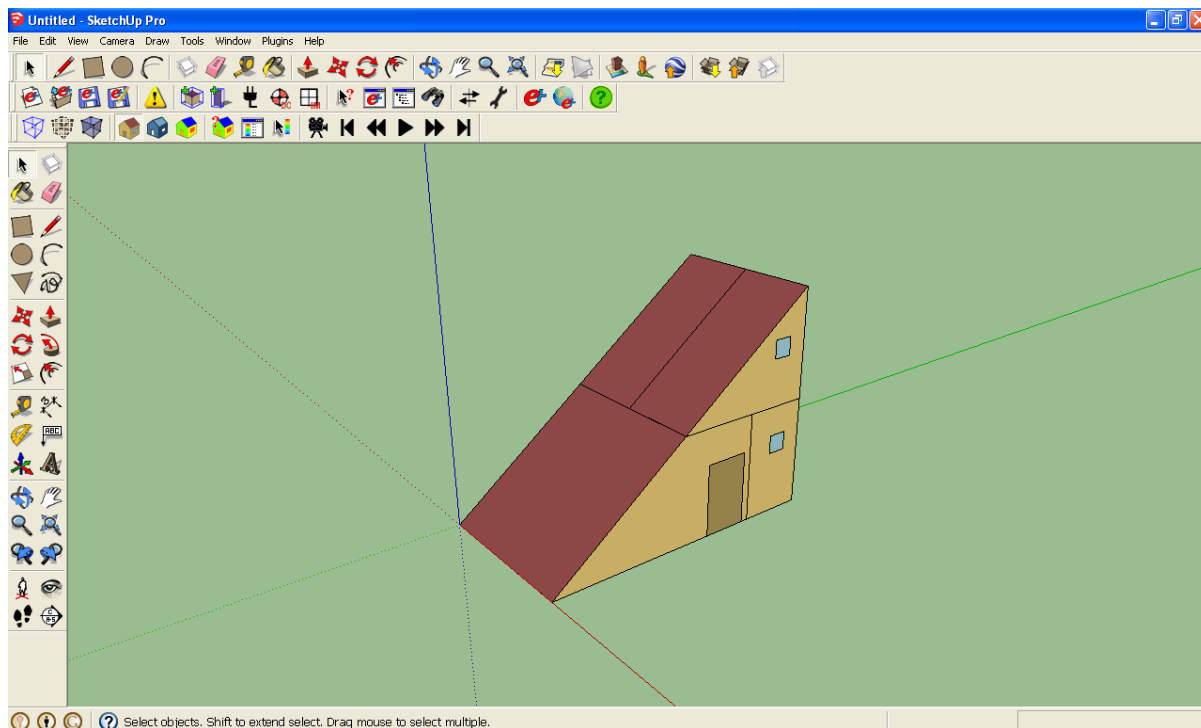


Слика 5.1. Уводни прозор *EnergyPlus*



Слика 5.2. Прозор за унос података у *EnergyPlus*

OpenStudio представља скуп алата који се користе за подршку моделирања енергетског понашања зграда у *EnergyPlus*-у. Његова главна помоћ је у оквиру његове адаптације при уношењу података у *EnergyPlus*. У комбинацији са *Google SketchUp*-ом, у њега се много лакше уноси геометрија, зоне, зидови, прозори и задају се имена која су битна за симулацију. У основи *EnergyPlus* користи координате за геометрију, а *OpenStudio* са *Google SketchUp*-ом омогућава визуелизацију целог објекта. На слици 5.3. је приказан прозор *Google SketchUp* са *OpenStudio* додатком.



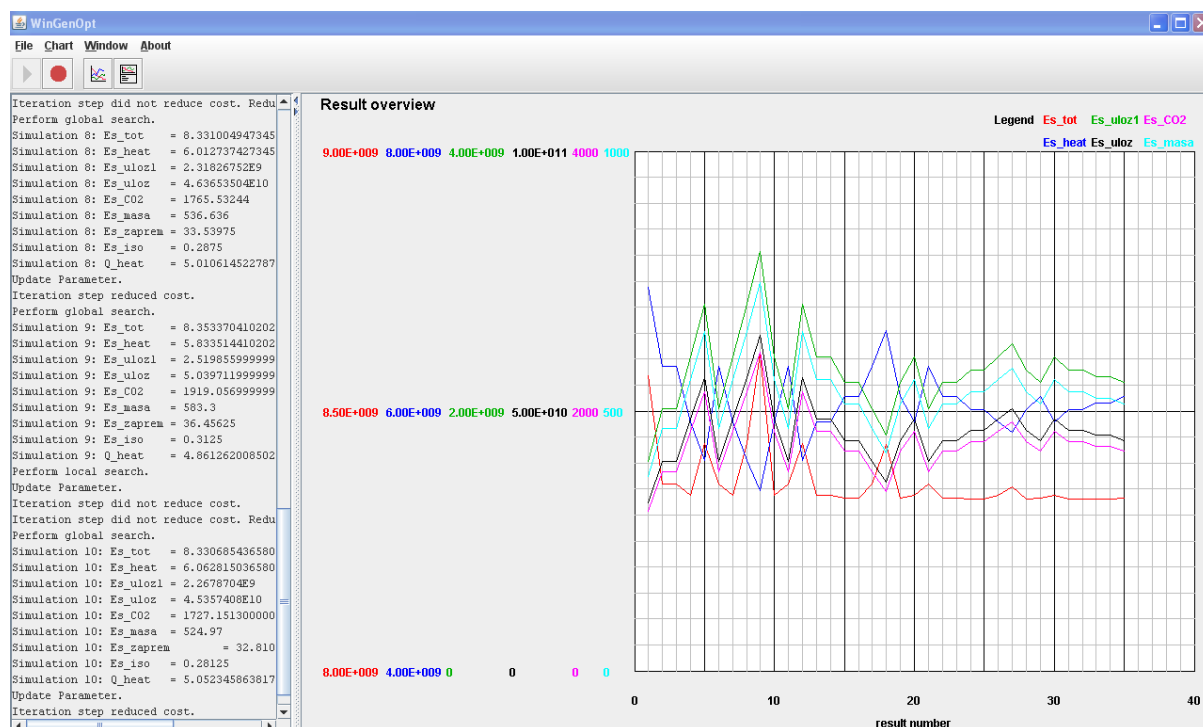
Слика 5.3. Прозор *Google SketchUp* са *OpenStudio* додатком

5.3. Оптимизација при коришћењу динамичких симулација - *GenOpt*

Методи генеричке оптимизације су се појавили као значајна класа метода пружајући инжењерима могућност оптимизације појединачних елемената енергетских инсталација према потреби. Са друге стране, све ово је довело до развоја нових метода оптимизације у оквиру већ постојећих генеричких метода. За потребе компјутерске оптимизације коришћен је софтвер *GenOpt* [148].

GenOpt је оптимизациони код који се користи за минимизацију функције која се рачуна помоћу екстерног симулационог програма, као што су *EnergyPlus*, *TRNSYS*, *SPARK*, *IDA-ICE* или *DOE-2*. Развијен је за оптимизационе проблеме где је цена тражења функције компјутерски скупа. У принципу *GenOpt* се може комбиновати са било којим симулационим програмом који учитава почетне податке из текст фајлова и своје резултате записује у текст фајлове. Независне променљиве могу бити континуалне (по могућности са горњим и доњим границама), дискретне или обе. Ограничења зависних променљивих могу бити задата коришћењем граница, или граничним функцијама.

Да би се вршила оптимизација, *Genopt* аутоматски узима полазне податке за симулациони програм. Он генерише привремене фајлове (*template files*) у којима мења захтеване променљиве и њихове вредности. Оптимизација се врши тако што програм прво провери да случајно не постоји нека грешка, затим чита вредност функције циља која је добијена у управо завршеној симулацији, упоређује са претходним резултатима и на основу тога одлучује у ком правцу ће мењати вредност сваке променљиве. На слици 5.4 је приказано како се цео процес итеративно понавља док се не достигне минимална вредност функције циља. *Genopt* има графички приказ кретања функције циља током симулације.



Слика 5.4. Графички приказ у *Genopt*-у током оптимизације

У оквиру *Genopt* – а су имплементиране различите оптимизационе методе:

- *Generalized Pattern Search* алгоритми (*Hooke-Jeeves* и *Coordinate Search* алгоритми), који се користе са различитим почетним тачкама,
- *Particle Swarm* оптимизациони алгоритми,
- Хибридни глобални алгоритми који користе *Particle Swarm* за глобалну оптимизацију, а *Hooke-Jeeves* за локалну оптимизацију,
- *Discrete Armijo Gradient* алгоритам,
- *Nelder and Mead's Simplex* алгоритам
- *Golden Section and Fibonacci* алгоритам за једнодимензионалну минимизацију.

GenOpt има отворену платформу и интерфејс тако да може да се повеже са доста симулационих програма мењањем конфигурационог фајла. Може се користити у комбинацији са *EnergyPlus*, *TRNSYS*, *SPARK*, *IDA-ICE*, *DOE-2*, или било који другим писаним софтвером. На слици 5.5 приказан је алгоритам рада *Genopt*-а.

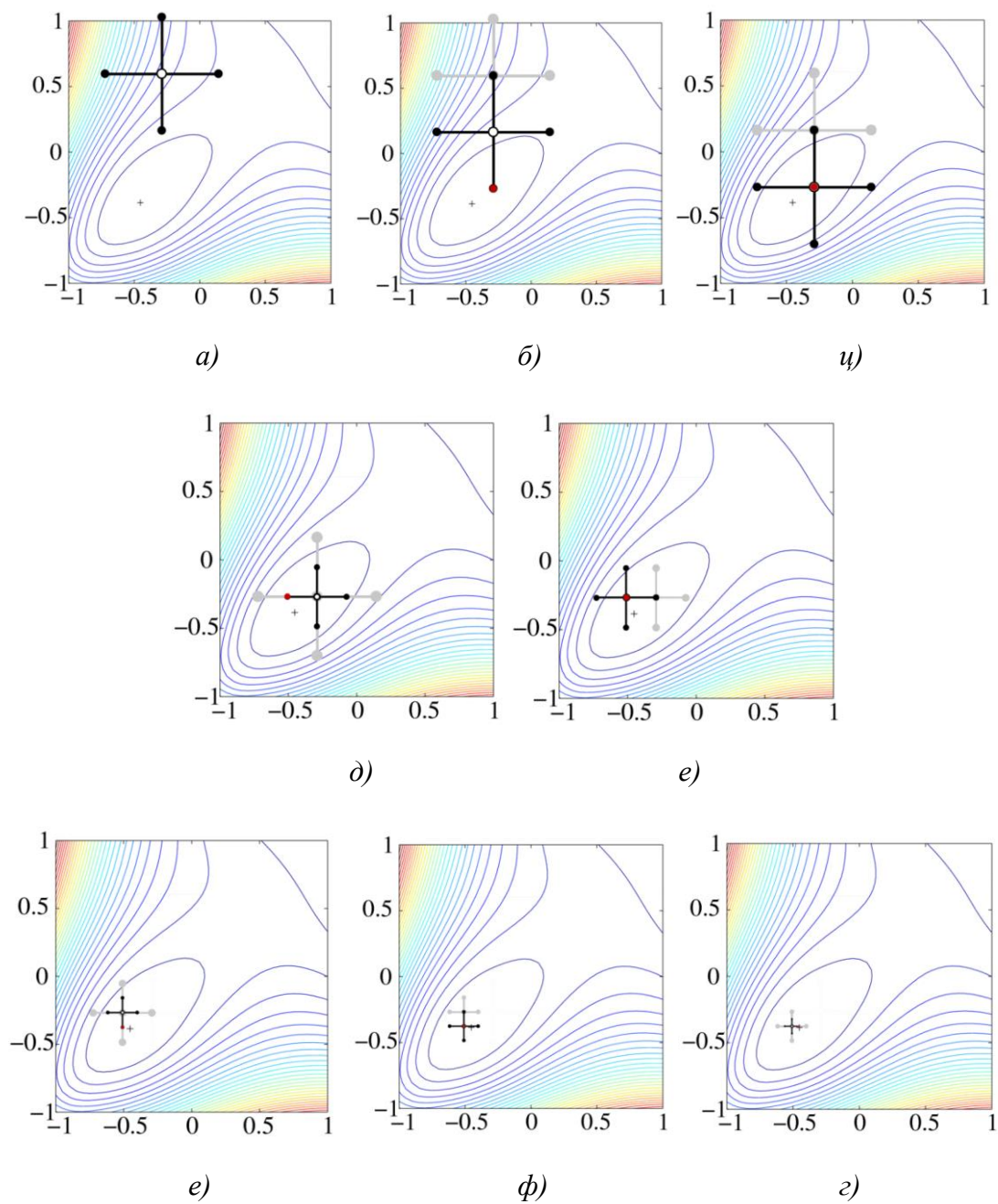


Слика 5.5. Начин повезивања и симулације коришћењем Genopt софтвера

Корисник у оквиру конфигурационог фајла поставља инструкције и задаје које су променљиве. У оквиру њега он задаје и која је функција циља и одакле се узимају вредности резултата током симулације. У другом фајлу се дефинишу границе у којима се налази променљива као и оптимизациони параметри. У оквиру привременог фајла се у самог екстерном фајлу мењају променљиве и користе за симулације. Ово значи да се *Genopt* може повезати са било којим екстерним програмом који своје улазне и излазне податке пише у текстуалном фајлу.

5.4. Hooke-Jeeves оптимизациона метода

Hooke-Jeeves метода се заснива на претрази минимума померањем променљиве за исте вредности у свим правцима и одређивањем у ком правцу се у следећем кораку врши оптимизација [149]. Када се достигне минимум, редукује се корак за који се мења променљива. Тиме се постиже финија претрага све док се не достигне жељена прецизност. Овакве методе се још називају и методе директне претраге или методе црне кутије. Код ове методе, код промене корака он се сваки пут смањује на једну половину од претходне вредности. На слици 5.6. је дат пример претраге при коришћењу ове методе.



Слика 5.6. Пример претраге Нооке-Јевес методом

6. Обрада анкетних података ради дефинисања начина коришћења ниских кућа у Крагујевцу

6.1. Примена анкета у енергетско ефикасне сврхе у свету

Да би се технологија нето-нултих енергетских кућа уопште могла применити и оптимално пројектовати, нужно је неопходно познавати навике становништва у подручју за које се кућа пројектује. За анализу понашања и навика просечне породице најмеродавнија је анкета коју би попуњавали корисници енергије. Тако су за анализу потреба за енергијом рађене различите студије понашања конзумента енергије [150, 151, 152].

Због постојања свести о заштити животне средине, као и због донетих законских аката којима се промовише градња кућа са нето-нултом енергетском потрошњом, у свету је већ изграђен велики број оваквих кућа. У анкетама везаним за енергетску ефикасност у свету су испитиване различите врсте грађевина, као што су болнице, администрационе зграде, школе, универзитети, пословне зграде, хотели, департмани и стамбене куће и зграде. У Кини, Непалу и Шкотској су изучавана енергетски ефикасна унапређења на централном грејању у болницама, администрационим зградама, школама и универзитетима [150, 151]. За пословне зграде у тропским зонама, анкетни упитник је открио потенцијал за одрживо унапређење енергетске ефикасности зграде [151].

Према овим упитницима, испитивани су људи различитих интересовања, као што су студенти архитектуре, архитекте, *LEED* акредитовано особље, менаџери хотела, супервизори департмана, власници кућа различитих висина и врста. *Ali* и остали [152] су направили и разделили анкету менаџерима хотела и супервизорима департмана како би схватили перформансе окружења у сектору туристичког смештаја у Јордану. Телефонска анкета у Енглеској и Велсу је истраживала интересе поправљања и рестаурирања кућа у односу на бригу власника о климатским променама и расподели одговорности за акције на побољшању старих кућа [153]. *Wang* и остали [154] су помоћу анкете испитивали потрошњу енергије и управљање енергетском ефикасношћу нових руралних стамбених зграда у Хангжоу, Кина, као и упознатост са енергетском ефикасношћу и жељом да је примене. *Watts* и остали [155] су процењивали приоритете енергетске ефикасности, упознатост са енергетском ефикасношћу и енергетским пасошима, као и препознавање потенцијала енергетске ефикасности код купаца ниских стамбених зграда. При анкетирању студената архитектуре испитивала се њихова упознатост и свест о технологијама енергетске ефикасности које се примењују на грађевинама [156]. Анонимна интернет анкета *LEED* акредитованог особља је открила њихову свесност и поверење у истраживачки рад на пољу конструкције „зелених“ зграда [157]. *Seitz* и остали [158] су анкетирали кориснике како би пронашли најбоље параметре и технологије за климатизацију кућа. *Ma* и остали [159] су истраживали став станара према енергетски ефикасним кућним уређајима.

6.2. Примена анкете за развој нето-нулте куће у Србији

Да би уопште ушло у истраживања и развој куће са нето-нултом енергетском потрошњом у Србији и да би се кренуло у оптимизацију великог броја посебних технологија, неопходно је познавати навике корисника у Србији. Најбољи и најтачнији начин добијања ових информација је спровођење анонимних, али поузданих анкета. На основу поузданих података из анкете сазнаје се који су то уређаји које користи просечно домаћинство и који су начини њиховог коришћења.

У оквиру ових анкета неопходно је сазнати навике потрошача енергије. При пројектовању нето-нултих енергетских кућа није довољно узети у обзир навике еколошки свесних потрошача, већ је неопходно кућу пројектовати за просечног потрошача.

За озбиљну анализу потрошње енергије у просечној кући у Србији је неопходно знати више параметара. Полазни параметри су свакако локација објекта, старост објекта, површина објекта, као и појединих просторија. Главни податак који се тражио у анкети је била потрошња појединих енергената, како на месечном тако и на годишњем нивоу.

Да би се анализирали ови подаци било је неопходно упарити их са мноштвом других података. Материјали који су се користили за изградњу објекта, изолованост објекта, као и окружење објекта значајно утичу на крајњу потрошњу енергије у објекту. Наравно и неки субјективни подаци, као што је осећај комфора, утичу на ову потрошњу. Навике коришћења појединих уређаја, осветљења и топле воде одређују потрошњу енергената. Такође је било интересантно шта једна просечна породица поседује од електричних уређаја и колико је њихово искоришћење у току дана.

У ситуацији када се прави анкета, која већ садржи велики број информација, било је неопходно направити анализу колико је једна просечна породица свесна неопходности штедње енергије и колико је спремна на одређене жртве зарад екологије.

Због лакше анализе резултата већина питања, изузев оних која су захтевала експлицитну информацију (углавном она која су за одговор имала бројчану вредност), имала је унапред дефинисане одговоре.

Овако припремљена анкета садржи преко 300 питања и на свако питање у просеку од четири до шест одговора. У појединим питањима постоји могућност само једног изабраног одговора, док у другим питањима постоји могућност избора више одговора истовремено.

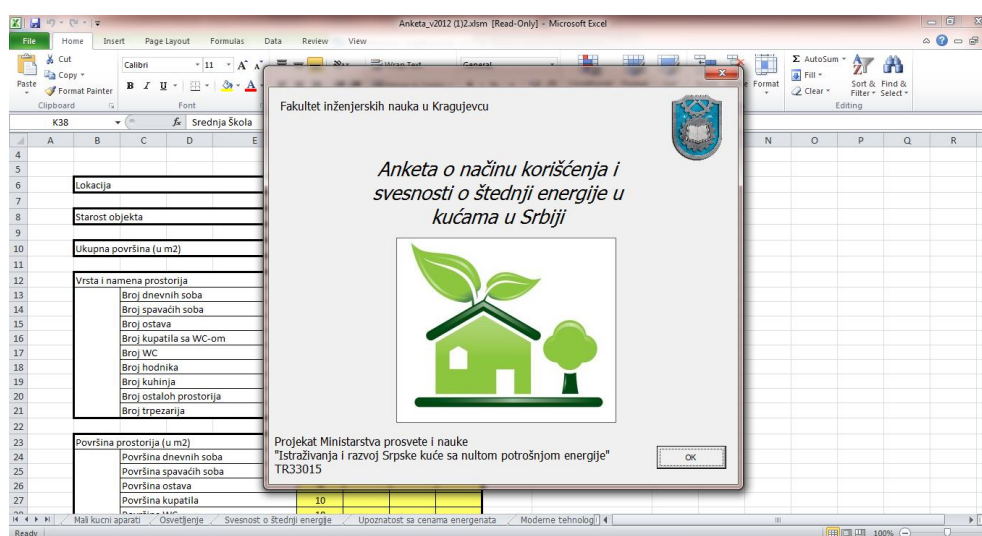
Суштина ове анкете је софтвер, који је верификован и као техничко решење [160], којим је требало олакшати спровођење и припрему података добијених из анкете за даљу обраду у специјализованом статистичком софтверу. Олакшање се односи како на спровођење анкете, коју су испитаници добијали заједно са упутством за попуњавање у електронском облику, преко *user-friendly* начина попуњавања анкете, у виду форме са лаким избором, прегледа попуњених података и анализе њихове веродостојности, тако и до обједињавања прикупљених података у заједничку базу прилагођену за унос у софтвер за статистичку обраду података. Ручни унос података

би био дуготрајан и с обзиром на количину података постојала би велика могућност грешке.

Првим анкетирањем обухваћено је преко 200 домаћинстава, па је овакав начин уноса и анализе података донео знатну уштеду у времену. У оквиру другог и трећег анкетирања је урађено још око 150 анкета. Права уштеда у времену добијаће се и у наредним анкетирањима. Од њих је урађена селекција и изабрано је 248 као релевантно.

6.3. Детаљан опис анкете

Софтвер за подршку развоју куће нето-нулте енергетске потрошње је написан у програмском језику *VBA* и интегрисан је у програму *Microsoft Excel*, и „пријатељски“ је оријентисан према кориснику [160]. Почетни екран је приказан на слици 6.1.

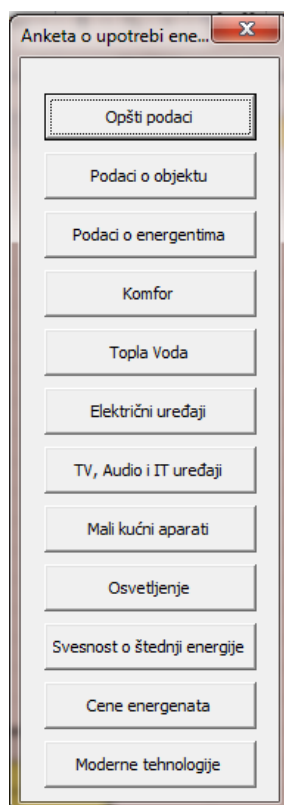


Слика 6.1. Изглед корисничког интерфејса

Развијени софтвер садржи дванаест целина које су обједињене у једну анкету. Све приказане целине су део техничког решења ТР-63/2012 [160].

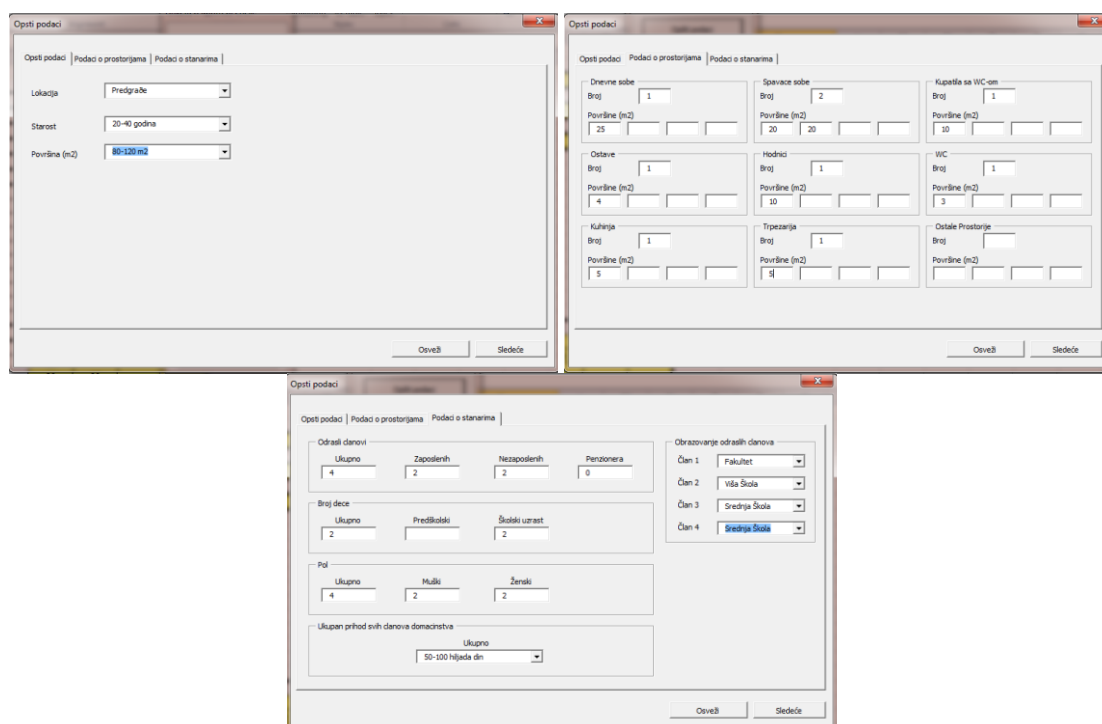
- Општи подаци
- Подаци о објекту
- Подаци о енергентима
- Комфор и коришћење објекта
- Топла вода
- Електрични уређаји
- ТВ, аудио и ИТ уређаји
- Мали кућни апарати
- Осветљење
- Свесност о уштеди енергије
- Цене енергената
- Модерне технологије

На почетку се отвара прозор који води ка осталим целинама. На слици 6.2 је приказан изглед тог прозора.



Слика 6.2. Приказ прозора са анкетним целинама

У целини „Општи подаци“, приказаној на слици 6.3, прикупљају се основни подаци о објекту, површини и локацији објекта. Ти подаци се између осталог односе на старост, локацију и укупну површину објекта. Испитивани су и број и површине одређених врста просторија, као и број станара, њихово образовање, старост и пол. Једно од битних питања се односило и на укупне приходе домаћинства.



Слика 6.3. Приказ дела „Општи подаци“

У целини „Подаци о објекту“, приказаној на слици 6.4, се прикупљају подаци о спратности објекта, материјалима који су коришћени за израду и изолацији. Питања су се такође односила и на то да ли је објекат потпуно или делимично завршен. Важно питање са аспекта енергетске ефикасности се односило на врсту прозора и оријентацију истих. У овом делу се такође испитивала оријентација објекта, јер она доста утиче на енергетску ефикасност, као и то да ли је објекат окружен другим објектима или не.

Слика 6.4. Приказ дела „Подаци о објекту“

У целини „Подаци о енергентима“, приказаној на слици 6.5, прикупљају се подаци о врстама енергената кој се користе, количини потрошених енергената на годишњем нивоу, количини потрошене електричне енергије и гаса на месечном нивоу, као и начину коришћења тих енергената.

Слика 6.5. Приказ дела „Подаци о енергентима“

У целини „Комфор и коришћење објекта“, приказаној на слици 6.6, прикупљају се подаци о субјективном осећају комфора у појединим просторијама, као и томе коју температуру просторије ти комфор захтевају. Овде се прикупљају и подаци о коришћењу клима уређаја и начину њихове употребе, као и коришћењу објекта, како током дана, тако и током недеље и године.

Слика 6.6. Приказ дела „Комфор и коришћење објекта“

У целинама „Топла вода“, „Електрични уређаји“, „ТВ, аудио и ИТ уређаји“ и „Мали кућни апарати“ приказаним на слици 6.7, прикупљају се подаци о томе које уређаје поседује просечна породица, њиховој старости као и начину њиховог коришћења у току дана. У оквиру одељка „Топла вода“ испитивало се колико се често користи бојлер, која је врста и величина бојлера, као и колика је његова старост. Уједно се испитивало да ли се бојлер користи само у јефтиној или и у скупљој тарифи, јер се стандардни бојлери греју углавном у вечерњим часовима ради уштеде новца. У оквиру електричних уређаја се испитивало који су најкоришћенији електрични уређаји и њихови остали подаци, као што су на пример шпорет, расхладна техника, машина за прање и микроталасна пећница. У ТВ, аудио и ИТ уређајима је испитано колико телевизора и које врсте телевизора поседује породица, који су аудио уређаји, као и који рачунари, лаптопови и штампачи се користе у датом домаћинству. Од малих кућних апарата је испитано коришћење усисивача, фена за косу, миксера, пегли, тостера и соковника.

The image shows four overlapping software windows from a data collection tool.

1. **Topla Voda**: Water heating settings. Includes fields for boiler type (Electric - standard), number of boilers (1), capacity (30-75 liters), and usage frequency (8 baths/week, 18 showers/week).

2. **Elektricni uređaji u kući**: Household electrical appliances. Includes categories like refrigerator, washing machine, and microwave. Fields for energy class (A+), age (Do 5 godina), and usage frequency (e.g., 20 minutes in the morning).

3. **TV, Audio, Video i IT**: TV and audio equipment. Fields for number of TVs, type (LED, LCD, Plasma, CRT), brand (Samsung, Panasonic), and usage frequency.

4. **Mali kućni aparati**: Small household appliances. Fields for usage frequency of items like vacuum cleaners, iron, mixer, toaster, and coffee maker.

Слика 6.7. Приказ дела „Топла вода“, „Електрични уређаји у кући“, „ТВ, аудио и ИТ“ и „Мали кућни апарати“

У целини „Осветљење“, приказаној на слици 6.8, прикупљају се подаци о сијалицама које се користе у просторијама, њиховој количини и снази, као и о навикама и дужини коришћења осветљења у току дана.

The 'Osvetljenje' window is organized into several room-based sections:

- **Dnevna soba**: 3 energy-saving bulbs, power less than 20W, used 5-8 hours.

- **Spavaca soba**: 2 energy-saving bulbs, power more than 20W, used up to 2 hours.

- **Kuhinja**: 3 classic bulbs, power 60-100W, used 2-5 hours.

- **Kupatilo**: 1 classic bulb, power up to 60W, used 2-5 hours.

- **Hodnik**: 3 classic bulbs, power up to 60W, used 2-5 hours.

Слика 6.8. Приказ дела „Осветљење“

У целини „Свесност о значају штедње енергије“, приказаној на слици 6.9, прикупљани су подаци о нивоу свесности испитаника и неопходности штедње енергије. Овде су такође прикупљани подаци о томе шта испитаници директно спроводе по питању штедње енергије у њиховом дому.

Svesnost o štednji energije

Da li se vodilo računa o štednji energije pri izradi kuće? Ne

Da li se sada vodi računa o štednji energije? Da

Koliko ste upoznati sa načinima štednje energije? Malo sam upoznat

Koji su razlozi za štednju energije? Ekonomski razlozi i briga o životnoj sri

Da li znate koji je odnos cena skupa/jeftina tarifa struje? 4:1

Da li ste upoznati kada počinje jeftina tarifa? Da

Da li pokušavate da potrošnju struje držite u određenim platnim zonama (zelena, plava i crvena)? Da

Da li ste upoznati sa cenama energenata koje koristite? Delimicno sam upoznat

Da li ste upoznati sa cenama energenata koje ne koristite? Nisam upoznat

Koji je dominantan nacin na koju stedite energiju?

- Racionalnim korišćenjem električnih i drugih uređaja pri upotrebi
- Primenom štedljivih sijalica
- Efikasnim električnim uređajima
- Primenom toplotne izolacije omotača kuće (zidovi i prozori)

Osveži Sledeće

Слика 6.9. Приказ дела „Свесност о штедњи енергије“

У целини „Цене енергената“, приказаној на слици 6.10, проверавала се упознатост испитаника са ценама енергената које користе, и испитивало се и да ли испитаници знају тарифе електричне струје.

Upoznatost sa cenama energenata

Cene uglja

| Vrsta | Cena (din/t) |
|--|--------------|
| Kameni - (Resovica, Ruski, Breza, Djurdjevik) | |
| Mrki - (Kreka, Banovici, Stivalj, Pljevlja) | |
| Drveni, lignit - (Vreoci, Kolubara, Kostolac, Kovin) | |

Cene drveta

| Vrsta | Cena (din/m3) |
|------------|---------------|
| Cer, hrast | |
| Bukva | |
| Bagrem | |

Cene gasa

Cena (din/m3)

Cena elektricne energije

Jednotarifno brojlo

Cena (din/kWh)

Dvotarifno brojlo (din/kWh)

| Zona | Jeftina | Skupa |
|--------|---------|-------|
| Zelena | | |
| Plava | | |
| Crvena | | |

Osveži Sledeće

Слика 6.10. Приказ дела „Упознатост са ценама енергената“

У целини „Модерне технологије“, приказаној на слици 6.11, прикупљени су подаци о познавању и заинтересованости испитаника за модерне технологије.

Слика 6.11. Приказ дела „Модерне технологије“

Када испитаник попуни анкету, коришћени макро, програмски код написан у оквиру *Excel* фајла, сам попуни поља у анкети на основу датих одговора. На слици 6.12 је приказан изглед једног листа у *Excel* фајлу.

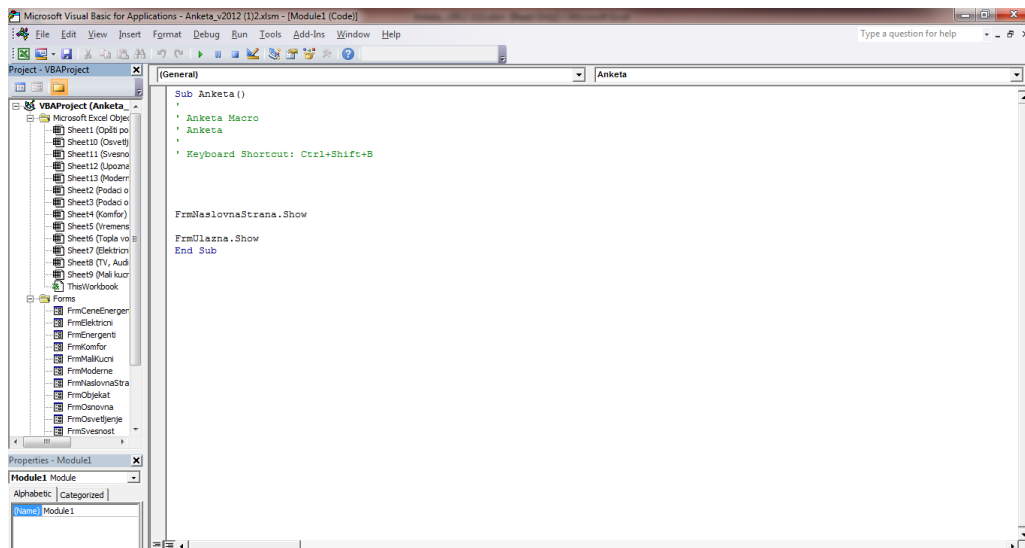
| | | | | |
|---|-----------------------|----|---|---|
| Lokacija | Predgrađe | | | |
| Starost objekta | 20-40 godina | | | |
| Ukupna površina (u m ²) | 80-120 m ² | | | |
| Vrsta i namena prostorija | | | | |
| Broj dnevnih soba | 1 | | | |
| Broj spavaćih soba | 2 | | | |
| Broj ostava | 1 | | | |
| Broj kupatila sa 'WC-om | 1 | | | |
| Broj 'WC | 1 | | | |
| Broj hodnika | 1 | | | |
| Broj kuhinja | 1 | | | |
| Broj ostalih prostorija | | | | |
| Broj trpezarija | 1 | | | |
| Površina prostorija (u m ²) | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Površina dnevnih soba | 25 | | | |
| Površina spavaćih soba | 20 | 20 | | |
| Površina ostava | 4 | | | |
| Površina kupatila | 10 | | | |
| Površina 'WC | 10 | | | |
| Površina hodnika | 8 | | | |
| Površina kuhinje | 15 | | | |
| Površina ostalih prostorija | | | | |
| Broj trpezarija | 5 | | | |

Слика 6.12. Изглед листа у *Excel* фајлу

6.4. Код анкете

Сам код анкете је писан у *VBA* програмском језику. Код поседује преко 3200 линија и има 13 *Windows* форми, од којих свака има бар по још један лист на себи. Такође битно је поменути да је вођено рачуна о томе да поједини одговори иду заједно,

док се поједини поништавају међусобно, па су због тога постављани *option button*-и и *check box*-ови. Прављени су падајући менији како би се лакше уносили одговори за унапред дефинисане одговоре. На слици 6.13 је приказан изглед VBA прозора. На слици 6.14 је дат део кода који податке из анкете, везане за упознатост са ценама енергената, преноси у предвиђена поља у *Excel* табели.



Слика 6.13. Изглед VBA прозора

```
Private Sub CommandButton1_Click()
Excel.Sheets("Upoznatost sa cenama energenata").Select

'Cene uglja
'Range("D7").Select
'ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(UgaljVrs1Txt.Text)
Range("F7").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(UgaljVrs1CenaTxt.Text)
'Range("D8").Select
'ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(UgaljVrs2Txt.Text)
Range("F8").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(UgaljVrs2CenaTxt.Text)
'Range("D9").Select
'ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(UgaljVrs3Txt.Text)
Range("F9").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(UgaljVrs3CenaTxt.Text)

'Cene drveta
'Range("D12").Select
'ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(DrvVrs1Txt.Text)
Range("F12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(DrvVrs1CenaTxt.Text)
'Range("D13").Select
'ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(DrvVrs2Txt.Text)
Range("F13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(DrvVrs2CenaTxt.Text)
'Range("D14").Select
'ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(DrvVrs3Txt.Text)
Range("F14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(DrvVrs3CenaTxt.Text)

'Cene drveta
Range("F17").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = CStr(GasVrs1CenaTxt.Text)
```

Слика 6.14. Део VBA кода

6.5. Резултати анкете

Анкету су попуњавали студенти у Крагујевцу који живе у ниским кућама како би се добили жељени резултати потребни за моделирање правог стања при коришћењу нето-нулте енергетске куће.

Са 180252 становника (по попису из 2002. године) град је, по величини, највећи у Шумадији, а четврти у Републици Србији. Територију града чине 57 насељених места са 78 месних заједница. На градском подручју живи 147.473 становника, а на сеоском 32.779 [161].

У структури становника женско становништво чини 51%, а мушко 49%, док радно способно становништво у укупном становништву учествује са 65.2% што је повољније од учешћа радно способног становништва у укупном становништву у Републици Србији (60.6%). Старосна структура становништва је повољнија од исте структуре на нивоу Републике Србије.

У образовној структури становништва највеће учешће има становништво са завршеном средњом стручном спремом (47.7%) и становништво које има завршено основно образовање (22.0%), док становништво са завршеним вишим образовањем учествује са 5.0%, а са високим образовањем 7.0%. У укупном броју становника неписмено становништво (3.360) учествује са 2.3%.

У овој дисертацији ће бити приказани само неки резултати и закључци добијени анкетањем који су интересантни за ово истраживање.

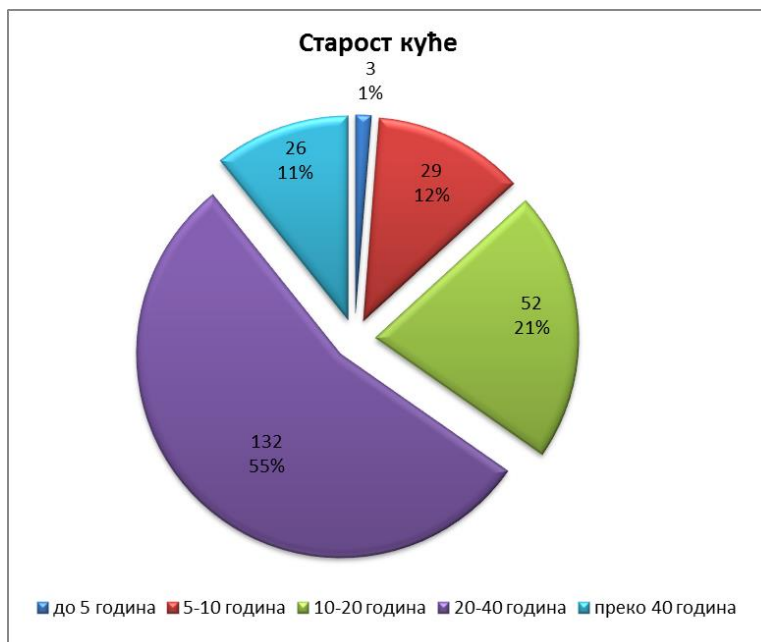
6.5.1. Основи подаци о анкетираним кућама

Према подацима добијеним анкетањем може се приметити да се већина анкетираних кућа налази у ужем градском језгру и предграђу (укупно 76%), док се најмањи број њих налази на селу (24%). То иначе може да се представи и као заштићеност куће од удара ветра, јер су куће у ужем градском језгру и предграђу грађене близу једна другој, док то на селу није случај. На слици 6.15 су приказани детаљни подаци о локацијама кућа испитаника.



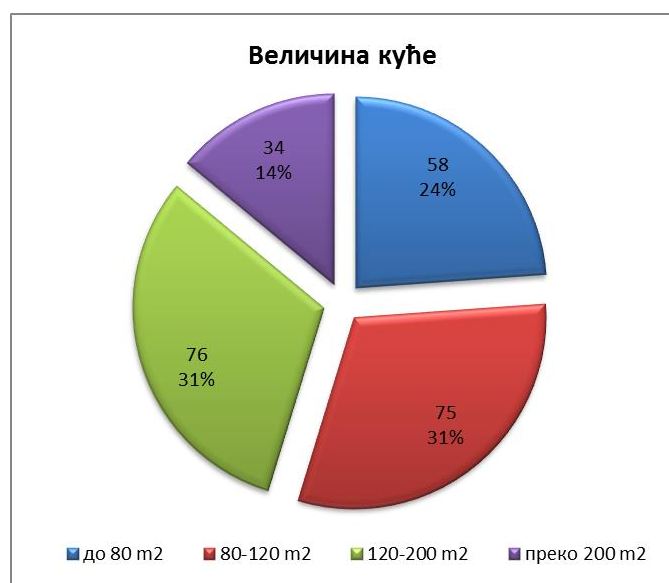
Слика 6.15. Локација куће испитаника у анкети

Што се тиче старости кућа, приметно је да највећи број кућа старости између 20 и 40 година, што је случај код 55% од укупног броја испитаника. То је између осталог проузроковано и финансијском ситуацијом у земљи у последњих 20 година. Није занемарљив и број кућа старих од 5 до 10 година (21%). Ово значи да куће углавном прате старије стандарде за изолацију, као и појава већих процепа услед старости кућа. На слици 6.16 су приказани детаљни подаци о старости кућа испитаника.



Слика 6.16. Старост куће испитаника у анкети

Куће су углавном правилно распоређене и куће до 80m² представљају 24% укупног броја анкетираних, 80-120m² представљају 31% укупног броја анкетираних, куће од 120-200m² представљају 31% укупног броја анкетираних, а најмањи број кућа је преко 200m² са 14% од укупног броја анкетираних кућа. Превелике куће могу водити ка нерационалној потрошњи енергије. Графички приказ ових резултата је дат на слици 6.17.



Слика 6.17. Величина куће испитаника у анкети

На слици 6.18 је приказано да је највећи број кућа у Крагујевцу или приземног карактера или са једним спратом. Заједно оне чине чак 76% испитаних кућа. Највише је кућа приземног карактера. Ако се овај податак упореди са податком о величини кућа, може се закључити да куће имају веће основе.



Слика 6.18. Спратност куће испитаника у анкети

6.5.2. Подаци о станарима анкетираних кућа

Као један од битних фактора везаних за потрошњу енергије код кућа, мора се у обзир узети и понашање станара кућа. Један од циљева ове дисертације је да при стварању динамичког модела куће, као једног од параметара симулације, опише и понашање станара.

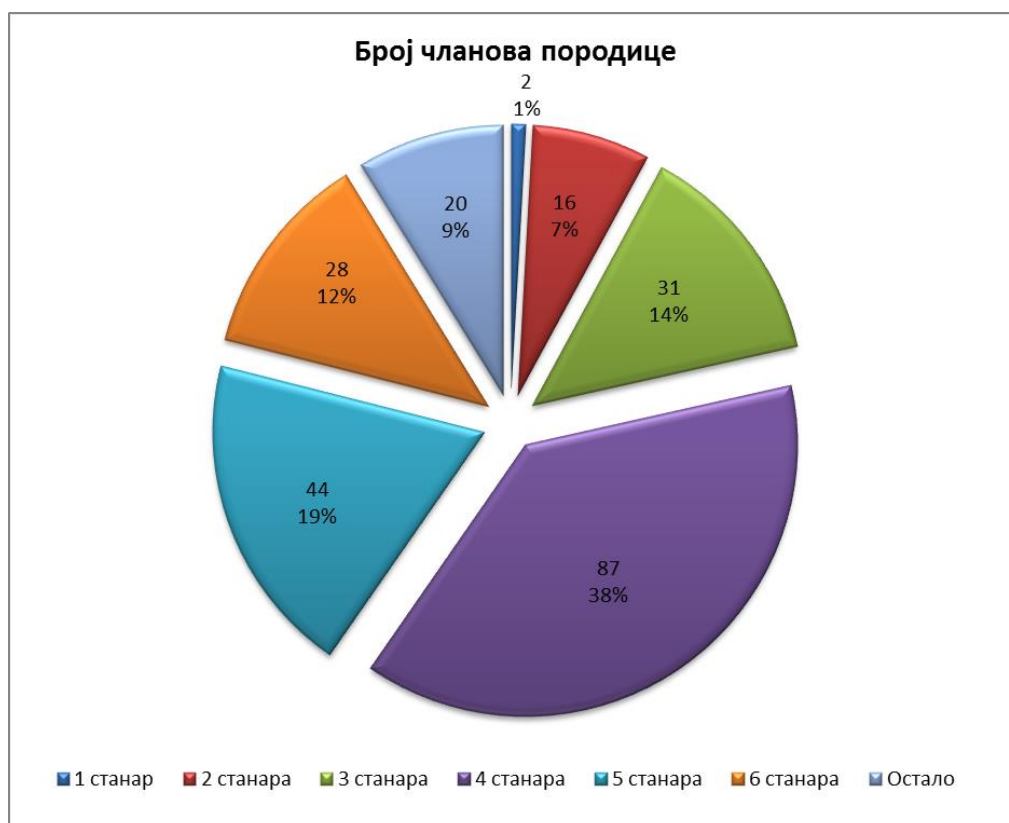
Просечна примања утичу на рационалност и на могућност набављања модернијих уређаја који су енергетски ефикасни, као и на вољу и могућност власника кућа да инвестирају у модерне технологије, као што су фотонапонски панели или соларни колектори, који би донели додатну уштеду власнику, али тек после одређеног периода. Један од одлучујућих фактора је и свесност о штедњи енергије, као и обавештеност самих потрошача о начинима штедње енергије, као и о модерним технологијама.

Просечна примања у Србији су у периоду од 2010 – 2014. године износила око 40 000 – 45 000 динара по запосленом. Мора се узети у обзир да је минимална плата била око 22 000 динара у том периоду. Према подацима анкетираних власника кућа просечна породична примања свих чланова породице су најчешће била до 50 000 динара (41% испитаника), док су примања између 50 000 и 100 000 имала 85 испитаника (34%). Око 14% испитаника је изјавило да су им породична примања преко 100 000 динара. Око 11% испитаника није желело да каже колика су им породична примања, што је донекле и разумљиво, јер је то осетљиво питање. Ови подаци су приказани на слици 6.19.



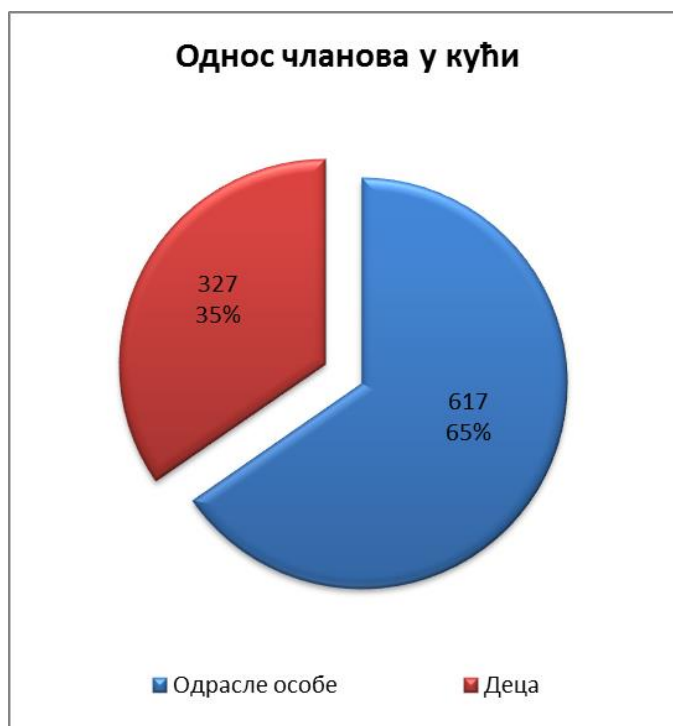
Слика 6.19. Породична примања испитаника у анкети

Број чланова породице је веома важан, јер значајно утиче на енергетске потребе куће. Анкета је показала да породице најчешће имају четири станара (38%), док породице са три, четири или пет чланова представљају укупно 71% испитаника. У овим случајевима, најчешће су то породице које имају две одрасле особе, једно до двоје деце и једну старију особу, која је у пензији. Анкетни подаци о броју чланова породице дати су на слици 6.20.



Слика 6.20. Број чланова породице испитаника у анкети

Ако би се претходни подаци укрстили са односом чланова у кући, види се да одрасле особе представљају 65% узорка, док су деца 35% истог. Један део одраслих особа је студентског узраста, али себе не сматра дететом јер има свој извор прихода. На слици 6.21 је дат графички приказ односа старости станара куће.



Слика 6.21. Однос старости чланова у кући испитаника у анкети

6.5.3. Подаци о материјалима и термоизолацији куће

Већина модерних регулатива и правилника се заснива на коефицијенту пролаза топлоте и специфичној потрошњи по m^2 . Метода која даје најбоље резултате је правилан избор и примена термоизолације.

Анкетом су добијени поражавајући резултати да је чак 55% испитаних кућа без термоизолације, што је приказано на слици 6.22. Као што је већ поменуто пресудан фактор игра економска ситуација задњих година. Око 44% испитаних кућа користи стиропор, а стаклену вуну 2%. Око 4% испитаника је изјавило да користи други вид изолације.

Стиропор је очигледно однео превагу у претходном периоду као најзаступљенији и финансијски у том тренутку најприступачнији материјал за термоизолацију. Уједно су и мајстори са ових простора у претходном периоду били специјализовани за уградњу овог материјала. Стиропор такође пружа лак избор жељене дебљине термоизолационог слоја, који се може стављати како споља тако и унутар просторија.

Оправдано је рећи да у овом случају, са аспекта енергетске ефикасности власници кућа губе доста енергије, што се огледа у ефекту повећања ефекта стаклене баште на глобалном нивоу, као и новца услед плаћања веће количине енергије од оне

коју би трошили да имају термоизолацију. Почетне инвестиције изискују одређену количину новца, али је период повраћаја новца прихватљив са економске стране.



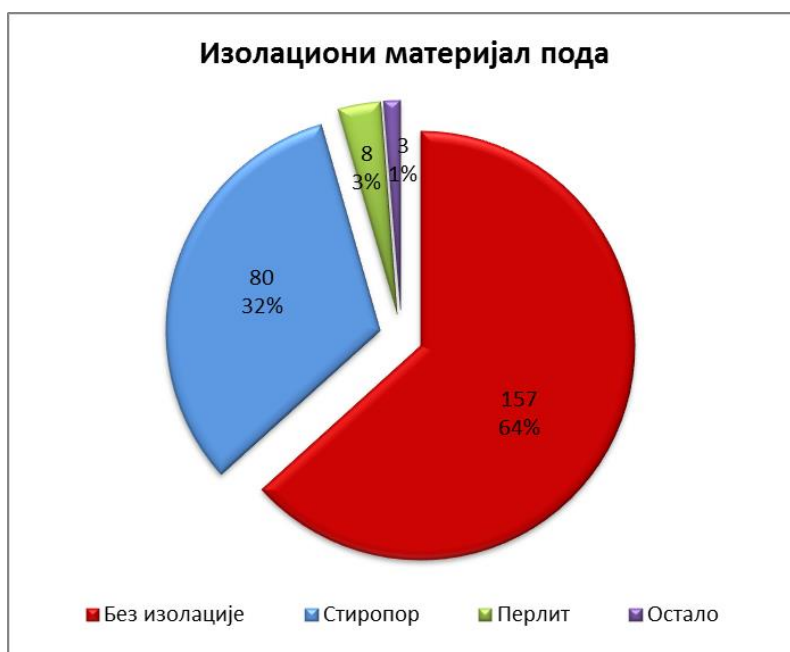
Слика 6.22. *Изолациони материјал зидова кућа испитаника у анкети*

На слици 6.23 су приказани подаци о изолацији плафона, који дају још лошије резултате у односу на податке о изолацији зидова. Највећи број кућа је без изолације плафона, чак 60%. Стиропор је заступљен са 24%, док је стаклена вуна заступљена са 12%. Остали материјали чине око 4%. Проблем са накнадном термоизолацијом плафона је што је донекле тежа у односу на накнадну термоизолацију зидова.



Слика 6.23. *Изолациони материјал плафона кућа испитаника у анкети*

Подови су тако слабо изоловани и чак 64% подова није изоловано. Остатак одлази на изолацију стиропором, перлитом и другим материјалима. Детаљнији подаци о избору материјала за изолацију пода код испитаника су приказани на слици 6.24.



Слика 6.24. *Изолациони материјал пода кућа испитаника у анкети*

Основни материјал зида су у највећем броју случајева били шупљи глинени блокови са 38% заступљености, затим пуна опека са 32% заступљености и бетонски блокови са 21% заступљености. Сипорекс блокови и остали материјал представљају укупно 9% примењених основних материјала. Детаљни подаци о избору основног материјала зидова кућа испитаника су дати на слици 6.25.



Слика 6.25. *Основни материјал зидова кућа испитаника у анкети*

На слици 6.26 је приказано да се као основни материјал плоче користи армирани бетон и њега је користило 147 од 248 испитаника. То значи да се око 59% укупног узорка одлучило за ово решење. Око 23% испитаника је користило монту док је 18% користило друге материјале. Овакви резултати нису изненађујући, јер је при градњи у Србији иначе највише прихваћена основа са армираним бетоном.



Слика 6.26. Основни материјал плоче кућа испитаника у анкети

На слици 6.27 је приказано да се за под дневне собе добар део испитаника определио за паркет, бродски под или патос, њих 56%. Око 34% има ламинат, док 5% има бетон као најлошије решење са становишта енергетске ефикасности и 5% има неко друго решење. Ово је вероватно повезано са старашћу куће, јер је приметно да при прегледу резултата анкете и укрштања података новије куће имају ламинат као јефтиније решење, а старије куће имају паркет, бродски под или патос као најприхватљивије решење пре 20 година.



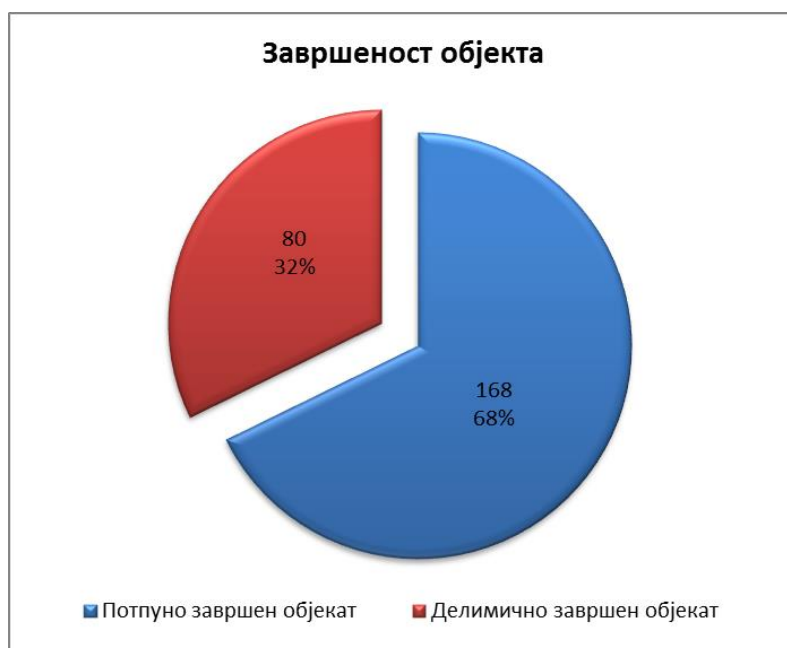
Слика 6.27. Под дневних соба кућа испитаника у анкети

На слици 6.28 је приказано да је стање слично код подова спаваћих соба као и код подова дневних соба. Највећи број подова спаваћих соба је урађен као паркет, бродски под или патос и представља око 51%. Следе ламинат са 39%, и бетон са 6%.



Слика 6.28. Под спаваћих соба кућа испитаника у анкети

Интересантно истраживање може да се спроведе на основу завршености објеката. На слици 6.29. је приказано да је по мишљењу анкетираних особа 68% објеката завршено, док 32% представља делимично завршене објекте.



Слика 6.29. Завршеност кућа испитаника у анкети

Када се то на пример упореди са изолацијом зидова, од чега је 50% неизолованих кућа, и старошћу куће, где је 99% кућа старије од 5 година, долази се до закључка да неких 18% испитаника сматра своју кућу завршеном, иако није изолована и нема намеру да улаже у изолацију. За исто поређење код изолације подова, долази се до закључка да неких 22% власника кућа нема намеру да улаже у изолацију пода, док код плафона та вредност расте на 28%.

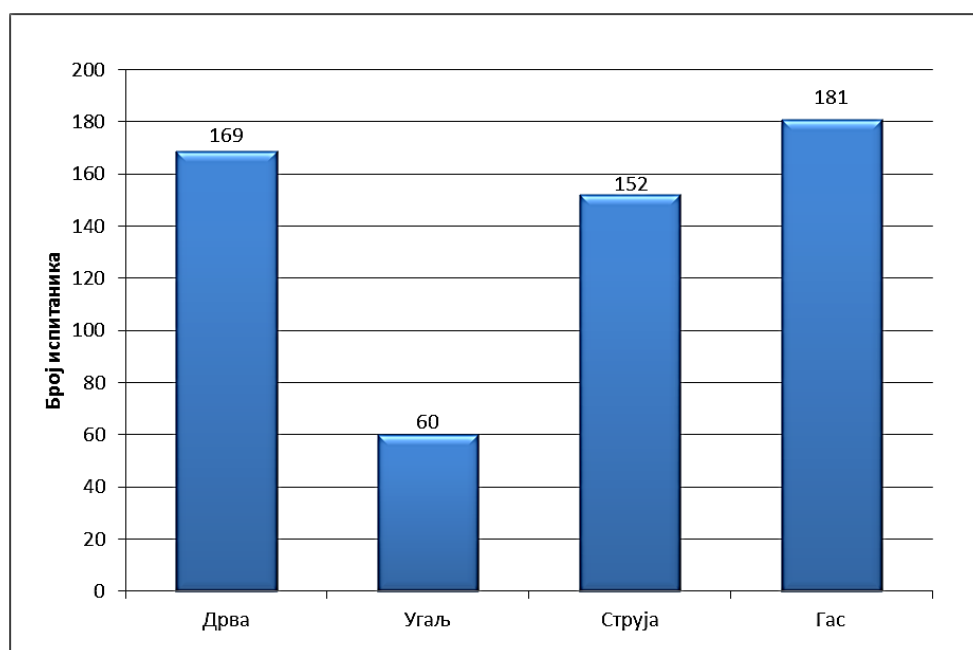
6.5.4. Подаци о начинима грејања и утисак комфора испитаника

Одређени део популације, који живи у кућама, повезан је на даљинско грејање и то најчешће на гас. Интересантно је да 21% испитаника користи даљинско грејање док 79% користи самостално грејање. На слици 6.30 су дати детаљни подаци о начину грејања испитаника у анкети.



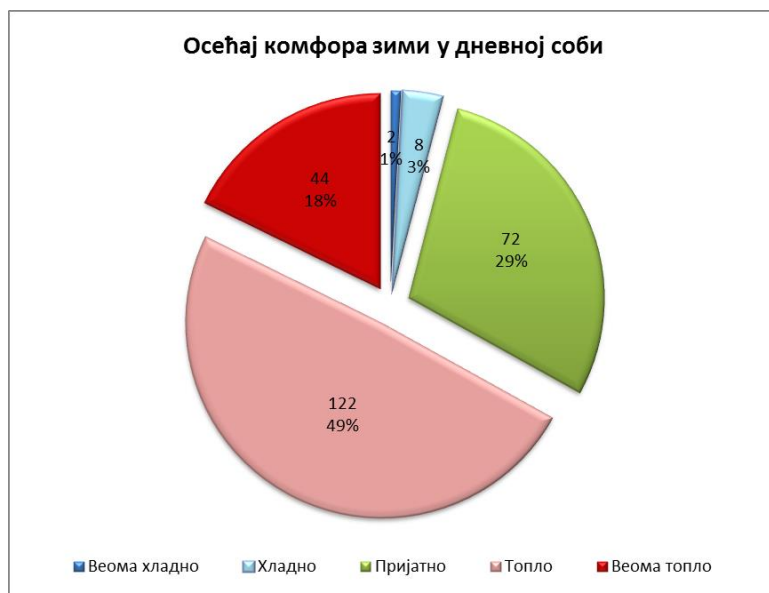
Слика 6.30. Начин грејања кућа испитаника у анкети

Код питања о употреби енергената велики број испитаника је имао вишеструки одговор, па тако дрва користи 169 до 248 испитаника, 60 користи угаљ, 152 струју, док 181 испитаник користи гас. То значи да добар део испитаника догрева кућу на струју. Такође је интересантно да у последње време доста корисника прелази са коришћења гаса на струју услед ниске цене струје и растуће цене гаса. Србија има најнижу цену струје у региону, па је и то један од фактора који утичу на коришћење струје. Детаљни подаци о коришћењу енергената за грејање кућа су приказани на слици 6.31.



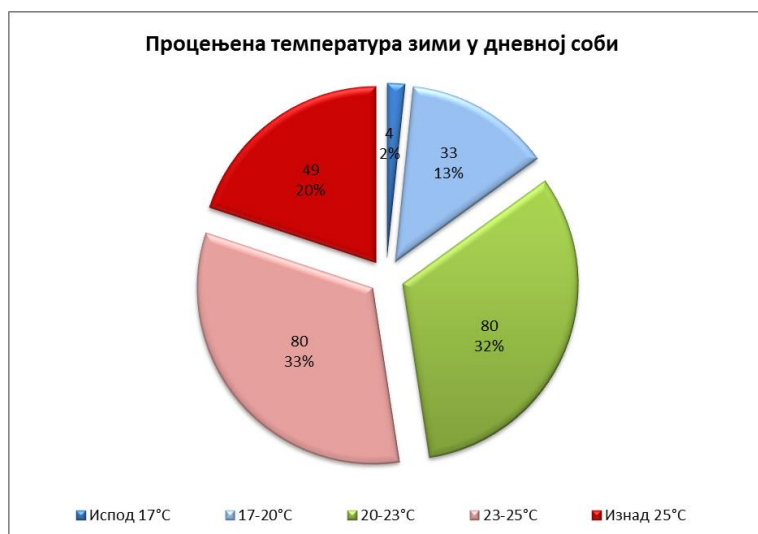
Слика 6.31. Употреба енергената за грејање кућа испитаника у анкети

На питање о осећају комфора зими испитаници су различито одговарали у зависности од својих навика и личних перцепција топлоте. На слици 6.32 су приказани одговори на питање о осећају комфора зими у дневној соби. Чак 49% испитаника је одговорило да има осећај топлоте пре него пријатности. Око 29% се осећа пријатно, док 18% испитаника осећа велику топлоту у просторији. Овај осећај може да буде чак и непријатан. Само 4% испитаника има осећај хладноће или велике хладноће. Из ових одговора може се наслутити след догађаја. Услед нерегулисања температуре помоћу регулатора топлоте долази до прегревања, да би се затим применио потпуно неефикасан, али нажалост чест, пример расхлађивања просторије отварањем прозора. Тиме се губи добар део енергије.



Слика 6.32. Осећај комфора зими у дневној соби испитаника у анкети

Претходни закључак добија додатну вредност и у подацима о процењеној температури у дневној соби током зиме. На слици 6.33 је приказано да већи део испитаника, 53%, жели да у просторији има већу температуру од оне која се налази у нашим стандардима, књигама, правилницима и регулативама. Код њих је процењена температура у дневним собама током зиме преко 23 °C.



Слика 6.33. Процењена температура зими у дневној соби испитаника у анкети

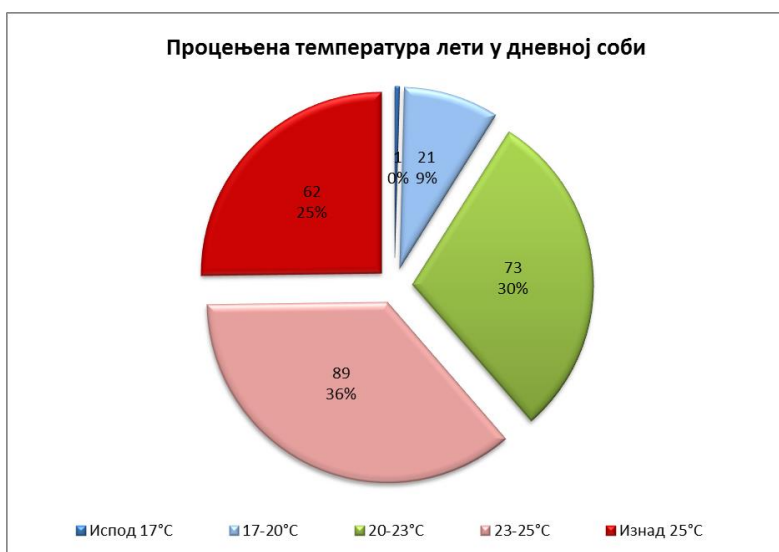
Из приложеног се такође може закључити да око 15% испитаника греје собе испод 20 °C. То значи да се у прописаним границама, можда је боље рећи предлозима, од 20 °C до 23 °C греје око 32% испитаника.

На слици 6.34 приказана је ситуација лети која је мало другачија. Око 67% испитаника се лети осећа пријатно, око 23% осећа врућину, 7% несносну врућину, док око 3% има осећај хладноће. Резултати су вероватно овакви због тога што у собама постоје клима уређаји као и због тога што се у просторијама окренутим ка северној страни не осећа иста количина топлоте као у просторијама окренутим ка јужној страни.



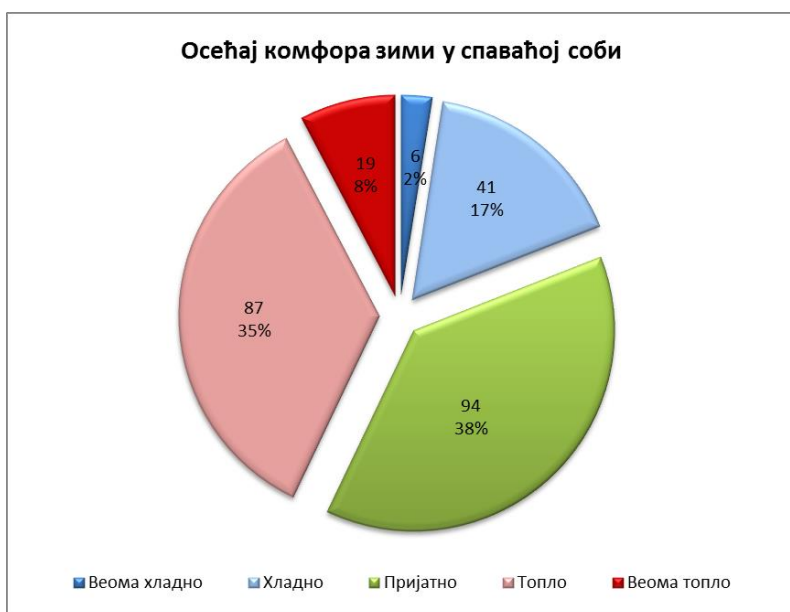
Слика 6.34. Осећај комфора лети у дневној соби испитаника у анкети

На слици 6.35 је приказано да су температуре лети у дневној соби нешто више него што би се можда очекивало, на основу података о комфору у истој соби лети. Процењена температура је у 61% случајева преко 23 °C. Око 30% има температуру између 20 °C и 23 °C. Око 9% има осећај хладноће услед климатизације. Ово нам говори да, иако се клима уређаји редовно користе, нема прекомерног расхлађивања простора, које би изазвало пораст у броју испитаника који осећају хладноћу.



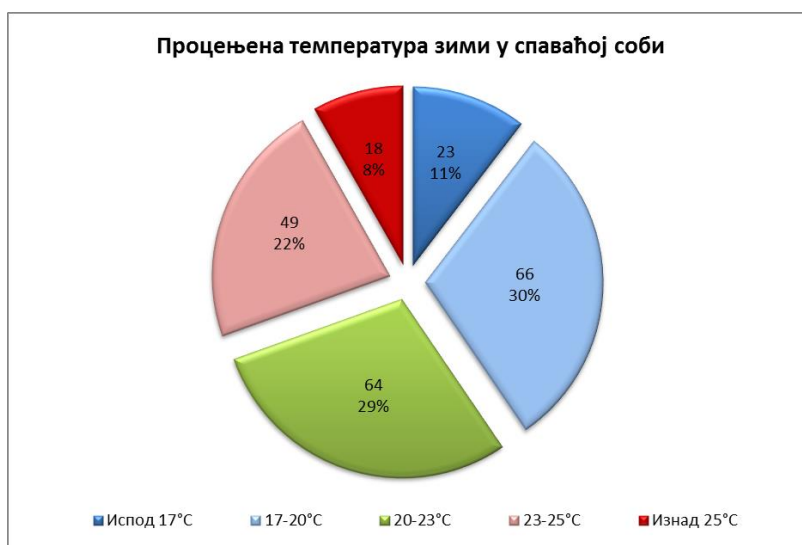
Слика 6.35. Процењена температура лети у дневној соби испитаника у анкети

Резултати се мало, али не и драстично, разликују за осећај комфора у спаваћој соби током зиме. Већем броју испитаника више одговарају ниже температуре у спаваћим собама, а треба урачунати и рационалну потрошњу. Ове собе се не греју по цео дан већ само у ранијим јутарњим и касним вечерњим сатима. На слици 6.36 је приказано да укупно 19% испитаника изјављује да у спаваћој соби осећа хладноћу или чак претерану хладноћу, док је 38% изјавило да се у спаваћим собама осећа пријатно. Око 35% испитаника има осећај топлоте, док 8% има осећа велике топлоте у просторији. У поређењу са дневном собом испитаници се свеукупно боље осећају.



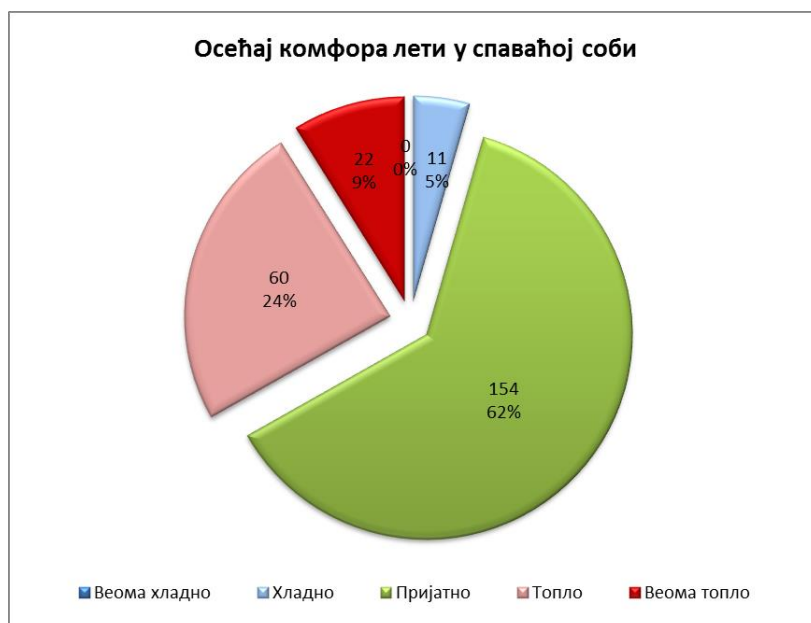
Слика 6.36. Осећај комфора зими у спаваћој соби испитаника у анкети

Температуре су због свега претходно наведеног очекивано мање током зиме у спаваћој соби него у дневној соби. Чак 41% испитаника има температуру у спаваћој соби нижу од 20 °C. Око 29% има температуру између 20 °C и 23 °C. Интересантно је да је температура у спаваћој соби преко 23 °C код 30% испитаника, што је чак за 31% мање него у дневној соби. На слици 6.37 су приказани детаљнији резултати температура у спаваћој соби у односу на дневну.



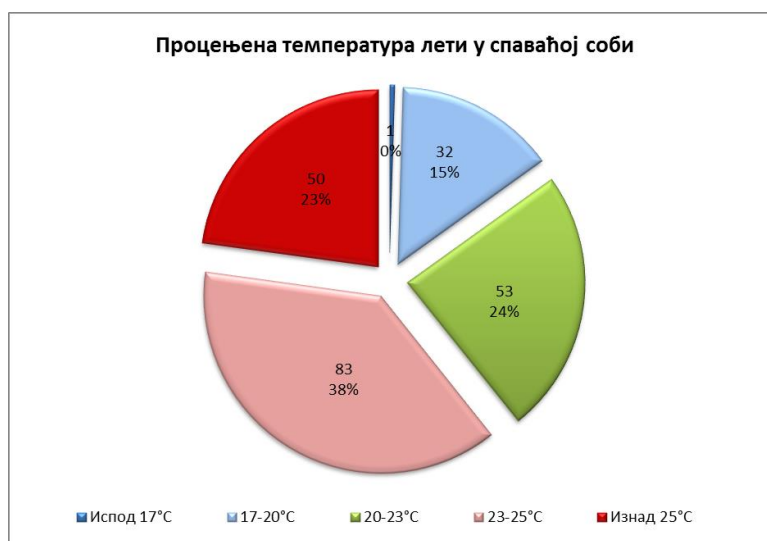
Слика 6.37. Процењена температура зими у спаваћој соби испитаника у анкети

На слици 6.38 је приказано да се испитаници осећају комфортно лети у спаваћој соби, и то се може приметити јер је 62% одговорило да им је пријатно. Око 24% се осећа топло, док се 9% осећа јако топло. Ови подаци су јако слични подацима за дневну собу лети.



Слика 6.38. Осећај комфора лети у спаваћој соби испитаника у анкети

Оно што је јако занимљиво су температуре лети у спаваћој соби. За разлику од температура у дневној соби, приметан је раст испитаника којима одговара да им соба буде хладна, ради бољег спавања. Сада чак 15% испитаника има температуру собе испод 20 °C. И приметан је такође пораст броја испитаника код којих је температура виша од 23 °C. То је између осталог условљено и тиме што нема толико клима уређаја у спаваћим собама. Они који имају клима уређај у спаваћој соби, услед повећане температуре ноћу лети у односу на зиму, нарочито ако су у ужем центру града, и услед отпуштања топлоте из асфалта и бетона, хладе своје спаваће собе чак и више од оне количине која је потребна. На слици 6.39 дати су детаљни подаци о температурама у спаваћим собама.

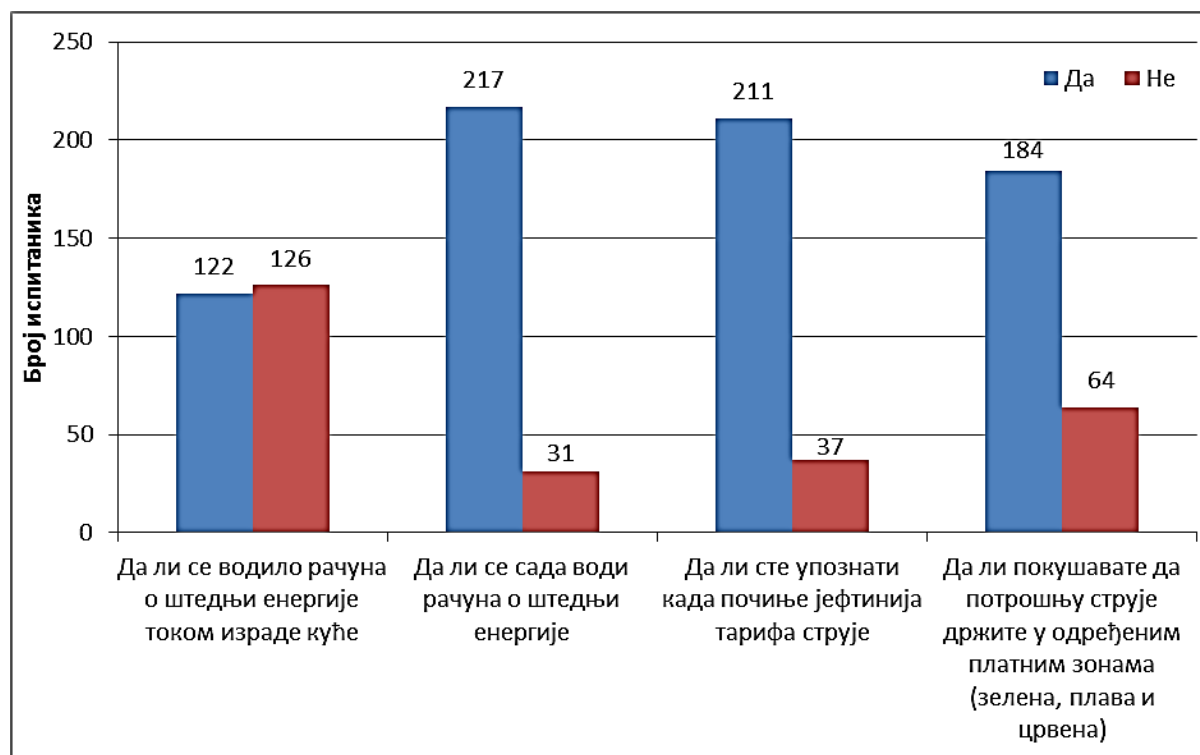


Слика 6.39. Процењена температура лети у спаваћој соби испитаника у анкети

6.5.5. Подаци о свесности о штедњи енергије и употреби модерних технологија испитаника

Испитаници су такође у једном делу анкете имали извештај број питања везаних за свесност о штедње енергије. Подаци показују да 126 од 248 испитаника (51%) није водило рачуна о штедњи енергије током израде куће (слика 6.40). Око 49% испитаника је водило рачуна и ови подаци се отприлике поклапају са резултатима везаним за термоизолацију зидова. Међутим приметан је пораст испитаника који сада води рачуна о штедњи енергије и око 87,5% испитаника се труди да штеди енергију. То је пораст од 36,5% у односу на време израде куће, што је јако охрабрујући податак.

Већем броју испитаника је познато када почиње јефтиније тарифирање струје (86%). Услед постојања различитих платних зона о којима ће бити речи у оквиру поглавља 8, сами испитаници се труде да буду у оквиру појединих. Услед већег броја чланова породице некада је немогуће да користе електричну енергију у оквиру једне зоне већ потпадају под другу зону која је скупља. Ово је такође условљено тиме да се неки испитаници са својом потрошњом налазе у средини зелене или плаве зоне, па је неизводљиво да толико уштеде да би прешли у јефтинију зону.



Слика 6.40. Свесност о штедњи енергије испитаника у анкети

Целокупно повећање свесности условљено је увођењем платних зона, повећањем свеукупних ефеката стаклене баште и глобалном кампањом у свету о редукацији потрошње енергије и пропагирањем нових извора енергије. Модерне технологије су такође популарне и све чешће се могу чути рекламе на јавним сервисима, као што су телевизија и радио, који пропагирају ове програме штедње.

Нови ефикаснији уређаји потпомажу уштеду енергије, а уједно и примена штедљивих сијалица је постала популарна. Поред чисто економских, испитаници се све више одлучују за енергетски ефикасне методе и због очувања животне средине.

Неколико питања у анкети било је везано и за упознатост испитаника са енергетски ефикасним методама, разлозима штедње и њиховим доминантним начинима штедње. Проверено је и колико су упознати са односом јефтине и скупе струје.

На питање о томе колико су упознати са начинима штедње, 52% је одговорило да је добро упознато, док је 10% одговорило да је одлично упознато (слика 6.41). Овај податак је помало забрињавајући јер је око 34% испитаника изјавило да је мало упознато са начинима штедње, а 4% да уопште није упознато.

Аутор дисертације верује да је 34% испитаника ово изјавило услед познавања два или три опште позната начина штедње енергије, док друге познају, али не знају у потпуности принцип њиховог рада. Ту спадају фотонапонски панели или соларни колектори. У том случају нису желели да одговоре да су добро упознати, али то не умањује њихову тежњу за уштедом енергије која је приказана на претходној слици 6.40. На слици 6.41 је приказана упознатост испитаника са начинима штедње енергије.



Слика 6.41. Упознатост о начинима штедње енергије испитаника у анкети

На слици 6.42 је приказано да су разлози за штедњу енергије углавном економски (43% испитаника) и економски заједно са бригом о животnoj средини (53%). Само 4% испитаника штеди или би штедело енергију искључиво због бриге о животnoj средини.



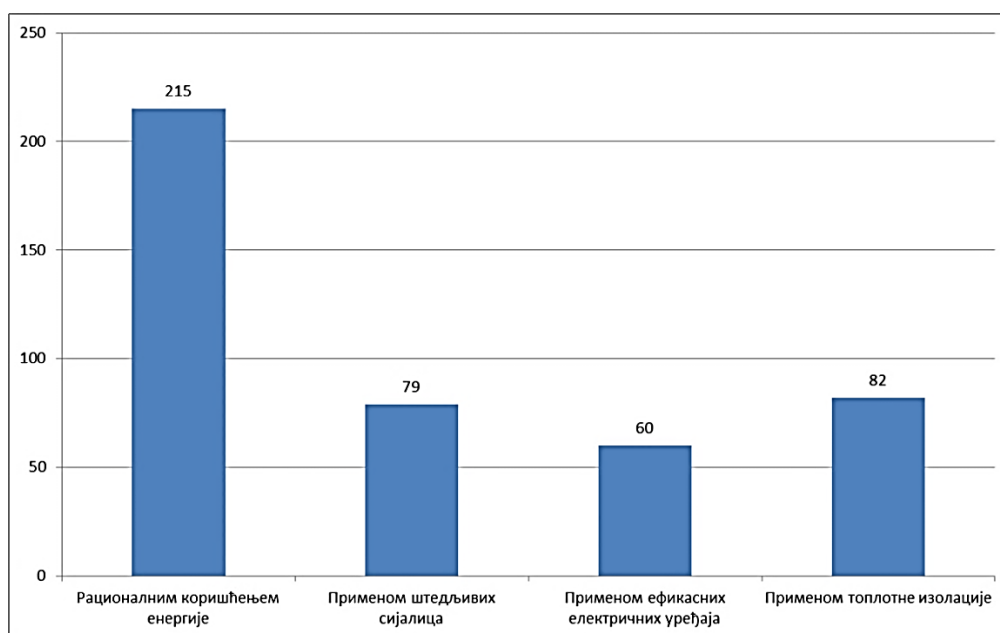
Слика 6.42. Разлози за штедњу енергије испитаника у анкети

Једно од интересантијих питања је било колико су сами испитаници стварно упознати са односом скупље и јефтиније струје, што је приказано на слици 6.43. Тачан одговор 4:1 је дало 53% испитаника, док је остатак испитаника рекао 2:1 и то 34%, и одговор 6:1 је дало 4% испитаника. Неких 9% испитаника се изјаснило да не зна овај однос.



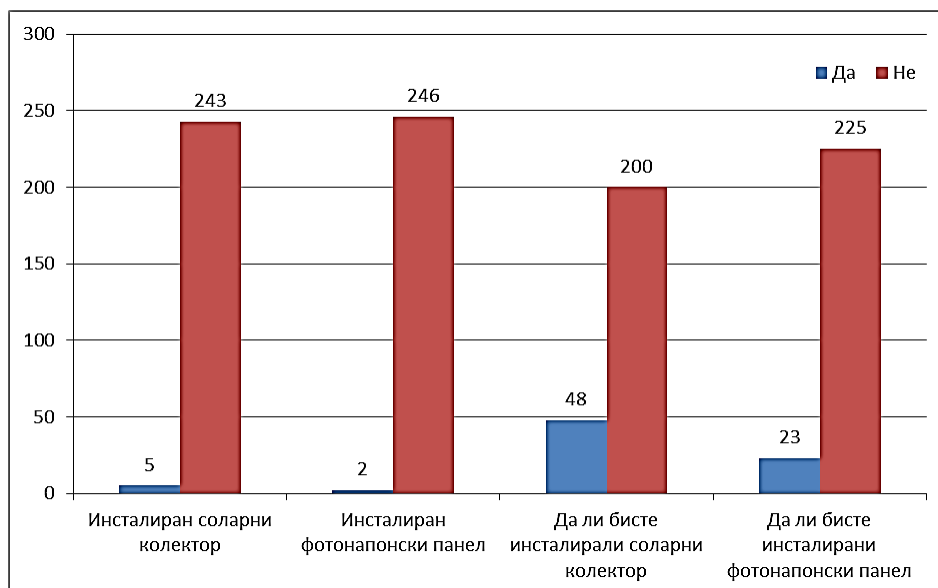
Слика 6.43. Упознатост са односом скупља/јефтинија струја испитаника у анкети

Следеће питање је било везано за доминантан начин о уштеди енергије. На њега су испитаници могли да дају више одговора. На слици 6.44 је приказано да се за рационално коришћење определило 87% испитаника. Под рационалним коришћењем сматра се гашење светала и уређаја при изласку из просторија, коришћење бојлера у време јефтине струје, спремање хране за више дана, као и загревање само просторија које се користе у току дана и коришћење терморегулатора ако га испитаник поседује. За примену штедљивих сијалица се определило 32% испитаника, док се 19% похвалило применом ефикасних електричних уређаја. Око 33% је примену топлотне изолације навело као доминантан начин штедње енергије.



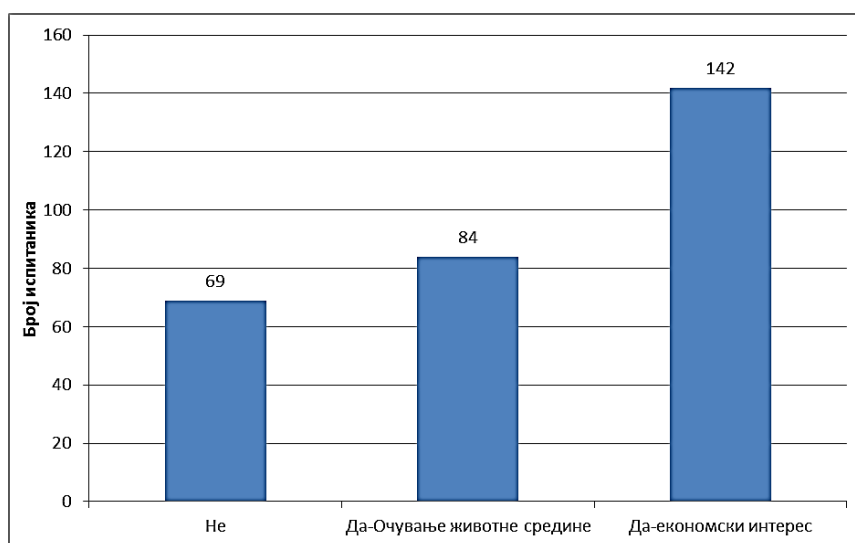
Слика 6.44. Доминантан начин штедње енергије испитаника у анкети

Када су станари упитани да ли имају соларни колектор њих 242 је одговорило да нема, док је њих 5 одговорило да има. То значи да само 2% поседује соларни колектор. Само 2 испитаника имају фотонапонски панел, тј. 1%. На питање да ли би инсталирали соларни колектор чак 200 (81%) испитаника је одговорило негативно, а на питање о фотонапонском панелу је чак 225 (91%) такође одговорило негативно. Ово је делом условљено непознавањем технологије, делом немогућношћу извођења, делом већ доброј ефикасности куће, а вероватно највећим делом економском ситуацијом и периодом повраћаја уложеног новца који није кратак (минимум 7 година за колекторе и 12 за панеле). На слици 6.45 је приказана примена модерних технологија код испитаника.



Слика 6.45. Примена модерних технологија испитаника у анкети

На слици 6.46 је приказано да се на питање о инвестирању у нето-нулту енергетску кућу, које је имало више могућих и истовремених одговора, 28% испитаника изјаснило да не би инвестирало, 34% би инвестирало ради очувања животне средине, а 57% је изјавило да би инвестирало због економског интереса.



Слика 6.46. Потенцијално инвестирање у нето нулту енергетску кућу испитаника у анкети

6.6. Закључци изведени анкетирањем

Анкета је вршена у Крагујевцу међу студентима који живе у ниским кућама, а како би се добили жељени резултати потребни за моделирање правог стања при коришћењу нето-нулте енергетске куће. Вршена је селекција анкета и изабрано је 248 релевантних анкета.

Према подацима добијеним анкетирањем види се да је већина кућа у ужем градском језгру и предграђу (укупно 76%), док се најмањи број њих налази на селу (24%). Највећи број кућа је старо између 20 и 40 година и оне заузимају 76% укупног броја анкетираних кућа. Примећено је да су величине кућа равномерно распоређене у свим предложеним ранговима по квадратури. Највећи број кућа у Крагујевцу је или приземног карактера или са једним спратом. Заједно, оне чине чак 76% испитаних кућа.

Према подацима анкетираних власника кућа просечна породична примања свих чланова породице су најчешће била до 50 000 динара (41% испитаника), док су примања између 50 000 и 100 000 имала 85 испитаника (34%). Породице са 3, 4 или 5 чланова представљају укупно 71% испитаника. Одрасле особе представљају 65% узорка, док су деца 35% истог. Један део одраслих особа је студентског узраста, али себе не сматрају дететом јер имају свој извор прихода.

Чак 50% кућа нема изолован спољашњи зид, док тај проценат расте до 60% и 64% за изолацију подова и плафона. Најчешће коришћени материјал за термоизолацију је стиропор, док се за основни материјал спољашњег зида користе шупљи глинени блокови и пуна опека. Затим се за основни материјал плоче највише користи армирани бетон (59%), док је за под у дневној и спаваћој соби најчешће коришћен бродски под, паркет или патос (51% до 56%), а затим следи ламинат (34% до 39%). Приметно је да се бродски под, паркет или патос користи код старих кућа, док се ламинат користи код млађих кућа. Око 68% власника кућа каже да су њихове куће завршене. Долази се до закључка да неких 18% власника нема намеру да улаже у термоизолацију спољних зидова, неких 22% власника кућа нема намеру да улаже у изолацију подова, док код плафона та вредност расте на 28%.

Одређени део популације која живи у кућама је повезан на даљинско грејање и то најчешће на гас. Интересантно је да 21% испитаника користи даљинско грејање, док 79% користи самостално грејање. Код питања о употреби енергената велики број испитаника је имао вишеструки одговор, па дрва користи 169 до 248 испитаника, 60 користи угаљ, 152 струју док 181 користи гас. То значи да добар део испитаника догрева кућу на струју што је условљено јефтином ценом струје.

Интересантан податак се односи на осећај комфора, као и процењене температуре лети и зими у дневној и спаваћој соби. Приметно је да је када се разматра комфор, испитаници имају осећај веће топлоте зими него лети у просторијама. Лети углавном имају осећај пријатности, док им је зими осећај топлоте повећан у просторијама. Ако се упореде дневна и спаваћа соба види се да су спаваће собе хладније и да је то између осталог условљено незагревањем спаваће собе у току дана. Приметно је да се генералних препорука из правилника, стандарда и регулатива како лети тако и зими придржава између 20% и 30% у зависности од врсте собе и годишњег доба.

Подаци показују да 126 од 248 испитаника (51%) није водило рачуна о штедњи енергије током израде куће. Око 49% испитаника је водило рачуна и ови подаци се отприлике поклапају са резултатима везаним за термоизолацију зидова. Међутим, приметан је пораст испитаника који сада води рачуна о штедњи енергије и око 87,5% испитаника се труди да штеди енергију. То је пораст од 36,5% у односу на време израде куће, што је јако охрабрујући податак. Велики број испитаника познаје време када почиње јефтина струје и такође се труди да остане у нижим платним зонама за потрошњу електричне енергије. Испитаници су упознати са мерама штедње енергије, и приметно је да се највећи број њих, чак 96%, опредељује за штедњу енергије из економских разлога, у неким случајевима повезаним са очувањем животне средине, док се мањи број њих за штедњу опредељује само из разлога очувања животне средине (4%). Од укупног броја испитаника 53% је познавало однос цене јефтине и скупе струје.

Доминантан начин уштеде енергије је рационална потрошња (87%), док су други начини који се користе применом штедљивих сијалица, ефикасних уређаја и надградњом топлотне изолације заступљени у мањем обиму. Велики број испитаника нити има (98%) нити жели да инсталира (80% – 90%) соларни панел или колектор. Ово је делимично условљено и финансијским стањем испитаника. На питање о инвестирању у нето-нулту енергетску кућу, 28% испитаника је изјавило да не би инвестирало, 34% би инвестирало ради очувања животне средине, а 57% је изјавило да би инвестирало због економског интереса.

7. Метеоролошки подаци за град Крагујевац

7.1. Град Крагујевац

Град Крагујевац је привредни, културно, просветни, здравствени и политички центар Шумадије и Поморавља и суседних региона референца. Налази се у срцу Шумадије и Србије, јужно од главног града Србије, Београда од ког је удаљен 140 km аутопутем Е10. Простире се на површини од 835 квадратних километара, са 57 насељених места и 78 месних заједница. Подигнут је на обалама Лепенице у крагујевачкој котлини, где се дотичу крајњи огранци шумадијских планина: Рудника, Црног Врха и Гледићких планина. За избор места при оснивању насеља били су од утицаја и бројни водотоци. Наиме, кроз уже градско подручје тече река Лепеница и налазе се ушћа њених притока. Долинама поменутих водотокова и благим развојима између њих, Крагујевац је у прошлости повезивао Грузу, Лепеницу и Рудник са Поморављем, куда пролазе саобраћајнице међународног значаја [161].

Координате града Крагујевца:

- северна географска ширина 44° 22'
- источна географска дужина 20° 56'
- надморска висина 180m.

7.2. Клима Крагујевца

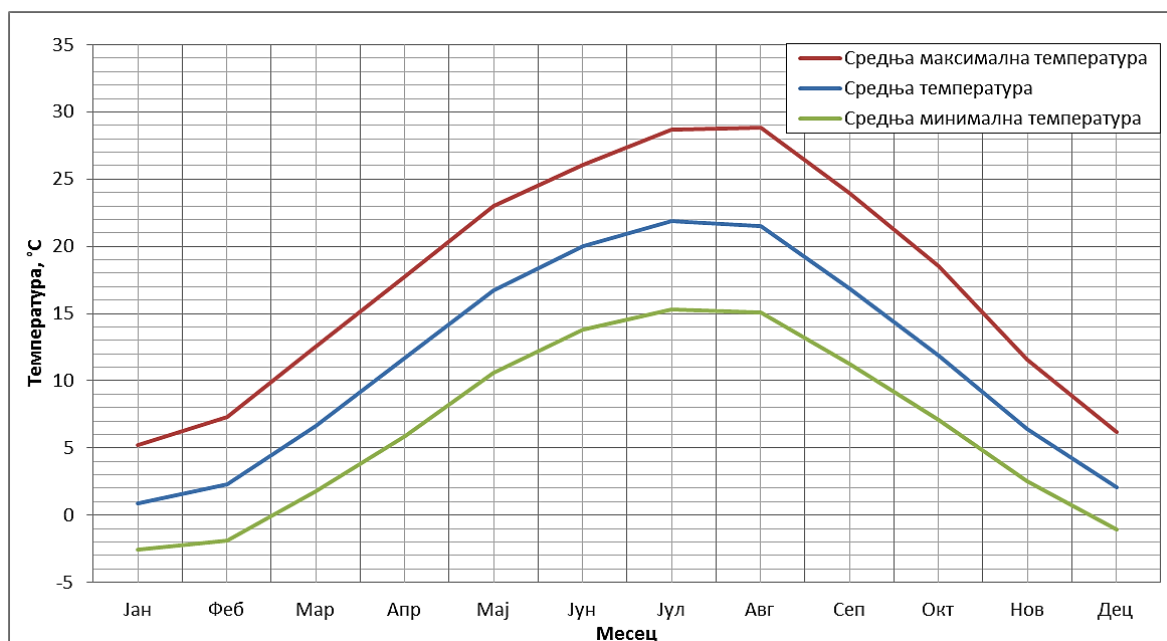
Клима која влада у Крагујевцу је умерено континентална клима. Одликују је оштре зиме и постојан снежни покривач. Количина падавина опада ка континенталном делу, пролећа су кратка а лета топла.

За потребе овог рада биће представљена клима у Крагујевцу кроз све релевантне податке. Подаци су узети на основу просека последњих 30 година [162].

7.2.1. Температурни подаци

Температуре које се јављају у Крагујевцу у просеку су у зимским месецима од минималних -3 °C у децембру и јануару до максималних дневних око 5 °C у току дана. На слици 7.1 је приказано да су у летњим месецима ове температуре у просеку од минималних 15 °C до максималних 27 °C у месецима јулу и августу.

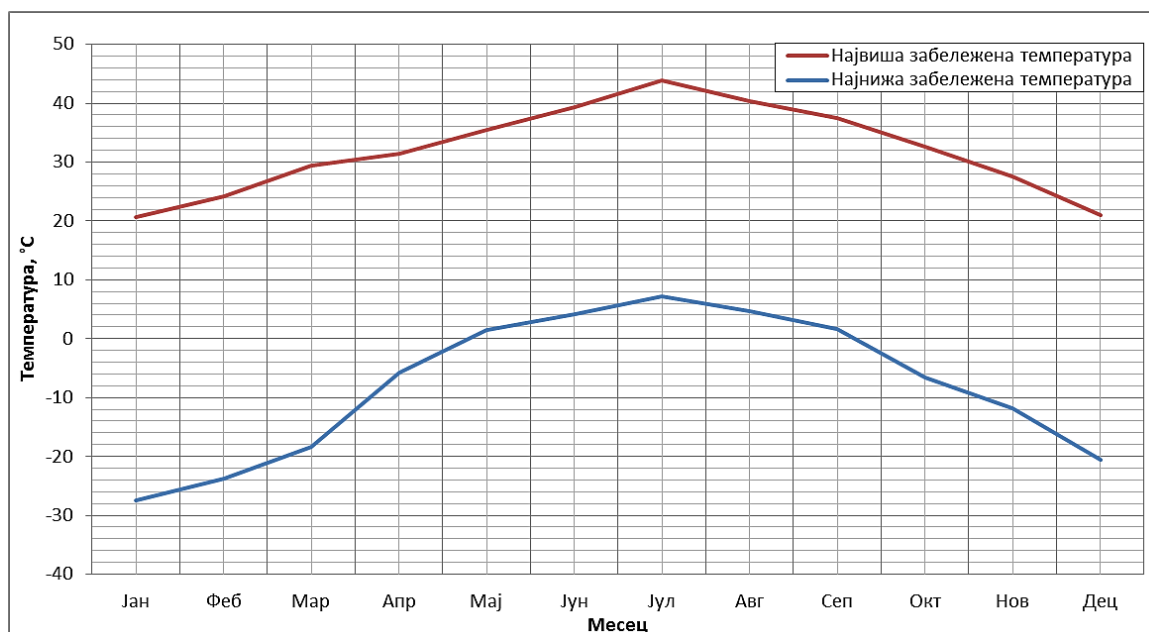
Битно је приметити да просечне температуре с обзиром на климу варирају за 15 °C када се упореде за летње и зимске месеце.



Слика 7.1. Средња температура у Крагујевцу по месецима

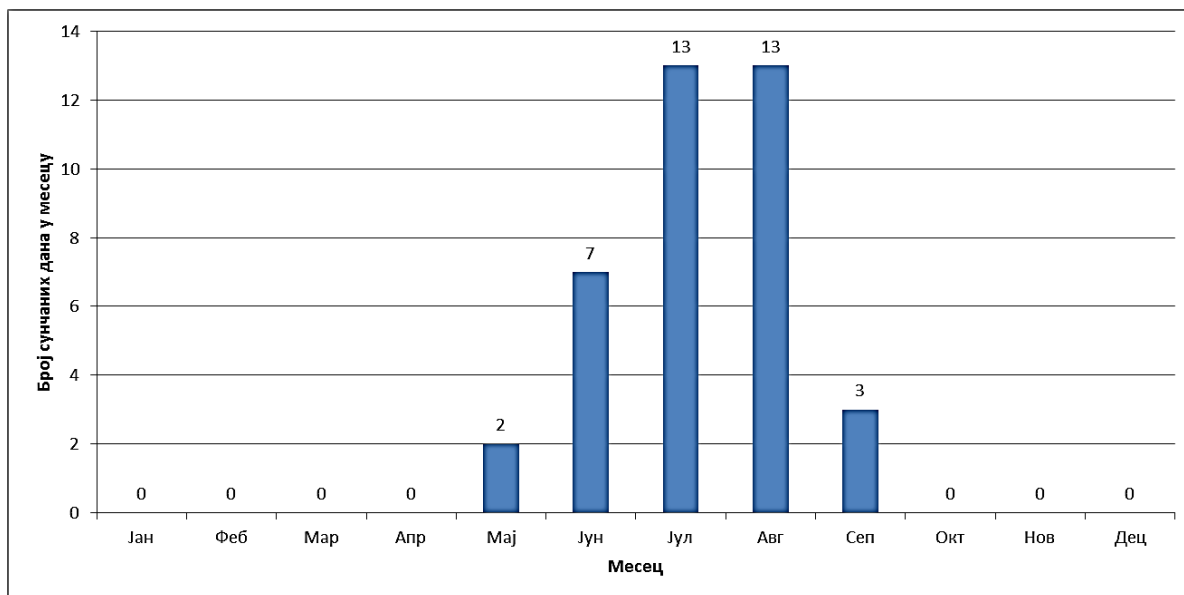
На слици 7.2 су приказане најниже минималне и највише максималне температуре у периоду од последњих 30 година. Приметно је да у току зиме минималне температуре могу да падну и до екстремних $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а да су екстремне минималне температуре и лети понекад јако ниске и да је једном у току јула температура била $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, док је у току августа била само $4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Што се тиче максималних температура зими је највиша максимална температура била $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ у децембру и јануару, док је највиша забележена температура била $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ у јулу месецу. У августу је највиша икад забележена била $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Услед ефекта стаклене баште приметан је просечни пораст температуре последњих година.



Слика 7.2. Екстремне температуре у Крагујевцу по месецима

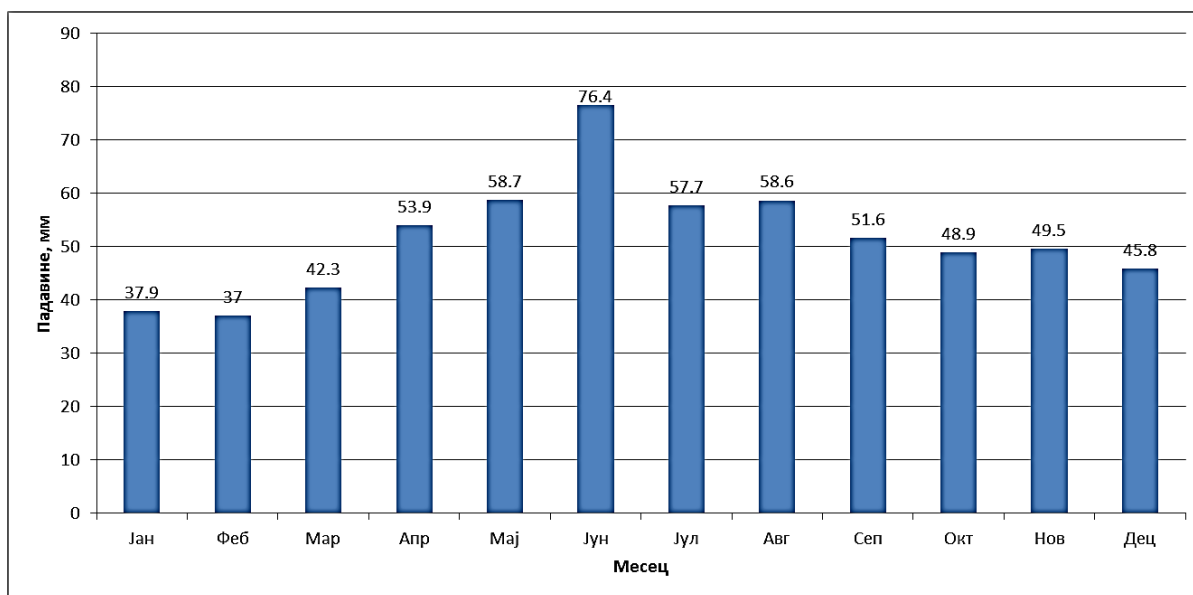
На слици 7.3 приказан је просечан број дана у месецу са температуром преко 21°C. Може се видети да зими нема ниједан дан са просечном температуром са преко 21°C. Период у којима има дана се поклапа са период у коме нема централног грејања. Централно грејање у Србији траје од 15. октобра до 15. априла. Утоку летње сезоне долази до повећаног броја дана са температуром преко 21 °C. У јулу и августу месецу има по 13 дана са просечном температуром преко 21°C.



Слика 7.3. Просечан број дана са температуром преко 21 °C

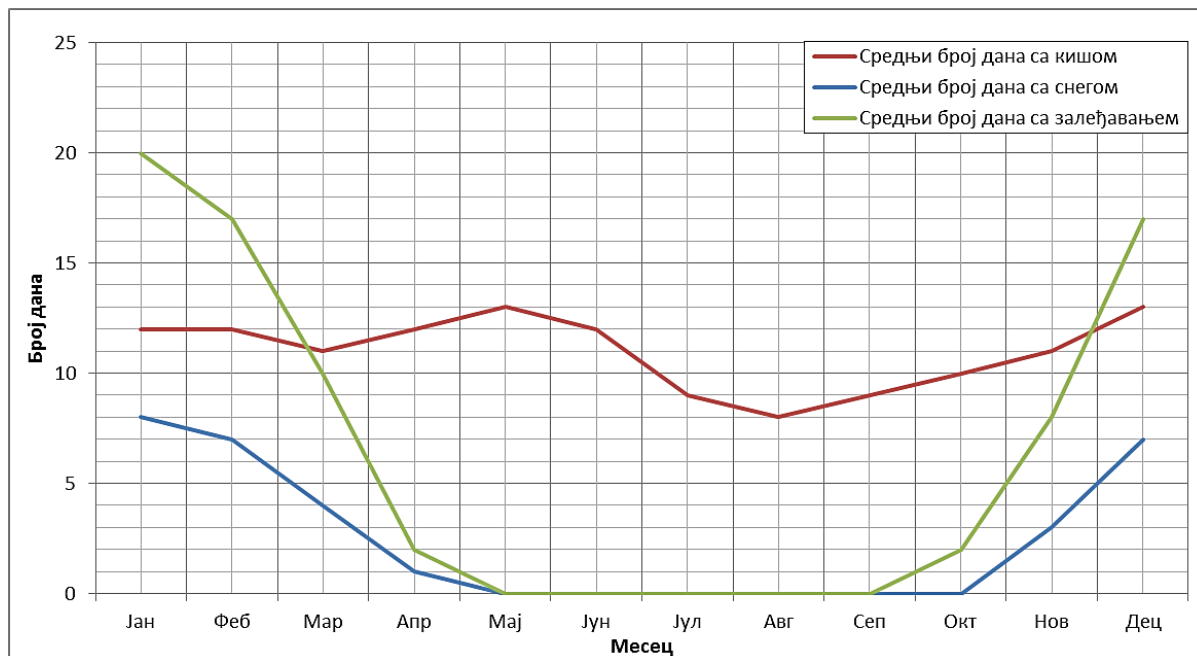
7.2.2. Подаци о падавинама

У овом региону кише су најчесталије у месецу јуну када су укупне просечне падавине 76.4 mm. На слици 7.4 је приказано да у осталим периодима иако има више облачних дана има мање падавина. Интересантно је да у месецу фебруару има најмање кише и тада је количина падавина 77 mm.



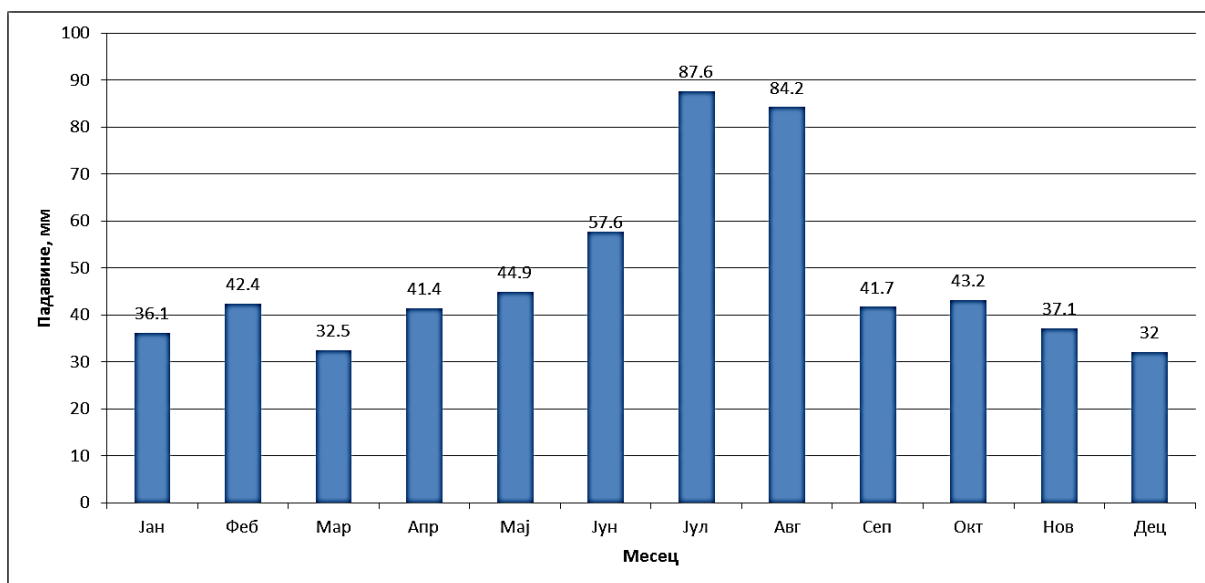
Слика 7.4. Падавине кише по месецима

Интересантно је да је највећи број дана са кишом у мају и децембру по 13, а најмањи у августу - 8 (слика 7.5). Дани када је температура испод нуле почињу у октобру и завршавају се у априлу. Највећи број дана са температуром испод нуле је очекивано у децембру (17) и јануару (20). Снег почиње у новембру и пада све до априла. У децембру има 7, а у јануару 8 снежних дана.



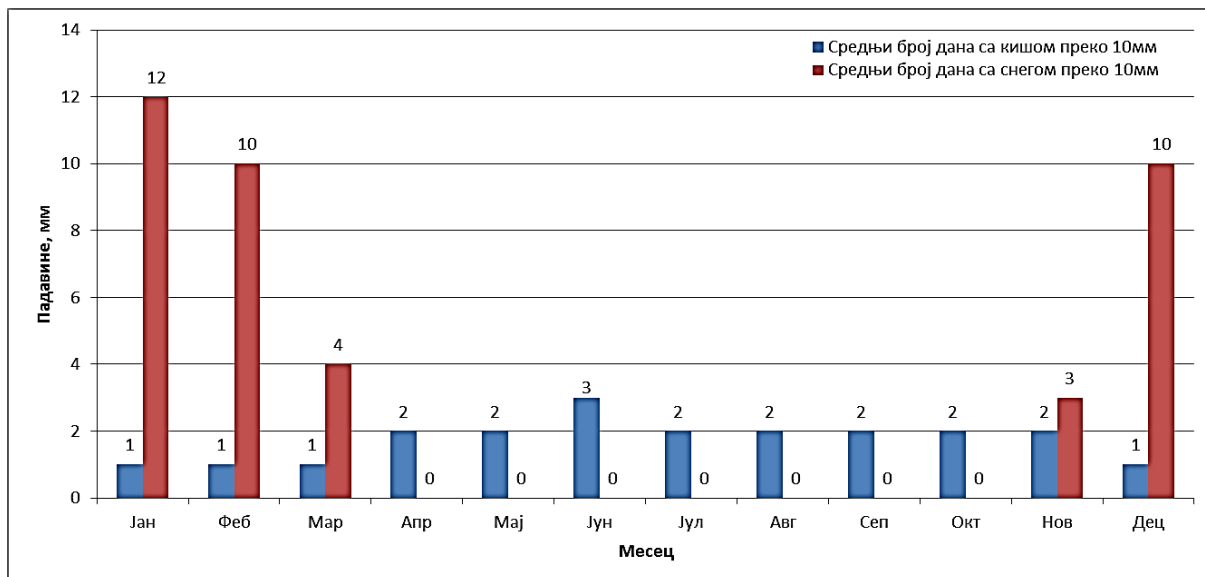
Слика 7.5. Средњи број дана са кишом, снегом и залеђавањем

Дешава се да има екстремних случајева када кише падају по цели дан или падне велика количина кише одједном. На слици 7.6 су приказане највеће падавине по једном дану за сваки месец у последњих 30 година. Приметно је да је у јуну у јулу у једном дану пало чак 87.6 mm што је више него просек за цео месец за последњих 30 година.



Слика 7.6. Највеће падавине забележене у једном дану по месецу

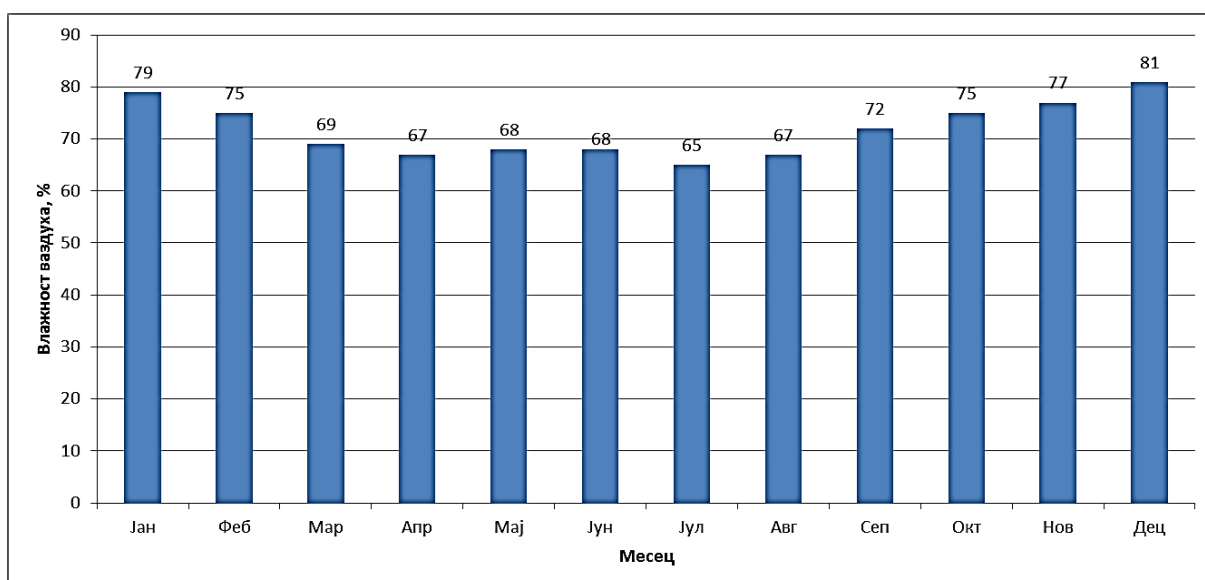
Ако се погледају падавине са преко 10 mm види се да таквих има током целе године у виду кише и средњи број дана са кишом преко 10 mm иде од 1 у зимским месецима до 3 у јуну (слика 7.7). Када се посматра средњи број дана са падавинама снега преко 10 mm види се да највише таквих дана има у јануару 12, и по 10 у децембру и фебруару.



Слика 7.7. Средњи број дана са кишом и снегом преко 10 mm

7.2.3. Влажност ваздуха

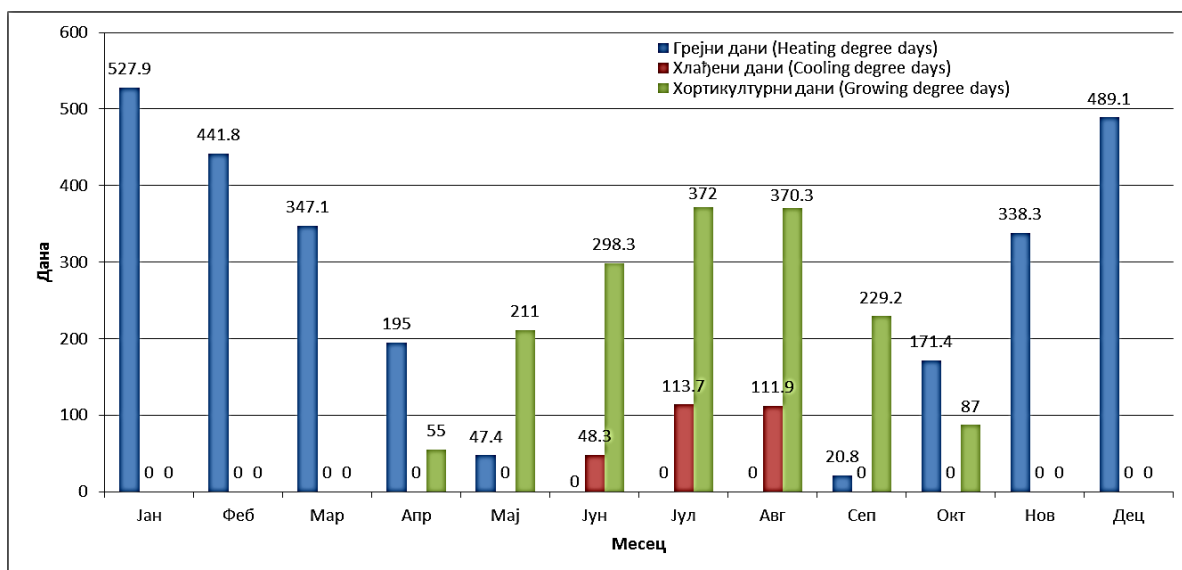
Влажност ваздуха је најмања у месецу јулу и тада износи 65%, док је највећа у месецу децембру и тада износи 81%. Приметно је да је влажност ваздуха у летњим месецима очекивано мања од влажности ваздуха у зимским месецима.



Слика 7.8. Просечна влажност ваздуха у Крагујевцу

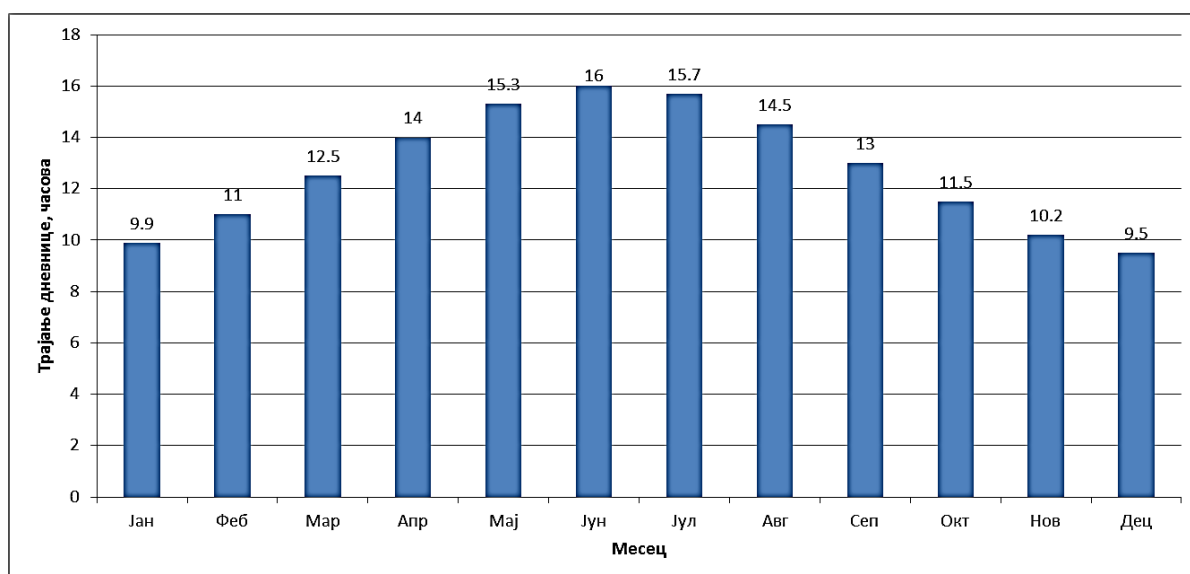
7.2.4. Специфични подаци о данима

У климатологији, али и машинству постоје специфични дани који се одређују. Они се користе да би се видело колико дана у години је потребно да се просторије унутар куће греју (грејни дани – *heating degree days*), а колико дана је потребно да се просторије унутар куће расхлађују (хлађени дани – *cooling degree days*). Такође се посматрају и дани повољни за узгајање тропских биљака (хортикултурални дани – *growing degree days*). На слици 7.9 дати су подаци о оваквим данима. Види се да сезона грејања почиње од октобра и завршава се у априлу, а да су највеће потребе за грејањем у децембру и јануару. Летњи дани захтевају расхлађивање просторија и то је потребно чинити од маја до септембра, а највише у јулу и августу. Хортикултурални дани су у јуну, јулу и августу.



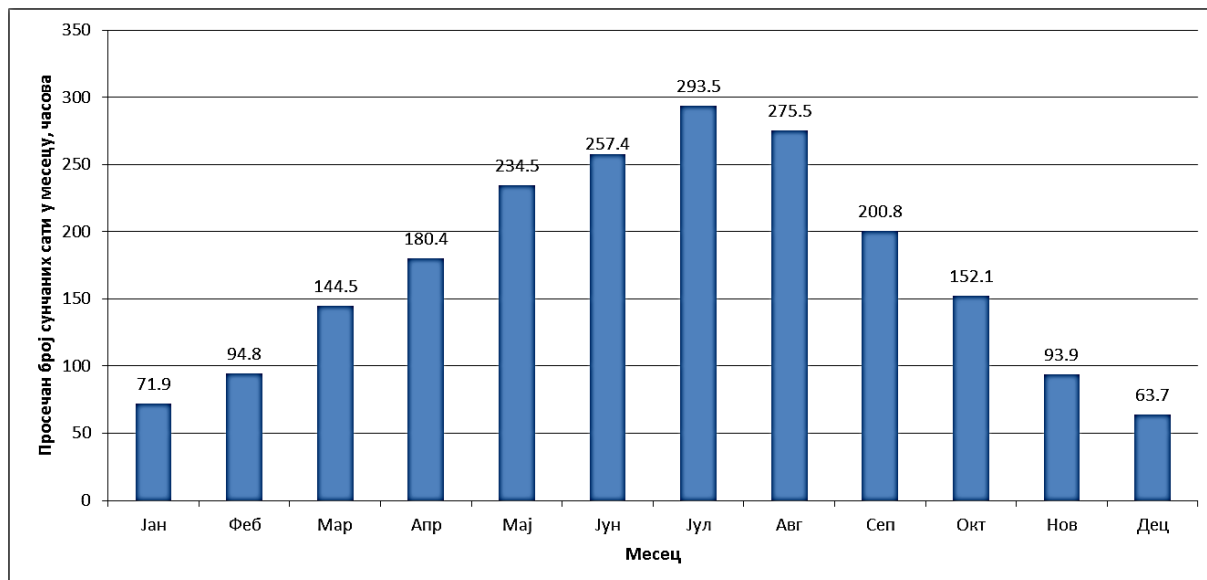
Слика 7.9. Број специфичних дана у Крагујевцу

Средње трајање дневнице се креће од 9.5 сати у децембру када је дневница најкраћа до 16 сати у јуну када је дневница најдужа (слика 7.10).



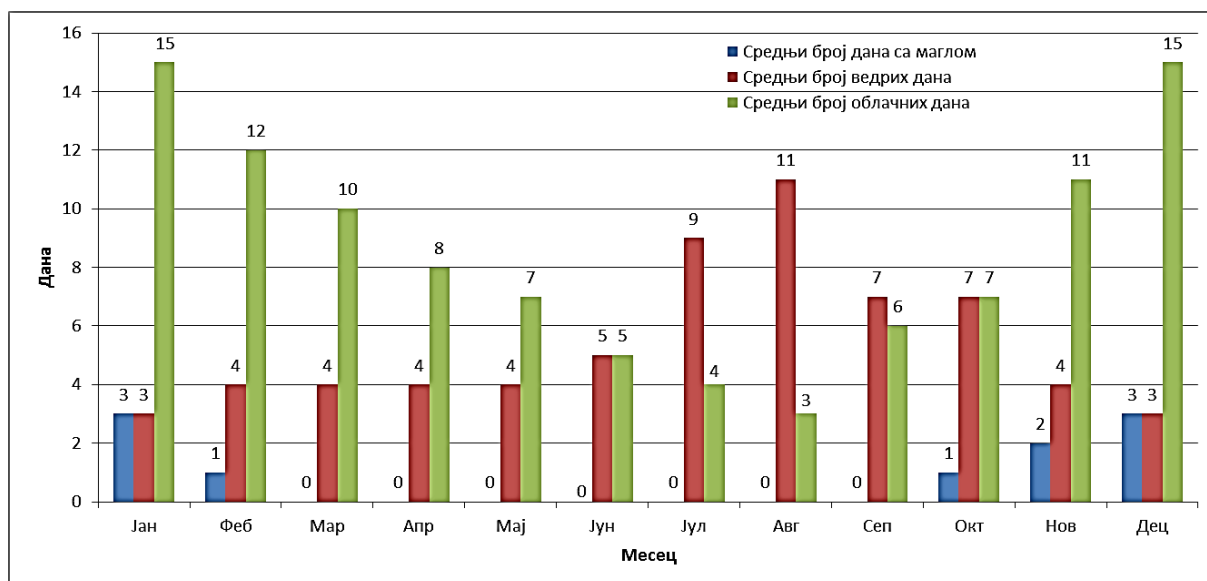
Слика 7.10. Средње трајање дневнице у часовима

Што се просечног броја сунчаних часова у месецу тиче, очекивано највише сунчаних сати има у јулу и то 293,5 (слика 7.11.). Следе август и јун са по 275,5 односно 257,4 сунчаних сати у месецу. Најмање сунца има у децембру и то само 63,7 сунчаних сати а у месецу јануару 71,9 сунчаних сати. У новембру и фебруару има по 94 оваква сата.



Слика 7.11. Просечан број сунчаних часова у месецу

На слици 7.12 је приказан средњи број ведрих, облачних и магловитих дана. Види се да у току године има највише облачних дана и то нарочито у децембру и јануару, по 15. Лети ови дани су ретки и у августу их има 3, док их у јулу има 4. Ведрих дана има највише лети и то 11 у августу и 9 у јулу. Зимски ведри дани су ретки и има их по 3 у децембру и јануару. Магловити дани се јављају углавном у зимском периоду и највише их има у децембру и јануару, по 3.

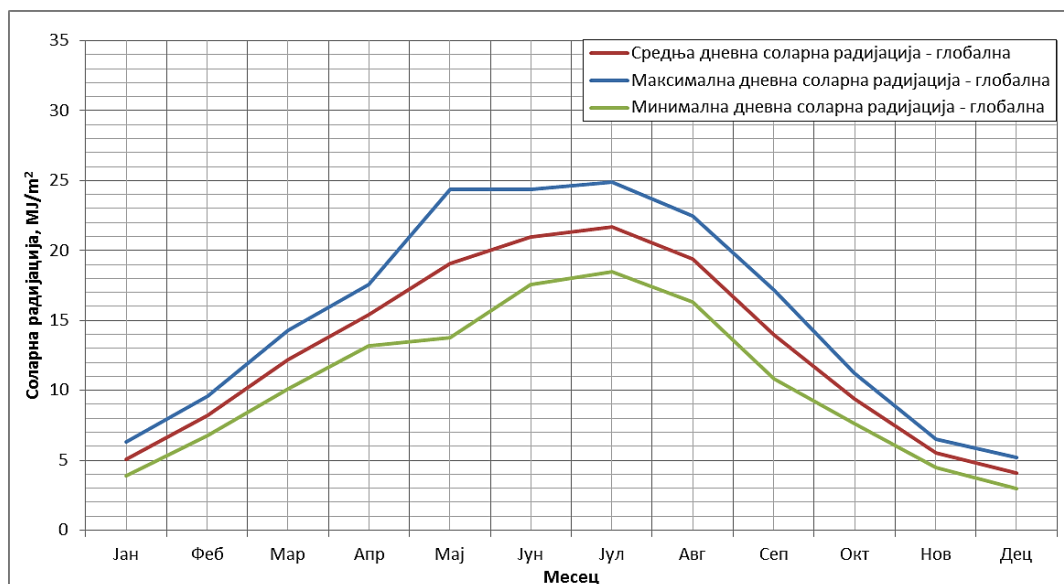


Слика 7.12. Средњи број ведрих, облачних и магловитих дана

7.2.5. Соларна радијација

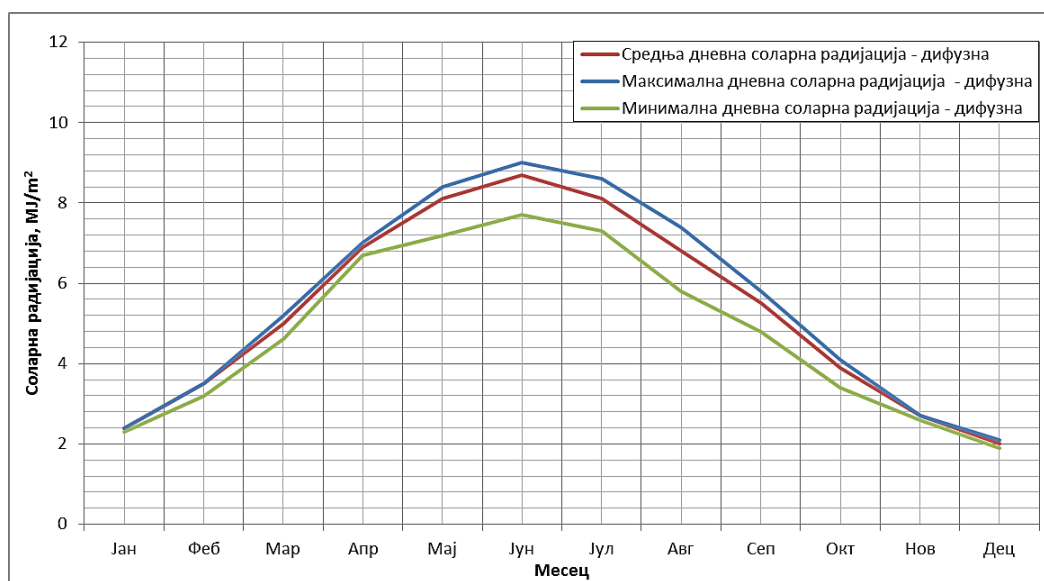
Испитивање дневне соларне инсолације је битно како би се добио тачан увид у соларну енергију која се добија од Сунца. Овакав увид важан је како за утицај загревања просторија услед проласка соларне топлоте кроз прозоре, тако и за боље изучавање постављања соларних панела и колектора.

На слици 7.13. је приказана средња дневна глобална соларна инсолација. Наравно у летњим месецима она је највећа и износи око 23 MJ/m^2 . Зими је ова инсолација јако мала и износи око 5 MJ/m^2 .



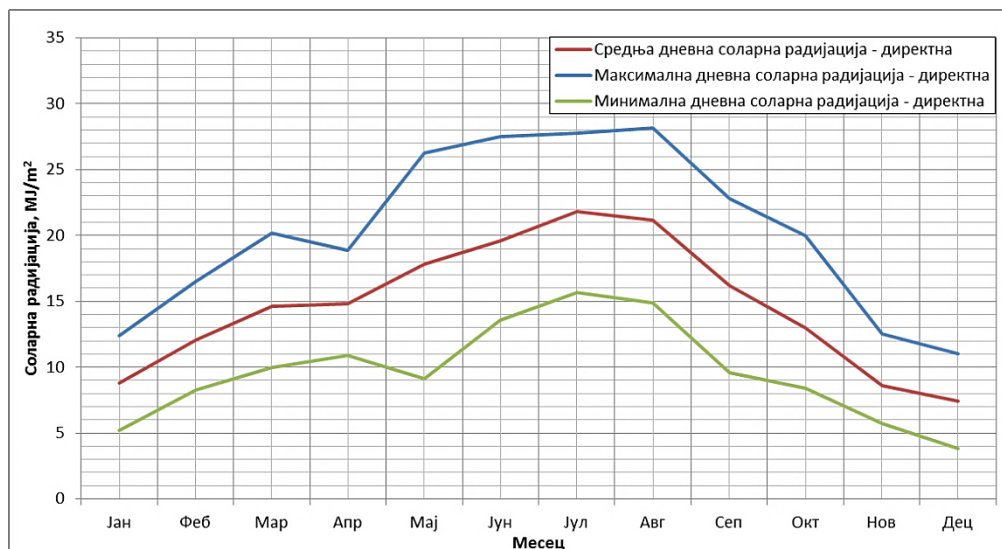
Слика 7.13. Средња дневна соларна радијација – глобална

Вредност средње дневне дифузне соларне радијације се креће од 2 MJ/m^2 зими, до 9 MJ/m^2 лети (слика 7.14). Она је у директној зависности и од броја сунчаних дана и од глобалне дневне инсолације, јер се остварује помоћу проласка сунчевих зрака кроз облаке.



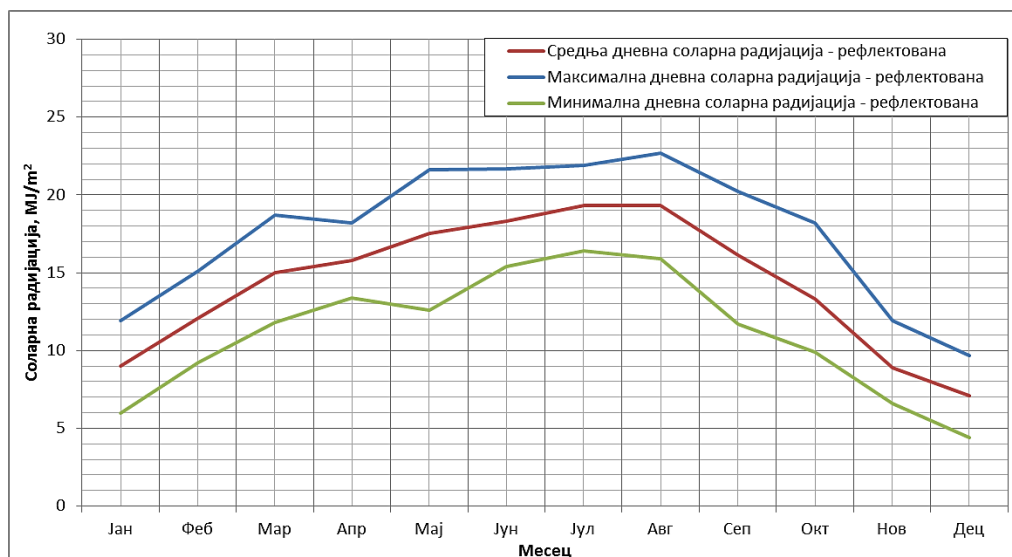
Слика 7.14. Средња дневна соларна радијација – дифузна

Средња дневна директна соларна инсолација варира од $7,5 \text{ MJ/m}^2$ зими, до 22 MJ/m^2 лети. То је количина енергије која директно пада на фотонапонске панеле и соларне колекторе. Подаци о средњој дневној директној соларној радијацији су приказани на слици 7.15.



Слика 7.15. Средња дневна соларна радијација директна

Средња дневна рефлектована соларна радијација се огледа у количини енергије која се рефлектује. Она је мало мања од количине која директно пада и креће се од 7 MJ/m^2 зими до $22,5 \text{ MJ/m}^2$ лети. Подаци о вредностима средње дневне рефлектоване соларне радијације су дати на слици 7.16.



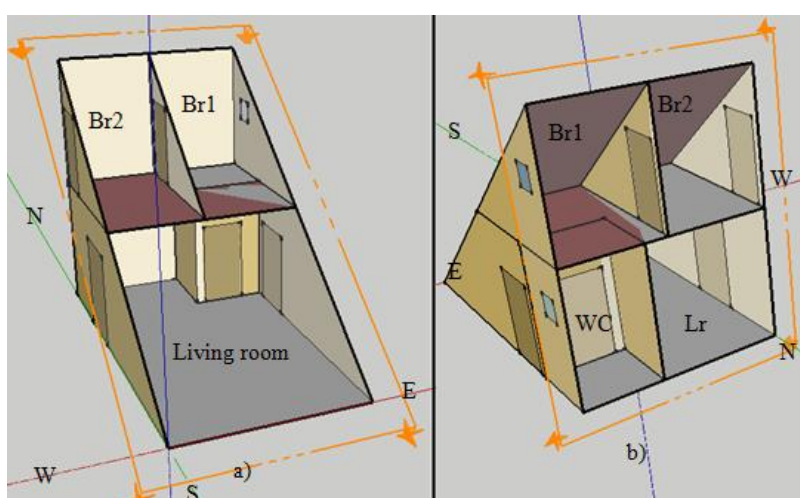
Слика 7.16. Средња дневна соларна радијација – рефлектована

На основу ових података је развијен *weather file* за град Крагујевац. Истовремено је сличан фајл развијен и на Берклију. Комбинација ова два фајла са малим изменама основног фајла развијеног на Берклију, а у складу са прикупљеним резултатима, користиће се у даљим симулацијама.

8. Моделирање кућа нето-нулте енергетске потрошње

8.1. Геометријски подаци куће

Кућа која ће бити коришћена за потребе истраживања заснива се на моделу ниске куће која има особине које потпомажу постизање нето-нулте енергетске куће. Њен јужни зид је уствари кров на коме се налазе фотонапонски панели. Ова кућа има 2 спрата и четири просторије. На приземљу се налазе дневна соба и у оквиру ње се налази кухињски део, а ту је уједно и купатило. На спрату се налазе две спаваће собе (слика 8.1).



Слика 8.1. Геометријска дефиниција куће (Br-спаваћа соба, Lr-дневна соба, WC-купатило) (a) јужна страна света; (b) северна страна света

У табели 8.1 су дати геометријски подаци везани за површине просторија. Нема јужног зида због постојања крова који је под оптималним углом за добијање електричне енергије из фотонапонских панела за локацију Крагујевца.

Табела 8.1. Површине просторија и спољних зидова *

| | Површина пода (m ²) | Површина спољног зида (m ²) |
|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| Дневна соба | 31.46 | - |
| Купатило | 2.95 | - |
| Спаваћа соба (x2) | 8.6 | - |
| Кров | - | 43.37 |
| Северни зид | - | 26.4 |
| Источни и западни зид (појединачно) | - | 23.46 |
| Укупно | 51.61 | 116.69 |

*73.32 m² површина спољног зида + 43.37 m² површина крова

Што се тиче прозора, кућа има два прозора, један мали у купатилу и један у спаваћој соби 1, и има 7 врата од којих су 3 спољашња. Спаваћа соба 1 је окренута ка истоку, док је спаваћа соба 2 окренута ка западу.

Промена ваздуха у кући је 2 измене на сат времена [163].

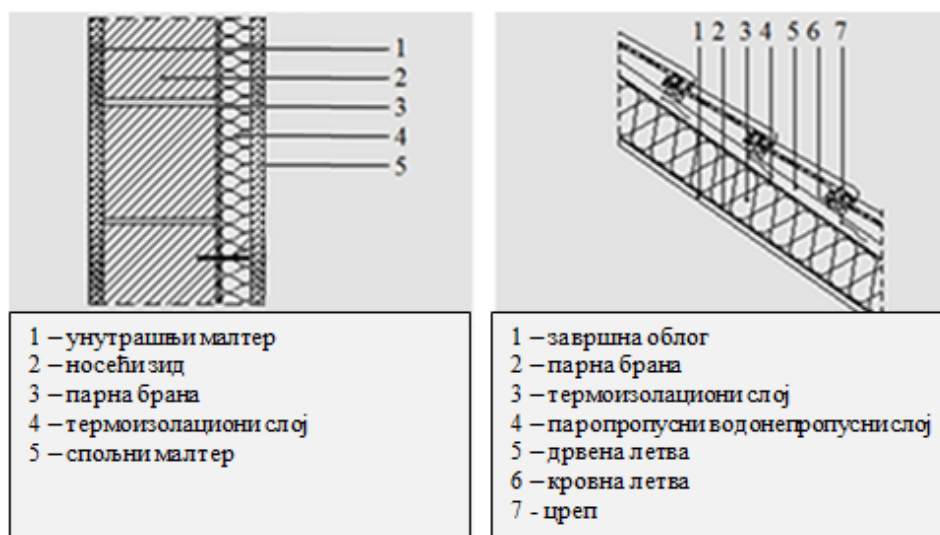
8.2. Грејање куће

По српским стандардима за грејање [164], жељене температуре у просторијама при којима је најбољи осећај комфора су 20 °С за дневну и спаваће собе, и 22 °С за купатило. Кућа се греје од 6:00 до 22:00. Од 22:00 до 06:00 се дневна соба и спаваће собе греју до температуре од 16 °С. За грејање се користе електрични радијатори са термостатским вентилима.

Систем за грејање је усклађен са стандардним процедурама у литератури [164]. По њој су још и температуре грејања у WC и ходницима 15 °С. По новом правилнику за енергетску ефикасност U фактор (коэффициент пролазности топлоте за спољашњи зид) за нове куће треба да буде $U < 0.3$, док је код кућа за које се ради обнављање потребно да буде $U < 0.4$ [10]. У највећем броју случајева жељена температура се постиже у првих пола сата. Термостатски вентили чувају енергију тако што искључују електричне грејаче када се достигне жељена температура, а поново их укључују када температура падне испод жељеног нивоа.

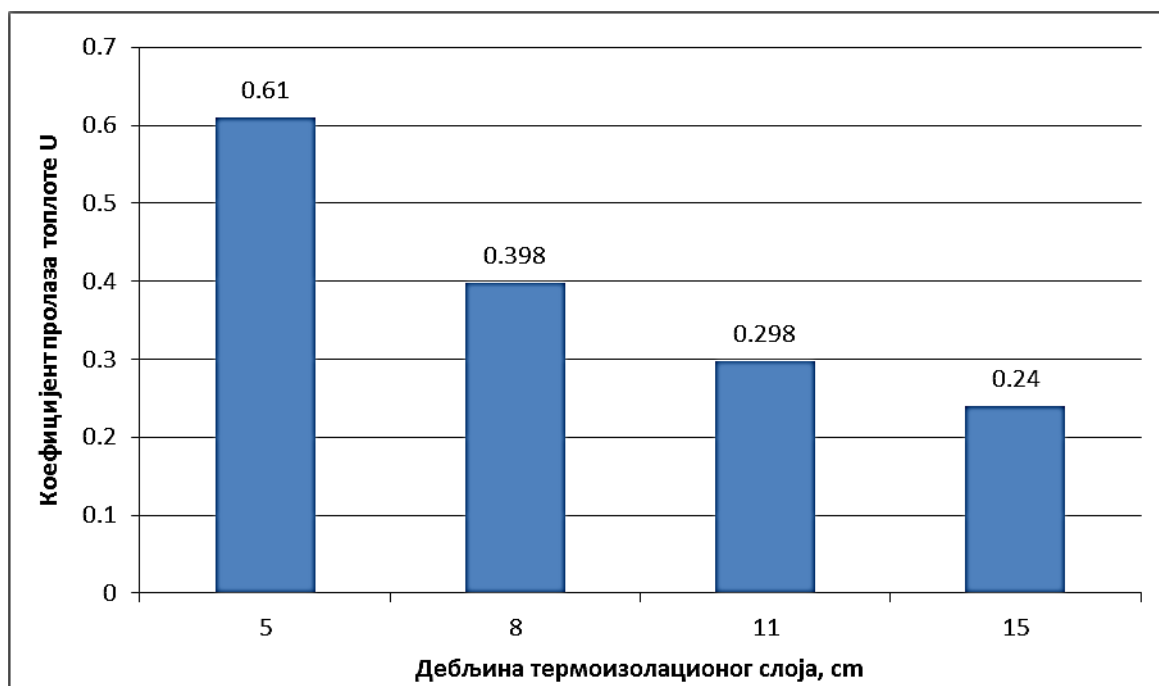
8.3. Спољашњи зид

За потребе куће у Србији, узете су конструкције спољашњег зида по препоруци URSA [165] и ово је нека уобичајена конструкција у балканским земљама. На слици 8.2 су приказане ове конструкције. На слици 8.2 термоизолациони слој код спољњег зида је обележен бројем 4 (лево), док је термоизолациони слој код крова обележен бројем 3 (десно).



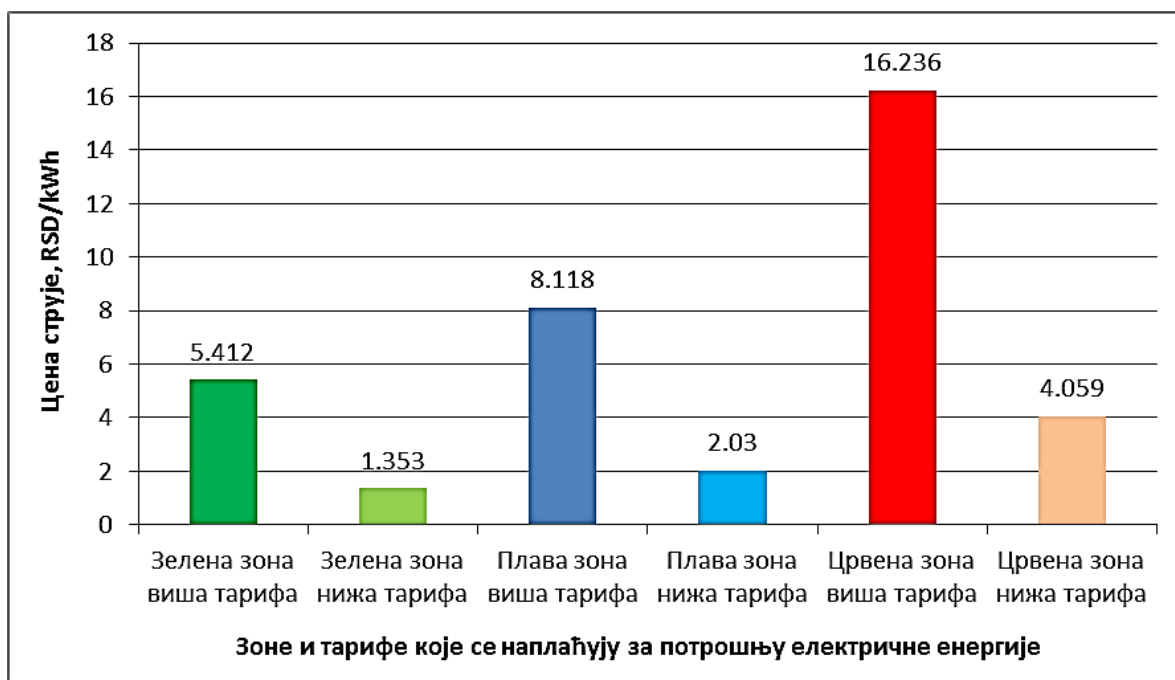
Слика 8.2. Спољни зид (лево) и кров (десно) по препоруци URSA [165]

Како би се овом конструкцијом задовољили стандарди и регулативе наведене у подглављу 8.2 на слици 8.3 је дат однос потребне дебљине, за дати коэффициент провођења топлоте. Са слике се види да је по старом стандарду потребно 5 центиметара дебљине $U=0,61$. По новој регулативи при реновирању куће ($U < 0,4$) је потребно 8 центиметара дебљине термоизолације, док је за потпуно нову кућу по новој регулативи ($U < 0,3$) потребно 11 центиметара дебљине термоизолационог слоја [10].



Слика 8.3. Потребне дебљине термоизолационог слоја по старом стандарду и новој регулативи у зависности од коефицијента пролаза топлоте

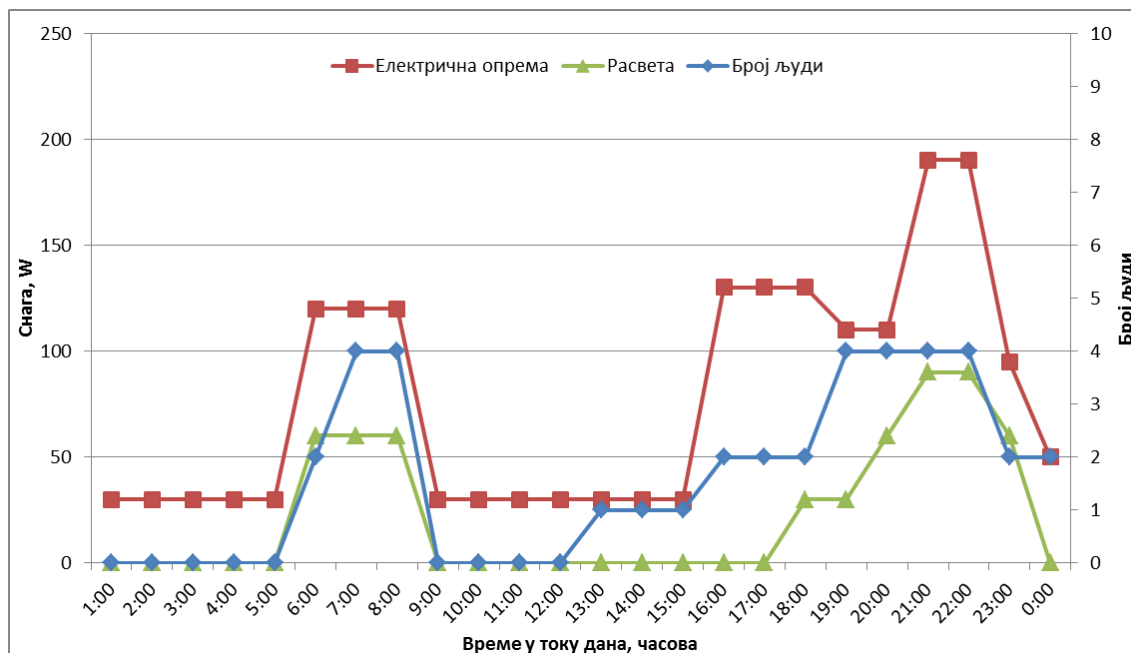
Цена струје је у овом случају узета код двотарифних потрошача, која је најчешћа у цивилном сектору [166]. Цена струје је дата на слици 8.4 по тарифама и зонама. Нижа тарифа се користи током ноћи, док се виша тарифа користи током дана. У највећем броју случајева активна је виша тарифа јер се у овим симулацијама у том периоду греје и хлади. Зелена зона је за потрошаче који троше мање од 350 kWh месечно, плава зона је за потрошаче који користе између 350 kWh и 1600 kWh месечно, док је црвена зона за кориснике који троше више од 1600 kWh месечно.



Слика 8.4. Цена струје у Србији за домаћинства у динарима по kWh

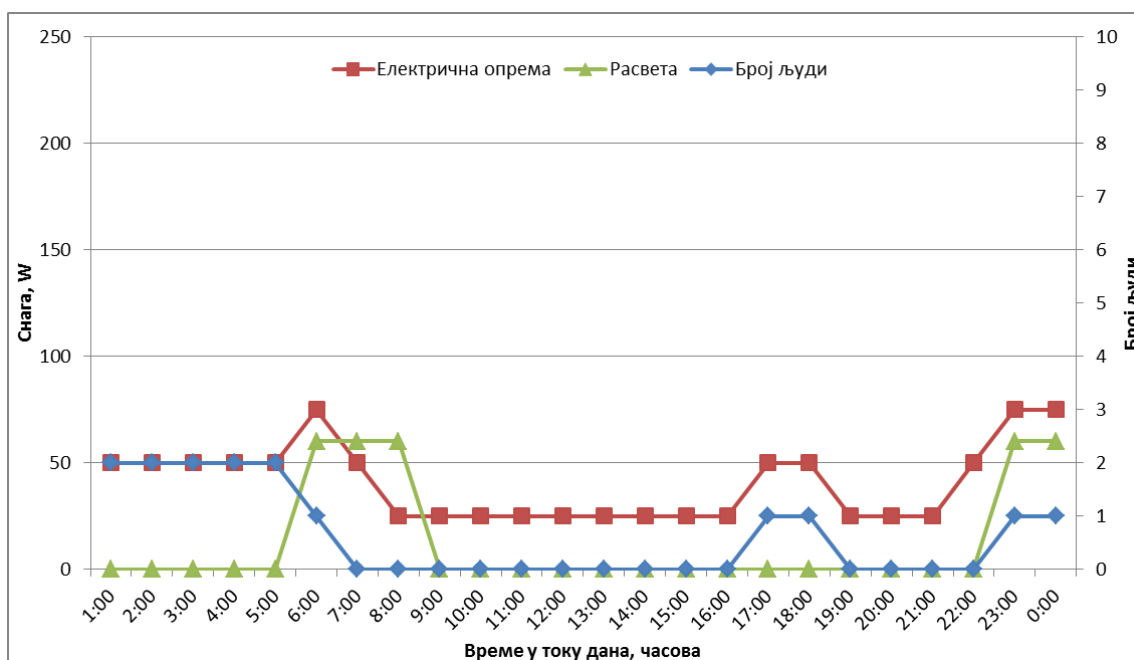
8.4. Распреди потрошње електричних уређаја и осветљења у кући

Како би кућа била приближнија што реалнијем понашању људи, и како би динамички модел био што прецизнији, коришћени су подаци добијени анкетом. На слици 8.5 је приказан распоред потрошње електричних уређаја, заједно са распоредом потрошње електричне енергије за осветљење у дневној соби.



Слика 8.5. Распоред потрошње електричних уређаја и осветљења, са бројем људи у дневној соби току радног дана

На слици 8.6 се налази распоред потрошње електричних уређаја и осветљења у спаваћој соби током радног дана.



Слика 8.6. Распоред потрошње електричних уређаја и осветљења, са бројем људи у спаваћој соби у току радног дана

8.5. Примењени фотонапонски панели

Фотонапонски систем инсталиран на крову куће, састоји се од серијски везаних фотонапонских панела. При симулацијама зграде са ФН панелима коришћен је Simple модел ФН панела ћелијске ефикасности 12 %. Код примене овог модела, корисник има директан приступ вредности ћелијске ефикасности тако да може произвољно да је мења. У циљу генерисања што веће количине електричне енергије ФН панели заузимају 50% површине крова. Како нема засенчења ФН панела, и ФН панели не поседују систем којим би се окретали како би пратили кретање Сунца, може се рећи да је произведена количина електричне струје из ФН панела сразмерна површини коју ФН панели заузимају.

На основу истраживања *Alsema-e* [167], *Bankier* и *Gale* [168] дају литературни преглед уграђене енергије различитих фотонапонских модула, без оквира и са алуминијумским оквиром, пратећим елементима и инвертором. Такође је дато и њихово енергетско време отплате. Резултати истраживања су дати у табели 8.2. *Alsema* [167] наводи да је средња дужина животног века фотонапонских система између 20 и 30 година, док *Bankier* и *Gale* [168] наводе да она износи између 25 и 30 година.

Табела 8.2. Уграђена енергија и енергетски период отплате за различите врсте фотонапонских модула

| Тип ФН модула | Уграђена енергија ФН модула (MJ/m ²) | Уграђена енергија ФН модула са рамом (Al), пратећим елементима и инвертором (MJ/m ²) |
|---------------|--|---|
| mc-Si | 4200 | 5400 |
| Sc-Si | 5700 | 6900 |
| a-Si | 1200 | 2400 |

9. Експериментално истраживање

За потребе верификације нумерички развијених модела, који ће бити приказани у поглављу 10 и 11, направљен је експериментални модел кућице која је испитивана у лабораторијским условима. Ова експериментална инсталација је коришћена први пут у раду Цветковића [169], која је за потребе ове дисертације унапређена. Модел представља умањену верзију кућице на два нивоа. Због економске изводљивости и могућности извођења у лабораторијским условима кућица је имала димензије које би стале у клима комору која се налази у просторијама факултета. Кућица има изведено зидно грејање помоћу грејних каблова које представља једну од економичнијих варијанти грејања. Мерења су вршена за различите дебљине термоизолације које испуњавају старе стандарде, и потребне дебљине изолација по новом стандарду, односно 5cm, 8cm и 11cm.

Резултати мерења су међусобно упоређени и успостављени су односи по којем се мења потрошња електричне енергије потребне за грејање у односу на примењену дебљину термоизолације. Такође, испитивања су вршена и за различите температуре спољашње средине (температуре задате у клима комори). Коришћене су температуре од 4 °C, 1 °C, -2 °C, и -5 °C. Резултати су показали очекивано мању потрошњу електричне енергије са повећањем дебљине термоизолационог слоја.

На крају, направљен је симулациони модел у софтверу *EnergyPlus* – у који је искоришћен за проверу експерименталних мерења и упоређивање разлике симулационих резултата са стварним мерењима. На основу добијених резултата урађена је калибрација симулационог модела како би резултати били што ближи реалним и како би се смањила грешка у симулацији.

9.1. Инсталација експерименталне кућице и коришћена мерна опрема

Експериментална истраживања су вршена на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, највећим делом у просторијама Лабораторије за моторна возила где се налази клима комора у коју је смештена експериментална кућица са опремом за загревање, прављена у просторијама Лабораторије за термодинамику и термотехнику. За добијање резултата су још коришћене и мерна опрема и опрема за прикупљање података.

Клима комора се налази у оквиру просторија Лабораторије за моторна возила и то у просторији димензија 3500x5500x3800 mm. Клима комора димензија 1500x1500x1800 mm представља расхладну комору која има два испаривача унутар коморе који су повезани са ваздушним чилером. На слици 9.1 је приказана клима комора на којој се виде врата за улаз у комору, сензор за читавање и одржавање температуре унутар коморе, као и компресор и ваздушни чилер. Сама просторија има додатну вентилацију која измењује ваздух и хлади просторију што је повољно за рад самог компресора и ваздушног чилера.

Услед величине просторије у којој се налази клима комора, а зарад очувања мерне опреме и саме клима коморе препоручено је да се комора не хлади на веће температуре од -5°C. На самој комори се као што је већ поменуто налази ПИД

регулатор типа *XMTF-308* компаније *Yuyao Gongyi Meter*, који је приказан на слици 9.2. Он поседује могућност очитавања температуре у реалном времену, и паљења и гашења компресора и чилера како би се температура константно одржавала на жељеном нивоу. То значи да сама комора може да симулира константне спољне услове са константном температуром. Тиме се постижу прецизна мерења за различите дебљине термоизолационог слоја при истим условима, а самим тим се побољшавају и добијени резултати и њихова валидност.

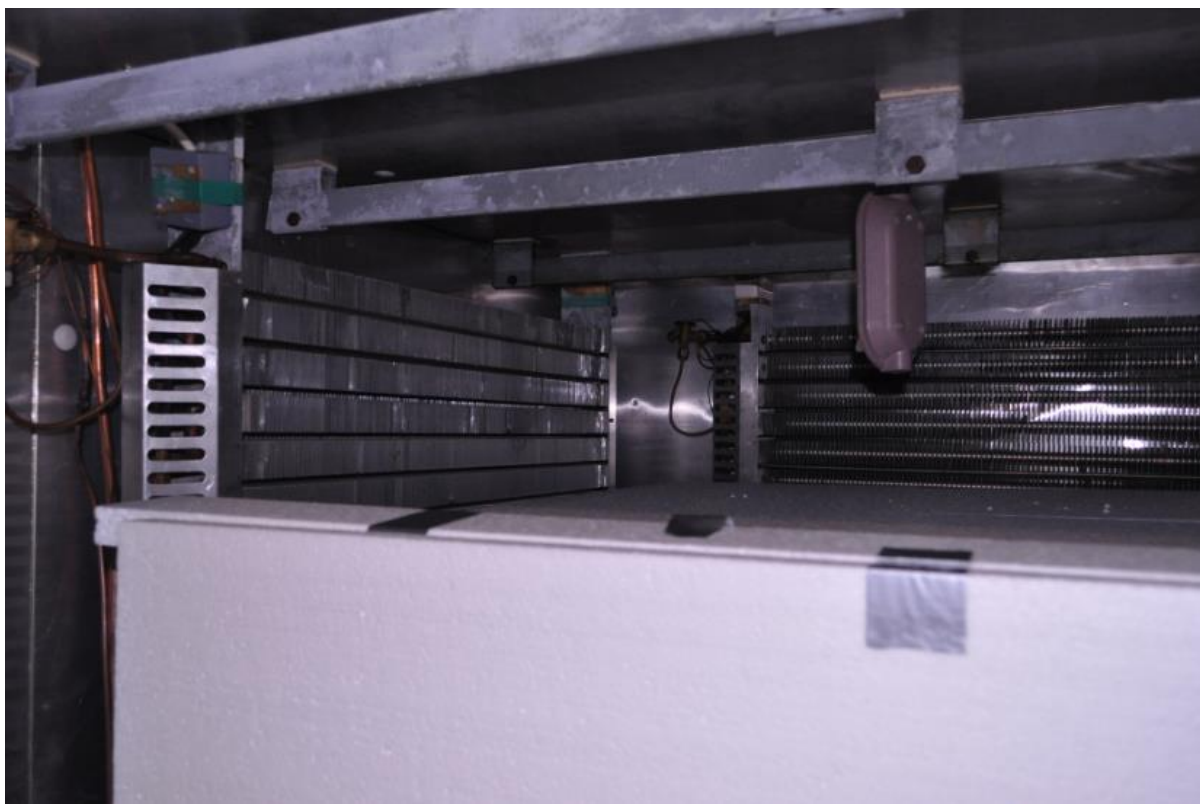


Слика 9.1. *Клима комора*



Слика 9.2. *Пид регулатор XMTF-308 за одржавање температуре у клима комори*

Испаривачи који се налазе унутар коморе без проблема одржавају жељене температуре задате експерименталним испитивањима. Довољно су великих димензија и приказани су на слици 9.3.



Слика 9.3. Испаривачи унутар клима коморе

Експериментални модел кућице, приказана на слици 9.4, се састоји из две мање коморе, просторије, које су истих димензија и налазе се једна на другој. Појединачне димензије кутија које представљају просторије су 650x800x1000 mm, при чему димензија од 650 mm представља висину просторије. Укупна висина експерименталне кућице је 1300 mm. На обе просторије се налази по прозор који је представљен плексигласом и димензија је 300x200 mm.

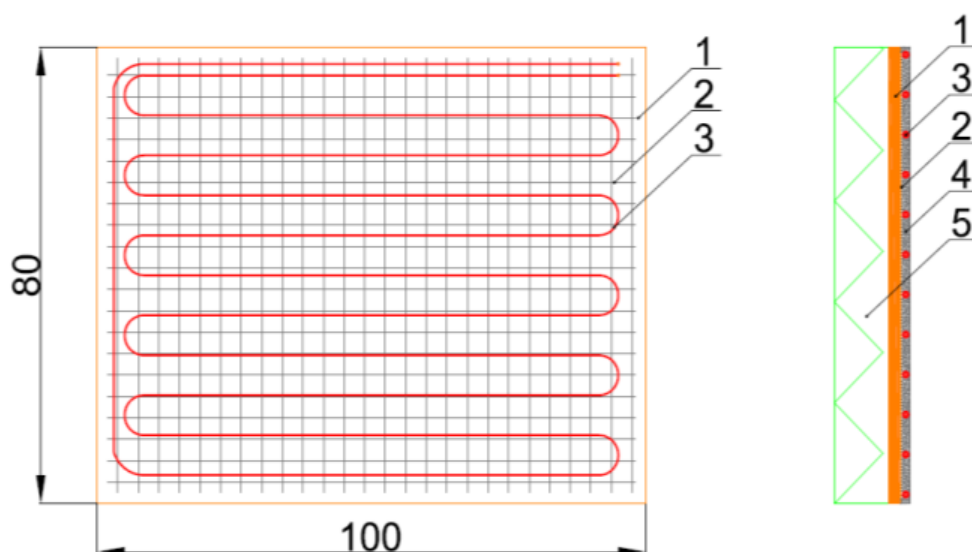
Сама просторија се греје помоћу грејних панела који се налазе на бочном зиду. Помоћу њих се постиже и одржава температура унутар експерименталне кућице. Са спољне стране се налази термоизолациони слој од стиропора.

Кућица је осмишљена тако да представља умањени систем који је погодан за додавање термоизолације са спољне стране како би се постигли жељени ефекти у мерењу потрошње електричне енергије у зависности од дебљине термоизолације. Термоизолациони слој се лако наноси, додавањем стиропорских плоча дебљине 3 cm на постојећу изолацију од 5 cm, како би се постигла дебљина од 8 cm, а касније следи ново додавање стиропорских плоча од 3 cm како би се постигла дебљина од 11 cm која је довољна како би се испунили стандарди које прописује нови правилник.



Слика 9.4. Експериментална кућица у комори

Грејна тела, у овом случају, грејни панели се у основи састоје од грејних каблова. Грејни кабл је постављен на ПВЦ мрежицу која је хефтањем причвршћена за неоплемењену иверицу дебљине 18 mm, иза које се ка спољашњости налази термоизолациони слој од стиропора дебљине 50 mm. Са унутрашње стране се преко грејних каблова поставља танак слој малтера дебљине 5 mm преко које иде јупол завршна обрада. Малтер и завршна обрада су постављени преко каблова како би се топлота хомогено распростирала дуж грејног панела. На слици 9.5 је приказана конструкција панела.



Слика 9.5. Конструкција грејача [169]

Растер полагања грејног кабла је 50 mm. Конструкција је направљена и тестирана пре завршног склапања кућице. На слици 9.6 је приказана монтажа грејног кабла на грејни панел.



Слика 9.6. *Монтажа грејног кабла [169]*

Сам грејни кабл приказан на слици 9.7 спада у групу грејних каблова са редним отпором и састоји се од топлотног проводника, пробојне изолације на бази флорполимера, керамичке траке, никловане бакарне облоге и спољног омотача флорполимера. Топлотна снага грејног кабла је 17 W/m, а дебљина електричног грејног кабла је 3.5 mm. Минимални радијус савијања је 5D. Произвођач кабла је ФКС Јагодина.



Слика 9.7. *Грејни кабл*

Сама мерна процедура се заснива на мерењу потрошње електричне енергије, како би се у просторијама одржавала задата температура коришћењем мерне опреме, која је приказана на слици 9.8. Спољашњи услови су постигнути клима комором, а онда се приступало загревању просторија. Када је температура постигнута, праћена је

потрошња електричне енергије. Грејни панели су повезани на регулаторе температуре марке *XMTF-308*. Мерни регулатори су приказани на слици 9.9 Они раде на принципу укључено-искључено и добијају вредност температуре из унутрашњости просторија помоћу сонде ПТ100. Када је жељена температура постигнута, панели гасе напајање струјом електричних каблова помоћу аутотрансформатора који је приказан на слици 9.10. У случају пада температуре, електрично напајање панела се опет остварује.



Слика 9.8. Мерна опрема



Слика 9.9. Регулатор температуре *XMTF - 308*



Слика 9.10. Аутотрансформатор

Карактеристике терморегулатора су дате у табели 9.1, док се карактеристика ауотрансформатора налази у табели 9.2.

Табела 9.1. Карактеристика ауотрансформатора

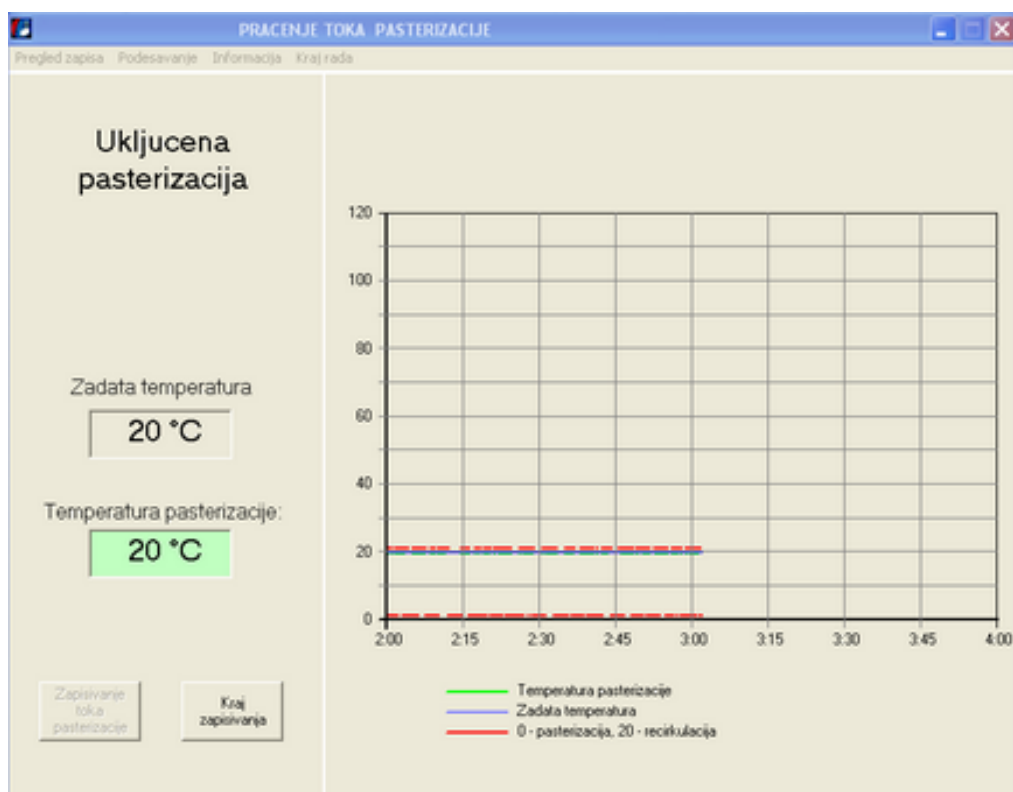
| | |
|----------------|---------------|
| Тип | ИСКРА ТРН 110 |
| Улазни напон | 220 V |
| Излазни напон | 0-320 V |
| Називна струја | 4A |

Табела 9.2. Карактеристика терморегулатора

| | |
|------------------|---------------------|
| Тип | ХМТ – 808 series |
| Време одзива | < 0.5 s |
| Потрошња | < 4W |
| Комуникација | RS 485 RS 232 |
| Врста регулације | 1. On/off 2. PID |

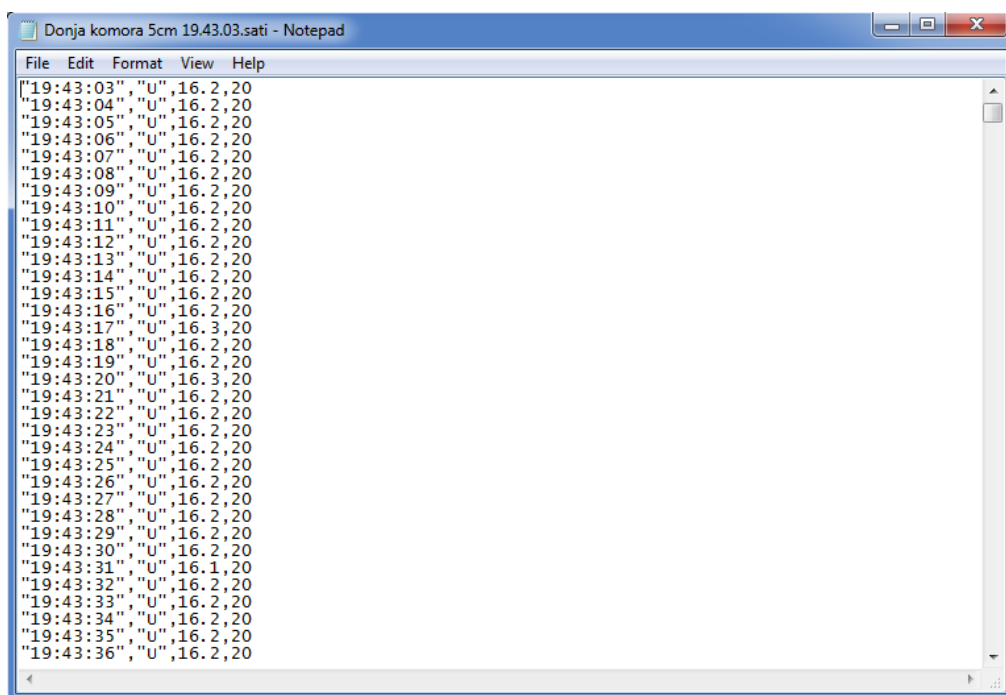
Током регулације температуре, терморегулатори комуницирају са рачунаром и вредности потрошње и паљења и гашења грејних панела се записују у току времена. Тиме се подаци аутоматски сакупљају и обрађују. Резултати ових истраживања су приказана у поглављу 9.2.

На слици 9.11 је приказан софтвер који прикупља податке о потрошњи енергије.



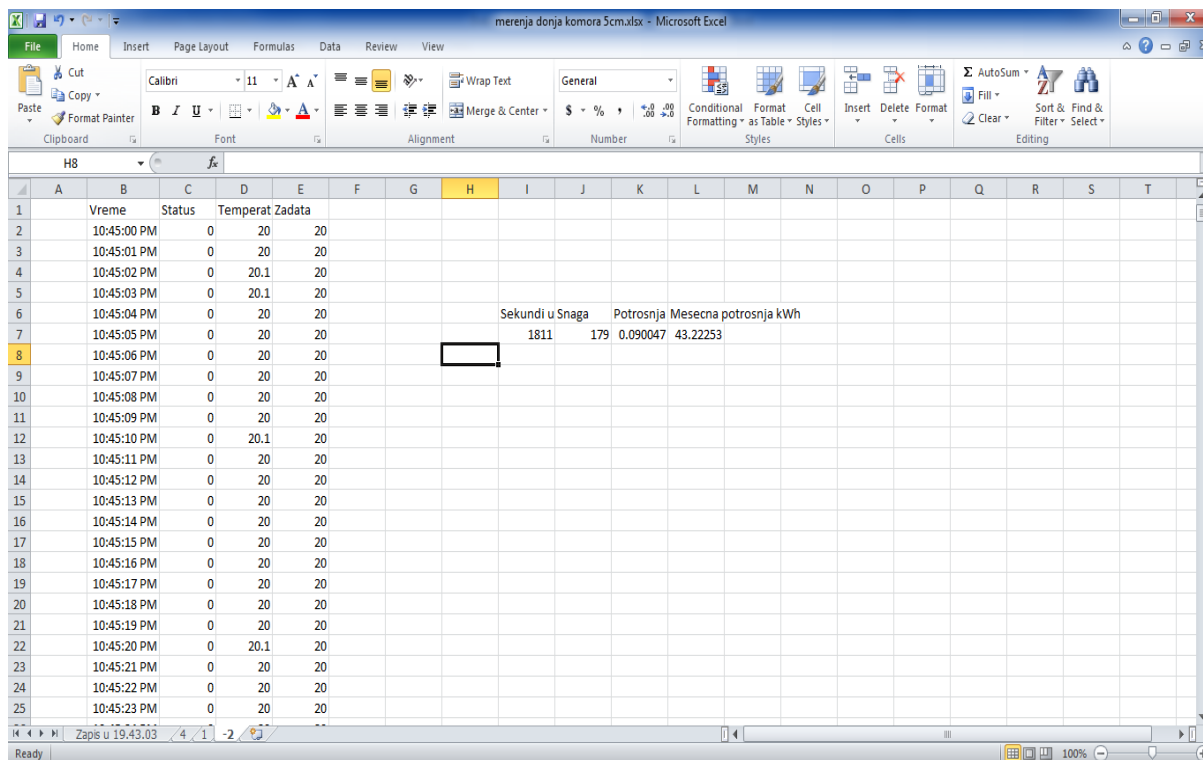
Слика 9.11. Софтвер за прикупљање података екперименталних испитивања

На слици 9.12 су приказани излазни резултати везани за терморегуlator из текстуалног фајла. Ови резултати показују време, статус регулатора, температуру у просторији и задату температуру.



Слика 9.12. Пример резултата добијених мерењем у оквиру текстуалног фајла

За сваку комору су се добијали посебни резултати и за сваку задату температуру спољашње средине. Касније су ови резултати преводили у Excel форму и обрађивали. Приказ таквог фајла дат је на слици 9.13.



Слика 9.13. Обрада резултата у Excel фајлу када се резултати преведу у форму

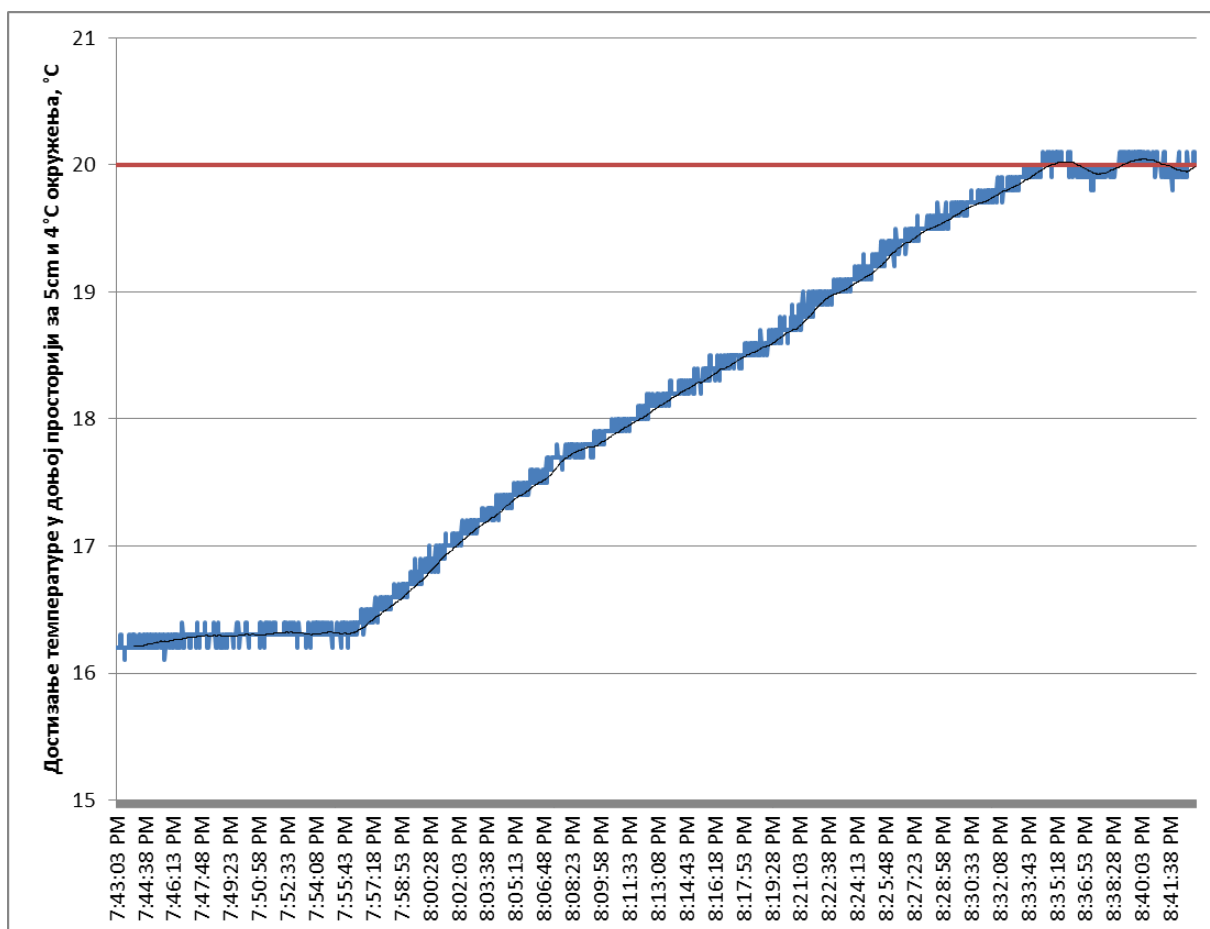
9.2. Резултати добијени испитивањем експерименталне кућице

Као што је већ речено у оквиру експерименталних испитивања прикупљени су подаци о потрошњи електричне енергије за случајеве кад дебелина термоизолационог слоја износи 5, 8 и 11 cm, за температуре од 4°C, 1°C, -2°C, и -5°C. Мерења за сваку температуру су износила по 2 сата при стабилним условима. Резултати су показали очекивано мању потрошњу електричне енергије са повећањем дебелине термоизолационог слоја.

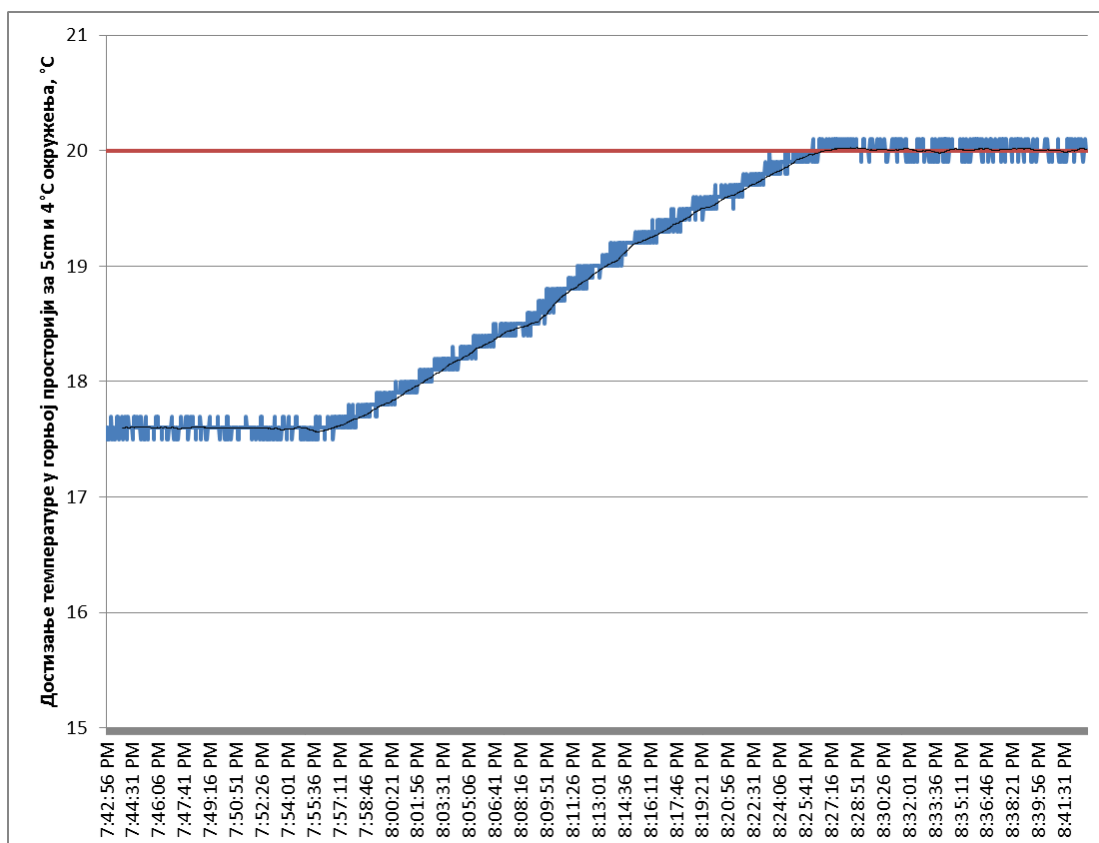
9.2.1 Анализа експерименталних резултата на примеру дебелине термоизолације од 5 cm и спољне температуре од 4°C

Количина утрошене енергије потребне за загревање простора је у директној зависности од спољне температуре и дебелине термоизолационог слоја. У овом случају је такође у зависности од положаја просторије, тј. да ли је горња или доња комора, јер се са доње стране налази бетонски под.

На сликама 9.14 и 9.15 су приказане температуре у коморама на почетку загревања просторија. Приметно је да је чак и почетна температура у горњим просторијама већа, што је и очекивано услед већ наведених услова.

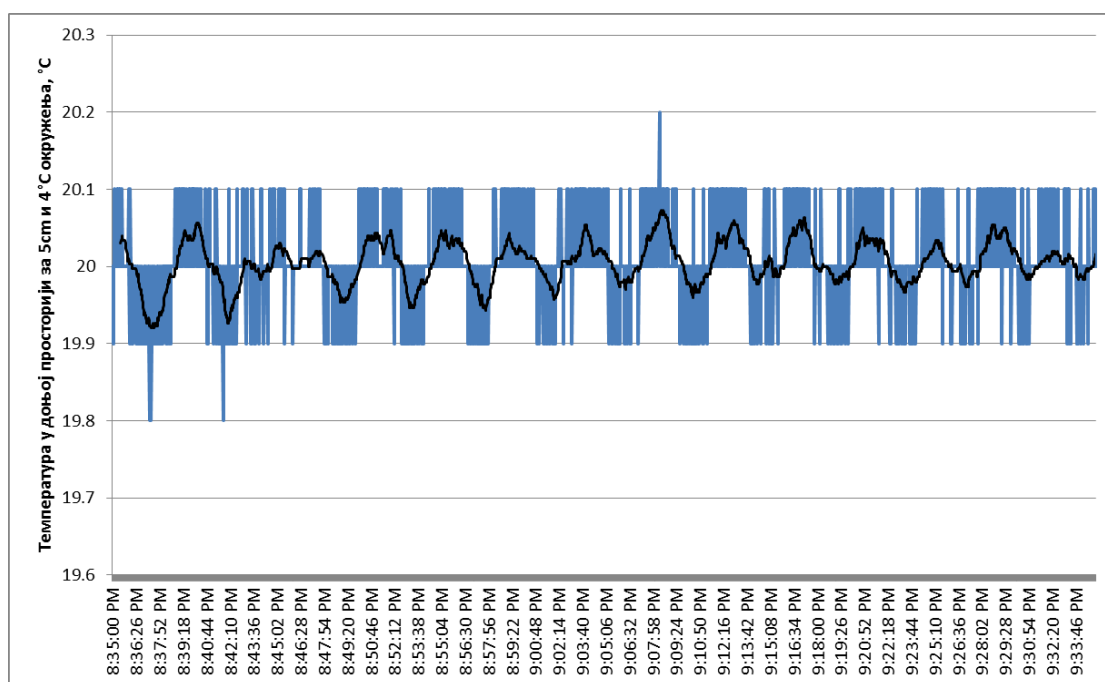


Слика 9.14. Достигање температуре на почетку мерења у доњој комори при температури од 4°C и дебелини термоизолације од 5 cm



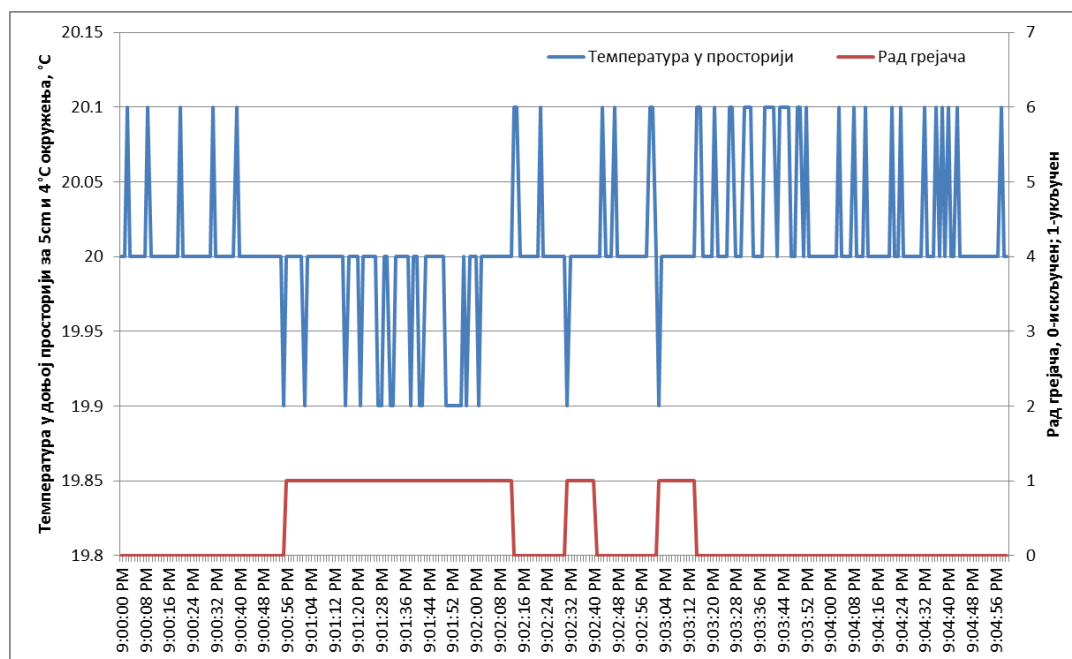
Слика 9.15. Достизање температуре на почетку мерења у горњој комори при температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm

На слици 9.16 приказано је одржавање температуре у доњој комори током једног сата. Приметно је да температура варира у опсегу $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, што је скоро идеално одржавање температуре. Томе доприноси и квалитет уграђених сензора.



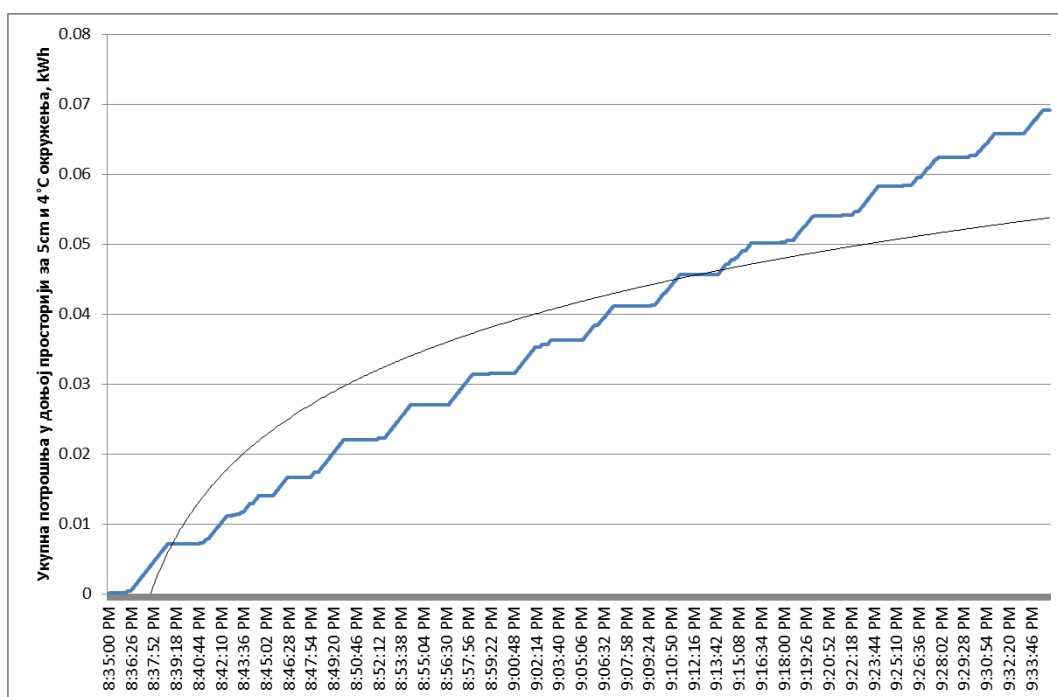
Слика 9.16. Одржавање температуре у доњој комори при температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm

На слици 9.17 је приказан однос између температуре у просторији и укључивања и искључивања грејача у датој просторији у току 5 минута. Поједине скокове температуре можемо објаснити и утицајем друге просторије због пролаза топлоте кроз слојеве који раздвајају просторије.



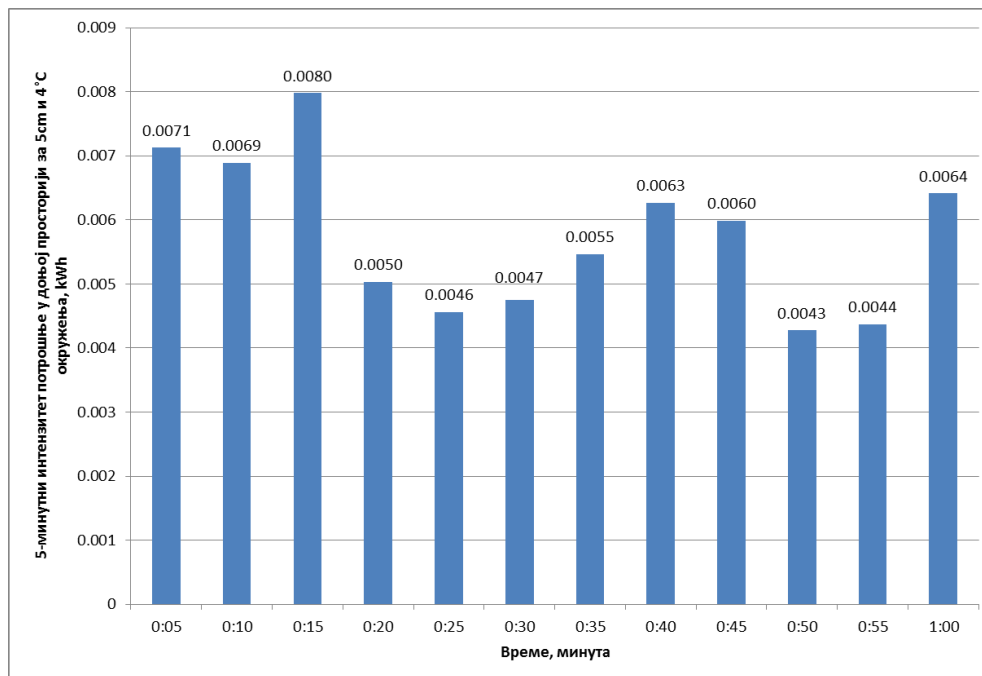
Слика 9.17. Укључивање и искључивање грејача у зависности од унутрашње температуре у доњој комори при спољној температури од 4°C и дебелини термоизолације од 5 cm

Кретање потрошње енергије у доњој просторији је дато на слици 9.18. Приметно је да је потрошња директно повезана са паљењем и гашењем грејача.



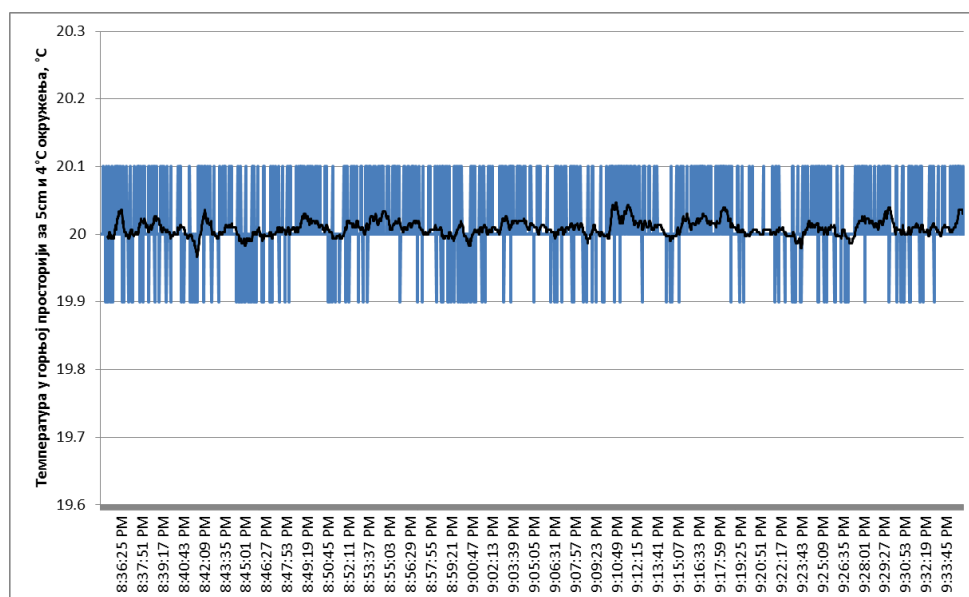
Слика 9.18. Укупна потрошња енергије у доњој комори при температури од 4°C и дебелини термоизолације од 5 cm

На слици 9.19 је приказан 5-минутни интензитет потрошње у доњој просторији при спољашњој температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm. Потрошња је слична, али је приметно да како време одмиче сами зидови акумулирају више енергије, па потрошња временом опада. То је још један битан ефекат који је примећен током експерименталног дела, а био је очекиван.

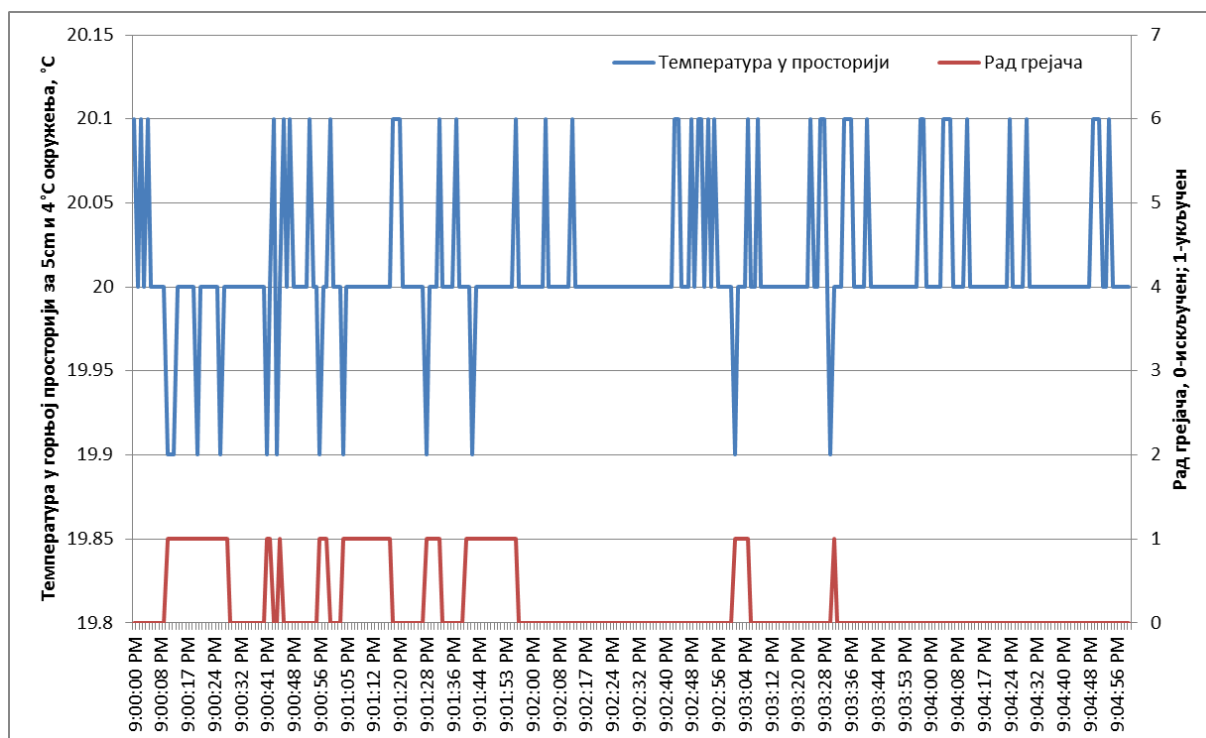


Слика 9.19. 5-минутни интензитет потрошње енергије у доњој комори при спољашњој температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm

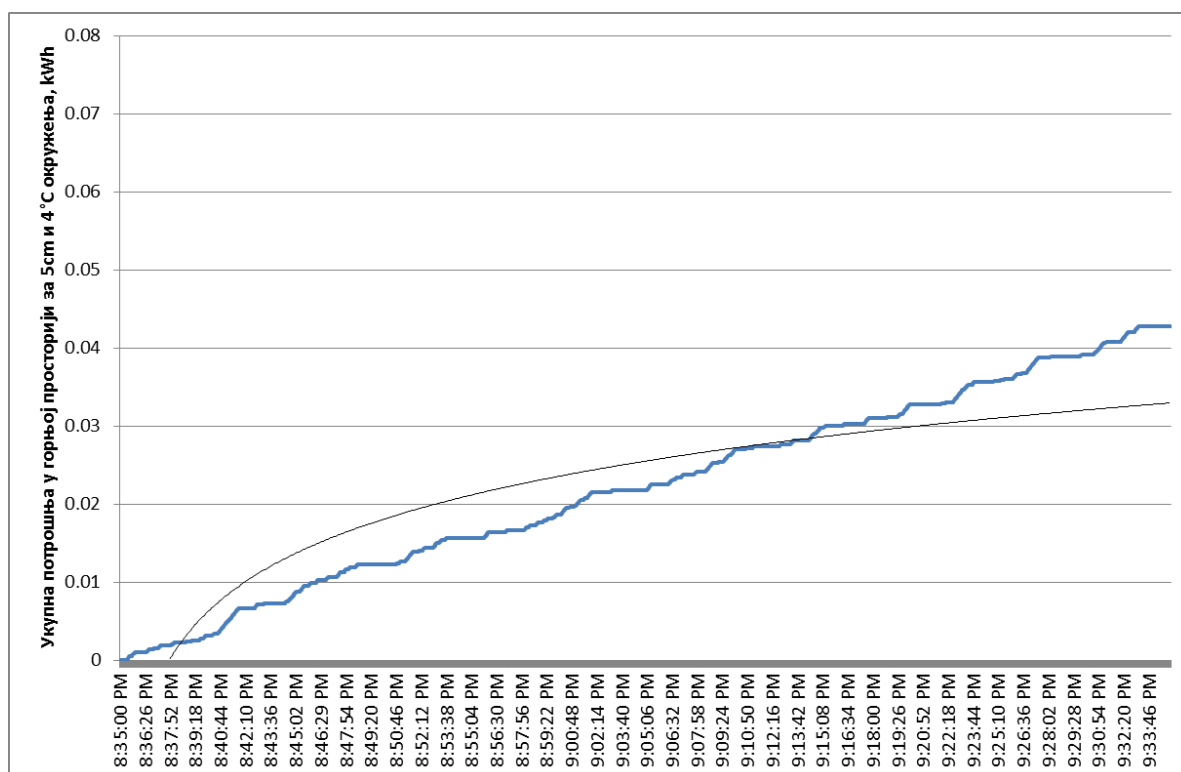
На сликама 9.20-9.23 су приказани подаци за горњу комору истог карактера, док су подаци на сликама 9.16-9.19 дати за доњу комору. У оквиру тих резултата се види да је потрошња у горњој комори мања и тај ефекат је пратио резултате при свим температурама и дебљинама термоизолације током целог експерименталног дела.



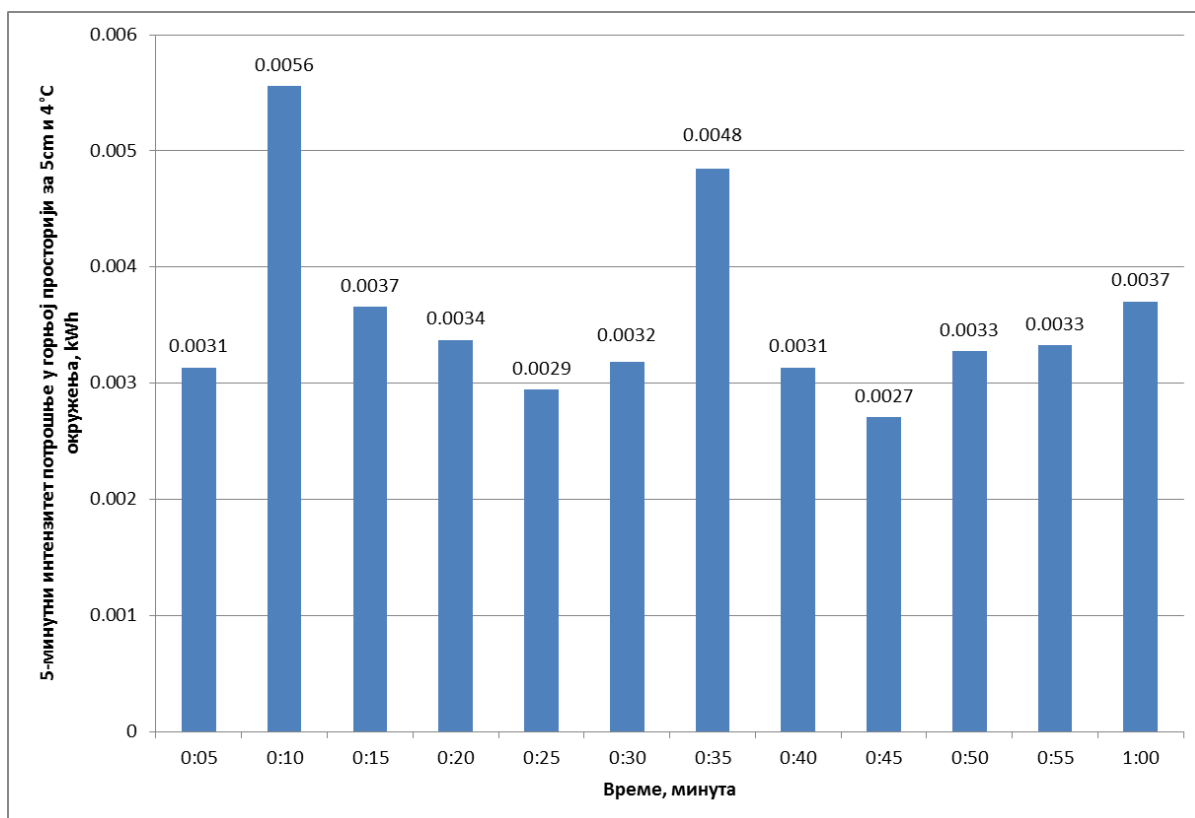
Слика 9.20. Одржавање температуре у горњој комори при температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm



Слика 9.21. Укључивање и искључивање грејача у зависности од унутрашње температуре у горњој комори при спољној температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm



Слика 9.22. Укупна потрошња енергије у горњој комори при температури од 4°C и дебљини термоизолације од 5 cm



Слика 9.23. 5-минутни интензитет потрошње енергије у горњој комори при спољашњој температури од 4°C и дебелини термоизолације од 5 cm

9.2.2. Поређење резултата за примењене дебљине термоизолационог слоја и спољашње температуре

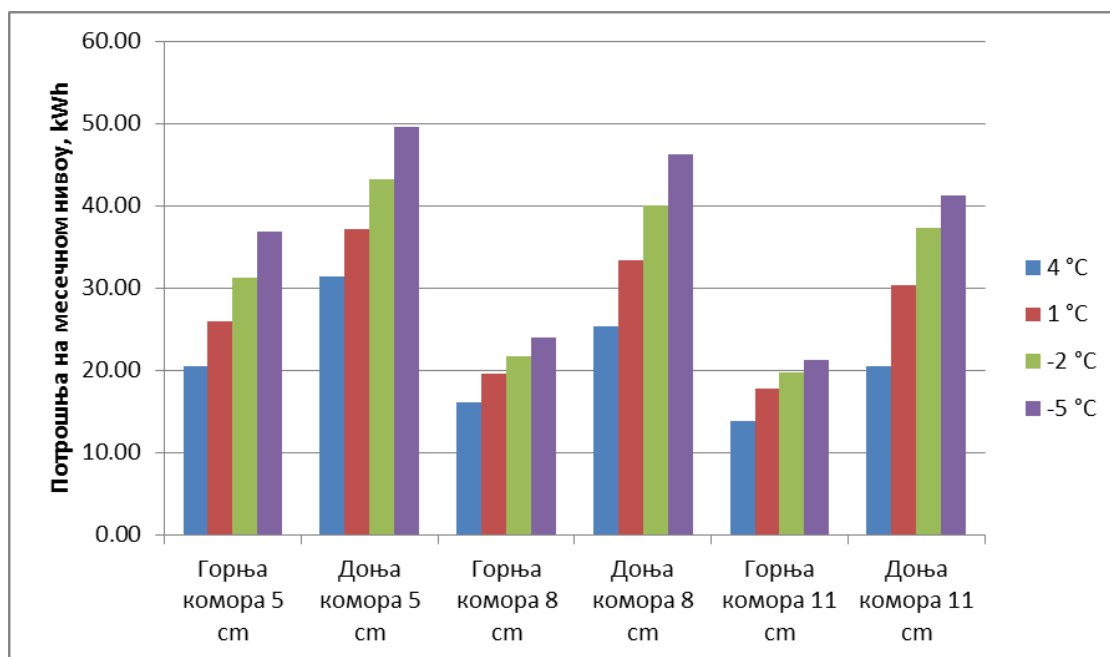
Анализом добијених резултата примећено је да експериментални модел одговара реалном стању и да са повећањем дебљине изолације опада потрошња енергије, што је приказано на слици 9.24. Истовремено, види се да са мањом спољном температуром енергија потребна за загревање простора опада. Ови резултати су очекивани.

Резултат који је присутан кроз сва испитивања и у каснијим деловима ове дисертације је да са повећањем дебљине термоизолационог слоја сваки следећи центиметар термоизолационог слоја има мањи утицај него претходни.

У просеку при промени дебљине изолације са 5 центиметара на 8 центиметара уштеда енергије је око 22%, док је при промени дебљине изолације са 8 центиметара на 11 центиметара уштеда око 15%. Наравно величина уштеде зависи и од спољашње температуре. Са нижом спољашњом температуром, уштеда при мањим дебљинама изолације је већа.

Такође је примећено и да је за загревање горње коморе било потребно мање енергије. Са порастом дебљине термоизолационог слоја ова разлика је постајала све већа. Разлог за овакве резултате се налази у конструкцији како кућице тако и клима коморе у којој се кућица налазила. Наиме, дебљина термоизолационог слоја је повећавана свуда са спољне стране изузев на поду доње коморе, која се ослања на под

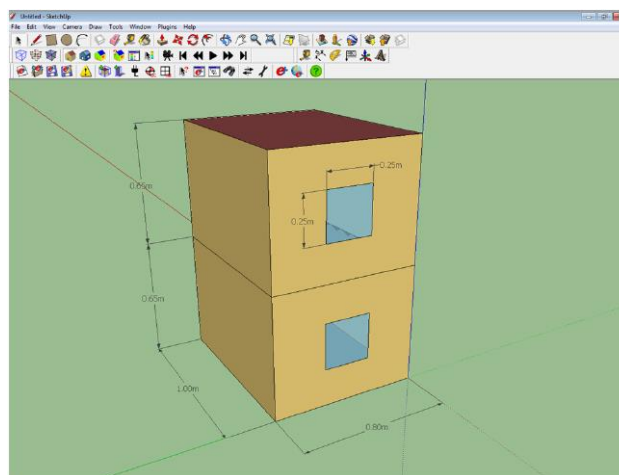
клима коморе. Такође, под клима коморе је бетонски и то је додатно утицало на овај ефекат.



Слика 9.24. Потрошња на месечном нивоу за све дебљине термоизолационог слоја при различитим температурама спољашње средине

9.2.3. Упоредна анализа резултата добијених експериментом и моделом у софтверу EnergyPlus

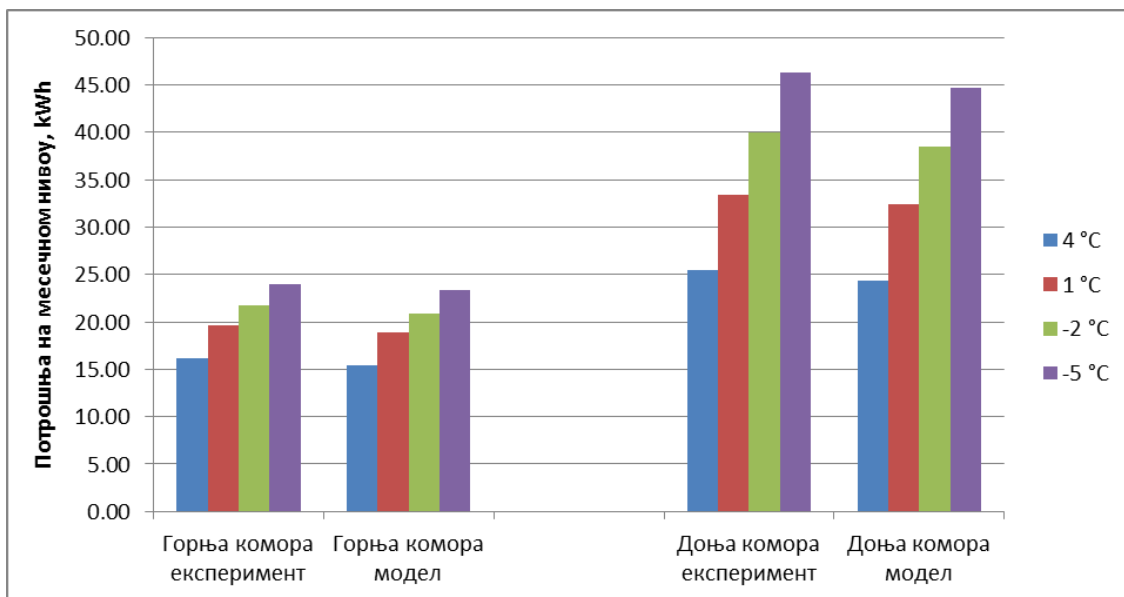
У EnergyPlus-у направљен је модел који је верна копија експерименталне кућице. На слици 9.25 је приказан модел експерименталне кућице који је коришћен за верификацију експерименталних резултата.



Слика 9.25. Модел експерименталне кућице у Energy Plus-у [169]

Модел кућице је креиран у софтверском пакету GoogleSketchUp због олакшаног формирања геометрије објекта, а затим су коришћењем EnergyPlus софтвера дефинисани сви преостали детаљи као што су: материјали, конструктивни склопови, рад термостата, задате температуре, панелни системи грејања и сл.

Резултати су верификовани за дебљину термоизолационог слоја од 8 центиметара, при свим коришћеним спољашњим температурама код експерименталног модела. При верификацији је коришћен нови метеоролошки фајл, који је симулирао тренутно стање у клима комори. Резултати приказани на слици 9.26 показују да је одступање мање од 5%, па се самим тим може закључити да софтвер *EnergyPlus* верно осликава реално стање.



Слика 9.26. Поређење резултата добијених експериментом и симулационим моделом

У табели 9.3 су детаљно приказани резултати добијени експериментом и симулационим моделом, као и процентуална вредност грешке између њих. Вредност грешке се креће у распону од 2,55% до 4,8%. И максимум и минимум грешке се јавља код горње коморе. Вредност грешке опада са опадањем температуре спољашње средине, па је могуће извести закључак да прецизност резултата симулационог модела расте са повећањем времена током којег су грејачи укључени. Како је потребно да се грејачи чешће укључују са смањењем температуре спољашње средине, тако и прецизност резултата симулације расте.

Табела 9.3. Поређење резултата потрошње на месечном нивоу добијених експериментом и симулационим моделом, kWh

| Спољашња температура | 4 °C | 1 °C | -2 °C | -5 °C |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Горња комора експеримент | 16.21 | 19.60 | 21.71 | 23.96 |
| Горња комора модел | 15.43 | 18.92 | 20.89 | 23.35 |
| Грешка симулације за горњу комору | 4.80% | 3.47% | 3.79% | 2.55% |
| Доња комора експеримент | 25.44 | 33.39 | 39.98 | 46.26 |
| Доња комора модел | 24.31 | 32.35 | 38.43 | 44.64 |
| Грешка симулације за доњу комору | 4.43% | 3.11% | 3.87% | 3.49% |

10. Компјутерске симулације и оптимизације

10.1. Кућа коришћена у симулацијама

За компјутерске симулације коришћена је кућа описана у глави 8, а предикција понашања станара куће је пројектована у односу на податке добијене у глави 6. Метеоролошки подаци су добијени на основу главе 7.

10.2. Математички модели

Истраживања у овој дисертацији на оптимизацији дебљине термоизолације код нето-нултих енергетских кућа су вршена у два правца. Дебљина термоизолације је оптимизована у зависности од укупне потрошене енергије која у обзир узима уложу енергију у саму изолацију, други правац је узимао у обзир оптимизацију са економског аспекта. Оптимизација ексергије се због самог приступа оптимизације са аспекта примарне енергије поклапа са њом. Изабрани модел куће се греје на струју и у оквиру трансформације финалне енергије у примарну постиже се иста оптимизација као и код оптимизације са аспекта ексергије.

10.2.1. Математички модел оптимизације укупне количине примарне енергије

Уложена енергија се у пракси не узима у обзир када се пројектује и прави кућа или зграда. Међутим, свеукупна енергетска ситуација у свету нам показује да би и овај аспект требало да буде заступљен. То се нарочито односи на куће ниске потрошње енергије. Наиме, у току животног циклуса кућа ниске енергетске потрошње, уложена енергија у њихову изградњу има већи удео него код стандардне куће [47]. Уложена енергија у термоизолацију се рачуна коришћењем следеће једначине:

$$E_{em,ti} = A_{ti} \cdot \delta_{ti} \cdot \rho_{ti} \cdot E_{em}. \quad (10.1)$$

Овде је $A_{ti} = 116.69 \text{ m}^2$ површина коју заузима термоизолациони слој (површина спољашњег зида и крова), δ_{ti} је дебљина термоизолационог слоја, ρ_{ti} представља густину термоизолационог материјала, док E_{em} представља специфичну уложу енергију за производњу једног килограма изабраног термоизолационог материјала.

Укупна количина годишње уложене енергије у термоизолацију представља укупну енергију уложу енергију у термоизолациони слој подељену са бројем година животног циклуса за који се симулација врши, као што је приказано у следећој једначини:

$$E_{a,em,ti,y} = E_{em,ti} / L_y. \quad (10.2)$$

Овде, L_y представља број година животног циклуса.

Годишња оперативна потрошња топлотне енергије представља годишњу потрошњу енергије електричних грејача у кући како би се одржала жељена температура у просторијама, и израчунава се по следећој једначини:

$$E_u = \sum_{d=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} E_{u,h,d} \quad (10.3)$$

где $E_{u,h,d}$ представља топлотну потрошњу у сату h , дана d .

Годишња потрошња оперативне примарне енергије за грејање представља годишњу потрошњу оперативне енергије за грејање куће помножену коефицијентом трансформације из примарне у финалну електричну енергију. У Србији, овај фактор је 3.04 [170]. На тај начин, годишња потрошња оперативне примарне енергије се рачуна по следећој једначини:

$$E_{u,p} = 3.04 E_u \quad (10.4)$$

Функција циља оптимизације је редуција годишње искоришћене примарне енергије. Она представља суму годишње потрошње оперативне примарне енергије за грејање и укупне годишње уложене енергије у термоизолацију, као што је представљено у следећој једначини:

$$E_{a,u,y} = E_{u,p} + E_{a,em,ti,y} \quad (10.5)$$

Укупна искоришћена примарна енергија је производ годишње потрошње примарне енергије и броја година животног циклуса:

$$E_{t,u,p} = (E_{u,p} + E_{a,em,ti,y}) \cdot L_y \quad (10.6)$$

Пет врста COP-а за уложену енергију се рачуна, да би се одредиле уштеде примарне енергије: $COP_{n,o}$, $COP_{s,o}$, $COP_{n,nr}$, $COP_{s,nr}$ и $COP_{s,x}$. Они нам дају информацију колико пута се примарна енергија штеди при реновирању термоизолације у току животног циклуса.

Када се на кућу која нема претходну термоизолацију наноси слој термоизолације оптималне дебљине користи се $COP_{n,o}$. Он представља однос сачуване примарне енергије по јединици уложене енергије у постављени слој термоизолације. Рачуна се по следећој једначини:

$$COP_{n,o} = (E_{t,u,p,y,n} - E_{t,u,p,y,o}) / E_{em,ti,o} \quad (10.7)$$

Овде, $E_{t,u,p,y,o}$ представља укупну искоришћену примарну енергију код куће са слојем оптималне дебљине термоизолације који је нанет при реновирању, $E_{t,u,p,y,n}$ представља укупну искоришћену примарну енергију код куће без термоизолационог слоја и $E_{em,ti,o}$ представља количину уложене примарне енергије у оптимални термоизолациони слој.

Када се термоизолациони слој оптималне дебљине наноси на већ изоловану кућу (стара регулатива – 5 cm), користи се $COP_{s,o}$. Претходно је кућа већ била изолована да задовољи старе стандарде у Србији. $COP_{s,o}$ се рачуна као:

$$COP_{s,o} = (E_{t,u,p,y,s} - E_{t,u,p,y,o}) / (E_{em,ti,o} - E_{em,ti,s}) \quad (10.8)$$

Овде, $E_{t,u,p,y,s}$ представља укупну искоришћену примарну енергију код куће са слојем дебљине термоизолације која задовољава старе стандарде, $E_{em,ti,s}$ представља

уложени примарну енергију у термоизолациони слој по старом стандарду од 5 центиметара. $COP_{s,o}$ даје уштеду примарне енергије по јединици уложене примарне енергије у додатну термоизолацију.

За куће које се реновирају по новој регулативи, неопходно је да кофицијент пролаза топлоте кроз спољне зидове буде мањи од $0.4W/K\cdot m^2$ [40]. У том случају је потребна дебљина термоизолационог слоја за овакав спољни зид 8 центиметара. Када се изолација наноси на неизоловану кућу користи се $COP_{n,nr}$. Он даје уштеду примарне енергије по јединици уложене примарне енергије у додатну термоизолацију у овом случају. Рачуна се по једначини:

$$COP_{n,nr} = (E_{t,u,p,y,n} - E_{t,u,p,y,nr}) / E_{em,ti,nr} \quad (10.9)$$

Овде, $E_{t,u,p,y,nr}$ представља укупну искоришћену примарну енергију код куће са слојем дебљине термоизолације која задовољава нову регулативу, $E_{em,ti,nr}$ представља уложени примарну енергију у термоизолациони слој по новој регулативи од 8 см.

Када се на кућу која задовољава старе стандарде додаје термоизолациони слој како би она задовољила нову регулативу користи се $COP_{s,nr}$. Он даје уштеду примарне енергије по јединици уложене примарне енергије у додатну термоизолацију у овом случају. Рачуна се као:

$$COP_{s,nr} = (E_{t,u,p,y,s} - E_{t,u,p,y,nr}) / (E_{em,ti,nr} - E_{em,ti,s}) \quad (10.10)$$

Када се на кућу која задовољава старе стандарде додаје термоизолациони слој неке одређене дебљине користи се $COP_{s,x}$. Он даје уштеду примарне енергије по јединици уложене примарне енергије у додатну термоизолацију. Рачуна се по једначини:

$$COP_{s,x} = (E_{t,u,p,y,s} - E_{t,u,p,y,x}) / (E_{em,ti,x} - E_{em,ti,s}) \quad (10.11)$$

Овде, $E_{t,u,p,y,x}$ представља укупну искоришћену примарну енергију код куће са слојем задате дебљине термоизолације, $E_{em,ti,x}$ представља уложени примарну енергију у термоизолациони слој са задатом дебљином x израженој у центиметрима. У овом раду $COP_{s,x}$ ће бити рачунат за животни циклус од 10 година.

Енергетски период повраћаја је рачунат када је на кућу са термоизолацијом која је задовољавала старе стандарде накнадно постављен додатни термоизолациони слој. Он представља потребно време да се поврати енергија уложена у додатни термоизолациони слој. Рачуна се као разлика у уложеној примарној енергији у термоизолацију која је подељена са годишњом штедњом примарне енергије ова два случаја. Једначина је следећа:

$$Payback_y = (E_{em,ti,x} - E_{em,ti,s}) / ((E_{t,u,p,y,s} - E_{t,u,p,y,x}) / L_y) \quad (10.12)$$

10.2.2. Математички модел оптимизације економске добити

Годишња оперативна потрошња топлотне енергије представља годишњу потрошњу енергије електричних грејача у кући како би се одржала жељена температура у просторија, и израчунава се по следећој једначини:

$$E_u = \sum_{d=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} E_{u,h,d}. \quad (10.3)$$

Да би се израчунала годишња потрошња струје потребно је преbacити из J у киловат часове годишњу потрошњу оперативне енергије. Годишња потрошња струје се рачуна по следећој једначини:

$$E_{el,u,y} = E_u / 3600000. \quad (10.13)$$

Годишња цена грејања се рачуна као цена потрошене струје. Узета је плава тарифа у току дана као референтна, јер се у том периоду врши грејање. Вредност потрошене струје у киловат часовима се помножи са 8,118 динара по киловат часу. Због пореза ова вредност се множи са 1,2 јер је порез у Србији на потрошену електричну енергију 20%:

$$C_{el,u,y} = E_{el,u,y} \cdot 8,118 \cdot 1,2. \quad (10.14)$$

Цена термоизолације се рачуна као дебљина термоизолације, помножена са површином спољашњих зидова и крова, и затим помножена са ценом термоизолације по m^3 термоизолационог материјала. Цена термоизолационог материјала по m^3 је цена из табеле 3.2 помножена 100 пута. Једначина за рачун цене термоизолације је:

$$C_{ti} = A_{ti} \cdot \delta_{ti} \cdot C_{tis}. \quad (10.15)$$

Овде је C_{tis} цена изабраног термоизолационог материјала по m^3 .

Годишња цена термоизолационог материјала представља цену термоизолације подељену са бројем година животног циклуса за који се симулација врши, као што је приказано у следећој једначини:

$$C_{ti,y} = C_{ti} / L_y. \quad (10.16)$$

Функција циља оптимизације је редукција годишњег трошка грејања. Он представља суму годишње цене грејања и годишње цене термоизолације, као што је представљено у следећој једначини:

$$C_{u,y} = C_{ti,y} + C_{el,u,y}. \quad (10.17)$$

Укупни трошак грејања је једнак годишњем трошку грејања помноженом са бројем година животног циклуса. Израчунава се по једначини:

$$C_{t,u} = C_{u,y} \cdot L_y. \quad (10.18)$$

Четири врсте COP-а за новац уложен у термоизолацију се рачуна, да би се одредиле уштеде новца: $COP_{c,n,o}$, $COP_{c,s,o}$, $COP_{c,n,nr}$, $COP_{c,n,nr}$. Они нам дају информацију колико пута се новац штеди при реновирању термоизолације у току животног циклуса.

Ови COP-ови су слични као и они за примарну енергију али се односе на уложени и уштеђени новац.

Када се на кућу која нема претходну термоизолацију наноси слој термоизолације оптималне дебљине користи се $COP_{c,n,o}$. Он представља однос сачуваног новца по јединици уложеног новца у постављени слој термоизолације. Рачуна се по следећој једначини:

$$COP_{c,n,o} = (C_{t,u,n} - C_{t,u,o}) / C_{ti,o} \quad (10.19)$$

Овде, $C_{t,u,o}$ представља укупни трошак грејања код куће са слојем оптималне дебљине термоизолације који је нанет при реновирању, $C_{t,u,n}$ представља укупни трошак грејања код куће код куће без термоизолационог слоја, и $C_{ti,o}$ представља уложени новац у оптимални термоизолациони слој.

Када се термоизолациони слој оптималне дебљине наноси на већ изоловану кућу (стара регулатива – 5 cm), користи се $COP_{c,s,o}$. Претходно је кућа већ била изолована да задовољи старе стандарде у Србији. $COP_{c,s,o}$ се рачуна као:

$$COP_{c,s,o} = (C_{t,u,s} - C_{t,u,o}) / (C_{ti,o} - C_{ti,s}) \quad (10.20)$$

Овде, $C_{t,u,s}$ представља укупни трошак грејања код куће са слојем дебљине термоизолације која задовољава старе стандарде, $C_{ti,s}$ представља уложени новац у термоизолациони слој по старом стандарду од 5 центиметара. $COP_{c,s,o}$ даје уштеду новца у укупним трошковима грејања по јединици новца уложеног у додатну термоизолацију.

За куће које се реновирају по новој регулативи, потребна дебљина за термоизолациони слој за спољни зид је 8 центиметара. Када се изолација наноси на неизоловану кућу користи се $COP_{c,n,nr}$. Он даје уштеду новца у укупним трошковима грејања по јединици новца уложеног у додатну термоизолацију у овом случају. Рачуна се по једначини:

$$COP_{c,n,nr} = (C_{t,u,n} - C_{t,u,nr}) / C_{ti,nr} \quad (10.21)$$

Овде, $C_{t,u,nr}$ представља укупни трошак грејања код куће са слојем дебљине термоизолације који задовољава нову регулативу, $C_{ti,nr}$ представља уложени новац у термоизолациони слој по новој регулативи од 8 центиметара.

Када се на кућу која задовољава старе стандарде додаје термоизолациони слој како би она задовољила нову регулативу користи се $COP_{c,s,nr}$. Он даје уштеду новца у укупним трошковима грејања по јединици новца уложеног у додатну термоизолацију у овом случају. Рачуна се као:

$$COP_{c,s,nr} = (C_{t,u,s} - C_{t,u,nr}) / (C_{ti,nr} - C_{ti,s}) \quad (10.22)$$

Период повраћаја уложеног новца у реновирање је рачунат када је на кућу са термоизолацијом која је задовољавала старе стандарде накнадно постављен додатни термоизолациони слој. Он представља време да се поврати новац уложен у додатни термоизолациони слој. Рачуна се као разлика у новцу уложеном у термоизолацију подељену са годишњом ценом грејања ова два случаја. Једначина је следећа:

$$Payback_{c,y} = (C_{ti,x} - C_{ti,s}) / (C_{el,u,y,s} - C_{el,u,y,x}) \quad (10.23)$$

Овде, $C_{el,u,y,x}$ представља годишњу цену грејања код куће са слојем дебљине термоизолације од x центиметара, $C_{ti,x}$ представља уложени новац у термоизолациони слој по новој регулативи од x центиметара.

10.3. *Genopt* код

За потребе оптимизације коришћен је софтвер *Genopt* у коме су прављени кодови који узимају податке из резултата симулација у *EnergyPlus*-у и мења почетне податке потребних променљивих док не добије оптимални резултат.

10.3.1. *Genopt* код код оптимизације укупне количине примарне енергије

У наставку је дат оптимизациони код у оквиру фајла *OptWinXP* који задаје функцију циља, а који је у сагласности са математичким моделом задатим у потпоглављу 10.2.1. Такође коришћењем овог кода је додатно рачуната и количина CO_2 која се улаже у термоизолацију. Пример је дат за термоизолацију од стиропора за животни циклус од 10 година:

```
Simulation {

Files {
  Template {
    File1 = TgHouseNormalBuild_template.idf;
  }
  Input {
    File1 = TgHouseNormalBuild.idf;
  }
  Log {
    File1 = TgHouseNormalBuild.err;
  }
  Output {
    File1 = TgHouseNormalBuild.eso;
  }

  Configuration {
    File1 = "..\..\..\..\cfg\EnergyPlusWinXP.cfg";
  }
}

CallParameter { // optional section
  // The weather file without extension
  Suffix = SRB_Kragujevac_MN6;
}

ObjectiveFunctionLocation
{
  Name1 = Es_tot;
  Function1 = "add( %Es_heat%, %Es_uloz1%)";

  Name2 = Es_heat;
```

```

Function2 = "multiply( %Q_heat%, 3.04)";

Name3     = Es_uloz1;
Function3 = "divide( %Es_uloz%, 10)";

Name4     = Es_uloz;
Function4 = "multiply( %Es_masa%, 86400000)";

Name5     = Es_CO2;
Function5 = "multiply( %Es_masa%, 3.29)";

Name6     = Es_masa;
Function6 = "multiply( %Es_zaprem%, 16)";

Name7     = Es_zaprem;
Function7 = "multiply( %isol%, 116.66)";

Name8     = Es_iso;
Function8 = "multiply( %isol%, 1)";

Name9     = Q_heat;
Delimiter9 = "284,";

}
} // end of section Simulation

Optimization {
  Files {
    Command {
      File1 = command.txt;
    }
  }
} // end of configuration file

```

Ограничења симулације су дата у фајлу *command.txt* и у њему се уносе параметри симулације. У овом случају минимална дебљина која је узимана за дебљину термоизолационог слоја је била 0.02 m. Лимит максималне дебљине термоизолационог слоја је задат као 2 m. Оптимизациона метода је *Hooke-Jeeves*. Почетна дебљина термоизолационог слоја је постављена на 0.05m а корак оптимизације је 0.1. Број редукције корака је 4. Максимални број итерација је постављен на 2000, али никада није прешао више од 200. Састав тог фајла је дат у наставку:

```

Vary{
  Parameter{ // izolacija
    Name = isol;
    Min = 0.02;
    Ini = 0.2;
    Max = 2;
    Step = 0.1;
  }
}

```

```

}

OptimizationSettings{
  MaxIte = 2000;
  MaxEqualResults = 100;
  WriteStepNumber = false;
  UnitsOfExecution = 0;
}

Algorithm{
  Main = GPSHookeJeeves;
  MeshSizeDivider = 2;
  InitialMeshSizeExponent = 0;
  MeshSizeExponentIncrement = 1;
  NumberOfStepReduction = 4;
}

```

10.3.2. Genopt код код оптимизације економске добити

Као и за оптимизацију потрошње примарне енергије, и за оптимизацију дебљине термоизолације са економског аспекта било је неопходно направити добар програмски код у *Genopt* – у. У наставку је дат код којим се оптимизује дебљина термоизолационог слоја за стиропор за животни циклус од 10 година:

```

Simulation {

Files {
  Template {
    File1 = TgHouseNormalBuild_template.idf;
  }
  Input {
    File1 = TgHouseNormalBuild.idf;
  }
  Log {
    File1 = TgHouseNormalBuild.err;
  }
  Output {
    File1 = TgHouseNormalBuild.eso;
  }

Configuration {
  File1 = "..\..\..\cfg\EnergyPlusWinXP.cfg";
}
}

CallParameter { // optional section
  // The weather file without extension
  Suffix = SRB_Kragujevac_MN6;
}

```

```

ObjectiveFunctionLocation
{
  Name1    = Es_tot;
  Function1 = "add( %Es_cena_iso_lc%, %Es_cena_struje_pdv%)";

  Name2    = Es_cena_iso_lc;
  Function2 = "divide( %Es_cena_iso%, 10)";

  Name3    = Es_cena_iso;
  Function3 = "multiply( %Es_zapremina%, 4890)";

  Name4    = Es_cena_struje_pdv;
  Function4 = "multiply( %Es_cena_struje%, 1.2)";

  Name5    = Es_cena_struje;
  Function5 = "multiply( %Es_Struja_kWh%, 8.118)";

  Name6    = Es_Struja_kWh;
  Function6 = "multiply( %Q_heat%, %Es_J_kWh%)";

  Name7    = Es_J_kWh;
  Function7 = "divide( 1, 3600000)";

  Name8    = Es_zapremina;
  Function8 = "multiply( %isol%, 116.66)";

  Name9    = Es_iso;
  Function9 = "multiply( %isol%, 1)";

  Name10   = Q_heat;
  Delimiter10 = "284,";

}
} // end of section Simulation

Optimization {
  Files {
    Command {
      File1 = command.txt;
    }
  }
} // end of configuration file

```

Ограничења симулације су дата у фајлу *command.txt* и у њему се уносе параметри симулације. Ова ограничења су потпуно иста као и за оптимизацију укупне количине примарне енергије. Састав тог фајла је дат у наставку:

```
Vary{
  Parameter{ //izolacija
    Name = isol;
    Min = 0.02;
    Ini = 0.2;
    Max = 2;
    Step = 0.1;
  }
}

OptimizationSettings{
  MaxIte = 2000;
  MaxEqualResults = 100;
  WriteStepNumber = false;
  UnitsOfExecution = 0;
}

Algorithm{
  Main = GPSHookeJeeves;
  MeshSizeDivider = 2;
  InitialMeshSizeExponent = 0;
  MeshSizeExponentIncrement = 1;
  NumberOfStepReduction = 4;
}
```

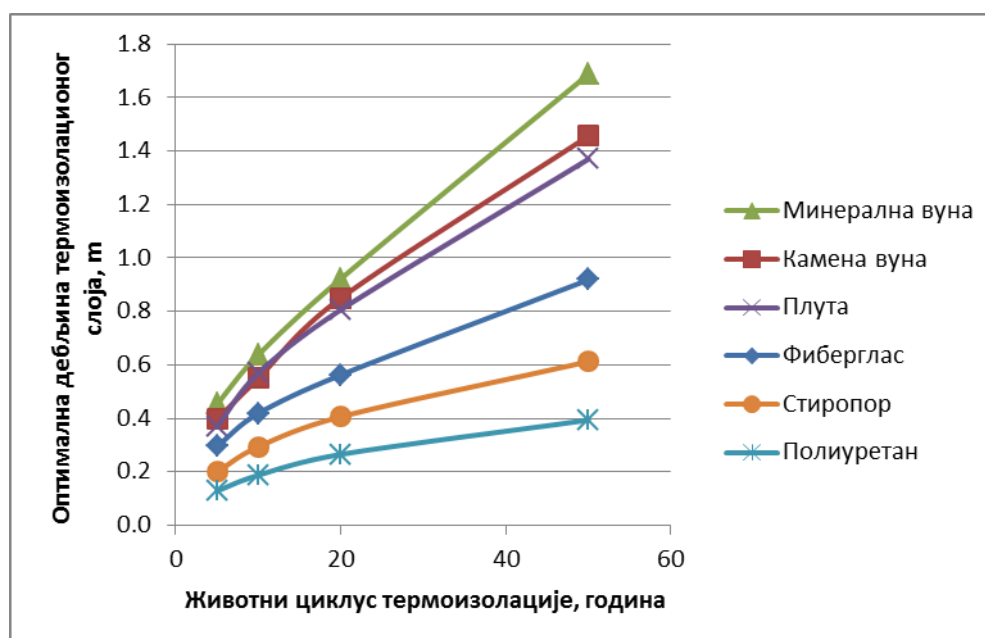
11. Резултати симулација и оптимизација и њихова анализа

11.1. Резултати оптимизације термоизолације са аспекта примарне енергије код нето-нултих енергетских кућа

У овом подглављу дати су резултати симулација и оптимизација дебљине термоизолационог слоја са аспекта укупне искоришћене примарне енергије код нето-нултих енергетских кућа [171].

11.1.1. Перформансе различитих врста термоизолационих материјала

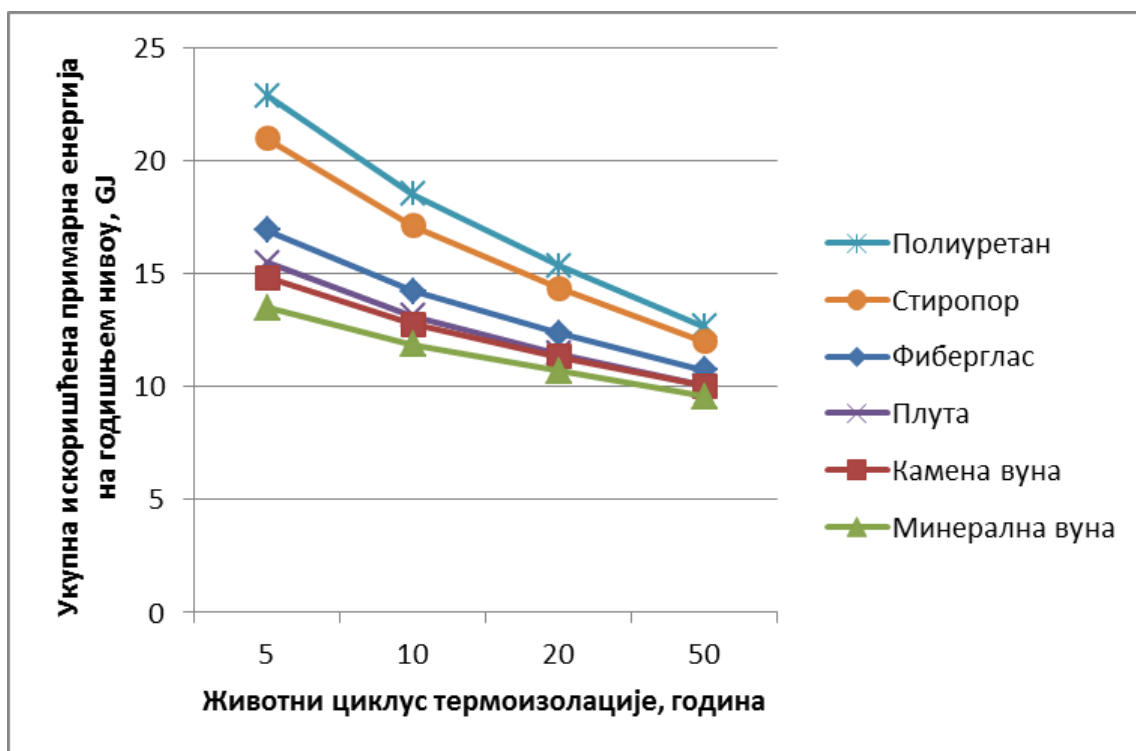
Кућа без икакве претходне термоизолације је реновирана и термоизолациони слој је постављен на спољашњи зид. Преко термоизолационог слоја поставља се малтер како би заштитио термоизолациони материјал. Испитивање је вршено за различите врсте материјала као што су полиуретан, стиропор, фиберглас, камена вуна, минерална буна и плута. Животни циклус испитивања се кретао од 5 до 50 година. Дебљина термоизолације је оптимизована како би се достигао минимум у годишњој укупној искоришћеној примарној енергији. Слика 11.1 показује оптималне дебљине термоизолационих слојева у зависности од врсте материјала и животног циклуса. Резултати показују да је термоизолациони слој минералне вуне највећи, док је термоизолациони слој полиуретана најмање дебљине. Наиме, дебљина термоизолационог слоја минералне вуне је 2.5 – 3.5 пута већа од дебљине термоизолационог слоја стиропора и полиуретана.



Слика 11.1. Оптимална дебљина термоизолационог слоја у зависности од врсте материјала и животног циклуса

За оптималне дебљине термоизолационог слоја у зависности од врсте материјала и животног циклуса, слика 11.2 даје укупну годишњу искоришћену примарну

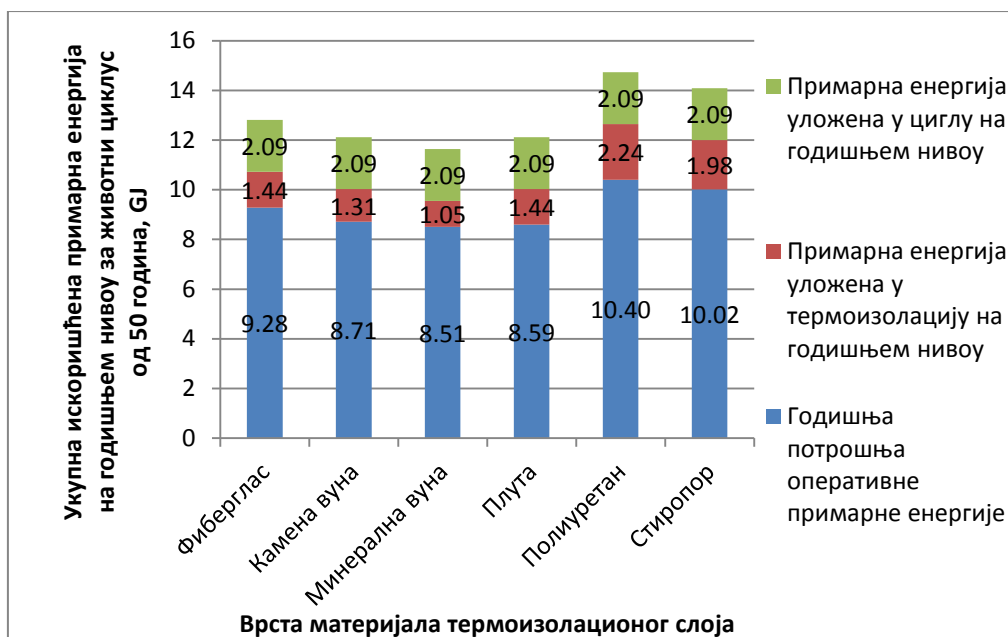
енергију на годишњем нивоу. Годишња искоришћена примарна енергија је најмања за минералну вуну као термоизолациони материјал, док је највећа за полиуретан за термоизолациони материјал.



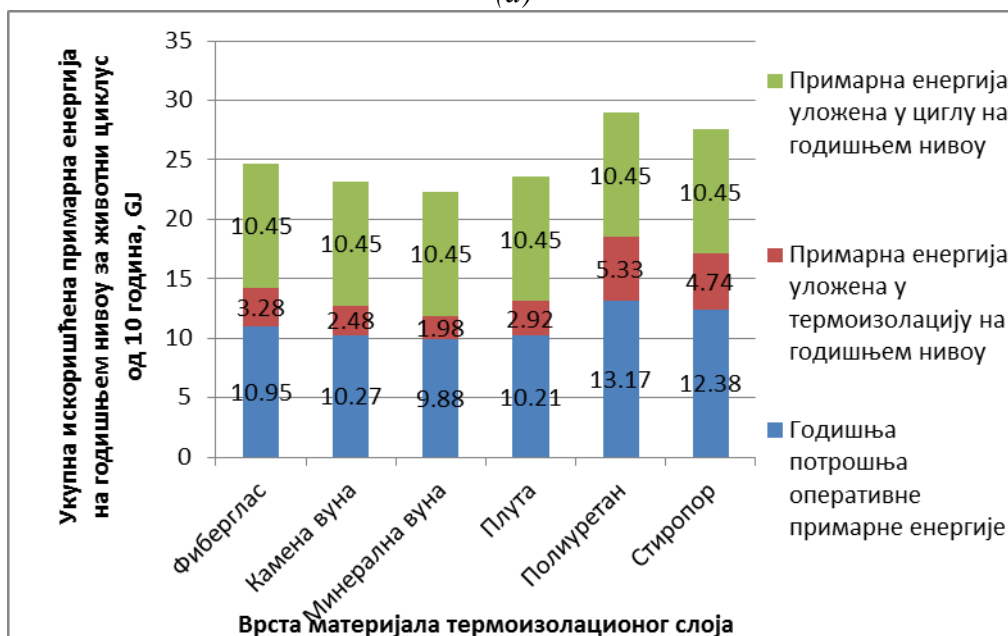
Слика 11.2. Годишња потрошња оперативне примарне енергије у зависности од врсте термоизолационог материјала и животног циклуса

На годишњем нивоу, слика 11.3 показује уложену примарну енергију у цигле, уложену примарну енергију у термоизолацију и годишњу потрошњу оперативне примарне енергије за грејање за различите врсте термоизолације са оптималном дебљином термоизолационог слоја. На слици су приказана два случаја: први кад је животни циклус 50 година и други када је животни циклус 10 година. Ова слика показује да минерална вунa има минимум укупне годишње искоришћене примарне енергије у поређењу са осталим термоизолационим материјалима.

Што се тиче удела уложене енергије у термоизолацију студије показују да код кућа са нормалном градњом (цигла), уложена примарна енергија у термоизолацију учествује са само око 15% од укупне искоришћене примарне енергије. У овом случају уложена примарна енергија у грађевинске материјале, рачунајући и циглу и термоизолацију учествује са 27%, у случају животног циклуса од 50 година тј. са око 56% за животни циклус од 10 година. За монтажне куће може се претпоставити да је уложена енергија у дрво незнатна, док би уложена енергија у термоизолацију била иста. Тада би удео уложене примарне енергије у термоизолацију у односу на укупну искоришћену енергију за животни циклус био 11% за 50 година, односно 17% за животни циклус од 10 година. Ова анализа се односи на примену минералне вуне као термоизолационог материјала.



(а)

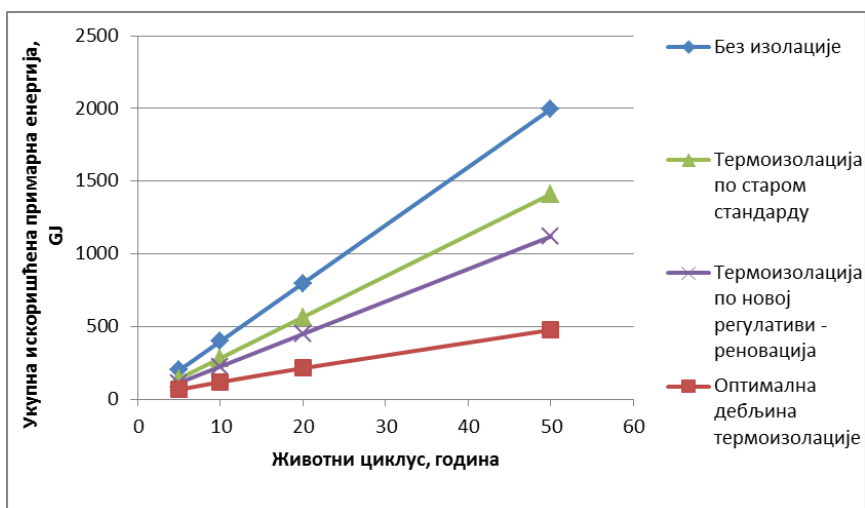


(б)

Слика 11.3. Годишња укупна оперативна енергија за грејање, годишња уложена енергија у термоизолацију, и годишња примарна енергија уложена у циглу за а) животни циклус од 50 година, б) животни циклус од 10 година

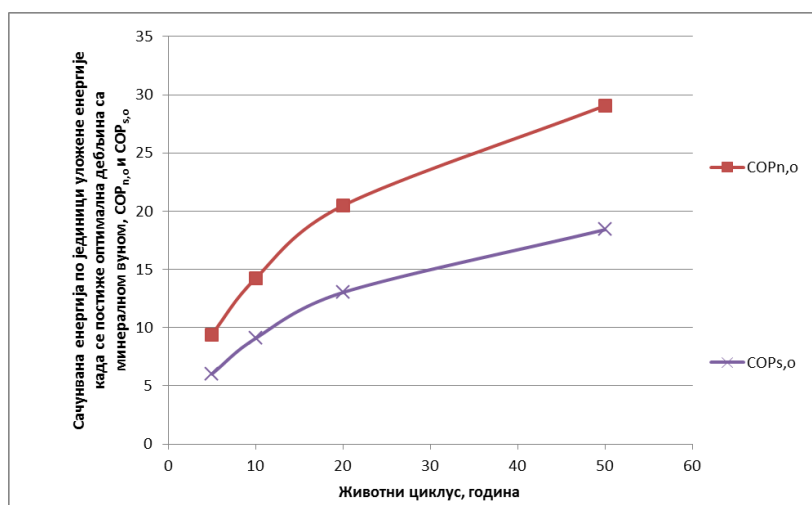
11.1.2. Минерална вуна као термоизолациони материјал

На основу претходних резултата посебно истраживање је изведено за минералну вуну и стиропор. Прво је урађено истраживање за минералну вуну. Четири испитиване куће су биле потпуно исте изузев дебљине термоизолационог слоја. Прва кућа нема никакву термоизолацију, друга има термоизолацију која задовољава старе стандарде, трећа има термоизолацију која задовољава нову регулативу, а четврта има оптималну дебљину термоизолационог слоја. Слика 11.4 показује укупну искоришћену примарну енергију у зависности од животног циклуса и врсте једне од четири куће. Укупна искоришћена примарна енергија расте са бројем година животног циклуса.



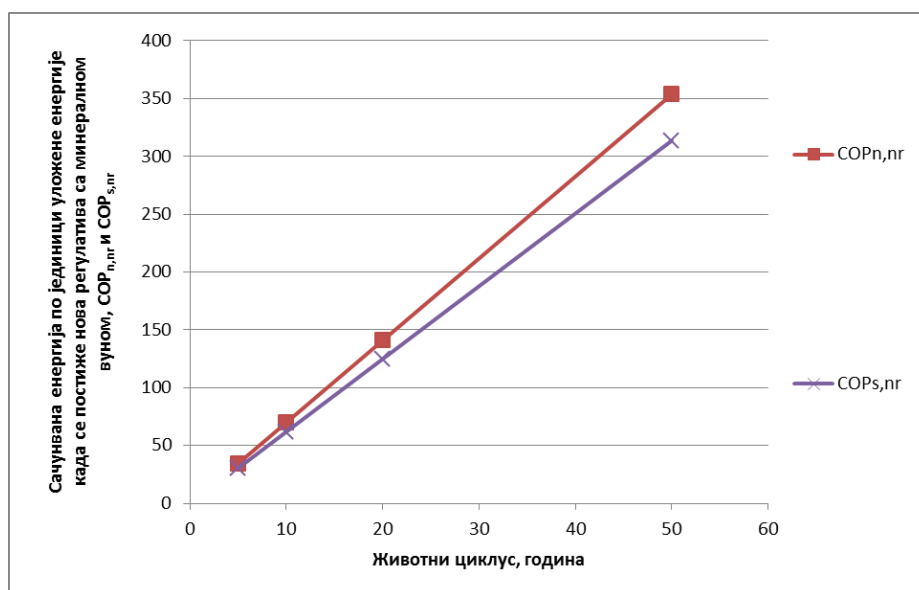
Слика 11.4. Укупна искоришћена енергија у зависности од животног циклуса. Линије представљају куће без исолације, са исолацијом по старом стандарду, са исолацијом по новој регулативи, и са исолацијом оптимальне дебљине. Термоиолациони материјал је минерална вуна.

Да би се сагледала уштеда енергије за животно циклус од 5 до 50 година, на слици 11.5 је приказан COP уложене примарне енергије за два случаја реновирања: (1) када се ради реновирање на кући без претходне термоиолације, и (2) када се ради реновирање на кући која је претходно иолована по старим стандардима. У првом случају, минерална вуна оптимальне дебљине се поставља на циглу окренута ка спољашњој страни – $COP_{n,o}$. У другом случају, на већ постојећи слој термоиолације са спољашње стране се додаје нови слој минералне вуне који допуњује дебљину термоиолације до оптимальне – $COP_{s,o}$. Види се да се за сваки 1 J уложене енергије у термоиолацију оптимальне дебљине на кућу без претходне исолације штеди $COP_{n,o}=29.06$ J оперативне примарне енергије. Затим, види се да улагањем 1 J у уложену енергију термоиолационог слоја оптимальне дебљине од минералне вуне који се додаје на већ постојећу термоиолацију по старом стандарду, штеди $COP_{s,o}=18.42$ J оперативне примарне енергије. Ова два случаја су разматрана за животно циклус од 50 година. Када је у питању животно циклус од 10 година, онда је $COP_{n,o}=14.22$, док је $COP_{s,o}=9.07$.



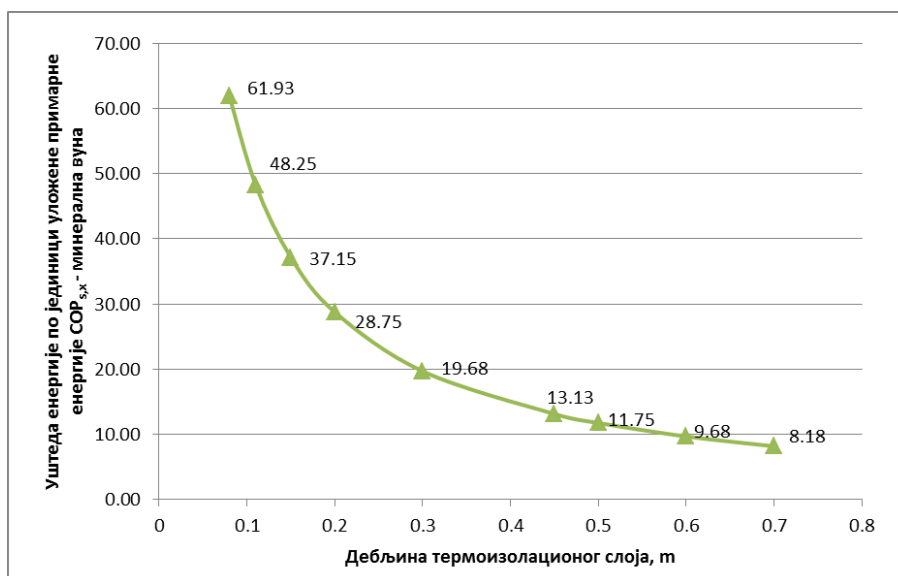
Слика 11.5. Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоиолацију до оптимальне дебљине када се као материјал користи минерална вуна

Да би се сагледала уштеда оперативне примарне енергије за различите животне циклусе, на слици 11.6 је приказан COP уложене енергије у две опције реновирања: (3) када се на кућу без термоизолације додаје термоизолација од минералне вуне чија дебљина задовољава нову регулативу – $COP_{n,nr}$, и (4) када се на кућу са термоизолацијом од минералне вуне чија дебљина задовољава старе стандарде додаје нови слој термоизолације од минералне вуне како би дебљина термоизолационог слоја задовољила нову регулативу - $COP_{s,nr}$. Улагањем 1 J у термоизолацију од минералне вуне која задовољава нову регулативу на претходно неизоловану кућу штеди се $COP_{n,nr}=354$ J оперативне примарне енергије, док се улагањем 1 J у термоизолацију од минералне вуне на кућу која је претходно била изолована по старом стандарду како би задовољила нову регулативу, штеди $COP_{s,nr}=314$ J оперативне примарне енергије када се посматра животни циклус од 50 година. Ако се посматра животни циклус од 10 година, $COP_{n,nr}=69.9$, док је $COP_{s,nr}=61.9$.



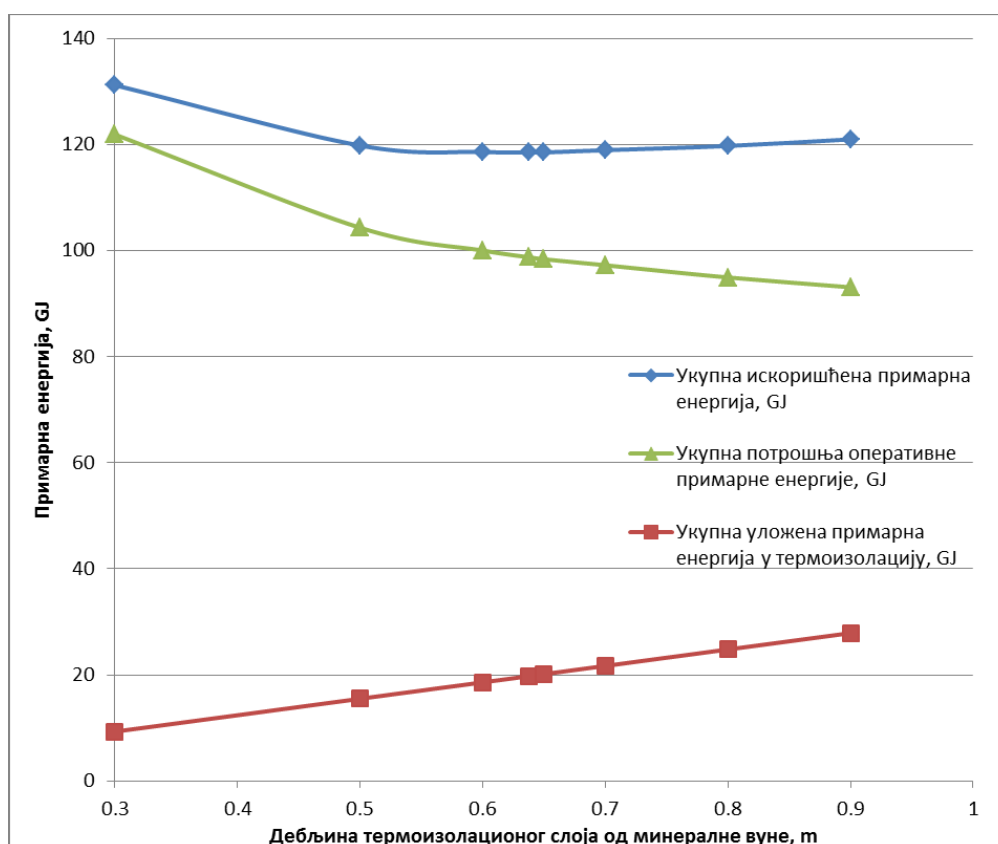
Слика 11.6. Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију до дебљине нове регулативе када се као материјал користи минерална вуна

Претходни графици постављају питање који је утицај сваког следећег додатог центиметра у термоизолацију од минералне вуне. Овај утицај се огледа у уложеној енергији у термоизолацију у односу на уштеђену оперативну примарну енергију. На слици 11.7 је приказано да сваки следећи центиметар додат у термоизолациони слој од минералне вуне има мањи утицај од претходног. У овом случају додатна дебљина је стављена на термоизолациони слој од минералне вуне по старом стандарду. Види се да сваки 1 J енергије уложен у додатну термоизолацију од минералне вуне како би се од старог стандарда (слој дебљине 5 cm) стигло до слоја који задовољава нову регулативу (слој дебљине 8 cm) штеди 61.93 J оперативне примарне енергије, док се за сваки 1 J енергије уложен у додатну термоизолацију од минералне вуне како би се од старог стандарда (слој дебљине 5 cm) стигло до слоја од на пример 30 cm штеди 19.68 J оперативне примарне енергије. Ова резултати су дати на основу симулација за животни циклус од 10 година.



Слика 11.7. Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију на слој термоизолације по старом стандарду за животни циклус од 10 година када се као материјал користи минерална вуна

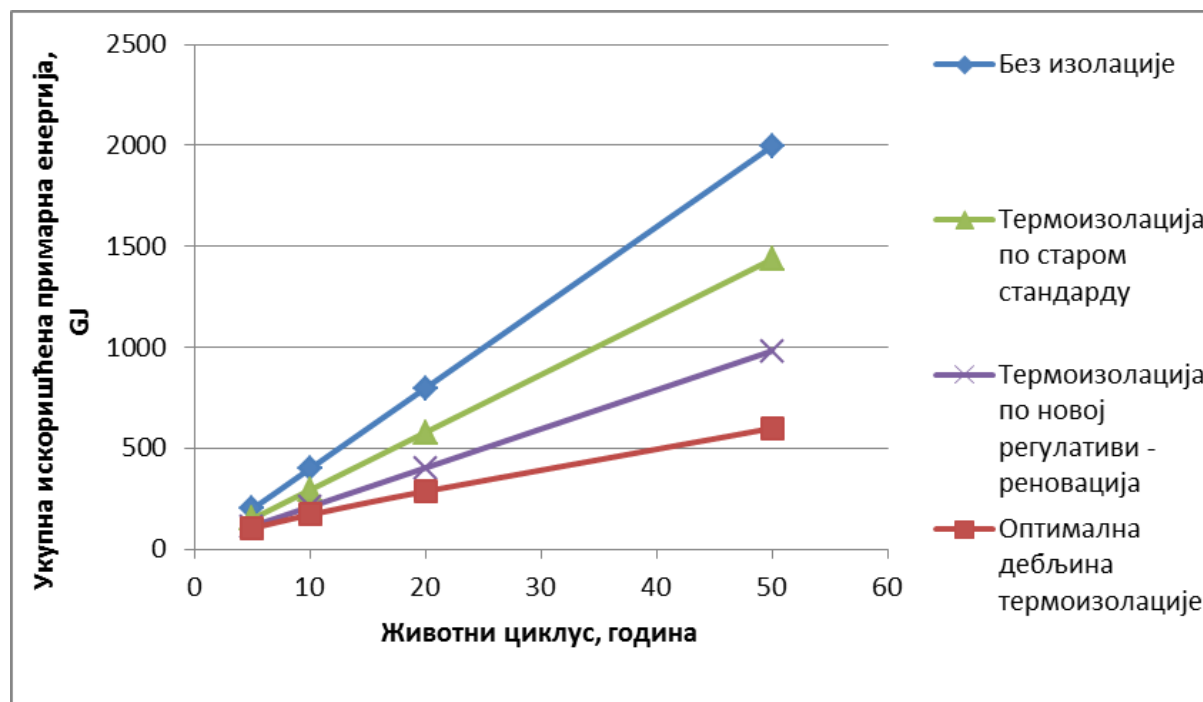
Минимум функције циља (укупна искоришћена примарна енергија) је дат на слици 11.8. Резултати приказани на тој слици су за животни циклус од 10 година када је минерална вуна термоизолациони материјал. Са слике се види да је оптимална дебљина термоизолације у овом случају 63 см.



Слика 11.8. Оптимална дебљина термоизолације од минералне вуне за животни циклус од 10 година када се оптимизација врши на основу укупне искоришћене примарне енергије

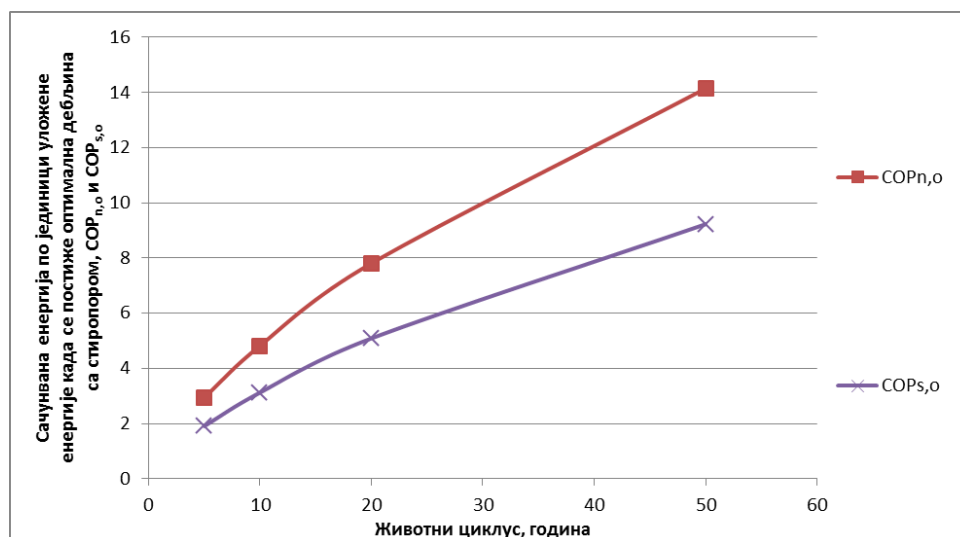
11.1.3. Стиропор као термоизолациони материјал

На слици 11.9. је приказана укупна искоришћена примарна енергија када је термоизолациони материјал стиропор за четири различите куће: прва кућа нема никакву термоизолацију, друга има термоизолацију која задовољава старе стандарде, трећа има термоизолацију која задовољава нову регулативу, а четврта има оптималну дебљину термоизолационог слоја.



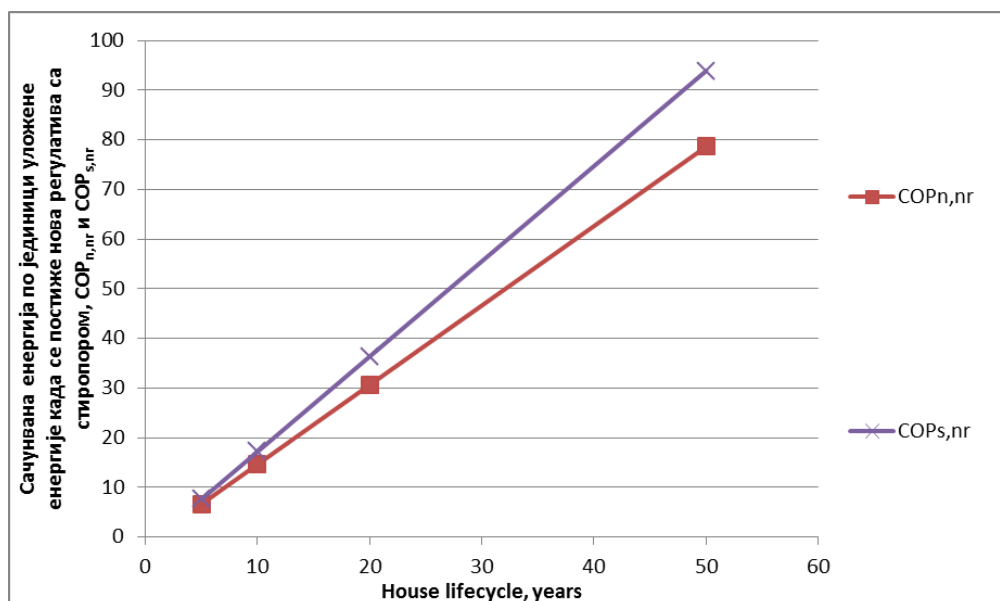
Слика 11.9. Укупна искоришћена енергија у зависности од животног циклуса. Линије представљају куће без изолације, са изолацијом по старом стандарду, са изолацијом по новој регулативи, и са изолацијом оптималне дебљине. Термоизолациони материјал је стиропор.

Да би се сагледала уштеда енергије за животни циклус од 5 до 50 година, на слици 11.10 је приказан COP уложене примарне енергије за два случаја реновирања: (1) када се ради реновирање на кући без претходне термоизолације, и (2) када се ради реновирање на кући која је претходно изолована по старим стандардима. У првом случају, стиропор оптималне дебљине се поставља на циглу окренут ка спољашњој страни – $COP_{n,o}$. У другом случају, на већ постојећи слој термоизолације са спољашње стране се додаје нови слој стиропора који допуњује дебљину термоизолације до оптималне – $COP_{s,o}$. Види се да се за сваки 1 J уложене енергије у термоизолацију оптималне дебљине на кућу без претходне изолације штеди $COP_{n,o}=14.15$ J оперативне примарне енергије. Затим, види се да улагањем 1 J у уложену енергију термоизолационог слоја оптималне дебљине од стиропора који се додаје на већ постојећу термоизолацију по старом стандарду штеди $COP_{s,o}=9.23$ J оперативне примарне енергије. Ова два случаја су разматрана за животни циклус од 50 година. Када је у питању животни циклус од 10 година, онда је $COP_{n,o}=4.82$, док је $COP_{s,o}=3.12$.



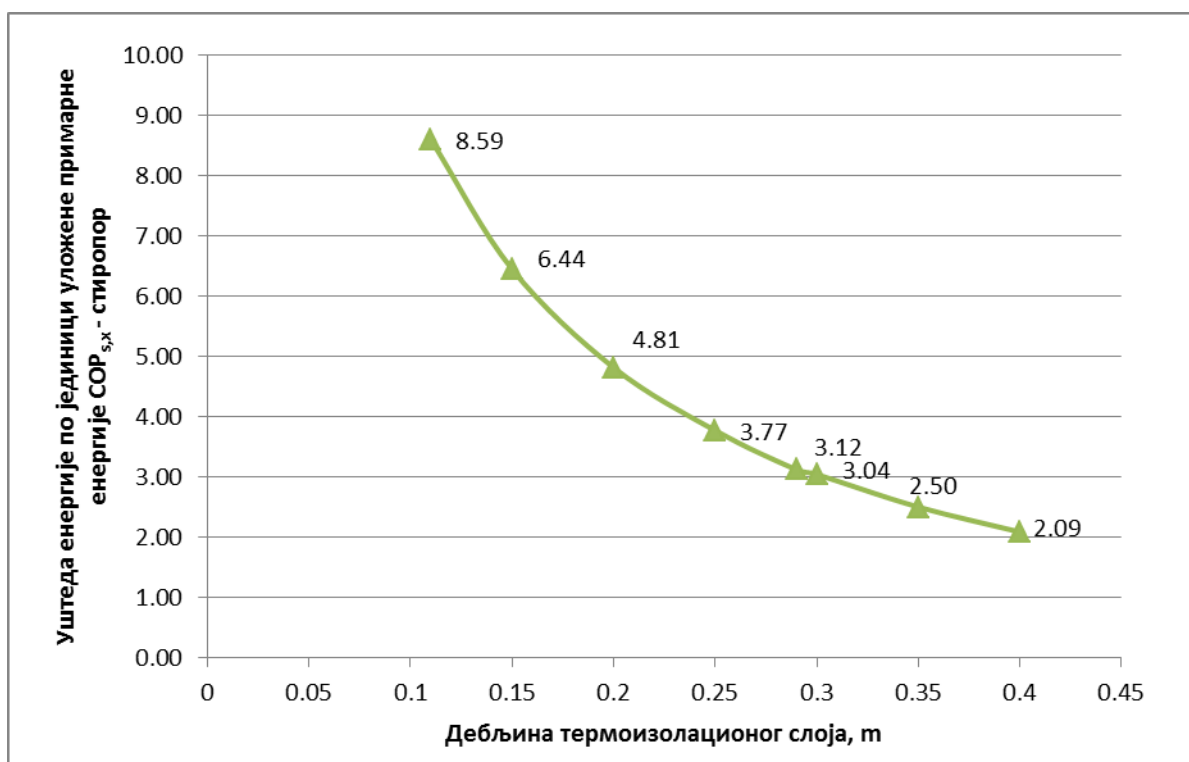
Слика 11.10. Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију до оптималне дебљине када се као материјал користи стиропор

Да би се сагледала уштеда оперативне примарне енергије за различите животне циклусе, на слици 11.11 је приказан COP уложене енергије у две опције реновирања: (3) када се на кућу без термоизолације додаје термоизолација од стиропора чија дебљина задовољава нову регулативу – $COP_{n,nr}$, и (4) када се на кућу са термоизолацијом од минералне вуне чија дебљина задовољава старе стандарде додаје нови слој термоизолације од стиропора како би дебљина термоизолационог слоја задовољила нову регулативу - $COP_{s,nr}$. Улагањем 1 J у термоизолацију од стиропора која задовољава нову регулативу на претходно неизоловану кућу штеди се $COP_{n,nr}=93.89$ J оперативне примарне енергије, док се улагањем 1 J у термоизолацију од стиропора на кућу која је претходно била изолована по старом стандарду како би задовољила нову регулативу штеди $COP_{s,nr}=78.63$ J оперативне примарне енергије када се посматра животни циклус од 50 година. Ако се посматра животни циклус од 10 година, $COP_{n,nr}=17.8$, док је $COP_{s,nr}=14.63$.



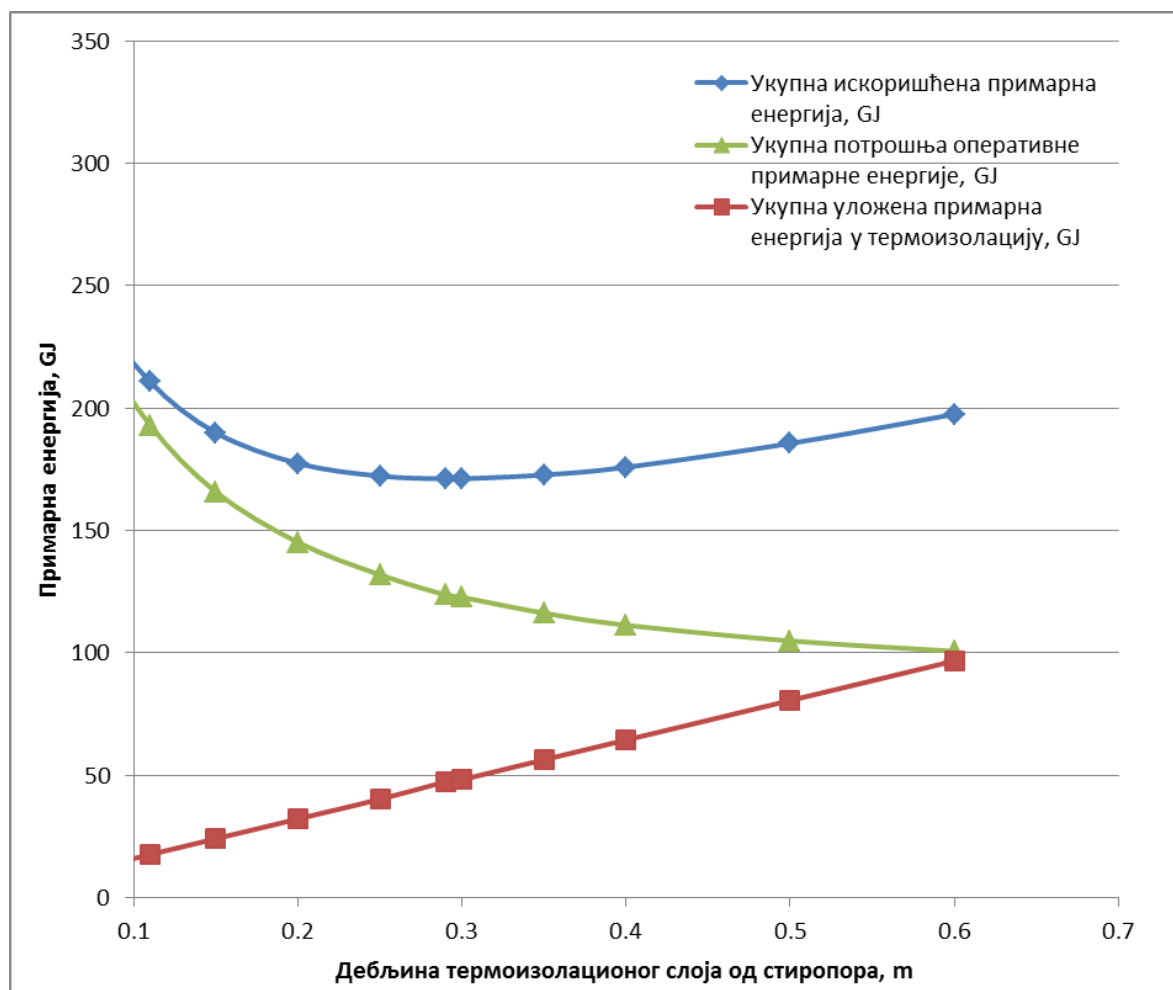
Слика 11.11. Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију до дебљине нове регулативе када се као материјал користи стиропор

Претходни графици постављају питање који је утицај сваког следећег додатог центиметра у термоизолацију од стиропора. Овај утицај се огледа у уложеној енергији у термоизолацију у односу на уштеђену оперативну примарну енергију. На слици 11.12 је приказано да сваки следећи центиметар додат у термоизолациони слој од стиропора има мањи утицај од претходног. У овом случају додатна дебљина је стављена на термоизолациони слој од стиропора по старом стандарду. Види се да се за сваки 1 J енергије уложен у додатну термоизолацију од стиропора како би се од старог стандарда (слој дебљине 5 cm) стигло до слоја који задовољава нову регулативу (слој дебљине 8 cm) штеди 61.93 J оперативне примарне енергије, док се за сваки 1 J енергије уложен у додатну термоизолацију од стиропора како би се од старог стандарда (слој дебљине 5 cm) стигло до слоја од на пример 30 cm штеди 19.68 J оперативне примарне енергије. Ова резултати су добијени при симулацијама за животни циклус од 10 година.



Слика 11.12. Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене енергије у термоизолацију на слој термоизолације по старом стандарду за животни циклус од 10 година када се као материјал користи стиропор

Минимум циља функције (укупна искоришћена примарна енергија) је дат на слици 11.13. Резултати приказани на тој слици су за животни циклус од 10 година када је стиропор термоизолациони материјал. Са слике се види да је оптимална дебљина термоизолације у овом случају 29 cm.



Слика 11.13. Оптимална дебљина термоизолације од стиропора за животног циклус од 10 година када се оптимизација врши на основу укупне искоришћене примарне енергије

11.1.4. Поређење оптималних дебљина термоизолационог слоја за укупну искоришћену примарну енергију при коришћењу минералне вуне и стиропора у функцији од животног циклуса

Вредности оптималних дебљина термоизолационог слоја направљеног или од минералне или од стиропора су дате у табели 11.1. Период енергетског повраћаја уложене енергије је такође дат у овој табели за реновирање термоизолације са старог стандарда на оптималну дебљину термоизолационог слоја. Може се приметити да је за исти животног циклус оптимална дебљина термоизолационог слоја од стиропора за 2,5 пута мања од оптималне дебљине термоизолационог слоја од минералне вуне. За обе врсте изолације енергетски период повраћаја уложене енергије је у кратком временском периоду. Ово је такође условљено тиме да је овај енергетски период повраћаја уложене енергије израчунат за оптималне вредности дебљине термоизолационог слоја ових материјала. У сваком случају, у пракси дебљина термоизолације никако не би требала да буде већа од оптималне дебљине термоизолације за животног циклус од 10 година.

Табела 11.1. Оптимална дебљина термоизолационог слоја од минералне вуне и стиропора за укупну искоришћену примарну енергију у зависности од животног циклуса. Период енергетског повраћаја уложене енергије је за реновирање куће по старом стандарду са оптималном дебљином термоизолационог слоја

| Животни циклус, година | Минерална вуна | | Стиропор | |
|------------------------|--|--|--|--|
| | Оптимална дебљина термоизолационог слоја, метара | Енергетски период повраћаја уложене енергије, година | Оптимална дебљина термоизолационог слоја, метара | Енергетски период повраћаја уложене енергије, година |
| 5 | 0.45 | 0.84 | 0.20 | 3.18 |
| 10 | 0.64 | 1.1 | 0.29 | 3.2 |
| 20 | 0.92 | 1.53 | 0.41 | 3.82 |
| 50 | 1.69 | 2.7 | 0.61 | 5.21 |

Иначе животног циклуса саме куће тежи да буде 50 и више година. У литератури, [172] *Li* је са групом аутора разматрао утицај климатских промена у току дугог животног циклуса куће. Такође, при анализама животног циклуса који укључују потрошњу енергије у кућама и метеоролошке податке, наравно да утицај климатских промена доноси одређена питања са собом. Утицај климатских промена мења ове резултате, међутим како се термоизолација мења и реновира на сваких 10 до 20 година климатске промене имају мањи утицај на њу него на целу кућу.

11.1.5. Евалуација грешке

Како би се подаци о специфичној уложеној енергији из Велике Британије могли користити за Србију, разлика у резултатима је тестирана додавањем 10% на вредност специфичне уложене енергије за стиропор код симулације куће са оптималном дебљином термоизолационог слоја. Резултати овог упоређивања су дати у табели 11.2. Овај тест показује да је код куће са мањим животним циклусом одступање тј. грешка много већа него код кућа са великим животним циклусом. На пример, код животног циклуса од 1 године (који је јако кратак), грешка износи чак 20%. Међутим, код животног циклуса од 10 година, грешка је само 1,2%. За животног циклус од 20 година, грешка се и не може наћи јер је мања од прецизности истраживања које износи 0,125 центиметара. Ово води до закључка да се ова истраживања могу узети као релевантна за Србију, како је грешка јако мала у нормалном животном циклусу термоизолације који износи од 10 до 20 година.

Табела 11.2. Разлика у резултатима са стиропором као материјалом када се уведе грешка од 10% у специфичну уложену примарну енергију

| Животни циклус, година | Оптимална дебљина термоизолационог слоја, cm | Оптимална дебљина термоизолационог слоја (+10% грешке у специфичној уложеној енергији), cm |
|------------------------|--|--|
| 1 | 7.31 | 5.63 |
| 2 | 11.63 | 10.28 |
| 5 | 20.00 | 19.13 |
| 10 | 29.38 | 29.00 |
| 20 | 40.63 | 40.63 |
| 50 | 61.13 | 61.13 |

11.1.6. Закључци везани за оптимизацију дебљине термоизолације у функцији од укупне искоришћене примарне енергије

У овом одељку је приказано да се на енергетску ефикасност куће лако може утицати побољшавањем термоизолационог слоја до његове оптималне дебљине. У овом случају оптимизација је вршена на основу укупне искоришћене енергије која у обзир узима и уложену енергију у термоизолациони слој. Резултати показују да се најмања укупна искоришћена примарна енергија постиже са минералном вуном као термоизолационим материјалом. Међутим, насупротив томе је и то да је оптимална дебљина највећа код минералне вуне као термоизолационог материјала у поређењу са осталим материјалима. Коришћењем полиуретана се постиже највећа укупна потрошња примарне енергије, као и минимална оптимална дебљина термоизолационог слоја. Детаљно су разматране две опције реновирања када се коришћењем минералне вуне или стиропора постиже оптимална дебљина термоизолационог слоја на кућу без термоизолације и на кућу која задовољава старе стандарде по питању термоизолације. Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене примарне енергије у термоизолацију су за минералну вуну од 9 до 14 пута, док су за стиропор од 3 до 5 пута за животни циклус од 10 година. Такође још две опције реновирања су разматране када се од куће без термоизолације и куће која задовољава старе стандарде додавањем термоизолационог слоја достижу вредности потребне за нову регулативу. Уштеда оперативне примарне енергије по јединици уложене примарне енергије се креће од 62 до 70 пута за минералну вуну, односно 14.6 до 17 пута за стиропор за животни циклус од 10 година.

Оптималне дебљине термоизолације су од 45 cm за минералну вуну и 20 cm за стиропор за животни циклус од 5 година, до 64 cm за минералну вуну и 29 cm за стиропор за животни циклус од 10 година. Оволике разлике у дебљини термоизолационог слоја код ова два материјала су изазване великом разликом у специфичној уложеној енергији за производњу тог материјала. Ове разлике би биле мање у другим земљама уколико је коефицијент трансформације примарне енергије у финалну другачији.

Ово води до закључка да је, гледано у зависности од оптималне укупне искоришћене примарне енергије, најбоље узети минералну вуну као термоизолацију. То са собом носи неке проблеме који су конструктивно решиви, а који се односе како поставити тако дебео слој термоизолације. У сваком случају, гледано из аспекта конструкције и оптималне укупне искоришћене примарне енергије, дебљина термоизолације не би требало да буде већа од оптималне дебљине за животни циклус од 10 година.

Енергетски период повраћаја уложене енергије у термоизолацију је врло добар јер је веома кратак. Код минералне вуне креће се од 1,1 до 4,2 године у зависности од животног циклуса, док је код стиропора од 1,41 до 3,7 година у зависности од животног циклуса.

Ови резултати су добијени коришћењем званичних резултата о уложеној примарној енергији у материјале за Велику Британију. Међутим, у будућности, је битно организовати истраживање о количини уложене примарне енергије за материјале који се користе у Србији како би у обзир могли да се узму локални услови.

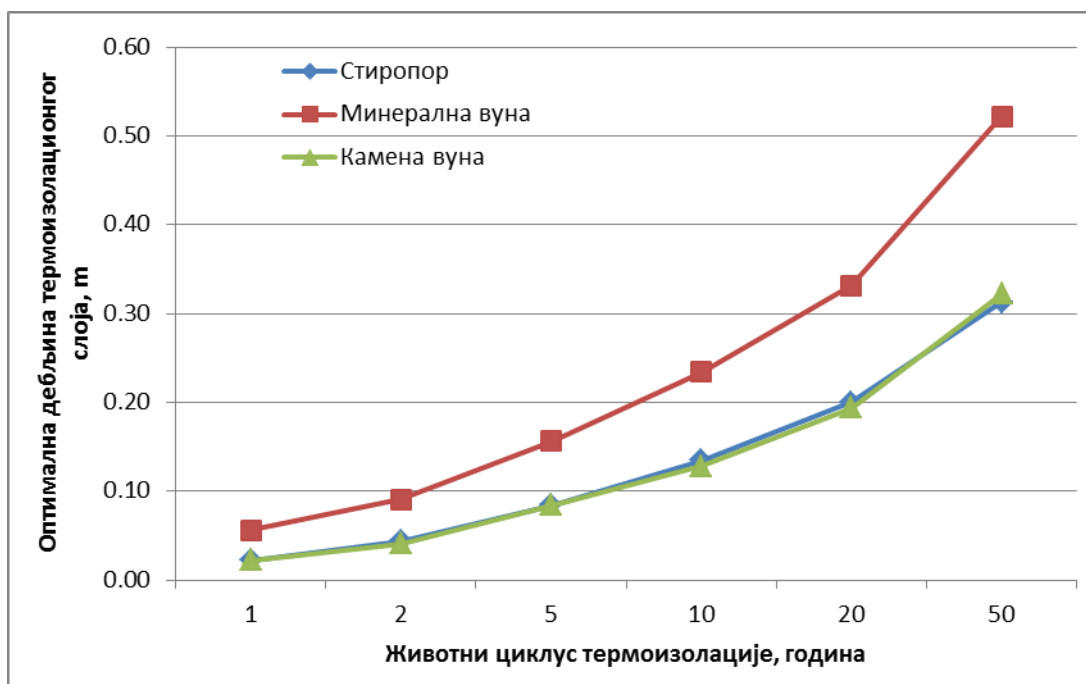
Ово истраживање такође показује како би у будућности при доношењу нових регулатива између осталог требало узети у обзир и животни циклус куће, као и уложена енергија како би се избегао такозвани повратни ефекат, „rebound effect“, који се јавља када се уложи већа количина енергије у изолацију него што је потребно и самим тим се у већем низу година погоршава утицај стаклене баште.

11.2. Резултати оптимизације термоизолације са економског аспекта код нето нултих енергетских кућа

У овом подглављу дати су резултати симулација и оптимизација дебљине термоизолационог слоја са економског аспекта код нето нултих енергетских кућа.

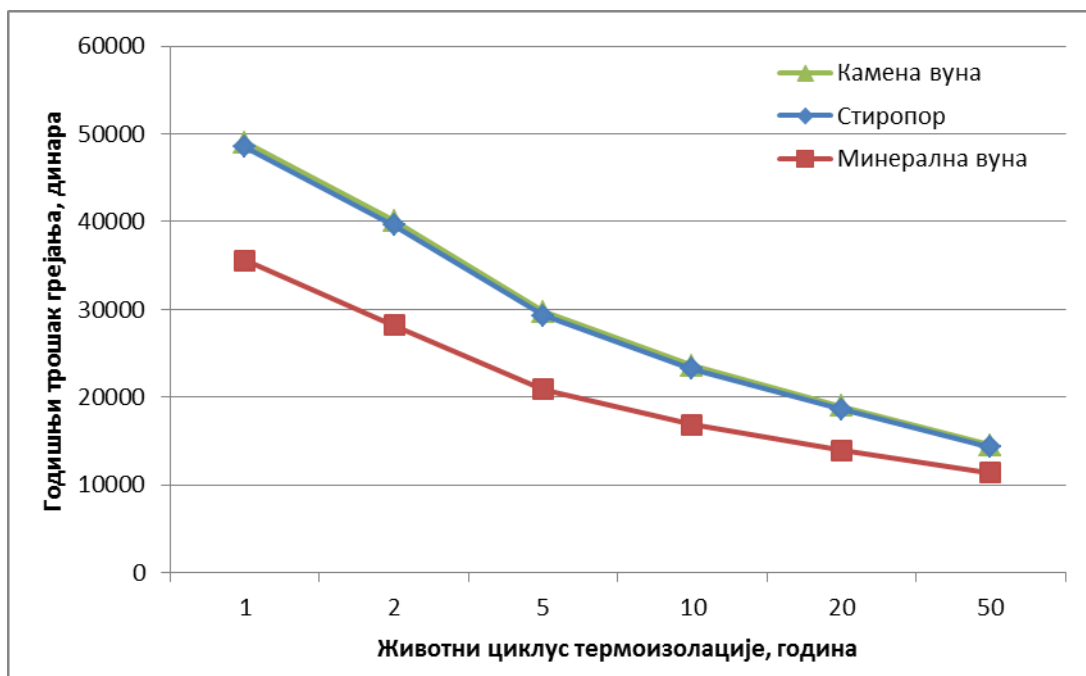
11.2.1. Перформансе различитих врста термоизолационих материјала

Кућа без икакве претходне термоизолације је реновирана и термоизолациони слој је постављен на спољашњи зид. Преко термоизолационог слоја поставља се малтер како би заштитио термоизолациони материјал. Испитивање је вршено за различите врсте материјала као што су стиропор, камена вунa и минерална вунa и плута. Животни циклус испитивања се кретао од 5 до 50 година. Дебљина термоизолације је оптимизирана како би се достигао минимум у годишњем трошку грејања са економског аспекта. Слика 11.14 показује оптималне дебљине термоизолационих слојева у зависности од врсте материјала и животног циклуса. Резултати показују да је термоизолациони слој минералне вуне највећи, док је термоизолациони слој стиропора и камене вуне сличан, јер имају сличне карактеристике и сличну цену за разлику од минералне вуне чија је цена око 2,5 пута мања. Приметно је да и однос између дебљина стиропора и минералне вуне није више у тој мери различит као у случају оптимизације са аспекта укупне искоришћене примарне енергије.



Слика 11.14. Оптимална дебљина термоизолационог слоја са економског аспекта у зависности од врсте материјала и животног циклуса

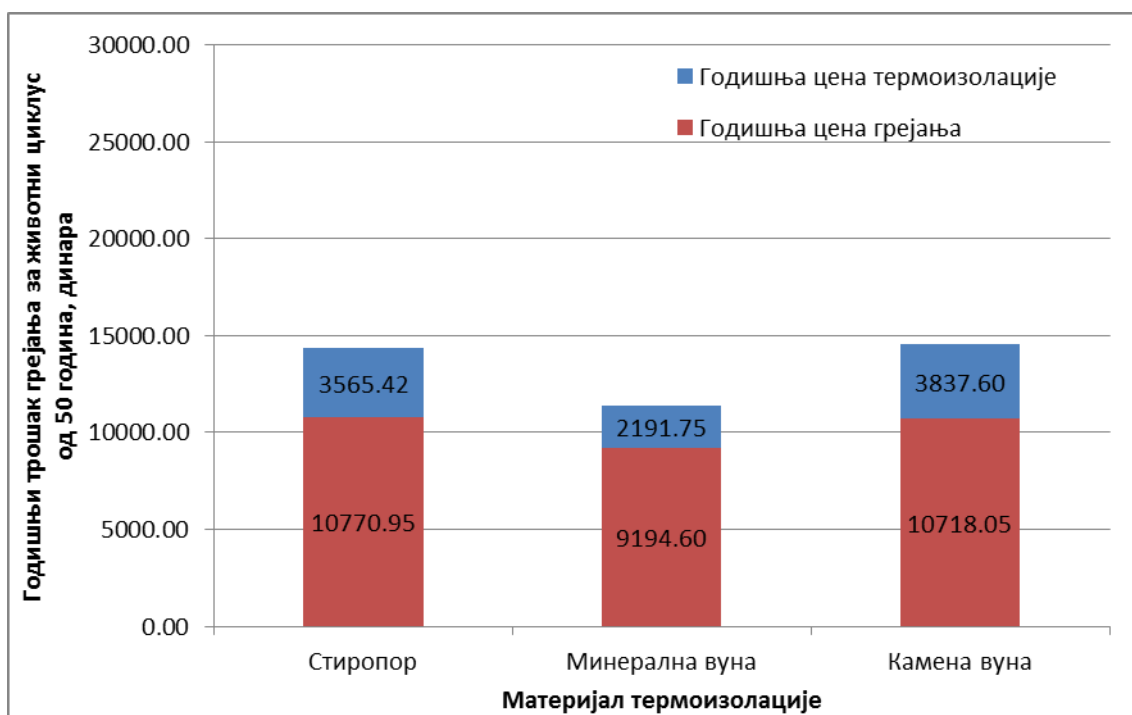
За оптималне дебљине термоизолационог слоја у зависности од врсте материјала и животног циклуса, слика 11.15 даје годишњи трошак грејања са економског аспекта. Годишња трошак грејања је најмањи за минералну вуну као термоизолациони материјал, док стиропор и камена вуна имају мање више исту цену.



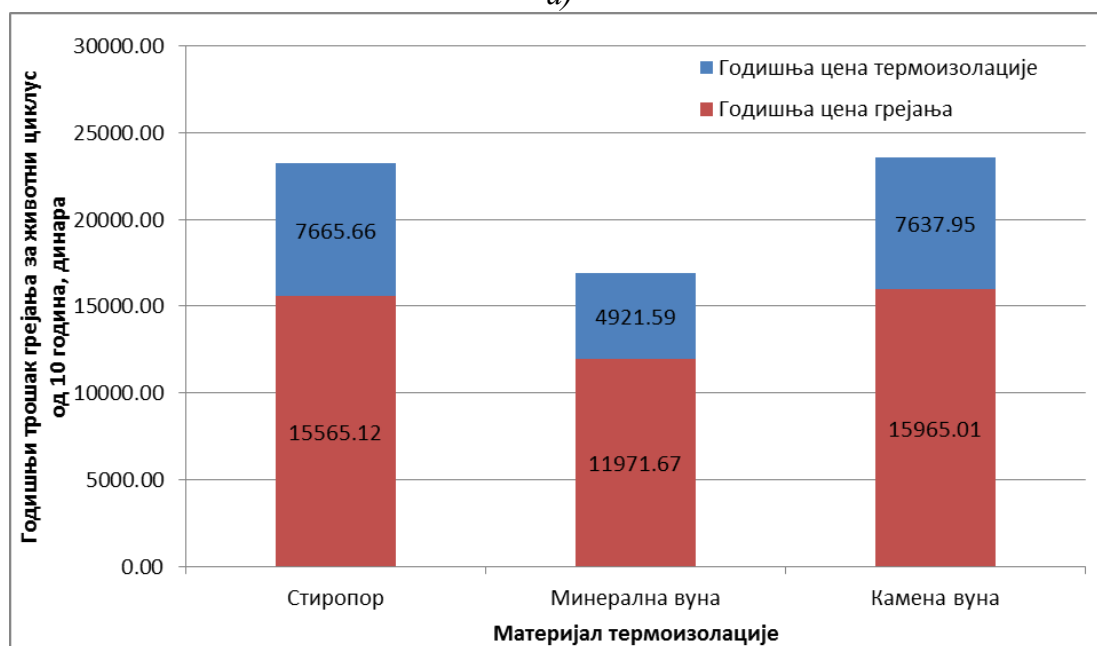
Слика 11.15. Годишњи трошак грејања са економског аспекта у зависности од врсте термоизолационог материјала и животног циклуса

Слика 11.16 показује годишњу цену термоизолације и годишњу цену грејања огледану кроз цену струје. На слици су приказана два случаја: први кад је животни

циклус 10 година и други када је животни циклус 50 година. Ова слика показује да минерална вуна има минимум годишњи трошак грејања у поређењу са осталим термоизолационим материјалима.



а)

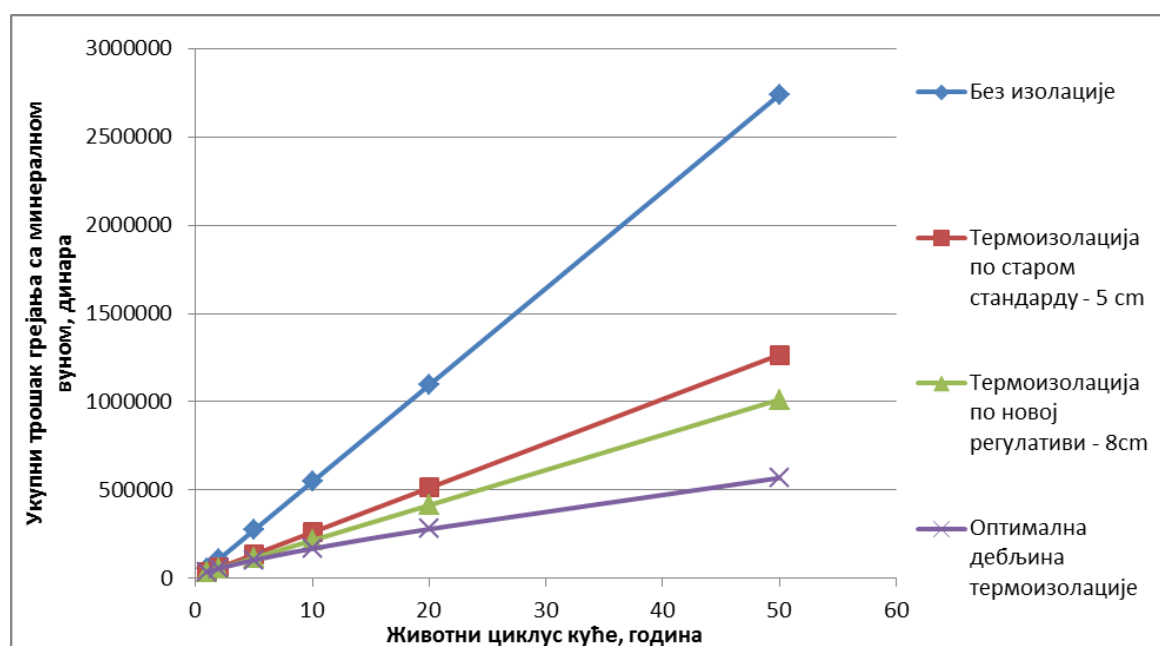


б)

Слика 11.16. Годишња цена грејања и годишња цена термоизолације код куће са оптималном дебљином слоја термоизолације за а) животни циклус од 50 година, б) животни циклус од 10 година

11.2.2. Минерална вуна као термоизолациони материјал

Као и код оптимизације на основу укупне искоришћене примарне енергије, посебно истраживање је изведено за минералну вуну и стиропор. Прво је урађено истраживање за минералну вуну. Четири испитиване куће су биле потпуно исте изузев дебљине термоизолационог слоја. Прва кућа нема никакву термоизолацију, друга има термоизолацију која задовољава старе стандарде, трећа има термоизолацију која задовољава нову регулативу, а четврта има оптималну дебљину термоизолационог слоја. Слика 11.17 показује укупни трошак грејања са економског аспекта у зависности од животног циклуса и једне од четири куће. Укупни трошак грејања расте са бројем година животног циклуса што је и очекивано.



Слика 11.17. Укупна трошак грејања у зависности од животног циклуса. Линије представљају куће без исолације, са исолацијом по старом стандарду, са исолацијом по новој регулативи, и са исолацијом оптималне дебљине. Термоизолациони материјал је минерална вуна.

У табели 11.3 је ради лакшег прегледа дата оптимална дебљина термоизолационог слоја од минералне вуне када се оптимизује укупни трошак грејања са економског аспекта у зависности од животног циклуса. Приметно је да тенденција раста оптималне дебљине опада са већим бројем година животног циклуса. Такође је приметно и да су дебљине термоизолационог слоја доста мање него код оптимизације укупне искоришћене примарне енергије. Дебљина за 1 годину животног циклуса је већ већа од старог стандарда док је за 2 године животног циклуса за 1 центиметар већа од нове регулативе. Оптимална дебљина за 10 година животног циклуса је 23 центиметра.

Табела 11.3. Оптимална дебљина термоизолационог слоја од минералне вуне када се оптимизује укупни трошак грејања са економског аспекта у зависности од животног циклуса

| Животни циклус, година | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
|---|------|------|------|------|------|------|
| Оптимална дебљина термоизолационог слоја, m | 0.06 | 0.09 | 0.16 | 0.23 | 0.33 | 0.52 |

У табели 11.4 је приказан укупни трошак грејања код кућа без изолације, са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптималном дебљином термоизолације са економског аспекта када је минерална вуна термоизолациони материјал. Наравно, како је и очекивано, већ од две године животног циклуса је приметно да кућа без изолације има највећи укупни трошак грејања, па затим кућа са дебљином термоизолационог слоја по старом стандарду од 5 центиметара, па затим кућа са термоизолационим слојем по новој регулативи од 8 центиметара и на крају најмањи трошак грејања има кућа са оптималном дебљином термоизолације. На нивоу од 10 година животног циклуса приметна је драстична разлика у потрошњи од скоро 47 хиљада динара (22% укупног трошка грејања куће са 8 центиметара термоизолационог слоја) између куће са оптималном дебљином термоизолације и куће са дебљином термоизолације од 8 центиметара. Ако се упореде кућа са оптималном дебљином и кућа по старом стандарду уштеда је скоро 93 хиљаде динара што чини 35% укупног трошка грејања за кућу са термоизолацијом по старом стандарду. И коначно ако се упореде кућа са оптималном дебљином термоизолације и кућа без термоизолације уштеда је чак 375,5 хиљада динара за животно циклус што чини око 69% укупног трошка грејања за кућу без термоизолације. Са порастом броја година животног циклуса ове вредности расту као и проценти уштеде.

Табела 11.4. *Укупни трошак грејања код кућа без изолације, са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптималном дебљином термоизолације са економског аспекта када је минерална вуна термоизолациони материјал изражен у динарима*

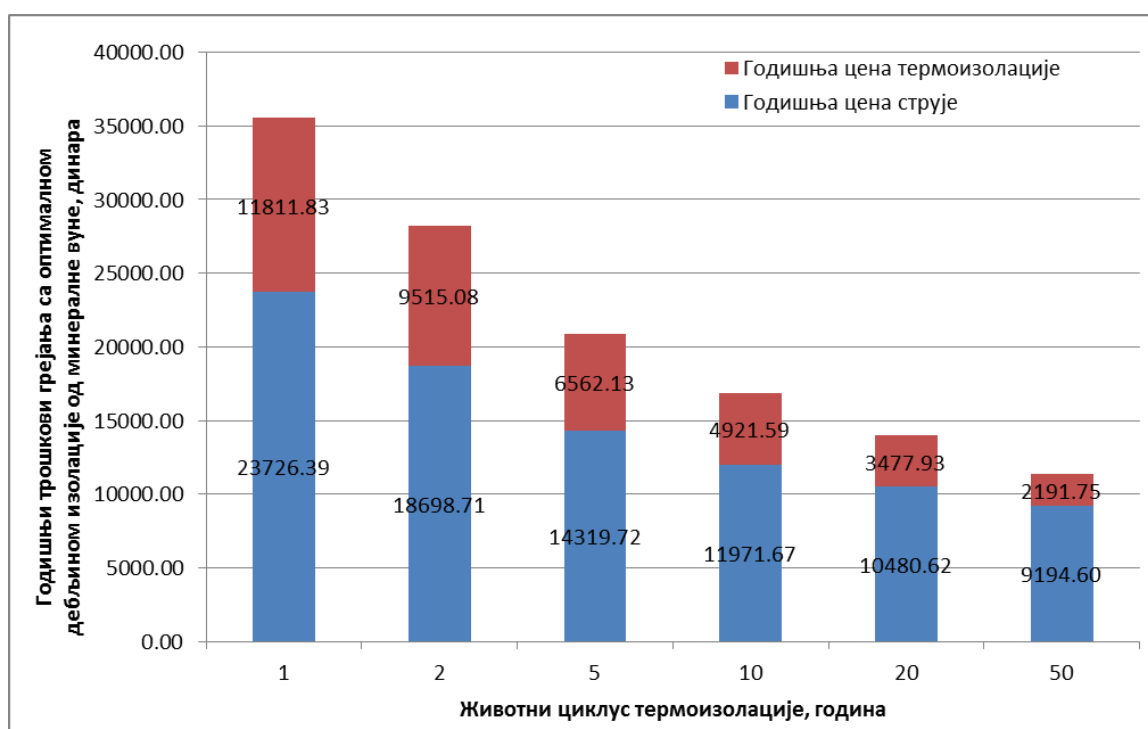
| Животни циклус, година | Без изолације | Термоизолација по старом стандарду – 5 cm | Термоизолација по новој регулативи – 8cm | Оптимална дебљина термоизолације |
|------------------------|---------------|---|--|----------------------------------|
| 1 | 54752.47 | 35616.87 | 36709.89 | 35538.21 |
| 2 | 109504.95 | 60734.34 | 56620.74 | 56427.58 |
| 5 | 273762.37 | 136086.75 | 116353.28 | 104409.21 |
| 10 | 547524.74 | 261674.09 | 215907.52 | 168932.69 |
| 20 | 1095049.48 | 512848.79 | 415016.00 | 279171.00 |
| 50 | 2737623.71 | 1266372.87 | 1012341.43 | 569317.27 |

У табели 11.5 дате су укупне цене термоизолације код кућа са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптималном дебљином термоизолације са економског аспекта, када је минерална вуна термоизолациони материјал изражена у динарима. Укупне цене термоизолације су фиксне за термоизолацију по старом стандарду и новој регулативи и износе 10500 динара, односно 16800 динара. Укупна цена термоизолације када се користи оптимална дебљина термоизолационог слоја расте са бројем година животног циклуса, јер самим тим расте и дебљина термоизолационог слоја. Тада је укупна цена од 11811 динара за животно циклус од 1 године до 109587 динара за животно циклус од 50 година. Интересантно је да је укупна цена термоизолације за животно циклус од 10 година око 49216 динара.

Табела 11.5. Укупна цена термоизолације код кућа са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптималном дебљином термоизолације са економског аспекта када је минерална вуна термоизолациони материјал изражена у динарима

| Животни циклус, година | 5 cm | 8 cm | Оптимална дебљина |
|------------------------|---------|----------|-------------------|
| 1 | 10499.4 | 16799.04 | 11811.83 |
| 2 | 10499.4 | 16799.04 | 19030.16 |
| 5 | 10499.4 | 16799.04 | 32810.63 |
| 10 | 10499.4 | 16799.04 | 49215.94 |
| 20 | 10499.4 | 16799.04 | 69558.53 |
| 50 | 10499.4 | 16799.04 | 109587.49 |

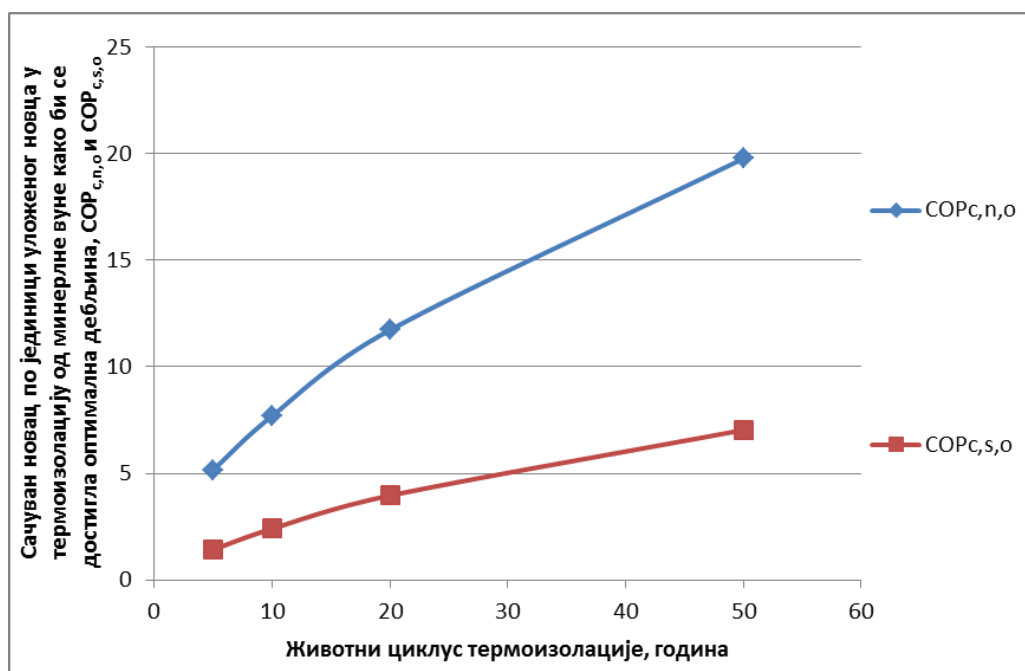
На слици 11.18 је приказан укупни трошак грејања рашчлањен на годишњу цену термоизолације и годињу цену струје у зависности од животног циклуса када је термоизолациони материјал минерална вуна оптималне дебљине. Приметно је да како расте број година животног циклуса учешће годишње цене термоизолације у годишњем трошку термоизолације опада од 33% процената за животни циклус од 1 године, преко 29% за животни циклус од 10 година до 19% за животни циклус од 50 година.



Слика 11.18. Укупни трошак грејања рашчлањен на годишњу цену термоизолације и годињу цену струје у зависности од животног циклуса када је термоизолациони материјал минерална вуна оптималне дебљине

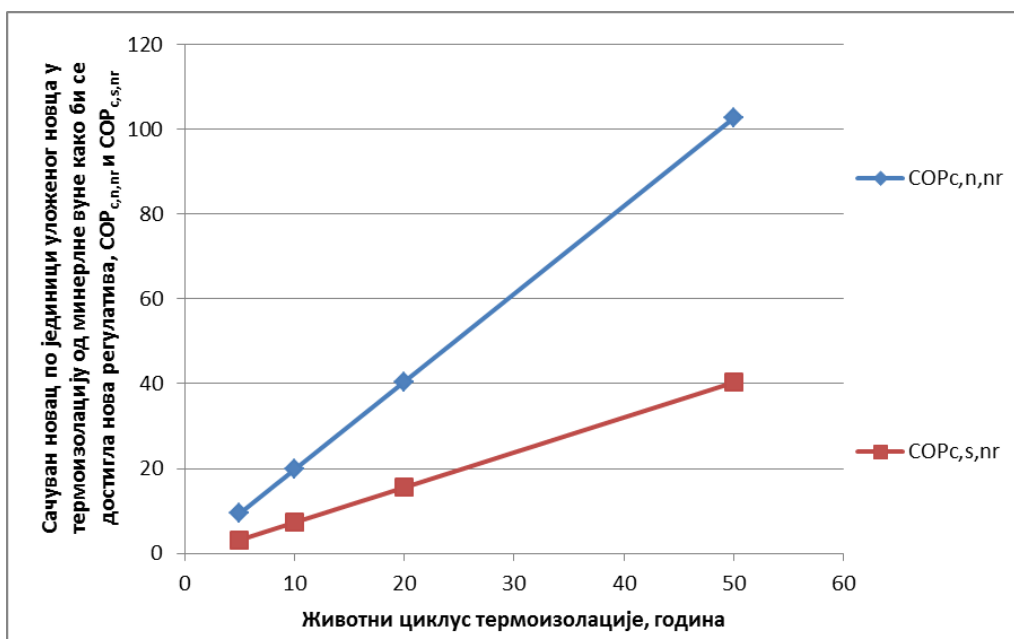
Да би се сагледала уштеда новца за животни циклус од 5 до 50 година, на слици 11.19 је приказан *COP* уложеног новца у термоизолацију за два случаја реновирања: (1) када се ради реновирање на кући без претходне термоизолације, и (2) када се ради реновирање на кући која је претходно изолована по старим стандардима. У првом

случају, минерална вуна оптималне дебљине се поставља на циглу окренута ка спољашњој страни – $COP_{c,n,o}$. У другом случају, на већ постојећи слој термоизолације са спољашње стране се додаје нови слој минералне вуне који допуњује дебљину термоизолације до оптималне – $COP_{c,s,o}$. Види се да се за сваки динар (1 динар) уложеног новца у термоизолацију оптималне дебљине на кућу без претходне изолације сачува $COP_{c,n,o}=19.79$ динара укупног трошка грејања. Затим, види се да улагањем 1 динара у термоизолациони слој оптималне дебљине од минералне вуне који се додаје на већ постојећу термоизолацију по старом стандарду штеди $COP_{c,s,o}=7.03$ динара укупног трошка грејања. Ова два случаја су разматрана за животни циклус од 50 година. Када је у питању животни циклус од 10 година, онда је $COP_{c,n,o}=7.69$, док је $COP_{c,s,o}=2.40$.



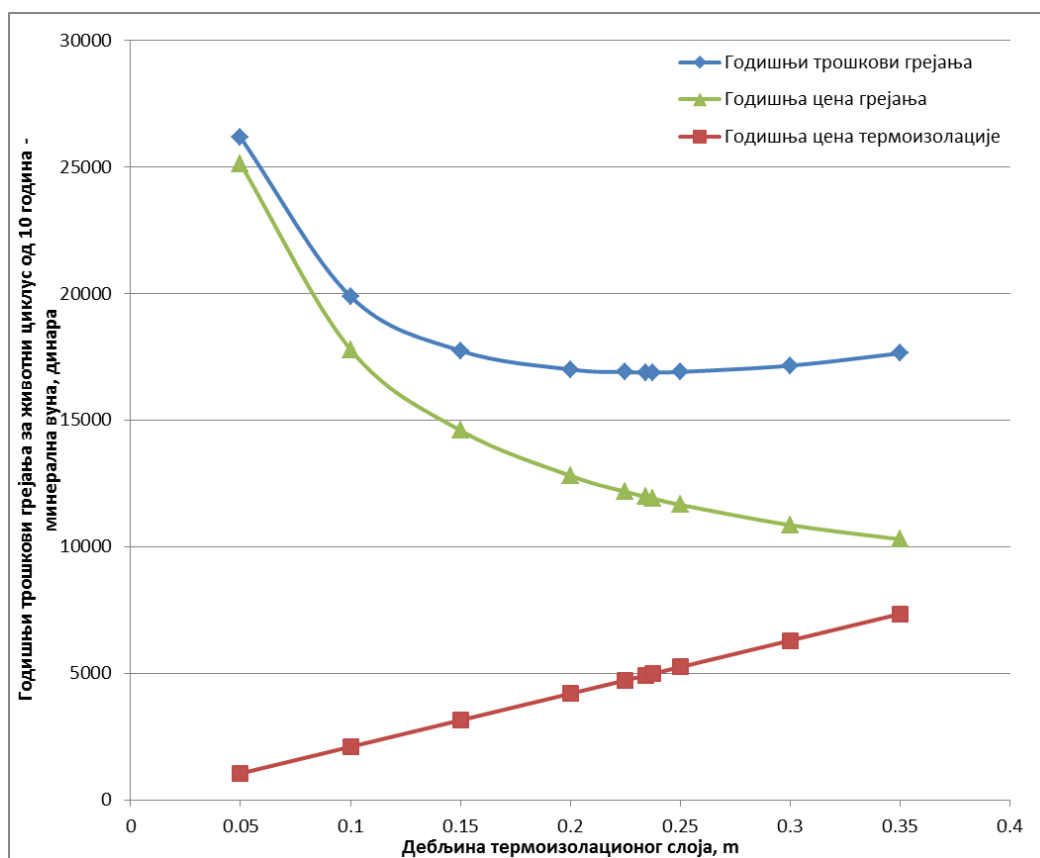
Слика 11.19. Уштеда новца по јединици уложеног новца у термоизолацију до оптималне дебљине када се као материјал користи минерална вуна

Да би се сагледала уштеда новца за различите животне циклусе, на слици 11.20 је приказан COP уложеног новца у две опције реновирања: (3) када се на кућу без термоизолације додаје термоизолација од минералне вуне чија дебљина задовољава нову регулативу – $COP_{c,n,nr}$, и (4) када се на кућу са термоизолацијом од минералне вуне чија дебљина задовољава старе стандарде додаје нови слој термоизолације од минералне вуне како би дебљина термоизолационог слоја задовољила нову регулативу – $COP_{c,s,nr}$. Улагањем 1 динара у термоизолацију од минералне вуне која задовољава нову регулативу на претходно неизоловану кућу чува се $COP_{c,n,nr}=102.7$ динара укупног трошка грејања, док се улагањем 1 динара у термоизолацију од минералне вуне на кућу која је претходно била изолована по старом стандарду како би задовољила нову регулативу чува $COP_{c,s,nr}=40.32$ динара укупног трошка грејања када се посматра животни циклус од 50 година. Ако се посматра животни циклус од 10 година, $COP_{c,n,nr}=19.74$, док је $COP_{c,s,nr}=7.26$.



Слика 11.20. Уштеда новца по јединици уложеног новца у термоизолацију до дебљине нове регулативе када се као материјал користи минерална вуна

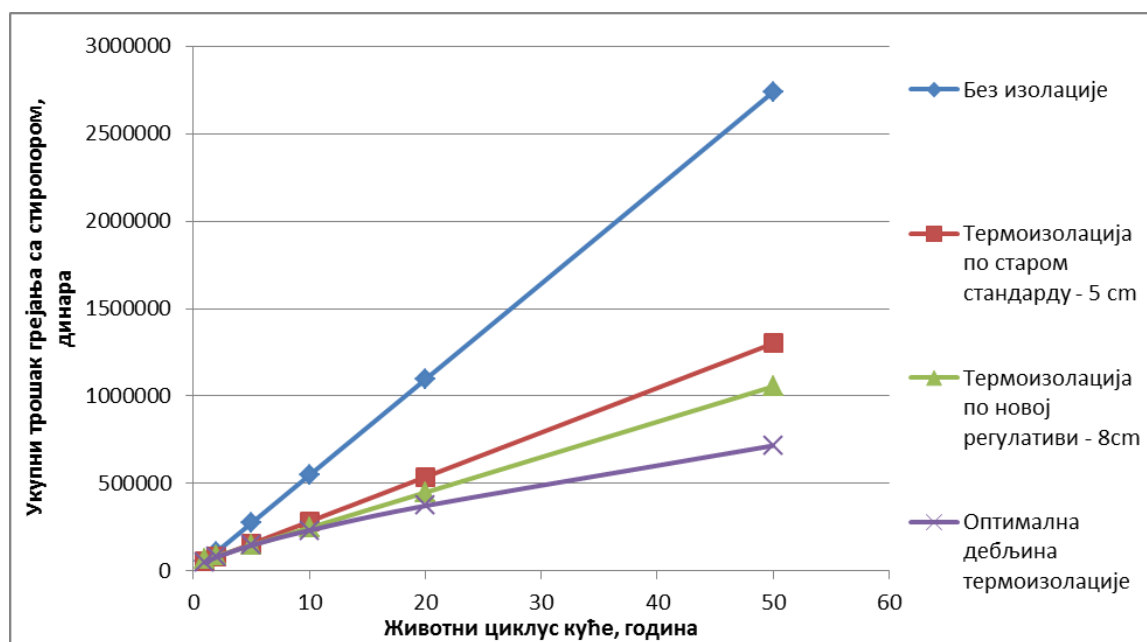
Минимум циља функције (укупни трошкови грејања) је дат на слици 11.21. Резултати приказани на тој слици су за животни циклус од 10 година када је минерална вуна термоизолациони материјал. Са слике се види да је оптимална дебљина термоизолације у овом случају 23 см.



Слика 11.21. Оптимална дебљина термоизолације од минералне вуне за животни циклус од 10 година када се оптимизација врши на основу укупног трошка грејања

11.2.3. Стиропор као термоизолациони материјал

На слици 11.22 приказан је укупни трошак грејања са економског аспекта у зависности од животног циклуса и врсте куће која се испитује: прва кућа нема термоизолацију, друга има термоизолацију која задовољава старе стандарде, трећа има термоизолацију која задовољава нову регулативу, а четврта има оптималну дебљину термоизолационог слоја од стиропора. Укупни трошак грејања расте са бројем година животног циклуса што је и очекивано.



Слика 11.22. Укупна трошак грејања у зависности од животног циклуса. Линије представљају куће без изолације, са изолацијом по старој стандарду, са изолацијом по новој регулативи, и са изолацијом оптималне дебљине. Термоизолациони материјал је минерална вуна.

У табели 11.6 је ради лакшег прегледа дата оптимална дебљина термоизолационог слоја од стиропора када се оптимизује укупни трошак грејања са економског аспекта у зависности од животног циклуса. Приметно је да тенденција раста оптималне дебљине опада са већим бројем година животног циклуса. Такође је приметно и да су дебљине термоизолационог слоја стиропора доста мање него код оптимизације укупне искоришћене примарне енергије. Дебљина за 1 годину животног циклуса је само 2 центиметра, док је за 2 године животног циклуса за 4 центиметра. Када се погледају ови подаци приметно је да је оптимална дебљина за животни циклус од 5 година исти као и за нову регулативу за реновиране куће док је оптимална дебљина за 10 година животног циклуса 13 центиметара што је за 2 више од нове регулативе за нове куће у овом случају.

Табела 11.6. Оптимална дебљина термоизолационог слоја од стиропора када се оптимизује укупни трошак грејања са економског аспекта у зависности од животног циклуса

| Животни циклус, година | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
|---|------|------|------|------|------|------|
| Оптимална дебљина термоизолационог слоја, m | 0.02 | 0.04 | 0.08 | 0.13 | 0.20 | 0.31 |

У табели 11.7 је приказан укупни трошак грејања код кућа без изолације, са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптималном дебљином термоизолације са економског аспекта када је стиропор термоизолациони материјал. Наравно, како је и очекивано, већ од 5 година животног циклуса је приметно да кућа без изолације има највећи укупни трошак грејања, па затим кућа са дебљином термоизолационог слоја по старом стандарду од 5 центиметара, па затим кућа са термоизолационим слојем по новој регулативи од 8 центиметара и на крају најмањи трошак грејања има кућа са оптималном дебљином термоизолације. На нивоу од 10 година животног циклуса приметна је мања разлика у потрошњи од скоро 15130 динара (6% укупног трошка грејања куће са 8 центиметара термоизолационог слоја) између куће са оптималном дебљином термоизолације и куће са дебљином термоизолације од 8 центиметара. Ако се упореде кућа са оптималном дебљином и кућа по старом стандарду уштеда је скоро 50646 динара што чини 17,8% укупног трошка грејања за кућу са термоизолацијом по старом стандарду. И коначно ако се упореде кућа са оптималном дебљином термоизолације и кућа без термоизолације уштеда је чак 315217 динара за животно циклус што чини око 57,6% укупног трошка грејања за кућу без термоизолације. Са порастом броја година животног циклуса ове вредности расту као и проценти уштеде.

Табела 11.7. Укупни трошак грејања код кућа без изолације, са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптималном дебљином термоизолације са економског аспекта када је стиропор термоизолациони материјал изражен у динарима

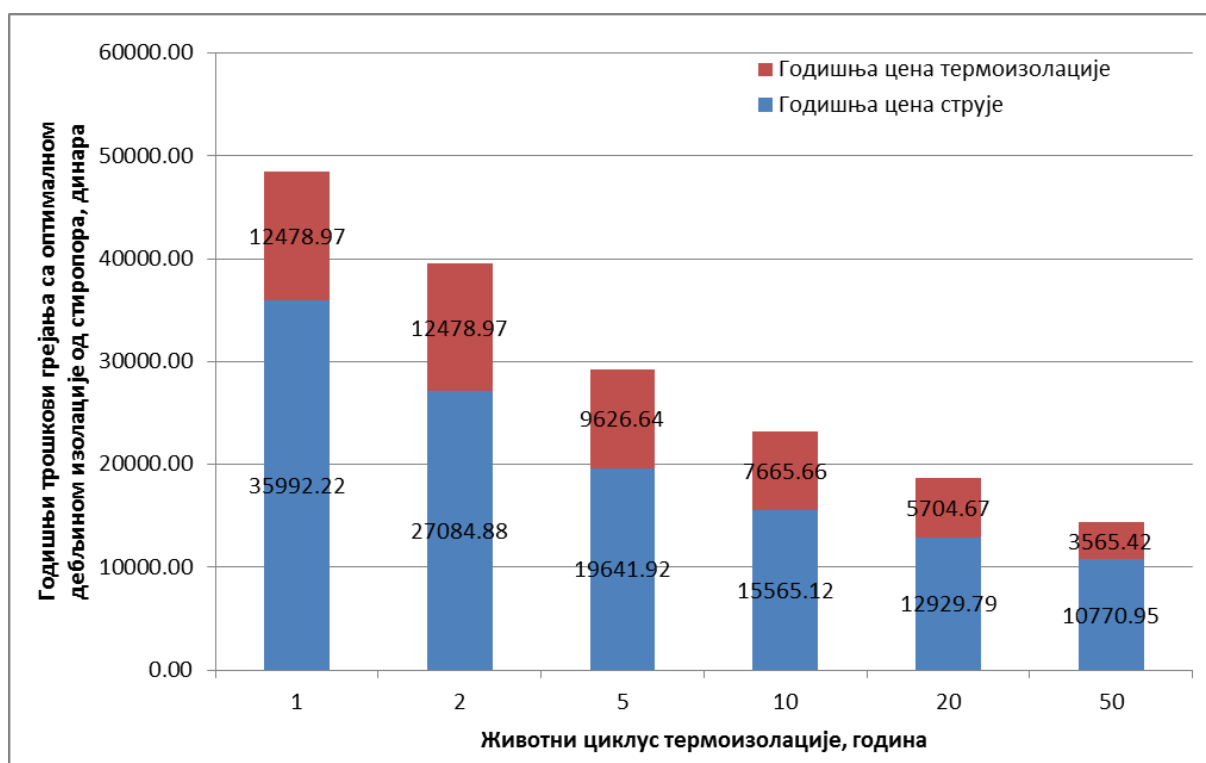
| Животни циклус, година | Без изолације | Термоизолација по старом стандарду - 5 cm | Термоизолација по новој регулативи - 8cm | Оптимална дебљина термоизолације |
|------------------------|---------------|---|--|----------------------------------|
| 1 | 54752.47 | 53966.34 | 65817.72 | 48471.19 |
| 2 | 109504.95 | 79409.32 | 85998.06 | 79127.70 |
| 5 | 273762.37 | 155738.24 | 146539.05 | 146342.80 |
| 10 | 547524.74 | 282953.11 | 247440.71 | 232307.77 |
| 20 | 1095049.48 | 537382.85 | 449244.02 | 372689.19 |
| 50 | 2737623.71 | 1300672.06 | 1054653.97 | 716818.53 |

У табели 11.8 дате су укупне цене термоизолације код кућа са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптималном дебљином термоизолације са економског аспекта када је стиропор термоизолациони материјал изражена у динарима. Укупне цене термоизолације су фиксне за термоизолацију по старом стандарду и новој регулативи и износе 28523 динара, односно 45637 динара. Укупна цена термоизолације када се користи оптимална дебљина термоизолационог слоја расте са бројем година животног циклуса, јер самим тим расте и дебљина термоизолационог слоја. Тада је укупна цена од 12479 динара за животно циклус од 1 године до 178271 динар за животно циклус од 50 година. Интересантно је да је укупна цена термоизолације за животно циклус од 10 година око 76656 динара.

Табела 11.8. Укупна цена термоизолације код кућа са термоизолацијом по старом стандарду, са термоизолацијом по новој регулативи и са оптималном дебљином термоизолације са економског аспекта када је стиропор термоизолациони материјал изражена у динарима

| Животни циклус, година | 5 cm | 8 cm | Оптимална дебљина |
|---------------------------|----------|----------|----------------------|
| 1 | 28523.37 | 45637.39 | 12478.97 |
| 2 | 28523.37 | 45637.39 | 24957.95 |
| 5 | 28523.37 | 45637.39 | 48133.19 |
| 10 | 28523.37 | 45637.39 | 76656.56 |
| 20 | 28523.37 | 45637.39 | 114093.48 |
| 50 | 28523.37 | 45637.39 | 178271.06 |

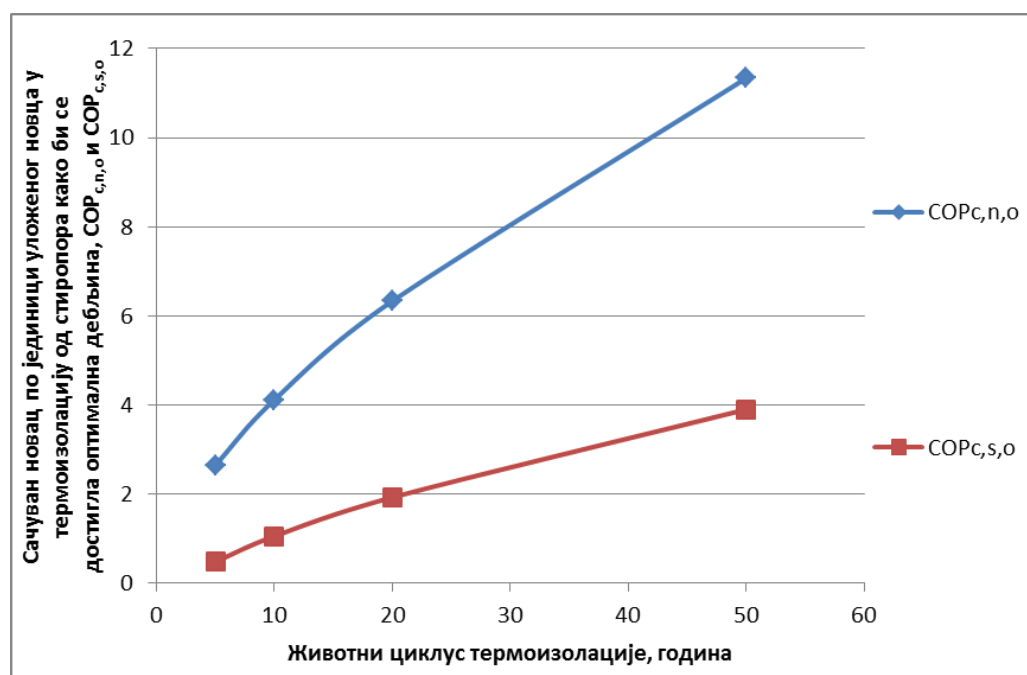
На слици 11.23 је приказан укупни трошак грејања рашчлањен на годишњу цену термоизолације и годишњу цену струје у зависности од животног циклуса када је термоизолациони материјал стиропор оптималне дебљине. Приметно је да како расте број година животног циклус учешће годишње цене термоизолације у годишњем трошку термоизолације за разлику од минералне вуне варира од 25,7% процената за животни циклус од 1 године, преко 33% за животни циклус од 10 година до 24,8% за животни циклус од 50 година.



Слика 11.23. Укупни трошак грејања рашчлањен на годишњу цену термоизолације и годишњу цену струје у зависности од животног циклуса када је термоизолациони материјал стиропор оптималне дебљине

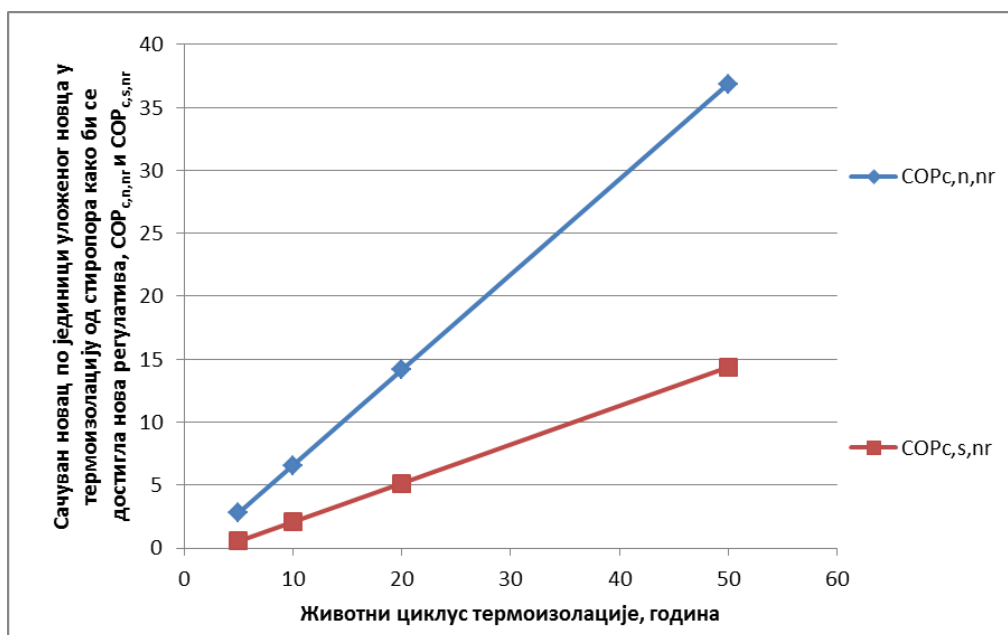
Да би се сагледала уштеда новца за животни циклус од 5 до 50 година, на слици 11.24 је приказан *COP* уложеног новца у термоизолацију за два случаја реновирања: (1)

када се ради реновирање на кући без претходне термоизолације, и (2) када се ради реновирање на кући која је претходно изолована по старим стандардима. У првом случају, стиропор оптималне дебљине се поставља на циглу окренут ка спољашњој страни – $COP_{c,n,o}$. У другом случају, на већ постојећи слој термоизолације са спољашње стране се додаје нови слој стиропора који допуњује дебљину термоизолације до оптималне – $COP_{c,s,o}$. Види се да се за сваки динар (1 динар) уложеног новца у термоизолацију оптималне дебљине на кућу без претходне изолације сачува $COP_{c,n,o}=11.34$ динара укупног трошка грејања. Затим, види се да улагањем 1 динара у термоизолациони слој оптималне дебљине од стиропора који се додаје на већ постојећу термоизолацију по старом стандарду штеди $COP_{c,s,o}=3.90$ динара укупног трошка грејања. Ова два случаја су разматрана за животног циклус од 50 година. Када је у питању животног циклус од 10 година, онда је $COP_{c,n,o}=4.11$, док је $COP_{c,s,o}=1.05$.



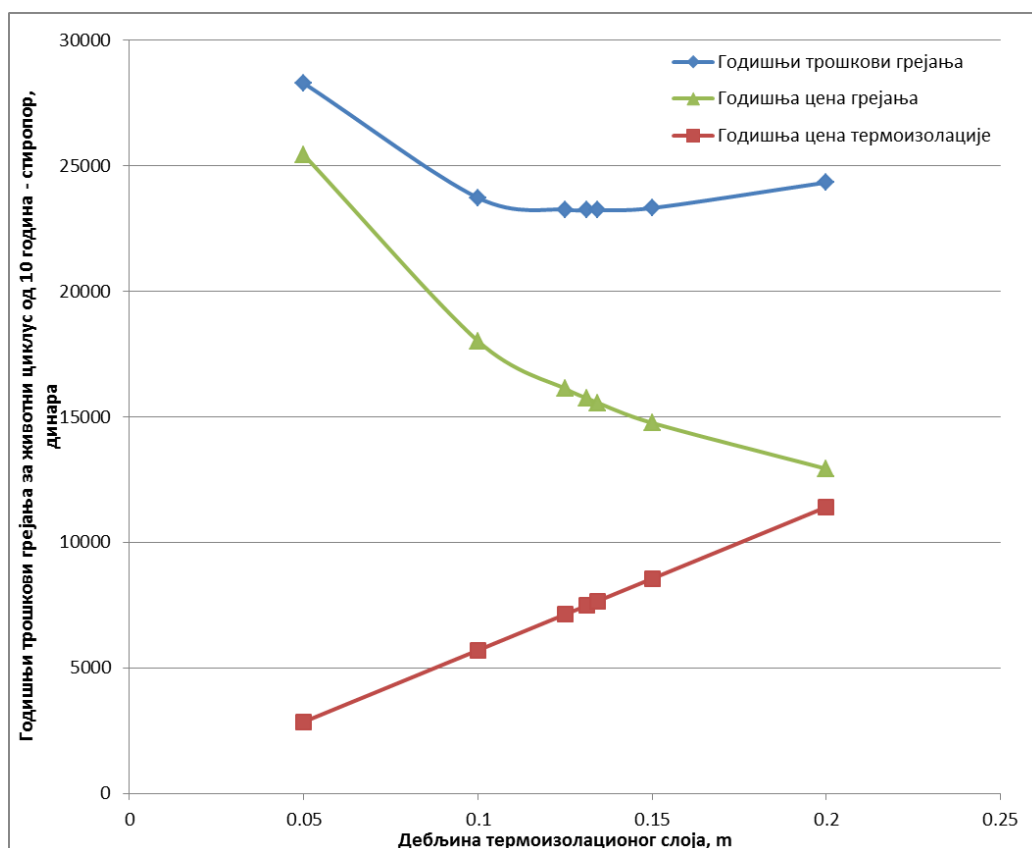
Слика 11.24. Уштеда новца по јединици уложеног новца у термоизолацију до оптималне дебљине када се као материјал користи стиропор

Да би се сагледала уштеда новца за различите животног циклусе, на слици 11.25 је приказан COP уложеног новца у две опције реновирања: (3) када се на кућу без термоизолације додаје термоизолација од стиропора чија дебљина задовољава нову регулативу – $COP_{c,n,nr}$, и (4) када се на кућу са термоизолацијом од стиропора чија дебљина задовољава старе стандарде додаје нови слој термоизолације од стиропора како би дебљина термоизолационог слоја задовољила нову регулативу - $COP_{c,s,nr}$. Улагањем 1 динара у термоизолацију од стиропора која задовољава нову регулативу на претходно неизоловану кућу чува се $COP_{c,n,nr}=36.88$ динара укупног трошка грејања, док се улагањем 1 динара у термоизолацију од стиропора на кућу која је претходно била изолована по старом стандарду како би задовољила нову регулативу чува $COP_{c,s,nr}=14.38$ динара укупног трошка грејања када се посматра животног циклус од 50 година. Ако се посматра животног циклус од 10 година, $COP_{c,n,nr}=6.58$, док је $COP_{c,s,nr}=2.08$.



Слика 11.25. Уштеда новца по јединици уложеног новца у термоизолацију до дебљине нове регулативе када се као материјал користи стиропор

Минимум циља функције (укупни трошкови грејања) је дат на слици 11.26. Резултати приказани на тој слици су за животни циклус од 10 година када је стиропор термоизолациони материјал. Са слике се види да је оптимална дебљина термоизолације у овом случају 23 см.



Слика 11.26. Оптимална дебљина термоизолације од стиропора за животни циклус од 10 година када се оптимизација врши на основу укупног трошка грејања

11.2.4. Поређење оптималних дебљина термоизолационог слоја за укупан трошак грејања при коришћењу минералне вуне и стиропора у функцији од животног циклуса

Вредности оптималних дебљина термоизолационог слоја направљеног или од минералне вуне или од стиропора су дате у табели 11.9. Период повраћаја новца уложеног у термоизолацију је такође дат у овој табели за реновирање термоизолације са старог стандарда на оптималну дебљину термоизолационог слоја. Може се приметити да је за исти животни циклус оптимална дебљина термоизолационог слоја од стиропора за 2 пута мања од оптималне дебљине термоизолационог слоја од минералне вуне и да опада са повећањем броја година животног циклуса. За обе врсте изолације период повраћаја новца уложеног у термоизолацију је у кратком временском периоду. Ово је такође условљено тиме да је овај период повраћаја новца уложеног у термоизолацију израчунат за оптималне вредности дебљине термоизолационог слоја ових материјала. Примера ради периоди повраћаја новца за животни циклус су за минералну вуну 2,95 година и за стиропор 4,87 година. Ово су одлични временски периоди за овакве инвестиције.

Табела 11.9. Оптимална дебљина термоизолационог слоја од минералне вуне и стиропора за укупни трошак грејања у зависности од животног циклуса. Период повраћаја новца уложеног у термоизолацију за реновирање куће по старом стандарду са оптималном дебљином термоизолационог слоја

| Животни циклус, година | Минерална вуна | | Стиропор | |
|------------------------|--|--|--|--|
| | Оптимална дебљина термоизолационог слоја, метара | Период повраћаја уложеног новца у реновирање, година | Оптимална дебљина термоизолационог слоја, метара | Период повраћаја уложеног новца у реновирање, година |
| 5 | 0.16 | 2.07 | 0.08 | 3.38 |
| 10 | 0.23 | 2.95 | 0.13 | 4.87 |
| 20 | 0.33 | 4.03 | 0.20 | 6.84 |
| 50 | 0.52 | 6.22 | 0.31 | 10.21 |

11.2.5. Евалуација грешке

Евалуација грешке је вршена додавањем 10% на цену термоизолације од стиропора код симулације куће са оптималном дебљином термоизолационог слоја. Резултати овог упоређивања су дати у табели 11.10. Као и код примера са оптимизацијом примарне енергије, резултати показују да је код кућа са мањим животним циклусом одступање тј. грешка много већа него код кућа са великим животним циклусом. На пример, код животног циклуса од 1 године, грешка износи чак 16,5%. Међутим, код животног циклуса од 10 година, грешка је мања од 3,24%.

Табела 11.10. Разлика у резултатима са стиропором као материјалом када се уведе грешка од 10% у цену термоизолационог материјала

| Животни циклус, година | Оптимална дебљина термоизолационог слоја, cm | Оптимална дебљина термоизолационог слоја (+10% грешке у цени термоизолације), cm |
|------------------------|--|--|
| 1 | 2.187 | 1.827 |
| 2 | 4.375 | 4.062 |
| 5 | 8.437 | 8.125 |
| 10 | 13.437 | 13.137 |
| 20 | 20.00 | 19.362 |
| 50 | 31.25 | 31.25 |

11.2.6. Закључци везани за оптимизацију дебљине термоизолације у функцији од економске анализе

У овом случају вршена је оптимизација термоизолационог слоја у зависности од уложеног новца у термоизолацију и новца потребног за загревање простора. Резултати показују да је укупни трошак грејања најмањи са минералном вуном као термоизолационим материјалом. Детаљно су разматране две опције реновирања када се коришћењем минералне вуне или стиропора постиже оптимална дебљина термоизолационог слоја на кућу без термоизолације и на кућу која задовољава старе стандарде по питању термоизолације. Уштеда укупне количине потребног новца за грејање по јединици новца уложеног у термоизолацију је за минералну вуну од 2,4 до 7,69 пута, док су за стиропор од 1,05 до 4,11 пута за животни циклус од 10 година. Такође, још две опције реновирања су разматране када се од куће без термоизолације и куће која задовољава старе стандарде додавањем термоизолационог слоја достижу вредности потребне за нову регулативу. Уштеда укупне количине потребног новца за грејање по јединици новца уложеног у термоизолацију се креће од 7,26 до 19,74 пута за минералну вуну, односно 2,08 до 6,58 пута за стиропор за животни циклус од 10 година.

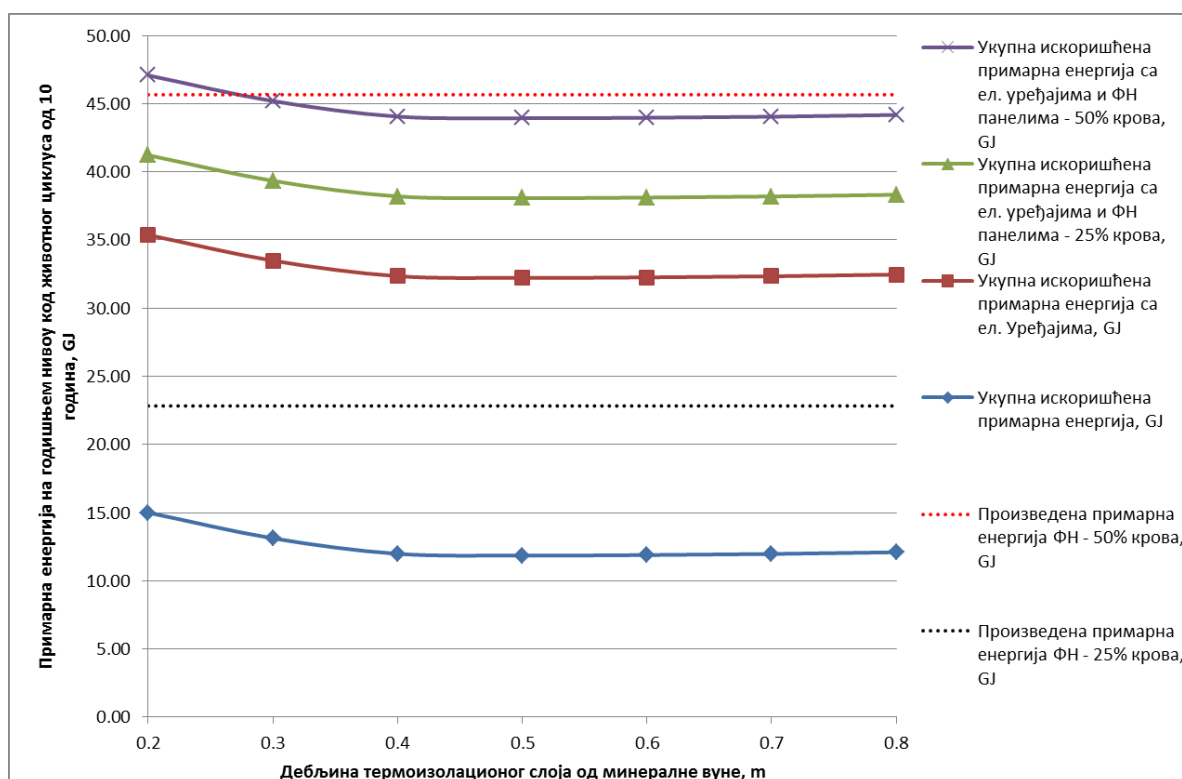
Оптималне дебљине термоизолације су од 16 cm за минералну вуну и 8 cm за стиропор за животни циклус од 5 година, до 23 cm за минералну вуну и 13 cm за стиропор за животни циклус од 10 година. Сада су разлике у дебљини мање него код примарне енергије и условљене су ценом минералне вуне. За разлику од примарне енергије овде се већ поставља питање оправданости коришћења минералне вуне уместо стиропора и када се детаљније сагледају резултати примећује се да се готово поклапају са дебљинама по новом правилнику за енергетску ефикасност.

Енергетски период повраћаја уложеног новца у термоизолацију је врло добар јер је веома кратак. Код минералне вуне креће се од 2,07 до 6,22 године у зависности од животног циклуса, док је код стиропора од 3,38 до 10,21 година у зависности од животног циклуса.

11.3. Достижање принципа нето нулте енергетске куће код примењеног модела

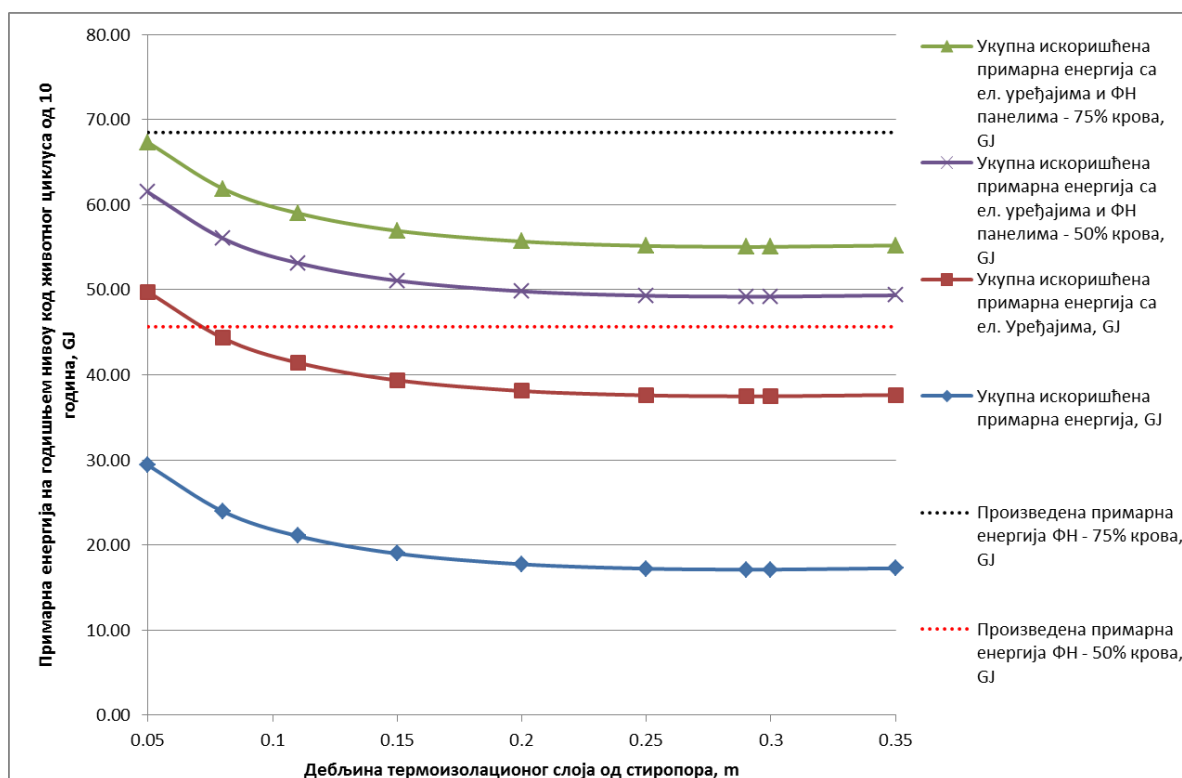
Услед самог геометријског облика достигање куће нето-нулте енергетске потрошње је могуће и зависи од процента површине крова који се налази под фотонапонским панелима. Како кров има површину од $43,37 \text{ m}^2$, 50% површине крова износи $21,69 \text{ m}^2$. Површина од $21,69 \text{ m}^2$ фотонапонских панела ствара $15,22 \text{ GJ}$ финалне електричне енергије, која је еквивалентна $45,66 \text{ GJ}$ финалне енергије. Како у овом случају нису разматрани соларни колектори, потрошња електричних уређаја и опреме за освету је увек иста и износи $4,3 \text{ GJ}$ за електричне уређаје и $2,4 \text{ GJ}$ за освету, што у збиру даје $6,7 \text{ GJ}$ финалне енергије годишње. Када се та вредност преведе у примарну енергију, она износи $20,37 \text{ GJ}$ годишње. Такође, потребно је узети у обзир и енергију уложу у производњу фотонапонских панела, чија вредност зависи од заузете површине крова. Резултати приказани на сликама 11.26 и 11.27 су израчунати за животно циклус од 10 година.

При коришћењу минералне вуне као термоизолационог материјала, за дебљине термоизолационог слоја преко 25 cm довољно је да 50% крова буде под фотонапонским панелима, како би принцип нето-позитивне енергетске куће био достигнут, што је приказано на слици 11.27. При расту дебљине термоизолационог слоја дошло би се до тога да при дебљини од преко 1 m, а са 50% крова под фотонапонским панелима, ова кућа поново постаје нето-негативна енергетска кућа. Када се сагледају наведене чињенице, лако је закључити да је оптимизација дебљине термоизолационог слоја нужно неопходна при правилном дефинисању параметара куће у току њеног грађења и прорачунавања.



Слика 11.27. Укупна искоришћена примарна енергија укључујући и ел. уређаје и ФН панеле у односу на произведену примарну енергију куће са термоизолацијом од минералне вуне на годишњем нивоу, за животно циклус од 10 година

При коришћењу стиропора као термоизолационог материјала потребно је да 75% крова буде под фотонапонским панелима, како би принцип нето-позитивне енергетске куће био достигнут за све дебљине термоизолационог слоја, што је приказано на слици 11.28. Код куће са стиропором као термоизолационим материјалом није довољно да 50% крова буде под ФН панелима већ је неопходно да та вредност буде преко 69% за дебљине термоизолационог слоја које износе преко 8 cm, и преко 65% за дебљине термоизолационог слоја које износе преко 15 cm. Тада, кућа која је разматрана у овој дисертацији представља нето-позитивну енергетску кућу.



Слика 11.28. Укупна искоришћена примарна енергија укључујући и ел. уређаје и ФН панеле у односу на произведену примарну енергију куће са термоизолацијом од стиропор на годишњем нивоу, за животно циклус од 10 година

12. Закључак

Научни циљ дисертације је развој нових динамичких модела за симулацију и оптимизацију термичког понашања кућа нето-нулте енергетске потрошње. Ови модели су обухватили све факторе који утичу на зграду, како спољне, тако и унутрашње, али уједно и утицај људи током животног циклуса куће. Да би се тај циљ постигао најпре су развијени математички модели, методологија и алгоритам за динамичку симулацију, извршена је калибрација резултата са стварним подацима и на основу тога су додатно дефинисани фактори који утичу на енергетски биланс зграде. Све ово је урађено како би се добили модели који дају готово реално предвиђање потрошње енергије и осталих термичких параметара у зградама.

У оквиру дисертације најпре је анализирана литература која се састојала из претходних истраживања како би се усвојила потребна методологија која би била у складу са већ постојећим резултатима и радовима у овом пољу. Анализирана су истраживања на пољу нето-нултих енергетских кућа и принципи њихових изведби, као и утицај дебљине термоизолационог слоја са аспекта примарне енергије, економске оптимизације и ексергије.

Како би истраживања у овој дисертацији била што прецизнија, у оквиру анкетног испитивања усвојени су подаци везани за пројектовање понашања људи на овим просторима. У оквиру главе 6 детаљно су објашњени принципи сакупљања података и питања постављена анкетом. Добијени резултати су показали да је већина кућа старости између 20 и 40 година, да се при градњи није водило рачуна о уштеди енергије, док сада 85% испитаника мисли да је нужно неопходно узети у обзир и уштеду енергије. Такође велики део испитаника се греје на струју и термоизолација је најчешће од стиропора.

Резултати добијени анкетом о пројектовању понашања људи као и подаци о временским приликама искоришћени су при прављењу модела нето-нулте енергетске куће.

У експерименталном делу рада је направљена тест кућица како би се утврдила тачност програма *EnergyPlus*, као и утицај дебљине термоизолационог слоја на потрошњу енергије. Резултати су показали да додатна калибрација модела није неопходна.

Направљени модели су користили програме *Genopt* и *EnergyPlus* за оптимизацију и притом су коришћени математички модели приказани у глави 10. Ови модели узимају у обзир енергију уложу у термоизолациони слој код оптимизације примарне енергије, и цену термоизолационог слоја код економске оптимизације као контратег укупној потрошеној енергији за грејање и цени потрошене енергије за грејање.

У глави 11 су приказани резултати оптимизације примарне енергије и економске оптимизације. Код оптимизације примарне енергије резултати су доста другачији него код економске оптимизације. Оптималне дебљине термоизолације су од 45 cm за минералну вуну и 20 cm за стиропор за животно циклус од 5 година; до 64 cm

за минералну вуну и 29 cm за стиропор за животни циклус од 10 година. Оволике разлике у дебљини термоизолационог слоја код ова два материјала су изазване великом разликом у специфичној уложеној енергији у материјале при њиховој производњи. Ове разлике би биле мање у другим земљама уколико је коефицијент трансформације примарне енергије у финалну другачији. Изведен је закључак да је, у зависности од оптималне укупне искоришћене примарне енергије, најбоље узети минералну вуну као термоизолацију. То са собом носи неке проблеме који су конструктивно решиви, а који се односе на то како поставити толико дебео слој термоизолације. Посматрано са аспекта конструкције и оптималне укупне искоришћене примарне енергије, дебљина термоизолације не би требало да буде већа од оптималне дебљине за животни циклус од 10 година.

Енергетски период повраћаја уложене енергије у термоизолацију је врло добар јер је веома кратак. Код минералне вуне креће се од 1,1 до 4,2 године у зависности од животног циклуса, док је код стиропора од 1,41 до 3,7 година у зависности од животног циклуса.

Код економске анализе је приметно да је разлика између материјала мања. Оптималне дебљине термоизолације су од 16 cm за минералну вуну и 8 cm за стиропор за животни циклус од 5 година, до 23 cm за минералну вуну и 13 cm за стиропор за животни циклус од 10 година. Сада су разлике у дебљини мање него код примарне енергије и условљене су ценом минералне вуне.

За разлику од примарне енергије овде се већ поставља питање оправданости коришћења минералне вуне уместо стиропора и када се мало боље погледају резултати скоро да се покалају са дебљинама по новом правилнику за енергетску ефикасност.

Енергетски период повраћаја уложене енергије у термоизолацију је врло добар јер је веома кратак. Код минералне вуне креће се од 2,07 до 6,22 година у зависности од животног циклуса, док је код стиропора од 3,38 до 10,21 година у зависности од животног циклуса.

Закључено је да уколико се користи минерална вуна као термоизолациони материјал довољно је да кућа има 50% крова покривено фотонапонским ћелијама. Ако се користи стиропор као термоизолациони материјал потребно је да 75% крова буде покривено фотонапонским ћелијама. Наведени проценти важе за примењени облик куће и њену површину, под условом да се разматра животни циклус од 10 година.

Ова дисертација нам даје у увид модеран проблем пројектовања нето-нултих кућа и самог грејања кућа и узима у обзир и понашања самих станара куће. По свему примећеном не сме се при прорачуну изоставити понашање станара и у обзир треба узети и поред тог динамичког фактора и остале статичке факторе. Такође резултати добијени овим анализама стварају модел по ком би се могао оптимизовати термоизолациони слој у зависности од афинитета и приоритета самих укућана.

13. Литература

[1] Годишње потребе планете земље за примарном енергијом по ЕИА,
<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=44&pid=44&aid=2&cid=ww,r3,RB,&syid=2008&eyid=2012&unit=QBTU>, приступљено – децембар 2014.

[2] Главни индикатори потрошње енергије у свету по врсти горива и сектору,
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/keyworld2014.pdf>,
приступљено - мај 2015.

[3] World Energy Technology Outlook – 2050,
http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/weto-h2_en.pdf, приступљено - децембар 2014.

[4] Europe 2020 climate and energy package,
http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_en.htm, приступљено - јул 2011.

[5] Kyoto Protocol, http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php, приступљено - јул 2011.

[6] Climate Change Act 2008, <http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/27>, приступљено - јул 2011.

[7] Carbon Emissions Reduction Target (CERT)
http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/what_we_do/consumers/saving_energy/cert/cert.aspx,
приступљено - јул 2011.

[8] Covering Copenhagen, <http://coveringcopenhagen.com/milestones/#2009>, приступљено - јул 2011.

[9] World Energy Outlook 2013, <http://www.iea.org/weo/>, приступљено - јул 2014.

[10] Правилник о енергетској ефикасности у Србији
<http://www.efikasnost.com/2011/09/27/pravilnik-o-energetske-efikasnosti/>, приступљено - јул 2012.

[11] <http://www.genewscenter.com/Press-Releases/GE-Targets-Net-Zero-Energy-Homes-by-2015-1c68.aspx>, приступљено - јул 2012.

[12] Daniel J. Krammer, "2020 visions, Opinion", Nature Vol. 463, 2010, pp.26-32 (7 January) doi:10.1038/463026a.

[13] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru, and D. Crawley, Zero Energy Buildings: A Critical Look At The Definition, Preprint, Aceee Summer Study, Pacific Grove, California, August 14-18, 2006.

[14] Marszal AJ, Heiselberg P, Bourrelle JS, Musall E, Voss K, Sartori I, et al., Zero energy building - a review of definitions and calculation methodologies, Energy Build 2011; 43:971-979.

- [15] Sartori I, Napolitano A, Voss K., Net zero energy buildings: a consistent definition framework, *Energy Build* 2012; 48:220-32.
- [16] 2. Milorad Bojic, Jasmina Skerlic, Dragan Cvetkovic, Danijela Nikolic, Marko Miletic, Positive net buildings: simulations and optimization, *Instalatorul*, Vol.5, No.1, pp. 38-41, ISSN 1223-7418, 2012
- [17] K. Voss, E. Musall, M. Lichtmeß, From low energy to net zero energy buildings – status and perspectives, *Journal of Green Building* 6/1 (2011) 46–57., DOI: 10.3992/jgb.6.1.46
- [18] M. Heinze, K. Voss, Goal: zero energy building – exemplary experience based on the Solar Estate Solarsiedlung Freiburg am Schlierberg, *Journal of Green Building* 4/4 (2009). 93-100, DOI: 10.3992/jgb.4.4.93
- [19] Директива 2010/31/EU, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1444382795926&uri=CELEX:32010L0031>, приступљено - јул 2012.
- [20] Juliane KAMMER, All new buildings to be zero energy from 2019, Press Service Directorate for the Media, European Parliament, 2009.
- [21] White house, Federal leadership in environmental, energy, and economic performance (executive order), The white house office of the press secretary, October 5, 2009.
- [22] M. Bakker, H.A. Zondag, M.J. Elswijk, K.J. Strootman, M.J.M. Jong, Performance and costs of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump, *Solar Energy*, Volume 78, Issue 2, February 2005, Pages 331-339, ISSN 0038-092X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.019>.
- [23] S. Citherlet, T. Defaux, Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 2, February 2007, Pages 591-598, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.025>.
- [24] A. Athienitis, Design of a solar home with BIPV -thermal system and ground source heat pump, 2nd Canadian Solar Buildings Conference. Calgary, 2007
- [25] P. Norton, C. Christensen, A cold-climate case study for affordable zero energy homes, Solar 2006 Conference, Denver, Colorado, July 9-13, 2006
- [26] Yasuhiro Hamada, Makoto Nakamura, Kiyoshi Ochifuji, Katsunori Nagano, Shintaro Yokoyama, Field performance of a Japanese low energy home relying on renewable energy, *Energy and Buildings*, Volume 33, Issue 8, October 2001, Pages 805-814, ISSN 0378-7788, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00074-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00074-3).
- [27] Milorad Bojić, Novak Nikolić, Danijela Nikolić, Jasmina Skerlić, Ivan Miletić, Toward a positive net-energy residential building in Serbian conditions, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 7, July 2011, 2407-2419

- [28] Danny H.W. Li, Liu Yang, Joseph C. Lam, Zero energy buildings and sustainable development implications – A review, *Energy*, Volume 54, 1 June 2013, Pages 1-10, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.070>.
- [29] Karsten Voss, Eike Musall, *Net Zero Energy Buildings, ENOB*, 2. издање, новембар 2012, 192 стр. ISBN 978-3-920034-80-5
- [30] Towards nearly zero-energy buildings, Definition of common principles under the EPBD -Final report, 2013, Пројекат ECOFYS-а Европске комисије под бројем BESDE10788, http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/doc/nzeb_full_report.pdf - приступљено 8.8.2014
- [31] Minor J, Hallinan K. Renewable energy design and performance of LEED EB platinum building for zero energy programme. *ASHRAE Trans* 2011;vol. 117: 43-50.
- [32] US Green Building Council. Leadership in energy and environmental design (LEED) green building rating system. <http://www.usgbc.org/LEED>. - приступљено 8.8.2014.
- [33] Anna Joanna Marszal, Per Heiselberg, Life cycle cost analysis of a multi-storey residential Net Zero Energy Building in Denmark, *Energy*, Volume 36, Issue 9, September 2011, Pages 5600-5609, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.010>.
- [34] K.F. Fong, C.K. Lee, Towards net zero energy design for low-rise residential buildings in subtropical Hong Kong, *Applied Energy*, Volume 93, May 2012, Pages 686-694, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.006>.
- [35] L. Zhu, R. Hurt, D. Correa, R. Boehm, Comprehensive energy and economic analyses on a zero energy house versus a conventional house, *Energy*, Volume 34, Issue 9, September 2009, Pages 1043-1053, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.03.010>.
- [36] S. Deng, A. Dalibard, M. Martin, Y.J. Dai, U. Eicker, R.Z. Wang, Energy supply concepts for zero energy residential buildings in humid and dry climate, *Energy Conversion and Management*, Volume 52, Issue 6, June 2011, Pages 2455-2460, ISSN 0196-8904, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.054>.
- [37] Net Zero Energy Buildings – Definition(s), Load Matching and Grid Interaction, Karsten Voss, University Wuppertal School of Architecture, Building Physics & Technical Services, http://www.esc.ethz.ch/ses11/Voss_presentation.pdf, - приступљено 8.8.2014.
- [38] Karsten Voss, Igor Sartori, Assunta Napolitano, Sonja Geier, Helder Gonzalves, Monika Hall, Per Heiselberg, Joakim Widén, José A. Candanedo, Eike Musall, Björn Karlsson, Paul Torcellini, Load Matching and Grid Interaction of Net Zero Energy Buildings, *EuroSun Conferenc Graz 2010*, http://www.enob.info/fileadmin/media/Projektbilder/EnOB/Thema_Nullenergie/EuroSun_Conference_Graz_2010_Load_Matching_and_Grid_Interaction_of_Net_Zero_Energy_Building_sx.pdf, приступљено 8.8.2014.
- [39] Веб страница – Нето нулте енергетске куће у свету, *ENOB* <http://www.enob.info/de/nullenergie-plusenergie-klimaneutrale-gebaeude-im-stromnetz-20/nullenergiegebaeude-karte-internationaler-projekte/>, приступљено 8.8.2014

- [40] Правилник о енергетској ефикасности зграда, <http://www.efikasnost.com/wp-content/uploads/2011/09/Pravilnik-o-energetskej-efikasnosti-zgrada.pdf>, приступљено – јул 2012.
- [41] Правилник о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда, <http://www.cis.org.rs/propisi/417?1317638041>, приступљено – јул 2012.
- [42] Термоизолациони материјали, http://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/termoizolacioni_materijali_1387814173320.pdf, приступљено – јул 2012.
- [43] Matthew R. Hall, Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Woodhead Publishing Limited, 2010
- [44] Hammond, G. P. and Jones, C. I., 2008. “Embodied energy and carbon in construction materials”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy, 161 (2), pp. 87-98, <http://dx.doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>
- [45] “Green Public Procurement - Thermal Insulation Technical Background Report”, Report for the European Commission – DG Environment by AEA, Harwell, June 2010, Owner, Editor: European Commission, DG Environment-G2, B-1049, Brussels. http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/thermal_insulation_GPP_%20background_report.pdf - приступљено 10.7.2013 .
- [46] Термомастер, топлотна, звулна и хидроизолација, <http://www.thermomaster.rs/toplotna-zvucna-i-hidroizolacija>, приступљено – јул 2012.
- [47] J. Monahan, J.C. Powell, An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework, Energy and Buildings, Volume 43, Issue 1, January 2011, Pages 179-188, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.005>.
- [48] Chia-Jen Yu, Jian Kang, Environmental impact of acoustic materials in residential buildings, Building and Environment, Volume 44, Issue 10, October 2009, Pages 2166-2175, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.013>.
- [49] Brad Upton, Reid Miner, Mike Spinney, Linda S. Heath, The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States, Biomass and Bioenergy, Volume 32, Issue 1, January 2008, Pages 1-10, ISSN 0961-9534, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.07.001>.
- [50] C. Thormark, The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building, Building and Environment, Volume 41, Issue 8, August 2006, Pages 1019-1026, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.026>.
- [51] Leif Gustavsson, Anna Joelsson, Life cycle primary energy analysis of residential buildings, Energy and Buildings, Volume 42, Issue 2, February 2010, Pages 210-220, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.017>.

- [52] Milutienè, E., 2010, “House Embodied Energy and Zero Energy Building Concept”, *Environmental Research, Engineering and Management*, 2010. No.4(54), P. 62-71, ISSN 2029-2139.
- [53] A. Alcorn, P. Wood, 1998, “New Zealand building materials embodied energy coefficients database, Volume II Coefficients”, ISBN:1172-563X, Victoria University of New Zealand, New Zealand.
- [54] Green building, <http://www.buildinggreen.com>, - приступљено 10.7.2013.
- [55] Sustainable Homes, 1999, “Embodied energy in residential property development”, <http://www.sustainablehomes.co.uk/upload/publication/Embodied%20Energy.pdf> - приступљено 10.7.2011.
- [56] Изолациони материјали, <http://www.greenspec.co.uk/html/materials/insulation.html> - приступљено 10.7.2013.
- [57] Специфична уложена енергија у термоизолацију, www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied - приступљено 10.7.2013.
- [58] Robert Dylewski, Janusz Adamczyk, Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls, *Building and Environment*, Volume 46, Issue 12, December 2011, Pages 2615-2623, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.023>.
- [59] Omer Kaynakli, A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, Issue 1, January 2012, Pages 415-425, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.006>.
- [60] Naouel Daouas, Zaineb Hassen, Habib Ben Aissia, Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia, *Applied Thermal Engineering*, Volume 30, Issue 4, March 2010, Pages 319-326, ISSN 1359-4311, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.009>.
- [61] Ö. Altan Dombaycı, Mustafa Gölcü, Yaşar Pancar, Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources, *Applied Energy*, Volume 83, Issue 9, September 2006, Pages 921-928, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.10.006>.
- [62] Comakli K, Yuksel B. Optimum insulation thickness of external walls for energy saving. *Appl Therm Eng* 2003, Volume 23:473–479. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00209-0
- [63] H. Sfrata, B. Salmeen, Optimization of insulation thicknesses using micros, *Energy Conversion and Management*, Volume 34, Issue 6, June 1993, Pages 471-479, ISSN 0196-8904, [http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904\(93\)90078-O](http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904(93)90078-O).
- [64] Stig-Inge Gustafsson, Optimisation of insulation measures on existing buildings, *Energy and Buildings*, Volume 33, Issue 1, 1 November 2000, Pages 49-55, ISSN 0378-7788, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00062-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00062-1).

- [65] Afif Hasan, Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost, Applied Energy, Volume 63, Issue 2, June 1999, Pages 115-124, ISSN 0306-2619, [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00023-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00023-9).
- [66] Mearig T, Coffee N, Morgan M. Life cycle cost analysis handbook. first ed. State of Alaska: Department of Education & Early Development Education Support Services/Facilities; 1999.
- [67] Nuri Sisman, Emin Kahya, Nil Aras, Haydar Aras, Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Turkey's different degree-day regions, Energy Policy, Volume 35, Issue 10, October 2007, Pages 5151-5155, ISSN 0301-4215, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.04.037>.
- [68] Aynur Ucar, Figen Balo, Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls, Renewable Energy, Volume 35, Issue 1, January 2010, Pages 88-94, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.009>.
- [69] Comakli K, Yuksel B. Optimum insulation thickness of external walls for energy saving. Appl Therm Eng 2003, Volume 23:473–479., DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00209-0
- [70] Jinghua Yu, Changzhi Yang, Liwei Tian, Dan Liao, A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China, Applied Energy, Volume 86, Issue 11, November 2009, Pages 2520-2529, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.010>.
- [71] T.M.I. Mahlia, A. Iqbal, Cost benefits analysis and emission reductions of optimum thickness and air gaps for selected insulation materials for building walls in Maldives, Energy, Volume 35, Issue 5, May 2010, Pages 2242-2250, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.011>.
- [72] T.M.I. Mahlia, B.N. Taufiq, Ismail, H.H. Masjuki, Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall, Energy and Buildings, Volume 39, Issue 2, February 2007, Pages 182-187, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.06.002>.
- [73] M.S Söylemez, M Ünsal, Optimum insulation thickness for refrigeration applications, Energy Conversion and Management, Volume 40, Issue 1, January 1999, Pages 13-21, ISSN 0196-8904, [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00125-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00125-3).
- [74] Mohammed J. Al-Khawaja, Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation, Applied Thermal Engineering, Volume 24, Issues 17–18, December 2004, Pages 2601-2610, ISSN 1359-4311, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.03.019>.
- [75] Naouel Daouas, A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads, Applied Energy, Volume 88, Issue 1, January 2011, Pages 156-164, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.030>.

- [76] Lollini, Barozzi, Fasano, Meroni, Zinzi, Optimisation of opaque components of the building envelope. Energy, economic and environmental issues, Building and Environment, Volume 41, Issue 8, August 2006, Pages 1001-1013, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.011>.
- [77] Ali Bolattürk, Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey, Building and Environment, Volume 43, Issue 6, June 2008, Pages 1055-1064, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.014>.
- [78] Aynur Ucar, Figen Balo, Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey, Applied Energy, Volume 86, Issue 5, May 2009, Pages 730-736, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.09.015>.
- [79] Duffie JA, Bechman WA. Solar energy and thermal process. New York: Wiley 1991.
- [80] Evans RB. 1969. A proof that exergy is the only consistent measure of potential work (for chemical systems). Ph.D. Thesis. Dartmouth College: Hanover, New Hampshire.
- [81] Reistad GM. 1970. Availability: concepts and applications. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison.
- [82] Nerescu I, Radcenco V. 1970. Exergy Analysis of Thermal Processes. Editura Tehnica: Bucharest.
- [83] Brodyanskii VM. 1973. Exergy Method of Thermodynamic Analysis. Energiia: Moscow
- [84] Haywood RW. 1980. Equilibrium Thermodynamics. Wiley: New York
- [85] Ahern, JE. 1980. The Exergy Method of Energy Systems Analysis. Wiley: New York.
- [86] Bejan A. 1982. Entropy Generation through Heat and Fluid Flow. Wiley: New York.
- [87] Bejan A. 1988. Advanced Engineering Thermodynamics. Wiley: New York.
- [88] Bejan A. 1996a. Entropy Generation Minimization. CRC Press: Boca Raton.
- [89] Bejan A. 1996b. Entropy generation minimization: the new thermodynamics of "nite-size devices and "nite-time processes. Journal of Applied Physics 79 (3):1191-1218. DOI: 10.1063/1.362674
- [90] Bejan A. 1997. Advanced Engineering Thermodynamics (2nd edn). Wiley: New York.
- [91] Bejan A. 2000. Shape and Structure, from Engineering to Nature. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- [92] Bejan A, Mamut E. (eds). 1999. Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands.

- [93] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. 1996. *Thermal Design and Optimization*. Wiley: New York.
- [94] Bejan A, Vadasz P, Kroger DG. (eds). 1999. *Energy and the Environment*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands.
- [95] Masanori Shukuya, Daisuke Komuro, Exergy-entropy process of passive solar heating and global environmental systems, *Solar Energy*, Volume 58, Issues 1–3, July–September 1996, Pages 25-32, ISSN 0038-092X, [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(96\)00064-3](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(96)00064-3).
- [96] Shukuya, M. 1994. 'Energy, Entropy, Exergy and Space Heating Systems'. Proceedings of the 3rd International Conference "Healthy Buildings '94", Vol. 1, pp. 369–374.
- [97] Shukuya, M. 1996. 'Warm exergy and cool exergy'. Proceedings of Annual Meeting, Building Science Section, Architectural Institute of Japan. Pp. 453–454
- [98] Shukuya, M. 1998. 'Bio-climatic Design as Rational Design of Exergy-Entropy Process'. Proceedings of Passive and Low Energy Architecture (PLEA) '98. Lisboa, Portugal. Pp. 321–324.
- [99] Adrian Bejan, Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture, *Int. J. Energy Res.* 2002; Volume 26:545-565, DOI: 10.1002/er.804.
- [100] Masanori Shukuya, Abdelaziz Hammache, Introduction to the Concept of Exergy - for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems, 2002, VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
- [101] Cem Tahsin Yucer, Arif Hepbasli, Thermodynamic analysis of a building using exergy analysis method, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issues 2–3, February–March 2011, Pages 536-542, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.019>.
- [102] Marcel Schweiker, Masanori Shukuya, Comparative effects of building envelope improvements and occupant behavioural changes on the exergy consumption for heating and cooling, *Energy Policy*, Volume 38, Issue 6, June 2010, Pages 2976-2986, ISSN 0301-4215, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.035>.
- [103] Mateja Dovjak, Masanori Shukuya, Bjarne W. Olesen, Aleš Krainer, Analysis on exergy consumption patterns for space heating in Slovenian buildings, *Energy Policy*, Volume 38, Issue 6, June 2010, Pages 2998-3007, ISSN 0301-4215, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.039>.
- [104] Arif Hepbasli, Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, Issue 1, January 2012, Pages 73-104, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.138>.
- [105] Abdullah Yildiz, Ali Güngör, Energy and exergy analyses of space heating in buildings, *Applied Energy*, Volume 86, Issue 10, October 2009, Pages 1939-1948, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.010>.

[106] Yan Zhou, Guangcai Gong, Exergy analysis of the building heating and cooling system from the power plant to the building envelop with hourly variable reference state, *Energy and Buildings*, Volume 56, January 2013, Pages 94-99, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.041>.

[107] Aynur Ucar, Thermoeconomic analysis method for optimization of insulation thickness for the four different climatic regions of Turkey, *Energy*, Volume 35, Issue 4, April 2010, Pages 1854-1864, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.022>.

[108] Joseph C. Lam, Kevin K.W. Wan, C.L. Tsang, Liu Yang, Building energy efficiency in different climates, *Energy Conversion and Management*, Volume 49, Issue 8, August 2008, Pages 2354-2366, ISSN 0196-8904, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.013>.

[109] Joseph C. Lam, Kevin K.W. Wan, Dalong Liu, C.L. Tsang, Multiple regression models for energy use in air-conditioned office buildings in different climates, *Energy Conversion and Management*, Volume 51, Issue 12, December 2010, Pages 2692-2697, ISSN 0196-8904, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.004>.

[110] Zhenggen Ren, Zhengdong Chen, Xiaoming Wang, Climate change adaptation pathways for Australian residential buildings, *Building and Environment*, Volume 46, Issue 11, November 2011, Pages 2398-2412, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.022>.

[111] Lisa Guan, Energy use, indoor temperature and possible adaptation strategies for air-conditioned office buildings in face of global warming, *Building and Environment*, Volume 55, September 2012, Pages 8-19, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.013>.

[112] Joseph C. Lam, Kevin K.W. Wan, Liu Yang, Sensitivity analysis and energy conservation measures implications, *Energy Conversion and Management*, Volume 49, Issue 11, November 2008, Pages 3170-3177, ISSN 0196-8904, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.05.022>.

[113] Kevin K.W. Wan, Danny H.W. Li, Wenyan Pan, Joseph C. Lam, Impact of climate change on building energy use in different climate zones and mitigation and adaptation implications, *Applied Energy*, Volume 97, September 2012, Pages 274-282, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.048>.

[114] M Bojic, F Yik, W Leung, Thermal insulation of cooled spaces in high rise residential buildings in Hong Kong, *Energy Conversion and Management*, Volume 43, Issue 2, January 2002, Pages 165-183, ISSN 0196-8904, [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00018-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00018-8).

[115] M Bojic, F Yik, K Wan, J Burnett, Influence of envelope and partition characteristics on the space cooling of high-rise residential buildings in Hong Kong, *Building and Environment*, Volume 37, Issue 4, April 2002, Pages 347-355, ISSN 0360-1323, [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00045-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00045-2).

- [116] C.K. Cheung, R.J. Fuller, M.B. Luther, Energy-efficient envelope design for high-rise apartments, *Energy and Buildings*, Volume 37, Issue 1, January 2005, Pages 37-48, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.002>.
- [117] Radhi, H., Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings - A contribution to reduce the CO2 emissions. *Building and Environment* 44(12), 2451-2462, DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.04.006
- [118] Joshua Kneifel, Beyond the code: Energy, carbon, and cost savings using conventional technologies, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 4, April 2011, Pages 951-959, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.019>.
- [119] M.R. Gaterell, M.E. McEvoy, The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings, *Energy and Buildings*, Volume 37, Issue 9, September 2005, Pages 982-995, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.015>.
- [120] Mark F. Jentsch, AbuBakr S. Bahaj, Patrick A.B. James, Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 12, 2008, Pages 2148-2168, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>.
- [121] D.P. Jenkins, H. Singh, P.C. Eames, Interventions for large-scale carbon emission reductions in future UK offices, *Energy and Buildings*, Volume 41, Issue 12, December 2009, Pages 1374-1380, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.002>.
- [122] Riccardo Maria Pulselli, Eugenio Simoncini, Nadia Marchettini, Energy and emergy based cost–benefit evaluation of building envelopes relative to geographical location and climate, *Building and Environment*, Volume 44, Issue 5, May 2009, Pages 920-928, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.009>.
- [123] Dimitris Anastaselos, Simos Oxizidis, Agis M. Papadopoulos, Energy, environmental and economic optimization of thermal insulation solutions by means of an integrated decision support system, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issues 2–3, February–March 2011, Pages 686-694, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.013>.
- [124] Christian Ghiaus, Ion Hazyuk, Calculation of optimal thermal load of intermittently heated buildings, *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 8, August 2010, Pages 1248-1258, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2010.02.017.
- [125] Ion Hazyuk, Christian Ghiaus, David Penhouet, Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part I – Building modeling, *Building and Environment*, Volume 51, May 2012, Pages 379-387, ISSN 0360-1323, 10.1016/j.buildenv.2011.11.009.
- [126] Ion Hazyuk, Christian Ghiaus, David Penhouet, Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part II – Control algorithm, *Building and Environment*, Volume 51, May 2012, Pages 388-394, ISSN 0360-1323, 10.1016/j.buildenv.2011.11.008.

- [127] Jan Široký, Frauke Oldewurtel, Jiří Cigler, Samuel Prívará, Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 9, September 2011, Pages 3079-3087, ISSN 0306-2619, 10.1016/j.apenergy.2011.03.009.
- [128] Samuel Prívará, Jan Široký, Lukáš Ferkl, Jiří Cigler, Model predictive control of a building heating system: The first experience, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issues 2–3, February–March 2011, Pages 564-572, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2010.10.022.
- [129] Ivan Korolija, Yi Zhang, Ljiljana Marjanovic-Halburd, Victor I. Hanby, Regression models for predicting UK office building energy consumption from heating and cooling demands, *Energy and Buildings*, Volume 59, April 2013, Pages 214-227, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2012.12.005.
- [130] Tim Salsbury, Prashant Mhaskar, S. Joe Qin, Predictive control methods to improve energy efficiency and reduce demand in buildings, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 51, 5 April 2013, Pages 77-85, ISSN 0098-1354, 10.1016/j.compchemeng.2012.08.003.
- [131] Samuel Prívará, Jiří Cigler, Zdeněk Váňa, Frauke Oldewurtel, Carina Sagerschnig, Eva Žáčková, Building modeling as a crucial part for building predictive control, *Energy and Buildings*, Volume 56, January 2013, Pages 8-22, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2012.10.024.
- [132] Christian Ghiaus, Causality issue in the heat balance method for calculating the design heating and cooling load, *Energy*, Volume 50, 1 February 2013, Pages 292-301, ISSN 0360-5442, 10.1016/j.energy.2012.10.024.
- [133] Sami A. Al-Sanea, M.F. Zedan, Saleh A. Al-Ajlan, Effect of electricity tariff on the optimum insulation-thickness in building walls as determined by a dynamic heat-transfer model, *Applied Energy*, Volume 82, Issue 4, December 2005, Pages 313-330, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.10.014>.
- [134] Al-Sanea SA, Zedan MF. Effect of insulation location on thermal performance of building walls under steady periodic conditions. *International Journal of Ambient Energy* 03/2011; 22(2). DOI: 10.1080/01430750.2001.9675389
- [135] Al-Sanea SA, Zedan MF. Optimum insulation thickness for building walls in a hot–dry climate. *International Journal of Ambient Energy* 03/2011; 23(3). DOI: 10.1080/01430750.2002.9674880
- [136] Ozel M. Dynamic approach and cost analysis for optimum insulation thickness of the building external walls. *J Fac Eng Archi Gazi Univ* 2008; Volume 23(4):879–84.
- [137] Naouel Daouas, A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 1, January 2011, Pages 156-164, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.030>.

- [138] Recep Yumrutaş, Mazhar Ünsal, Mehmet Kanoğlu, Periodic solution of transient heat flow through multilayer walls and flat roofs by complex finite Fourier transform technique, *Building and Environment*, Volume 40, Issue 8, August 2005, Pages 1117-1125, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.09.005>.
- [139] Recep Yumrutaş, Önder Kaşka, Erdal Yıldırım, Estimation of total equivalent temperature difference values for multilayer walls and flat roofs by using periodic solution, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 5, May 2007, Pages 1878-1885, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.020>.
- [140] Anonymous, ENERGYPLUS, Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, University of Illinois & Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
- [141] Robert H Henninger, Michael J Witte, Drury B Crawley, Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100–E200 test suite, *Energy and Buildings*, Volume 36, Issue 8, August 2004, Pages 855-863, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.025>.
- [142] The board of trustees of the University Of Illinois and the regents of the University Of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley, National Laboratory, ENERGYPLUS, EnergyPlus Engineering Document, The Reference to EnergyPlus Calculations (incaseyouwantorneedtoknow), March 29, 2004.
- [143] Milorad Bojić, Marko Miletić, Jovan Malešević, Slobodan Djordjević, Dragan Cvetković, Influence of additional storey construction to space heating of a residential building, *Energy and Buildings*, Volume 54, November 2012, Pages 511-518, ISSN 0378-7788, [10.1016/j.enbuild.2012.02.056](http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.056).
- [144] Milorad Bojić, Slobodan Djordjević, Andreja Stefanović, Marko Miletić, Dragan Cvetković, Decreasing energy consumption in thermally non-insulated old house via refurbishment, *Energy and Buildings*, Volume 54, November 2012, Pages 503-510, ISSN 0378-7788, [10.1016/j.enbuild.2012.03.045](http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.045).
- [145] D. Crawley, L. Lawrie, F. Winkelmann, W. Buhl, Y. Joe Huang, C. Pedersen, R. Strand, R. Liesen, D. Fisher, M. Witte, J. Glazer, EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings*. 33 (2001) 319-331.
- [146] Сајт EnergyPlus, http://www1.eere.energy.gov/buildings/energyplus_redirect.html - приступљено 18.3.2011.
- [147] Google SketchUp, <http://www.sketchup.com/>, приступљено 18.3.2012.
- [148] Genopt - <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/overview.html> - приступљено 18.3.2012.
- [149] Hooke, R.; Jeeves, T.A. (1961). "'Direct search' solution of numerical and statistical problems". *Journal of the Association for Computing Machinery (ACM)* 8 (2): 212–229. doi:10.1145/321062.321069

- [150] Gippner O. Dhakal S. Sovacool B.K. 2011. Energy-efficient municipal heating: Preliminary lessons from Beijing, Kathmandu and Edinburgh. *International Journal of Ambient Energy*, Volume 32(3), 146-160.
- [151] Abdul-Rahman H. Wang C. Kho MY. 2011. Potentials for sustainable improvement in building energy efficiency: Case studies in tropical zone. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(2), 325-339
- [152] Yahya Ali, Mairna Mustafa, Shireen Al-Mashaqbah, Kholoud Mashal, Mousa Mohsen, Potential of energy savings in the hotel sector in Jordan, *Energy Conversion and Management*, Volume 49, Issue 11, November 2008, Pages 3391-3397, ISSN 0196-8904, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.036>.
- [153] Bichard E. Kazmierczak A.. Are homeowners willing to adapt to and mitigate the effects of climate change? *Climatic Change*, June 2012, Volume 112, Issue 3, pp 633-654, ISSN 0165-0009, DOI: 10.1007/s10584-011-0257-8
- [154] Wang Y. Tian Y. Ge J. Xu Y. 2011. The study on the status of energy consumption and energy-efficiency management of new rural residential buildings in Hangzhou, China. In: *BMEI 2011 - Proceedings 2011 International Conference on Business Management and Electronic Information*, Vol. 2, pp. 49-52.
- [155] Watts C. Jentsch M.F. James P.A. 2011. Evaluation of domestic energy performance certificates in use. *Building Service Engineering*, 11/2011; 32(4):361-376. DOI: 10.1177/0143624411404486
- [156] Yang Y. Shi T. Tai H-X. Zhao S-H. Zhu Y. 2011. An investigation of building energy conservation technologies education, 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2011 - Proceedings, 2011, Pages 2919-2922
- [157] M.H. Issa, J.H. Rankin, A.J. Christian, Canadian practitioners' perception of research work investigating the cost premiums, long-term costs and health and productivity benefits of green buildings, *Building and Environment*, Volume 45, Issue 7, July 2010, Pages 1698-1711, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.020>.
- [158] Seitz V. Razzouk N. Wells D.M. 2010. The importance of brand equity on purchasing consumer durables: An analysis of home air-conditioning systems. *Journal of Consumer Marketing* 05/2010; 27(3):236-242. DOI: 10.1108/07363761011038301
- [159] G. Ma, P. Andrews-Speed, J.D. Zhang, Study on Chinese consumer attitudes on energy-saving household appliances and government policies: based on a questionnaire survey of residents in Chongqing, China, *Energy Procedia*, Volume 5, 2011, Pages 445-451, ISSN 1876-6102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.077>.
- [160] Bojić M., Miletić M., Miletić I., Adamović D., Marjanović V., Softver za izvođenje ankete o načinu korišćenja i svesnosti o štednji energije u kućama u Srbiji kao podrška razvoju kuće neto nulte energetske potrošnje, TR-63/2012, Ministarstvo prosvete i nauke, Kragujevac, 2012.

- [161] Званични сајт града Крагујевца, http://www.krugujevac.rs/Statisticki_podaci-53-1 - приступљено мај 2014.
- [162] Weatherbase веб сајт <http://www.weatherbase.com/weather/weatherall.php?s=591898&cityname=Kragujevac%2C+Central+Serbia%2C+Serbia&units=metric>, приступљено мај 2014.
- [163] Зрнић С., Тулум З., Грејање и климатизација, Научна књига Београд, Београд, 1988.
- [164] Тодоровић Б., Пројектовање постројења за централно грејање, Машински факулте Београд, Београд, 2005.
- [165] УРСА веб сајт, <http://www.ursa.rs/> - приступљено 10.7.2013.
- [166] Електропривреда Србије, тарифни систем наплате електричне енергије, http://www.eps.rs/SiteAssets/Lists/Sitemap/EditForm/20130708_EPS%20Snabdevanje.pdf - приступљено 15.04.2014.
- [167] E. A. Alsema, Energy pay-back time and CO₂ emissions of PV systems, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Volume 8, Issue 1, pages 17–25, January/February 2000, DOI: 10.1002/(SICI)1099-159X(200001/02)8
- [168] C. Bankier, S. Gale, Energy Payback of Roof Mounted Photovoltaic Cells, *Energy Bulletin*, 2006
- [169] Драган Цветковић, Унапређење енергетско-ексергетске ефикасности применом панелних система за грејање кућа са нето-нултом потрошњом енергије, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2015.
- [170] Milorad Bojić, Slobodan Djordjević, Jovan Malesević, Marko Miletić, Dragan Cvetković, A simulation appraisal of a switch of district to electric heating due to increased heat efficiency in an office building, *Energy and Buildings*, Volume 50, July 2012, Pages 324-330, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.004>.
- [171] Milorad Bojić, Marko Miletić, Ljubiša Bojić, Optimization of thermal insulation to achieve energy savings in low energy house (refurbishment), *Energy Conversion and Management*, Volume 84, August 2014, Pages 681-690, ISSN 0196-8904, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.095>.
- [172] Danny H.W. Li, Liu Yang, Joseph C. Lam, Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones – A review, *Energy*, Volume 42, Issue 1, June 2012, Pages 103-112, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.044>.