



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Данијела М. Николић

**ЕНЕРГЕТСКО-ЕКСЕРГЕТСКА ОПТИМИЗАЦИЈА  
ВЕЛИЧИНА ФОТОНАПОНСКИХ ПАНЕЛА И  
СОЛАРНИХ КОЛЕКТОРА КОД КУЋА  
НЕТО-НУЛТЕ ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2015.

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

Име и презиме: **Данијела Николић**  
Датум и место рођења: **26.11.1971. Крагујевац**  
Садашње запослење: **Асистент на Факултету инжењерских наука  
Универзитета у Крагујевцу**

***II. Докторска дисертација***

Наслов: **ЕНЕРГЕТСКО-ЕКСЕРГЕТСКА ОПТИМИЗАЦИЈА ВЕЛИЧИНА  
ФОТОНАПОНСКИХ ПАНЕЛА И СОЛАРНИХ КОЛЕКТОРА  
КОД КУЋА НЕТО-НУЛТЕ ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ**

Број страница: 184  
Број слика: 133  
Број библиографских података: 99  
Установа и место где је рад  
израђен: **Факултет инжењерских наука Универзитета у  
Крагујевцу**  
Научна област (УДК): **621.383.5:697.329:728.3**  
Ментор: **др Милорад Бојић, ред. проф. Факултета инжењерских  
наука Универзитета у Крагујевцу**

***III. Оцена и одбрана***

Датум пријаве теме: **27. 08. 2012. год**

Број одлуке и датум прихватања  
докторске дисертације: **01-1/2633-6 од 18. 10. 2012**

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 Добрица Миловановић**, ред. проф., Факултет инжењерских  
наука Универзитет у Крагујевцу
4. **Др Вања Шуштершич**, ванр. проф., Факултет инжењерских  
наука Универзитет у Крагујевцу
5. **Др Велимир Стефановић**, ред. проф., Машински факултет Ниш

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 Добрица Миловановић**, ред. проф., Факултет инжењерских  
наука Универзитет у Крагујевцу
4. **Др Јасна Радуловић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука  
Универзитет у Крагујевцу
5. **Др Вања Шуштершич**, ванр. проф., Факултет инжењерских  
наука Универзитет у Крагујевцу
6. **Др Велимир Стефановић**, ред. проф., Машински факултет  
Ниш

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 Добрица Миловановић**, ред. проф., Факултет инжењерских  
наука Универзитет у Крагујевцу
4. **Др Јасна Радуловић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука  
Универзитет у Крагујевцу
5. **Др Вања Шуштершич**, ванр. проф., Факултет инжењерских  
наука Универзитет у Крагујевцу
6. **Др Велимир Стефановић**, ред. проф., Машински факултет  
Ниш

Датум одбране дисертације: **2015. година**

*Сари,  
Дејану,  
родитељима*

## 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 особама које су ми пружиле подршку приликом израде докторске дисертације:

- ментору, проф. др Милораду Бојићу на несебичној помоћи и подршци у свим фазама израде ове дисертације, као и на поверењу и бројним корисним саветима, како током израде дисертације тако и током наше дугогодишње заједничке сарадње;
- драгој колегиници проф. др Јасни Радуловић на значајним саветима и помоћи током целокупног процеса израде дисертације;
- драгој колегиници проф. др Вањи Шуштершич на сугестијама и корисним саветима у завршној фази израде докторске дисертације;
- својим родитељима – мајци Гордани и пок. оцу Момчилу јер су ме усмерили на прави пут.

На крају желим да се захвалим својој породици – ћерки Сари и супругу Дејану на безграничном стрпљењу, подршци и разумевању током израде докторске дисертације.

Март 2015.  
Крагујевац

Аутор

# РЕЗИМЕ

## ЕНЕРГЕТСКО-ЕКСЕРГЕТСКА ОПТИМИЗАЦИЈА ВЕЛИЧИНА ФОТОНАПОНСКИХ ПАНЕЛА И СОЛАРНИХ КОЛЕКТОРА КОД КУЋА НЕТО-НУЛТЕ ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ

У модерном свету данас, значајан удео у укупној потрошњи енергије се односи на зграде, па су зато истраживања и развој метода за побољшање енергетске ефикасности зграда веома важне. Радикални приступ за смањење потрошње енергије у зградама је концепт зграда нето-нулте енергетске потрошње (ННЕП) и концепт зграда нето-позитивне енергетске потрошње (НПЕП). Такође и обновљива енергија има значајан утицај на смањење укупне енергетске потрошње и позитиван утицај на животну средину, па су од круцијалног значаја истраживања и развој примене обновљивих извора енергије.

У овој тези истраживана је српска кућа која је на крову имала систем фотонапонских панела и систем соларних колектора. Соларна фотонапонска технологија је атрактивно и, по животну средину, чисто решење за генерисање електричне енергије. Генерисана електрична енергија може да се троши у згради или да се као вишак продаје електро-дистрибутивној мрежи. У згради електрична енергија може да се троши за грејање, осветљење, рад електричних апарата и за грејање санитарне воде. Соларним колекторима се генерише топлотна енергија која се користи уместо електричне енергије за грејање санитарне воде.

Разматрана је зграда са три различита система грејања: електричним грејањем, даљинским грејањем и сопственим централним системом грејања са гасним котлом. Рађена је енергетска и ексергетска оптимизација (укључујући при томе и уграђену енергију и уграђену ексергију) чији је главни циљ одређивање оптималне величине површина фотонапонских панела и соларних колектора инсталираних на крову зграде. Са оптималним вредностима ових површина, потрошња примарне енергије се може значајно смањити

Анализиране су зграде са различитом дебљином изолације, различитом потрошњом електричне енергије, различитом потрошњом топле воде, различитом дужином животног века фотонапонских система и соларних колектора, различитим врстама фотонапонских панела и њиховом различитом ћелијском ефикасношћу, у циљу постизања концепта зграда нето-нулте енергетске потрошње и зграда нето-позитивне енергетске потрошње. Приказана је и економска оптимизација којом су добијени резултати величина фотонапонских панела и соларних колектора при којима се остварује максимална вредност финансијске добити. На крају, разматран је утицај инсталираних система за генерисање енергије на животну средину.

Зграде су симулиране у окружењу софтвера *EnergyPlus*, *Open Studio* додаток за *Google SketchUp* је коришћен за дизајнирање зграде, *Hooke-Jeeves* алгоритам за оптимизацију, а *GenOpt* софтвер за извршну контролу софтвера при оптимизацији.

Добијени резултати су дали оптималне вредности величина фотонапонских панела и соларних колектора, при којима се остварује највећа уштеда примарне енергије. На тај начин се може достићи концепт зграда ННЕП и НПЕП.

**Кључне речи:** КННЕ; Фотонапонски панели; Соларни колектори; Енергија; Ексергија; Симулација; Оптимизација;

# ABSTRACT

## ENERGY AND EXERGY OPTIMIZATION OF PHOTOVOLTAIC AND SOLAR COLLECTORS AREA AT ZERO-NET ENERGY BUILDING

In the modern world today, the significant part of the total energy consumption is related to the building, so research and development of methods for improving energy efficiency in buildings are very important. Nowadays, a radical approach for the mitigation of the energy demand is the concept of the zero-net energy building (ZNEB) and positive-net energy building (PNEB). Also, the renewable energy has a significant impact on reducing overall energy consumption and positive impact on the environment, so the research and development of renewable energy resources and the use of renewable energy is essential.

In this thesis it is investigated the Serbian residential building with photovoltaic panels and solar collectors on the roof. Solar photovoltaic (PV) technologies are an attractive option for clean and renewable electricity generation. The generated electricity either may be consumed by the building or may be fed-in the electricity grid. The building uses electricity for space heating system, lighting, electric equipment and for domestic hot water heating. The solar collector generates thermal energy for domestic hot water heating.

The building with three different space heating system is analyzed: electrical space heating, district heating and central heating system with gas boiler. Energy and exergy optimization (including embodied energy and embodied exergy) was performed with the major aim to determine the optimal area of the PV array and solar collector area on the roof. With the optimal PV and solar collector areas, primary energy consumption may be minimized.

The residential buildings with variable thermal insulation thickness, variable electricity consumption for electric equipment and lighting, variable hot water consumption, variable life cycle, variable types of PV panels and variable PV cell efficiency are investigated in order to achieve zero-net energy building (ZNEB) or positive-net energy building (PNEB). Also, economic optimization was performed to maximize the financial profit. At the end of the investigation, the environmental aspects of applied systems (PV and solar collectors) are analyzed.

The buildings are simulated in EnergyPlus environment. Open Studio plug-in in Google SketchUp was used for buildings design, Hooke-Jeeves algorithm for optimization and GENOPT software for software execution control.

The obtained results gave the optimal size of PV array and solar collectors system, for which the maximum of values of primary energy savings can be obtained. With these optimal sizes, the concept ZNEB and PNEB can be achieved.

**Keywords:** ZNEB; Photovoltaic; Solar collector; Energy; Exergy; Simulation; Optimization;

## САДРЖАЈ

<b>1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА.....</b>	<b>1</b>
<b>2. НУЛТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЗГРАДЕ .....</b>	<b>5</b>
2.1 Концепт нето-енергије.....	5
2.2 Нето-енергија и уграђена енергија .....	6
2.3 Дефиниција нултих и нето-нултих енергетских зграда .....	6
2.3.1 Нулте енергетске зграде.....	6
2.3.2 Нето-нулте енергетске зграде .....	7
<b>3. СИСТЕМИ ЗА ГЕНЕРИСАЊЕ ЕНЕРГИЈЕ КОД НУЛТИХ ЗГРАДА.....</b>	<b>9</b>
3.1 Историјат коришћења соларне енергије.....	9
3.2 Соларни колектори.....	10
3.2.1 Равни застакљени соларни колектор .....	10
3.3 Фотонапонска технологија.....	12
3.3.1 Развој соларних ћелија.....	12
3.3.2 Ефикасност соларних ћелија.....	14
3.3.3 ФН технологија на светском тржишту.....	14
3.3.4 Фотонапонски системи.....	15
<b>4. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ.....</b>	<b>16</b>
<b>5. СИМУЛАЦИОНИ СОФТВЕРИ .....</b>	<b>19</b>
5.1 Симулациони софтвер Energy Plus.....	19
5.2 Google SketchUp софтвер са Open Studio додатком .....	20
5.3 GenOpt софтвер.....	21
5.4 Hooke-Jeeves алгоритам.....	22
<b>6. РАЗВИЈЕНИ МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛИ.....</b>	<b>23</b>
6.1 Модел соларног зрачења.....	23
6.1.1 Израчунавање соларног зрачења .....	23
6.1.2 Израчунавање небеског соларног зрачења које пада на нагнуте површине.....	24
6.2 Математички модел фотонапонског система .....	25
6.2.1 "Simple" модел фотонапонских панела.....	26
6.2.2 Центар електричног оптерећења .....	27
6.2.3 Инвертор .....	28
6.3 Математички модел система за грејање санитарне воде са соларним колекторима .....	29
6.3.1 Математички модел равног застакљеног соларног колектора.....	29
6.3.2 Модел централног бојлера.....	31
6.3.3 Модел система за грејање санитарне воде .....	33
6.3.4 Контрола соларног система за грејање санитарне воде .....	35
<b>7. МОДЕЛ АНАЛИЗИРАНЕ КУЋЕ.....</b>	<b>36</b>
7.1 Архитектонско решење модела зграде .....	36
7.2 Потрошња електричне енергије у згради.....	38

---

7.3 Потрошња топле воде у згради .....	39
7.4 Анализирани системи грејања.....	40
7.4.1 Електрични систем грејања .....	40
7.4.2 Даљински систем грејања.....	41
7.4.3 Систем грејања са котлом на природни гас.....	42
7.5 Карактеристике инсталираних система за генерисање енергије.....	43
7.5.1 Карактеристике фотонапонског система.....	44
7.5.2 Карактеристике соларних колектора.....	46
7.5.3 Карактеристике система за грејање санитарне воде .....	47
7.6 Локација и метеоролошки подаци .....	48
<b>8. ОПТИМИЗАЦИОНЕ ПРОЦЕДУРЕ .....</b>	<b>51</b>
8.1 Енергетска оптимизациона процедура.....	51
8.2 Ексергетска оптимизациона процедура.....	53
8.3 Економска оптимизациона процедура.....	55
8.4 Еколошка анализа соларних система.....	57
<b>9. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА .....</b>	<b>58</b>
9.1 Енергетска оптимизација.....	59
9.1.1 Електрично грејање.....	59
9.1.2 Даљинско и гасно грејање .....	79
9.2 Ексергетска оптимизација.....	104
9.2.1 Електрично грејање.....	104
9.2.2 Даљинско и гасно грејање .....	122
9.3 Економска оптимизација.....	142
9.3.1 Електрично грејање.....	142
9.3.2 Даљинско и гасно грејање .....	151
9.4 Резултати еколошке анализе соларних система.....	159
9.4.1 Еколошка анализа најповољнијих решења енергетске оптимизације.....	159
9.4.2 Еколошка анализа најповољнијих решења ексергетске оптимизације.....	161
9.4.3 Еколошка анализа најповољнијих решења економске оптимизације.....	162
9.5 Поређење резултата.....	164
9.5.1 Енергетска анализа.....	164
9.5.2 Ексергетска анализа.....	169
9.5.3 Економска анализа.....	172
<b>10. ЗАКЉУЧАК .....</b>	<b>176</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>179</b>

---



## СПИСАК КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

$a$	$\max(0, \cos \alpha)$
$A$	површина колектора
$ab$	директни масени експоненти
$ad$	дифузни масени експоненти
$A_{surf}$	укупна површина ФН панела
$b$	$\max(0,087, \cos Z)$
$C_{inst}$	коефицијент инсталације и одржавања соларних система током њиховог животног циклуса
$C_{m1}$	коефицијент животног циклуса изолације
$C_m$	коефицијент животног циклуса соларних система
$c_p$	специфична топлота воде
$c_p$	специфична топлота радног флуида
$C_{PV}$	цена енергије продате мрежи, feed-in тарифа
$C_{NET}$	цена енергије купљене из мреже
$D$	годишња финансијска добит од инсталираних система
$E_{DG}$	потрошња енергије за грејање
$E_{GG}$	потрошња енергије за грејање гасом
$E_{EL}$	укупна годишња потрошња електричне енергије
$E_{EL,EO}$	електрична енергија за рад електричних уређаја у кући
$E_{EL,O}$	укупна годишња потрошња ел. енергије (без ел. ен. за грејање)
$E_{EL,OS}$	електрична енергија потребна за осветљење
$E_{EL,PRIM}$	примарна енергија укупне потрошње електричне енергије
$E_{EL,V}$	електрична енергија за грејање санитарне воде
$E_{KOL}$	топлотна енергија генерисана соларним колекторима
$E_{em, FN}$	уграђена енергија ФН система
$E_{em, IZO}$	уграђена енергија изолације
$E_{em, KOL}$	уграђена енергија соларних колектора
$E_P$	укупна купљена електрична енергија
$E_{P,NET}$	нето-купљена електрична енергија
$E_{PV,S}$	вишак електричне енергије
$E_{PRIM}$	годишња уштеда примарне ен. инсталирањем соларних система
$E_{PV}$	генерисана електрична енергија ФН системом
$E_{PV,B}$	електрична енергија која се генерише ФН системом и одмах троши
$E_{PV,NET}$	нето-купљена електрична енергија из мреже
$E_{PV,S}$	вишак електричне енергије који се продаје електро-мрежи
$E_{X,1}$	ексергија после мешања са хладном водом
$E_{X,COLD WAT}$	ексергија хладне воде
$E_{X,KOL}$	ексергија колектора
$E_{X,CW}$	ексергија топле воде за машину за прање веша
$E_{X,DW}$	ексергија топле воде за машину за прање судова
$E_{X,PV}$	ексергија топле воде ФН панела
$E_{X,PV-KOL}$	ексергија добијена из соларних система
$E_{X,PV-KOL,EE}$	ексергија добијена из соларних система (са уграђеном ексергијом)
$E_{X,SHOW}$	ексергија топле воде за судоперу
$E_{X,SINK}$	ексергија топле воде за туш

$E_{X,SUN}$	ексергија Сунца
$E_{X,TANK}$	ексергија бојлера
$E_x, POT$	укупна потребна ексергија
$E_x, PV-KOL$	ексергија добијена из ФН панела и соларних колектора
$E_x, PV-KOL, EE$	ексергија добијена из ФН панела и соларних колектора са уграђеном ексергијом
$E_{X,POT}$	укупна потребна ексергија потрошача
$EE_{KOL}$	уграђена ексергија инсталираних соларних колектора
$EE_{PV}$	уграђена ексергија инсталираних ФН система
$E_{TOT, DG}$	укупна потрошња енергије
$E_{TOT, PRIM, DG}$	укупна потрошња примарне енергије зграде са даљинским грејањем
$E_{TOT, PRIM, GG}$	укупна потрошња примарне енергије зграде са гасним грејањем
$e_x$	однос потребне и добијене ексергије (без уграђене ексергије)
$e_x, EE$	однос потребне и добијене ексергије (са уграђеном ексергијом)
$F_1$	директни коефицијент осветљености
$F_2$	рефлективни коефицијент осветљености
$f_{activ}$	део површине ФН панела са активном соларним ћелијама
$F_{ij}$	коефицијенти из датотеке <i>EnergyPlus</i> -а
$F_R$	пропустљивост првог слоја стакла
$G_T$	укупно соларно зрачење на ФН систему
$I$	директно соларно зрачење
$I_0$	екстратерестријално зрачење
$I_d$	дифузно хоризонтално зрачење
$I_h$	хоризонтално соларно зрачење
$I_{sol}$	укупно соларно зрачење које пада на нагнуту површину колектора
$LC_{IZO}$	дужина животног века изолације
$LC_{FN, KOL}$	дужина животног века инсталираних система
$m$	релативни оптички коефицијент масе ваздуха
$\dot{m}$	масени проток
$\dot{m}_{use}$	масени проток у соларној петљи
$\dot{m}_{source}$	масени проток од колектора до бојлера
$P$	снага електричне енергије произведене ФН панелом
$q$	укупни користан топлотни добитак радног флуида
$q_{heater}$	топлота додата грејачем или колектором
$q_{net}$	нето пренешена количина топлоте на воду у резервоару
$q_{offcycloss}$	пренос топлоте ка/од спољашње средине када систем не ради
$q_{offcycpar}$	топлота додата паразитским оптерећењем када систем не ради
$q_{oncycloss}$	пренос топлоте ка/од спољашње средине током рада система
$q_{oncycpar}$	топлота додата паразитским оптерећењем током рада
$q_{source}$	пренос корисне топлоте ка/од соларног колектора
$q_{use}$	пренос корисне топлоте ка/од петље
$R_{cond}$	отпор кондукције од апсорбера кроз изолацију до околине
$R_{conv}$	отпор конвекције од апсорбера до унутрашњег слоја стакла
$R_{GG}$	коефицијент конверзије примарне енергије за природни гас
$R_{EL}$	коефицијент конверзије електричне у примарну енергију
$R_{DG}$	коефицијент конверзије топлотне у примарну енергију
$R_{KOL}$	годишњи расход соларних колектора

$R_{rad}$	отпор зрачења од апсорбера до унутрашњег слоја стакла
$R_{PV}$	годишњи расход ФН система
$S$	нагиб посматране површине у односу на хоризонталу
$S_{CO_2}$	емисија угљен-диоксида
$S_{CO_2, PV}$	емисија угљен-диоксида која потиче од ФН панела
$S_{CO_2, KOL}$	емисија угљен-диоксида која потиче од соларних колектора
$S_{TOT, CO_2}$	тотална емисија угљен-диоксида
$S_{CO_2, PV, emb}$	уграђена емисија угљен-диоксида ФН панела
$S_{CO_2, KOL, emb}$	уграђена емисија угљен-диоксида соларних колектора
$T$	температура воде у бојлеру
$t$	Време
$T_{abs}$	температура апсорпционе плоче-апсорбера
$T_{air}$	температура спољашњег ваздуха
$T_{g2}$	температура унутрашњег слоја стакла
$T_i$	почетна температура воде у бојлеру у тренутку $t=0$
$T_{in}$	температура радног флуида
$T_{use}$	улазна температура флуида у бојлер
$T_{source}$	излазна температура флуида из бојлера
$UA_{offcyc}$	коефицијент губитака када систем не ради (0 када је укључен)
$UA_{oncyc}$	коефицијент губитака када систем ради (0 када је искључен)
$U_L$	укупни топлотни губитак зрачењем, конвекцијом, кондукцијом
$V$	запремина бојлера
$y$	удео ФН панела на крову
$Z$	зенитни угао Сунца
$\alpha$	упадни угао
$\alpha_{abs}$	коефицијент апсорпције апсорпционе плоче
$\beta$	соларна алтитуда
$\epsilon$	коефицијент прозирности неба
$\epsilon_{source}$	ефективност размене топлоте током преноса од колектора
$\epsilon_{use}$	ефективност размене топлоте током преноса у соларној петљи
$\eta_{cell}$	ћелијска ефикасност ФН панела
$\eta_{invert}$	ефикасност конверзије једносмерне у наизменичну струју
$\eta_x$	ексергетски степен искоришћења без уграђене ексергије
$\eta_{x, EE}$	ексергетски степен искоришћења са уграђеном ексергијом
$\rho$	густина воде
$\tau_b$	директна оптичка константа
$\tau_d$	дифузна оптичка константа
$\tau_{g1}$	пропустљивост првог слоја стакла
$\tau_{g2}$	пропустљивост другог слоја стакла
$\tau\alpha$	оптичка ефикасност соларног колектора

## СПИСАК СЛИКА

- Слика 2.1 - Шема енергетске анализе зграде нето-нулте потрошње енергије (ZNEB), са уграђеном енергијом
- Слика 3.1 - Пресек равног застакљеног колектора
- Слика 3.2 - Годишња производња фотонапонских система у свету
- Слика 3.3 - Мрежно повезан фотонапонски систем
- Слика 5.1 - 3Д модел неког стамбеног објекта у *GoogleSketchUp*-у
- Слика 5.2 - Радно окружење програма *GenOpt* са симулацијом у току
- Слика 6.1 - Основна шема Центра ел. оптерећења са једносмерном струјом
- Слика 6.2 - Шема функционисања Центра ел. оптерећења са инвертором
- Слика 6.3 - Шема система за грејање санитарне воде
- Слика 7.1 - Модел анализираних зграда добијен софтвером *Google SketchUp* са додатком *Open Studio*
- Слика 7.2 - Пресек приземља и првог спрата у *Google SketchUp*-у
- Слика 7.3 - Распоред потрошње електричне енергије за осветљење и електричне уређаје, и присуство људи у дневној соби током радног дана
- Слика 7.4 - Распоред потрошње електричне енергије за осветљење и ел. уређаје, и присуство људи у спаваћој соби (приземље) током радног дана
- Слика 7.5 - Распоред потрошње топле воде током дана
- Слика 7.6 - CINI електрични грејач за радијаторе код система електричног етажног грејања
- Слика 7.7 - Шема даљинског грејања у анализираној згради са снабдевачком и потрошачком петљом
- Слика 7.8 - Шема гасног грејања у анализираној згради
- Слика 7.9 - Приказ зграде са инсталираним системима за генерисање енергије
- Слика 7.10 - Временски подаци за Крагујевац из датотеке *EnergyPlus*-а
- Слика 7.11 - Мапа средњих годишњих вредности соларног зрачења у Србији
- Слика 7.12 - Месечне вредности соларног зрачења за Крагујевац из датотеке *EnergyPlus*-а
- Слика 8.1 - Ексергетско билансирање система за грејање санитарне воде
- Слика 8.2 - Ексергетско билансирање фотонапонског система
- Слика 8.3 - Генерисана, потрошена и купљена електрична енергија у згради
- Слика 9.1 - Годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности дебљине изолације
- Слика 9.2 - Годишња потрошња финалне и примарне енергије и уштеда примарне енергије за различите дебљине изолације
- Слика 9.3 - Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом дебљином изолације
- Слика 9.4 - Годишња потрошња финалне и примарне енергије и уштеда примарне енергије за различиту потрошњу топле воде
- Слика 9.5 - Графички приказ односа удела фотонапонских панела и уштеде примарне енергије за различиту потрошњу топле воде
- Слика 9.6 - Графички приказ односа површина фотонапонских панела и соларних колектора на крову, за различиту потрошњу топле воде
- Слика 9.7 - Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом потрошњом топле воде

- Слика 9.8** - Годишња потрошња електричне енергије у зградама са различитом потрошњом електричне енергије
- Слика 9.9** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, и уштеда примарне енергије за зграде са различитом потрошњом електричне енергије
- Слика 9.10** - Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом потрошњом електричне енергије
- Слика 9.11** - Графички приказ односа удела фотонапонских панела и уштеде примарне енергије за различит животни век соларних система
- Слика 9.12** - Графички приказ годишње вредности уграђене енергије соларних система за њихов различит животни век
- Слика 9.13** - Графички приказ годишње вредности уграђене енергије ФН система за различите вредности њихове уграђене енергије
- Слика 9.14** - Графички приказ односа удела фотонапонских панела и уштеде примарне енергије за различиту вредност уграђене енергије ФН система
- Слика 9.15** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија, уштеда примарне енергије за ФН модуле различите ефикасности
- Слика 9.16** - Однос површина фотонапонских панела и соларних колектора на крову, за различиту хелијску ефикасност ФН модула
- Слика 9.17** - Удео фотонапонских панела и уштеда примарне енергије за различиту хелијску ефикасност фотонапонских модула
- Слика 9.18** - Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом хелијском ефикасношћу фотонапонских модула
- Слика 9.19** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са даљинским системом грејања, за различите вредности дебљине изолације
- Слика 9.20** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са гасним системом грејања, за различите вредности дебљине изолације
- Слика 9.21** - Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом дебљином изолације (даљинско и гасно грејање)
- Слика 9.22** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са даљинским системом грејања, за различиту месечну потрошњу топле воде
- Слика 9.23** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са гасним системом грејања, за различиту месечну потрошњу топле воде
- Слика 9.24** - Графички приказ односа удела ФН панела и уштеде примарне енергије за различиту потрошњу топле воде и систем даљинског и гасног грејања
- Слика 9.25** - Графички приказ односа површина фотонапонских панела и соларних колектора на крову, за различиту потрошњу топле воде
- Слика 9.26** - Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом потрошњом топле воде и системима даљинског и гасног грејања
- Слика 9.27** - Потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са даљинским грејањем за различиту потрошњу електричне енергије
- Слика 9.28** - Потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са гасним грејањем за различиту потрошњу електричне енергије
- Слика 9.29** - Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом потрошњом електричне енергије
- Слика 9.30** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са даљинским системом грејања, за различите вредности дужине животног века соларних система
- Слика 9.31** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са гасним системом грејања, за различите вредности дужине животног века соларних система

- Слика 9.32** - Графички приказ односа удела фотонапонских панела и уштеде примарне енергије за различиту вредност уграђене енергије ФН система и зграду са даљинским и гасним системом грејања
- Слика 9.33** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија, уштеда примарне енергије за ФН модуле различите ефикасности и даљински систем грејања
- Слика 9.34** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија, уштеда примарне енергије за ФН модуле различите ефикасности и систем гасног грејања
- Слика 9.35** - Однос површина фотонапонских панела и соларних колектора на крову, за различиту ћелијску ефикасност ФН модула и системе даљинског и гасног грејања
- Слика 9.36** - Удео фотонапонских панела и уштеда примарне енергије за системе даљинског и гасног грејања и различиту ћелијску ефикасност ФН модула
- Слика 9.37** - Продата и купљена електрична енергија за зграде са даљинским и гасним грејањем и различитом ћелијском ефикасношћу фотонапонских модула
- Слика 9.38** - Однос потребне и добијене ексергије за зграду са различитом дебљином изолације и електричним грејањем
- Слика 9.39** - Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом дебљином изолације и електричним грејањем
- Слика 9.40** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту дебљину изолације
- Слика 9.41** - Ексергетски степени искоришћења за зграде са електричним грејањем и различитом потрошњом топле воде
- Слика 9.42** - Однос потребне и добијене ексергије за зграду са електричним грејањем и различитом месечном потрошњом топле воде
- Слика 9.43** - Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом месечном потрошњом топле воде и електричним грејањем
- Слика 9.44** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту потрошњу топле воде
- Слика 9.45** - Однос потребне и добијене ексергије за зграду са електричним грејањем и различитом потрошњом електричне енергије
- Слика 9.46** - Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом потрошњом електричне енергије и електричним грејањем
- Слика 9.47** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту потрошњу ел.енергије
- Слика 9.48** - Ексергетски степени искоришћења за зграде са електричним грејањем и различитом температуром топле воде
- Слика 9.49** - Однос потребне и добијене ексергије за зграду са електричним грејањем и различитом температуром топле воде
- Слика 9.50** - Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом температуром топле воде и електричним грејањем
- Слика 9.51** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту температуру топле воде
- Слика 9.52** - Ексергетски степени искоришћења за зграде са електричним грејањем и ФН модулима различите ћелијске ефикасности
- Слика 9.53** - Однос потребне и добијене ексергије за зграду са електричним грејањем и различитом ћелијском ефикасношћу ФН модула
- Слика 9.54** - Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом ћелијском ефикасношћу ФН модула и електричним грејањем
- Слика 9.55** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту ћелијску ефикасност ФН модула
- Слика 9.56** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту дебљину изолације у згради са гасним системом грејања

- Слика 9.57** - Однос потребне и добијене ексергије за зграду са даљинским и гасним грејањем и различитом потрошњом топле воде
- Слика 9.58** - Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом потрошњом топле воде и даљинским или гасним системом грејања
- Слика 9.59** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту потрошњу топле воде у згради са даљинским системом грејања
- Слика 9.60** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту потрошњу топле воде у згради са гасним системом грејања
- Слика 9.61** - Однос потребне и добијене ексергије за зграду са даљинским тј. гасним системом грејања и различитом потрошњом електричне енергије
- Слика 9.62** - Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом потрошњом електричне енергије и даљинским, тј. гасним системом грејања
- Слика 9.63** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту потрошњу
- Слика 9.64** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту потрошњу електричне енергије и систем гасног грејања
- Слика 9.65** - Ексергетски степени искоришћења за зграде са даљинским и гасним грејањем и различитом температуром топле воде у бојлеру
- Слика 9.66** - Однос потребне и добијене ексергије за зграду са даљинским и гасним грејањем и различитом температуром топле воде
- Слика 9.67** - Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом температуром топле воде и даљинским и гасним грејањем
- Слика 9.68** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту температуру топле воде и даљински систем грејања
- Слика 9.69** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту температуру топле воде и гасни систем грејања
- Слика 9.70** - Однос потребне и добијене ексергије за зграду са даљинским, тј. гасним грејањем и различитом ћелијском ефикасношћу ФН модула
- Слика 9.71** - Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом ћелијском ефикасношћу ФН модула и даљинским и гасним грејањем
- Слика 9.72** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту ћелијску ефикасност ФН модула и систем даљинског грејања
- Слика 9.73** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту ћелијску ефикасност ФН модула и систем гасног грејања
- Слика 9.74** - Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са различитом дебљином изолације и електричним грејањем
- Слика 9.75** - Вишак произведене електричне енергије и нето купљена електрична енергија за зграду са различитом дебљином изолације и електричним грејањем
- Слика 9.76** - Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са различитом потрошњом електричне енергије и електричним грејањем
- Слика 9.77** - Вишак електричне енергије и нето купљена електрична енергија за зграду са различитом потрошњом електричне енергије и електричним грејањем
- Слика 9.78** - Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са различитом месечном потрошњом топле воде и електричним грејањем
- Слика 9.79** - Удео ФН панела за различиту месечну потрошњу топле воде
- Слика 9.80** - Графички приказ односа површина фотонапонских панела и соларних колектора на крову, за различиту потрошњу топле воде

- Слика 9.81** - Вишак произведене електричне енергије и нето купљена ел. енергија за зграду са различитом потрошњом топле воде и електричним грејањем
- Слика 9.82** - Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са ФН панелима различите ћелијске ефикасности
- Слика 9.83** - Вишак, нето-купљена и укупно-купљена електрична енергија за ФН панеле различите ћелијске ефикасности
- Слика 9.84** - Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са различитом потрошњом електричне енергије
- Слика 9.85** - Вишак, нето-купљена и укупно-купљена електрична енергија за различиту потрошњу електричне енергије у згради са даљинским, тј. гасним грејањем
- Слика 9.86** - Годишња добит и период отплате инвестиција за зграду са различитом месечном потрошњом топле воде и даљинским, тј. гасним грејањем
- Слика 9.87** - Вишак, нето-купљена и укупно-купљена електрична ен. за различиту потрошњу топле воде у згради са даљинским, тј. гасним грејањем
- Слика 9.88** - Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са ФН панелима различите ћелијске ефикасности
- Слика 9.89** - Вишак, нето-купљена и укупно-купљена електрична енергија за ФН панеле различите ћелијске ефикасности
- Слика 9.90** - Емисија и тотална емисија CO<sub>2</sub> при енергетској оптимизацији зграда са различитим системима грејања и ФН системом ћелијске ефикасности 12 %
- Слика 9.91** - Емисија и тотална емисија CO<sub>2</sub> код енергетске оптимизације зграда са различитим системима грејања, при ћелијској ефикасности ФН система 14 % и 16 %
- Слика 9.92** - Емисија и тотална емисија угљен-диоксида при енергетској оптимизацији зграда са ФН системима различите ћелијске ефикасности
- Слика 9.93** - Емисионо време отплате за ФН системе различите ћелијске ефикасности при енергетској оптимизацији зграда
- Слика 9.94** - Емисија и тотална емисија угљен-диоксида код зграда са ФН системима различите ћелијске ефикасности при економској оптимизацији
- Слика 9.95** - Емисионо време отплате за економску оптимизацију зграда са ФН системима различите ћелијске ефикасности
- Слика 9.96** - Потрошња финалне и примарне енергије референтне зграде, за различите системе грејања
- Слика 9.97** - Потрошња примарне енергије и генерисана примарна енергија референтне зграде, за различите системе грејања (уделе ФН панела)
- Слика 9.98** - Потрошња примарне енергије референтне зграде у зависности од коефицијента конверзије електричне у примарну енергију, за различите примењене системе грејања
- Слика 9.99** - Потрошња примарне енергије и генерисана примарна ен. референтне зграде (при оптималним вредностима удела ФН панела и различитим системима грејања) за различите ћелијске ефикасности ФН модула
- Слика 9.100** - Вишак и купљена електрична енергија референтне зграде (при оптималним вредностима удела ФН панела и различитим системима грејања) за различите ћелијске ефикасности ФН модула
- Слика 9.101** - Енергетско време отплате соларних система референтне зграде (при оптималним вредностима удела ФН панела и различитим системима грејања) за различите ћелијске ефикасности ФН модула
- Слика 9.102** - Енергетски степени ефикасности у зависности од ћелијске ефикасности ФН панела, за све анализиране системе грејања
- Слика 9.103** - Потребна и добијена енергија реф. зграде, за различите системе грејања
- Слика 9.104** - Однос потребне и добијене енергије референтне зграде, за различите системе грејања и за различиту ћелијску ефикасност ФН модула 12 %
- Слика 9.105** - Енергетско време отплате фотонапонских система референтне зграде за различите ћелијске ефикасности ФН модула
- Слика 9.106** - Финансијска добит и време отплате соларних система референтне зграде за различите системе грејања



- Слика 9.107** - Финансијска добит соларних система референтне зграде за различите системе грејања и различиту ћелијску ефикасност
- Слика 9.108** - Период отплате соларних система референтне зграде за различите системе грејања и различиту ћелијску ефикасност
- Слика 9.109** - Период отплате соларних система референтне зграде са електричним грејањем за различиту ћелијску ефикасност ФН система

## СПИСАК ТАБЕЛА

- Табела 7.1** - Уграђена енергија, ћелијска и модулска ефикасност за фотонапонске модуле од кристалног силицијума
- Табела 7.2** - Уграђена енергија и модулска ефикасност за фотонапонске модуле од аморфног силицијума
- Табела 7.3** - Уграђена енергија и енергетски период отплате за различите врсте фотонапонских модула
- Табела 8.1** - Цена електричне енергије у Србији
- Табела 9.1** - Детаљна годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности дебљине изолације
- Табела 9.2** - Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитом дебљином изолације
- Табела 9.3** - Детаљна годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности потрошње топле воде
- Табела 9.4** - Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитом потрошњом топле воде
- Табела 9.5** - Детаљна годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности потрошње електричне енергије расвете и електро-уређаја
- Табела 9.6** - Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за зграде са различитом отрошњом електричне енергије
- Табела 9.7** - Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитим животним веком соларних система
- Табела 9.8** - Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитом уграђеном енергијом фотонапонског система
- Табела 9.9** - Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за зграде са различитом ефикасношћу фотонапонских модула
- Табела 9.10** - Детаљна годишња потрошња електричне енергије у референтној згради и потрошња енергије за грејање
- Табела 9.11** - Годишња потрошња финалне и примарне енергије у референтној згради за различите системе грејања
- Табела 9.12** - Детаљна годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности дебљине изолације и системе даљинског и гасног грејања
- Табела 9.13** - Потрошња примарне енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитом дебљином изолације
- Табела 9.14** - Детаљна годишња потрошња финалне и примарне ен. у згради за даљинско и гасно грејање, при различитим вредностима потрошње топле воде
- Табела 9.15** - Потрошња примарне енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитом потрошњом топле воде
- Табела 9.16** - Детаљна годишња потрошња финалне и примарне енергије у згради за даљинско и гасно грејање, при различитим вредностима потрошње електричне енергије
- Табела 9.17** - Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за зграде са даљинским и гасним системом грејања, и са различитом потрошњом електричне енергије

- Табела 9.18** - Потрошња примарне енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитим животним веком соларних инсталација
- Табела 9.19** - Потрошња примарне енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитим врстама фотонапонских панела
- Табела 9.20** - Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за зграде са даљинским и гасним грејањем, при различитиј ћелијској ефикасности фотонапонских модула
- Табела 9.21** - Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са електричним грејањем и различитом дебљином изолације
- Табела 9.22** - Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са електричним грејањем и различитом потрошњом топле воде
- Табела 9.23** - Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са електричним грејањем и различитом потрошњом ел. енергије
- Табела 9.24** - Детаљна годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности температуре топле воде у бојлеру соларне инсталације
- Табела 9.25** - Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са различитом температуром топле воде у бојлеру сол. инсталације
- Табела 9.26** - Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве ФН модула са различитом ћелијском ефикасношћу
- Табела 9.27** - Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са различитом дебљином изолације
- Табела 9.28** - Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са различитом месечном потрошњом топле воде
- Табела 9.29** - Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са различитом потрошњом електричне енергије и системом даљинског, тј. гасног грејања
- Табела 9.30** - Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са различитом температуром воде у бојлеру соларне инсталације и системом даљинског и гасног грејања
- Табела 9.31** - Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за ФН модуле различите ћелијске ефикасности и даљинско, тј. гасно грејање
- Табела 9.32** - Резултати економске оптимизације за различиту дебљину изолације у зградама са електричним грејањем
- Табела 9.33** - Резултати економске оптимизације за различиту потрошњу електричне енергије у зградама са електричним грејањем
- Табела 9.34** - Резултати економске оптимизације за различиту месечну потрошњу топле воде у згради са електричним грејањем
- Табела 9.35** - Резултати економске оптимизације за различиту ћелијску ефикасност ФН модула у зградама са електричним грејањем
- Табела 9.36** - Резултати економске оптимизације за различиту дебљину изолације у зградама са даљинским, тј. гасним системом грејања
- Табела 9.37** - Резултати економске оптимизације за различиту потрошњу електричне енергије у зградама са даљинским, тј. гасним грејањем
- Табела 9.38** - Резултати економске оптимизације за различиту месечну потрошњу топле воде у згради са даљинским, тј. гасним грејањем
- Табела 9.39** - Резултати економске оптимизације за различиту ћелијску ефикасност ФН модула у зградама са даљинским, тј. гасним грејањем

# 1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

---

Проблем енергетске стабилности је последњих неколико година постао најбитније питање светског привредног, економског и друштвеног система. Нагли пораст популације проузроковао је већи економски развој који иде у корак са још већом потрошњом енергије на светском нивоу. Тренутно, светска годишња потрошња енергије је већа од 12 TW, а до 2050. године предвиђа се да ће она достићи износ од 30 TW. Током прошлог века, фосилна горива су подмиривала већину људских енергетских потреба, јер су јефтинија и лакша за експлоатацију. Данас је светска дневна потрошња нафте око 80 милиона барела, а реална очекивања су да се она повећа на 123 милиона барела дневно до 2025. године [1]. Резерве нафте и гаса са текућим стопама потрошње довољне су за задовољење потражње наредних 40 до 60 година. Резерве угља су у нешто бољој ситуацији, и оне су довољне за наредних 250 година [2]. Ако се сагледају последице ограничених резерви, свет се може суочити са ситуацијом у којој ће цена горива рапидно расти са смањењем резерви.

Постоји велики број фактора који су значајни у одређивању будућег нивоа потрошње енергије и производње. Такви фактори поред пораста становништва, укључују привредне перформансе и технолошки развој. Осим тога, државне регулативе о енергији и развоју на светском енергетском тржишту ће сигурно играти кључну улогу у будућем нивоу и начину производње и потрошње енергије.

Повећање потрошње енергије и коришћење фосилних горива, довели су до стварања још једног великог проблема – повећаног загађења животне средине услед велике емисије штетних гасова, које је резултирало глобалним загревањем и климатским променама. Климатске промене данас представљају озбиљну претњу Земљиној кугли и целом човечанству, и оне могу достићи катастрофалне размере у овом веку ако се емисија гасова са ефектом стаклене баште брзо и одлучно не смањи. Према подацима Међународне агенције за енергију – IEA (енгл. *International Energy Agency*) [3] енергетски сектор емитује 26 билиона тона угљен-диоксида годишње, а очекује се да се емисија CO<sub>2</sub> 2030. године повећа за 55 % и достигне ниво већи од 40 билиона тона годишње. Ублажавање климатских промена је један од главних приоритета у свету, Европској унији, па и у Србији. Постизање решења за еколошке проблеме захтева да се човечанство данас суочи са дугорочним потенцијалним активностима за одрживи развој.

Када је у питању потрошње енергије у Србији, према подацима из 2010. године, укупна потрошња примарне енергије износила је 15,531 Mtoe, а укупна потрошња финалне енергије износила је 9,698 Mtoe, од чега је у неенергетске сврхе потрошено 0,809 Mtoe а у енергетске сврхе 8,889 Mtoe [4].

Што се тиче стамбеног сектора, из бројних извора се може доћи до података да је потрошња енергије у зградарству на светском нивоу 20 - 40 % од укупне потрошње енергије, а у Србији је она на нивоу око 35 % [5]. Треба имати у виду да се ова потрошња односи на експлоатационе услове зграда, где су највећи потрошачи системи грејања, инсталације за грејање топле воде, кућни апарати, итд. Укупна емисија CO<sub>2</sub> која потиче од зграда у Европској унији износи чак 36 % [6]. Зато треба тежити унапређењу енергетске ефикасности у зградарству који подразумева континуирану примену широког опсега делатности чији је крајњи циљ смањење потрошње свих врста енергије уз исте или боље услове у објекту. Овакве мере резултирају смањењем емисије штетних гасова (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) и на тај начин доприносе заштити животне средине и смањењу глобалног загревања.

ЕУ системским мерама обавезује своје чланице на стално повећање енергетске ефикасности, доносећи бројне директиве за остварење веће енергетске ефикасности и смањење постојеће еколошке неравнотеже на Земљи. Према директиви 2009/28/ЕС и "TRIPLE 20" процедури [7], у земљама Европске уније до 2020. године емисија гасова стаклене баште и потрошња енергије треба да се смањи за 20%, и истовремено да се угради 20% обновљиве енергије у укупној потрошњи енергије. Године 2010. Усвојена је ЕПБД директива (Energy Performance of Buildings Directive) која је обавезујућа и према којој све нове зграде до 31. 12. 2020. треба да буду потпуно енергетски ефикасне (ZERO ENERGY BUILDING) - да не троше енергију из мреже и да не емитују CO<sub>2</sub>. Очекивани исход примене ове Директиве, изражен у бројкама, значи да се до 2020. године смањи укупна потрошње енергије у ЕУ 5-6 % и емисија CO<sub>2</sub> 5 %, и да се отвори 280 000 – 450 000 нових радних места.

Смањење потрошње енергије је могуће оставити на два начина: побољшањем енергетске ефикасности постојећих зграда или грађењем нових енергетски ефикасних зграда. Енергетски ефикасне зграде имају мању укупну потрошњу енергије, мању емисију гасова стаклене баште и своје енергетске потребе делимично или потпуно задовољавају енергијом коју генеришу сопственим системима обновљивих извора енергије који не загађују животну средину. У том смислу, обновљиви извори енергије треба да буду један од најефикаснијих и најефектнијих решења.

Светска истраживања и развој у области обновљивих извора енергије и њихових система врше се интензивно у последње три деценије. Технологије обновљивих извора енергије производе енергију претварањем природних феномена у корисне облике енергије. Обновљиви ресурси имају огроман енергетски потенцијал, међутим, они су генерално дифузни и не у потпуности приступачни за коришћење. Системи конверзије енергије који су базирани на обновљивим енергетским технологијама развијају се тако да буду исплативији у односу на високе цене нафте и нафтних деривата. Осим тога, системи обновљивих извора енергије имају повољан утицај на животну средину, што представља њихову највећу предност. На крају 2001. године инсталирани капацитет система обновљивих извора енергије је износио једва 9% од укупне производње електричне енергије, али интензивним коришћењем обновљиве енергије, сценарио глобалне потрошње енергије обновљивих извора до 2050. године треба да достигне 318 EJ (318x10<sup>15</sup> J).

Постоји више обновљивих извора енергије који се могу користити уместо фосилних горива, али због веома високог нивоа заштите животне средине, верује се да би соларну енергију требало користити уместо других облика енергије, чак и када су трошкови незнатно већи. Највећа предност соларне енергије у односу на друге

облике енергије је да је чиста и да се до крајњег корисника испоручује без загађивања животне средине. Дакле, соларне системе би требало користити увек када је то могуће у циљу постизања одрживог развоја и одрживе будућности. Соларна енергија се користи за генерисање електричне енергије или топлотне енергије, а такође може да се користи и за истовремено генерисање електричне и топлотне енергије.

Фотонапонска технологија (ФН или ФН, (PV) од енгл. *photovoltaic*) представља најистакнутију и највише примењену технологију обновљивих извора енергије коју карактерише непресушни енергетски извор – Сунце. Она представља директно претварање сунчеве енергије у електричну енергију. Током последњих пет година, глобална ФН индустрија имала је раст већи од 40% сваке године [8]. Иако је ФН технологија још увек скупа опција за производњу електричне енергије у односу на друге изворе енергије, многе земље подржавају и подстичу њену примену због обећавајућег потенцијала и додатних користи.

Генерисање топлотне енергије помоћу енергије Сунца врши се преко соларних колектора - посебне врсте размењивача топлоте који претварају енергију сунчевог зрачења у унутрашњу енергију транспортног флуида. Соларни колектори обезбеђују топлу воду која може да се користи у многе сврхе. Када су у питању породичне куће, ова врста соларних пријемника се користи за грејање санитарне топле воде.

Дизајнирањем куће која би уз примену одговарајућих стандарда пројектовања имала и сопствене соларне системе за генерисање електричне и топлотне енергије, може се остварити концепт зграде са нето-нултом потрошњом енергије па чак и са нето-позитивном потрошњом енергије.

Базни део истраживања датих у овој докторској дисертацији представља моделирање зграде уз поштовање процедура енергетског и ексергетског моделирања. На тај начин се реални енергетски систем преводи у енергетски модел. Основне инсталације које се моделирају су фотонапонски системи и системи соларних колектора. Неопходно је и моделирање система који унутар куће троше енергију, а то је грејни систем као највећи потрошач, систем за грејање санитарне топле воде, као и системи за погон кућних уређаја током читаве године. Развијени математички модел успоставља релације између параметара зграде, параметара потрошње енергије и параметара постојећих соларних инсталација. Комплетан модел зграде заједно са инсталираним соларним системима се програмира у програмском језику софтвера *EnergyPlus*. Веома је важно правилно пројектовати соларне енергетске системе, да би они производили максималну количину енергије и ексергије са максималном енергетском ефикасношћу, минималним утрошком фосилне енергије, минималним утицајем на животну средину, и са циљем смањењења коришћења енергетских ресурса.

Следећи корак је развој оптимизационих метода и формирање оптимизационог алгорита у циљу решавања постављеног истраживачког задатка.

Предмет рада докторске дисертације је оптимизација односа површина фотонапонских панела и соларних колектора, инсталираних на крову зграде, у циљу добијања највеће количине укупне произведене енергије и достизање наведених концепата нето-нулте и нето-позитивне потрошње енергије. Генерисањем највеће могуће количине енергије максимално се избегава потрошња примарне енергије и емисија гасова стаклене баште у атмосферу.

При оптимизацији величине фотонапонских панела и соларних колектора узимана је у обзир и уграђена енергија - енергија утрошена током животног циклуса наведених соларних инсталација и изолације (енгл. *embodied energy*). Оптимизације су вршене за зграду са различитим системима грејања - електрично грејање, даљинско грејање и гасно грејање. Разматрани су случајеви зграде са различитом дебљином изолације, различитим потребама за топлим водом, различитом потрошњом електричне енергије, различитим врстама фотонапонских панела, различитом ефикасношћу ФН модула и различитом дужином животног века соларних система.

Рађена је енергетска оптимизација са циљем добијања највеће уштеде примарне енергије инсталирањем соларних система на крову посматране зграде. Након енергетске, рађена је и ексергетска оптимизација којом је одређиван оптимални однос површина соларних инсталација при коме се добијао највећи ексергетски степен искоришћења инсталираних соларних система.

Оптимизација површина фотонапонских панела и соларних колектора је рађена са економског аспекта, у циљу максимизирања финансијске добити која се остварује инсталацијом соларних система. Наиме, коришћењем наведених система, кућа са нето-позитивном потрошњом енергије на годишњем нивоу може у појединим тренуцима имати већу производњу енергије од њених енергетских потреба. Вишак енергије се "продаје" електричној мрежи, по такозваној фид-ин (*feed-in*) тарифи. Имајући у виду актуелне тарифе за произведену и купљену електричну енергију из електро-мреже, добијене су величине фотонапонских модула и соларних колектора које дају максималну економску добит и минимални период отплате инвестиција.

На крају истраживања дата је еколошка анализа најповољнијих добијених резултата. Такође су приказани и периоди отплате инвестиција инсталираних система за генерисање топлотне и електричне енергије: енергетско време отплате (*energy payback-time*), ексергетско време отплате (*exergy payback-time*) и емисионо време отплате (*emission payback-time*).

Оваква свеобухватна анализа могуће количине генерисане енергије из обновљивих извора помоћу сопствених соларних инсталација са једне стране, и енергетских потреба куће са друге стране, дата кроз оптималан однос величине ФН панела и соларних колектора, даје велике могућности за унапређење пројектовања соларних енергетских система код кућа са нето-нултом потрошњом енергије.

## 2. НУЛТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЗГРАДЕ

---

Темин нето енергија се обично користи за описивање баланса између енергије коју зграда троши (са својим инсталираним системима и људима који у њој живе) и енергије коју зграда сама производи преко сопствених инсталираних система (који генеришу енергију из обновљивих извора). Међутим, оригинални концепт "нето енергије", који се у прво време користио у области еколошке економије, има потпуно другачије значење. Он се односио на израчунавање потребне енергије током читавог животног циклуса и развијао се више од једног века, да би данас постао тема о којој се нашироко дискутује, посебно у области обновљиве енергије.

### 2.1 Концепт нето-енергије

Прве белешке о концепту "нето енергије" објавио је *Podolinsky*, још 1881. године, у којима је покушао да у енергетском смислу анализира аспекте друштва и производњу робе углавном везане за пољопривреду. Он је покушао да доведе у међусобну зависност термодинамичке принципе и економску производњу, разматрајући "акумулирану соларну енергију" људских делатности [9]. Ово се може сматрати првом студијом "нето енергије" у историји. Неколико деценија касније, двадесетих година прошлог века, енглески хемичар *Frederick Soddy* је даље анализирао савремене социјалне и економске системе из термодинамичке перспективе, сугеришући да је људски развој у великој мери зависан од биолошких и физичких чињеница, које нису евидентирани у економским студијама [10]. Он је предложио да детаљни прорачун утрошене енергије може бити добра алтернатива и за монетарни систем. Истовремено је група инжењера из САД-а, названа "Техничка алијанса", извршила детаљне анализе различитих индустријских процеса које се могу сматрати првим детаљнијим нето-енергетским анализама.

До 1970.-их година није се посебно разматрала ова проблематика, а онда се концепту "нето енергије" нагло посветила велика пажња због смањења светских резерви фосилних горива. Многи научници су се бавили овом темом, а међу њима је био и еколог *Howard T. Odum*, који је радио на анализи енергетских токова и закључио да је "истинита цена енергије у друштву управо цена нето енергије, која се добија тако што се од укупне цене енергије одузму трошкови њеног добијања" [11].

Од оживљавања концепта "нето енергије" седамдесетих година прошлог века, нето-енергетске анализе су рађене у различитим областима, почев од фосилних горива и нуклеарне индустрије па до обновљивих технологија, и постале су битан



фактор при анализи животног циклуса енергетских система. Нето-енергетска анализа је дефинисана као "техника за евалуацију која пореди испоручену количину енергије одређеном технологијом са укупном енергијом потребном за њено добијање, испоруку и прераду до социјално корисног облика" [12]. Годинама су различите методе и степени тачности коришћени за нето енергетске анализе и резултати су изражавани различитим терминима као што је енергетски период отплате (energy payback time - EPB), енергетски повраћај инвестиције (energy return of investment - EROI), енергетски принос енергије (energy yield ratio - EYR), однос нето енергије (net energy ratio), анализа енергетског животног циклуса (life cycle energy analysis - LCEA).

## 2.2 Нето-енергија и уграђена енергија

У области изградње зграда концепт и анализа нето енергије још увек није свуда уведена у редован прорачун и методе за сертификацију. Тек последњих пар година енергетска евалуација зграда почиње да разматра укупну потрошњу електричне енергије или фосилних горива, са узимањем у обзир и количине енергије која се користи у процесу градње објекта, као на пример за производњу материјала, транспорт, обраду итд. То је сопствена или уграђена енергија (*embodied energy*). Прорачун уграђене енергије, која узима у обзир и енергију потребну за монтажу и сервисирање, и на крају за рециклажу, ефикасно може послужити при нето енергетској анализи када се израчунава потрошња енергије у згради током њеног животног циклуса.

Прва студије која је користила уграђену енергију у енергетском прорачуну породичних зграда у САД је била студија *Hannon*-а и осталих [13], још давне 1978. године. Данашњи енергетски прорачуни зграда користе модерне рачунарске алате који пружају могућност детаљне енергетске анализе широког спектра еколошких аспеката примењених материјала укључујући уграђену енергију. Све енергетске анализе које се спроводе последњих година имају за циљ пројектовање ниско-енергетских зграда.

## 2.3 Дефиниција нултих и нето-нултих енергетских зграда

Дефиниција нулте енергије се углавном заснива на годишњој количини енергије потребној за задовољење енергетских потреба зграде (грејање, хлађење, вентилација, осветљење, електрични уређаји итд). Термин "нето-нулта енергија" се често користи за представљање годишњег енергетског биланса зграде повезане на електро-дистрибутивну мрежу.

### 2.3.1 Нулте енергетске зграде

Неки од првих документованих покушаја достизања зграда нулте енергије били су покушаји да се постигне нулта стопа грејања у тзв. соларним кућама. Рани примери су MIT соларна кућа 1939. године која је имала велику површину са инсталираним соларним колекторима и резервоарима за складиштење топле воде или "*Bliss House*" из 1955. године која је користила такође соларне колекторе. Примери из 1970. укључују *Vagn Korsgaard*-ову нулту енергетску кућу у Данској или

*Saskatchewan*-ову кућу [9]. Ове куће су имале високо-изоловани омотач и биле су дизајниране за нулто или приближно нулто грејање.

Наведени рани примери су утицали на грађевински дизајн зграда и допринели дефиницији и надоградњи постојећих грађевинских стандарда и законске регулативе. Стандарди за ниско-енергетске зграде који користе принципе добре изолације, добре заптивености и примену вентилационих система са рекуперацијом су све популарнији, као што су R-2000 у Канади [14] или *Passivhaus* у Немачкој [15]. Ови стандарди нису стандарди ни нулте енергије ни нултог грејања али постижу смањење енергије потребне за грејање користећи практичне и економичне приступе, који би већина стручњака размотрила као први добар корак према нултој енергетској згради (*zero energy building* - ZEB). Ако се врши енергетска анализа оваквих зграда на основу животног циклуса, оне могу бити боље решење чак и од аутономних кућа које функционишу независно од инфраструктурне подршке – без прикључка за електричну енергију, водовод, канализацију итд.

У досадашњој пракси, најчешћа дефиниција нултих енергетских зграда (ZEB) је да користе електричну мрежу и као извор и као понор чиме се избегава систем за складиштење електричне енергије. Термин "нето" се користи код зграда повезаних на електро-мрежу за дефинисање енергетске равнотеже између електричне енергије која се купује из мреже и која се као вишак продаје мрежи.

### 2.3.2 Нето-нулте енергетске зграде

Радикални приступ за смањење енергетских потреба, када је у питању сектор зградарства, представља концепт зграда нето-нулте енергетске потрошње (ZNEB - *zero net energy building*). Овај концепт је почео да се појављује у литератури као еволуција изузетно енергетски ефикасних зграда, и подразумева нулти енергетски биланс на годишњем нивоу [10, 16, 17].

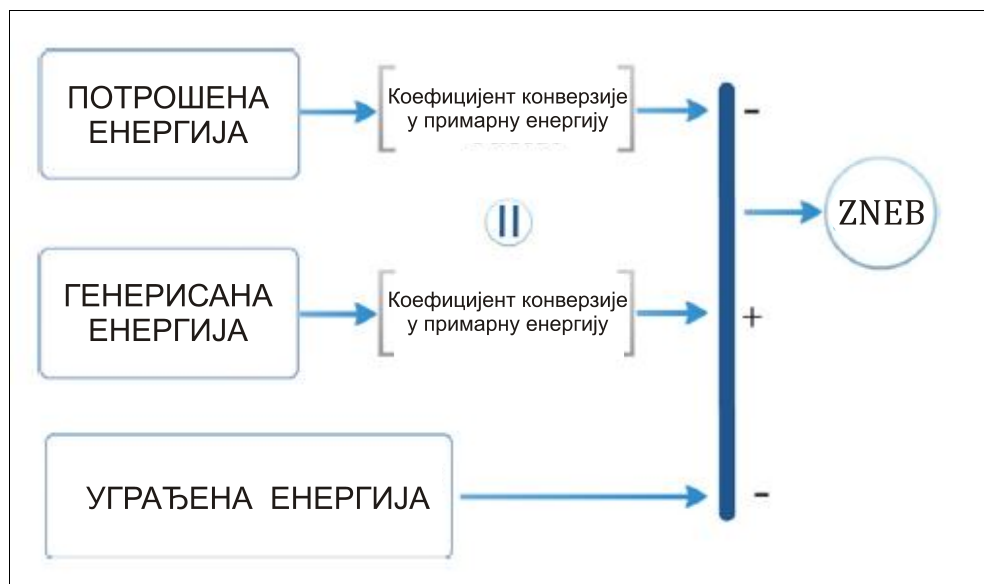
Постоје различите дефиниције концепта "нето-нулте енергије". Европски парламент дефинише нето-нулту енергетску зграду као "зграду где је, као резултат веома високе енергетске ефикасности, укупна годишња потрошња примарне енергије једнака или мања од енергије произведене из сопствених система обновљиве енергије". Две можда најчешће навођене дефиниције у литератури даје *Torcellini* и то су нето-нулта генерисана енергија (*net-zero site energy*) и нето-нулта примарна енергија (*net-zero energy source*) [18].

Зграда нето-нулте генерисане енергије односи се на зграду која сопственим инсталираним системима обновљиве енергије производе бар исту количину енергије као што је њена годишња потрошња, независно од врсте коришћене или произведене енергије. Јасно је да се говори о финалној енергији.

Код зграда нето-нулте примарне енергије, количина енергије која се троши и која се као вишак продаје електро-мрежи множи се са коефицијентом конверзије финалне у примарну енергију, што омогућава флексибилност у погледу коришћења енергента за грејање. На пример, ако струја која се као вишак продаје мрежи има висок коефицијент конверзије примарне енергије, као што је случај код нас у Србији, концепт "нето-нулте примарне енергије" омогућава коришћење већих количина енергента за грејање са мањим коефицијентом конверзије финалне у примарну енергију. Уколико су количине примарне енергије потрошене енергије и енергије која се као вишак продаје електро-мрежи међусобно једнаке, зграда је нето-нулте потрошње примарне енергије.

Последњих неколико година концепти зграда нето-нулте потрошње енергије су унапређени, тако да се сада при енергетским анализама у обзир узимају и уграђене енергије инсталираних система, изолације и сл (Слика 1.1).

Према дефиницији, коју је дао *Kapsalaki*, зграда нето-нулте енергетске потрошње (ZNEB – zero net energy buliding) произведе на годишњем нивоу енергију која јој је потребна за сопствене енергетске потребе, тј. вишак електричне енергије који се прода електро-мрежи једнак је купљеној електричној енергији на годишњем нивоу [19]. Зграда нето-позитивне енергетске потрошње (PNEB - positive net energy buliding) произведе на годишњем нивоу више енергије него што јој је потребно, тј. вишак електричне енергије који се прода електро-мрежи већи је од купљене електричне енергије из мреже на годишњем нивоу. Зграда нето-негативне енергетске потрошње (NNEB - negative net energy buliding) произведе на годишњем нивоу мање енергије него што јој је потребно, тј. вишак електричне енергије који се продаје електро-мрежи мањи је од купљене електричне енергије из мреже на годишњем нивоу [20].



**Слика 2.1** – Шема енергетске анализе зграда нето-нулте потрошње енергије (ZNEB), са уграђеном енергијом

Енергија коју зграда генерише из сопствених система је најчешће електрична енергија која се добија из фотонапонског (ФН) система, док се генерисање топлотне енергије врши преко система соларних колектора. Оба поменута система треба да буду постављена у оптималном положају, да би се енергија Сунца искористила на најбољи могући начин. Количина соларне енергије која долази до соларних пријемника зависи од много фактора: географске ширине и географске дужине локације где се налази кућа, од надморске висине, топографије земљишта, метеоролошких услова и сл, тако да, поред свега претходно реченог, и ови параметри треба да буду узети у обзир при енергетском прорачуну зграде.

Наравно, постоје и други обновљиви извори енергије који могу да се примене и на тај начн да се оствари још већа уштеда примарне енергије (геотермални извори, енергија ветра, енергија таласа...).

## 3. СИСТЕМИ ЗА ГЕНЕРИСАЊЕ ЕНЕРГИЈЕ КОД НУЛТИХ ЗГРАДА

---

У истраживањима приказаним у овој докторској дисертацији, код моделиране зграде од обновљивих извора енергије коришћена је само соларна енергија. У том смислу, на крову зграде је инсталиран фотонапонски систем за генерисање електричне енергије као и систем соларних колектора за генерисање топлотне енергије. У овом поглављу дат је кратак осврт на историјат коришћења соларне енергије, као и основне карактеристике соларних пријемника, односно система за генерисање енергије.

### 3.1 Историјат коришћења соларне енергије

Сунце је сфера састављена од интензивно топлих гасовитих материја, пречника  $1,39 \times 10^6$  km, које је од Земље удаљено  $1,5 \times 10^8$  km. Средња температура површине Сунца износи приближно 5800 K, док је температура језгра много већа. Укупна излазна Сунчева енергија је око  $3,8 \times 10^{20}$  MW, што одговара енергији од  $63 \text{ MW/m}^2$  површине Сунца. Ову енергију Сунце зрачи у свим правцима, али само мали део те енергије стиже на границу Земљине атмосфере - око  $1,74 \times 10^{11}$  MW. До Земљине површине стиже много мање соларне енергије, услед ефеката расипања светлости, присуства троатомних гасова и аеросола у атмосфери итд. [21]. Међутим, и са овом малом фракцијом, процењује се да је соларна енергија која током мање од једног сунчаног сата падне на Земљу довољна да подмири енергетске потребе читавих 7,29 милијарди људи који тренутно живе на нашој планети [22].

Човек је још у праисторији схватио да може имати добит од коришћења соларне енергије. Још је Сократ (V век пре н.е.) у својим записима и учењима наводио правилну оријентацију кућа са циљем да оне буду хладније лети и топлије зими. Од праисторијског доба, помоћу Сунца се сушила и чувала храна, и испаравала морска вода да би се добила со. Међутим прва права примена соларне енергије почиње много касније. Тек током 18. века развијају се соларне пећи које су служиле за за топлење метала и биле у употреби широм Европе и Блиског истока. У 19. веку били су покушаји конверзије соларне енергије у друге облике на основу генерације нископритисне паре која се користила за рад парних машина. Почетком 20. века

---

долази до интензивније примене соларне енергије у разновразне сврхе које су се углавном сводиле на загревање воде помоћу уређаја који су представљали неки вид соларних колектора. Средином 1940-их година дошло се на идеју да се врши загревање воде и она даље транспортује кроз већ инсталирани систем радијатора. Производња првих соларних грејача воде почела је раних 60-их година прошлог века и веома брзо се проширила у многе земље света [1].

Истовремено, 1954. године у *Bell* лабораторији у САД-у направљена је прва фотонапонска ћелија од кристалног силицијума, што представља зачетак развоја фотонапонске технологије – технологије која енергију сунчевог зрачења директно претвара у електричну енергију.

## 3.2 Соларни колектори

Соларни колектори су посебна врста размењивача топлоте који трансформишу соларну енергију у унутрашњу енергију радног флуида. То је уређај који апсорбује долазеће сунчево зрачење, претвара га у топлоту, и преноси ту топлоту на флуид (обично ваздух, вода или термичко уље) који тече кроз колектор. Овако трансформисана енергија може да се користи директно преко циркулационог флуида за грејање стамбеног простора или воде, или да се складишти па користи касније током ноћи и/или током облачних дана. Постоји више подела соларних колектора у зависности од аспекта посматрања, и она је дата у даљем тексту [21]. Према основној конструкцији постоје две врсте соларних колектора: равни соларни колектори и концентришући соларни колектори. Према покретљивости, соларни колектори се дела на: колекторе са непокретним панелом и колекторе са покретним панелом (који могу бити једноосни или двоосни). У системима за грејање санитарне топле воде најчешће се користе равни водени соларни колектори, који могу бити: незастакљени соларни колектори, застакљени соларни колектори, бојлерски соларни колектори и вакуумски соларни колектори.

У истраживањима датим у овој докторској дисертацији коришћен је модел равног застакљеног соларног колектора и једино овај модел колектора ће бити детаљније описан, док ће систем за грејање топле воде бити представљен накнадно кроз приказ математичког модела.

### 3.2.1 Равни застакљени соларни колектор

Равни застакљени колектори су најзаступљенији тип колектора у употреби. Углавном се користе за ниске температуре, до 100 °C, мада неки нови модели са вакуумом могу да постигну и веће вредности. Равни застакљени колектори који се данас користе су веома различитих дизајна, и праве се од различитих материјала. Намена им је углавном за грејање флуида као што су вода, вода са антифризом као адитивом, или ваздух. Њихов главни задатак је да прикупе што више сунчеве енергије. Колектори такође треба да имају дуг и ефикасан животни век, упркос неповољним ефектима УВ зрачења сунца, корозије и зачепљења (због киселости, алкалности или тврдоће у течностима за пренос топлоте), замрзавања воде или депозиције прашине или влаге на стаклу, и на крају лома стакла због термичког ширења, града, вандализма или других узрока. Ови узроци могу бити сведени на минимум употребом каљеног стакла.

Типичан равни застакљени соларни колектор је приказан Слици 3.1. Када сунчево зрачење пролази кроз транспарентни покривни слој и и долази до

затамњене површине апсорбера која има високу моћ апсорпције зрачења, велики део енергије се апсорбује и она се преноси на транспортни медијум који се креће кроз систем цеви, да би се даље користила или складиштила. Цеви су спојене у сабирну цев. Доња плоча апсорбера и странице кућишта су добро изоловане да би се што више смањили губици. Цеви кроз које се креће течност могу бити заварене за апсорбујућу плочу или могу бити саставни део плоче. Транспарентни покривни слој се користи за смањење губитака енергије при проласку сунчевих зрака кроз ваздушни слој до апсорбујуће плоче.

Равни колектори су обично фиксирани и не захтевају праћење Сунца. Оптимални угао нагиба колектора је једнак географској ширини локације са варијацијом угла 10-15<sup>0</sup> мање или више у зависности од начина примене [1].



Слика 3.1 - Пресек равног застакљеног колектора

**Застакљивање** - Стакло има широку примену за глазирање соларних колектора, јер може пропустити до 90% соларног зрачења. Застакљивање се обично остварује са једним или више слојева стакла или других дијатермичних материјала. У ову сврху могу да се користе и пластични филмови, с тим што је примена пластике ограничена у погледу температуре, због њених структурних и димензионалних промена. Антирефлектујући премази и површинска заштита такође значајно унапређују пренос топлоте. Ефекат прљавштине и прашине на колекторском стаклу је веома мали (они се сами чисте атмосферским падавинама) и обично одговара преносу 2-4 % од своје максималне вредности.

**Апсорбер или апсорпциона плоча** - је плоча на којој су цеви или канали којима се креће радни флуид. Плоче такође могу бити и интегрисане са цевима. Апсорпциона плоча апсорбује велики део зрачења које пролази кроз стакло. Апсорпциона моћ колектора зависи од природе и боја премаза и од угла нагиба. Обично се користи црна боја, али постоје и премази других боја који се користе из естетских разлога. Одговарајућим електролитичким или хемијским процесима, површине апсорбера се производе са високом моћи апсорпције соларног зрачења и ниском емисивношћу таласа дугих таласних дужина. Велики напредак последњих година се базира на примени вакуум технике за производњу апсорбера који се користе у ниско-температурним апликацијама. Њих карактеришу ниске цене и имају предност што мање загађују околинду од конвенционалних процеса. Најчешће коришћени материјали за апсорпционе плоче су бакар, алуминијум, и нерђајући челик. УВ отпорна пластика се користи за плоче за ниско-температурну примену.

**Цеви или канали** - воде или усмеравају радни флуид који са собом носи топлоту од улаза до излаза. Канали морају бити интегрисани са плочом или чврсто везани за њу.

**Заглавље** - омогућава проток и пражњење радног флуида.

**Изолација** - служи за смањење губитака топлоте са задње и бочне стране колектора.

**Кућиште** - обједињује све компоненте и штити их од прашине, влаге, и других спољашњих утицаја.

### 3.3 Фотонапонска технологија

Фотонапонска технологија представља обновљиву технологију која највише обећава у будућности јер почива на светски непресушном енергетском извору – Сунцу. Фотонапонски ефекат је први запазио француски физичар *Edmund Becquerel*, 1839. године, када је установио појаву наелектрисања при осветљавању две идентичне електроде од слабо проводљивих материјала.

Основу ФН технологије представљају ћелије које конвертују сунчево зрачење у електрицитет. Унутар сваке ћелије постоје слојеви полупроводничког материјала. Светлост која падне на површину ћелије ствара електрично поље између слојева и изазива проток електрицитета. Количину електрицитета који генерише ћелија одређује интензитет светла. Спајањем ФН ћелија добијају се модули а повезивањем фотонапонских модула настају фотонапонски системи.

#### 3.3.1 Развој соларних ћелија

Прве соларне ћелије су развијане 1950.-их година за потребе свемирске индустрије, и то су биле силицијумске соларне ћелије са ефикасношћу 6 – 10 %. Енергетска криза седамдесетих година прошлог века стимулисала је истраживања и развој ФН технологије. Силицијум је водећи материјал у технологији фотонапонских соларних ћелија због своје високе ефикасности. Истраживање соларних ћелија базираних на полупроводницима (III-V и II-VI групе) је почело 1960. године.

Силицијумска технологија је доминантна у фотонапонским ћелијама. Силицијум је најпознатији полупроводнички елемент (други хемијски елемент по распрострањености у природи), који има најзначајнију улогу у изради и развоју соларних ћелија. То је материјал чија се специфична отпорност налази између специфичних отпорности проводника и изолатора. Атоми силицијума су правилно распоређени у простору тако да формирају кристалну решетку. Електрична проводност чистих полупроводника јако је мала. Због тога се у практичним применама они користе са додацима других елемената, чиме се побољшавају њихове особине. Ако се силицијуму дода мала количина фосфора, добија се полупроводник *n* типа. Додавањем бора чистом силицијуму добија се кристална структура која се назива полупроводник *p* типа. Код *n* типа полупроводника главни носиоци наелектрисања су слободни електрони, док су то код *p* типа полупроводника шупљине. Спајањем *p* и *n* типа полупроводника технолошким поступком, формира се *p - n* полупроводнички спој. Просечна дебљина силицијумске соларне ћелије износи 300  $\mu\text{m}$ , а негативни *n* слој има дебљину само 2  $\mu\text{m}$ . Класична силицијумска ФН ћелија има димензије 10x10 cm, а радни напон је око 0,5 V. Ове ћелије се редно повезују у соларне модуле да би се добио радни напон 12 V. Даље се модули паралелно повезују и добијају се ФН панели. ФН ћелија даје једносмерну струју (DC) која се инвертером преводи у наизменичну струју одговарајућих карактеристика (AC) [23].

Постоје три основне врсте соларних ћелија од кристалног силицијума: монокристалне силицијумске ћелије, поликристалне силицијумске ћелије и ћелије од аморфног силицијума, а такође се развијају и хибридне соларне ћелије. У поређењу са свим осталим соларним ћелијама, ћелије од кристалног силицијума имају највећу ефикасност [24]. За монокристалне силицијумске соларне ћелије (mc-Si) користе се бором допирани монокристални вафери (око 400  $\mu\text{m}$  дебљине) добијени у CZ процесу тј. процесу Чохралског (Czochralski). Ово је стандардни процес који се користи за потребе микроелектронике [25]. Поликристални силицијум је веома погодан материјал за развој фотонапонских модула, међутим у поређењу са монокристалним силицијумским соларним ћелијама, ћелије од поликристалног силицијума имају мању ефикасност [26]. Полисилицијумске ћелије (pc-Si) се производе топљењем силицијума и његовим причвршћивањем да би се кристали оријентисали у фиксном смеру, градећи правоугаоник од поликристалног силицијума који се сече на веома танке листове – вафере. Произведена је pc-Si ћелија са текстуром ефикасности чак 19,8 %, а комерцијалне pc-Si ћелије имају ефикасност од 12 - 15 % [27]. Аморфни силицијум је некристални облик силицијума дезоријентисане структуре и има 40 пута већу стопу апсорпције светлости у односу на монокристални силицијум [28]. То је најпопуларнија танкослојна технологија са ефикасношћу ћелија 5-10 %. Хибридне соларне ћелије се добијају комбиновањем кристалног силицијума са некристалним силицијумом [27].

Касније су установљене нове не-силицијумске технологије фотонапонских ћелија, засноване на примени кадмијум-телурида и кадмијум-сулфида (CdTe и CdS), бакар-индијум-галијум-селенида/бакар-индијум-селенида (CIGS/CIS) и ћелија са фото-осетљивим пигментима (DSSC). Тако су прво развијане соларне ћелије на бази кадмијум-телурида (CdTe) које имају већи коефицијент апсорпције и већу ефикасност, чак преко 15 %. Ова врста соларних ћелија је у употреби од 1970. године, и у поређењу са претходно наведеним врстама јефтинија је. Лабораторијске CdTe ћелије имају ефикасност од 16%, за разлику од комерцијалних чија је ефикасност око 8% [29]. Галијум-арсенид (GaAs) је полупроводничка форма галијума и арсена која има сличну структуру као силицијум. У поређењу са силиконским ћелијама, галијум-арсенид соларне ћелије имају већу ефикасност и мању дебљину. Ове ћелије имају велику топлотну отпорност. Поред тога, GaAs је лакши у односу на поликристални и монокристални силицијум. Међутим производња GaAs материјала за соларне ћелије може бити прилично скупа [27]. CIGS/CIS соларне ћелије су још увек у развојној фази. Њихова модулска ефикасност је 13 %, док је ћелијска ефикасност 20 % [27]. Због повећања ефикасности, смањења трошкова производње и побољшања заштите животне средине, истраживачи су дошли до идеје да се произведе нови тип соларних ћелија под називом ћелија са фото-осетљивим пигментима (DSSC). Ћелије са фото-осетљивим пигментима (DSSC) су интензивно проучаване услед добре ефикасности (чак и до 11 %), једноставне технологије израде и потенцијално ниске цене [30].

Са потрагом за материјалом којим би се побољшале карактеристике соларних ћелија, развијене су нове фотонапонске технологије - технологије "треће генерације ФН ћелија". Овим технологијама је повећана ефикасност конверзије код соларних ћелија. Наноцеви (Nanotubes-CNT), квантне тачке (quantum dots - QDs) и HC (hot carrier) соларне ћелије су три врсте најновијих и најсавременијих технологија у производњи ФН ћелија. Предности коришћења ових технологија су: (1) побољшање механичких карактеристика материјала, (2) ниска цена, (3) мала маса и (4) добре електричне перформансе [31].



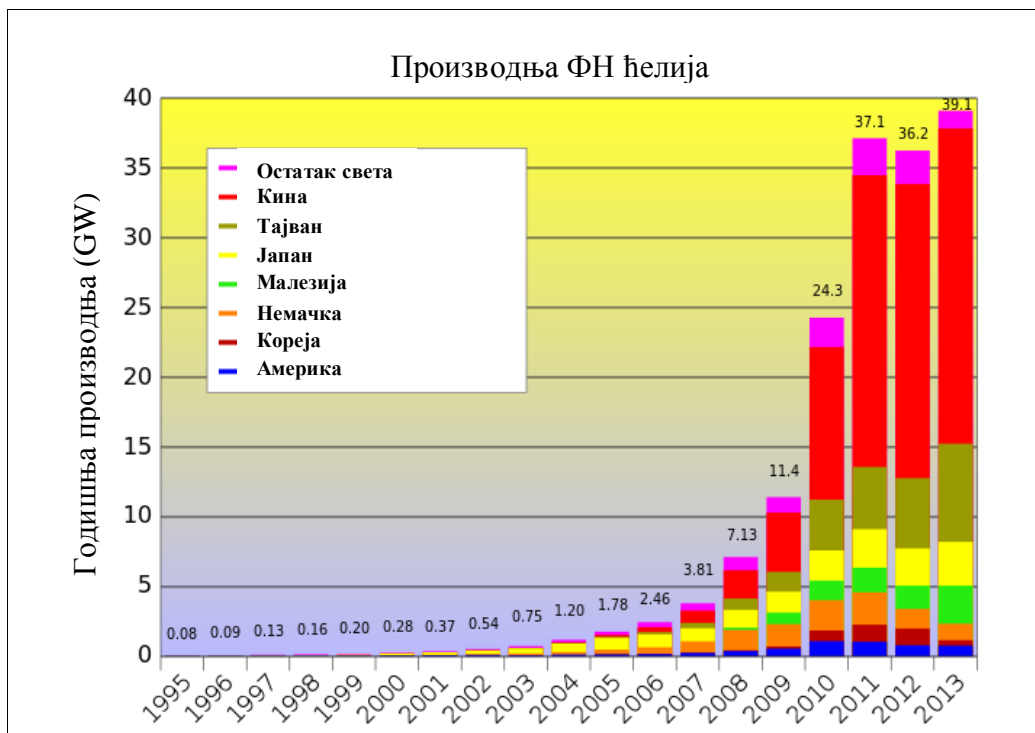
### 3.3.2 Ефикасност соларних ћелија

Ефикасност соларних ћелија је један од важних параметара који има за циљ да одржи ову технологију на тржишту. Задњих година се спроводи обиман истраживачки рад за побољшање ефикасности соларних ћелија за комерцијалну употребу. Познато је да на ефикасност соларних ћелија утиче више фактора, од којих су главни (1) температура соларне ћелије, (2) ефекат прашине на соларним ћелијама, (3) утицај влажности на соларне ћелије.

Ефикасност монокристалних силицијумских соларних ћелија показује значајан напредак из године у годину. Ефикасност је са 6 % у 1950.-им повећана на 17% у 1970.-им и до данас је континуирано повећавала вредност, чак до 28 % у лабораторијским условима. Монокристалне соларне ћелије су достигле ћелијску ефикасност од 20,3 %, а танкофилмне технологије ефикасност од 19,9 % у 2010. години. Поликристална соларна ћелија је постигла ефикасност 19,8 % до данас, али ефикасност поликристалног силицијума у комерцијалним сврхама је између 12 % и 15%. Највећу ефикасност од свих соларних ћелија данас, има GaAs соларна ћелија – чак до 40,7 % (остварена 2010. год. у лабораторијским условима). Ћелије са фото-осетљивим пигментима (DSSC) и даље имају ниску ефикасност, максимално 5 % [27].

### 3.3.3 ФН технологија на светском тржишту

Од 1990. год. ФН индустрија показује константни годишњи раст од преко 20%, а од 1997. преко 33 %. У 2000. години укупни инсталирани светски капацитети премашују 1 GW, а у развијеним земљама број домаћинстава које користе електричну енергију добијену фотонапонском конверзијом премашује цифру од милион корисника. Фотонапонска технологија је данас технологија са највећим годишњим растом, преко 40%, у поређењу са свим до сада развијеним технологијама [25].



Слика 3.2 – Годишња производња фотонапонских система у свету

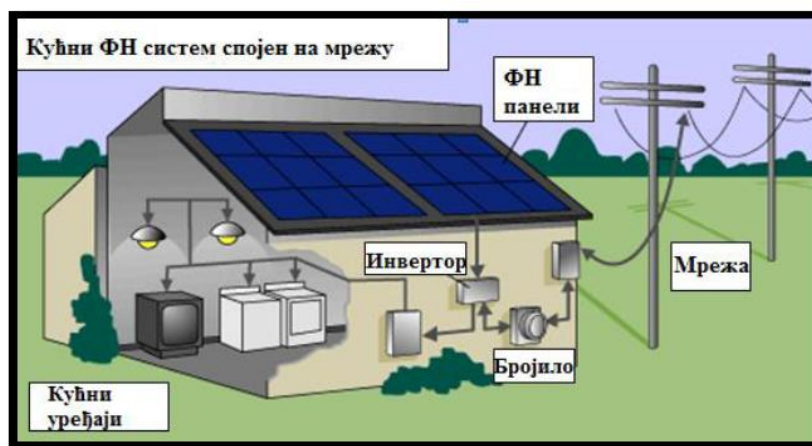
Примена ФН система је прогресивна и ова технологија своја највећа тржишта има углавном у САД, Јапану, Европској унији (највише Немачка) и Кини. Годишња производња ФН модула у САД, Јапану, Европској унији и Кини у 2009. год. је била 595MW, 1,5 GW, 1,93 GW, и 5,19 GW, респективно [2]. 2010. год. укупни инсталирани светски капацитети су били преко 24 GW, а током 2015. очекује се ниво од скоро 40 GW (Слика 3.2). Како је очекивана и несташица силицијума на светском тржишту, неопходно је брзо продирање друге генерације - танкослојних ФН соларних ћелија на светско тржиште. Цене ФН модула имају сталну тенденцију опадања и тренутно су око и испод 2 US\$/Wp за панеле, у зависности од технологије и величине [32].

### 3.3.4 Фотонапонски системи

Постоје два основна типа примене фотонапонских система: самостални и мрежно повезани ФН системи.

Самостални ФН системи се користе у областима које нису лако доступне, или немају приступ мрежи електричне енергије. Самостални систем је независан од електричне мреже, при чему се произведена енергија обично складишти у батеријама. Типичан самостални систем би се састојао од једног или више ФН модула, батерије и контроле пуњења. Инвертор може бити укључен у систем и служи за конвертовање једносмерне у наизменичну струју коју користе апарати за свој рад.

Код мрежно повезаних ФН система (Слика 3.3), системи фотонапонских модула су повезани на локалну мрежу електричне енергије. То значи да током дана, електрична енергија коју генерише ФН систем може одмах да се користи, или може бити продата електро-мрежи као вишак (што је случај код домаћих-кућних система где људи током дана не бораве у објектима становања). У вечерњим сатима, када соларни систем није у могућности да обезбеди целокупну потребну количину електричне енергије, она може да се "врати" из мреже. У ствари, мрежа се понаша као енергетски систем за складиштење, што значи да ФН систем не треба да укључује батерије за складиштење електричне енергије.



Слика 3.3 – Мрежно повезан фотонапонски систем

ФН системи повезани са електро мрежом представљају начин децентрализације електричне мреже. Електрична енергија се овим путем генерише ближе локацијама на којима постоји потражња, а не само у термоелектранама, нуклеарним електранама и у хидроелектранама. Током времена ови системи ће смањити потребу за повећањем капацитета преносних и дистрибутивних водова електро-мреже.

## 4. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

---

У поглављу о нултим зградама је дат развој самог концепта дефиниције зграде нулте-потрошње енергије и зграде нето-нулте енергетске потрошње. Током последњих петнаестак година интензивирани су истраживања у овој области. Унапређивани су постојећи концепти и допуњавани новим параметрима битним за енергетско билансирање зграда. Због глобалних проблема велике енергетске потрошње, постало је неопходно коришћење различитих обновљивих извора енергије. Овде су нарочито значајни фотонапонски системи, јер могу да генеришу електричну енергију којом потпуно или делимично задовољавају енергетске потребе зграде. Такође су битни и соларни колектори којима вода може да се греје за санитарну употребу и за грејање. Услед знатног загађења животне средине, постала је значајна и еколошка анализа која узима у обзир и емитовану и уграђену количину угљен-диоксида. Све ово је довело до интензивирања истраживања везаних за достизање концепта зграда нето-позитивне енергије помоћу система за генерисање енергије из различитих обновљивих извора.

*Norton* је у свом раду [33] дао резултате истраживања везане за постизање концепта зграда нето-нулте потрошње енергије у условима хладне климе у Колораду. Анализирана зграда је имала фотонапонски систем за генерисање електричне енергије, али је користила фосилна горива за грејање. *Citherlet* је у свом раду [34] дао енергетску и еколошку анализу и поређење три породичне куће у Швајцарској. Једна је била стандардног типа, друга је била смањене потрошње енергије, а трећа је користила обновљиве изворе енергије и уједно показала најбоље енергетске и еколошке перформансе. *Athienitis* је анализирао дизајн канадске соларне куће са фотонапонским панелима уграђеним у фасаду [35].

*Chel* и *Tiwari* су прорачунавали топлотне перформансе и уграђену енергију зелене нулте зграде – зграде од блата, као пример енергетски ефикасне и еколошке куће у којој се постиже природни термички комфор [36]. Кућа се налазила у руралном подручју Индије, где сиромашно становништво себи не може да приушти клима-уређаје лети или грејаче ваздуха који су потребни током зиме. *Llovera* је са групом аутора разматрао дизајн и перформансе енергетски ефикасне соларне породичне зграде у Андори са инсталираним соларним системима [37]. *Aste* је са групом аутора радио на енергетској анализи зграде мале потрошње енергије у Италији. Акцент истраживања је био на уграђеној енергији омотача зграде [38].

*Janne*, *Genku* и остали су у раду [39] разматрали примену фотонапонских система код кућа у нордијским условима – у Финској. Група кинеских аутора је анализирао примену фотонапонских и фотонапонских-термалних система у

зградама у Кини, као и генерисање енергије преко поменутих система [40]. Иранска група аутора је у свом раду [41] приказала примену соларних и вакумских колектора и Тромбеових зидова у нето-нултим енергетским зградама у Техерану. *Palzer* и *Henning* у својим радовима [42] и [43] дају преглед методологије прорачуна и резултате енергетске анализе немачких кућа на обалама Северног и Балтичког мора. Ове куће су користиле енергију ветра и имале инсталиране фотонапонске системе, а оптимизована је њихова укупна потрошња енергије.

У светској литератури има много више научних радова чије су теме примена соларних колектора и системи за грејање санитарне воде. То је и разумно, јер је примена ових уређаја и система почела пре примене ФН технологија. Свакако најпрегледнији и најобимнији рад из области примене соларних колектора је рад *Kalogirou*-а из 2004 год. [1] у коме су детаљно описане врсте колектора и њихова примена. *Leckner* и *Zmeureanu* у свом раду [44] анализирају животни циклус канадске зграде са соларним колекторима који су се користили за грејање топле воде, истовремено грејање простора и топле воде, као и за грејање базена. Посебан осврт је дат на уграђену енергију система за грејање воде. *Zhang* и *Gudmundsson* су поредили карактеристике кинеских и данских система за грејање топле воде [45] и поредили утрошак енергије када се топла вода користи и у системима грејања.

*Kaldellis* је са групом аутора вршио анализу енергетске добити и анализу осетљивости система за грејање санитарне воде у Грчкој [46]. Грчка је специфичан регион јер соларна енергија може да се користи и у зимском периоду, па је годишња уштеда енергије веома велика. Група шпанских аутора је разматрала оптималну величину бојлера у системима за грејање санитарне воде [47]. Шпанија је земља у којој је употреба оваквих система веома исплатива. *Comodi* је са групом аутора [48] поредио перформансе два система за грејање воде у домаћинствима која су имала различите типове колектора: застакљени и незастакљени. У оквиру рада је дата енергетска и еколошка анализа ових система. *O'Hegarty* је у свом раду [49] приказао поступак одређивања оптималне величине система за грејање воде у Великој Британији и Ирској примењен у ниско-енергетским зградама, како за грејање санитарне воде тако и за грејање простора. *Asaee* је разматрао примену соларних комбинованих система за грејање, хлађење и грејање воде у нултим-енергетским зградама [50]. Анализирана је потребна величина система соларних колектора и потребна запремина централног бојлера у систему, у циљу већег енергетског искоришћења.

Када је у питању истовремена примена фотонапонских система и соларних колектора, постоји више научних радова. *Biaou* и *Bernier* су дали резултате својих истраживања код зграде нулте-потрошње енергије у Канади [51]. Зграда је комплетне потребе за санитарном топлим водом подмиривала са сопственим системом соларних колектора, док је део енергетских потреба покривала генерисаном електричном енергијом из фотонапонског система. *Leckner* и *Zmeureanu* су анализирали зграду нето-нулте енергетске потрошње у Канади, која је имала фотонапонски систем и соларне колекторе [52]. Аутори су извршили енергетску анализу узимајући у обзир и уграђене енергије инсталираних система. Зграде нулте потрошње енергије у Јапану је анализирао *Hamada* са групом аутора [53]. У зградама је била примењена обновљива енергија и оне су задовољавале све критеријуме доброг енергетског дизајна: биле су добро изоловане и добро заптивене, имале су директне соларне добитке, уграђену топлотну пумпу, фотонапонски систем, соларне колекторе које су користиле за грејање топле воде и за грејање простора, а користиле су и снагу ветра. Овако дизајнирана кућа је 80 % својих енергетских

потреба покривала преко ФН система, соларних колектора и уз помоћ топлотне пумпе. *Gallo* је са групом аутора [54] дао енергетски биланс мрежно повезане зграде у Шпанији. Разматрали су енергетске потребе зграде са системом ФН панела и соларних колектора у различитим климатским подручјима.

Осим развоја зграда нето-нулте потрошње енергије, са инсталираним системима за генерисање енергије из обновљивих извора, постоје и примери зграда нето-позитивне потрошње енергије који су развијени у Француској, а дизајнирала их је париска фирма *Vouygues Immobilier* [55, 56].

Више аутора је кроз научне радове дало преглед својих истраживања везаних за анализу различитих грејних система у зградама нето-нулте потрошње енергије и ниско-енергетске потрошње. Овде ће се издвојити само нека од њих.

*Gustavsson* је у свом раду [57] разматрао различите видове грејања и њихову примену дискутовао на примеру осмоспратне апартманске зграде са омотачем од дрвета. Дао је резултате укупне уграђене енергије током животног циклуса за целокупну зграду и њене системе, као и емисију CO<sub>2</sub>. Оваква зграда је еколошки и енергетски оправдана. *Sanaye* је разматрао различите врсте топлотних пумпи за грејање породичних и пословних зграда у различитим подручјима Ирана [58]. *Kroetz* и *Friedland* су анализирали различиту употребу горива за системе грејања у кућама на северу Нове Енглеске [59] и поредили их са ценама и емисијом штетних гасова у будућности. *Tolga Balta, Dincer* и *Hepbasli* су дали преглед перформанси и примену различитих извора обновљивих енергија у неколико система КГХ [60]. *Shah* је дао оцену животног циклуса са уграђеним енергијама и израчунао емисијом штетних гасова за неколико различитих система за грејање и хлађење, примењених у четири истраживана региона у САД [61]. *Jenkins* [62] је разматрао примену топлотних пумпи уместо постојећих котлова и система за климатизацију, и анализирао енергетске билансе. *Thyholt* је прорачуном показао да емисија угљен-диоксида у систему даљинског грејања може бити нижа у поређењу са емисијом код електричног грејања [63]. *Paradopoulos* у свом раду [64] даје емпиријске резултате енергетских, економских и еколошких перформанси грејних система који се примењују у зградама у Грчкој: систем са гасним котлом, систем са топлотном пумпом и систем са нафтним котлом. *Бојић* је у свом раду [65] дао енергетску и еколошку анализу система даљинског и система електричног грејања у пословној згради.

На основу претходно наведене литературе, може се закључити да се велики број аутора бавио анализом потрошње енергије у зградама и применом различитих врста обновљивих извора енергије, све у циљу остваривања концепта нето-нулте или нето-позитивне потрошње енергије. Најчешће примењени системи за генерисање енергије су управо фотонапонски систем за добијање електричне енергије и систем соларних колектора за грејање топле воде у домаћинству.

Међутим, нико се до сада није бавио одређивањем оптималних односа површина ових система при којима би се генерисала највећа могућа количина енергије и на тај начин остварила највећа уштеда примарне енергије. Зато се и наметнула потреба за истраживањем, које би осим поменутих система за генерисање енергије обухватило и различите грејне системе као највеће потрошаче енергије у зградама.

Идеја је остварена кроз ову докторску дисертацију, у оквиру које су поред фотонапонских система и соларних колектора разматрана три најзаступљенија система грејања у Србији: даљинско, електрично и гасно грејање.

## 5. СИМУЛАЦИОНИ СОФТВЕРИ

---

За симулацију и оптимизацију моделиране зграде са инсталираним системима за генерисање енергије, у овом раду су коришћена три софтверска пакета. *EnergyPlus* софтвер је коришћен за симулације (верзија 7.0.0), *OpenStudio plug-in* у оквиру *Google SketchUp*-а за виртуелни дизајн зграде и *GenOpt* софтвер са *Hooke-Jeeves* алгоритмом за оптимизацију.

### 5.1 Симулациони софтвер *Energy Plus*

Развој софтвера *EnergyPlus* је започео 1996. године, а заснован је на основама два програма: DOE-2 и BLAST који су у то време били у широкој примени. BLAST (скраћеница од енгл. Building Loads Analysis and System Thermodynamics - Анализа оптерећења и термодинамичких система зграде) и DOE-2 су развијани и коришћени касних 1970-их и раних 1980-их година као алати за симулацију енергетских оптерећења зграда [66]. Овај софтвер је развијан у Lawrence Berkley лабораторији у САД а користили су га инжењери пројектанти и архитекте да би правилно дизајнирали опрему за грејање, климатизацију и вентилацију (ГКВ, енгл. HVAC), за израду студија животног циклуса зграда, оптимизацију енергетских перформанси итд. Након енергетске кризе раних седамдесетих година прошлог века, и препознавања зграде као главног потрошача енергије у америчком друштву, почело се са решавањем наведених проблема коришћењем BLAST и DOE-2 програма, са два потпуно различита аспекта. Оба програма су имала своје предности али и недостатке.

Затим је, препознајући добре стране оба програма, уследио развој јединственог програмског решења и тако настаје *EnergyPlus*. Попут својих матичних програма, и *EnergyPlus* представља програм за енергетску анализу и симулацију топлотног оптерећења зграда, тј. за симулацију енергетског понашања зграда као и симулацију употребе обновљивих извора енергије у зградама. На основу описа зграде од стране корисника са аспекта физике, примењених механичких система итд. *EnergyPlus* израчунава потребе за грејањем и потребе за хлађењем неопходне за одржавање и контролу жељене температуре, омогућава правилно пројектовање система за ГКВ, одређује потрошњу примарне енергије, и у стању је да симулира бројна друга енергетска понашања зграде, у складу са понашањем у реалном окружењу, тј. у реалним експлоатационим условима.

Програм *EnergyPlus* је скуп бројних програмских модула који раде заједно, у циљу израчунавања енергетских потреба зграде, користећи при томе различите системе и енергетске изворе. То се постиже симулацијама понашања зграде и пратећих енергетских система када су они изложени различитим еколошким и радним условима. Основа симулације је модел зграде заснован на основним принципима топлотног биланса [67].

Ниједан програм није у могућности да сам изврши сваку могућу симулацију реалних ситуација. Тако и *EnergyPlus* даје могућност пројектовања система за грејање, хлађење и климатизацију директно или индиректно кроз линкове ка другим програмима, а све у циљу прорачуна топлотног оптерећења и/или потрошње енергије током једног дана или знатно дужих периода (и до једне године).

Прве верзије програма су садржале карактеристике везане само за топлотни биланс зграде. Наредне верзије су се развијале узимајући у обзир све савремене системе који могу бити инсталирани у зградама, попут електричних система, система за грејање топле воде помоћу соларних колектора, уградња ФН панела, вентилационих система, различитих система грејања и бројних других [68].

Остале карактеристике симулација софтвером *EnergyPlus* су: временски кораци који се могу мењати, модулари системи које може да конфигурише сам корисник, као и улазне и излазне структуре података које такође дефинише корисник програма.

Валидност софтвера је испитивана више пута, нарочито су поређени добијени резултати са поставкама ASHRAE стандарда. Свакако најбитнија потврда валидности је добијена на тестовима који су вршени по процедурама IEA HVAC BESTTEST E100-E200 [69].

*EnergyPlus* користи податке о времену за локацију зграде која се симулира. Временски подаци постоје за преко 2 000 локација, и смештени су у посебним датотекама које *EnergyPlus* аутоматски читава.

## 5.2 *Google SketchUp* софтвер са *Open Studio* додатком

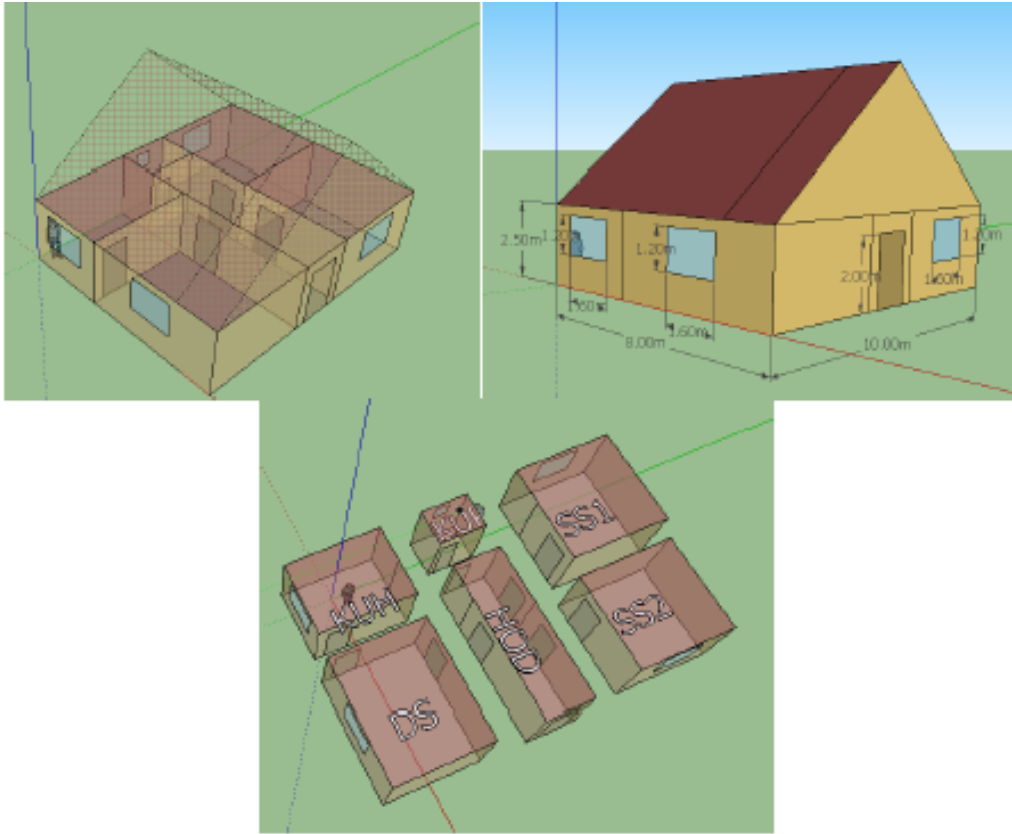
*SketchUp* је бесплатан 3Д софтверски алат који се користи за виртуелно дизајнирање стамбених објеката. Он комбинује сет сопствених алата са системом интелигентног дизајна [70]. Развила га је компанија *Last Software Boulder* из Колорада, САД, током 2000. године, а његови корисници су архитекте, дизајнери, градитељи, произвођачи и инжењери – другим речима људи који обликују физички свет.

Софтвер омогућава постављање модела зграде помоћу система реалних координата, омогућава површинске приказе и подржава постављање модела у *GoogleEarth* апликацији. Доступан је за бесплатно коришћење и веома лак за употребу. Постоје десетине видео туторијала као и опсежни помоћни центар (*Help Centre*) за заједницу корисника широм света.

*OpenStudio* је додаток софтверском пакету *GoogleSketchUp* којим се симулација енергетског понашања зграде у *EnergyPlus*-у повезује са 3Д окружењем *GoogleSketchUp*-а.

Овај софтвер дозвољава кориснику да креира улазни фајл *EnergyPlus*-а преко стандардних алата *SketchUp*-а, додајући при томе што више детаља и информација потребних за конструкцију зона и површина зграде. Он омогућава једноставно

креирање геометрије зграде од самог почетка: формирање зона (просторија), конструкција зидова кроз које се врши пренос топлоте, цртање прозора и врата, цртање засенчених површина итд. Корисници програма могу сачувати све информације у улазној датотеци *EnergyPlus*-а. У жељеном тренутку може се покренути симулација креиране зграде у *EnergyPlus*-у и кроз добијене резултате симулације уочити евентуалне грешке и пропусти у дизајну.



Слика 5.1 – 3Д модел неког стамбеног објекта у *GoogleSketchUp*-у

### 5.3 *GenOpt* софтвер

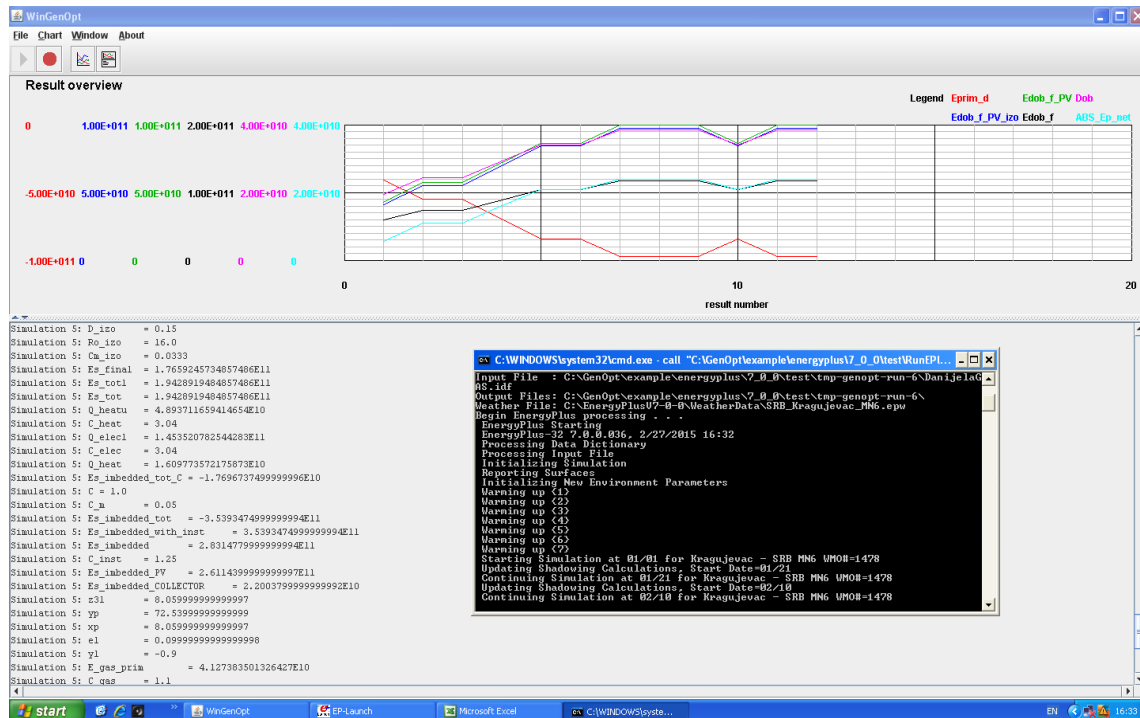
*GenOpt* је оптимизациони програм који минимизује функцију циља постављену од стране неког другог симулационог програма [71]. Он служи за оптимизацију проблема код којих је израчунавање функције циља комплексно у рачунском смислу, и где излазни резултати чак и не постоје увек.

*GenOpt* може да буде повезан са било којим симулационим програмом који читава улазне податке из текстуалних датотека а израчунате излазне податке записује такође у текстуалне датотеке. Независно променљиве могу да буду континуално променљиве, дискретне променљиве, или и континуалне и дискретне променљиве. Ограничења на зависно променљиве величине се спроводи преко граничних функција. Слика 5.2 приказује радно окружење програма *GenOpt*.

*GenOpt* је написан у програму *Java*, тако да је независан што се тиче платформе, па је применљив на широк спектар оптимизационих проблема. *GenOpt* користи паралелно процесирање и није дизајниран за линеарне и квадратне проблеме.



*GenOpt* има сопствену библиотеку са локалним и глобалним једно-димензионим и више-димензионим оптимizacionим алгоритмима. Један од тих алгоритама је и *Hooke-Jeeves* алгоритам који је коришћен у овим истраживањима.



Слика 5.2 – Радно окружење програма *GenOpt* са симулацијом у току

## 5.4 *Hooke-Jeeves* алгоритам

*Hooke-Jeeves* алгоритам се користи за процес оптимизације и представља оптимizacionи алгоритам без извода и са директном претрагом који је прилагодљиво прецизан [72, 73, 74]. У *Hooke-Jeeves* алгоритму само функције циља и ограничене вредности се користе да воде стратегију претраживања.

У односу на фиксно прецизан *Hooke-Jeeves* алгоритам, прилагодљиво прецизан *Hooke-Jeeves* алгоритам садржи у себи тест који контролише прецизност у процесу апроксимативног приближења функцији циља. Овај тест наводи оптимizacionи алгоритам да користи грубе апроксимације за достизање функције циља у раним итерацијама, и доста прогресивно повећава прецизност апроксимације функције циља што је секвенца итерације приближнија стационарној тачки.

Још једна разлика између адаптивних *Hooke-Jeeves* алгоритама и фиксно прецизних *Hooke-Jeeves* алгоритама је да се адаптивни алгоритам може параметризовати тако да овај алгоритам прихвата само итерације које довољно смањују функцију циља. Главна предност адаптивне прецизности је смањивање времена израчунавања.

## 6. РАЗВИЈЕНИ МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛИ

У овом поглављу су приказани развијени математички модели у софтверу *EnergyPlus* за инсталиране системе на породичној згради помоћу којих се генерише енергија. Најпре је дат модел небеског соларног зрачења које пада на нагнуте површине. Овај модел је основа прорачуна соларне енергије која долази до површина ФН панела, односно соларних колектора. Затим су представљени математички модели фотонапонског система за генерисање електричне енергије који је повезан на електро-дистрибутивну мрежу, а онда и математички модел система за грејање санитарне воде у домаћинству уз помоћ соларних колектора (са одговарајућом инсталацијом).

### 6.1 Модел соларног зрачења

#### 6.1.1 Израчунавање соларног зрачења

Постоји више модела за израчунавање соларног зрачења у *EnergyPlus*-у. Основни је ASHRAE соларни модел, који је развило Америчко друштво за грејање, климатизацију и соларну енергију 2005. год., а допуњен је 2009. године [68]. Допуњени модел се зове још и Тау модел и може током сваког сата да предвиди соларно зрачење на 5564 локација на читавој Земљиној кугли.

Директно и дифузно зрачење у овом моделу се израчунавају узимајући у обзир релативни оптички коефицијент масе ваздуха  $m$ :

$$m = 1 / [\sin \beta + 0,50572(6,07995 + \beta)^{-1,6364}] \quad (1)$$

где је  $\beta$  – соларна алтитуда (rad).

Директно и дифузно зрачење су дати следећим релацијама:

$$I = I_0 \exp[-\tau_b m^{ab}] \quad (2)$$

$$I_d = I_0 \exp[-\tau_d m^{ad}] \quad (3)$$

где је:

$I$  – директно соларно зрачење ( $W/m^2$ );

$I_d$  – дифузно хоризонтално зрачење ( $W/m^2$ );

$I_0$  – екстратерестријално зрачење ( $W/m^2$ );

$\tau_b$  и  $\tau_d$  – директна и дифузна оптичка константа (-);

$ab$  и  $ad$  – директни и дифузни масени експоненти (-).

Директна и дифузна оптичка константа су подаци који се налазе у ASHRAE климатским подацима, док се масени експоненти рачунају на следећи начин:

$$ab = 1,219 - 0,043\tau_b - 0,151\tau_d - 0,204\tau_b\tau_d \quad (4)$$

$$ad = 0,202 + 0,852\tau_b - 0,007\tau_d - 0,357\tau_b\tau_d \quad (5)$$

### 6.1.2 Израчунавање небеског соларног зрачења које пада на нагнуте површине

Као што је познато, интензитет зрачења на неку површину зависи од косинуса упадног угла зрака (угао између зрака и нормале површине), па је веома значајно како је посматрана површина оријентисана и нагнута у простору [22]. Положај фотонапонских система и соларних колектора на згради се дефинише у улазној датотеци *EnergyPlus*-а где се дефинишу типови конструкција. У овом случају они су постављени на крову зграде, тако да је у потпуности описана њихова оријентација и тако омогућен квалитетан прорачун соларног зрачења на основу модела који је уграђен у *EnergyPlus*.

Модел расподеле соларног зрачења је базиран на емпиријском моделу који је описао *Perez* са групом аутора 1990. године, а који је урађен на основу серије мерења небеских зрачења. Модул небеског соларног зрачења које пада на нагнуте површине детаљно је описан у [68], а његова основна поставка је да се укупно зрачење које пада на неку површину састоји од директног, дифузног и рефлектованог зрачења.

Соларно зрачење се израчунава узимајући у обзир ефекте засенчења и рефлексије од других површина (ако постоје) који су такође дефинисани у улазној датотеци. На овај начин се добија велики број различитих излазних података, али као излазна величина везана за сам фотонапонски систем не добија се напон, већ само снага, тј. енергија соларног зрачења.

Укупно соларно зрачење које пада на нагнуте површине  $I_{sol}$  састоји се из 3 компоненте:

$$I_{sol} = I_{ref} + I_{dif} + I_{dir} \quad (6)$$

где се прва компонента  $I_{ref}$  односи на зрачење које пада на нагнуту површину са хоризонта, тј. рефлектовано зрачење, и оно износи

$$I_{ref} = I_h F_2 \sin S, \quad (7)$$

друга компонента једначине (6)  $I_{dif}$  се односи на зрачење које пада на нагнуту површину са небеског свода, дифузно зрачење, које износи

$$I_{dif} = I_h (1 - F_1)(1 + \cos S) / 2, \quad (8)$$

док се трећа компонента једначине (6)  $I_{dir}$  односи на зрачење које пада на нагнуту површину из центра Сунца, директно зрачење, и које износи

$$I_{dir} = I_h F_1 \frac{a}{b} \quad (9)$$

У једначинама (2), (3) и (4) фигуришу величине:

$I_h$  – хоризонтално соларно зрачење ( $W/m^2$ );

$S$  – нагиб посматране површине у односу на хоризонталу (rad);

$a$  –  $\max(0, \cos \alpha)$ ;

$b$  –  $\max(0, 0,87, \cos Z)$ ;

$F_1$  – директни коефицијент осветљености (-);

$F_2$  – рефлективни коефицијент осветљености (-);

$\alpha$  – упадни угао;

$Z$  – зенитни угао Сунца (rad).

Коефицијенти осветљености  $F_1$  и  $F_2$  су функције параметара који су одређени небеским условима и дати су следећим релацијама:

$$F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon)\Delta + F_{13}(\varepsilon)Z \quad (10)$$

$$F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon)\Delta + F_{23}(\varepsilon)Z \quad (11)$$

Величина  $\Delta$  у горњим једначинама представља коефицијент осветљености неба:

$$\Delta = I_h m / I_0 \quad (12)$$

где је:

$I_0$  – екстатерстријално зрачење или соларна константа ( $1353 W/m^2$  – средња годишња вредност);

$m$  – релативни оптички коефицијент масе ваздуха(-);

$\varepsilon$  – коефицијент прозирности неба (-) који се израчунава према обрасцу:

$$\varepsilon = \frac{(I + I_h) / I_h + \kappa Z^3}{1 + \kappa Z^3} \quad (13)$$

где је:

$I$  – директно нормално соларно зрачење ( $W/m^2$ );

$\kappa = 1,041$  за  $Z$  (rad);

$F_{ij}$  – коефицијенти који су уграђени у датотеке *EnergyPlus*-а.

## 6.2 Математички модел фотонапонског система

Софтверски пакет *EnergyPlus* има различите опције за прорачун количине електричне енергије која се генерише фотонапонским системима. Три различита типа ФН модула су уграђена у сам софтвер и то “Simple”, “Equivalent One-Diode” и “Sandia” модел. Избор модела одређује и математички модел који се користи за одређивање количине генерисане електричне енергије.

У истраживањима приказаним у овој докторској дисертацији коришћен је “Simple” модел фотонапонских панела који омогућава кориснику програма да сам мења хелијску ефикасност.

Центар електричног оптерећења (Electric Load Center) је објекат који се користи за моделирање целокупног фотонапонског система. Он управља радом ФН система и даје податке о количини произведене и испоручене електричне енергије, као и о вишку електричне енергије који се продаје електро-мрежи.

Помоћу инвертора или претварача, једносмерна струја се претвара у наизменичну струју. Произведена електрична енергија се мери на излазу инвертора.

Целокупни систем може да садржи и трансформаторе који служе да трансформишу електричну енергију једног напона у електричну енергију другог напона (уколико је то потребно).

Претпоставка је да ФН систем увек ради на максималној тачки напајања која је константна у временском кораку симулације.

*EnergyPlus* не укључује моделе за помоћну опрему фотонапонског система, као што је уређај за праћење Сунца и контролер складиштења код система са складиштењем електричне енергије. У даљем тексту дат је приказ модела фотонапонског система [68].

### 6.2.1 "Simple" модел фотонапонских панела

Сви фотонапонски модели (па и *Simple*) деле исте моделе за предвиђање соларног зрачења који се користе за соларне прорачуне.

Основна претпоставка је да ФН модули увек раде када је укупно зрачење сунчеве енергије веће од 0,3 W. Ако је зрачење сунчеве енергије је мање од 0,3 W, онда модули не производе никакву енергију. Излагањем површине ФН панела соларном зрачењу, помоћу комплексног сета модела уграђених у *EnergyPlus*, израчунава се укупна количина соларне енергије која долази на сам панел. Модел прихвата произвољну ефикасност конверзије коју сам корисник може да мења (*EnergyPlus* има опсег ефикасности конверзије, која може бити у интервалу 0 - 1).

Корисна електрична енергија произведена ФН системом са *Simple* моделом фотонапонских панела рачуна се као:

$$P = A_{surf} \cdot f_{activ} \cdot G_T \cdot \eta_{cell} \cdot \eta_{invert} \quad (14)$$

где је:

$P$  – снага електричне енергије произведене ФН панелом (W);

$A_{surf}$  - Укупна површина ФН панела ( $m^2$ );

$f_{activ}$  – део површине ФН панела са активном соларним ћелијама (-);

$G_T$  – укупно соларно зрачење на ФН систему ( $W/m^2$ );

$\eta_{cell}$  – ћелијска ефикасност ФН панела (-);

$\eta_{invert}$  – ефикасност конверзије једносмерне у наизменичну струју (-).

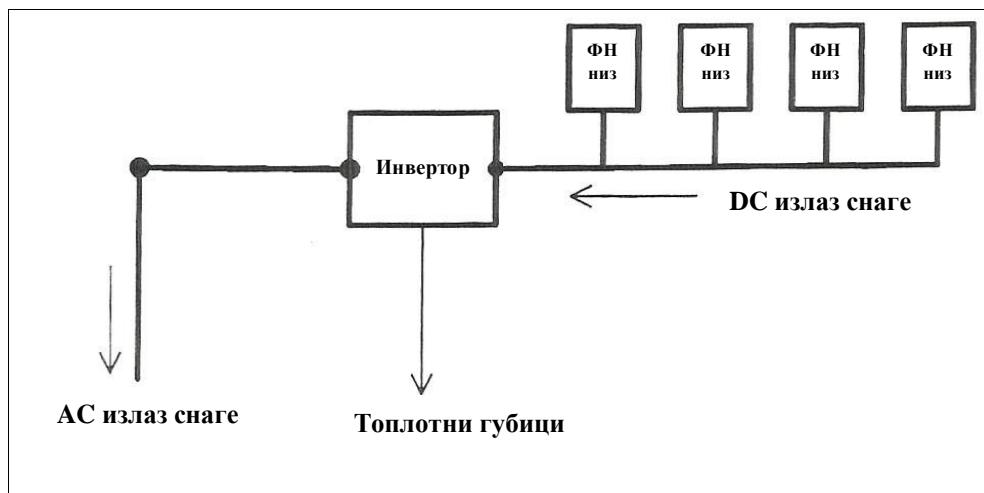
На десној страни ове једначине само величина  $G_T$  је израчуната од стране *EnergyPlus*-а а остало су улази дефинисани од стране корисника.

Постоје два начина који могу бити изабрани од стране корисника који регулишу како је фотонапонски систем постављен на површинама зграде. То су "растављен" (*Decoupled*) и "интегрисани" (*Integrated*) модел. Код њих се битно разликује прорачун температуре соларних ћелија која значајно утиче на њихову ефикасност, па се самим тим разликује и прорачун површинских преноса топлоте који је за интегрисане системе веома важан.



Центри електричног оптерећења могу имати различите конфигурације. Центри оптерећења који опслужују ФН систем треба да буду повезани магистралом једносмерне струје. Унутар система може постојати и инвертор. Центар оптерећења такође може да управља и електричним складиштењем, уколико оно постоји. Основна конфигурација са једносмерном струјом дата је на Слици 6.1.

Центри оптерећења наизменичне струје се понашају на следећи начин: целокупна електрична потражња коју не подмирује електрична енергија произведена ФН системом се подмирује куповином електричне енергије из електро-мреже. Када се генерише више електричне енергије него што је потребно, центар оптерећења продаје вишак енергије електро-мрежи или смањује оптерећење и ради са мањим капацитетом, ако је тако дефинисано шемом оптерећења коју задаје корисник програма. Основна конфигурација Центра за фотонапонске системе "Једносмерна струја са инвертором" је приказана на следећој слици.



Слика 6.2 – Шема функционисања Центра електричног оптерећења са инвертором

Центри оптерећења са једносмерном струјом и инвертором прикупљају једносмерну струју из различитих ФН панела. Једносмерна струја се у инвертору претвара у наизменичну струју. Излаз енергије из инвертора је оно што се евидентира као производња електричне енергије.

### 6.2.3 Инвертор

*EnergyPlus* обухвата три модела за претварање једносмерне струје (DC) у наизменичну струју (AC). Једносмерна струја снаге  $P_{DC-in}$ , у инвертору се конвертује у наизменичну струју снаге  $P_{AC-out}$ , према следећој релацији:

$$P_{AC-out} = P_{DC-in} \cdot \epsilon_{inv} \quad (15)$$

где је  $\epsilon_{inv}$  ефикасност инвертора која се одређује програмски, избором типа инвертора.

За Једноставан ("Simple") модел инвертора, који је коришћен у овим истраживањима, ефикасност је константна и уноси се од стране корисника. Коришћена вредност ефикасности је 1. За модел Закључаног распореда ("Look Up Table"), ефикасност се израчунава користећи линеарну интерполацију, док се за

инвертор типа Функција снаге ("Function of Power") ефикасност израчунава коришћењем објекта криве са једном променљивом. Топлотни губици у инвертору се израчунавају преко разлике између  $P_{DC-in}$  и  $P_{AC-out}$ .

### 6.3 Математички модел система за грејање санитарне воде са соларним колекторима

Основни елемент система за грејање санитарне воде је соларни колектор, као што је већ речено у одељку 3. Помоћу софтверског пакета *EnergyPlus* се може извршити прорачун количине топлотне енергије која се генерише преко соларних колектора, као и бројних других параметара који карактеришу соларни колектор (ефикасност, упадни угао, излазна температура и сл. ). Од избора модела ће наравно зависити и математички модел за одређивање генерисане топлотне енергије.

Поред колектора, битан елемент система за грејање санитарне воде је централни бојлер. Целокупни систем је повезан на јавну мрежу водо-снабдевања одакле узима потребну количину хладне воде.

У даљем тексту дат је приказ математичког модела коришћеног соларног колектора, централног бојлера, као и опис система за грејање санитарне воде у породичној згради, са свим својим пратећим елементима [68].

#### 6.3.1 Математички модел равног застакљеног соларног колектора

Постоји више типова соларних колектора који сам *EnergyPlus* нуди као опције избора при креирању модела соларног система за грејање воде. У овој докторској дисертацији избор су били равни двоструко застакљени соларни колектори, пошто су они најзаступљенији у комерцијалној употреби. Њихов избор се обавља у почетном кораку креирања соларне инсталације у улазној датотеци. *EnergyPlus* модел соларних колектора је заснован на једначинама које се налазе у ASHRAE стандардима [68].

#### Прорачун соларног зрачења

Соларно зрачење које под неким упадним углом долази до колектора укључује директно, дифузно и рефлектовано зрачење. Прорачун овог зрачења дат је у одељку 6.1.2. Такође мора да се узме у обзир и небеско осенчење, као и осенченост од оближњих објеката, ако постоји.

#### Прорачун ефикасности колектора

Термичка ефикасност колектора се дефинише као однос корисног топлотног добитка радног флуида колектора и укупног сунчевог зрачења које пада на површину колектора:

$$\eta = \frac{(q/A)}{I_{sol}} \quad (28)$$

где је:

$I_{sol}$  – укупно сол. зрачење које пада на нагнуту површину колектора ( $W/m^2$ );

$q$  – укупни користан топлотни добитак радног флуида ( $W$ );

$A$  – површина колектора ( $m^2$ ).



Треба имати у виду да је ефикасност соларног колектора дефинисана једино у случају када је  $I_{sol} > 0$ .

Једначина енергетског биланса застакљеног равног соларног колектора показује везу између особина стакла, апсорпционе плоче и услова спољашње средине:

$$\frac{q}{A} = I_{sol} \tau_{g1} \tau_{g2} \alpha_{abs} - \frac{T_{abs}^4 - T_{g2}^4}{R_{rad}} - \frac{T_{abs} - T_{g2}}{R_{conv}} - \frac{T_{abs} - T_{air}}{R_{cond}} \quad (29)$$

где је:

$\tau_{g1}$  – пропустљивост првог слоја стакла(-);

$\tau_{g2}$  – пропустљивост другог слоја стакла(-);

$\alpha_{abs}$  – коефицијент апсорпције апсорпционе плоче(-);

$R_{rad}$  – отпор преносу топлоте зрачењем од апсорбера до унутрашњег слоја стакла ( $\text{Km}^2/\text{W}$ );

$R_{conv}$  – отпор преносу топлоте конвекцијом од апсорбера до унутрашњег слоја стакла ( $\text{Km}^2/\text{W}$ );

$R_{cond}$  – отпор преносу топлоте кондукцијом апсорбера кроз изолацију до спољашње околине ( $\text{Km}^2/\text{W}$ );

$T_{abs}$  – температура апсорпционе плоче-апсорбера (К);

$T_{g2}$  – температура унутрашњег слоја стакла (К);

$T_{air}$  – температура спољашњег ваздуха(К).

Једначина (29) се може апроксимирати једноставнијом формулацијом:

$$\frac{q}{A} = F_R [I_{sol} (\tau\alpha) - U_L (T_{in} - T_{air})] \quad (30)$$

где је:

$F_R$  – пропустљивост првог слоја стакла(-);

$\tau\alpha$  – оптичка ефикасност соларног колектора (-);

$U_L$  – укупни топлотни губитак зрачењем, конвекцијом и кондукцијом( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ );

$T_{in}$  – температура радног флуида ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Имајућу у виду једначине (28) и (30), добија се израз

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{in} - T_{air})}{I_{sol}} \quad (31)$$

Линеарна корелација се може успоставити ако се  $F_R(\tau\alpha)$  и  $- F_R U_L$  сматрају константама соларног колектора:

$$\eta = c_0 + c_1 \frac{(T_{in} - T_{air})}{I_{sol}} \quad (32)$$

Слично, квадратна корелација се може поставити као:

$$\eta = c_0 + c_1 \frac{(T_{in} - T_{air})}{I_{sol}} + c_2 \frac{(T_{in} - T_{air})^2}{I_{sol}} \quad (33)$$

Оба наведена коефицијента ефикасности соларног колектора првог и другог реда су дефинисани такође и у [75].

### Прорачун корекције упадног угла соларног зрачења

Као и код стандардних прозора пропустљивост застакљења колектора се мења са променом упадног угла соларног зрачења. Обично је пропустљивост највећа када је зрачење нормално на површину застакљеног слоја колектора. Услови испитивања одређују коефицијенте ефикасности за прав упадни угао. За упадне углове  $< 90^\circ$ , пропустљивост стакла се модификује корекцијом упадног угла зрачења.

$$K_{\tau\alpha} = \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \quad (34)$$

Додатни тестови који су рађени одредили су корекцију упадног угла зрачења као функцију упадног угла  $\theta$ . Овај однос првог реда, у линеарној корелацији дат је као:

$$K_{\tau\alpha} = 1 + b_0 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (35)$$

или као однос другог реда, у квадратној корелацији:

$$K_{\tau\alpha} = 1 + b_0 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) + b_1 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)^2 \quad (36)$$

Коефицијенти у корекцији упадног угла зрачења  $b_0$  и  $b_1$  су обично негативни, мада поједини колектори могу имати позитивне вредности коефицијента  $b_0$ . Ови коефицијенти су такође наведени у [75], и они важе када је упадни угао највише  $60^\circ$ . За упадне углове веће од  $60^\circ$ , *EnergyPlus* занемарује добитке на колектору.

### Прорачун излазне температуре радног флуида

Излазна температура радног флуида се рачуна преко корисних топлотних добитака  $q$ , улазне температуре радног флуида  $T_{in}$  и масеног протока који се добија као резултат симулације:

$$\frac{q}{A} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (37)$$

где је:

$\dot{m}$  – масени проток (kg/s);

$c_p$  – специфична топлота радног флуида (J/kgK);

Решење за излазну температуру радног флуида је:

$$T_{out} = T_{in} + \frac{q}{\dot{m} c_p A} \quad (38)$$

Ако не постоји проток радног флуида коз колектор, излазна температура је температура радног флуида у стању мировања.

### 6.3.2 Модел централног бојлера

Централни бојлер је уређај који служи за складиштење топле воде. При симулацијама у програмском пакету *EnergyPlus* он је спојен у тзв. соларну петљу топле воде у систему за грејање санитарне воде. Такође има и доток хладне воде и симулацијом предвиђен добар процес мешања, тако да се у њему не стварају слојеви воде различите температуре.

## Енергетски биланс

Због доброг процеса мешања топле и хладне воде, температура воде у читавом бојлеру је уједначена. За израчунавање температуре воде у резервоару, модел аналитички решава диференцијалну једначину енергетског биланса бојлера:

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = q_{net} \quad (39)$$

где је:

$\rho$  – густина воде ( $\text{kg/m}^3$ );

$V$  – запремина бојлера ( $\text{m}^3$ );

$c_p$  – специфична топлота воде ( $\text{J/kgK}$ );

$T$  – температура воде у бојлеру ( $\text{K}$ );

$t$  – време ( $\text{s}$ );

$q_{net}$  – нето пренешена количина топлоте на воду у резервоару ( $\text{J/s}$ ),

или преко масе воде у резервоару:

$$m c_p \frac{dT}{dt} = q_{net} \quad (40)$$

Нето пренешена количина топлоте представља суму топлотних добитака и топлотних губитака због вишеструког преноса топлоте:

$$q_{net} = q_{heater} + q_{oncy\text{c}par} + q_{offcy\text{c}par} + q_{oncy\text{c}loss} + q_{offcy\text{c}loss} + q_{use} + q_{source} \quad (41)$$

где је:

$q_{heater}$  – топлота додата грејачем или колектором ( $\text{J/s}$ );

$q_{oncy\text{c}par}$  – топлота додата паразитским оптерећењем током рада ( $\text{J/s}$ );

$q_{offcy\text{c}par}$  – топлота додата паразитским оптерећењем када систем не ради ( $\text{J/s}$ );

$q_{oncy\text{c}loss}$  – пренос топлоте ка/од спољашње средине током рада система ( $\text{J/s}$ );

$q_{offcy\text{c}loss}$  – пренос топлоте ка/од спољашње средине када систем не ради ( $\text{J/s}$ );

$q_{use}$  – пренос корисне топлоте ка/од петље ( $\text{J/s}$ );

$q_{source}$  – пренос корисне топлоте ка/од соларног колектора ( $\text{J/s}$ ).

Топлоте  $q_{oncy\text{c}loss}$  и  $q_{offcy\text{c}loss}$  су дефинисане као:

$$q_{oncy\text{c}loss} = UA_{oncy\text{c}}(T_{amb} - T) \quad (42)$$

$$q_{offcy\text{c}loss} = UA_{offcy\text{c}}(T_{amb} - T) \quad (43)$$

где је:

$UA_{oncy\text{c}}$  – коефицијент губитака када систем ради (0 када је искључен);

$UA_{offcy\text{c}}$  – коефицијент губитака када систем не ради (0 када је укључен);

$T_{amb}$  – амбијентална температура.

Топлоте  $q_{use}$  и  $q_{source}$  су дефинисане као:

$$q_{use} = \varepsilon_{use} \dot{m}_{use} c_p (T_{use} - T) \quad (44)$$

$$q_{source} = \varepsilon_{source} \dot{m}_{source} c_p (T_{source} - T) \quad (45)$$

где је:

$\varepsilon_{use}$  – ефективност размене топлоте током преноса у соларној петљи;

$\dot{m}_{use}$  – масени проток у соларној петљи;

$T_{use}$  – улазна температура флуида у бојлер;

$\varepsilon_{source}$  – ефективност размене топлоте током преноса од колектора;

$\dot{m}_{use}$  – масени проток од колектора до бојлера;

$T_{use}$  – излазна температура флуида из бојлера.

Увођењем ових једначина у једначину (41) добија се диференцијална једначина:

$$\frac{dT}{dt} = a + bT \quad (46)$$

где су константе  $a$  и  $b$  дате изразима:

$$a = \frac{1}{mc_p} (q_{heater} + q_{oncyapar} + q_{offcyapar} + UA_{oncy} T_{amb} + UA_{offcy} T_{amb}) + \frac{1}{mc_p} (\varepsilon_{use} \dot{m}_{use} c_p T_{use} + \varepsilon_{source} \dot{m}_{source} c_p T_{source}) \quad (47)$$

$$b = -\frac{1}{mc_p} (UA_{oncy} + UA_{offcy} + \varepsilon_{use} \dot{m}_{use} c_p + \varepsilon_{source} \dot{m}_{source} c_p) \quad (48)$$

Решење диференцијалне једначине (46) преко константи  $a$  и  $b$  гласи:

$$T(t) = \left( \frac{a}{b} + T_i \right) e^{bt} - \frac{a}{b} \quad (49)$$

где је:

$T(t)$  – температура воде у бојлеру у времену  $t$ ;

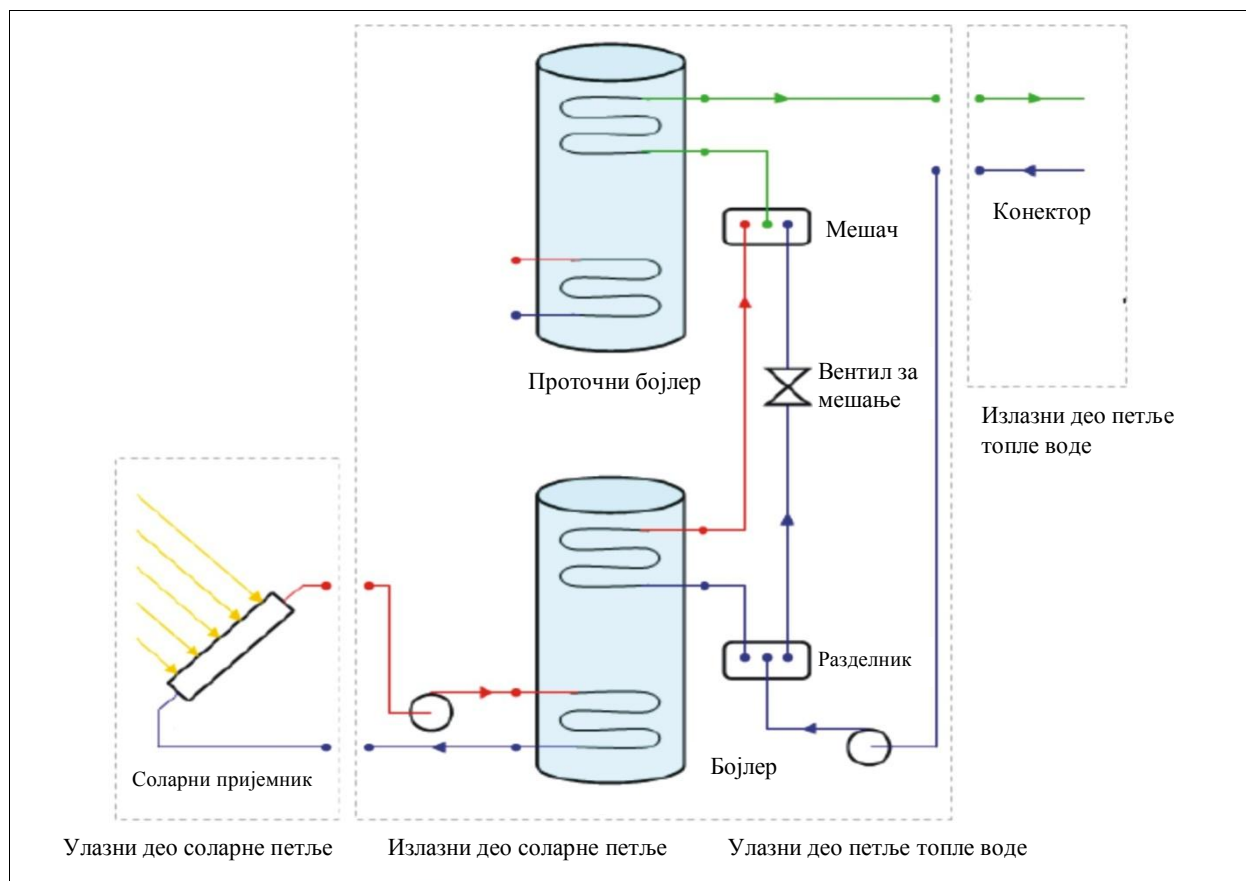
$T_i$  – почетна температура воде у бојлеру у тренутку  $t=0$ ;

### 6.3.3 Модел система за грејање санитарне воде

Да би се остварила уштеда енергије применом соларног система за грејање санитарне воде, најбоље је да се користи систем са два резервоара – централним бојлером и помоћним проточним бојлером (Слика 6.3 - преузето из [68]). У централном бојлеру складишти се вода загрејана у соларним колекторима, за тренутну или каснију употребу. Помоћни проточни бојлер је постављен низводно у односу на централни бојлер и његова улога је догревање воде када температура из централног бојлера није довољно велика за задовољење потреба.

Систем за грејање санитарне топле воде састоји се, поред соларних колектора и наведених бојлера, још и од пумпе, мешача, разделника и вентила за мешање воде. Соларни колектори могу бити повезани редно или паралелно, ако их има више. Сви наведени елементи система чине две петље: соларну петљу и потрошачку петљу, које се међусобно преклапају.

Соларна петља обухвата соларне колекторе, пумпу која покреће воду - радни флуид и спирални размењивач топлоте у централном бојлеру. Унутар соларне петље, соларни колектор апсорбује соларну енергију и тако загрева воду која тече кроз његове бакарне цеви. Даље та топла вода загрева санитарну воду у централном бојлеру. Температура воде у централном бојлеру може да буде већа или мања од температуре задате у улазној датотеци.



**Слика 6.3** – Шема система за грејање санитарне воде

Потрошачка петља представља петљу потрошње санитарне топле воде. Састоји се од разделника, централног бојлера, проточног бојлера и вентила за мешање топле воде са хладном водом.

У потрошачкој петљи хладна санитарна вода долази до разделника, одакле може да иде или у централни бојлер или до вентила за мешање воде. Ако је температура воде у централном бојлеру нижа од потребне, вода се додатно загрева помоћу електричне енергије у помоћном проточном бојлеру. Ако је температура санитарне топле воде виша од потребне она се снижава у мешачу мешањем са хладном водом преко вентила.

Вентил за мешање ради тако што кроз једну од својих грана пропушта хладну воду да би прилагодио температуру воде на излазу из мешача. Мешањем топле и хладне воде, добија се вода задате температуре која одлази до потрошача.

Потрошачи у систему су судопера, туш, машина за прање посуђа и веш-машина. Сви потрошачи раде према утврђеном распореду задатом у улазној датотеци. Машина за прање посуђа ради једном током дана, машина за прање веша једном недељно, док је потрошња топле воде на судопери и тушу одређена временом које укућани проводе унутар куће, а то је најчешће у јутарњим и вечерњим сатима. Током дана, према дефинисаном распореду, укућани веома мало времена проводе у кући, тако да је у тим сатима и потрошња воде на тушу и судопери минимална или не постоји.

### 6.3.4 Контрола соларног система за грејање санитарне воде

Постоји неколико начина за контролу соларног система за грејање санитарне воде у *EnergyPlus*-у. Пошто соларни колектори захтевају константан проток, ограничавајући фактор је проток пумпе у соларној петљи. Ако није предвиђено распоредом, пумпа и систем ће радити све време, што није најбољи начин за рад соларног система. За бољу контролу соларне петље може се користити диференцијални термостат који пореди температуру воде у колектору са температуром воде у централном бојлеру, тако да се пумпа укључује само када постоји топлотни добитак. У улазној датотеци дефинише се разлика температура за укључивање (*Temperature Difference On Limit*) и искључивање пумпе (*Temperature Difference Off Limit*). Ове вредности износе 8-12 °C и 1-3 °C, респективно. Уколико су ове две разлике температура исувише блиске, постоји могућност да се систем укључи и искључи брзо без великог корисног топлотног добитка. До овога може да дође и када је проток кроз колектор превише велики. Без протицања, флуид у колектору се загрева много брже; када се систем укључи при великом протоку сва количина топлог флуида се одједном покреће и температура нагло пада, што доводи до искључења система. Други метод за контролу је коришћење фотонапонског панела са погон пумпе у соларној петљи. Пумпа се покреће само када постоји довољно соларног зрачења да је покрене.

### 6.3.5 Превенција против мржњења

У климатским зонама са хладним зимама, соларни систем мора бити дизајниран да избегне ризик од мржњења флуида у соларном колектору и спољним цевима и на тај начин проузрокује штету. Ово није проблем ако је радни флуид ваздух. Са водом, међутим, постоји неколико начина да се смањи овај ризик.

**Сезонски распоред.** Најједноставнија стратегија је да се систем не користи током зимског периода. Ово је незгодно јер је неопходно да се сав радни флуид уклони ручно из соларног колектора. Такође се губе и бенефити који би се остварили коришћењем соларних система током овог периода. Ово у *EnergyPlus*-у може бити симулирано одговарајућим распоредом рада пумпе у соларном систему.

**Средство против мржњења.** Тачка мржњења течности се снижава додавањем средства против мржњења (антифриза) води (радном флуиду). Ово се може постићи и коришћењем радног флуида са нижом тачком мржњења, што још увек нема могућност симулације у *EnergyPlus*-у јер се једино чиста вода користи у петљама.

**Дренажни систем.** Ова стратегија аутоматски празни колекторе када пумпа није укључена. Сценарио је моделиран у *EnergyPlus*-у, али додатна енергија за погон пумпе није узета у обзир у прорачуну.

**Рециркулациони систем.** Овим начином контроле, топла вода из централног бојлера се враћа назад у колектор, одржавајући систем изнад тачке мржњења. У овом случају постоје системски губици. Рециркулацијом се форсира укључивање система када спољашња температура ваздуха или излазна температура воде из колектора падне испод задатог минимума.

**Додатна контрола.** Осим спречавања замрзавања воде у соларном систему за грејање воде, такође је потребно заштитити систем и од прегревања. Ово питање сигурности је обично везано за централни бојлер. У том случају важно је прекинути загревање воде у централном бојлеру ако је температура воде у њему већа од задате температуре, и прекинути рад пумпе да се не би оштетио соларни колектор.

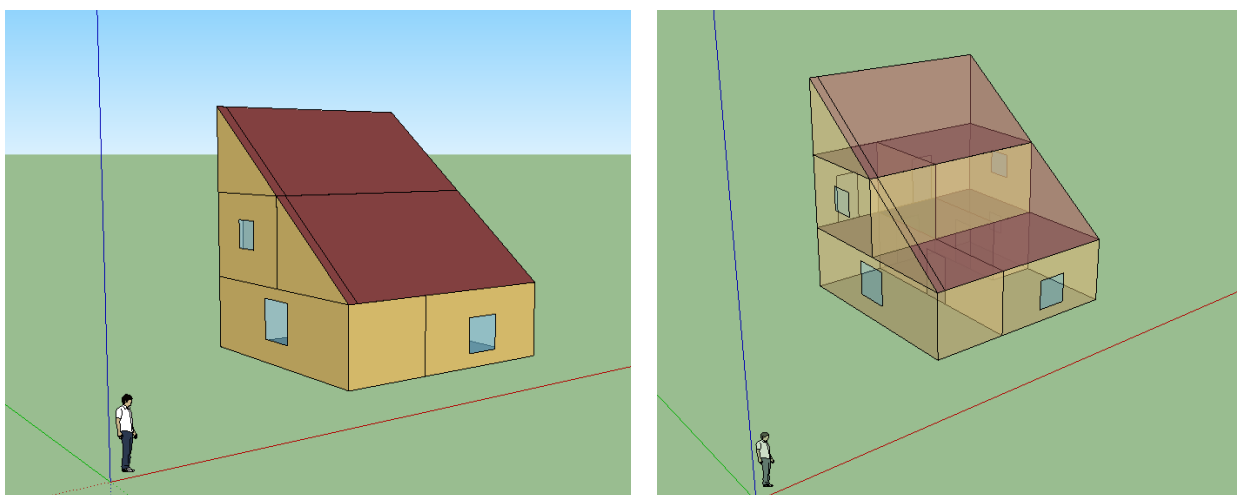
## 7. МОДЕЛ АНАЛИЗИРАНЕ КУЋЕ

У овом поглављу најпре је приказано архитектонско решење референтног модела куће (зграде), а затим потрошња електричне енергије и топле воде у референтној згради. Након тога дат је опис грејних система коришћених у пројектованој згради, као и опис система за генерисање енергије, инсталираних на крову анализиране зграде са својим основним карактеристикама. На крају поглавља су дати и метеоролошки услови локације куће.

### 7.1 Архитектонско решење модела зграде

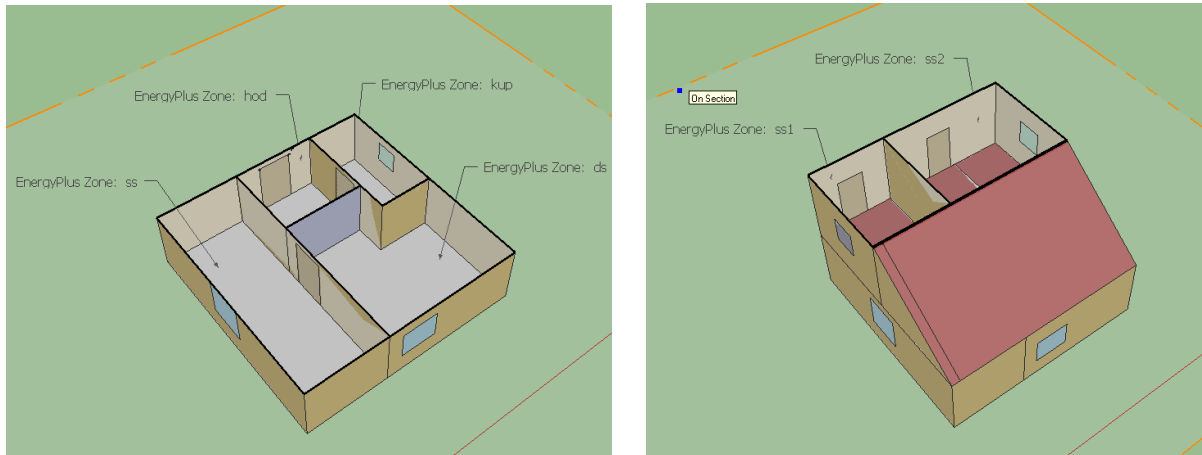
Референтни модел зграде која је анализирана у овој дисертацији представља модел зграде, односно куће намењене за становање четворочлане породице.

Зграда има кров оријентисан ка југу, под углом нагиба  $37,5^\circ$ , на коме је инсталиран фотонапонски систем и систем соларних колектора. Овакав модел зграде није типичан у Југоисточној Европи, али он је изабран за анализу због тога што је установљено да је оптимални угао постављања соларних система за територију Крагујевца и околине  $37,5^\circ$  [76]. Модел зграде је дат на Слици 7.1.



Слика 7.1 – Модел анализиране зграде добијен софтвером *Google SketchUp* са додатаком *Open Studio*

На два нивоа зграде распоређено је 6 зона које се зими греју (Слика 7.2). На приземљу се налази велика дневна соба са кухињским делом, спаваћа соба, ходник и купатило. На првом спрату се налазе две спаваће собе намењене деци. Претпоставка је да зграда није окружена било каквим објектима који могу створити засенчење површина соларних система.



Слика 7.2 – Пресек приземља и првог спрата у *Google SketchUp*-у

Укупна површина свих зидова износи  $245,43 \text{ m}^2$ . Укупна запремина просторија је  $264,64 \text{ m}^3$ . Површина крова износи  $80,6 \text{ m}^2$ , а укупна површина коју покрива изолациони слој износи  $313,67 \text{ m}^2$ .

Кућа је изолована стиропором дебљине  $0,15 \text{ m}$ , у референтном случају. Густина стиропора је износила  $16 \text{ kg/m}^3$ , а његова уграђена енергија  $86,4 \text{ MJ/kg}$ .

Прозори су двоструко застакљени са укупном површином  $16,05 \text{ m}^2$ , а њихов коефицијент пролаза топлоте износи  $U=0,72 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Укупан однос површина прекривених стаклом према површини спољашњих зидова износи  $6,54 \%$ .

Спољашњи зидови су прављени од више слојева, идући са унутрашње стране: слој кречног малтера, цигла, слој фасадног малтера, изолациони слој – стиропор (различите дебљине –  $0,05 \text{ m}$ ,  $0,1 \text{ m}$ ,  $0,15 \text{ m}$  за референтни случај,  $0,2 \text{ m}$ ), термоизолациони слој и завршни слој фасадног малтера. Вредност коефицијента пролаза топлоте спољашњег зида се мењао у опсегу  $U = 0,132 - 1,862 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . За случај референтне зграде са изолационим слојем од  $0,15 \text{ m}$ , коефицијент пролаза топлоте износи  $U = 0,177 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Унутрашњи зидови су направљени од две ригипс плоче између којих је изолациони слој. Коефицијент пролаза топлоте унутрашњих зидова зграде износи  $U=3,135 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Плафон је такође вишеслојан, и гледано са унутрашње стране ка спољашњој састоји се од слоја малтера, монта-блока и цементне кошуљице. За плафон коефицијента пролаза топлоте износио је  $U=0,4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Подна конструкција приземља састоји се од керамичких плочица, цементне кошуљице, термоизолационог слоја, хидроизолационог слоја, и армираног бетона, а вредност коефицијента пролаза топлоте пода износи  $U=0,312 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

На првом спрату поред спаваћих соба налази се зона испод косине крова која се не греја. Такође, изнад истих спаваћих соба је друга негрејана зона.



## 7.2 Потрошња електричне енергије у згради

Електрична енергија у згради се највише троши за грејање санитарне воде помоћу електричних грејача у бојлерима, затим на на рад електричних уређаја (фрижидер, замрзивач, веш-машина, машина за прање судова, усисивач, телевизор, фен за косу, компјутер) и на крају за расвету (или осветљење). У случају да у згради постоји систем електричног грејања, свакако се највећи део потрошње електричне енергије односи на грејање.

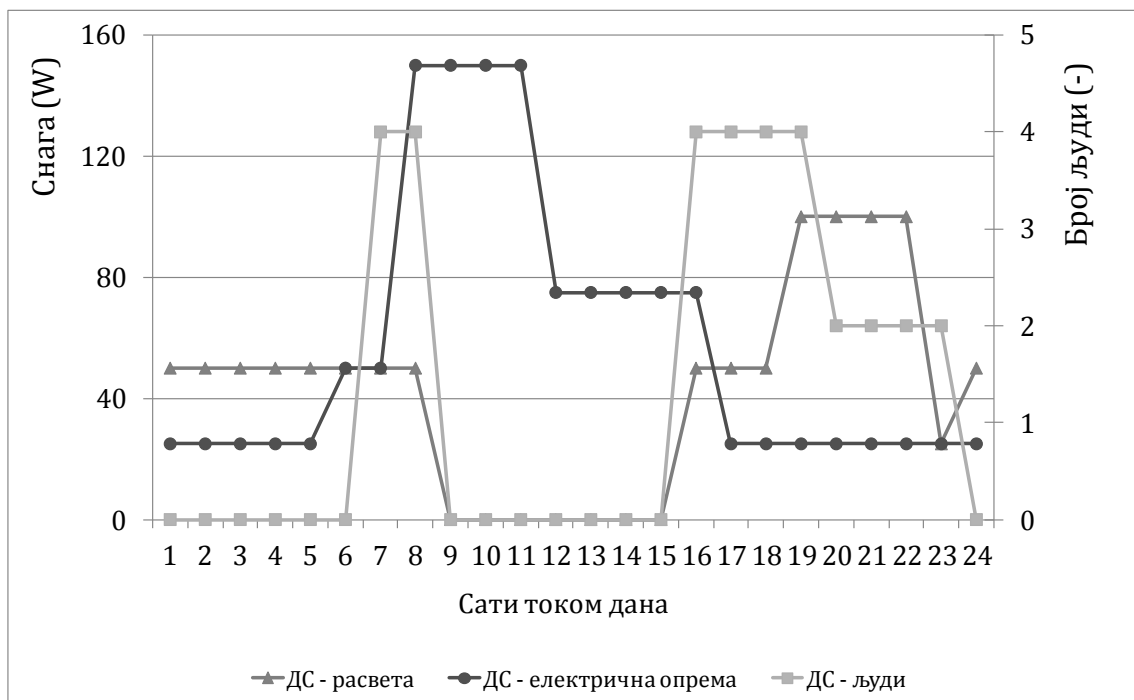
Укупна годишња потрошња електричне енергије  $E_{EL,0}$  (без електричне енергије за грејање) је електрична енергија која се потроши на задовољавање енергетских потреба укућана и може да се подели на три дела: (1) електричну енергију за грејање санитарне воде  $E_{EL,V}$ , (2) електричну енергију за рад електричних уређаја у кући  $E_{EL,EO}$ , и (3) електричну енергију потребну за осветљење  $E_{EL,OS}$ :

$$E_{EL,0} = E_{EL,V} + E_{EL,EO} + E_{EL,OS} \quad (50)$$

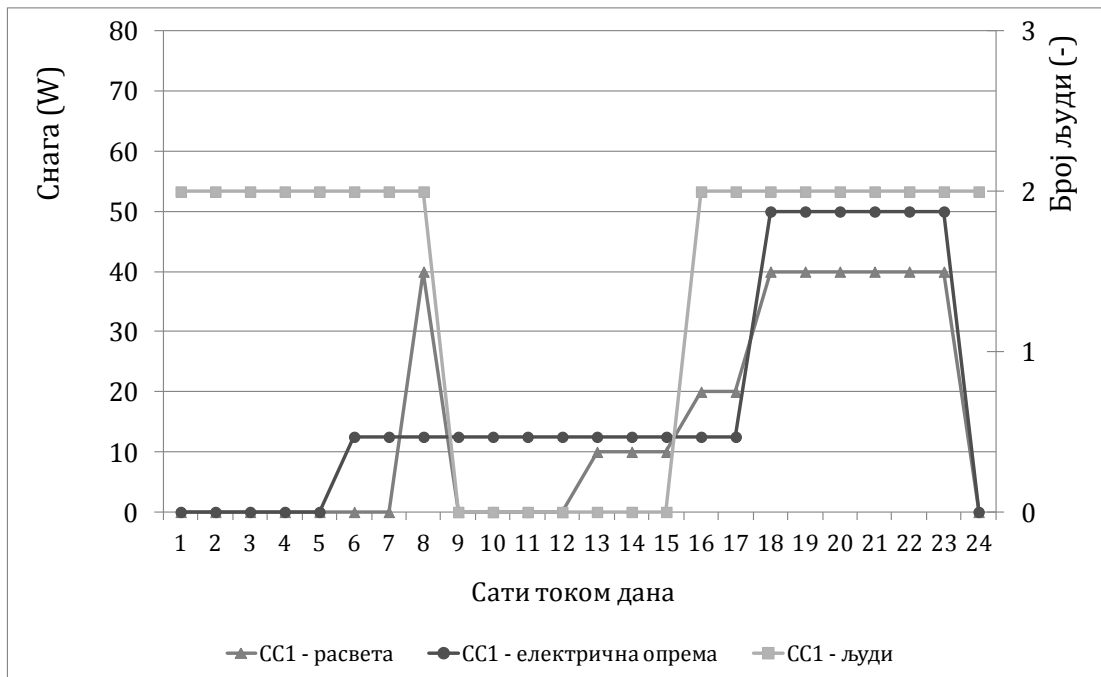
Рад електричних уређаја, као и потрошња електричне енергије за расвету, дате су посебним распоредима дефинисаним у улазној датотеци *EnergyPlus*-а за сваку просторију у згради. У улазној датотеци је такође дат и распоред боравка људи у просторијама. Електрична опрема и осветљење се углавном користе у јутарњим сатима и у вечерњим сатима када породица време проводи у кући.

У случају референтне зграде, укупна годишња потрошња електричне енергије (без електричне енергије за грејање) износи 30,2 GJ, од чега се на грејање санитарне воде троши 22,89 GJ, на рад електричних уређаја 6,29 GJ и на осветљење 1,02 GJ.

Распоред потрошње електричне енергије за расвету и електричне уређаје, као и број људи који борави унутар дневне собе током радног дана дат је на Слици 7.3, док су на Слици 7.4 приказани исти распореди за спаваћу собу (СС 1) у приземљу.



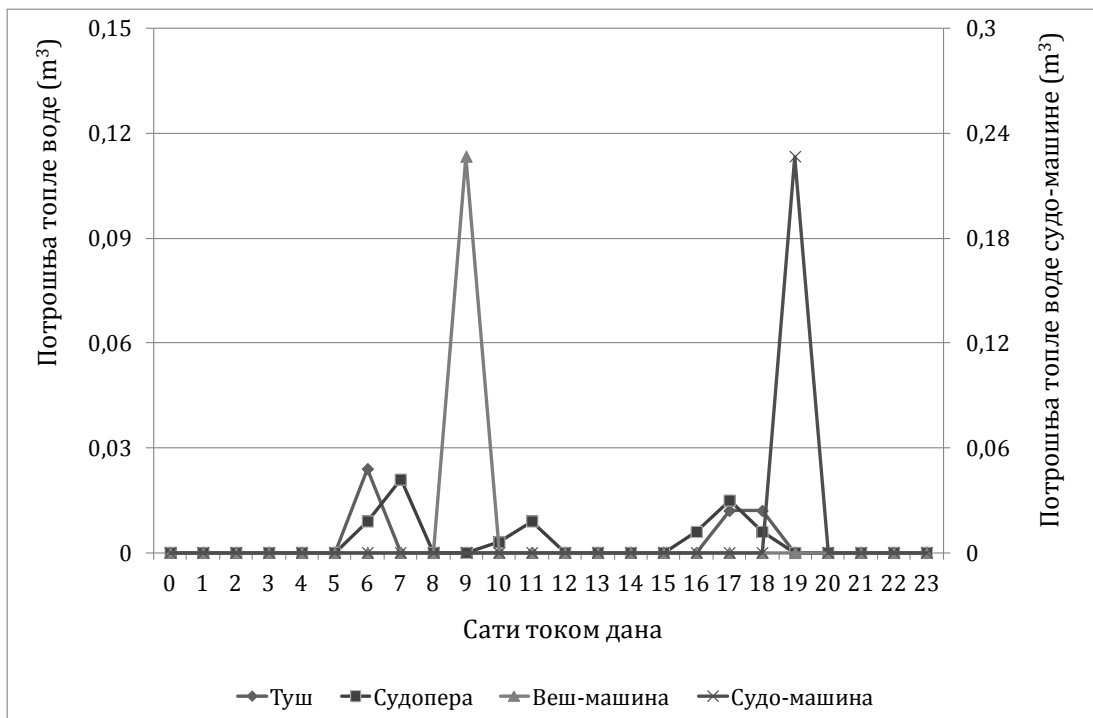
Слика 7.3 – Распоред потрошње електричне енергије за расвету и електричне уређаје, и присуство људи у дневној соби током радног дана



Слика 7.4 – Распоред потрошње електричне енергије за освету и електричне уређаје, и присуство људи у спаваћој соби (приземље) током радног дана

### 7.3 Потрошња топле воде у згради

Потрошња топле воде у згради се односи на туш, судоперу, машину за прање судова и вешмашину. Распоред потрошње топле воде, као и распоред потрошње електричне енергије, дат је у улазној датотеци *EnergyPlus-a*.



Слика 7.5 – Распоред потрошње топле воде током дана

Према овом распореду, у згради се троши топла вода различитих температура: за туш и судоперу користи се вода тампературе 43,3 °C, а за веш-машину и машину за прање судова користи се вода тампературе 50 °C. Машина за прање судова ради свакодневно, док је рад веш-машине предвиђен два пута седмично. У референтном случају месечна потрошња топле воде је 11,5 m<sup>3</sup>, што одговара потрошњи топле воде просечне четворочлане породице. Распоред потрошње топле воде у референтној згради током дана када раде обе машине дат је на Слици 7.5.

## 7.4 Анализирани системи грејања

Без обзира на врсту грејног система који је примењен у анализираној згради, распоредом у програмском пакету *EnergyPlus* подешено је време њиховог рада током радног дана од 7 h до 9 h пре подне и од 16 h до 21 h увече. Током викенда грејни систем ради непрекидно од 7 h до 21 h. У свим вршеним симулацијама, грејни системи су радили од 15. октобра до 15. априла следеће године, што је уобичајена пракса у Србији. Временски корак у свим симулацијама је био 15 min.

Температуре у просторијама се регулишу помоћу термостата и за време рада грејних система су подешене на 20°C. Изузетак је купатило где је пројектна температура 22°C. У периоду током дана када грејни системи не раде (9–16 h), температура у просторијама зграде је подешена на 15°C.

### 7.4.1 Електрични систем грејања

Програм *EnergyPlus* у свом пакету има модул за систем конвективног електричног грејања. Овај модул подразумева примену електричних грејача у радијаторима. У већини случајева радијатори преносе значајну количину топлоте природном конвекцијом, док се извесна количина топлоте преноси зрачењем. У овом моделу компонента пренете топлоте зрачењем се занемарује и основна претопставка је да се целокупни процес преноса топлоте одвија конвекцијом. *EnergyPlus* претопставља да се топлота шири равномерно кроз просторију и на тај начин се остварује топлотна равнотежа ваздуха у грејаној зони, на основу које се израчунава средња температура ваздуха у просторији (mean air temperature - MAT).



Слика 7.6 – CINI електрични грејач за радијаторе код система електричног етажног грејања

Као и бројне друге компоненте система за грејање, хлађење и климатизацију, модел конвективних електричних радијатора захтева јасан распоред рада. Поред распореда рада, неопходно је знати снагу електричног грејача и ефикасност целокупног радијатора.

При симулацијама ове врсте грејања, снага радијатора је била 2 kW а ефикасност 97 %. Слика 7.6 приказује електрични грејач МЕК за алуминијумске радијаторе, марке CINI [77], чије карактеристике су коришћене приликом моделирања електричног система грејања.

Електрични грејач типа МЕК намењен је за загревање различитих система, од мањих као што су сушачи пешкира до радијатора у системима централног грејања. Конструкционо је решен тако да се лако уграђује у све врсте цевних, ливених, челичних, алуминијумских и панелних радијатора. Уређај се састоји од цевног грејача посебне конструкције и електронског терморегулатора са термичким осигурачем, који су смештени у пластично кућиште.

Предност коришћења овог система грејања су што не постоји опасност од пожара, не заузима додатни простор, има могућност fine регулације температуре у просторији и одржавање минималне температуре (као заштита од замрзавања). У простору који се периодично користи може се користити за грејање једне просторије (један уређај - један радијатор) или повезивање више уређаја у систем за грејање целе куће. Најзначајнија предност је што је цена уређаја нижа него за било који други извор топлоте.

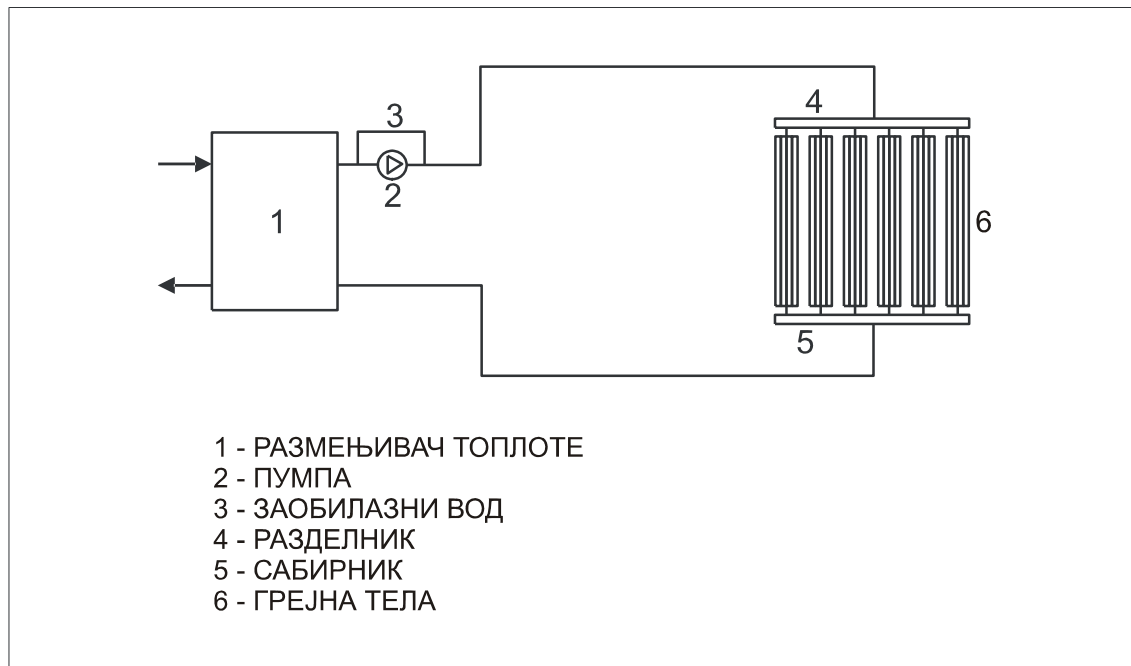
#### 7.4.2 Даљински систем грејања

Систем даљинског грејање је инфраструктурни систем који омогућава да се топлота произведена на централној локацији преноси до стамбених и комерцијалних зграда на ширем подручју.

Систем даљинског грејања је најзаступљенији вид грејања у урбаним срединама. Овај систем представља јединствени систем међусобно повезаних енергетских објеката који служи за производњу, пренос и дистрибуцију топлотне енергије. Систем чине: производни извор, топоводна мрежа и топлопредајне станице. У производном извору се примарна енергија горива претвара у топлотну енергију. Топлотна енергија се до крајњих корисника преноси топоводном мрежом која има мерно-регулационе уређаје. Топлопредајна станица обезбеђује испоруку топлотне енергије у унутрашње топлотне инсталације и уређаје корисника, а састоји се из прикључне и кућне подстанице са размењивачима топлоте.

Даљинско грејање је чисто, ефикасно и економично због своје флексибилности и оптималних услова за производњу топлоте. У суштини, сваки извор енергије може се употребити у систему даљинског грејања. Обновљиви извори као што су биомаса, соларна енергија и отпад све се више примењују у овим системима, или у потпуности или као додатак традиционалним фосилним горивима.

*EnergyPlus* програмом се може симулирати коришћење система даљинског грејања у кући. Овим путем се омогућава кориснику да изврши симулацију енергетског понашања зграде не прецизирајући радне параметре или радне криве котловских постројења. Овај модел једино треба да повеже систем радијатора симулираног стамбеног објекта у затворену петљу, и да зна номинални капацитет постројења. Као излазне величине добијају се потребне снаге потребне за достизање жељене температуре.



**Слика 7.7** – Шема даљинског грејања у анализираној згради са снабдевачком и потрошачком петљом

Слика 7.7 приказује шему даљинског грејања у анализираној згради са потрошачком петљом (систем развода унутар стамбеног објекта - од кућне подстанице до свих просторија, тј. радијатора). У систему грејања постоји и тзв. снабдевачка петља. Основни елементи оваквих система су: размењивач топлоте, циркулациона пумпа за транспорт грејног флуида, разделник, сабирник и грејна тела а сви они су међусобно повезани гранама.

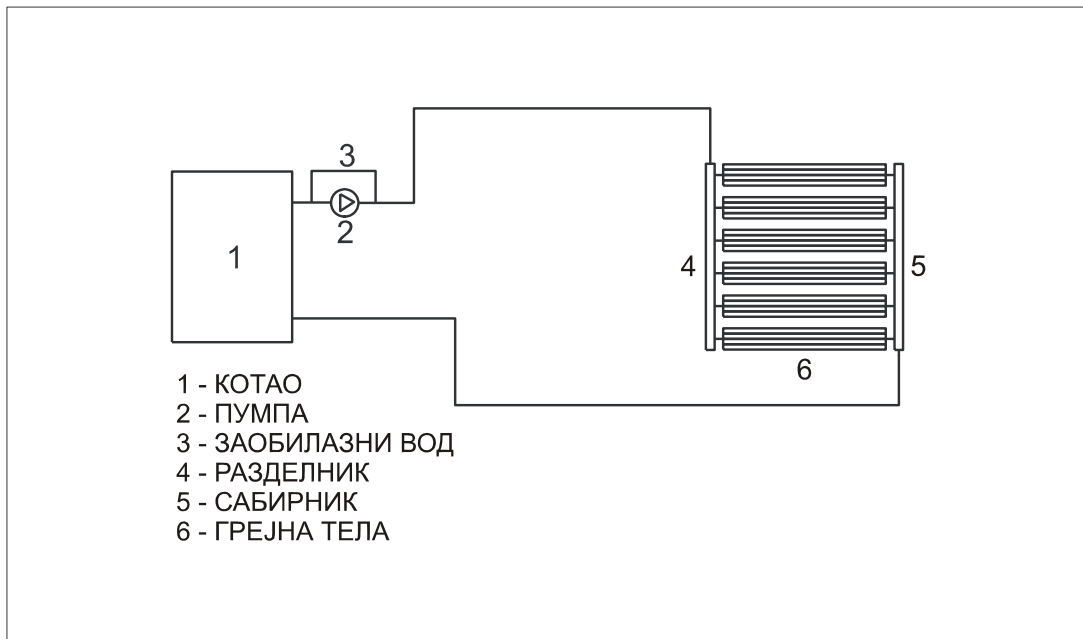
### 7.4.3 Систем грејања са котлом на природни гас

Систем грејања са котлом на природни гас свакако може довести до значајне уштеде примарне енергије, нарочито у односу на електрично грејање. Код ових система грејања топлотна енергија се генерише у котлу и преноси радним флуидом до грејних тела – радијатора. Елементи грејног система су исти као код даљинског грејања, с тим што овде постоји и котло на природни гас.

Слика 7.8 даје шематски приказ система гасног грејања. Систем гасног грејања се састоји од циркулационе пумпе, гасног котла, заобилазног вода, разделника, сабирника и грејних тела по просторијама референтне зграде.

Снага котла од 24 kW обезбеђује довољно топлоте за грејање просечне куће, па су котлови ове снаге коришћени и при симулацији гасног грејања у *EnergyPlus* окружењу. Ефикасност котла који се користио при симулацијама је била 98 %, а излазна температура воде из котла 60 °C.

Данашњи типови гасних котлова имају тробрзинске пумпе које гарантују минималне шумове, па их то чини јако погодним и за уградњу у малим становима. За постизање жељене температуре, стара се сензор на излазу из размењивача топлоте.



Слика 7.8 – Шема гасног грејања у анализираној згради

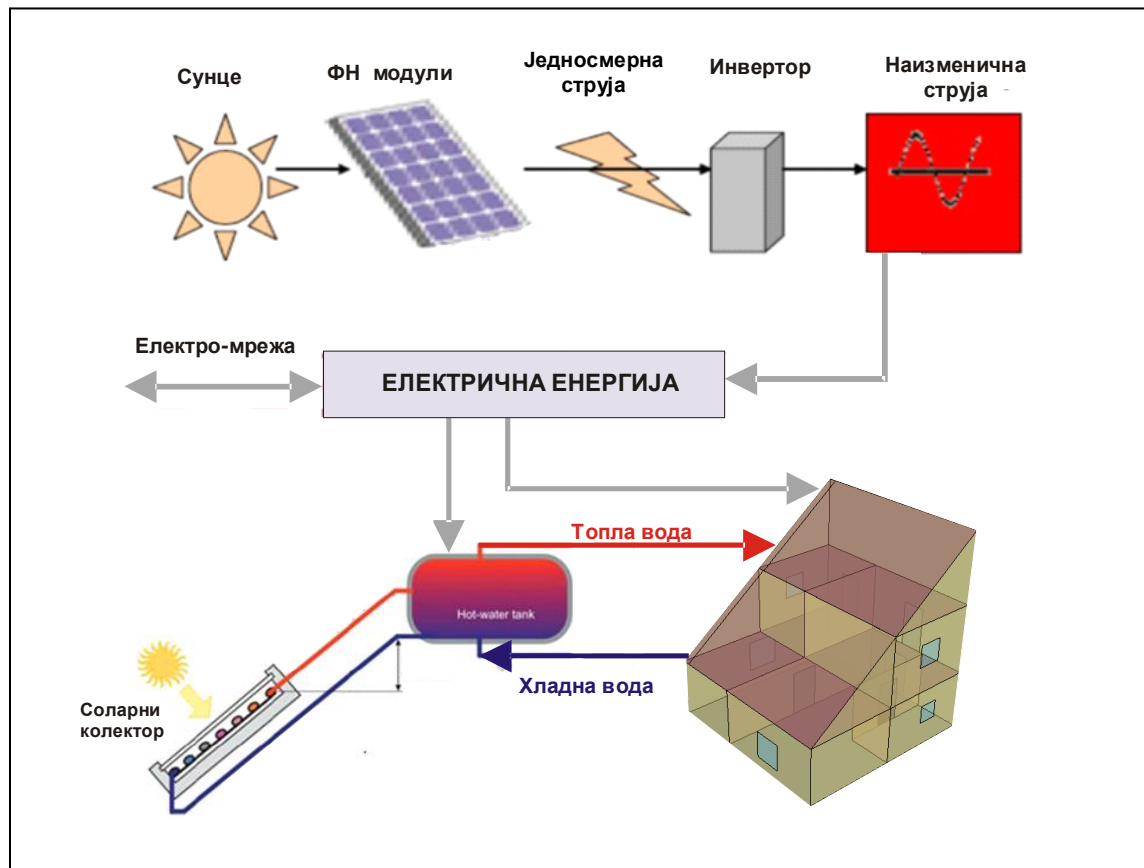
## 7.5 Карактеристике инсталираних система за генерисање енергије

Шематски приказ анализираних зграда са инсталираним системима за генерисање електричне и топлотне енергије дат је на Слици 7.9.

Као што је раније наведено, енергија код анализираних зграда се генерише преко фотонапонског система и соларних колектора, који су постављени на крову зграде. Количина генерисане енергије је самим тим ограничена величином крова, па је веома битно одредити оптималан однос површина фотонапонских панела и соларних колектора. Оптималним односом површина се генерише највећа количина енергије и на тај начин се остварује највећа уштеда примарне енергије. Самим тим се и смањује емисија штетних гасова стаклене баште у атмосферу.

Кроз истраживања која су рађена у овој тези, при анализи потрошње примарне енергије, узета је у обзир и уграђена енергија. Уграђена енергија представља енергију потребну да се неки производ направи, почев од процеса вађења руде, преко обраде, транспорта, монтаже, инсталације и рециклаже на крају свог животног века. Када су у питању фотонапонски панели и соларни колектори, уграђена енергија има различите вредности у земљама које их производе, али те разлике су минималне. Зато су подаци за уграђену енергију из светске литературе потпуно применљиви и у Србији. У истраживања рађеним у оквиру ове тезе разматране су различите врсте фотонапонских панела и у даљем тексту је дат њихов преглед са основним карактеристикама. За соларне колекторе дати су подаци о уграђеној енергији из различитих извора литературе.

Када се анализира животни циклус и уграђена енергија, долази се до још једног битног параметра, а то је енергетско време отплате (ЕРВТ) које се дефинише као количник укупне уграђене енергије током животног циклуса и годишње вредности генерисане енергије.



Слика 7.9 – Приказ зграде са инсталираним системима за генерисање енергије

Како је питање загађења животне средине последњих година веома актуелно, при најновијим анализама животног циклуса се разматра и уграђена емисија  $\text{CO}_2$  која представља количну угљен-диоксида која се емитује при целокупном процесу производње посматраног производа. У вези са уграђеном емисијом дефинише се и емисионо време отплате ЕМРТ које представља количник укупне уграђене емисије  $\text{CO}_2$  током целокупног животног циклуса и годишње вредности емисије  $\text{CO}_2$  која се ослободи током експлоатације производа.

### 7.5.1 Карактеристике фотонапонског система

Фотонапонски систем инсталиран на крову зграде, 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, што је и рађено у оквиру ове дисертације. У циљу генерисања што веће количине електричне енергије, вршене су симулације за различите типове фотонапонских панела, који су у прорачуне узимани преко своје уграђене енергије и ћелијске ефикасности.

### ФН модули од кристалног силицијума

*Alsema* у својим радовима [78], [79] и [80] наводи да су ранија истраживања везана за уграђену енергију кристалних силиконских модула (1991-1998. год.) показала велико одступање у резултатима. За поликристалне силицијумске технологије (mc-Si) уграђена енергија је варирала између 2 400 и 7 600 MJ/m<sup>2</sup> а за монокристалне технологије (sc-Si) чак између 5 300 и 16 500 MJ/m<sup>2</sup>. Разлог за овако велике разлике је био у различитим претпоставкама везаним за енергетске потребе појединих процеса обраде соларних ћелија, као што је израда танких слојева – вафера. Одступања је такође било и у погледу енергије потребне за пречишћавање силицијума и процесе кристализације. Каснија истраживања (после 2000.) су показала да се уграђена енергија може свести на податке дате у Табели 7.1.

**Табела 7.1** – Уграђена енергија, ћелијска и модулска ефикасност за фотонапонске модуле од кристалног силицијума

	mc-Si	sc-Si
Уграђена енергија, без оквира (MJ/m <sup>2</sup> )	4 200	5 700
Ћелијска ефикасност (%)	15	17
Модулска ефикасност (%)	13	14

### ФН модули од аморфног силицијума

*Alsema* у својим радовима [78], [79] и [80] као и *Sanchez* [81] дају податке о укупној уграђеној енергији фотонапонских модула (без рама) од аморфног силицијума. Овај податак има вредности 710 до 1 980 MJ/m<sup>2</sup>. Разлика се може објаснити избором носача соларних ћелија и/или енкапсулацијом материјала. Они су податке за уграђену енергију и ефикасност ФН модула од аморфног танкослојног силицијума дали у Табели 7.2.

**Табела 7.2** – Уграђена енергија и модулска ефикасност за фотонапонске модуле од аморфног силицијума

	mc-Si
Уграђена енергија, без оквира (MJ/m <sup>2</sup> )	1 200
Модулска ефикасност (%)	7

Енергетско време отплате ових модула има тенденцију смањивања у будућности и реално је очекивати да оно буде 1 - 2 године.

На основу истраживања *Alsema*-е, *Bankier* и *Gale* [82] 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 7.3.

*Alsema* [78] наводи да је средња дужина животног века фотонапонских система између 20 и 30 година, док *Bankier* и *Gale* [82] наводе да она износи између 25 и 30 година.



**Табела 7.3** – Уграђена енергија и енергетски период отплате за различите врсте фотонапонских модула

Тип ФН модула	Уграђена енергија ФН модула (MJ/m <sup>2</sup> )	Уграђена енергија ФН модула са рамом (Al), пратећим елементима и инвертором (MJ/m <sup>2</sup> )	ЕРВТ (год)
mc-Si	4200	5400	3.2
Sc-Si	5700	6900	-----
a-Si	1200	2400	2.7

*Alsema* у свом раду [80] даје и податке о укупној уграђеној количини CO<sub>2</sub> код мрежно повезаних фотонапонских система, које се креће око 50 - 60 g/kWh генерисане електричне енергије. То су подаци из деведесетих година прошлог века. Прегледом литературе и новијих података, може се закључити да се емисија CO<sub>2</sub> значајно смањила са развојем ФН технологија. Тако, *Fukurozaki* [83] наводи да је укупна уграђена количина CO<sub>2</sub> у фотонапонским панелима у Бразилу 15 – 19 g/kWh генерисане електричне енергије. Последњи подаци британског Центра за алтернативне технологије (CAT) [84] кажу да је за подручје Велике Британије уграђена количина CO<sub>2</sub> у фотонапонским панелима око 60 g/kWh, а за јужну Европу око 35 g/kWh генерисане електричне енергије.

Последњих неколико година интензивно се ради на ексергетским анализама фотонапонских система. Група италијанских научника је дала податке о уграђеној ексергији ФН система који се састојао од панела од монокристалног силицијума [85]. Уграђена ексергија ове врсте фотонапонских панела износила је 4990 MJ/m<sup>2</sup>.

У истраживањима рађеним у овој дисертацији, претпоставка је да је на крову референтне зграде инсталиран систем фотонапонских панела чија је уграђена енергија 3600 MJ/m<sup>2</sup>, што одговара средњој вредности уграђене енергије фотонапонских панела силицијумске технологије. Референтна ћелијска ефикасност ФН модула је 12 %, а разматрана дужина животног века је износила 20 година. Усвојено је да је уграђена количина CO<sub>2</sub> у фотонапонским панелима 40 g/kWh, а уграђена ексергија 4990 MJ/m<sup>2</sup>.

### 7.5.2 Карактеристике соларних колектора

*Ardente* је са групом аутора у својим радовима [86] и [87] анализирао животни циклус соларних колектора и дао податке за уграђену енергију равних, застакљених соларних колектора. За пример оваквог колектора површине 1,9 m<sup>2</sup> укупан израчунати износ уграђене енергије износи 3540 MJ, или сведено по јединици површине 1863 MJ/m<sup>2</sup>. Енергетско време отплате према *Ardente*-у износи око 2 године. Ове вредности показују велике погодности примене соларних технологија у енергетском смислу. Израчуната уграђена емисија CO<sub>2</sub> соларних колектора, према истим ауторима, износи 657 kg CO<sub>2</sub> или 308 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> колектора.

*Kalogirou* је у свом раду [88] анализирао систем за грејање санитарне воде. У оквиру анализе целокупног система, посебан осврт је дао на раван застакљени соларни колектор. Према *Kalogirou* укупна уграђена енергија за производњу равнор

застакљеног колектора износи 3540 MJ, односно 1860 MJ/m<sup>2</sup> колектора. Енергетско време отплате износи око 1,2 године, а емисионо време отплате је различито у зависности од врсте производних процеса и варира од 1 до 9 година. Овако велико време отплате је проузроковано употребом фосилних горива велике емисије штетних гасова у појединим фазама израде колектора.

*Kalogirou* је за комплетан систем грејања санитарне воде дао вредност уграђене емисије CO<sub>2</sub> од 1934 kg CO<sub>2</sub>.

*Battisti* и *Corrado* [89] су такође анализирали систем за грејање топле воде у домаћинствима. Њихов закључак је да је уграђена енергија равног застакљеног соларног колектора, примењеног у овом систему, 3040 MJ или 1810 MJ/m<sup>2</sup>. Енергетско и емисионо време отплате према овим ауторима је имало блиске вредности и износило је од 5 – 19 месеци, док је дужина животног века равних, застакљених соларних колектора 15 до 20 година.

У презентованим истраживањима усвојена је уграђена енергија 1850 MJ/m<sup>2</sup> за постављени модел соларних колектора и дужина животног века 20 година. Усвојено је да је уграђена количина CO<sub>2</sub> у равним соларним колекторима 300 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. Пошто за соларне колекторе још увек нико није објавио податке о уграђеној ексергији, на основу односа уграђене ексергије и уграђене енергије ФН панела, дефинисана је претпоставка о уграђеној ексергији соларних колектора која је износила 2320 MJ/m<sup>2</sup>.

### 7.5.3 Карактеристике система за грејање санитарне воде

У претходном излагању је наведено да су основни делови система за грејање санитарне топле воде централни и проточни бојлер.

Централни бојлер има запремину 0,5 m<sup>3</sup> а помоћни проточни бојлер је запремине 5,68 l. Максимална дозвољена температура воде у оба бојлера је ограничена на 82,2 °C. Максимална пројектована разлика температура воде при врху и при дну централног бојлера износи 10 °C.

За контролу рада коришћења ове инсталације, у улазној датотеци је дефинисано неколико вредности температура радног флуида (воде) у соларној петљи:

- Температура флуида у соларној петљи ( $t_L=52$  °C);
- Горња гранична температура искључења соларне петље (60°C);
- Гранична температура укључења соларне петље (0 °C);
- Разлика температура на диференцијалном термостату за укључење (10°C);
- Разлика температура на диференцијалном термостату за искључење (2°C);

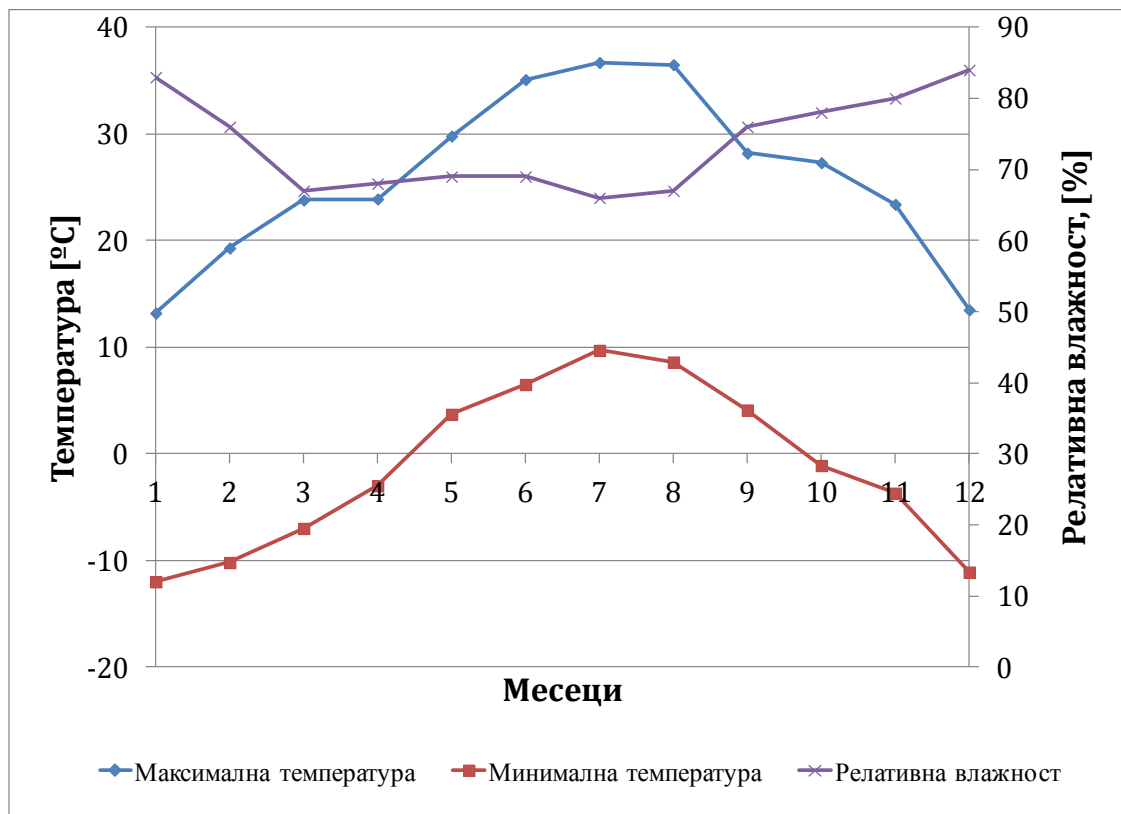
Средња годишња температура хладне воде које се користи у згради износи 14,72 °C.

## 7.6 Локација и метеоролошки подаци

Испитивана зграда је лоцирана у Крагујевцу, граду у централној Србији, држави на Балканском полуострву која спада у регион југоисточне Европе. Крагујевац има надморску висину 209 m. Налази се на 44° 22' северне географске ширине и 20° 56' источне географске дужине, са временском зоном GMT + 1.0 h.

Град има континенталну климу са четири различита годишња доба. Лета су топла и влажна са температуром чак и до 37 °C. Зиме су хладне, са снегом и температурама нижим од -12 °C. *EnergyPlus* при прорачунима користи климатске податке из сопствене базе са временским датотекама. Временске датотеке садрже полчасовне или часовне податке за бројне величине (барометарски притисак, температура, релативна влажност ваздуха, директно зрачење, дифузно зрачење, правац ветра, брзина ветра...) као и податке о падавинама током године.

Слика 7.10 даје приказ временских података (просечна минимална и максимална температура, као и просечна релативна влажност ваздуха, по месецима) за Крагујевац, из сопствене базе временских датотека.

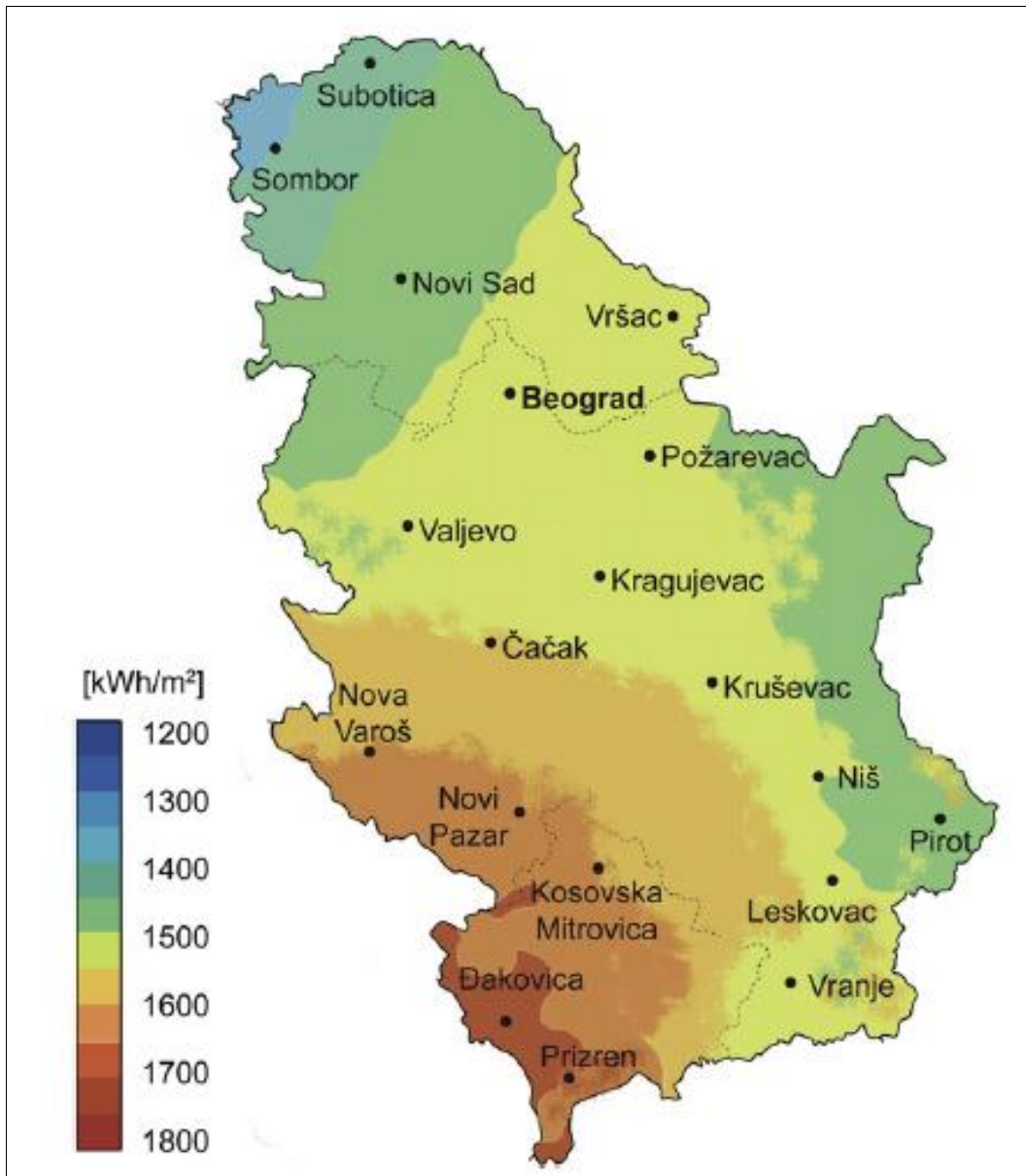


Слика 7.10 – Временски подаци за Крагујевац из датотеке *EnergyPlus*-а

Локација објекта који се испитује је веома битна за прорачун потрошње енергије. Улазна датотека садржи параметре који омогућавају *EnergyPlus*-у да израчуна соларно зрачење за било који дан у години.

Средња дневна вредност соларног зрачења на територији Републике Србије варира од 1,1 kWh/m<sup>2</sup> на северу до 1,7 kWh/m<sup>2</sup> на југу током јануара месеца, и од 5,9kWh/m<sup>2</sup> на северу до 6,6 kWh/m<sup>2</sup> на југу током јула месеца. Средња годишња вредност соларног зрачења у Србији износи између 1 200 kWh/m<sup>2</sup> на северозападу

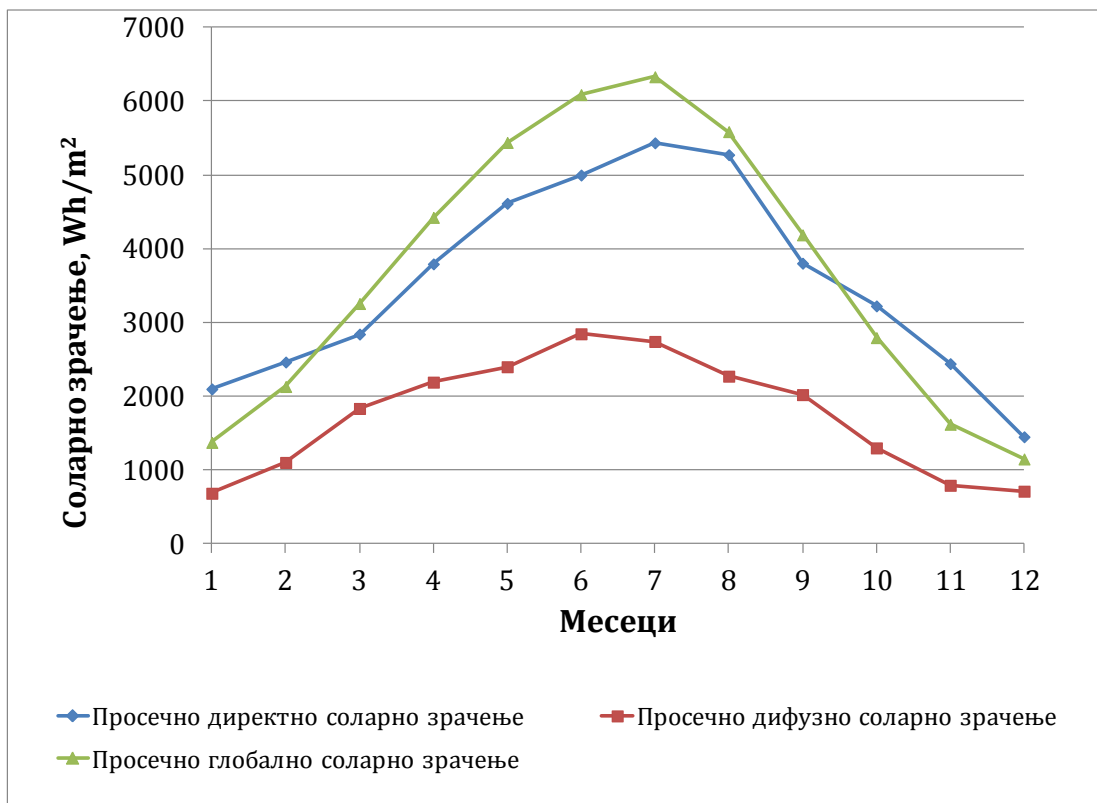
до чак  $1\,800\text{ kWh/m}^2$  на југу Србије, док је у реону централне Србије, којој припада Крагујевац, ова вредност око  $1550\text{ kWh/m}^2$  [90]. Соларно зрачење не зависи само од географске ширине локације, већ у великој мери зависи од климатских услова и рељефа. Слика 7.11 представља мапу соларног зрачења у Србији (преузета из [90]).



**Слика 7.11** – Мапа средњих годишњих вредности соларног зрачења у Србији

Јасно је да Србија има велики потенцијал у погледу искоришћења соларне енергије. Према претпоставкама о учешћу појединих врста обновљивих извора у укупном обновљивом енергетском потенцијалу Србије, соларна енергија има удео од 14 % [90].

Слика 7.12 даје приказ просечних вредности соларног зрачења (директног, дифузног и глобалног) по месецима за Крагујевац, на основу података из сопствене базе временских датотека. Иначе, Крагујевац годишње има 1988 сунчаних сати, 646 mm падавина и просечну релативну влажност ваздуха 73,4 % [90].



Слика 7.12 – Месечне вредности соларног зрачења за Крагујевац из датотеке *EnergyPlus-a*

## 8. ОПТИМИЗАЦИОНЕ ПРОЦЕДУРЕ

У овом поглављу дат је преглед развијених оптимизационих процедура које су коришћене у истраживањима. Приказана је енергетска, ексергетска и економска оптимизациона процедура, а на крају је дата еколошка анализа инсталираних система за генерисање енергије преко прорачуна емисије угљен-диоксида.

### 8.1 Енергетска оптимизациона процедура

Енергетска оптимизација има главни циљ да одреди оптималне вредности површина фотонапонских панела и соларних колектора (инсталираних на крову зграде) при којима се остварује највећа уштеда примарне енергије. Самим тим је потрошња примарне енергије у згради сведена на минималну меру. Оптимизација се ради на годишњем нивоу, тако да су све вредности енергија (генерисане и уграђене енергије) дате за период од годину дана.

Уштеда примарне енергије  $E_{PRIM}$  састоји се од примарне енергије генерисане преко инсталираних соларних система, уграђене енергије соларних система и уграђене енергије изолације. За процес оптимизације у софтверу GenOpt коришћена је функција циља која је дата следећом релацијом:

$$E_{PRIM} = R_{EL} (E_{FN} + E_{KOL}) - C_m [(E_{em, FN} + E_{em, KOL}) C_{inst}] - C_{m1} E_{em, IZO} \quad (51)$$

где је:

$E_{PRIM}$  – годишња уштеда примарне енергије (или избегнута потрошња примарне енергије) инсталирањем соларних система (J);

$R_{EL} = 3,04$  – коефицијент конверзије електричне у примарну енергију (-) [21];

$E_{FN}$  – електрична енергија генерисана ФН системом (J);

$E_{KOL}$  – топлотна енергија генерисана соларним колекторима (J);

$E_{em, FN}$  – уграђена енергија ФН система (J);

$E_{em, KOL}$  – уграђена енергија соларних колектора (J);

$E_{em, IZO}$  – уграђена енергија изолације (J);

$C_m$  – коефицијент животног циклуса соларних система ( $C_m = 1/LC_{FN, KOL}$ , где је  $LC_{FN, KOL}$  дужина животног века инсталираних система);

$C_{inst}$  – коефицијент инсталације и одржавања соларних система током њиховог животног циклуса (-) [91];

$C_{m1}$  – коефицијент животног циклуса изолације ( $C_{m1} = 1/LC_{IZO}$ , где је  $LC_{IZO}$  дужина животног века изолације).

Однос величина површина фотонапонских панела и соларних колектора рачуна се преко величине  $u$ , која одређује процентуални удео површине фотонапонских панела на површини крова. Када је познат удео површина ФН панела на крову, лако се израчуна удео површине соларних колектора. Ова величина фигурише у израчунатим вредностима генерисане енергије, као и у вредностима уграђене енергије ФН панела и соларних колектора.

У згради која има електрично грејање, као финална енергија троши се само електрична енергија, па ће укупна потрошња примарне енергије  $E_{EL, PRIM}$  бити једнака:

$$E_{EL, PRIM} = R_{EL} E_{EL} \quad (52)$$

где је  $E_{EL}$  – укупна годишња потрошња електричне енергије (J).

У згради која има даљинско грејање, као финална енергија троши се електрична енергија (за осветљење, електричне уређаје и грејање воде) и топлотна енергија из система даљинског грејања, па ће укупна потрошња примарне енергије бити:

$$E_{TOT, PRIM, DG} = R_{EL} E_{EL} + R_{DG} E_{DG} \quad (53)$$

где је:

$E_{TOT, PRIM, DG}$  - укупна потрошња примарне енергије зграде са даљинским грејањем (J);

$R_{DG} = 2,03$  – коефицијент конверзије топлотне у примарну енергију (-)[92];

$E_{DG}$  - потрошња енергије за грејање (J);

У згради која има систем грејања са гасним котлом, као финална енергија троши се електрична енергија (за осветљење, електричне уређаје и грејање воде) и топлотна енергија произведена сагоревањем гаса, па ће укупна потрошња примарне енергије бити:

$$E_{TOT, PRIM, GG} = R_{EL} E_{EL} + R_{GG} E_{GG} \quad (54)$$

где је:

$E_{TOT, PRIM, GG}$  - укупна потрошња примарне енергије зграде са гасним грејањем (J);

$R_{GG} = 1,1$  – коефицијент конверзије примарне енергије за природни гас (-)[93];

$E_{GG}$  - потрошња енергије за грејање гасом (J);

У једначини (51) први члан представља примарну генерисану енергију из ФН панела и соларних колектора:

$$E_{GEN, PRIM} = R_{EL} (E_{FN} + E_{KOL}) \quad (55)$$

Поређењем вредности укупне потрошње примарне енергије у згради и примарне генерисане енергије, може се закључити да ли је зграда нето-негативне, нето-нулте или нето-позитивне потрошње енергије. Ово је приступ без урачунатих уграђених енергија инсталираних соларних система и изолације. Зграда ће бити нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) ако генерише више примарне енергије него што је потрошена примарна енергија на годишњем нивоу. У супротном ће бити нето-негативне потрошње (NNEB). У случају да су вредности ове две примарне енергије једнаке – онда имамо случај зграде нулте потрошње енергије (ZNEB).

Поређењем вредности укупне потрошње примарне енергије у згради и уштеде примарне енергије (или избегнуте потрошње примарне енергије), можемо на исти начин да закључимо да ли је зграда нето-негативне, нето-нулте или нето-позитивне потрошње енергије, али тада говоримо о приступу са урачунатим уграђеним енергијама соларних система и изолације.

## 8.2 Ексергетска оптимизациона процедура

Кроз ексергетску оптимизацију је одређена максимална вредност ексергетског степена ефикасности система фотонапонских панела и соларних колектора. Максимални ексергетски степен ефикасности, аналогно максималној уштеди примарне енергије, постиже се при оптималном односу површина фотонапонског система и соларних колектора. Овај однос површина није исти као код енергетске оптимизације, и у оптимизационом коду је дат преко удела ФН панела на крову (величина  $u$ ).

Функција циља у процесу оптимизације – ексергетски степен ефикасности без урачунате уграђене ексергије, дат је једначином:

$$\eta_X = \frac{E_{X,PV-KOL}}{E_{X,SUN}} \quad (56)$$

где је:

$E_{X,PV-KOL}$  - ексергија добијена из ФН панела и соларних колектора (J) и једнака је збиру ексергија добијених од фотонапонских панела  $E_{X,PV}$  и соларних колектора  $E_{X,KOL}$ , тј.

$$E_{X,PV-KOL} = E_{X,PV} + E_{X,KOL} \quad (57)$$

$E_{X,SUN}$  - ексергија Сунца (J).

Удео ФН панела на крову у налази се у ексергијама ФН система и соларних колектора.

Ексергија Сунца је рачуната на основу вредности средње годишње инсолације за Крагујевац  $I=1447,85 \text{ kWh/m}^2$  [22];

Такође је дат и ексергетски степен искоришћења са урачунатом уграђеном ексергијом:

$$\eta_{X,EE} = \frac{E_{X,PV-KOL,EE}}{E_{X,SUN}} \quad (58)$$

где је:

$E_{X,PV-KOL,EE}$  - ексергија добијена из ФН панела и соларних колектора (J) са уграђеном ексергијом ових система и једнака је разлици ексергије добијене од соларних система  $E_{X,PV-KOL}$  и уграђених ексергија (ФН система  $EE_{PV}$  и соларних колектора  $EE_{KOL}$ )

$$E_{X,PV-KOL,EE} = E_{X,PV-KOL} - EE_{PV} - EE_{KOL} \quad (59)$$

Кроз процес енергетске оптимизације, израчунаване су још неке величине које могу бити валидан показатељ ексергетских токова у анализираним соларним системима. Једна од њих је однос потребне и добијене ексергије  $e_X$  без уграђене ексергије соларних система:

$$e_X = \frac{E_{X,POT}}{E_{X,PV-KOL}} \quad (60)$$

где је  $E_{X,POT}$  укупна потребна ексергија (J) која је једнака збиру потребних ексергија свих потрошача на годишњем нивоу.

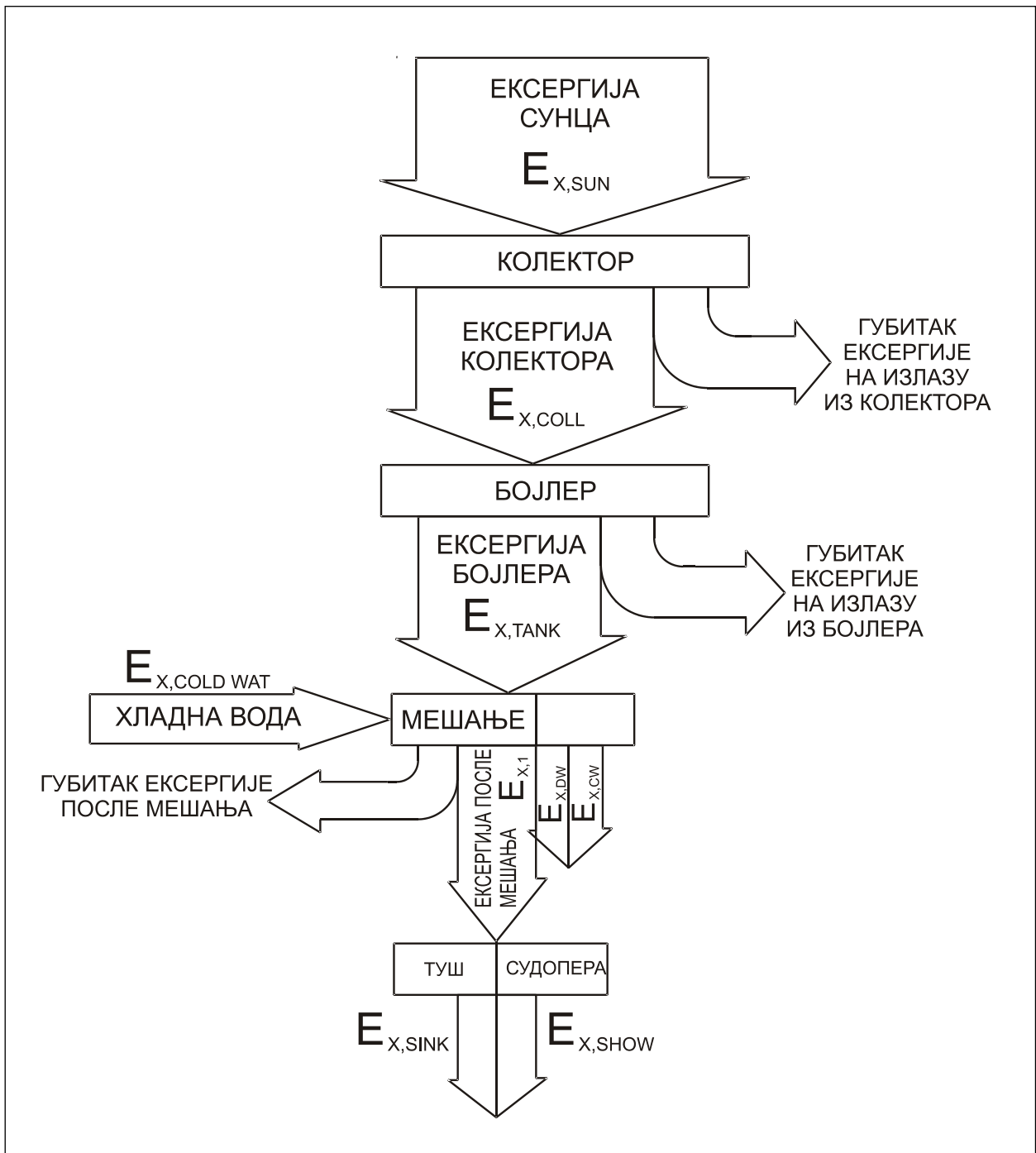


Дефинисан је и однос потребне и добијене ексергије  $e_x, EE$  са уграђеном ексергијом соларних система:

$$e_{x, EE} = \frac{E_{x, POT}}{E_{x, PV-KOL, EE}} \quad (61)$$

Односи потребне и добијене ексергије  $e_x$  и  $e_{x, EE}$  треба да буду што мањи, јер је у том случају добијена ексергија већа.

Дијаграм ексергетских токова у систему за грејање санитарне воде дат је на Слици 8.1, где су као излазне величине дате ексергије које се добијају на потрошачима.



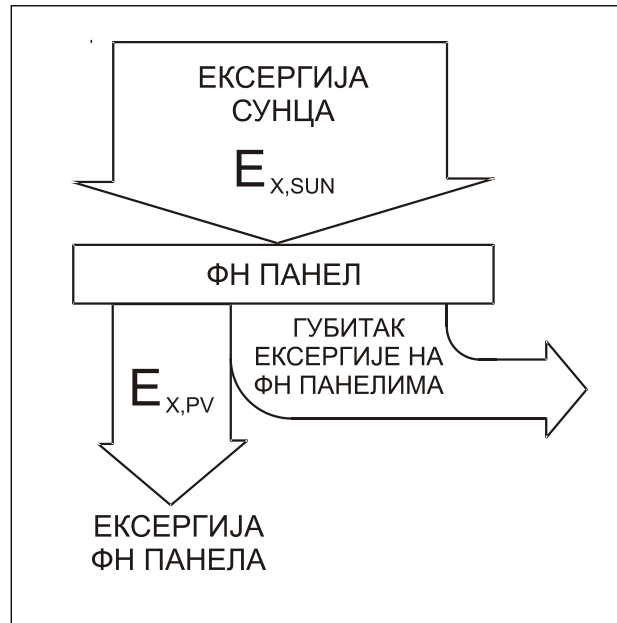
Слика 8.1 – Ексергетско балансирање система за грејање санитарне воде

Ексергије крајњих потрошача односе се на туш ( $E_{X, SHOW}$ ), судоперу ( $E_{X, SINK}$ ), веш-машину ( $E_{X, CW}$ ) и судо-машину ( $E_{X, DW}$ ). Због ниже температуре воде потребне за туш и судоперу неопходно је мешање са хладном водом, па је у ексергетској оптимизацији узета у обзир ексергија хладне воде која се додаје систему ( $E_{X, COLD WAT}$ ).

Ексергија која се добија преко колектора у систему за грејање санитарне воде  $E_{X, KOL}$  једнака је збиру ексергија крајњих потрошача:

$$E_{X, KOL} = E_{X, SHOW} + E_{X, SINK} + E_{X, CW} + E_{X, DW} \quad (62)$$

Дијаграм ексергетских токова у фотонапонском систему је знатно једноставнији због директне конверзије соларног зрачења у електричну енергију. Његов приказ дат је на Слици 8.2.



Слика 8.2 – Ексергетско билансирање фотонапонског система

### 8.3 Економска оптимизациона процедура

Економска оптимизација инсталираних система за генерисање енергије је спроведена да би се одредио оптимални однос површина фотонапонског система и соларних колектора, при коме ће се остварити највећа финансијска добит од инсталираних система.

Функција циља економске оптимизације дата је у облику:

$$D = E_{PV, S} C_{PV} - E_{P, NET} C_{NET} - R_{PV} - R_{KOL} \quad (63)$$

где је:

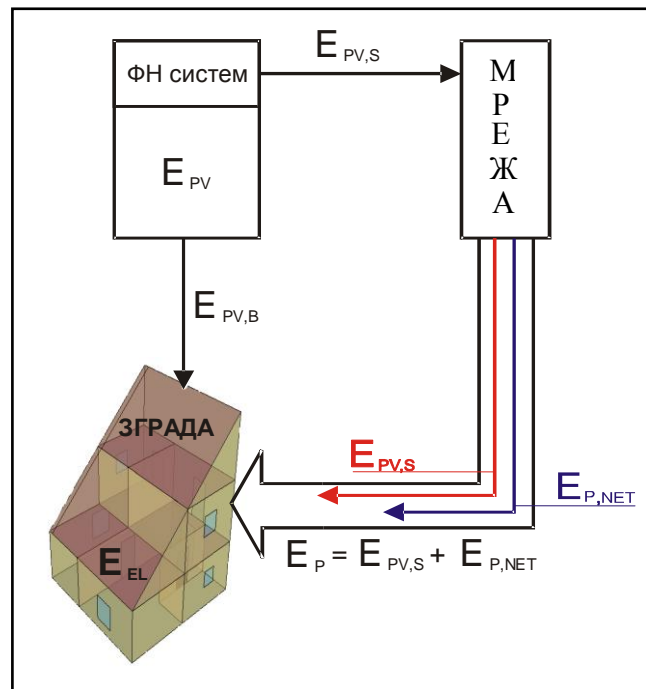
- $D$  – годишња финансијска добит од инсталираних система (EUR/год);
- $E_{PV, S}$  – вишак електричне енергије који се продаје електро-мрежи (kWh);
- $E_{PV, NET}$  – нето-купљена електрична енергија из мреже (kWh);
- $C_{PV}$  – цена енергије продате мрежи, feed-in тарифа (EUR/kWh);
- $C_{NET}$  – цена енергије купљене из мреже (EUR/kWh);
- $R_{PV}$  – годишњи расход ФН система (EUR);
- $R_{KOL}$  – годишњи расход соларних колектора (EUR).

Годишњи расход фотонапонског система и соларних колектора се рачуна према вредности инвестиције за ове системе ( $I_0$ ) и дат је у [20].

На основу израчунате добити, период отплате инвестиције се израчунава као:

$$PB = \frac{I_0}{D} \quad (64)$$

Као излазни подаци из *EnerguPlus*-а добијају се вредности укупне потрошње електричне енергије у згради ( $E_{EL}$ ), генерисана електрична енергија ФН система ( $E_{PV}$ ), вишка електричне енергије који се продаје електро-мрежи ( $E_{PV,S}$ ), укупне купљене електричне енергије ( $E_P$ ), нето-купљене електричне енергије ( $E_{P,NET}$ ) и електрична енергија која се генерише ФН системом и одмах троши ( $E_{PV,B}$ ). Релације између наведених величина електричне енергије дате су на Слици 8.3.



Слика 8.3 – Генерисана, потрошена и купљена електрична енергија у згради

Када ФН систем генерише више електричне енергије него што је потребно, тада се вишак електричне енергије продаје електро-дистрибутивној мрежи по *feed-in* тарифи. Тренутна вредност откупне цене електричне енергије из обновљивих извора енергије (*feed-in* тарифа) износи 0,2066 EUR/kWh за системе до 30 kW [94].

Просечна цена електричне енергије у Србији која се купује из електро-дистрибутивне мреже, за све три тарифе, дата је у Табели 8.1 [95].

Табела 8.1 – Цена електричне енергије у Србији

Електрична енергија	Цена (EUR/kWh)
Зелена тарифа (< 350 kWh)	0,059
Плава тарифа (351 – 1600 kWh)	0,089
Црвена тарифа (> 1600 kWh)	0,177

## 8.4 Еколошка анализа соларних система

Када се говори о еколошкој анализи и штетним утицајима на животну средину, све анализе се првенствено односе на емисију угљен-диоксида. Угљен-диоксид је гас који је у веома малом проценту заступљен у саставу земљине атмосфере (0,037 %), али је поред метана, азот-диоксида и других штетних гасова најзаступљенији у структури гасова стаклене баште са чак 83 %. Око 98 % емисије угљен-диоксида потиче од сагоревања фосилних горива, док се остатак емитује при сагоревању отпада, производњи цемента и креча, при разним технолошким процесима итд.

Инсталирани соларни системи који су разматрани у овом раду, при генерисању електричне енергије и топлоте емитују извесну количину угљен-диоксида у атмосферу. Без обзира што су то системи који имају минимални штетни утицај на животну средину, њихова емисија угљен-диоксида се израчунава према обрасцу:

$$S_{CO_2} = S_{CO_2, PV} + S_{CO_2, KOL} \quad (65)$$

где је:

$S_{CO_2}$  – емисија угљен-диоксида (kg/G)год);

$S_{CO_2, PV}$  – емисија угљен-диоксида која потиче од ФН панела (kg/G)год);

$S_{CO_2, KOL}$  – емисија угљен-диоксида која потиче од сол. колектора (kg/G)год).

Емисија угљен-диоксида која потиче од ФН панела према [96] износи 50 g CO<sub>2</sub>/kWh генерисане електричне енергије, а емисија угљен-диоксида која потиче од соларних колектора износи 72 g CO<sub>2</sub>/kWh генерисане топлотне енергије [97].

Тотална емисија угљен-диоксида представља збир емисије угљен-диоксида инсталираних соларних система и уграђене емисије угљен-диоксида која се емитовала при производњи анализираних соларних система. Тотална емисија угљен-диоксида се израчунава према обрасцу:

$$S_{TOT, CO_2} = S_{CO_2} + S_{CO_2, PV, emb} + S_{CO_2, KOL, emb} \quad (66)$$

где је:

$S_{CO_2, PV, emb}$  – уграђена емисија угљен-диоксида ФН панела (kg/G)год);

$S_{CO_2, KOL, emb}$  – уграђена емисија угљен-диоксида соларних колектора (kg/G)год).

Уграђене емисије угљен-диоксида ФН панела и соларних колектора дате су у Поглављу 7.

## 9. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА

---

Општа тежња истраживања датих у овој дисертацији је достизање концепта куће са нето-нултом потрошњом енергије, а даље, и куће са нето-позитивном потрошњом енергије, инсталирањем фотонапонских панела и соларних колектора помоћу којих би се генерисала енергија коју би зграда делимично или потпуно користила за подмирење својих енергетских потреба. У том смислу, потребне величине фотонапонских панела и соларних колектора, које треба инсталирати на крову зграде, одређиване су оптимизационим методама са циљем генерисања што веће количине енергије. Генерисањем највеће могуће количине енергије максимално се избегава потрошња примарне енергије као и емисија гасова стаклене баште у атмосферу.

Разматрана је зграда (кућа) са три система грејања: систем електричног грејања, систем даљинског грејања и систем грејања помоћу котла на природни гас.

У даљем раду дати су резултати оптимизација величина фотонапонских панела и соларних колектора, при чему је узета у обзир и уграђена енергија наведених соларних инсталација и изолације (енгл. *embodied energy*). Разматрана је енергетска оптимизација (са аспекта максималне избегнуте потрошње примарне енергије, тј. максималне уштеде примарне енергије), ексергетска оптимизација и економска оптимизација. На крају је приказана и еколошка анализа најповољнијих могућих решења. У делу где је извршено поређење резултата дати су и периоди отплате инвестиција инсталираних система за генерисање топлотне и електричне енергије: енергетско време отплате (*energy payback-time*), ексергетско време отплате (*exergy payback-time*) и емисионо време отплате (*emission payback-time*).

Економска оптимизација је нарочито важна због максимизирања финансијске добити. Наиме, кућа са нето-позитивном потрошњом енергије у неким периодима може имати већу производњу енергије од њених енергетских потреба. Тада се вишак енергије "продаје" електричној мрежи по тзв. "*feed-in*" тарифи. У резултатима истраживања приказана је и произведена енергија, вишак енергије који се продаје дистрибутивној мрежи и купљена енергија из система електро-дистрибуције.

Оптимизације су рађене за различиту дебљину изолације куће, за различиту потрошњу топле воде, различиту потрошњу електричне енергије, различите врсте фотонапонских панела и соларних колектора, за њихов различит животни век, као и за евентуалне различите факторе конверзије финалне у примарну енергију и различите вредности "*feed-in*" тарифе.

Сви резултати добијени симулацијом енергетског понашања моделиране зграде са инсталираним соларним системима су приказани на годишњем нивоу.

## 9.1 Енергетска оптимизација

### 9.1.1 Електрично грејање

Са аспекта потрошње енергије као и са економског аспекта, електрично грејање представља најнеповољнији систем грејања који се може применити. Наиме, код ове врсте грејања потрошња примарне енергије је изузетно велика и концепт нето-нулте потрошње енергије је готово неостварив. Стога је веома битна анализа свих параметара који могу довести до смањења потрошње укупне потребне количине примарне енергије. Са друге стране, систем електричног грејања има и највећу предност у односу на друге системе јер је генерално чист систем грејања, без велике емисије штетних гасова у атмосферу.

#### Различита дебљина изолације зграде

У овом делу истраживања извршена је варијација дебљине слоја изолације у циљу максимизирања избегнуте потрошње примарне енергије уградњом соларних система. Први случај је била зграда са дебљином изолације 0,05 m, други са 0,1 m, трећи са 0,15 m и четврти случај са 0,2 m, респективно. Због енормно велике вредности потрошње електричне енергије, концепт зграде нето-нулте енергетске потрошње није могао да се достигне. У Табели 9.1 дат је детаљан приказ потрошње електричне енергије у згради, по ставкама, за сва четири разматрана случаја.

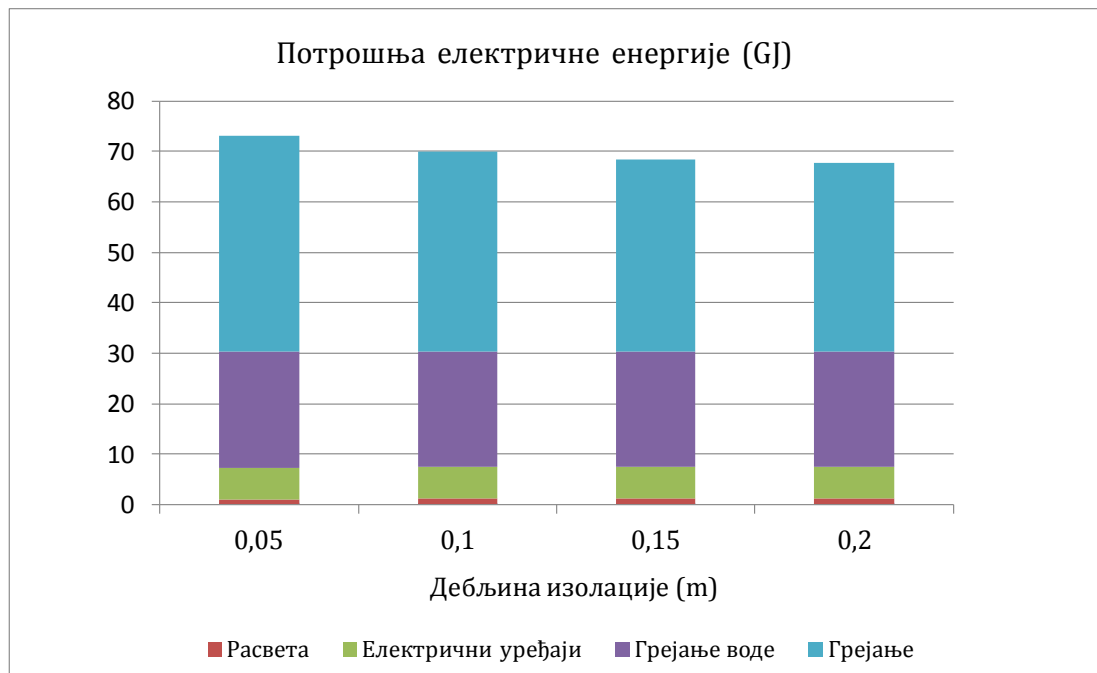
**Табела 9.1** – Детаљна годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности дебљине изолације

Потрошња електричне енергије (GJ)	Дебљина изолације			
	0,05 m	0,1 m	0,15 m - Реф	0,2 m
Грејање	42,84	39,63	38,16	37,32
Расвета	1,02	1,02	1,02	1,02
Електрични уређаји	6,29	6,29	6,29	6,29
Грејање воде	22,89	22,89	22,89	22,89
<b>УКУПНО</b>	<b>73,01</b>	<b>69,83</b>	<b>68,36</b>	<b>67,52</b>
Енергетски разред	<b>С</b>	<b>С</b>	<b>С</b>	<b>С</b>

Количине електричне енергије која се троши на расвету, електричне уређаје и грејање воде је иста у сва четири случаја. Разликује се само количина електричне енергије која се троши на електрично грејање зграде. Наравно, она расте, као и укупна годишња потрошња електричне енергије, уколико дебљина изолационог слоја опада, што се може видети и на Слици 9.1. Наиме, уколико је дебљи изолациони слој, топлотни губици кроз омотач зграде ће бити мањи, а самим тим и потрошња енергије за грејање.

Као референтни случај, посматрана је зграда са дебљином изолације 0,15 m код које је годишња потрошња енергије за грејање 38,16 GJ. По енергетској класификацији, ова зграда спада у енергетски разред С са годишњом потрошњом специфичне финалне енергије за грејање од 66,25 kWh/m<sup>2</sup>. Максимална дозвољена годишња потрошња специфичне финалне енергије за грејање која одговара С

разреду је  $75 \text{ kWh/m}^2$  [98]. Зграде са дебљином изолације  $0,05 \text{ m}$ ,  $0,1 \text{ m}$ , и  $0,2 \text{ m}$  имале су вредности годишње потрошње специфичне финалне енергије за грејање  $74,4 \text{ kWh/m}^2$ ,  $68,8 \text{ kWh/m}^2$  и  $65,2 \text{ kWh/m}^2$  респективно (све зграде спадају у енергетски разред C). Употребом изолације дебљине  $0,15 \text{ m}$  у односу на дебљину изолације  $0,05 \text{ m}$ , што је до недавно био уобичајени начин изолације кућа у Србији, доводи до уштеде финалне енергије за грејање за  $12\%$ , док употреба изолације дебљине  $0,1 \text{ m}$ , доводи до уштеде финалне енергије за грејање од  $4\%$ . Употреба изолације веће дебљине допринела би уштеди енергије за грејање од само  $2\%$ , а енергетски разред би остао исти.



**Слика 9.1** –Годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности дебљине изолације

Поређења ради, према европском стандарду за енергетско рангирање зграда [99] (*Building Energy Rating - BER*) који као индикатор користи потрошњу специфичне примарне енергије, зграде са дебљинама изолације од  $0,05 \text{ m}$  и  $0,1 \text{ m}$  спадају у енергетски разред F, а зграде са дебљинама изолације од  $0,15 \text{ m}$  и  $0,2 \text{ m}$  у енергетски разред E2. Ово указује још једном да је примена електричног грејања у зградама енергетски изузетно не-ефикасна због енормно велике потрошње примарне енергије.

У наредној табели (Табела 9.2) дата је укупна годишња потрошња електричне енергије у згради, генерисана енергија (електрична и топлотна), удео ФН панела на крову зграде (дат у процентима), уштеда примарне енергије (максимална избегнута потрошња примарне енергије уградњом соларних система), уграђена енергије инсталираних система и изолације и енергетски тип зграде. Енергетски тип зграде је посматран са два аспекта – са уграђеном енергијом соларних система и изолације која је узета у обзир током прорачуна и без уграђене енергије.

**Табела 9.2** – Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитом дебљином изолације

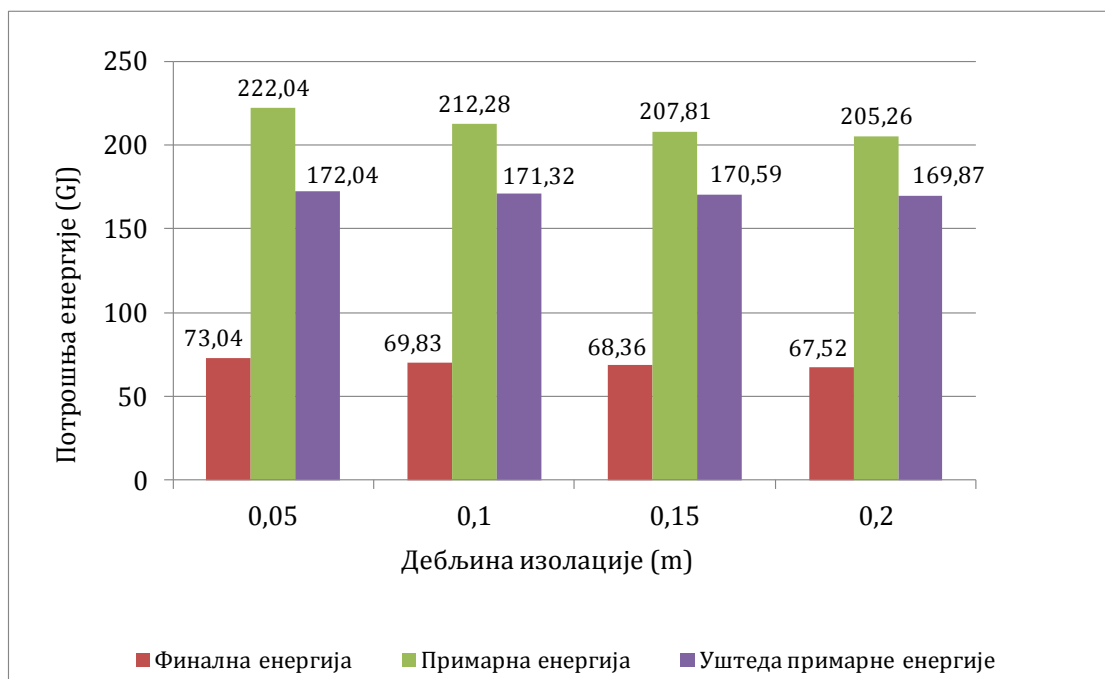
	Дебљина изолације			
	0,05 m	0,1 m	0,15 m - Реф	0,2 m
$E_{EL}$ - Укупна потрошња електричне енергије (GJ)	73,04	69,83	68,36	67,52
$E_{EL,PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	222,04	212,28	207,81	205,26
Удео ФН панела на крову (%)	91,25	91,25	91,25	91,25
Генерисана електрична енергија (GJ)	48,48	48,48	48,48	48,48
Генерисана топл. енергија (GJ)	14,19	14,19	14,19	14,19
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)	190,51	190,51	190,51	190,51
$E_{PRIM}$ – уштеда примарне енергије (GJ)	172,04	171,32	170,59	169,87
Уграђена енергија соларних система (GJ)	17,75	17,75	17,75	17,75
Уграђена енергија изолације (GJ)	0,72	1,44	2,17	2,89
$E_{PV,S}$ - Вишак електричне енергије (GJ)	32,32	32,79	33,02	33,15
$E_{P,NET}$ - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	10,95	7,74	6,27	5,43
$E_P$ - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	43,27	40,53	39,29	38,58
<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>

У свим случајевима, без обзира на вредност дебљине изолације, испитиване зграде су биле нето-негативне потрошње енергије (NNEB) по оба критеријума. Вредност генерисане електричне и топлотне енергије није била довољна за задовољење њихових енергетских потреба.

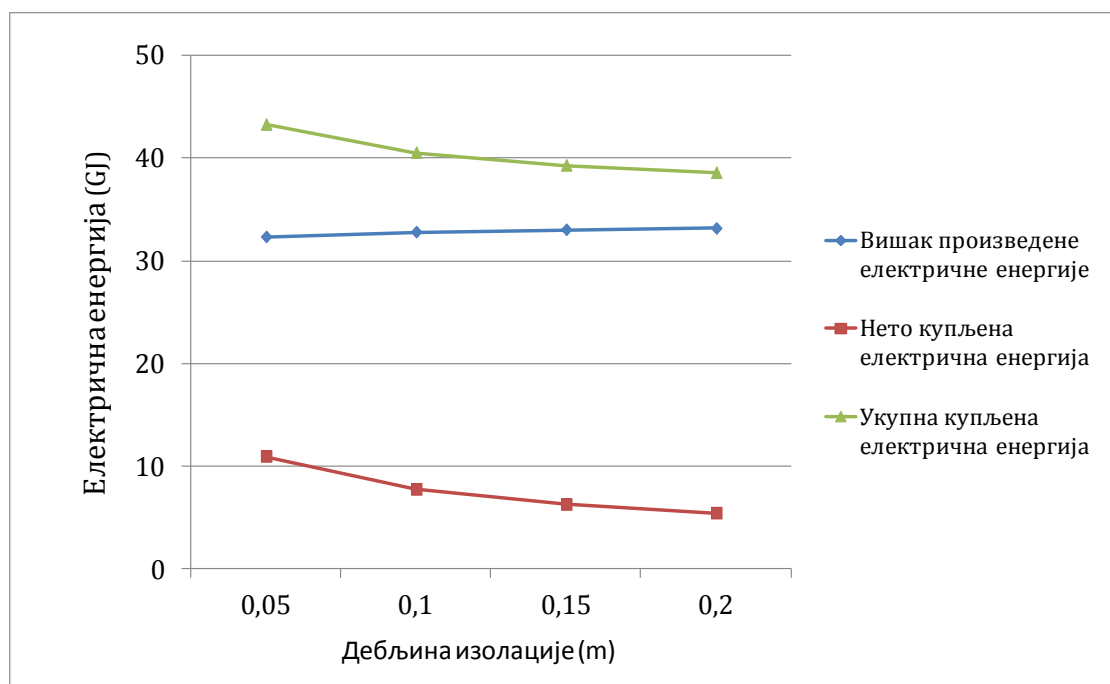
Удео фотонапонских панела на крову је у свим случајевима био исти и износио је 91,25 %, што значи да је 73,6 m<sup>2</sup> површине крова прекривено са ФН панелима. Други део крова од 8,75 % површине, тј. 7 m<sup>2</sup> прекривен је соларним колекторима. Оптимизацијом је добијен овај однос површина ФН панела и колектора као најоптималнији за задовољење потреба зграде за електричном енергијом. Са овим односом површина соларних система, годишње се генерише 48,48 GJ електричне енергије и 14,19 GJ топлотне енергије која се користи за грејање воде у домаћинству. Остатак енергетских потреба се надокнађује куповином енергије из електро-дистрибутивног система.



Уштеда тј. максимална избегнута потрошња примарне енергије инсталирањем соларних система на зграду и уградњом изолације опада са порастом дебљине изолације, услед пораста сопствене енергије изолације. Слика 9.2 даје графички приказ потрошње финалне и примарне енергије, као и уштеду примарне енергије за различите дебљине изолације.



Слика 9.2 –Годишња потрошња финалне и примарне енергије и уштеда примарне енергије за различите дебљине изолације



Слика 9.3 – Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом дебљином изолације

У Табели 9.2 дат је и вишак произведене електричне енергије који се продаје електро-дистрибутивној мрежи ( $E_{PV,S}$ ), нето количина купљене електричне енергије ( $E_{P,NET}$ ) и укупна количина купљене електричне енергије ( $E_P$ ) на годишњем нивоу, у GJ, за већ анализирани случајеви зграде са различитом дебљином изолације. Може се закључити да са порастом дебљине изолације расте количина електричне енергије која се као вишак произведене енергије продаје мрежи. Истовремено опада нето количина купљене електричне енергије, као и укупна количина купљене енергије. Разлог је у мањим енергетским потребама код зграда са дебљим изолационим слојем. Графички приказ ових резултата дат је на Слици 9.3.

### Различита потрошња топле воде у згради

Код ових анализа енергетског понашања зграде варирана је потрошња топле воде. Истраживана зграда је имала изолациони слој дебљине 0,15 m. У референтном случају месечна потрошња топле воде је била 11,5 m<sup>3</sup>. Та потрошње је адекватна потрошњи топле воде просечне четворочлане породице за месец дана, ако се има у виду да је просечна укупна месечна потрошња воде по члану домаћинства 5 m<sup>3</sup>. Анализирани су случајеви са месечном потрошњом топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>. Услед различите потрошње топле воде, била је потребна и различита количина енергије за њено загревање. Мала разлика у односу на референтни случај је била и код потрошње енергије електричних уређаја. Зато је и укупна потрошња енергије различита. У Табели 9.3 дат је детаљан приказ потрошње електричне енергије у згради, по ставкама, за све анализирани случајеви. Види се да са порастом месечне потрошње топле воде расте укупна потрошња финалне енергије у згради.

**Табела 9.3** – Детаљна годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности потрошње топле воде

Потрошња електричне енергије (GJ)	Потрошња топле воде			
	8 m <sup>3</sup>	11,5 m <sup>3</sup> - Реф	19 m <sup>3</sup>	27 m <sup>3</sup>
Грејање	38,16	38,16	38,16	38,16
Расвета	1,02	1,02	1,02	1,02
Електрични уређаји	6,28	6,29	6,32	6,35
Грејање воде	19,08	22,89	32,52	42,32
<b>УКУПНО</b>	<b>64,54</b>	<b>68,36</b>	<b>78,02</b>	<b>87,85</b>

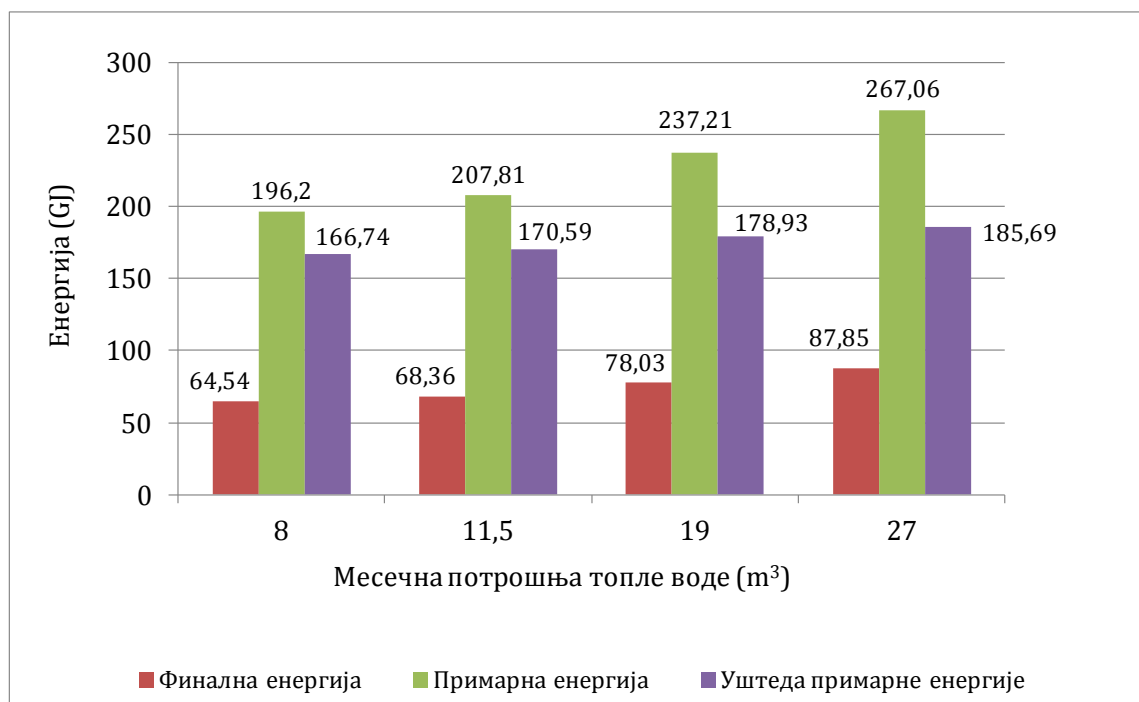
Резултати потрошње примарне енергије добијени симулацијом и оптимизацијом, као и генерисана енергија помоћу соларних система дати су у Табели 9.4. Такође је приказан и удео ФН панела на крову, максимална уштеда примарне енергије, уграђене енергије и тип зграде.

На слици 9.4 дат је приказ потрошње финалне енергије, примарне енергије и уштеде примарне енергије за зграде са различитом месечном потрошњом топле воде. Са порастом потрошње топле воде расте и уштеда примарне енергије. За потрошње топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup> уштеда примарне енергије је износила 166,74 GJ, 170,59 GJ, 178,93 GJ и 185,69 GJ, респективно или у односу на најнижу потрошњу у процентима, 2,4 %, 7,2 % и 11,4 % респективно. Графички приказ ових резултата дат је на Слици 9.5.

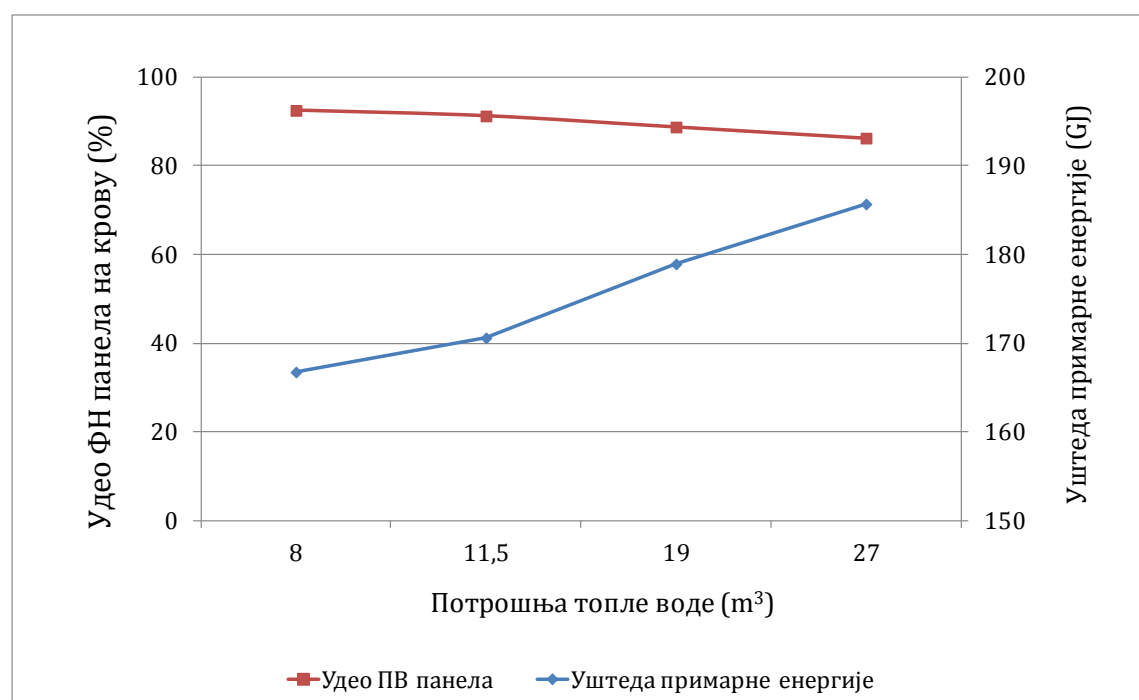
**Табела 9.4** – Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитом потрошњом топле воде

	Потрошња топле воде (m <sup>3</sup> )			
	8	11,5 - Реф	19	27
$E_{EL}$ - Укупна потрошња електричне енергије (GJ)	64,54	68,36	78,03	87,85
$E_{EL,PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	196,2	207,81	237,21	267,06
Удео ФН панела на крову (%)	92,5	91,25	88,75	86,25
Генерисана електрична енергија (GJ)	49,14	48,48	47,15	45,82
Генерисана топл. енергија (GJ)	12,28	14,19	18,23	21,74
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)	186,71	190,51	198,74	205,39
$E_{PRIM}$ – уштеда примарне енергије (GJ)	166,74	170,59	178,93	185,69
Уграђена енергија соларних система (GJ)	17,81	17,75	17,64	17,53
Уграђена енергија изолације (GJ)	2,17	2,17	2,17	2,17
$E_{PV,S}$ - Вишак електричне енергије (GJ)	34,14	33,02	30,79	28,41
$E_{P,NET}$ - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	2,61	6,27	13,01	22,11
$E_P$ - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	36,75	39,29	43,80	50,52
<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>

Из добијених резултата види се да су све зграде NNEB по оба критеријума. Удео ФН панела на крову опада са порастом потрошње топле воде, што значи да се повећава удео соларних колектора. За потрошњу топле воде од 8 m<sup>3</sup> удео ФН панела износи 92,5 %, тј. на крову је инсталиран ФН систем на површини од 74,6 m<sup>2</sup> док је осталих 6 m<sup>2</sup> крова прекривено соларним колекторима. За потрошњу топле воде од 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>, инсталирани фотонапонски системи заузимају површине крова од 73,6 m<sup>2</sup>, 71,6 m<sup>2</sup> и 69,6 m<sup>2</sup> респективно, а соларни колектори заузимају површине од 7 m<sup>2</sup>, 9 m<sup>2</sup> и 11 m<sup>2</sup>, респективно.

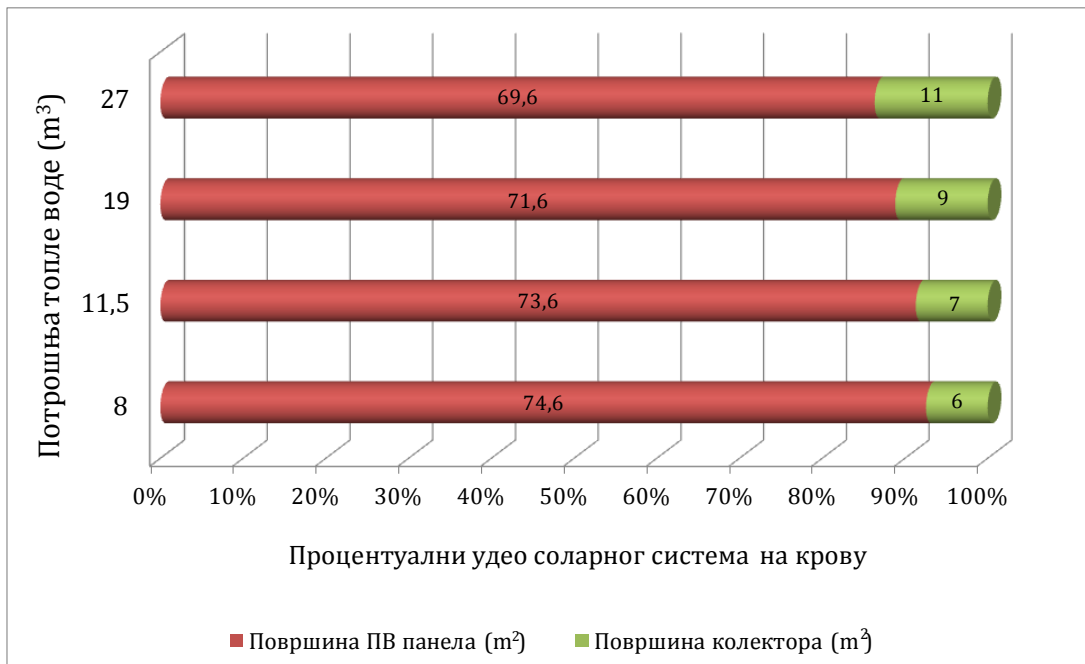


Слика 9.4 –Годишња потрошња финалне и примарне енергије и уштеда примарне енергије за различиту потрошњу топле воде



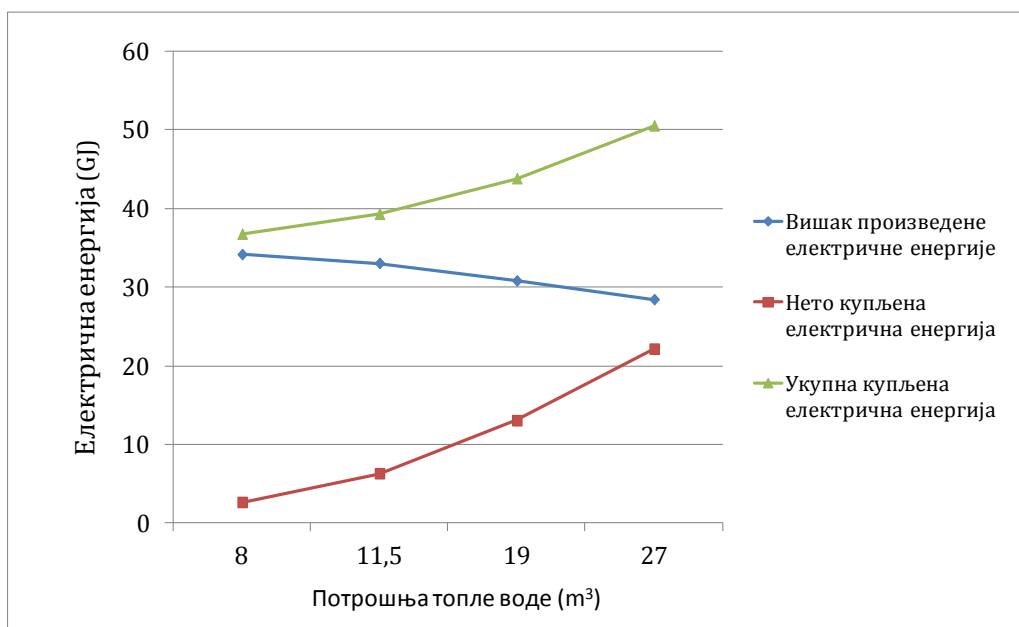
Слика 9.5 –Графички приказ односа удела фотонапонских панела и уштеде примарне енергије за различиту потрошњу топле воде

Слика 9.6 даје приказ односа површина фотонапонских панела и соларних колектора инсталираних на крову зграде, а за различите вредности месечне потрошње топле воде у згради.



**Слика 9.6** – Графички приказ односа површина фотонапонских панела и соларних колектора на крову, за различиту потрошњу топле воде

Табела 9.5 даје и нумерички приказ вишка произведене електричне енергије, нето количине купљене електричне енергије и укупне количине купљене електричне енергије на годишњем нивоу, у GJ, за анализирани зграде са различитом месечном потрошњом топле воде. Види се да са порастом потрошње топле воде опада количина електричне енергије која се као вишак продаје мрежи, и то у односу на најмању потрошњу топле воде за 3,4 %, 10,9 % и 20,2 %, респективно.



**Слика 9.7** – Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом потрошњом топле воде

Истовремено расте нето купљена електрична енергија, као и укупна количина купљене енергије, јер су са порастом потрошње топле воде веће и енергетске

потребе. За потрошњу топле воде од 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>, пораст величине купљене енергије је 6,4 %, 19,2 % и 37,5 % респективно, у односу на најмању потрошњу топле воде од 8 m<sup>3</sup> месечно. Графички приказ ових резултата дат је на Слици 9.7.

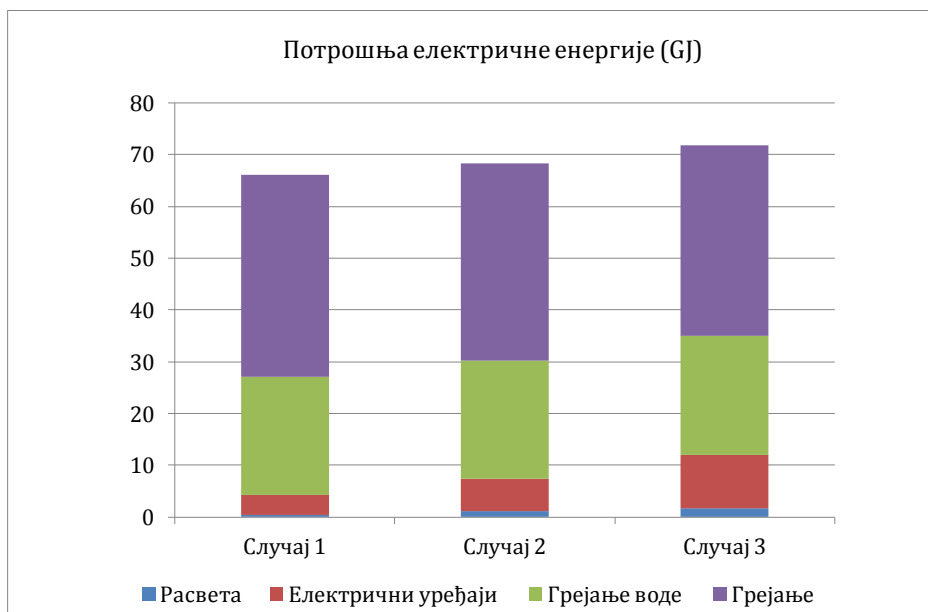
### Различита потрошња електричне енергије расвете и електро-уређаја

Код ових симулација варирана је потрошња електричне енергије расвете и електричних уређаја. Референтна зграда има годишњу потрошњу електричне енергије за расвету 1,02 GJ и за електричне уређаје 6,29 GJ (Случај 2). При симулацијама разматран је најпре случај смањене потрошње електричне енергије (расвета 0,4 GJ и електрични уређаји 3,81 GJ – Случај 1) а потом и случај повећане потрошње електричне енергије (расвета 1,68 GJ и електрични уређаји 10,36 GJ – Случај 3). У Табели 9.5 дат је приказ потрошње електричне енергије у згради, за све случајеве.

**Табела 9.5** – Детаљна годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности потрошње електричне енергије расвете и електро-уређаја

Потрошња електричне енергије (GJ)			
	Случај 1	Случај 2 - Реф	Случај 3
Грејање	38,95	38,16	36,95
Расвета	0,40	1,02	1,68
Електрични уређаји	3,81	6,29	10,36
Грејање воде	22,89	22,89	22,89
<b>УКУПНО</b>	<b>66,05</b>	<b>68,36</b>	<b>71,88</b>

У односу на најмању потрошњу електричне енергије, Укупна потрошња финалне енергије је већа за 3,5 % и 8,8 % респективно, за случај 2 и 3. Слика 9.8 даје графички приказ потрошње електричне енергије за сва 3 случаја.



**Слика 9.8** – Годишња потрошња електричне енергије у зградама са различитом потрошњом електричне енергије

**Табела 9.6** – Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за зграде са различитом потрошњом електричне енергије

	Различита потрошња ел. енергије		
	Случај 1	Случај 2- Реф	Случај 3
$E_{EL}$ - Укупна потрошња електричне енергије (GJ)	66,05	68,36	71,88
$E_{EL,PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	170,59	207,81	218,45
Удео ФН панела на крову (%)	91,25	91,25	91,25
Генерисана електрична енергија (GJ)	48,48	48,48	48,48
Генерисана топл. енергија (GJ)	14,19	14,19	14,19
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)	190,51	190,51	190,51
$E_{PRIM}$ – уштеда примарне енергије (GJ)	170,59	170,59	170,59
Уграђена енергија соларних система (GJ)	17,75	17,75	17,75
Уграђена енергија изолације (GJ)	2,17	2,17	2,17
$E_{PV,S}$ - Вишак електричне енергије (GJ)	34,16	33,02	31,27
$E_{P,NET}$ - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	3,99	6,27	9,78
$E_P$ - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	38,15	39,29	41,05
<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>

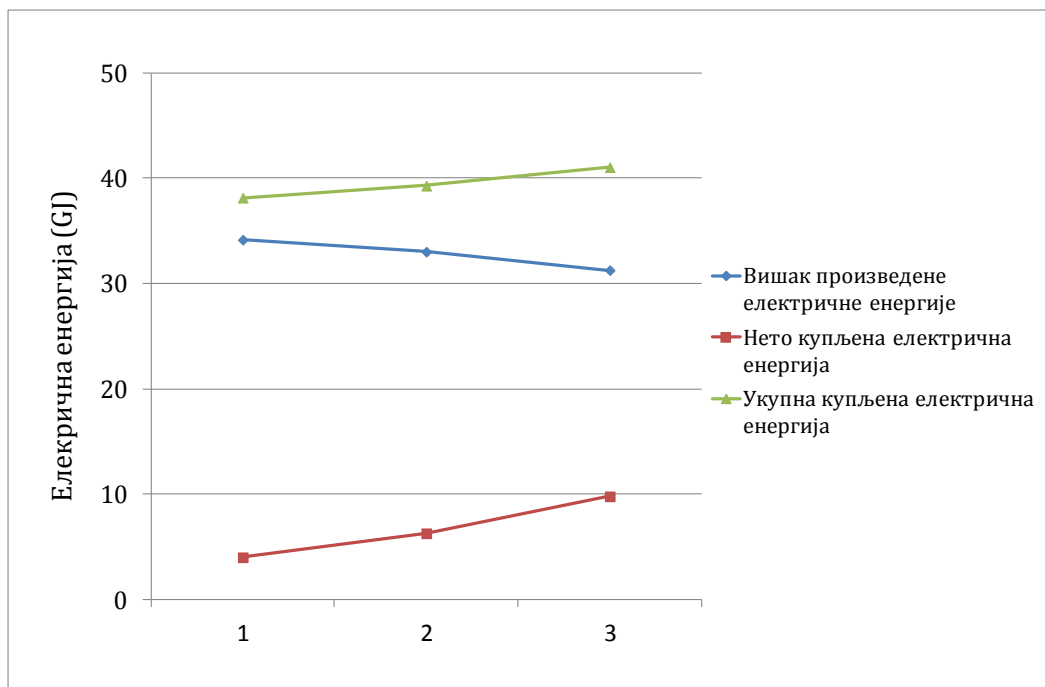
Из Табеле 9.6 се види да су све зграде NNEB по оба критеријума. Са порастом потрошње електричне енергије расвете и електро-уређаја, већа је укупна потрошња електричне енергије, а самим тим и утрошена примарна енергија.

Удео фотонапонских панела на крову је у свим случајевима био исти (91,25 %), што значи да је 73,6 m<sup>2</sup> површине крова прекривено са ФН панелима, 7 m<sup>2</sup> прекривено је соларним колекторима. Овај однос површина ФН панела и колектора је најоптималније решење за задовољење свих енергетских потреба зграде. Због истог односа површина ФН панела и соларних колектора и уштеда тј. максимална избегнута потрошња примарне енергије је иста у свим случајевима. Слика 9.9 приказује потрошње финалне и примарне енергије и уштеду примарне енергије за различите случајеве потрошње електричне енергије.



**Слика 9.9** – Годишња потрошња финалне и примарне енергије, и уштеда примарне енергије за зграде са различитом потрошњом електричне енергије

Што се тиче вишка произведене електричне енергије, нето количине купљене електричне енергије и укупне количине купљене електричне енергије, што је већа потрошња електричне енергије, већа је количина нето и укупне купљене електричне енергије, а вишак електричне енергије који се продаје мрежи је мањи услед повећања енергетских потреба и то за 3,5 % и 9,2 % респективно за случај 1 и случај 2 – Слика 9.10.



**Слика 9.10** – Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом потрошњом електричне енергије (Случајеви 1, 2 и 3)



## Различит животни век инсталираних соларних система

У овој групи симулација вариран је животни век соларних система инсталираних на испитиваној згради. Као што је већ раније речено, у референтном случају сматрано је да је животни век фотонапонских система и соларних колектора 20 година. Током истраживања, овај параметар је вариран, и разматрани су случајеви животног века од 15 год., 25 год. и 30 год. Годишња потрошња електричне енергије за све случајеве је била једнака потрошњи енергије за референтни случај - 68,36 GJ, чему одговара потрошња примарне енергије од 207,81 GJ.

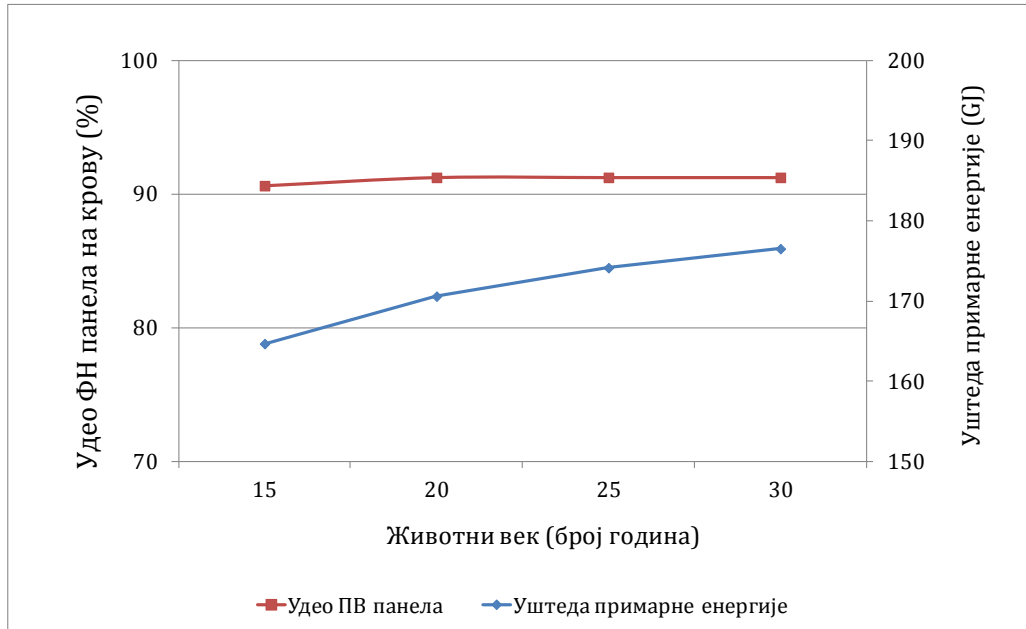
Са променом животног века соларних система долази и до промене њихове уграђене енергије, тако да се мења и уштеда примарне енергије. Резултати добијени симулацијама дати су у Табели 9.7.

**Табела 9.7** – Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитим животним веком соларних система

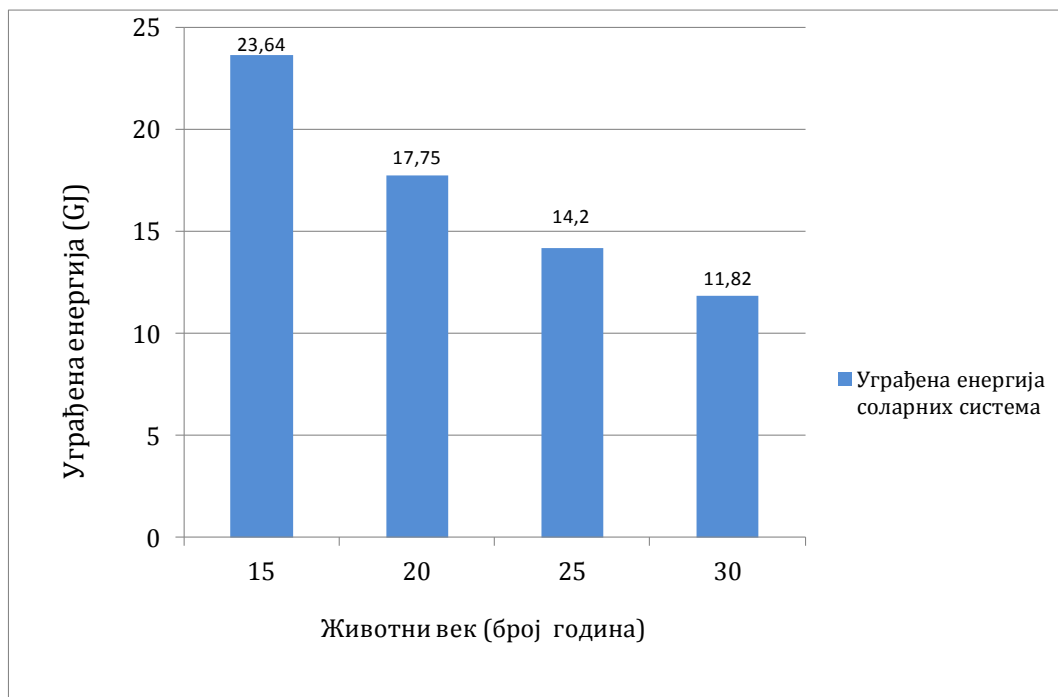
	Животни век соларних система (год)			
	15	20 - Реф	25	30
$E_{EL}$ - Укупна потрошња електричне енергије (GJ)	68,36	68,36	68,36	68,36
$E_{EL,PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	207,81	207,81	207,81	207,81
Удео ФН панела на крову (%)	90,63	91,25	91,25	91,25
Генерисана електрична енергија (GJ)	48,15	48,48	48,48	48,48
Генерисана топл. енергија (GJ)	14,51	14,19	14,19	14,19
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)	190,49	190,51	190,51	190,51
$E_{PRIM}$ - уштеда примарне енергије (GJ)	164,67	170,59	174,14	176,52
Уграђена енергија соларних система (GJ)	23,64	17,75	14,2	11,82
Уграђена енергија изолације (GJ)	2,17	2,17	2,17	2,17
$E_{PV,S}$ - Вишак електричне енергије (GJ)	32,77	33,02	33,02	33,02
$E_{P,NET}$ - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	6,34	6,27	6,27	6,27
$E_P$ - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	39,11	39,29	39,29	39,29
<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>

Из добијених резултата види се да су и ове зграде NNEB по оба критеријума.

Удео ФН панела на крову је нешто мањи за животни век од 15 година, и износи 90,63%, што значи да је на крову инсталиран ФН систем површине 73 m<sup>2</sup> док је осталих 7,6 m<sup>2</sup> крова прекривено соларним колекторима. За животни век од 20, 25 и 30 год. удео фотонапонских панела на крову је био као у референтном случају – 91,25%, (површина ФН панела 73,6 m<sup>2</sup> а соларних колектора 7 m<sup>2</sup>).



Слика 9.11 –Графички приказ односа удела фотонапонских панела и уштеде примарне енергије за различит животни век соларних система



Слика 9.12 –Графички приказ годишње вредности уграђене енергије соларних система за њихов различит животни век

Уштеда примарне енергије за животног века од 15, 20, 25 и 30 год. респективно, износила је 164,67 GJ, 170,59 GJ, 174,14 GJ и 176,52 GJ (Слика 9.11). Изражено у процентима, за животног века од 20, 25 и 30, уштеда примарне енергије је већа за 3,6%, 5,8% и 7,2 %, респективно, у односу на најмањи животног века од 15 година. Може се закључити да са порастом животног века соларних система, долази до раста уштеде примарне енергије.

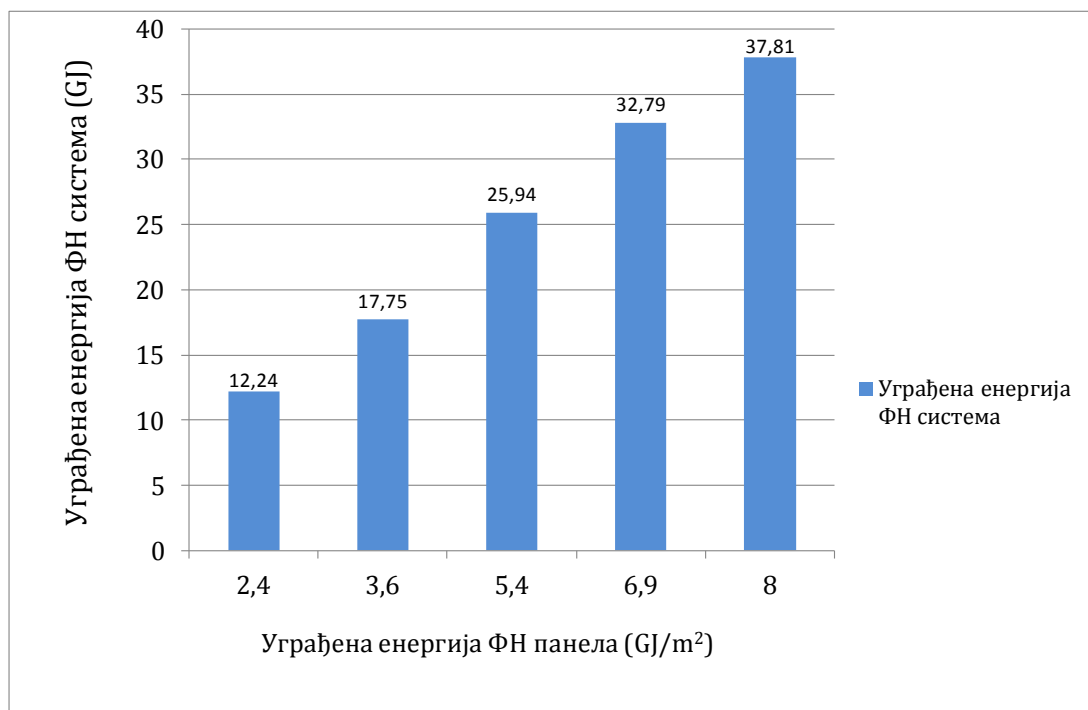
Слика 9.12 даје приказ уграђене енергије соларних система за животног века од 15, 20, 25 и 30 година. Закључак је да је за мању дужину животног века, уграђена енергија соларних система већа.

Са порастом животног века долази до веома малог пораста вишка произведене електричне енергије и укупне количине купљене електричне енергије, док нето количине купљене електричне енергије има благи пад.

### Различите врсте фотонапонских панела

Различите врсте фотонапонских панела су симулиране променом њихове уграђене (сопствене) енергије. Уграђена енергија ФН панела је мењана на референтном случају током оптимизационог процеса, чија уграђена енергија је износила 3,6 GJ/m<sup>2</sup>, тако да се укупна годишња потрошња енергије у згради није мењала (68,36 GJ финалне енергије, тј. 207,81 GJ примарне енергије).

Симулације су рађене за случајеве уграђене енергије ФН система од 2,4 GJ/m<sup>2</sup>, 3,6 GJ/m<sup>2</sup>, 5,4 GJ/m<sup>2</sup>, 6,9 GJ/m<sup>2</sup> и 8 GJ/m<sup>2</sup>. Вредности годишње уграђене енергије ФН система су приказане графички на Слици 9.13.



**Слика 9.13** –Графички приказ годишње вредности уграђене енергије ФН система за различите вредности њихове уграђене енергије

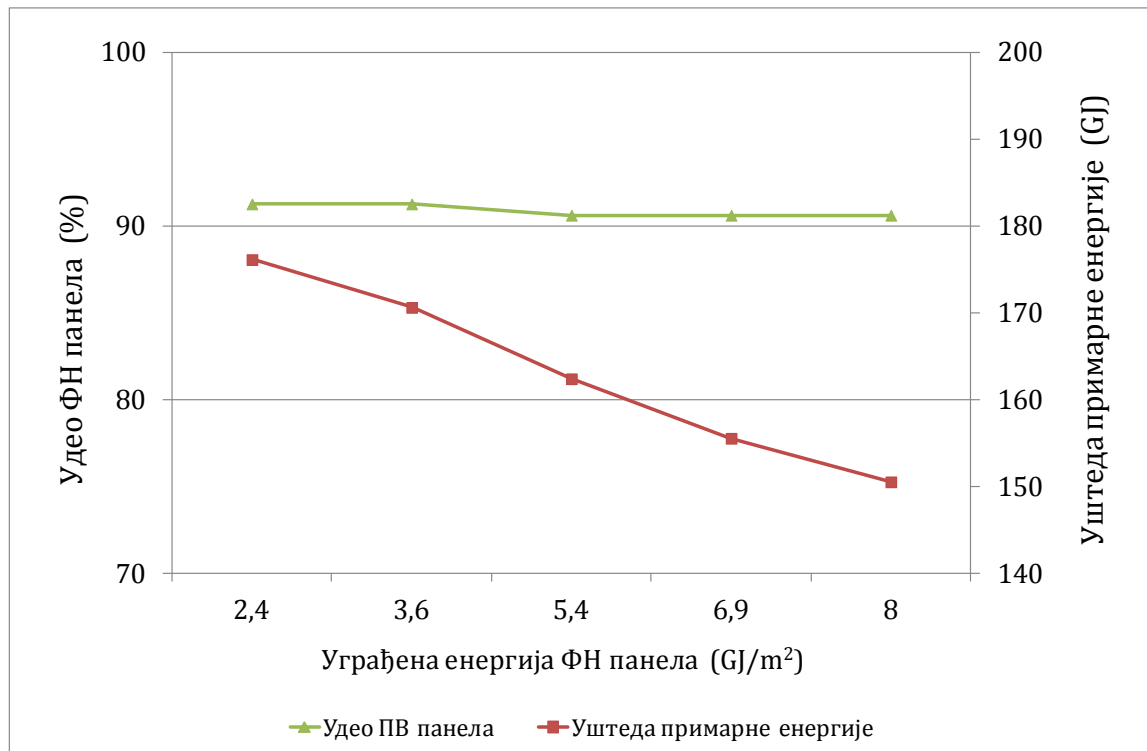
Резултати енергетске оптимизације дати су у Табели 9.8. Из приказаног се може закључити да уколико уграђена енергија фотонапонског система расте, уштеда примарне енергије опада. У односу на референтни случај, применом панела са мањом уграђеном енергијом од  $2,4 \text{ GJ/m}^2$  би довела до повећања уштеде примарне енергије за 3,3 %. Са друге стране, употреба ФН панела са већом уграђеном енергијом од референтне -  $5,4 \text{ GJ/m}^2$ ,  $6,9 \text{ GJ/m}^2$  и  $8 \text{ GJ/m}^2$ , довела би до смањења уштеде примарне енергије и то за 4,8 %, 8,8 % и 11,8 %, респективно.

**Табела 9.8** – Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитом уграђеном енергијом фотонапонског система

	Уграђена енергија ФН система ( $\text{GJ/m}^2$ )				
	2,4	3,6 - Реф	5,4	6,9	8
$E_{EL}$ - Укупна потрошња ел. енергије (GJ)	68,36	68,36	68,36	68,36	68,36
$E_{EL,PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	207,81	207,81	207,81	207,81	207,81
Удео ФН панела на крову (%)	91,25	91,25	90,6	90,6	90,6
Генерисана електрична енергија (GJ)	48,15	48,48	48,15	48,15	48,15
Генерисана топл. енергија (GJ)	14,19	14,19	14,51	14,51	14,51
Примарна енергија генерисане ен. (GJ)	190,51	190,51	190,48	190,48	190,48
$E_{PRIM}$ - уштеда примарне енергије (GJ)	176,1	170,59	162,37	155,52	150,5
Уграђена енергија соларних система (GJ)	12,24	17,75	25,94	32,79	37,81
Уграђена енергија изолације (GJ)	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17
$E_{PV,S}$ - Вишак електричне енергије (GJ)	33,02	33,02	32,77	32,77	32,77
$E_{P,NET}$ - Нето-купљена ел. енергија (GJ)	6,27	6,27	6,34	6,34	6,34
$E_P$ - Укупна купљена ел. енергија (GJ)	39,29	39,29	39,11	39,11	39,11
<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>

Процентуални удео фотонапонских панела на крову у случају пораста уграђене енергије, је у овом случају у веома малом опадању. За вредности уграђене

енергије испод  $5 \text{ GJ/m}^2$ , удео ФН панела је износио 91,25 % (као и у референтном случају), а за вредности уграђене енергије веће од  $5 \text{ GJ/m}^2$ , удео ФН панела је износио 90,6 %. Наведени подаци за удео ФН панела и уштеду примарне енергије су приказани на Слици 9.14.



**Слика 9.14** –Графички приказ односа удела фотонапонских панела и уштеде примарне енергије за различиту вредност уграђене енергије ФН система

Када се посматра вишак електричне енергије који се продаје дистрибутивној мрежи и купљена електрична енергија, може се рећи да са порастом уграђене енергије фотонапонских система, вишак генерисане електричне енергије опада. Нето купљена електрична енергија је у овом случају у благом порасту, тако да укупна количине купљене електричне енергије има тренд благог опадања.

### Различита ћелијска ефикасност фотонапонских модула

Анализирани су случајеви различите ефикасности инсталираних фотонапонских панела. Референтни случај је симулиран са ћелијском ефикасношћу модула од 12 %, а вршена је симулација и оптимизација за ћелијску ефикасност ФН модула од 14 % и 16 %. И у овим истрживањима укупна годишња потрошња енергије у згради се није мењала (68,36 GJ финалне енергије, тј. 207,81 GJ примарне енергије).

Резултати потрошње примарне енергије, енергије генерисане помоћу соларних система, максимална уштеда примарне енергије, уграђене енергије, удео ФН панела на крову и тип зграде који су добијени симулацијом и оптимизацијом, дати су у Табели 9.9.

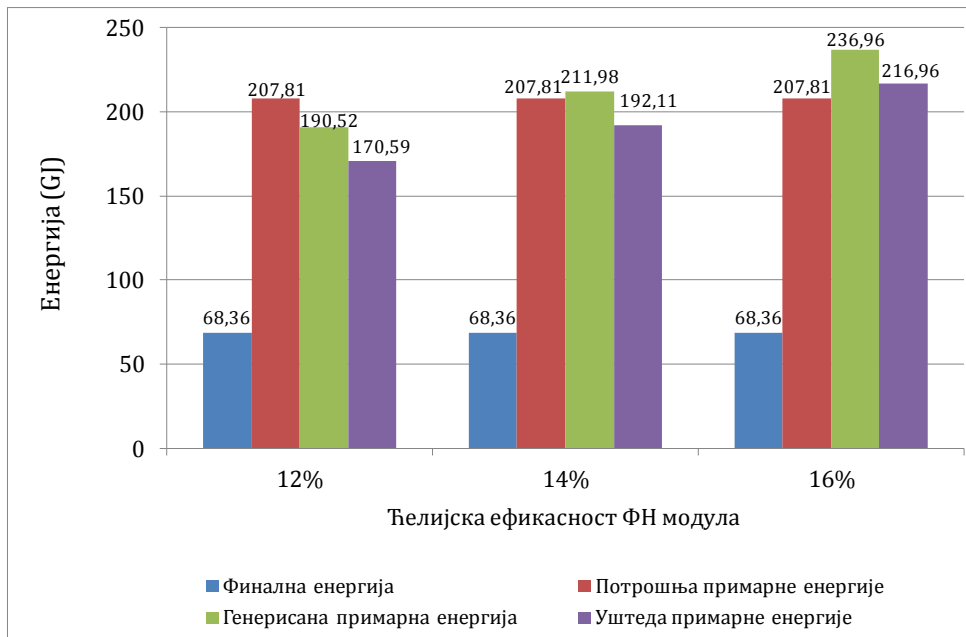
**Табела 9.9** – Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за зграде са различитом ефикасношћу фотонапонских модула

	Ефикасност ФН модула		
	12 % - Реф	14 %	16 %
$E_{EL}$ - Укупна потрошња електричне енергије (GJ)	68,36	68,36	68,36
$E_{EL,PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	207,81	207,81	207,81
Удео ФН панела на крову (%)	91,25	92,5	93,13
Генерисана електрична енергија (GJ)	48,48	57,33	65,96
Генерисана топл. енергија (GJ)	14,19	12,4	11,98
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)	190,51	211,98	236,96
$E_{PRIM}$ – уштеда примарне енергије (GJ)	170,59	192,01	216,96
Уграђена енергија соларних система (GJ)	17,75	17,81	17,83
Уграђена енергија изолације (GJ)	2,17	2,17	2,17
$E_{PV,S}$ - Вишак електричне енергије (GJ)	33,02	40,7	48,35
$E_{P,NET}$ - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	6,27	-1,89	-10,18
$E_P$ - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	39,29	38,82	38,17
<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>PNEB</b>	<b>PNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>PNEB</b>

Из Табеле 9.9 се види да нису све зграде NNEB и да је применом фотонапонских модула са већом ћелијском ефикасношћу могуће постићи концепт зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) и то према оба критеријума. Употребом ФН модула са ћелијском ефикасношћу од 14 %, могуће је постићи концепт зграде нето-позитивне потрошње енергије ако се не узима у обзир уграђена енергија инсталираних соларних система и изолације. Уколико се она узима у обзир, кућа остаје енергетски негативна. Употребом ФН модула са ћелијском ефикасношћу од 16%, при посматраним референтним условима, достиже се концепт нето-позитивне енергетске зграде према оба приступа – са и без уграђене енергије.

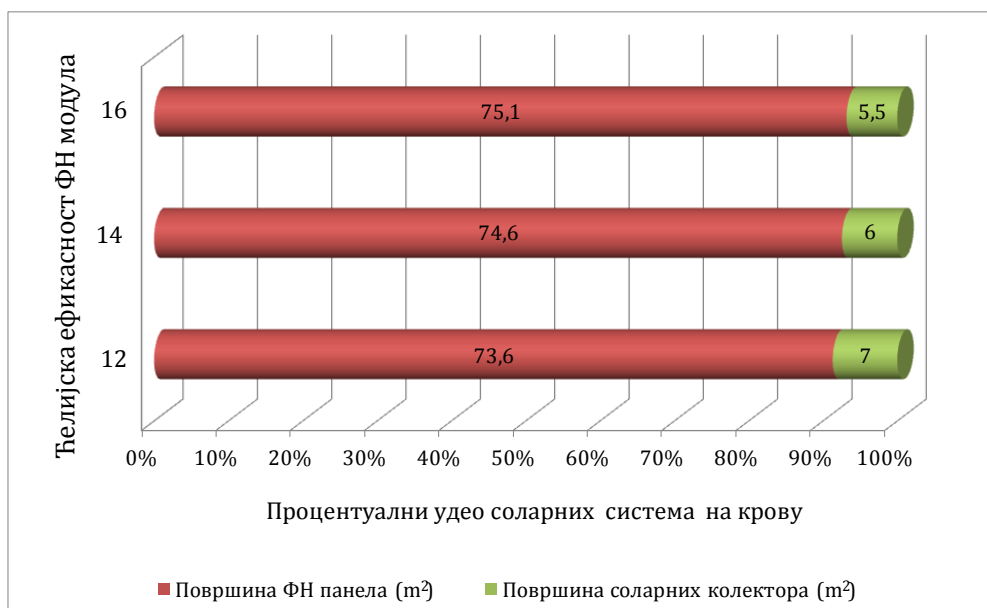
Наиме, употребом модула са ћелијском ефикасношћу од 14 %, генерише се 57,33 GJ електричне енергије, што је у односу на референтни случај (48,48 GJ генерисане електричне енергије), повећање од 8,85 GJ или 18,25 %. Уколико би се употребио ФН модул са ефикасношћу од 16 %, генерисана електрична енергија би износила 65,96 GJ, чиме би се постигло повећање од 17,5 GJ или чак 36 %.

Слика 9.15 приказује потрошње финалне и примарне енергије, примарну енергију генерисане енергије и уштеду примарне енергије и за случајеве примене фотонапонских модула различите ћелијске ефикасности.



Слика 9.15 – Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за ФН модуле различите ефикасности

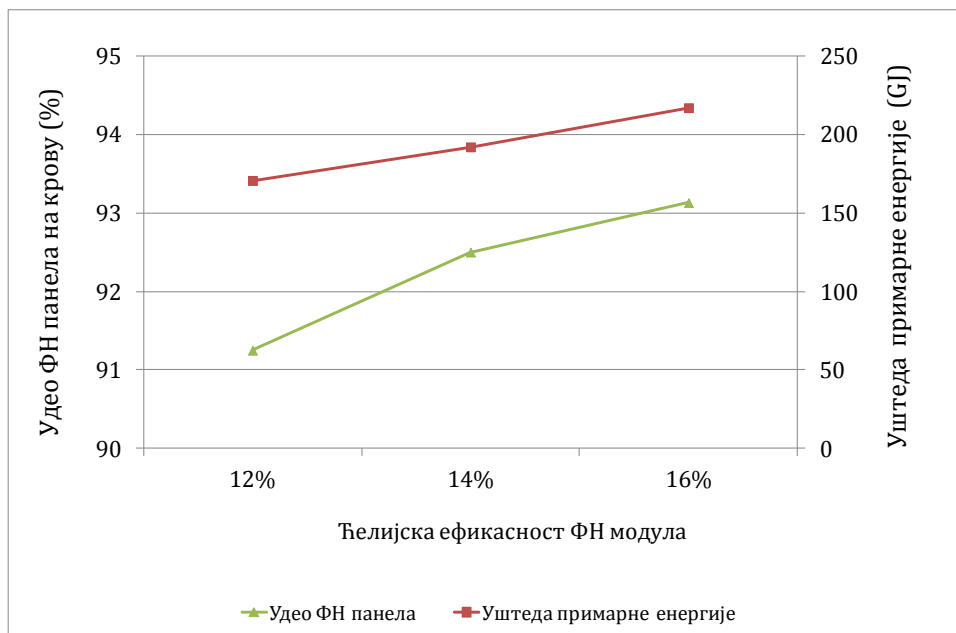
Примарна енергија укупне генерисане енергије употребом модула са ћелијском ефикасношћу од 14 % износи 211,98 GJ, што је у односу на референтни случај (190,52GJ), повећање од 21,46 GJ или 11,26 %. Употребом модула са ћелијском ефикасношћу од 16 %, примарна енергија укупне генерисане енергије износи 236,96GJ, што је у односу на референтни случај повећање од 46,44 GJ или 24,38 %.



Слика 9.16 – Однос површина фотонапонских панела и соларних колектора за различиту ћелијску ефикасност ФН модула

Слика 9.16 даје приказ односа површина ФН панела и соларних колектора, за ФН модуле различите ћелијске ефикасности. Удео ФН панела на крову расте са порастом ћелијске ефикасности фотонапонских модула, а смањује се удео соларних колектора. Удео ФН модула ћелијске ефикасности 14 % је 92,5 %, (одговара површини ФН система од 74,6 m<sup>2</sup> док је осталих 6 m<sup>2</sup> крова прекривено соларним колекторима), а удео модула ћелијске ефикасности 16 % је 93,13 %, (одговара површини ФН система од 75,1 m<sup>2</sup> док је осталих 5,5 m<sup>2</sup> крова прекривено соларним колекторима).

Уштеда примарне енергије за модуле ћелијске ефикасности 12 %, 14 % и 16 %, била је 170,59 GJ, 192,01 GJ и 216,96 GJ, респективно. Изражено у процентима за модуле ћелијске ефикасности 14 % и 16 %, уштеда примарне енергије је већа за 12,6% и 27,2 % респективно у односу на референтни модул ћелијске ефикасности од 12 %. Може се закључити да са порастом ћелијске ефикасности фотонапонских модула, долази до раста уштеде примарне енергије. (Слика 9.17).



**Слика 9.17** – Удео фотонапонских панела и уштеда примарне енергије за различиту ћелијску ефикасност фотонапонских модула

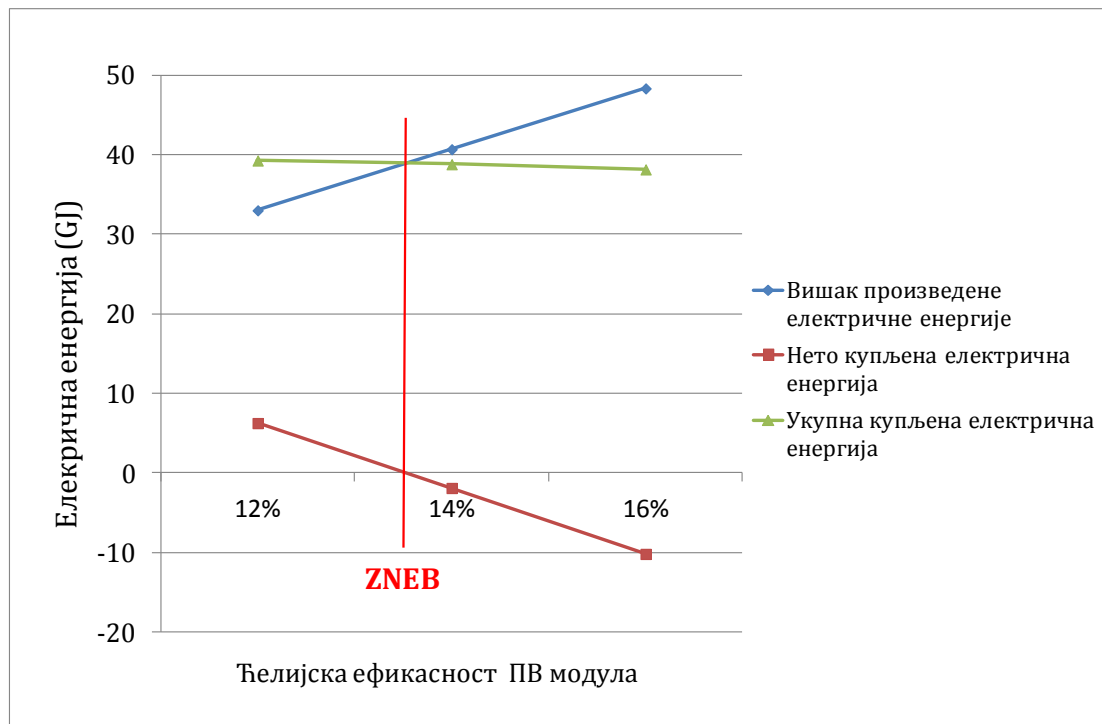
Ако се посматра вишак произведене електричне енергије, нето и укупна количина купљене електричне енергије, што је већа ћелијска ефикасност ФН модула, вишак електричне енергије који се продаје мрежи се рапидно увећава. Употребом модула ћелијске ефикасности, од 14 % и 16 %, вишак електричне енергије који се продаје мрежи у односу на референтну ћелијску ефикасност од 12 % је већи за 7,68 GJ (или 23,25 %) и 15,33 GJ (или 46,43%) респективно.

Због рапидног повећања вишка електричне енергије, аутоматски се значајно смањује нето купљена количина електричне енергије. Тако за случај ћелијске ефикасности ФН панела од 12 %, из електричне мреже се докупљује 6,27 GJ електричне енергије (нето-купљена електрична енергија), тако да је укупна количина купљене електричне енергије 39,29 GJ. За случај ћелијске ефикасности ФН модула од 14 %, из електричне мреже се не докупљује додатна електрична енергија, јер су енергетске потребе зграде мање од вишка електричне енергије који је продат мрежи. Зато је нето количина купљене енергије негативна (-1,89 GJ), што значи да је укупна купљена електрична енергија за 1,89 GJ мања од вишка електричне енергије



продате мрежи, тј. њен износ је 38,82 GJ. За примену ФН модула ћелијске ефикасности 16 %, укупна купљена електрична енергија за 10,18 GJ мања од вишка електричне енергије продате мрежи, тј. она износи 38,17 GJ. Све наведено значи да се у овим случајевима може говорити о ДОБИТИ ФИНАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ, која за ћелијске ефикасности ФН модула од 14 % и 16 % износи 1,89 GJ и 10,18 GJ, респективно.

На Слици 9.18 дат је приказ вишка електричне енергије продате мрежи и купљене електричне енергије из мреже.



**Слика 9.18** – Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом ћелијском ефикасношћу фотонапонских модула

Са Сlike 9.18 се може закључити да би се концепт зграде са нето-нултом потрошњом електричне енергије могао достићи применом ФН модула са ћелијском ефикасношћу од 13,5 %. У том случају укупна количина купљене електричне енергије једнака је вишку произведене енергије која се продаје електро-дистрибутивној мрежи, а нето купљена количина енергије је једнака 0.

За вредности ћелијске ефикасности фотонапонских панела изнад 13,5 %, имали би случај зграде нето-позитивне потрошње енергије. То значи да би зграда на годишњем нивоу, преко својих инсталираних соларних система, генерисала више енергије него што јој је потребно за подмирење својих енергетских потреба. Ово се може закључити и са Сlike 9.18, на којој је десно од линије нулте зграде, линија вишка електричне енергије која се продаје мрежи изнад линије укупне купљене електричне енергије. Разлика између вишка и укупне купљене енергије је управо негативна нето купљена енергија.

### 9.1.2 Даљинско и гасно грејање

Нешто повољнији систем грејања, са аспекта потрошње примарне енергије представља даљински систем грејања, а још повољније решење представља систем грејања на гас (гасно грејање). Због нижих фактора конверзије финалне у примарну енергију, код ових врсте грејања, потрошња примарне енергије је значајно мања него код електричног грејања, па се и концепти зграде нето-нулте потрошње енергије и нето-позитивне потрошње енергије могу лако остварити инсталацијом соларних система за генерисање електричне и топлотне енергије. За разлику од система електричног грејања, систем даљинског грејања, који је доста заступљен у урбаним срединама, има значајну емисију штетних гасова у атмосферу, чему се мора посветити доста пажње. Са друге стране, систем гасног грејања је еколошки најповољнији грејни систем. Он има велику предност јер се сагоревање гаса одвија са доста мањом емисијом штетних гасова.

Потрошња електричне енергије код ова два система грејања је значајно мања у односу на систем електричног грејања, јер се у случају примене ових система у стамбеним објектима, електрична енергија користи само за потребе расвете, електричних уређаја и за грејање санитарне топле воде. Циљ оптимизације је био највећа могућа уштеда примарне енергије кроз инсталирање соларних система. Она се може остварити са таквим односом површина ФН система и соларних колектора, при коме се добија највећа могућа количина генерисане енергије. Резултати добијени оптимизацијом варирањем разних параметара (дебљина изолације, потрошња топле воде, потрошња електричне енергије, дужина животног века, различите врсте фотонапонских система, различита хелијска ефикасност ФН модула), су били идентични за систем даљинског грејања и за систем гасног грејања. Ово се односи на удео ФН панела на крову, уштеду примарне енергије, генерисану енергију, уграђену енергију соларних система, вишак електричне енергије и купљену електричну енергију (нето износ и укупну). Разлог за овако нешто је у томе што је генерисана енергија много већа од енергетских потреба зграде.

Из тог разлога ће најпре бити анализирана потрошња енергије код зграде са системом даљинског грејања и системом грејања на гас, а затим ће бити приказани резултати добијени симулацијама и оптимизацијама.

#### **Анализа потрошње енергије у згради са системом даљинског и гасног грејања**

Електрична енергија која се троши на расвету, електричне уређаје и грејање санитарне воде је иста код система даљинског и система гасног грејања. У односу на систем електричног грејања, електрична енергија потребна за расвету и грејање топле воде је иста, док је електрична енергија за рад електричних уређаја у згради нешто већа код даљинског и гасног грејања.

Количина примарне енергије која се троши на грејање зграде разликује се због различитих фактора конверзије финалне у примарну енергију за даљинско и гасно грејање. У том смислу, укупна потрошња примарне енергије ће се разликовати код ових система грејања. У Табели 9.10 дат је детаљан приказ потрошње електричне енергије у згради за референтни случај изолације од 0,15 m. Такође је дата и енергија потребна за грејање оба разматрана случаја грејних система у згради.

У Табели 9.11 дат је приказ потрошње укупне финалне и примарне енергије за оба система грејања.

**Табела 9.10** – Детаљна годишња потрошња електричне енергије у референтној згради и потрошња енергије за грејање

Потрошња електричне енергије (GJ)	Финална	Примарна
Расвета	1,02	
Електрични уређаји	6,91	
Грејање воде	22,89	
УКУПНО	30,82	93,69
<b>Даљинско грејање - енергија (GJ)</b>		
Грејање	38,06	77,25
<b>Гасно грејање - енергија (GJ)</b>		
Грејање	37,52	41,27

**Табела 9.11** – Годишња потрошња финалне и примарне енергије у референтној згради за различите системе грејања

Укупна потрошња енергије (GJ)	Финална	Примарна
Даљинско грејање	68,88	170,94
Гасно грејање	68,34	134,96

### Различита дебљина изолације зграде

Као и код електричног грејања, и код ових истраживања варирана је дебљина слоја изолације у циљу постизања највеће могуће уштеде примарне енергије кроз инсталирање соларних система. Посматрани су исти случајеви дебљина изолационог слоја: 0,05 m, 0,1 m, 0,15 m (референтни случај) и 0,2 m. Потрошња електричне енергије је била иста у свим разматраним случајевима. У Табели 9.12 дат је детаљан приказ потрошње енергије у згради, по ставкама, за различите дебљине изолације, за систем даљинског грејања (ДГ) и за систем гасног грејања (ГГ). Јасно је да са порастом дебљине изолације, опада енергија потребна за грејање због мањих топлотних губитака кроз омотач зграде. Пошто је потрошња електричне енергије константна, то значи да са порастом дебљине изолације, укупна потрошња финалне и примарне енергије опада.

За случај даљинског грејања, у односу на дебљину изолације 0,05 m, употреба изолације дебљине 0,1 m, доводи до уштеде финалне енергије од 3,12 GJ (4%), употреба изолације дебљине 0,15 m, доводи до уштеде финалне енергије од 4,18 GJ (5,7 %), а употреба изолације дебљине 0,2 m допринела би уштеди финалне енергије од 4,93 GJ (6,7 %). Када је у питању уштеда примарне енергије, за наведене дебљине изолација, она би износила 5,84 GJ (3,3 %), 8,5 GJ (5 %) и 10,01 GJ (5,6 %).

За случај гасног грејања, у односу на најмању дебљину изолације од 0,5 m, уштеда финалне енергије је 3,19 GJ (4,4%) за употребу изолације дебљине 0,1 m, 4,16GJ (5,8%) за употребу изолације дебљине 0,15 m и 5,14 GJ (7,1%) за употребу изолације дебљине 0,2 m. Уштеда примарне енергије, за разматране дебљине изолација, износи 3,51 GJ (2,5 %), 4,58 GJ (3,3 %) и 5,66GJ (4,1 %).

**Табела 9.12** – Детаљна годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности дебљине изолације и системе даљинског и гасног грејања

Врста грејања	Потрошња енергије(GJ)	Дебљина изолације			
		0,05 m	0,1 m	0,15 m - Реф	0,2 m
ДГ	$E_{EL}$ - Потрошња електричне енергије	30,82	30,82	30,82	30,82
	$E_{DG}$ - Потрошња енергије за грејање	42,24	39,36	38,06	37,31
	$E_{TOT, DG}$ - Укупна потрошња енергије	73,06	70,18	68,88	68,13
	$E_{TOT, PRIM, DG}$ - Укупна потрошња примарне енергије	179,44	173,6	170,94	169,43
ГГ	$E_{EL}$ - Потрошња електричне енергије	30,82	30,82	30,82	30,82
	$E_{GG}$ - Потрошња енергије за грејање	41,68	38,49	37,52	36,54
	$E_{TOT, GG}$ - Укупна потрошња енергије	72,50	69,31	68,34	67,36
	$E_{TOT, PRIM, GG}$ - Укупна потрошња примарне енергије	139,54	136,03	134,96	133,88

Величине максималне уштеде примарне енергије, удела фотонапонских система на крову, генерисане енергије, уграђене енергије инсталираних система и изолације, као и вредности вишка произведене електричне енергије и купљене електричне енергије (нето и укупне), добијене оптимизационим процесима су биле међусобно потпуно једнаке за систем даљинског и за систем гасног грејања. Оне су дате у Табели 9.13, заједно са укупном потрошњом примарне енергије и енергетским типом зграде.

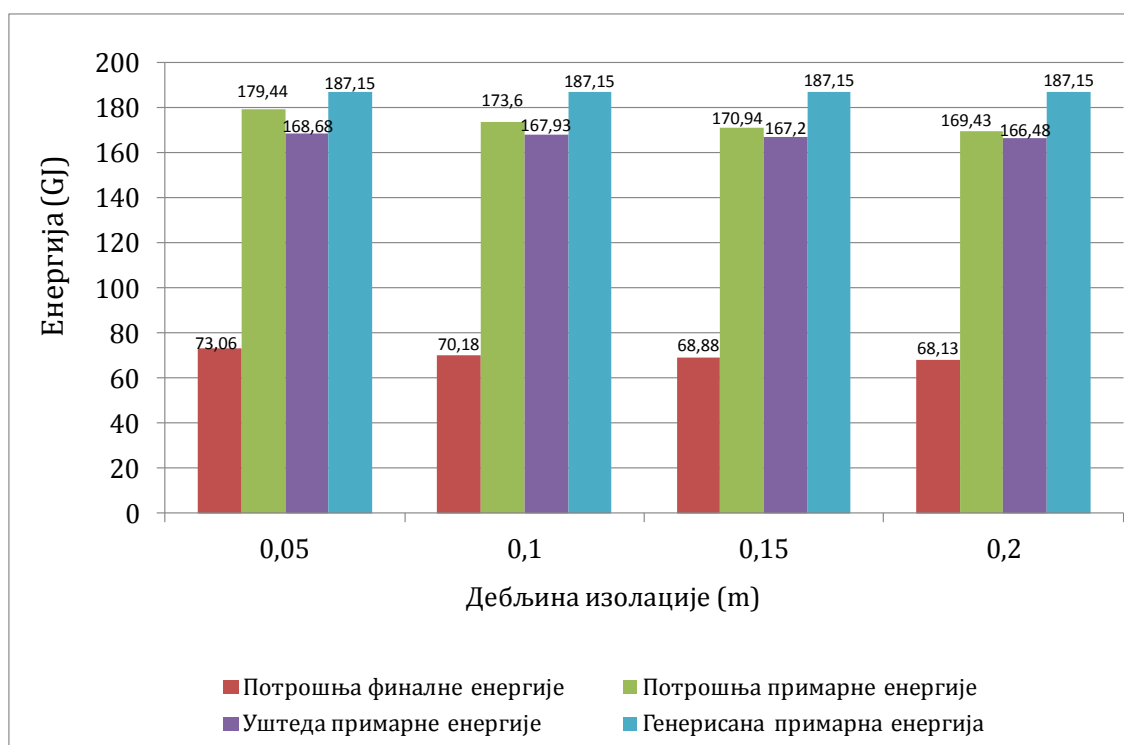
За разлику од зграда са електричним грејањем које су све биле зграде нето-негативне потрошње енергије, симулацијом и оптимизацијом енергетског понашања истовестних зграда са даљинским и гасним системом грејања, долази се до закључка да се могу постићи зграде нето-позитивне потрошње енергије. Код анализе зграда са даљинским системом грејања, ако се посматра потрошња примарне енергије и примарна енергија генерисане енергије (приступ без уграђене енергије соларних система и изолације), може се закључити да су све зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB), за било коју величину дебљине изолације. Ако се тип зграде одређује помоћу приступа са уграђеним енергијама, у том случају све зграде су зграде нето-негативне потрошње енергије (NNEB), за било коју величину дебљине изолације – генерисана енергија не поклапа њихове енергетске потребе. Код анализа зграда са системом грејања на гас, све испитиване зграде су биле зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према оба приступа, за све анализираним дебљине изолације.

**Табела 9.13** – Потрошња примарне енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитом дебљином изолације

		Дебљина изолације			
		0,05 m	0,1 m	0,15 m - P	0,2 m
Удео ФН панела на крову (%)		91,88	91,88	91,88	91,88
Генерисана електрична енергија (GJ)		48,81	48,81	48,81	48,81
Генерисана топлотна енергија (GJ)		12,75	12,75	12,75	12,75
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		187,15	187,15	187,15	187,15
$E_{\text{PRIM}}$ – уштеда примарне енергије (GJ)		168,65	167,93	167,20	166,48
Уграђена енергија соларних система (GJ)		17,78	17,78	17,78	17,78
Уграђена енергија изолације (GJ)		0,72	1,44	2,17	2,89
$E_{\text{PV,S}}$ - Вишак електричне енергије (GJ)		41,62	41,62	41,62	41,62
$E_{\text{P,NET}}$ - Нето-купљена ел. енергија (GJ)		-31,18	-31,18	-31,18	-31,18
$E_{\text{P}}$ - Укупна купљена ел. енергија (GJ)		10,44	10,44	10,44	10,44
ДГ	$E_{\text{TOT, PRIM, DG}}$ - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	179,44	173,6	170,94	169,43
	<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB
	<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	NNEB	NNEB	NNEB	NNEB
ГГ	$E_{\text{TOT, PRIM, GG}}$ - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	139,54	136,03	134,96	133,88
	<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB
	<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB

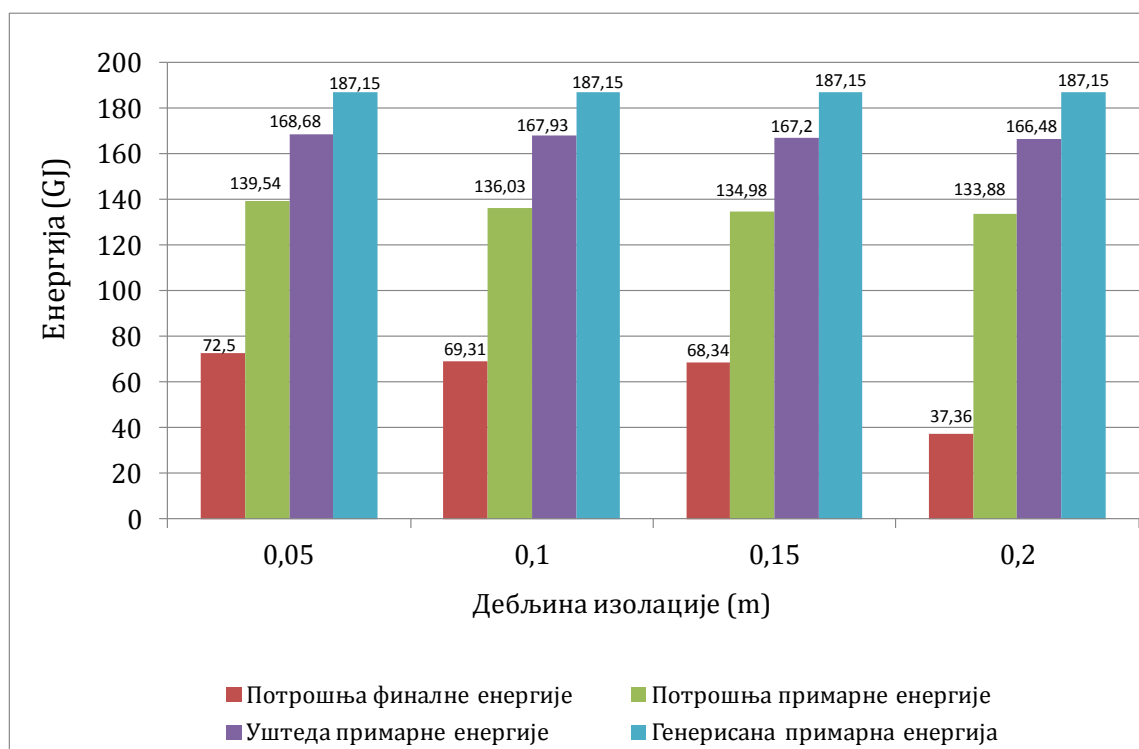
Удео фотонапонских панела на крову у свим случајевима је био исти и износио је 91,88 %, што значи да је 74,1 m<sup>2</sup> површине крова прекривено са ФН панелима, а део крова од 8,12 % површине, тј. 6,5 m<sup>2</sup> прекривен је соларним колекторима. Са овим уделом површина соларних система, годишње се генерише 48,81 GJ електричне енергије и 12,75 GJ топлотне енергије.

Уштеда тј. максимална избегнута потрошња примарне енергије инсталирањем соларних система на зграду и уградњом изолације минимално опада са порастом дебљине изолације, услед пораста уграђене енергије изолације. Слика 9.19 даје графички приказ потрошње финалне и примарне енергије, као и примарну енергију генерисане енергије и уштеду примарне енергије за различите дебљине изолације и систем даљинског грејања.



Слика 9.19 –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са даљинским системом грејања, за различите вредности дебљине изолације

Слика 9.20 даје приказ истих параметара за зграду са системом гасног грејања.



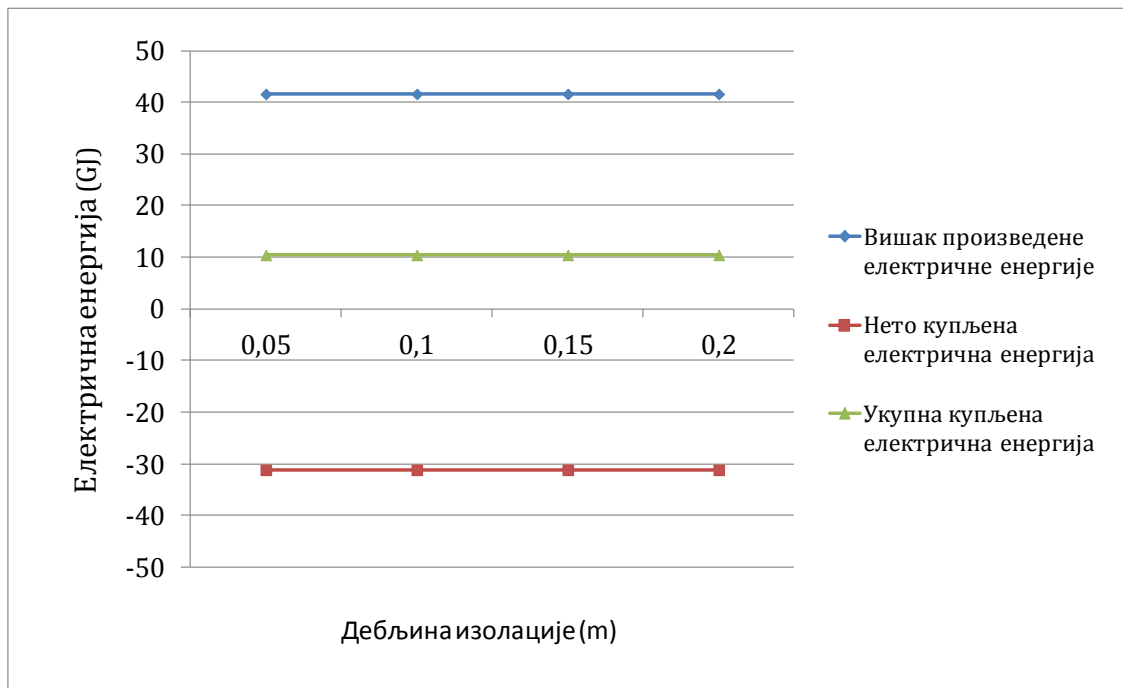
Слика 9.20 –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са гасним системом грејања, за различите вредности дебљине изолације

Вишак произведене електричне енергије који се продаје електро-дистрибутивној мрежи, нето количина купљене електричне енергије и укупна количина купљене електричне енергије на годишњем нивоу у GJ, могу се такође видети у Табели 9.12 за анализирани случајеве зграда са различитом дебљином изолације.

Вишак електричне енергије је исти за оба система грејања и све величине дебљине изолације и износи 41,62 GJ на годишњем нивоу. Нето количина купљене електричне енергије је такође иста за све случајеве испитивања и износи – 31,18 GJ, а укупна количина купљене енергије износи 10,44 GJ. Ово значи да су енергетске потребе анализираних зграда много мање од енергије коју оне могу да генеришу са својим инсталираним соларним системима.

У свим анализираним случајевима зграда, за оба примењена система грејања (даљинско и гасно грејање), ДОБИТ ФИНАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ је износила 31,18 GJ на годишњем нивоу, што одговара годишњој добити од 94,79 GJ примарне енергије.

Слика 9.21 графички представља вишак продате електричне енергије, нето-купљену и укупно купљену електричну енергију за симулациони период од годину дана.



**Слика 9.21** – Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом дебљином изолације (даљинско и гасно грејање)

### Различита потрошња топле воде у згради

Код случаја даљинског и гасног грејања, варирана је потрошња топле воде исто као и у случају електричног грејања – посматране су месечне потрошње топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup> (референтни случај), 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>. Са повећањем потрошње топле воде, расте и количина електричне енергије потребна за њено грејање, а постоји и мало повећање потрошње електричне енергије потребне за рад електричних уређаја. Све ово резултирало је различитом потрошњом електричне

енергије, која је дата у Табели 9.14. У овој табели је дата и енергија потребна за грејање зграде применом система даљинског и гасног грејања, као и укупна потрошња примарне енергије у згради на годишњем нивоу. Енергија потребна за грејање зграде остала је једнака вредности у референтном случају, јер није било никаквих утицаја који би могли да изазову њену промену.

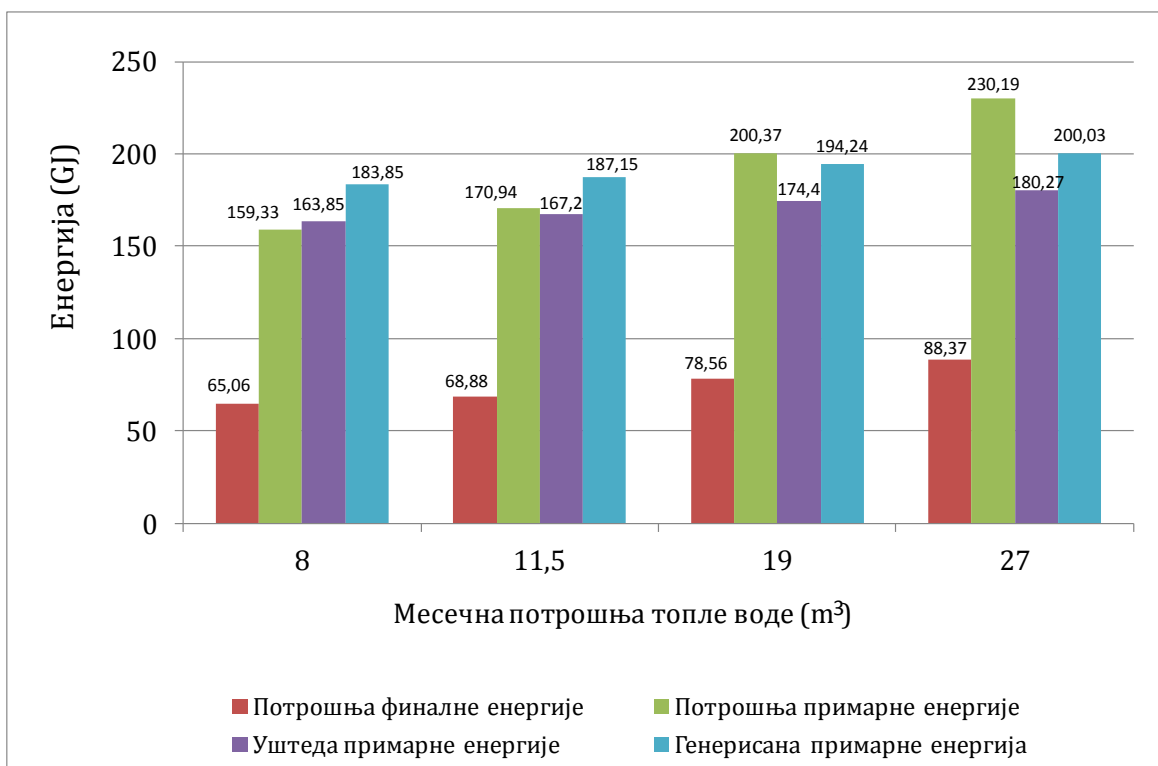
**Табела 9.14** – Детаљна годишња потрошња финалне и примарне енергије у згради за даљинско и гасно грејање, при различитим вредностима потрошње топле воде

Потрошња електричне енергије (GJ)	Потрошња топле воде (m <sup>3</sup> )			
	8	11,5 - Реф	19	27
Расвета	1,02	1,02	1,02	1,02
Електрични уређаји	6,90	6,91	6,95	6,98
Грејање воде	19,08	22,89	32,53	42,31
<b>УКУПНО</b>	<b>27,00</b>	<b>30,82</b>	<b>40,50</b>	<b>50,31</b>
<b>Даљинско грејање</b>				
Грејање – енергија (GJ)	38,06			
УКУПНА ПОТРОШЊА (GJ)				
Финална енергија	65,06	68,88	78,56	88,37
Примарна енергија	159,33	170,94	200,37	230,19
<b>Гасно грејање</b>				
Грејање – енергија (GJ)	37,52			
УКУПНА ПОТРОШЊА (GJ)				
Финална енергија	64,52	68,34	78,02	87,83
Примарна енергија	123,35	134,96	164,39	194,21

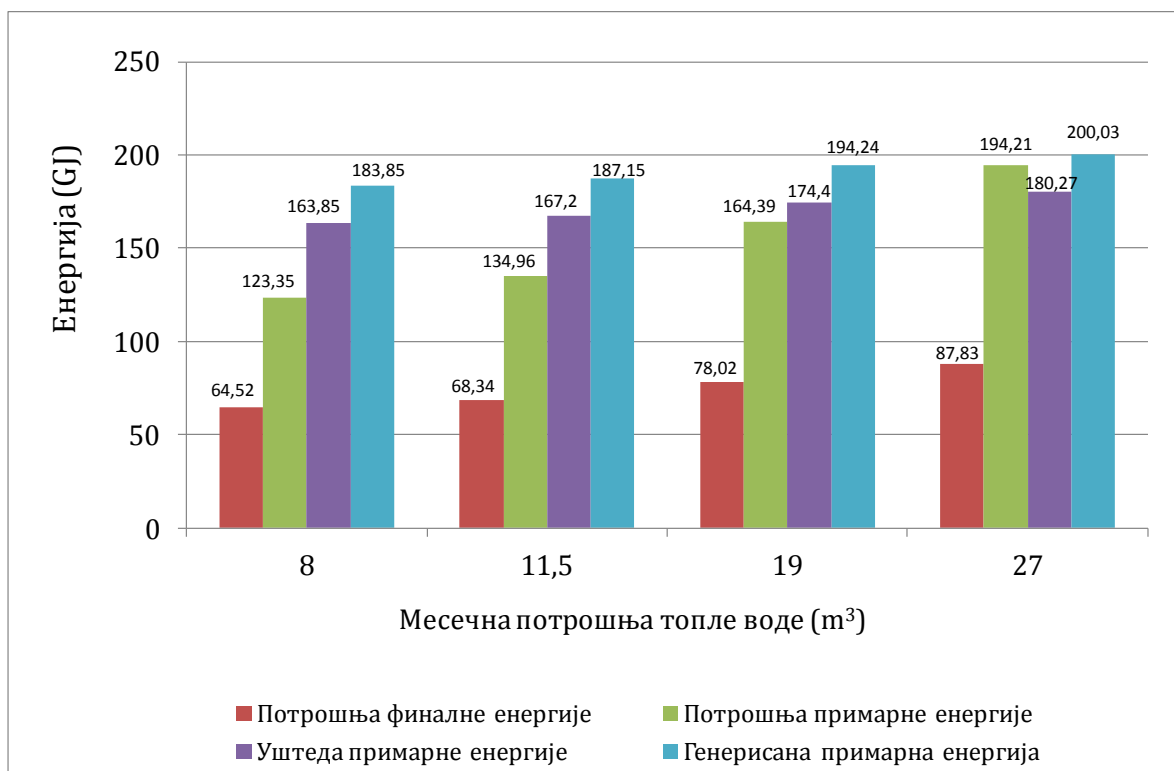
Из резултата добијених симулацијама, може се закључити да са порастом месечне потрошње санитарне топле воде, расте укупна годишња потрошња финалне, односно примарне енергије.

У случају анализираних зграда са даљинским грејањем, у односу на најмању потрошњу топле воде од 8 m<sup>3</sup>, повећање потрошње примарне енергије за потрошњу топле воде од 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup> износи 11,61 GJ (7,3 %), 41,04 GJ (25,8 %) и 70,86 GJ (44,5 %), респективно. Слика 9.22 даје годишњу потрошњу финалне и примарне енергије, уштеду и примарну енергију генерисане енергије у згради са даљинским системом грејања, за различите вредности потрошње топле воде.





Слика 9.22 –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са даљинским системом грејања, за различиту месечну потрошњу топле воде



Слика 9.23 –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са гасним системом грејања, за различиту месечну потрошњу топле воде

За случај различитих месечних потрошњи топле воде у згради са гасним грејањем, у односу на најмању потрошњу од  $8\text{m}^3$ , повећање потрошње примарне енергије за потрошњу топле воде од  $11,5\text{ m}^3$ ,  $19\text{ m}^3$  и  $27\text{ m}^3$  је  $11,61\text{ GJ}$  ( $9,4\%$ ),  $41,04\text{ GJ}$  ( $33,3\%$ ) и  $70,86\text{ GJ}$  ( $57,4\%$ ), респективно. Разлог за овако велико повећање потрошње примарне енергије је у томе што са порастом потрошње топле воде значајно расте потрошња електричне енергије која има велики коефицијент конверзије у примарну енергију. Слика 9.23 даје преглед енергетских параметара за случај гасног грејања.

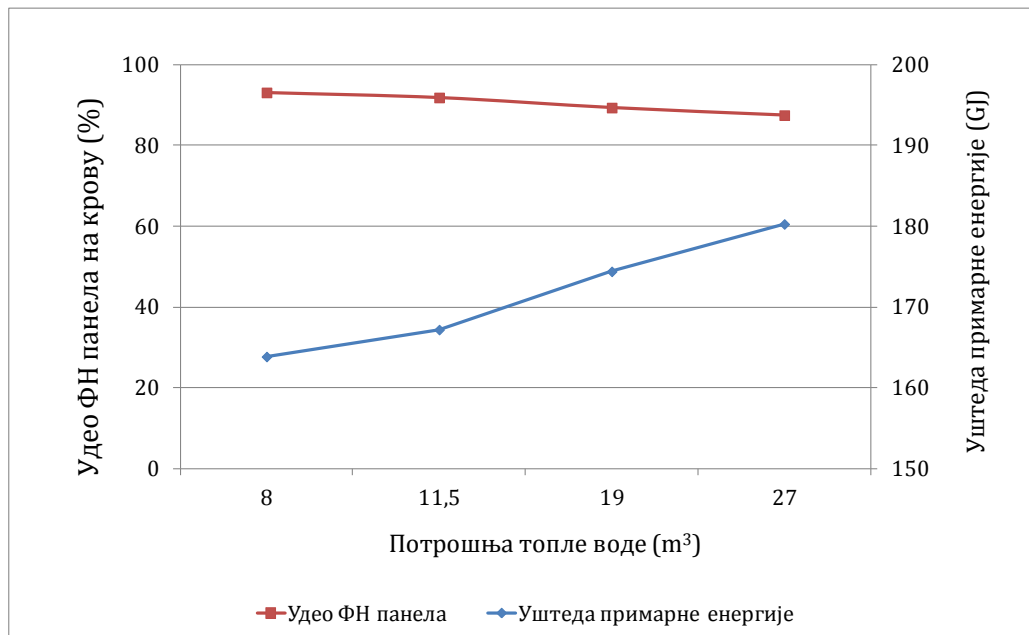
Резултати добијени оптимизацијом, за различиту месечну потрошњу топле воде, и даљински тј. гасни систем грејања, дати су у Табели 9.15.

**Табела 9.15** – Потрошња примарне енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитом потрошњом топле воде

		Потрошња топле воде ( $\text{m}^3$ )			
		8	11,5 -Реф	19	27
Удео ФН панела на крову (%)		93,13	91,88	89,38	87,5
Генерисана електрична енергија (GJ)		49,47	48,81	47,48	46,48
Генерисана топлотна енергија (GJ)		11,01	12,75	16,41	19,31
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		183,86	187,15	194,24	200,03
$E_{\text{PRIM}}$ – уштеда примарне енергије (GJ)		163,86	167,20	174,4	180,27
Уграђена енергија соларних система (GJ)		17,83	17,78	17,67	17,59
Уграђена енергија изолације (GJ)		2,17	2,17	2,17	2,17
$E_{\text{PV,S}}$ - Вишак електричне енергије (GJ)		43,23	41,62	38,33	35,75
$E_{\text{P,NET}}$ - Нето-купљена ел. енергија (GJ)		-33,99	-31,18	-23,74	-15,75
$E_{\text{P}}$ - Укупна купљена ел. енергија (GJ)		9,24	10,44	14,58	20,00
ДГ	$E_{\text{TOT, PRIM, DG}}$ - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	159,33	170,94	200,37	230,19
	<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	PNEB	PNEB	NNEB	NNEB
	<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	PNEB	NNEB	NNEB	NNEB
ГГ	$E_{\text{TOT, PRIM, GG}}$ - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	123,35	134,96	164,39	194,21
	<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB
	<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	PNEB	PNEB	PNEB	NNEB

Код анализе зграда са даљинским системом грејања, може се закључити да је једино зграда са најмањом месечном потрошњом топле воде зграда нето-позитивне потрошње енергије (PNEB), према оба приступа – са и без разматране уграђене енергије. Зграда са референтном потрошњом енергије од  $11,5 \text{ m}^3$  је зграда нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) ако се посматра потрошња примарне енергије без уграђених енергија. У супротном – ако се у обзир узму и уграђене енергије – ова зграда ће бити зграда нето-негативне потрошње енергије (NNEB). Остале зграде које су имале већу месечну потрошњу топле воде су према оба приступа зграде нето-негативне потрошње енергије (NNEB).

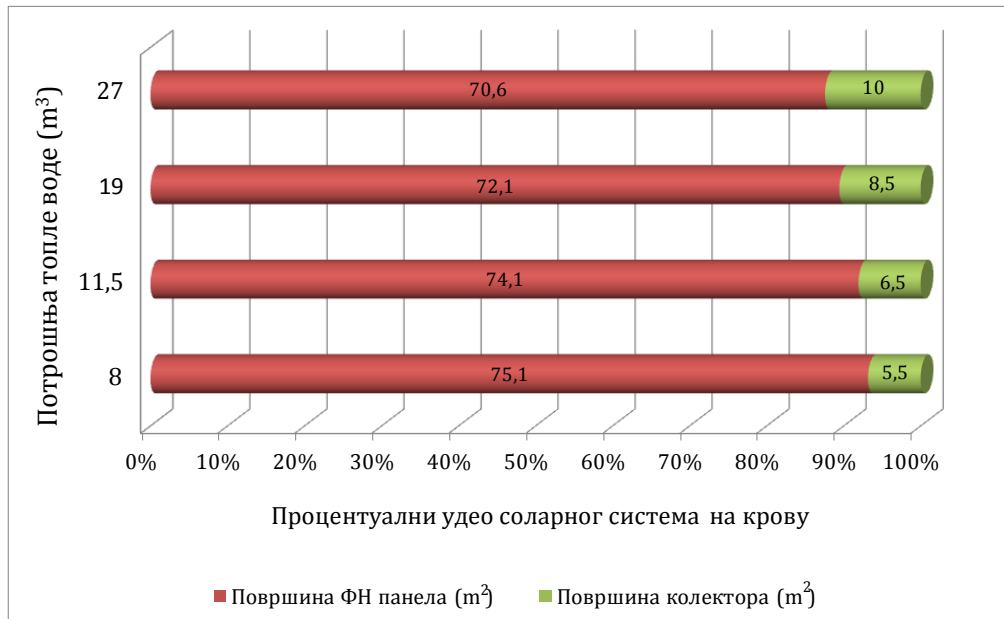
Са порастом месечне потрошње топле воде, удео фотонапонских панела на крову опада, па се самим тим повећава удео соларних колектора. За потрошњу топле воде од  $8 \text{ m}^3$  удео ФН панела износи  $93,13 \%$ , тј. на крову је инсталиран ФН систем на површини од  $75,1 \text{ m}^2$  док је осталих  $5,5 \text{ m}^2$  крова прекривено соларним колекторима. За потрошњу топле воде од  $11,5 \text{ m}^3$ ,  $19 \text{ m}^3$  и  $27 \text{ m}^3$ , удели ФН панела су били  $91,88 \%$ ,  $89,38 \%$  и  $87,5 \%$  респективно (Слика 9.24). То значи да при овим потрошњама топле воде, инсталирани фотонапонски системи заузимају површину крова од  $74,1 \text{ m}^2$ ,  $72,1 \text{ m}^2$  и  $70,6 \text{ m}^2$  респективно, а соларни колектори заузимају површине од  $6,5 \text{ m}^2$ ,  $8,5 \text{ m}^2$  и  $10 \text{ m}^2$ , респективно.



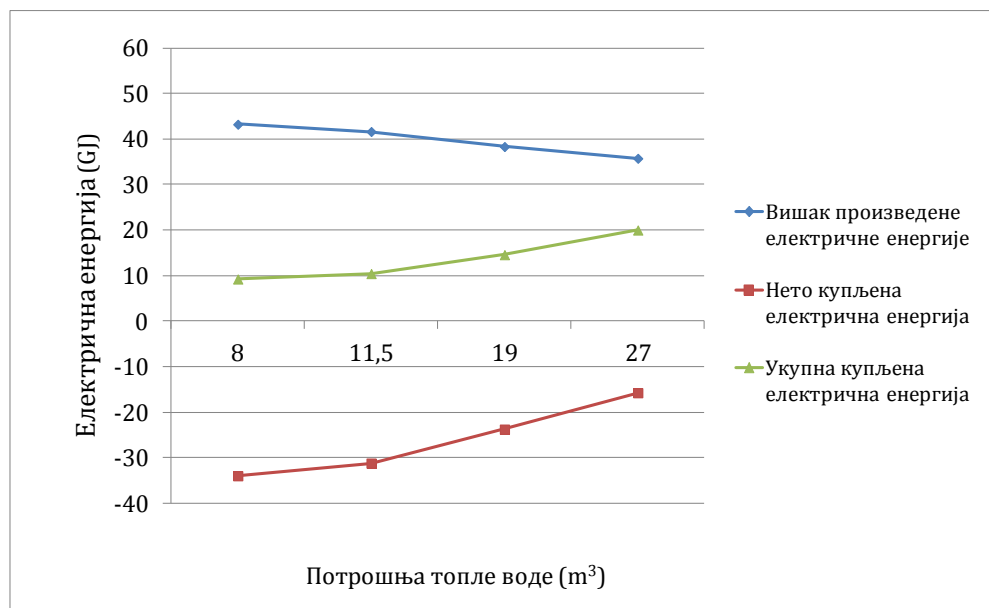
**Слика 9.24** –Графички приказ односа удела ФН панела и уштеде примарне енергије за различиту потрошњу топле воде и систем даљинског и гасног грејања

Слика 9.25 даје приказ односа површина фотонапонских панела и соларних колектора инсталираних на крову зграде, а за различите вредности месечне потрошње топле воде у згради.

У Табели 9.15 дат је и преглед вишка произведене електричне енергије, нето количине купљене електричне енергије и укупне количине купљене електричне енергије на годишњем нивоу, у GJ, за анализирани зграде са различитом месечном потрошњом топле воде, и системима даљинског и гасног грејања. Може се закључити да са порастом потрошње топле воде опада количина електричне енергије која се као вишак продаје мрежи.



Слика 9.25 –Графички приказ односа површина фотонапонских панела и соларних колектора на крову, за различиту потрошњу топле воде



Слика 9.26 – Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом потрошњом топле воде и системима даљинског и гасног грејања

За случај различитих месечних потрошњи топле воде вишак електричне енергије износи 43,23 GJ, 41,63 GJ, 38,33 GJ и 35,75 GJ, респективно, и то у односу на најмању потрошњу топле воде, мањи је за 3,7 %, 10,2 % и 17,3 %, респективно. Вишак произведене енергије и укупна купљена електрична енергија за различите месечне потрошње топле воде приказан је на Слици 9.26. Нето купљена електрична енергија је негативна и расте са порастом потрошње топле воде. У овом случају, она представља ДОБИТ ФИНАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ, јер је управо она показатељ за колико је вишак електричне енергије продат електро мрежи већи од купљене енергије из мреже.

## Различита потрошња електричне енергије расвете и електро-уређаја

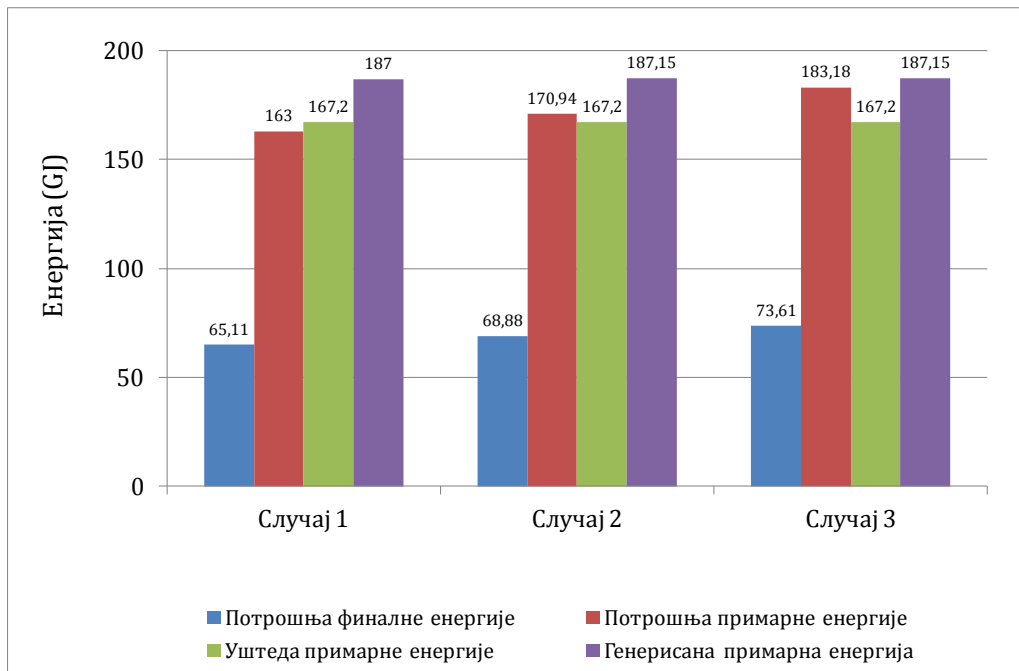
Код ових испитивања варирана је потрошња електричне енергије расвете и електричних уређаја у згради са даљинским и гасним грејањем на исти начин као код случаја електричног грејања. Дакле, поред референтног случаја (годишња потрошња електричне енергије за расвету 1,02 GJ и за електричне уређаје 6,29 GJ-Случај 2), симулирана је зграда са мањом потрошњом електричне енергије (расвета 0,4 GJ и електрични уређаји 3,81 GJ – Случај 1) а потом и зграда са већом потрошњом електричне енергије (расвета 1,68 GJ и електрични уређаји 10,36 GJ–Случај 3). У Табели 9.16 дат је приказ потрошње електричне енергије у згради, за све случаје. Поред ње, дат је и преглед годишње потрошње финалне и примарне енергије.

**Табела 9.16** – Детаљна годишња потрошња финалне и примарне енергије у згради за даљинско и гасно грејање, при различитим вредностима потрошње електричне енергије

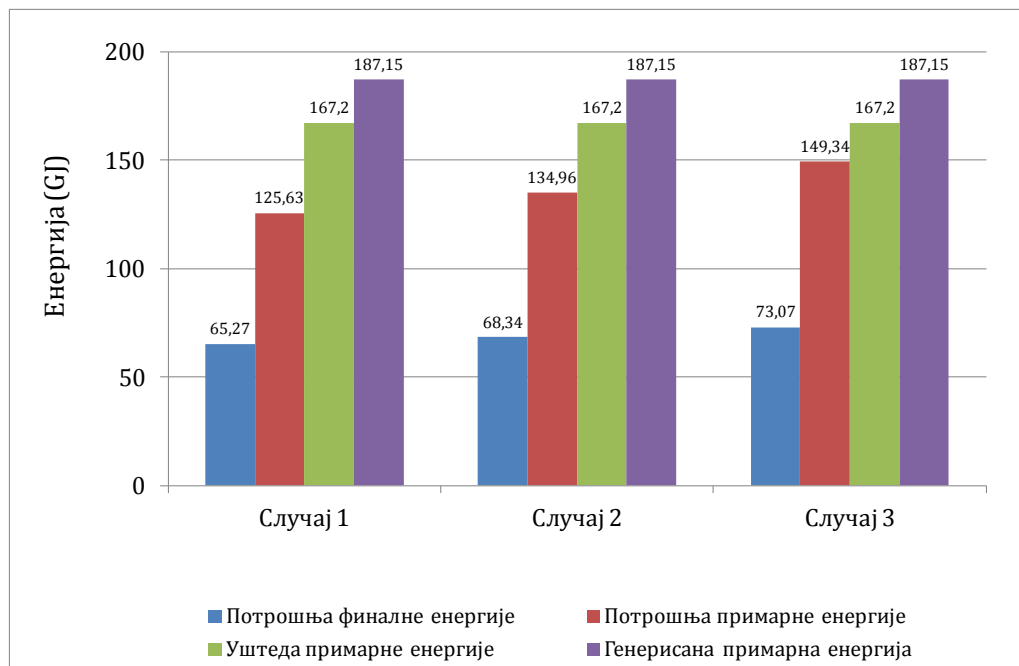
Потрошња електричне енергије (GJ)	Потрошња електричне енергије		
	Случај 1	Случај 2 - Реф	Случај 3
Расвета	0,40	1,02	1,68
Електрични уређаји	4,46	6,91	10,98
Грејање воде	22,89	22,89	22,89
<b>УКУПНО</b>	<b>27,75</b>	<b>30,82</b>	<b>35,55</b>
<b>Даљинско грејање</b>			
Грејање – енергија (GJ)	38,06		
УКУПНА ПОТРОШЊА (GJ)			
Финална енергија	65,81	68,88	73,61
Примарна енергија	163	170,94	183,18
<b>Гасно грејање</b>			
Грејање – енергија (GJ)	37,52		
УКУПНА ПОТРОШЊА (GJ)			
Финална енергија	65,27	68,34	73,07
Примарна енергија	125,63	134,96	149,34

Из резултата добијених симулацијама, може се закључити да са порастом потрошње електричне енергије у згради, расте укупна годишња потрошња финалне, односно примарне енергије.

У згради са даљинским грејањем, у односу на најмању потрошњу електричне енергије (случај 1), повећање потрошње примарне енергије за случајеве 2 и 3 износи 7,94 GJ (4,9 %) и 20,18 GJ (12,4 %), респективно. Слика 9.27 даје годишњу потрошњу финалне и примарне енергије, уштеду и примарну енергију генерисане енергије у згради са даљинским системом грејања, за различите вредности потрошње електричне енергије.



**Слика 9.27** – Потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са даљинским грејањем за различиту потрошњу електричне енергије



**Слика 9.28** – Потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са гасним грејањем за различиту потрошњу електричне енергије

У згради са гасним грејањем, у односу на најмању потрошњу електричне енергије (случај 1), повећање потрошње примарне енергије за случајеве 2 и 3 износи 9,33 GJ (7,4 %) и 23,71 GJ (18,9 %), респективно. Слика 9.27 даје годишњу потрошњу финалне и примарне енергије, уштеду и примарну енергију генерисане енергије у згради са даљинским системом грејања, за различите вредности потрошње електричне енергије.

Резултати добијени оптимизацијом, за различиту потрошњу електричне енергије, и даљински и гасни систем грејања, дати су у Табели 9.17.

**Табела 9.17** – Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за зграде са даљинским и гасним системом грејања, и са различитом потрошњом електричне енергије

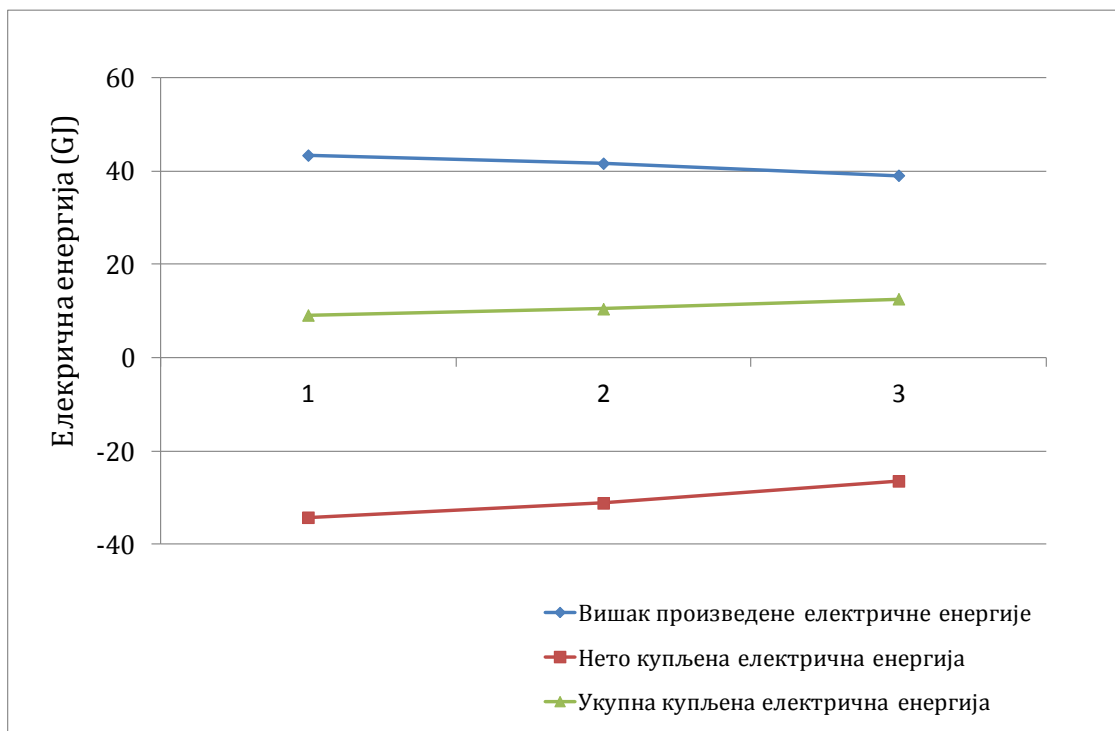
		Потрошња електричне енергије		
		Случај 1	Случај 2- Реф	Случај 3
Удео ФН панела на крову (%)		91,88	91,88	91,88
Генерисана ел. енергија (GJ)		48,81	48,81	48,81
Генерисана топлотна енергија (GJ)		12,75	12,75	12,75
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		187,15	187,15	187,15
$E_{\text{PRIM}}$ – уштеда примарне енергије (GJ)		167,20	167,20	167,20
Уграђена енергија сол. система (GJ)		17,78	17,78	17,78
Уграђена енергија изолације (GJ)		2,17	2,17	2,17
$E_{\text{PV,S}}$ - Вишак ел. енергије (GJ)		43,36	41,62	39,04
$E_{\text{P,NET}}$ - Нето-купљена ел. енергија (GJ)		-34,26	-31,18	-26,46
$E_{\text{P}}$ - Укупна купљена ел. енергија (GJ)		9,10	10,44	12,58
ДГ	$E_{\text{TOT, PRIM, DG}}$ - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	163	170,94	200,37
	<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	PNEB	PNEB	NNEB
	<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	PNEB	NNEB	NNEB
ГГ	$E_{\text{TOT, PRIM, GG}}$ - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	123,35	134,96	164,39
	<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	PNEB	PNEB	PNEB
	<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	PNEB	PNEB	PNEB

Када је у згради примењен даљински систем грејања - зграда најмање потрошње електричне енергије (Случај 1) је зграда нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према оба приступа – са и без разматране уграђене енергије. Зграда са референтном потрошњом електричне енергије (Случај 2) је зграда нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) ако се посматра потрошња примарне енергије без уграђених енергија. Ако се у обзир узму и уграђене енергије – ова зграда ће бити зграда нето-негативне потрошње енергије (NNEB). Зграда највеће потрошње електричне енергије је према оба приступа зграда нето-негативне потрошње енергије (NNEB).

У случају гасног грејања, сви разматрани случајеви потрошње електричне енергије у зградама су показали да су у питању зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према оба приступа – са и без разматране уграђене енергије. Оне са својим соларним системима производе већу количину енергије од својих енергетских потреба. Разлог је у малом коефицијенту конверзије финалне у примарну енергију за гасно грејање.

Са порастом потрошње електричне енергије, удео фотонапонских панела на крову је свим случајевима био исти (91,88 %), што значи да је 74,1 m<sup>2</sup> површине крова прекривено са ФН панелима, 6 m<sup>2</sup> прекривено је соларним колекторима. Овај однос површина ФН панела и колектора је најоптималније решење за задовољење свих енергетских потреба зграде у случају примене даљинског и гасног система грејања. Због истог односа површина ФН панела и соларних колектора и уштеда тј. максимална избегнута потрошња примарне енергије је иста у свим случајевима и она износи 167,2 GJ. Генерисана примарна енергија је такође иста у свим случајевима и износи 187,15 GJ.

Вишак произведене електричне енергије опада са порастом потрошње електричне енергије за оба случаја грејања, а укупна купљена електрична енергија расте. Нето купљена електрична енергија за случајеве 1, 2 и 3 износи -34,26 GJ, - 31,18 GJ и - 26,46 GJ, респективно, и њена апсолутна вредност представља ДОБИТ ФИНАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ. Добит финалне енергије опада са порастом потрошње електричне енергије, и у односу на најмању потрошњу (случај 1), она је нижа за 9 % (Случај 2) и 22,8 % (Случај 3) – Слика 9.29.



**Слика 9.29** – Продата и купљена електрична енергија за зграде са различитом потрошњом електричне енергије



## Различит животни век инсталираних соларних система

Код енергетске оптимизације зграда са даљинским и гасним системом грејања, животни век соларних система је вариран на исти начин као код зграде са електричним грејањем - разматрани су случајеви животног века од 15, 20, 25 и 30 година. Референтна зграда је имала животни век соларних система 20 година и годишњу потрошњу електричне енергије 30,82 GJ. У случају даљинског грејања, укупна годишња потрошња финалне енергије износила је 68,88 GJ, чему одговара потрошња примарне енергије од 170,94 GJ. У случају гасног грејања, укупна годишња потрошња финалне енергије износила је 68,34 GJ, чему одговара потрошња примарне енергије од 134,96 GJ. Са променом животног века соларних система, потрошња енергије у разматраним зградама се није мењала, и за посматране системе грејања, била је једнака наведеним вредностима. Резултати добијени симулацијама дати су у Табели 9.18.

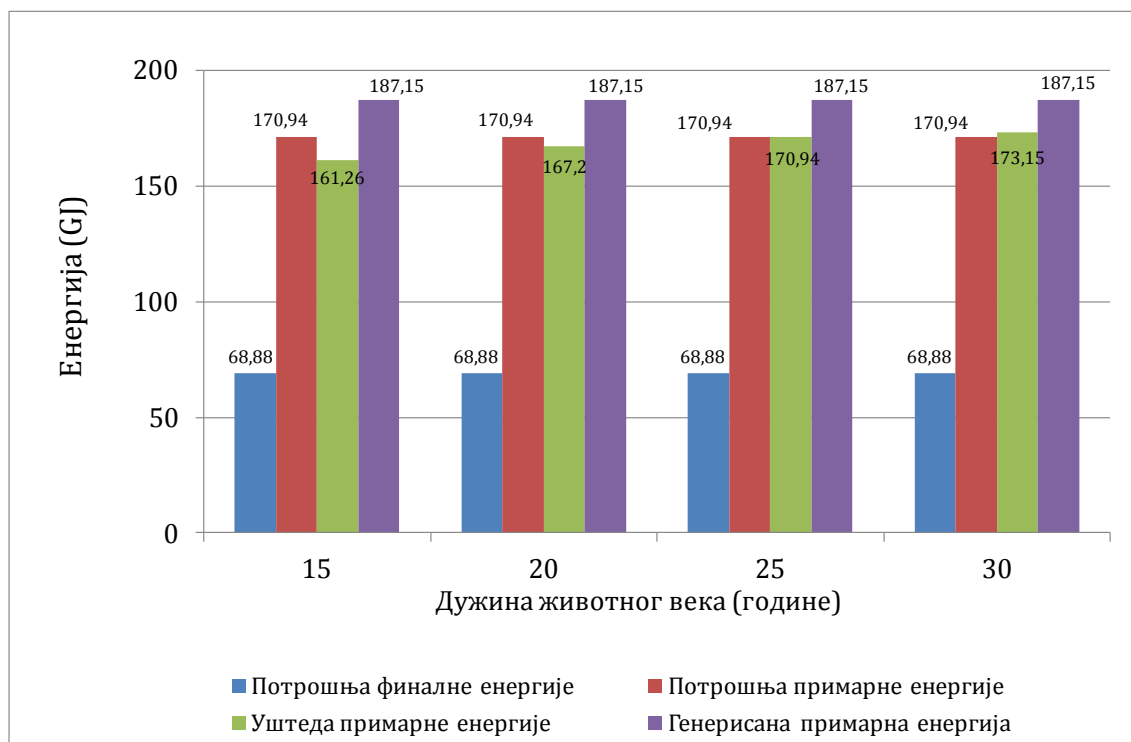
**Табела 9.18** – Потрошња примарне енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитим животним веком соларних инсталација

		Дужина животног века (године)			
		15	20- Реф	25	30
Удео ФН панела на крову (%)		91,88	91,88	91,88	91,88
Генерисана електрична енергија (GJ)		48,81	48,81	48,81	48,81
Генерисана топлотна енергија (GJ)		12,75	12,75	12,75	12,75
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		187,15	187,15	187,15	187,15
$E_{\text{PRIM}}$ – уштеда примарне енергије (GJ)		161,26	167,20	170,94	173,15
Уграђена енергија соларних система (GJ)		23,72	17,78	14,04	11,83
Уграђена енергија изолације (GJ)		2,17	2,17	2,17	2,17
$E_{\text{PV,S}}$ - Вишак електричне енергије (GJ)		41,62	41,62	41,62	41,62
$E_{\text{P,NET}}$ - Нето-купљена ел. енергија (GJ)		-31,18	-31,18	-31,18	-31,18
$E_{\text{P}}$ - Укупна купљена ел. енергија (GJ)		10,44	10,44	10,44	10,44
ДГ	$E_{\text{TOT, PRIM, DG}}$ - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	170,94	170,94	170,94	170,94
	<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB
	<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	NNEB	NNEB	ZNEB	PNEB
ГГ	$E_{\text{TOT, PRIM, GG}}$ - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	134,96	134,96	134,96	134,96
	<b>Тип зграде (оба приступа)</b>	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB

Величине удела фотонапонских система на крову, генерисане енергије инсталираним соларним системима, као и вредности вишка произведене електричне енергије и купљене електричне енергије (нето и укупне), добијене оптимизационим поцесима су биле међусобно потпуно једнаке за систем даљинског и за систем гасног грејања. Услед варирања дужине животног века инсталираних соларних система, мењала се њихова годишња вредност уграђене енергије, тако да се мењала и максимална уштеда примарне енергије. Вредности ових параметара су дате у Табели 9.13, заједно са укупном потрошњом примарне енергије и енергетским типом зграде.

Удео фотонапонских панела на крову у свим случајевима дужине животног века је био исти и износио је 91,88 %, што значи да је на 74,1 m<sup>2</sup> површине крова инсталиран систем фотонапонских панела, а део крова од 8,12 % површине, тј. 6,5 m<sup>2</sup> прекривен је соларним колекторима. На овај начин се годишње генерише 48,81 GJ електричне енергије и 12,75 GJ топлотне енергије, што је укупно 61,56 GJ генерисане енергије соларним системима, односно 187,15 GJ примарне енергије.

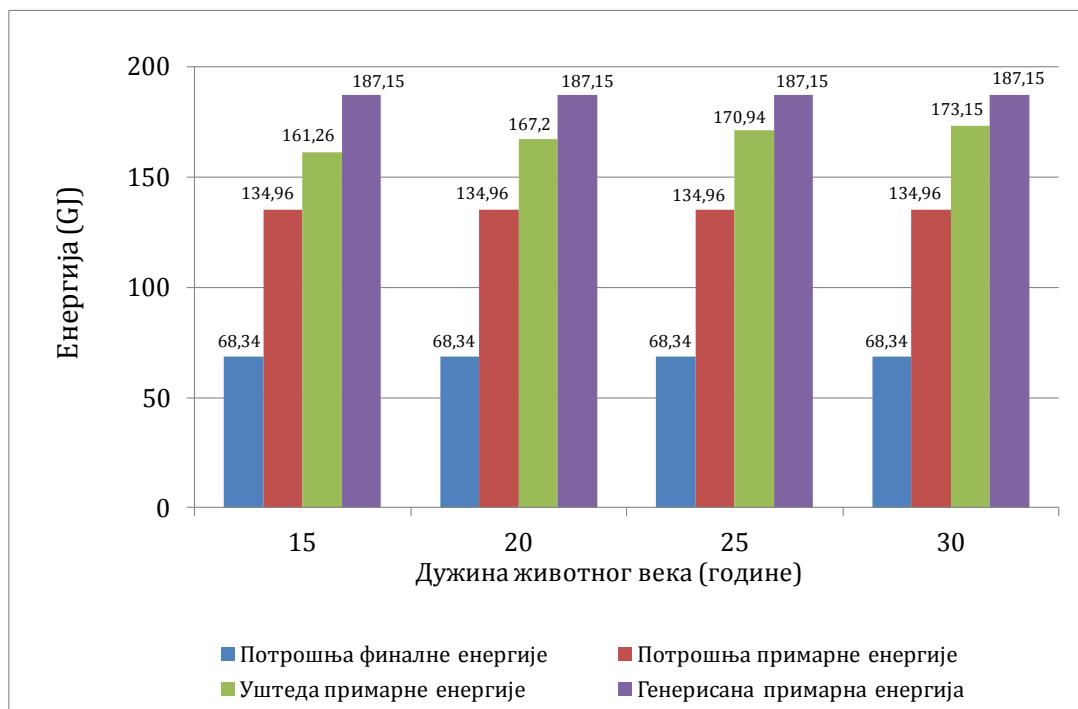
Код анализе зграда са даљинским системом грејања, ако се посматра потрошња примарне енергије и примарна енергија генерисане енергије (приступ без уграђене енергије соларних система и изолације), може се закључити да су зграде са мањим животним веком соларних система, од 15 и 20 година, зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB). Уколико се узима у обзир и уграђена енергија соларних система и изолације, тада су ове зграде нето-негативне (NNEB). За животни век соларних система од 25 година, зграда ће бити позитивне-потрошње енергије (PNEB) уколико се не узима у обзир уграђена енергија, а са уграђеном енергијом узетом у обзир добијамо зграду нето-нулте потрошње енергије (ZNEB).



**Слика 9.30** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са даљинским системом грејања, за различите вредности дужине животног века соларних система

За животни век од 30 година, зграда је према оба приступа нето-позитивне потрошње енергије (PNEB). Уштеда примарне енергије за дужину животног века 15, 20, 25 и 30 година, износила је 161,26 GJ, 167,2 GJ, 170,94 GJ и 173,15 GJ, респективно. Приказ потрошене и генерисане примарне енергије зграда са различитим животним веком соларних система и даљинским грејањем, дат је на Слици 9.30.

Код анализе зграда са системом гасног грејања, све испитиване зграде су биле зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према оба приступа, без обзира на дужину животног века инсталираних соларних система. Уштеда примарне енергије инсталацијом соларних система је била иста као код зграде са даљинским системом грејања. Приказ потрошене и генерисане примарне енергије зграда са различитим животним веком соларних система и гасним грејањем у згради, дат је на Слици 9.31.



**Слика 9.31** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, уштеда и примарна енергија генерисане енергије у згради са гасним системом грејања, за различите вредности дужине животног века соларних система

Максимална избегнута потрошња примарне енергије инсталирањем соларних система на зграду и уградњом изолације, односно уштеда примарне енергије, расте са порастом дужине животног века соларних система услед опадања вредности њихове годишње уграђене енергије. Уграђена енергија соларних система за животни век од 15, 20, 25 и 30 износила је 23,72 GJ, 17,78 GJ, 14,05 GJ и 11,83 GJ, респективно.

Вишак електричне енергије је исти за оба система грејања и све вредности дужине животног века (41,62 GJ), као и нето количина купљене електричне енергије (– 31,18 GJ) и укупна количина купљене енергије (10,44 GJ). Наведено значи да и у случају различите дужине животног века, код оба разматрана грејна система постоји ДОБИТ ФИНАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ ОД 31,18 GJ. Ове вредности су идентичне вредностима одговарајућих параметара у референтном случају.

## Различите врсте фотонапонских панела

Варирањем уграђене енергије инсталираних фотонапонских система, симулирана је уградња различитих типова ФН модула на кров зграде. Разматрани су ФН модули чија је уграђена енергија износила 2,4 GJ/m<sup>2</sup>, 3,6 GJ/m<sup>2</sup>, 5,4 GJ/m<sup>2</sup>, 6,9 GJ/m<sup>2</sup> и 8 GJ/m<sup>2</sup>. Укупна потрошња енергије у згради се није мењала и за случај даљинског грејања, износила је 68,88 GJ финалне енергије (или 170,94 GJ примарне енергије). За случај гасног грејања, укупна годишња потрошња износила је 68,34 GJ финалне енергије (или 134,96 GJ примарне енергије).

Резултати добијени оптимизацијом, за различите врсте ФН панела инсталираних на крову, за даљински и гасни систем грејања, дати су у Табели 9.19.

**Табела 9.19** – Потрошња примарне енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за случајеве зграда са различитим врстама фотонапонских панела

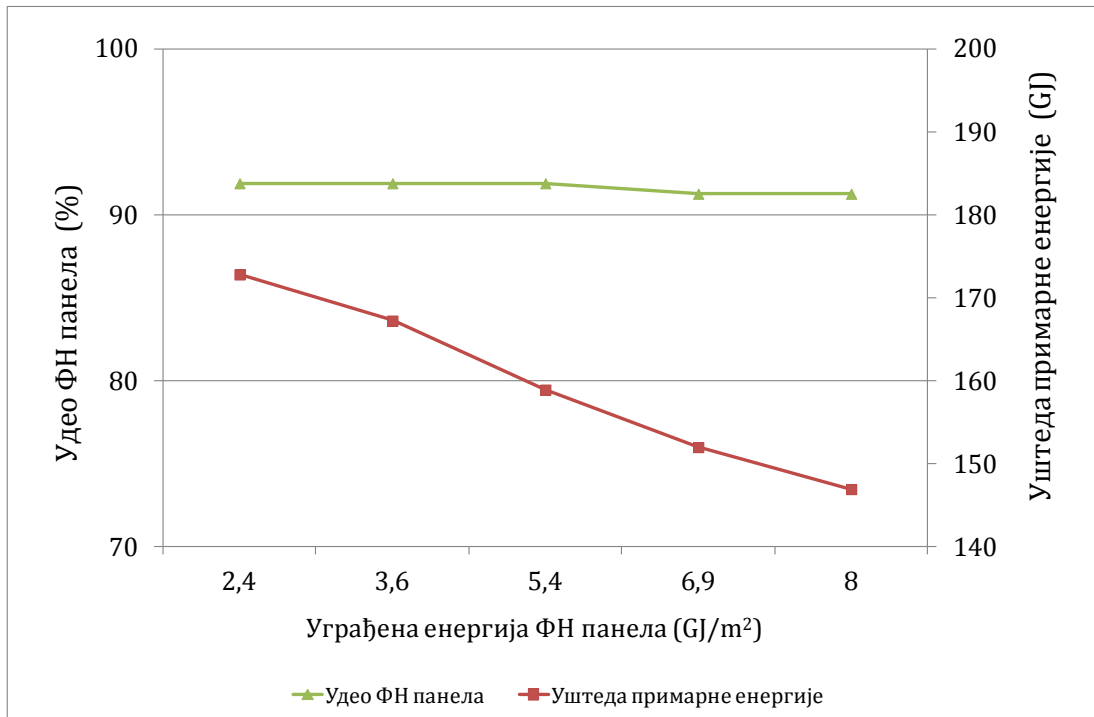
		Уграђена енергија ФН система (GJ/m <sup>2</sup> )				
		2,4	3,6 -Реф	5,4	6,9	8
Удео ФН панела на крову (%)		91,88	91,88	91,88	91,25	91,25
Генерисана електрична енергија (GJ)		48,81	48,81	48,81	48,48	48,48
Генерисана топлотна енергија (GJ)		12,75	12,75	12,75	13,04	13,04
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		187,15	187,15	187,15	187,01	187,01
E <sub>PRIM</sub> – уштеда примарне енергије (GJ)		172,72	167,20	158,86	151,92	146,86
Уграђена енергија соларних система (GJ)		12,22	17,78	26,10	32,92	37,98
Уграђена енергија изолације (GJ)		2,17	2,17	2,17	2,17	2,17
E <sub>PV,S</sub> - Вишак електричне енергије (GJ)		41,62	41,62	41,62	41,35	41,35
E <sub>P,NET</sub> - Нето-купљена ел. енергија (GJ)		-31,18	-31,18	-31,18	-31,08	-31,08
E <sub>P</sub> - Укупна купљена ел. енергија (GJ)		10,44	10,44	10,44	10,27	10,27
ДГ	E <sub>TOT, PRIM, DG</sub> - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	170,94	170,94	170,94	170,94	170,94
	Тип зграде (без уграђене енергије)	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB
	Тип зграде (са уграђеном енергијом)	PNEB	NNEB	NNEB	NNEB	NNEB
ГГ	E <sub>TOT, PRIM, GG</sub> - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	134,96	134,96	134,96	134,96	134,96
	Тип зграде (без уграђене енергије)	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB
	Тип зграде (са уграђеном енергијом)	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB

Са порастом уграђене енергије фотонапонског система, уштеда примарне енергије опада. У односу на референтни случај, примена панела са мањом уграђеном енергијом од 2,4 GJ/m<sup>2</sup> би довела до повећања уштеде примарне енергије за 3,3 %. Са

друге стране, употреба ФН панела са већом уграђеном енергијом од референтне - 5,4 GJ/m<sup>2</sup>, 6,9 GJ/m<sup>2</sup> и 8 GJ/m<sup>2</sup>, довела би до смањења уштеде примарне енергије и то за 5 %, 9,1 % и 12,1 %, респективно.

Када се посматра гасно грејање, све анализиране зграде, према оба приступа (са и без уграђене енергије) су зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB). Код анализе зграда са даљинским системом грејања, према приступу без уграђене енергије, све зграде су биле зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB). Када се узме у обзир уграђена енергија, само зграда код које је примењен ФН панел најниже уграђене енергије је нето-позитивне потрошње (PNEB), док су све остале зграде нето-негативне потрошње енергије (NNEB).

Са порастом уграђене енергије фотонапонских панела на крову, процентуални удео истих је у веома малом опадању. За вредности уграђене енергије испод 5,5 GJ/m<sup>2</sup>, удео ФН панела је износио 91,88 % (као и у референтном случају), а за вредности уграђене енергије веће од 5,5 GJ/m<sup>2</sup>, удео ФН панела је износио 91,25 %. Удео ФН панела и уштеда примарне енергије су графички приказани на Слици 9.32.



**Слика 9.32** –Графички приказ односа удела фотонапонских панела и уштеде примарне енергије за различиту вредност уграђене енергије ФН система и зграду са даљинским и гасним системом грејања

Вишак електричне енергије који се продаје дистрибутивној мрежи и нето-купљена и укупна купљена електрична енергија имају исте вредности као и референтна зграда, за оба примењена система грејања у згради – и за даљинско и за гасно грејање, без обзира на уграђену енергију инсталираних фотонапонских система. Ове вредности износе 41,62 GJ, – 31,18 GJ и 10,44 GJ, респективно. ДОБИТ ФИНАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ је и у овом случају 31,18 GJ.

## Различита ефикасност фотонапонских система

Разматрана су три различита случаја ћелијске ефикасности инсталираних фотонапонских панела - референтни случај са ћелијском ефикасношћу модула од 12 %, и случајеви ФН модула са ћелијским ефикасностима од 14 % и 16 %. И у овим истрживањима укупна годишња потрошња енергије у згради се није мењала. За случај даљинског грејања, износила је 68,88 GJ финалне енергије (или 170,94 GJ примарне енергије). За случај гасног грејања, укупна годишња потрошња износила је 68,34 GJ финалне енергије (или 134,96 GJ примарне енергије).

Резултати потрошње примарне енергије, енергије генерисане помоћу соларних система, максимална уштеда примарне енергије, уграђене енергије, удео ФН панела на крову и тип зграде који су добијени симулацијом и оптимизацијом, за оба разматрана система грејања у згради дати су у Табели 9.20.

**Табела 9.20** – Потрошња енергије, генерисана енергија, удео ФН панела, максимална уштеда примарне енергије и тип зграде за зграде са даљинским и гасним грејањем, при различитој ћелијској ефикасности фотонапонских модула

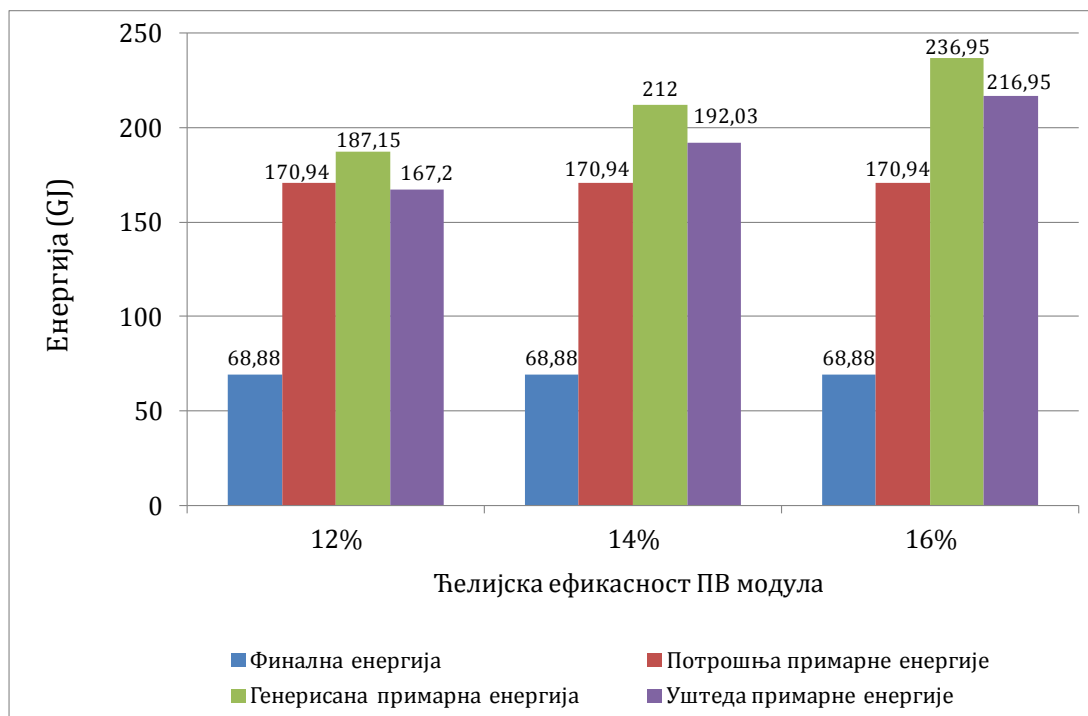
		Ћелијска ефикасност модула		
		12 % - Реф	14 %	16 %
Удео ФН панела на крову (%)		91,88	92,50	93,13
Генерисана ел. енергија (GJ)		48,81	57,33	65,96
Генерисана топлотна енергија (GJ)		12,75	12,41	11,98
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		187,15	212	236,95
$E_{\text{PRIM}}$ – уштеда примарне енергије (GJ)		167,20	192,03	216,95
Уграђена енергија сол. система (GJ)		17,78	17,81	17,83
Уграђена енергија изолације (GJ)		2,17	2,17	2,17
$E_{\text{PV,S}}$ - Вишак ел. енергије (GJ)		41,62	49,94	58,38
$E_{\text{P,NET}}$ - Нето-купљена ел. енергија (GJ)		-31,18	-39,43	-47,71
$E_{\text{P}}$ - Укупна купљена ел. енергија (GJ)		10,44	10,51	10,67
Д Г	$E_{\text{TOT, PRIM, DG}}$ - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	170,94	170,94	170,94
	<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	PNEB	PNEB	PNEB
	<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	NNEB	PNEB	PNEB
Г Г	$E_{\text{TOT, PRIM, GG}}$ - Укупна потрошња примарне енергије (GJ)	134,96	134,96	134,96
	<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	PNEB	PNEB	PNEB
	<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	PNEB	PNEB	PNEB

Из Табеле 9.20 се види да су зграде са системом даљинског грејања зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према оба критеријума, ако се примене фотонапонски системи чија је ћелијска ефикасност 14 % или 16 %. Ако се примени фотонапонски систем који има ћелијску ефикасност 12 %, зграда ће бити нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) ако се разматра само примарна енергија генерисане енергије, без уграђених енергија. Ако се у обзир узму и уграђене енергије, онда ће и ова зграда бити нето-негативне потрошње енергије (NNEB).

Код анализе зграда са гасним грејањем, због мале потрошње примарне енергије, све зграде ће бити зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према оба критеријума, без обзира на вредност ћелијске ефикасности фотонапонског система.

Уколико се на зграду инсталира ФН модул са ћелијском ефикасношћу од 14 %, он ће генерисати 57,33 GJ електричне енергије, што је у односу на референтни случај (48,81 GJ генерисане електричне енергије), повећање од 8,52 GJ или 17,5 %. Уколико би се употребио ФН модул са ћелијском ефикасношћу од 16 %, генерисана електрична енергија би износила 65,96 GJ, чиме би се постигло повећање од 17,15 GJ или чак 35,1 %.

Слика 9.33 приказује потрошње финалне и примарне енергије, примарну енергију генерисане енергије и уштеду примарне енергије и за случајеве примене фотонапонских модула различите ћелијске ефикасности у згради са системом даљинског грејања.

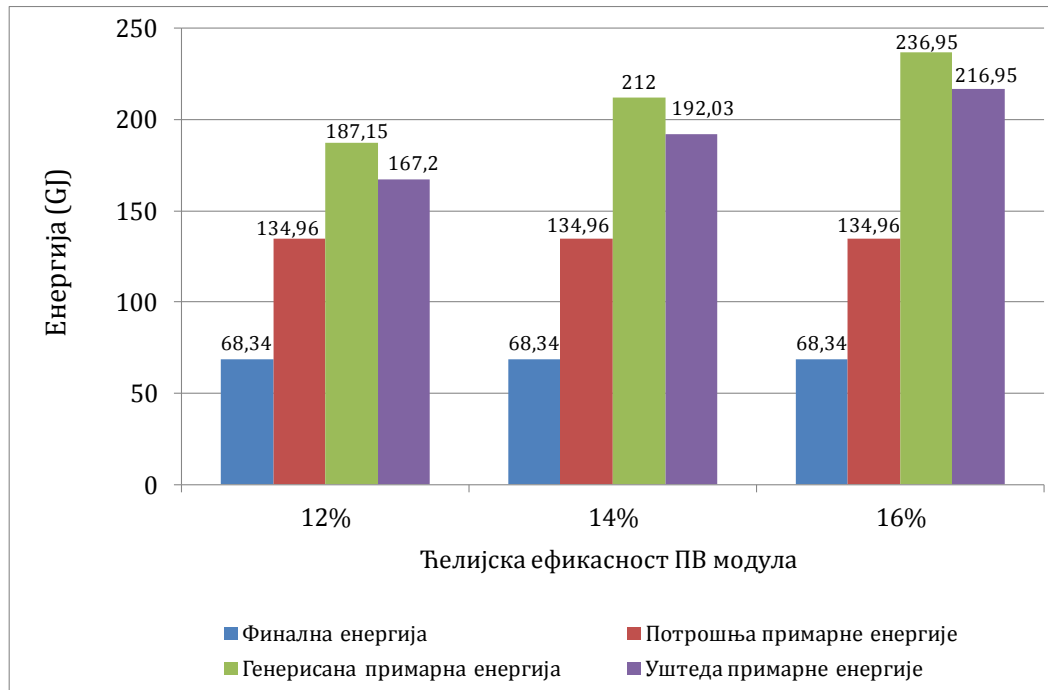


**Слика 9.33** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија, уштеда примарне енергије за ФН модуле различите ефикасности и даљински систем грејања

Са повећањем ћелијске ефикасности ФН модула, повећава се и примарна енергија укупне генерисане енергије. У односу на референтни случај (187,15 GJ), то значи да се остварује повећање од 24,85 GJ или 13,3 % употребом модула са ћелијском ефикасношћу 14 %. Употребом модула са ћелијском ефикасношћу од 16 %, генерисана примарна енергија би износила 236,95 GJ, чиме би се постигло повећање од 49,80 GJ или 26,6 %.

повећање примарне енергије укупне генерисане енергије износи 49,8 GJ или 26,6 % у односу на референтни случај.

Слика 9.34 приказује потрошње финалне и примарне енергије, примарну енергију генерисане енергије и уштеду примарне енергије и за случајеве примене фотонапонских модула различите ћелијске ефикасности у згради са системом гасног грејања.



**Слика 9.34** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија, уштеда примарне енергије за ФН модуле различите ефикасности и систем гасног грејања

Слика 9.35 даје графички приказ односа површина ФН панела и соларних колектора, за ФН модуле различите ћелијске ефикасности, и систем гасног и даљинског грејања. Удео ФН панела на крову расте са порастом ћелијске ефикасности фотонапонских модула, а смањује се удео соларних колектора. Удео ФН модула ћелијске ефикасности 12 % је 91,88 %, (одговара површини ФН система од 74,1 m<sup>2</sup> док је осталих 6,5 m<sup>2</sup> крова прекривено соларним колекторима). Удео ФН модула ћелијске ефикасности 14 % је 92,5 %, (одговара површини ФН система од 74,6 m<sup>2</sup> док је осталих 6 m<sup>2</sup> крова прекривено соларним колекторима), а удео модула ћелијске ефикасности 16 % је 93,13 %, (одговара површини ФН система од 75,1 m<sup>2</sup> док је осталих 5,5 m<sup>2</sup> крова прекривено соларним колекторима).

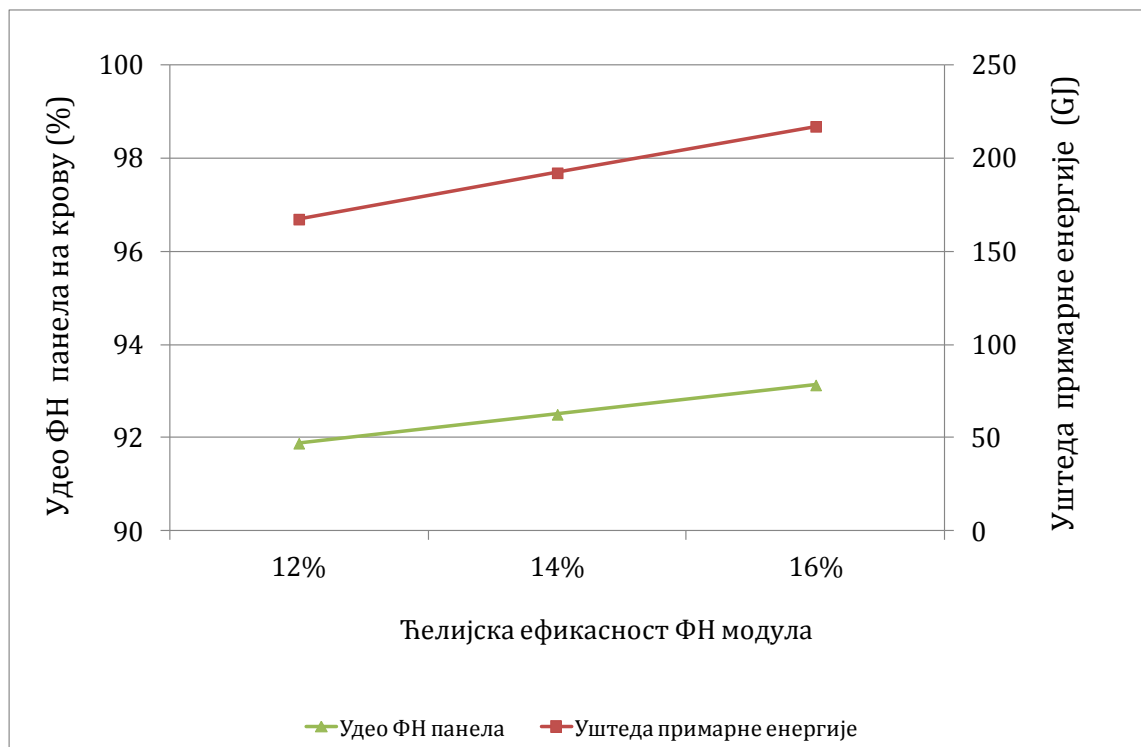
Са порастом ћелијске ефикасности фотонапонских модула, долази до пораста уштеде примарне енергије. Изражено у процентима за модуле ћелијске ефикасности 14 % и 16 %, уштеда примарне енергије је већа за 24,83 GJ или 14,9 % и 49,9 GJ или 29,9 % респективно у односу на референтни модул ћелијске ефикасности од 12 %.

Слика 9.36 даје приказ уштеде примарне енергије и удео ФН панела на крову за даљинско и гасно грејање и различите ћелијске ефикасности ФН модула.





**Слика 9.35** – Однос површина фотонапонских панела и соларних колектора на крову, за различиту ћелијску ефикасност ФН модула и системе даљинског и гасног грејања

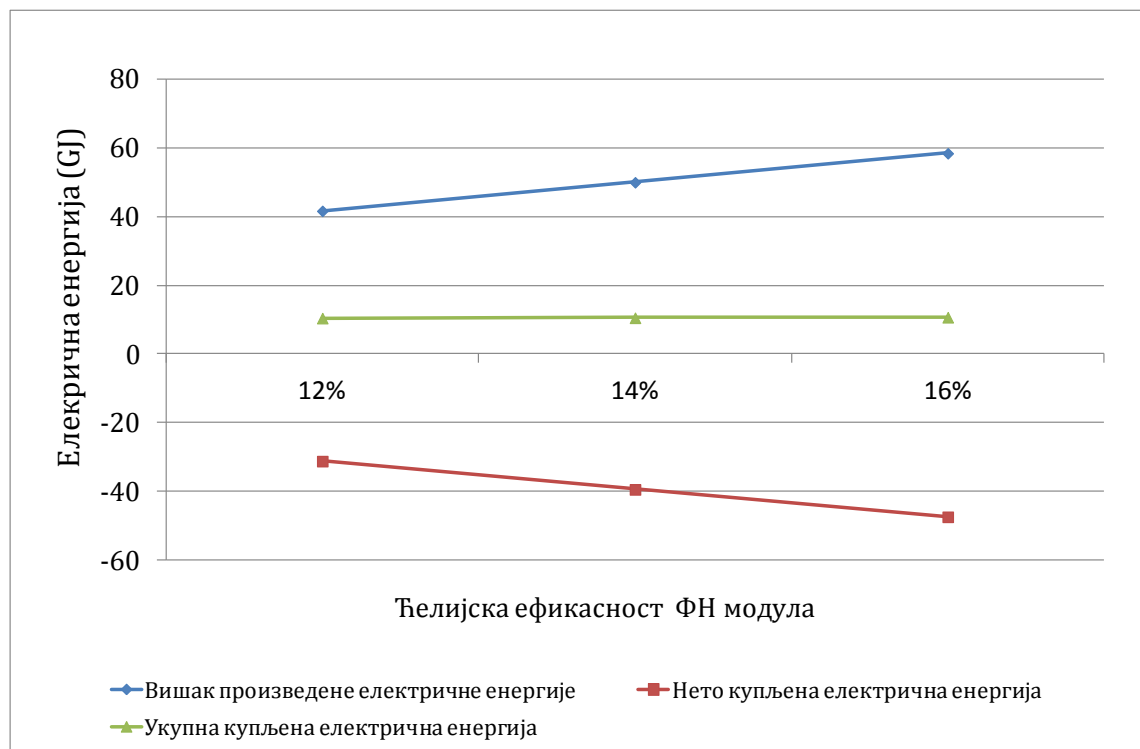


**Слика 9.36** – Удео фотонапонских панела и уштеда примарне енергије за системе даљинског и гасног грејања и различиту ћелијску ефикасност ФН модула

Са повећањем ћелијске ефикасности ФН модула, вишак електричне енергије који се продаје мрежи се нагло увећава. Употребом модула веће ћелијске ефикасности од 14 % и 16 %, вишак електричне енергије који се продаје мрежи биће већи за 8,32 GJ (или 20 %) и 16,76 GJ (или 40,3%) респективно, у односу на ФН модул ћелијске ефикасности 12 %.

Нето количина купљене енергије је у свим случајевима негативна, што значи да је укупна купљена електрична енергија мања од вишка електричне енергије продате мрежи. Нето количина купљене енергије представља у овом случају ДОБИТ ФИНАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ, која за ћелијске ефикасности ФН модула од 12 %, 14 % и 16 % износи 31,18 GJ, 39,43 GJ и 47,71 GJ, респективно.

На Слици 9.37 дат је приказ вишка електричне енергије продате мрежи и купљене електричне енергије из мреже.



**Слика 9.37** – Продата и купљена електрична енергија за зграде са даљинским и гасним грејањем и различитом ћелијском ефикасношћу фотонапонских модула

## 9.2 Ексергетска оптимизација

### 9.2.1 Електрично грејање

#### Различита дебљина изолације зграде

У циљу достигања максималног ексергетског степена искоришћења, тј. ексергетског степена ефикасности ( $\eta_x$  – без уграђене ексергије соларних система и  $\eta_{x, EE}$  – са уграђеном ексергијом соларних система) у овом делу истраживања варирана је дебљина слоја изолације. Посматрана је зграда са дебљинама изолације 0,05 m, 0,1 m, 0,15 m (референтни случај) и 0,2 m. Концепт зграде нето-нулте енергетске потрошње није достигнут због велике потрошње финалне (електричне енергије) и још веће потрошње примарне енергије. Потрошња у разматраним зградама се није мењала у односу на енергетску анализу електричног грејања (Табела 9.1).

Осим ексергетских степена искоришћења, при анализи резултата приказан је и однос потребне и добијене ексергије ( $e_x$  – без уграђене ексергије соларних система и  $e_{x, EE}$  – са уграђеном ексергијом соларних система), укупна потребна ексергија потрошача ( $E_{x, POT}$ ), ексергија добијена из соларних система ( $E_{x, PV-KOL}$  – без уграђене ексергије и  $E_{x, PV-KOL, EE}$  – са уграђеном ексергијом соларних система), потрошња финалне и примарне енергије у згради, процентуални удео фотонапонских панела на крову зграде, генерисана енергија (електрична и топлотна), уштеда примарне енергије (максимална избегнута потрошња примарне енергије уградњом соларних система), продата и купљена електрична енергија и енергетски тип зграде (са два аспекта – са и без уграђене енергије соларних система и изолације). Све наведене величине су дате у Табели 9.21.

Може се видети да је у свим разматраним случајевима дебљине изолације ексергетски степен искоришћења, рачунат без уграђених ексергија соларних система једнак, и износи 12,64 %. Ексергетски степен искоришћења, рачунат са уграђеном ексергијом соларних система, једнак је такође за све случајеве дебљине изолационог слоја и износи 7,63 %.

Однос потребне и добијене ексергије  $e_x$ , рачунат без уграђене ексергије соларних система са порастом дебљине изолационог слоја опада. За дебљину изолације 0,05 m, 0,1 m, 0,15 m и 0,2 m, однос потребне и добијене ексергије износи 1,168, 1,104, 1,075 и 1,059, респективно. Однос потребне и добијене ексергије  $e_{x, EE}$ , рачунат са уграђеном ексергијом соларних система, за дебљину изолације 0,05 m, 0,1 m, 0,15 m и 0,2 m износи 1,933, 1,828, 1,78 и 1,752, респективно. Треба тежити ка томе да величине односа потребне и добијене ексергије буду што мање, јер је у том случају добијена ексергија из соларног система већа. Код зграда са електричним системом грејања, веома тешко се остварују мале вредности ових односа, управо због великих потреба за електричном енергијом која представља чисту ексергију.

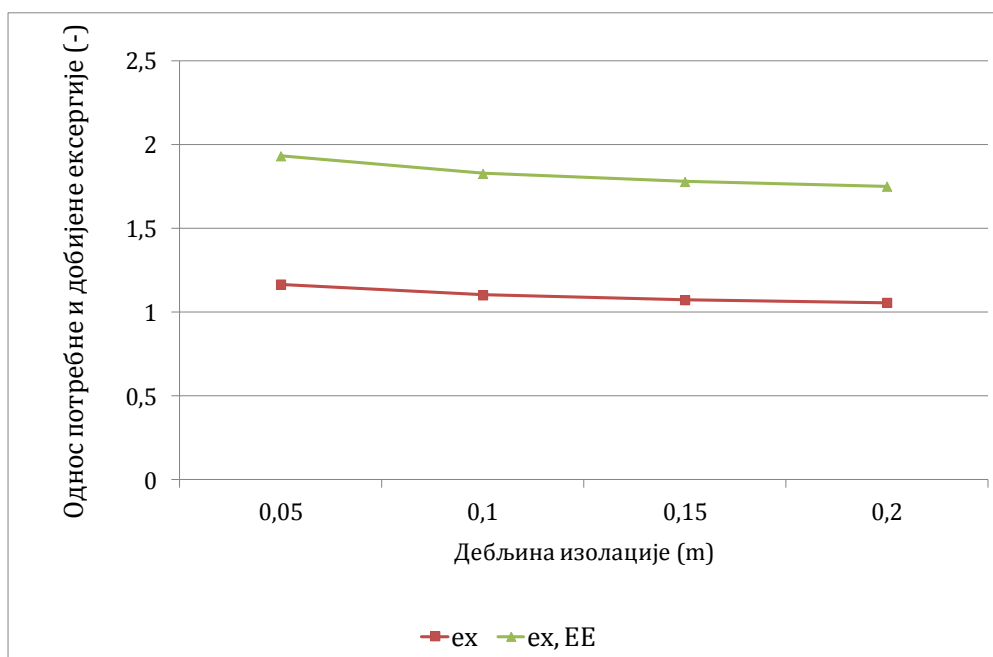
Графички приказ односа потребне и добијене ексергије у зависности од дебљине изолације зграде (са и без урачунате уграђене ексергије инсталираних фотонапонских система и соларних колектора) дат је на Слици 9.38.

Вредности укупне потребне ексергије потрошача и ексергије добијене из соларних система са и без уграђене ексергије, за различите дебљине изолације и систем електричног грејања, графички су приказане на Слици 9.39.

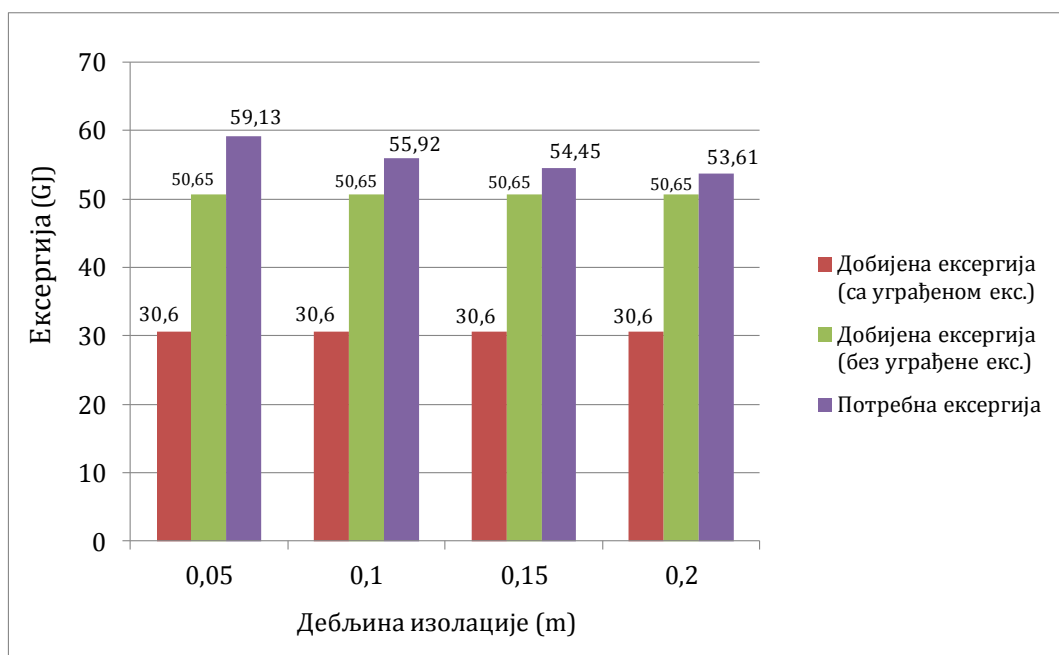
**Табела 9.21** – Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са електричним грејањем и различитом дебелином изолације

	Дебелина изолације (m)			
	0,05	0,1	0,15 – Реф	0,2
$\eta_x$ (%) - ексергетски степен искоришћења без угр. ексергије	12,64	12,64	12,64	12,64
$\eta_{x, EE}$ (%) - ексергетски степен искоришћења са угр. ексергијом	7,63	7,63	7,63	7,63
$e_x$ - однос потребне и добијене ексергије (без угр. ексергије)	1,168	1,104	1,075	1,059
$e_{x, EE}$ - однос потребне и добијене ексергије (са угр. екс.)	1,933	1,828	1,78	1,752
$E_{x, POT}$ - укупна потребна ексергија потрошача (GJ)	59,13	55,92	54,45	53,61
$E_{x, PV-KOL}$ - ексергија добијена из соларних система (GJ)	50,65	50,65	50,65	50,65
$E_{x, PV-KOL, EE}$ - ексергија добијена из сол. система (са угр. екс.)	30,6	30,6	30,6	30,6
$E_{EL}$ - Укупна потрошња електричне енергије (GJ)	73,04	69,83	68,36	67,52
$E_{EL, PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	222,04	212,28	207,81	205,26
Удео ФН панела на крову (%)	98,75	98,75	98,75	98,75
Генерисана енергија (GJ)	55,68	55,68	55,68	55,68
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)	169,27	169,27	169,27	169,27
$E_{PRIM}$ - уштеда примарне енергије (GJ)	150,46	149,74	149,02	148,29
<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>

Може се закључити да са порастом дебелине изолације, вредности добијене ексергије из соларних система су међусобно једнаке за све вредности дебелине изолације (Слика 9.39). Истовремено, са порастом дебелине изолације потребна ексергија опада. У односу на референтни случај дебелине изолације од 0,15 m са потребном ексергијом 54,45 GJ, зграде са тањим изолационим слојем од 0,05 m и 0,1 m имају већу потребну ексергију и то за 4,68 GJ (8,6 %) и 1,47 GJ (2,7 %). Зграда са дељим изолационим слојем од 0,2 m има мању потребну ексергију за 0,84 GJ (1,5 %) у односу на референтни случај.



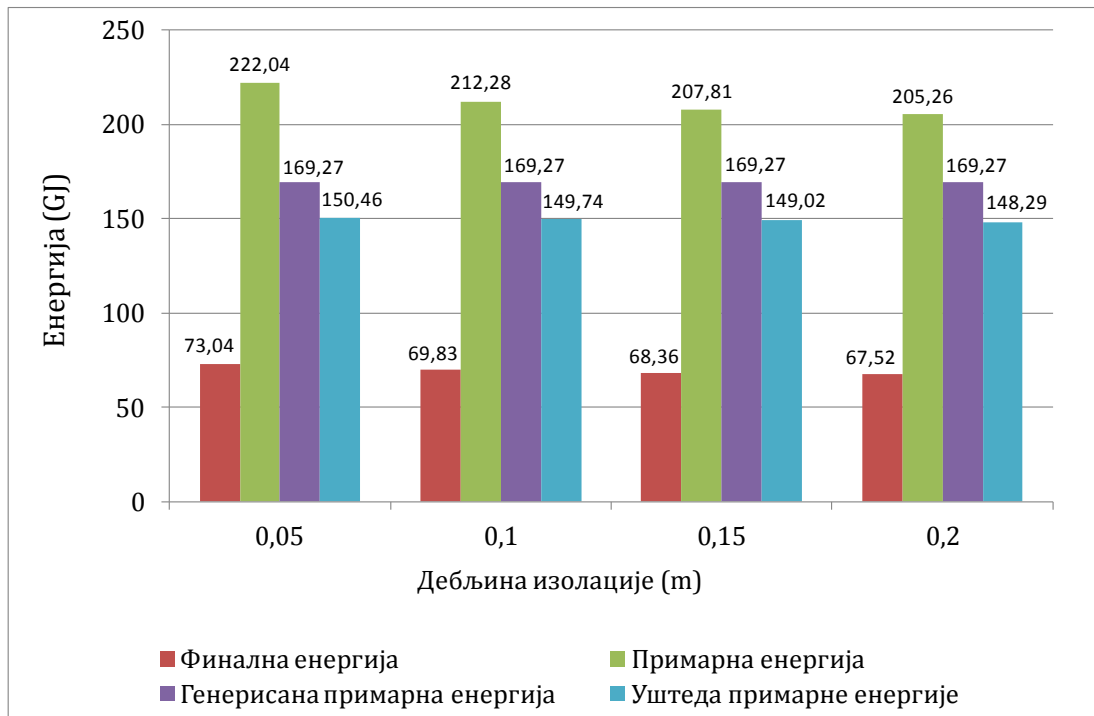
Слика 9.38 – Однос потребне и добијене ексергије за зграду са различитом дебљином изолације и електричним грејањем



Слика 9.39 – Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом дебљином изолације и електричним грејањем

Удео фотонапонских панела на крову је у свим случајевима био исти и износио је 98,75 %, што значи да је 79,6 m<sup>2</sup> површине крова прекривено са ФН панелима, а само 1,25 % површине, тј. 1 m<sup>2</sup> прекривен је соларним колекторима. На овај начин се генерише највећа могућа количина електричне енергије (52,46 GJ), при чему се донекле задовољавају и потребе за грејањем топле воде помоћу колектора (3,22 GJ). Са овим уделима фотонапонских система и соларних колектора, на годишњем нивоу се генерише 169,27 GJ примарне енергије.

Уштеда тј. максимална избегнута потрошња примарне енергије инсталирањем соларних система и употребом изолације благо опада са порастом дебљине изолације, услед пораста сопствене енергије изолације. Слика 9.40 представља потрошње финалне и примарне енергије, као и уштеду примарне енергије за различите дебљине изолације при уделу ФН панела од 98,75 % и са електричним системом грејања.



**Слика 9.40** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту дебљину изолације

У свим случајевима, без обзира на вредност дебљине изолације, испитиване зграде су биле нето-негативне потрошње енергије (NNEB) по оба критеријума, због велике потрошње примарне енергије.

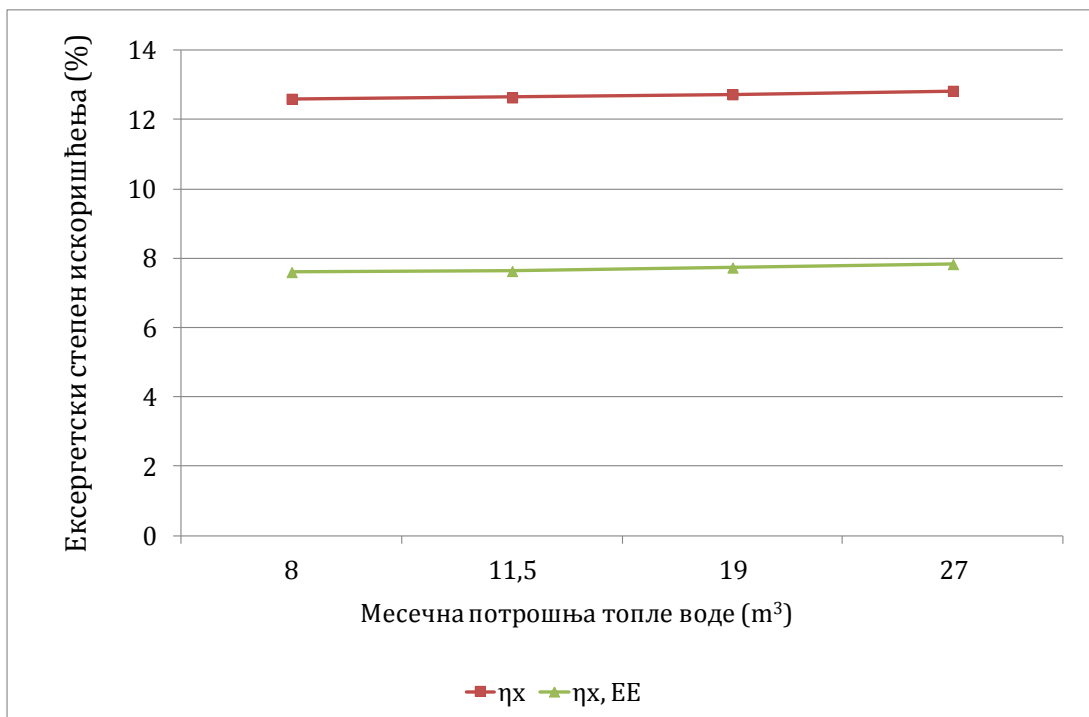
### Различита потрошња топле воде

Код ових истраживања варирана је месечна потрошња топле воде у згради са електричним системом грејања. Анализирани су случајеви са месечном потрошњом топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup> (референтни случај), 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>. Због пораста потрошње топле воде у згради, потребна је већа количина електричне енергије за њено загревање, па расте и укупна потрошња електричне енергије. Она је идентична потрошњи електричне енергије код енергетске оптимизације истих оваквих зграда, и дата је у Табели 9.3 кроз детаљан приказ потрошње по ставкама, за све анализирани случајеве. Месечној потрошњи топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup> одговара годишња потрошња финалне, електричне енергије од 64,54 GJ, 68,36 GJ, 78,03 GJ и 87,85 GJ, респективно. Резултати добијени ексергетском оптимизацијом дати су у Табели 9.22, у којој су такође приказани и енергетски параметри, процентуални удео ФН панела на крову и тип зграде.

Анализом резултата види се да са порастом месечне потрошње топле воде расте ексергетски степен искоришћења (од 12,6 % до 12,83 %), рачунат без уграђених ексергија соларних система. Ексергетски степен искоришћења, рачунат са уграђеном ексергијом соларних система, такође расте са порастом потрошње топле воде (од 7,6 % до 7,83 %) – Слика 9.41.

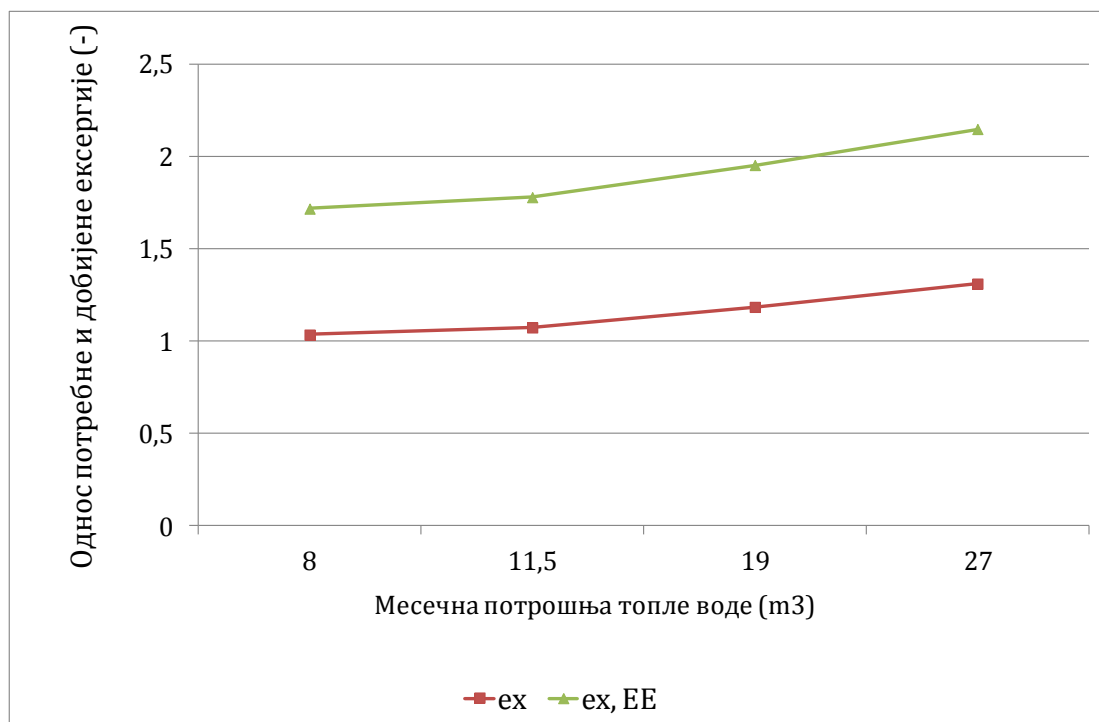
**Табела 9.22** – Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са електричним грејањем и различитом потрошњом топле воде

	Месечна потрошња топле воде (m <sup>3</sup> )			
	8	11,5 – Реф	19	27
$\eta_x$ (%) - ексергетски степен искоришћења без угр. ексергије	12,60	12,64	12,73	12,83
$\eta_{x, EE}$ (%) - ексергетски степен искоришћења са угр. ексергијом	7,60	7,63	7,73	7,83
$e_x$ - однос потребне и добијене ексергије (без угр. ексергије)	1,036	1,075	1,186	1,312
$e_{x, EE}$ - однос потребне и добијене ексергије (са угр. екс.)	1,718	1,78	1,954	2,149
$E_{x, POT}$ - укупна потребна ексергија потрошача (GJ)	52,29	54,45	60,55	67,46
$E_{x, PV-KOL}$ - ексергија добијена из соларних система (GJ)	50,49	50,65	51,04	51,43
$E_{x, PV-KOL, EE}$ - ексергија добијена из сол. система (са угр. екс.)	30,44	30,6	30,99	31,38
$E_{EL}$ - Укупна потрошња електричне енергије (GJ)	64,54	78,03	78,03	87,85
$E_{EL, PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	196,2	207,81	237,21	267,06
Удео ФН панела на крову (%)	98,75	98,75	98,75	98,75
Генерисана енергија (GJ)	55,68	55,68	55,68	55,68
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)	169,27	169,27	169,27	169,27
$E_{PRIM}$ - уштеда примарне енергије (GJ)	149,02	149,02	149,02	149,02
<b>Тип зграде (без угређене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>



Слика 9.41 – Ексергетски степени искоришћења за зграде са електричним грејањем и различитом потрошњом топле воде

Односи потребне и добијене ексергије, рачунати са и без уграђене ексергије соларних система са порастом месечне потрошње топле воде расту. Графички приказ односа потребне и добијене ексергије у зависности од потрошње топле воде дат је на Слици 9.42.

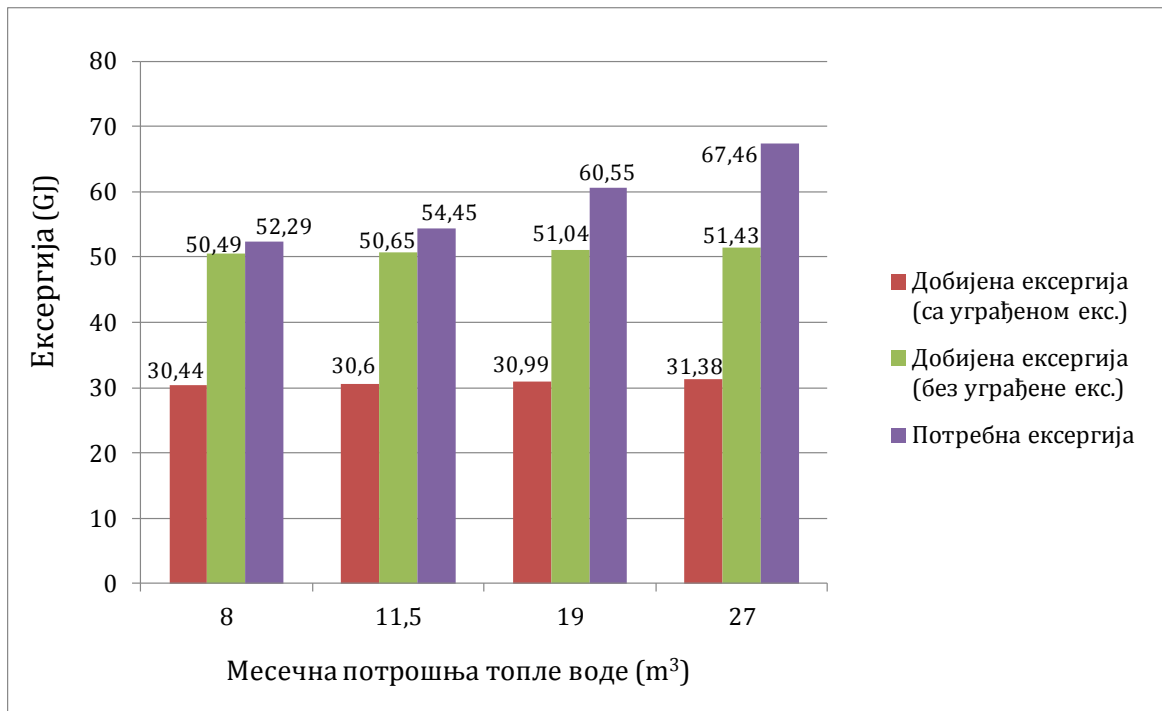


Слика 9.42 – Однос потребне и добијене ексергије за зграду са електричним грејањем и различитом месечном потрошњом топле воде



За месечну потрошњу топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup> однос потребне и добијене ексергије, рачунат без уграђене енергије, износи 1,036, 1,075, 1,186 и 1,312, респективно. Однос потребне и добијене ексергије рачунат са уграђеном ексергијом соларних система за месечну потрошњу топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup> износи 1,718, 1,78, 1,954 и 2,149, респективно. И у овом случају тешко се остварују мале вредности ових односа, због велике потрошње електричне енергије.

Потребна ексергија потрошача и ексергије добијене из соларних система са и без уграђене ексергије, за различиту месечну потрошњу топле воде и систем електричног грејања, графички су приказане на Слици 9.43.

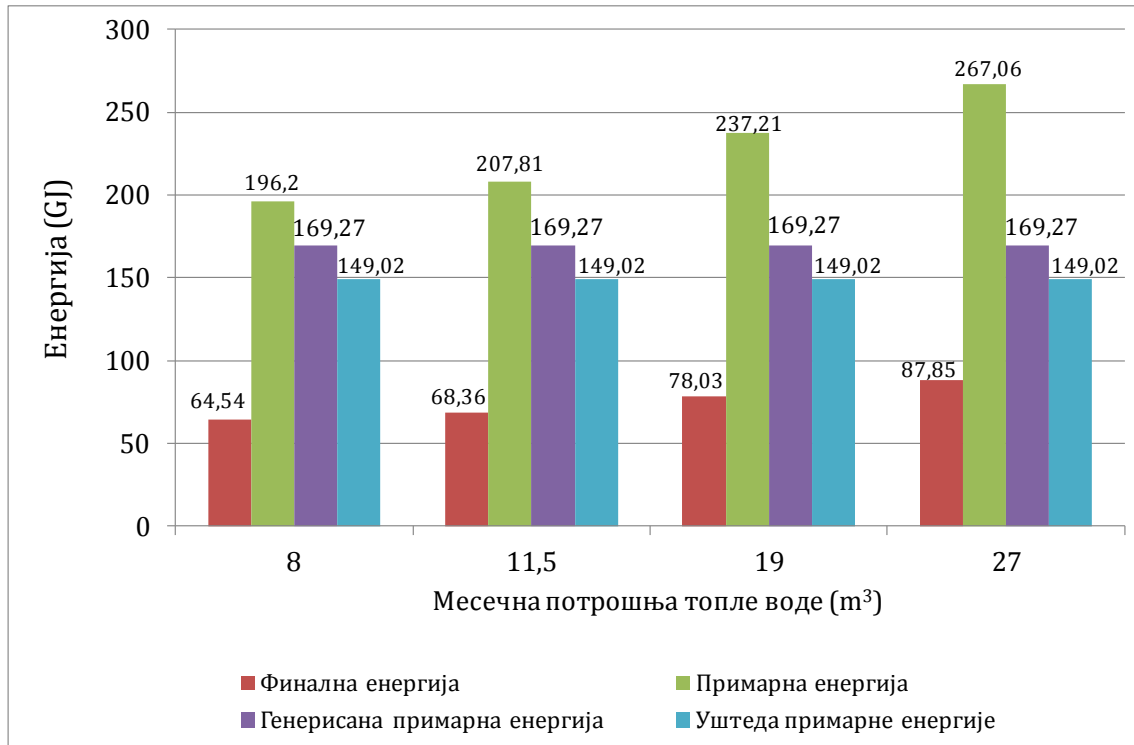


**Слика 9.43** – Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом месечном потрошњом топле воде и електричним грејањем

Уколико расте месечна потрошња топле воде, добијене ексергије из соларних система ће такође имати тренд раста. Она се значајно увећава са порастом потрошње санитарне топле воде, услед веће количине електричне енергије потребне за њено грејање. У односу на референтни случај потрошње топле воде од 11,5 m<sup>3</sup> са потребном ексергијом 54,45 GJ, зграда са мањом потрошњом, од 8 m<sup>3</sup>, има мању потребну ексергију и то за 2,16 GJ (4 %). Зграде са већом потрошњом топле воде, од 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>, имају већу потребну ексергију за 6,1 GJ (11,2 %) и 10,31 GJ (18,9 %) у односу на референтни случај.

Удео фотонапонских панела на крову је у свим случајевима био исти као и у претходном случају и износио је 98,75 %, (одговара 79,6 m<sup>2</sup> ФН панела и 1 m<sup>2</sup> соларних колектора), што омогућава генерисање 169,27 GJ примарне енергије. Максимална избегнута потрошња примарне енергије је иста у свим случајевима и износи 149,02 GJ. Слика 9.44 приказује потрошњу енергије, генерисану енергију и уштеду примарне енергије за различите потрошње топле воде у згради са електричним грејањем.

У свим случајевима, без обзира на вредност потрошње топле воде, испитиване зграде су биле нето-негативне потрошње енергије (NNEB) по оба критеријума, због велике потрошње примарне енергије.



Слика 9.44 –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту потрошњу топле воде

### Различита потрошња електричне енергије расвете и електро-уређаја

Код ових симулација варирана је потрошња електричне енергије расвете и електричних уређаја, на исти начин као код енергетске оптимизације, тако да су разматрана 3 случаја – Случај 1, Случај 2 (референтни) и Случај 3, који су имали укупну потрошњу електричне енергије 66,05 GJ, 68,36 GJ и 71,88 GJ, респективно. У Табели 9.5 дат је приказ потрошње електричне енергије за све разматране случајеве. Резултати добијени ексергетском оптимизацијом приказани су у Табели 9.23.

У свим анализираним случајевима потрошње електричне енергије ексергетски степен искоришћења, рачунат без уграђених ексергија соларних система био је једнак, и износио је 12,64 %. Ексергетски степен искоришћења, рачунат са уграђеном ексергијом соларних система, једнак је такође за све случајеве потрошње електричне енергије и износи 7,63 %.

Односи потребне и добијене ексергије, рачунати са и без уграђене ексергије соларних система расту са порастом потрошње електричне енергије. За различиту потрошњу електричне енергије у анализираној згради, тј. за случајеве 1, 2 и 3, однос потребне и добијене ексергије, рачунат без уграђене енергије, износи 1,0295, 1,075 и 1,144, респективно. Одговарајући односи потребне и добијене ексергије рачунати са уграђеном ексергијом соларних система износе 1,704, 1,78 и 1,894, респективно.

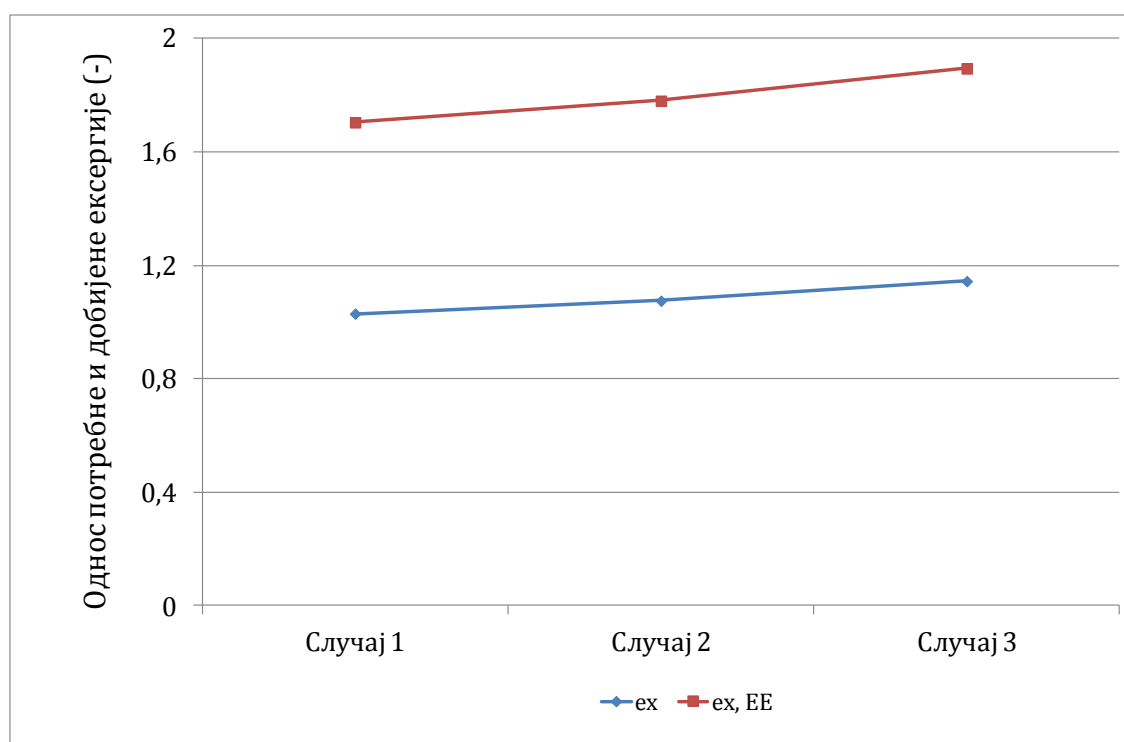
Графички приказ односа потребне и добијене ексергије у зависности од потрошње електричне енергије дат је на Слици 9.45.

**Табела 9.23** – Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са електричним грејањем и различитом потрошњом ел. енергије

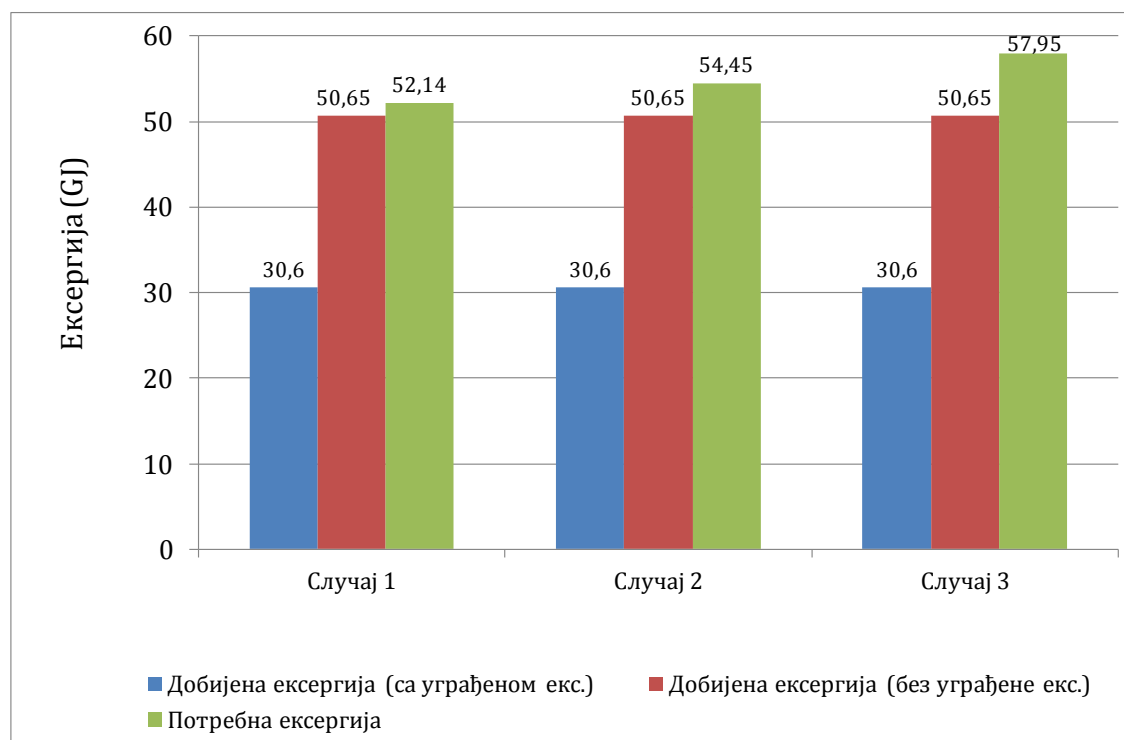
	Различита потрошња електричне енергије		
	Случај 1	Случај 2 - Реф	Случај 3
$\eta_x$ (%) - ексергетски степен искоришћења без угр. ексергије	12,64	12,64	12,64
$\eta_{x, EE}$ (%) - ексергетски степен искоришћења са угр. ексергијом	7,63	7,63	7,63
$e_x$ - однос потребне и добијене ексергије (без угр. ексергије)	1,0295	1,075	1,144
$e_{x, EE}$ - однос потребне и добијене ексергије (са угр. екс.)	1,704	1,78	1,894
$E_{x, POT}$ - укупна потребна ексергија потрошача (GJ)	52,14	54,45	57,95
$E_{x, PV-KOL}$ - ексергија добијена из соларних система (GJ)	50,65	50,65	50,65
$E_{x, PV-KOL, EE}$ - ексергија добијена из сол. система (са угр. екс.)	30,6	30,6	30,6
$E_{EL}$ - Укупна потрошња електричне енергије (GJ)	66,05	68,36	71,86
$E_{EL, PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	200,79	207,81	218,45
Удео ФН панела на крову (%)	98,75	98,75	98,75
Генерисана енергија (GJ)	55,68	55,68	55,68
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)	169,27	169,27	169,27
$E_{PRIM}$ - уштеда примарне енергије (GJ)	149,02	149,02	149,02
<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>

Са порастом потрошње електричне енергије, потребна ексергија је такође расла. За случај 1 (најмања потрошња електричне енергије) потребна ексергија је износила 52,14 GJ, за референтни случај 2 потребна ексергија 54,45 GJ и за случај 3 (највећа потрошња електричне енергије) потребна ексергија је износила 57,95 GJ. У односу на референтни случај, зграда са мањом потрошњом електричне енергије има потребну ексергију мању за 2,31 GJ (4,2%), док зграда веће потрошње електричне енергије има потребну ексергију већу за 3,5 GJ (6,4 %). Добијене ексергије из соларних система са и без уграђене ексергије се нису мењале и износиле су 30,6 GJ и

50,65 GJ за различиту потрошњу електричне енергије и систем електричног грејања - Слика 9.46.

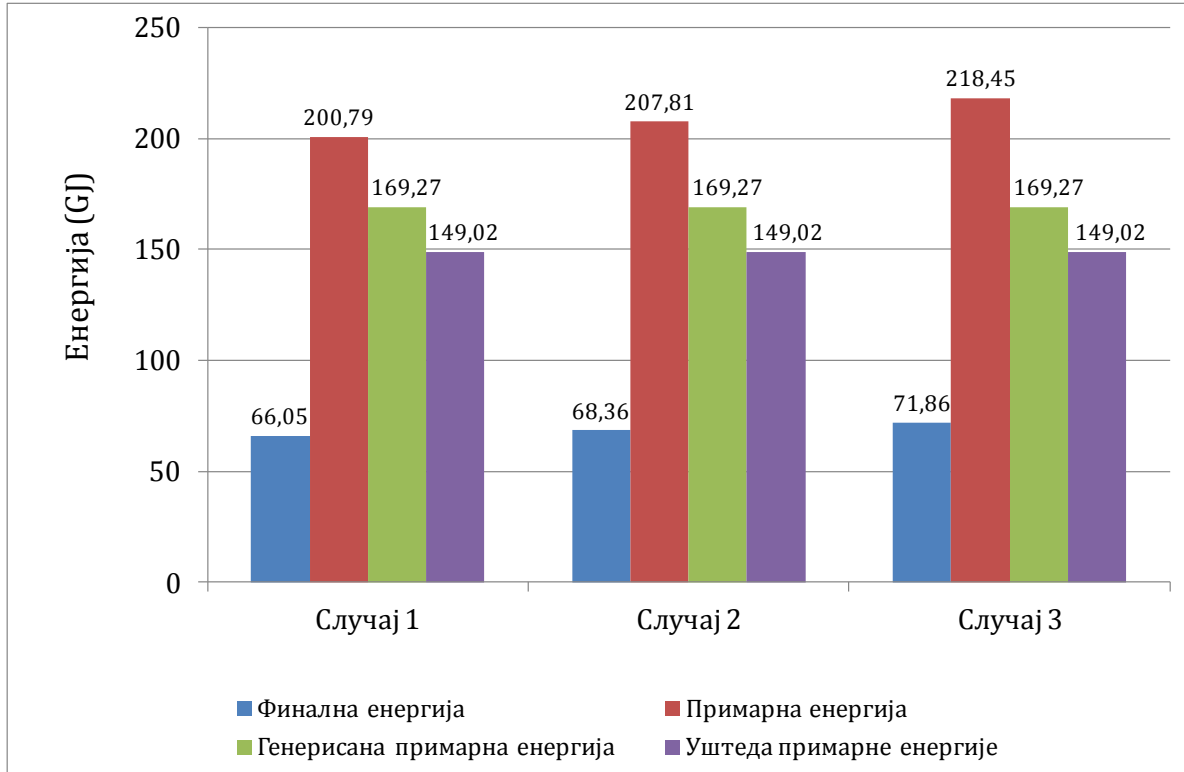


Слика 9.45 – Однос потребне и добијене ексергије за зграду са електричним грејањем и различитом потрошњом електричне енергије



Слика 9.46 – Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом потрошњом електричне енергије и електричним грејањем

Удео фотонапонских панела на крову је у свим случајевима био исти као и у претходним анализама и износио је 98,75 %, што омогућава генерисање 169,27 GJ примарне енергије, док је максимална избегнута потрошња примарне енергије иста у свим случајевима и износи 149,02 GJ. Слика 9.47 представља потрошњу енергије, генерисану енергију и уштеду примарне енергије за различиту потрошњу електричне енергије у згради са електричним грејањем.



**Слика 9.47** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту потрошњу ел. енергије

У свим случајевима, без обзира на вредност потрошње електричне енергије, испитиване зграде су биле зграде нето-негативне потрошње енергије (NNEB) према оба критеријума.

### Различита температура топле воде у бојлеру соларне инсталације

У овим истраживањима мењана је температура топле воде у бојлеру ( $T_{top}$ ) у соларној инсталацији за грејање санитарне воде. Ова температура се односи на температуру на врху бојлера, пошто је температура на дну бојлера програмски ограничена на 10°C мање. У референтном случају, ова температура је износила 50 °C, а анализирани су случајеви када је она износила 60 °C и 70 °C.

Услед различитих захтеваних температура топле воде, дошло је до промене потрошње електричне енергије, која се односила на удео електричне енергије за рад електричних уређаја и за потребе грејања воде.

У Табели 9.24 дат је приказ потрошње електричне енергије у згради, за све разматране случајеве.

**Табела 9.24** – Детаљна годишња потрошња електричне енергије у згради за различите вредности температуре топле воде у бојлеру соларне инсталације

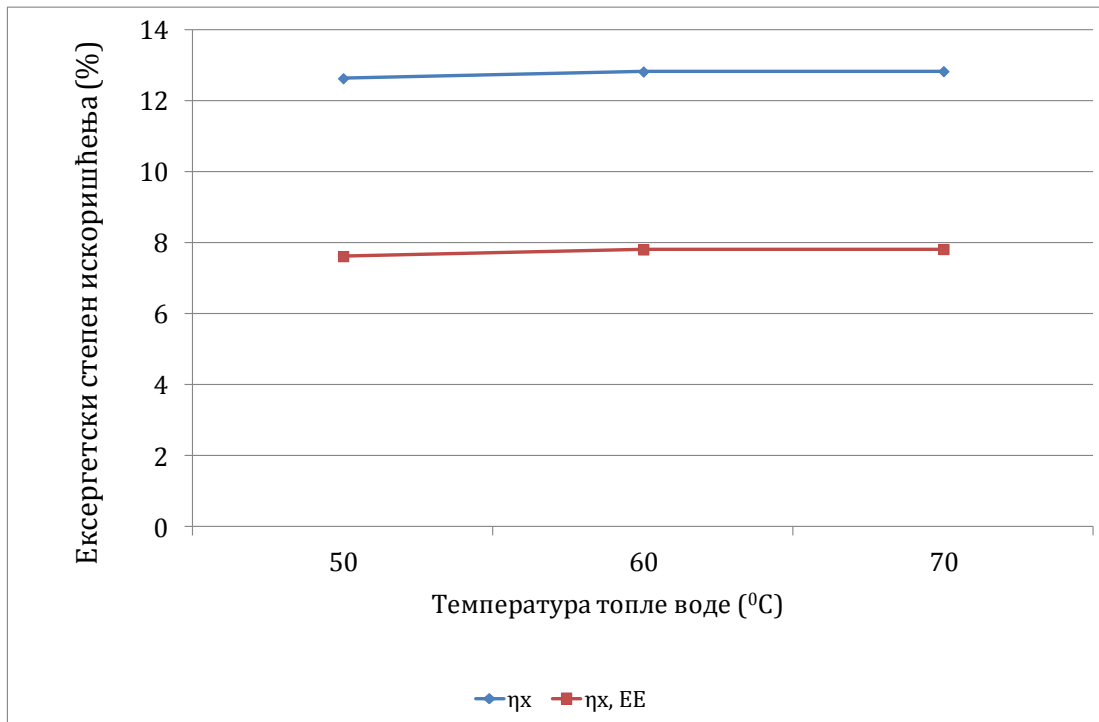
	Потрошња електричне енергије (GJ)		
	Случај 1 -Реф	Случај 2	Случај 3
Грејање	38,16	38,16	36,95
Расвета	1,02	1,02	102
Електрични уређаји	6,29	6,27	6,26
Грејање воде	22,89	23,54	24,23
<b>УКУПНО</b>	<b>68,36</b>	<b>69</b>	<b>69,67</b>

Резултати добијени ексергетском оптимизацијом дати су у Табели 9.25.

**Табела 9.25** – Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са различитом температуром топле воде у бојлеру сол. инсталације

	Температура воде у бојлеру (°C)		
	50 - Реф	60	70
$\eta_x$ (%) - ексергетски степен искоришћења без угр. ексергије	12,64	12,83	12,84
$\eta_{x,EE}$ (%) - ексергетски степен искоришћења са угр. ексергијом	7,63	7,82	7,83
$e_x$ - однос потребне и добијене ексергије (без угр. ексергије)	1,075	1,101	1,143
$e_{x,EE}$ - однос потребне и добијене ексергије (са угр. екс.)	1,78	1,804	1,874
$E_{x,ROT}$ - укупна потребна ексергија потрошача (GJ)	54,45	56,58	58,82
$E_{x,PV-KOL}$ - ексергија добијена из соларних система (GJ)	50,65	51,41	51,44
$E_{x,PV-KOL,EE}$ - ексергија добијена из сол. система (са угр. екс.)	30,6	31,36	31,39
$E_{EL}$ - Укупна потрошња електричне енергије (GJ)	68,36	69	69,67
$E_{EL,PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	207,81	209,76	211,8
Удео ФН панела на крову (%)	98,75	98,75	98,75
Генерисана енергија (GJ)	55,68	55,68	55,68
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)	169,27	169,27	169,27
$E_{PRIM}$ - уштеда прим. енергије GJ	149,02	149,02	149,02
<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>

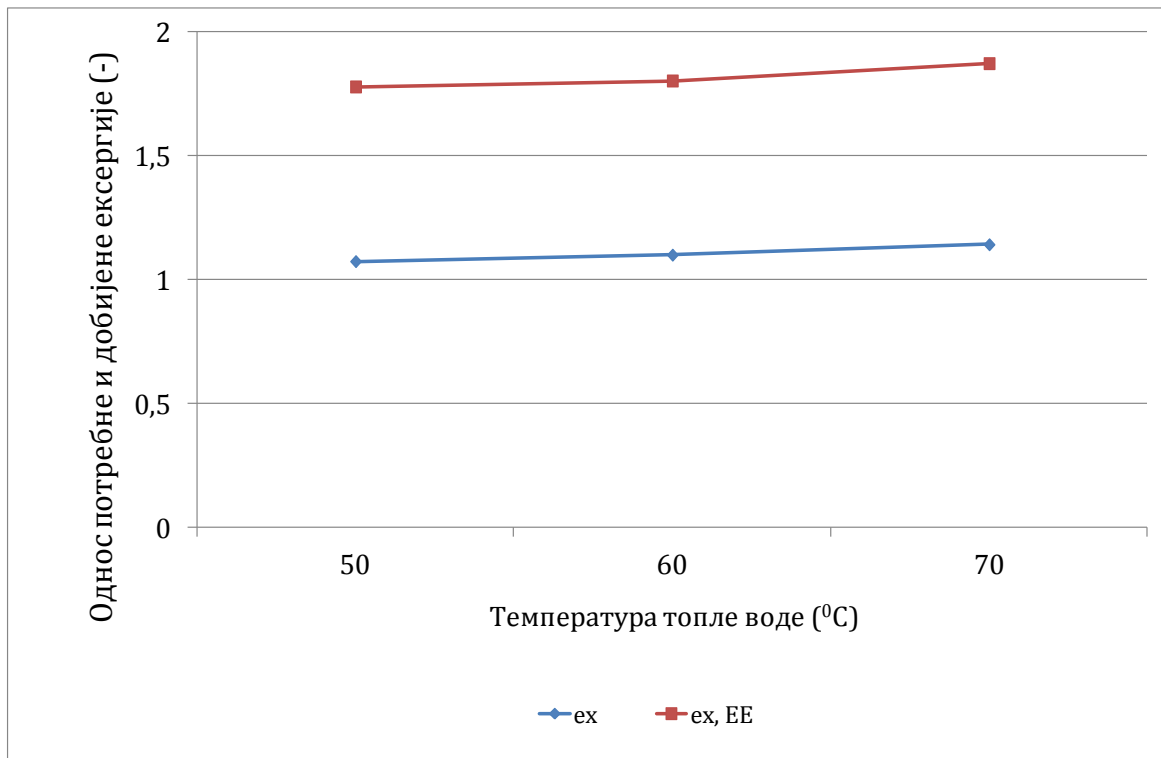
Из Табеле 9.25 се види да са порастом температуре топле воде у бојлеру соларне инсталације, расте и ексергетски степен искоришћења. Тако, коефицијент ексергетске ефикасности  $\eta_x$  за вредности температура топле воде 50 °C, 60 °C и 70 °C износи 12,64 %, 12,83 % и 12,84 %, респективно, док коефицијент ексергетске ефикасности  $\eta_{x, EE}$  има вредности 7,63 %, 7,82 % и 7,83 %, респективно. Приказ оба коефицијента ексергетске ефикасности у зависности од захтеване температуре топле воде дат је на Слици 9.48.



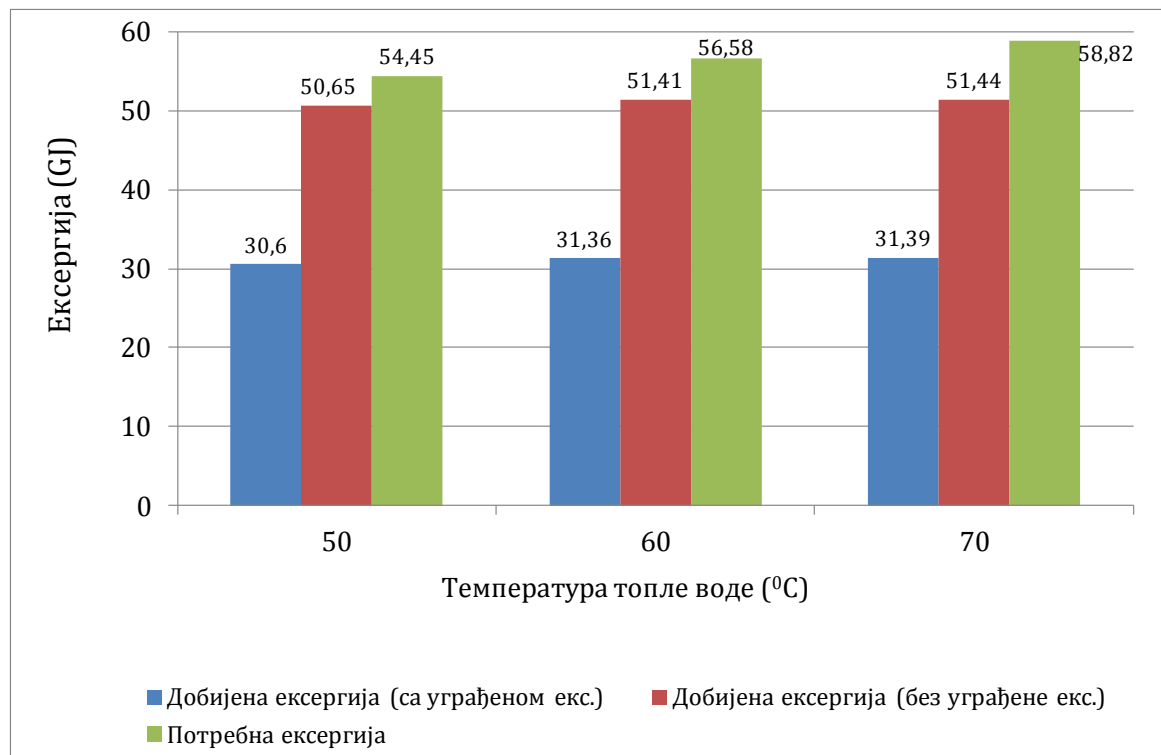
**Слика 9.48** – Ексергетски степени искоришћења за зграде са електричним грејањем и различитом температуром топле воде

Односи потребне и добијене ексергије  $e_x$  и  $e_{x, EE}$ , рачунати са и без уграђене ексергије соларних система, расту са порастом температуре топле воде у бојлеру. Графички приказ односа потребне и добијене ексергије у зависности од температуре топле воде у бојлеру соларне инсталације дат је на Слици 9.49. Мале вредности ових односа су тешко остварљиве због велике потрошње електричне енергије.

Потребна ексергија потрошача и ексергије добијене из соларних система са и без уграђене ексергије, за различиту температуру топле воде у бојлеру и систем електричног грејања, графички су приказане на Слици 9.50. Са порастом температуре топле воде, добијене ексергије из соларних система ће такође расти услед веће количине електричне енергије потребне за њено загревање. У односу на референтни случај са температуром топле воде од 50 °C, и потребном ексергијом 54,45 GJ, ако је захтевана температура топле воде 60 °C, потребна ексергија је већа за 2,13 GJ (3,9 %). Ако је захтевана температура топле воде 70 °C, потребна ексергија је већа за 4,37 GJ (8 %).



Слика 9.49 – Однос потребне и добијене ексергије за зграду са електричним грејањем и различитом температуром топле воде

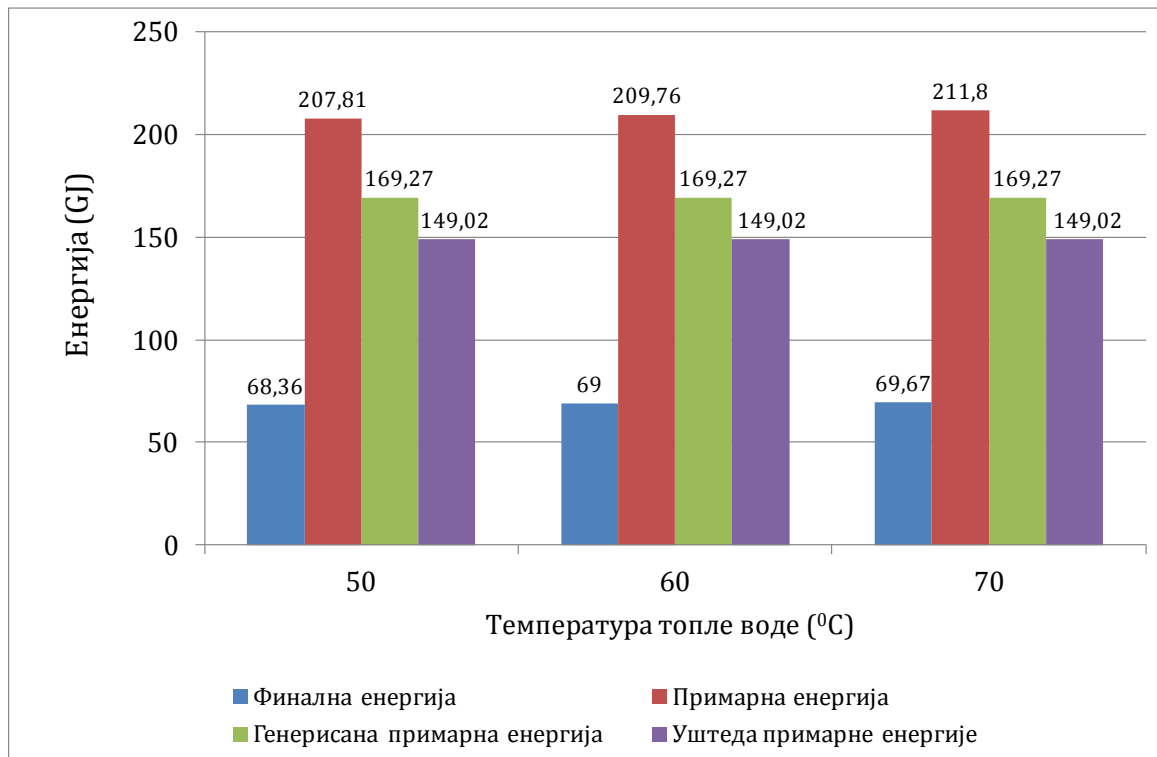


Слика 9.50 – Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом температуром топле воде и електричним грејањем

И код ових опимизација удео фотонапонских панела на крову је у свим случајевима био исти и износио је 98,75 %, (79,6 m<sup>2</sup> ФН панела и 1 m<sup>2</sup> соларних



коллектора), што омогућава генерисање 169,27 GJ примарне енергије, при чему је максимална избегнута потрошња примарне енергије 149,02 GJ. Слика 9.51 представља потрошњу енергије, генерисану енергију и уштеду примарне енергије за различите температуре топле воде у згради са електричним грејањем.



**Слика 9.51** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту температуру топле воде

У свим случајевима, без обзира на вредност температуре топле воде у бојлеру соларне инсталације, испитиване зграде су биле нето-негативне потрошње енергије (NNEB) по оба приступа – са и без уграђене енергије. Разлог је наравно, велика потрошња електричне енергије која има висок коефицијент конверзије у примарну енергију.

### Различита ћелијска ефикасност фотонапонских модула

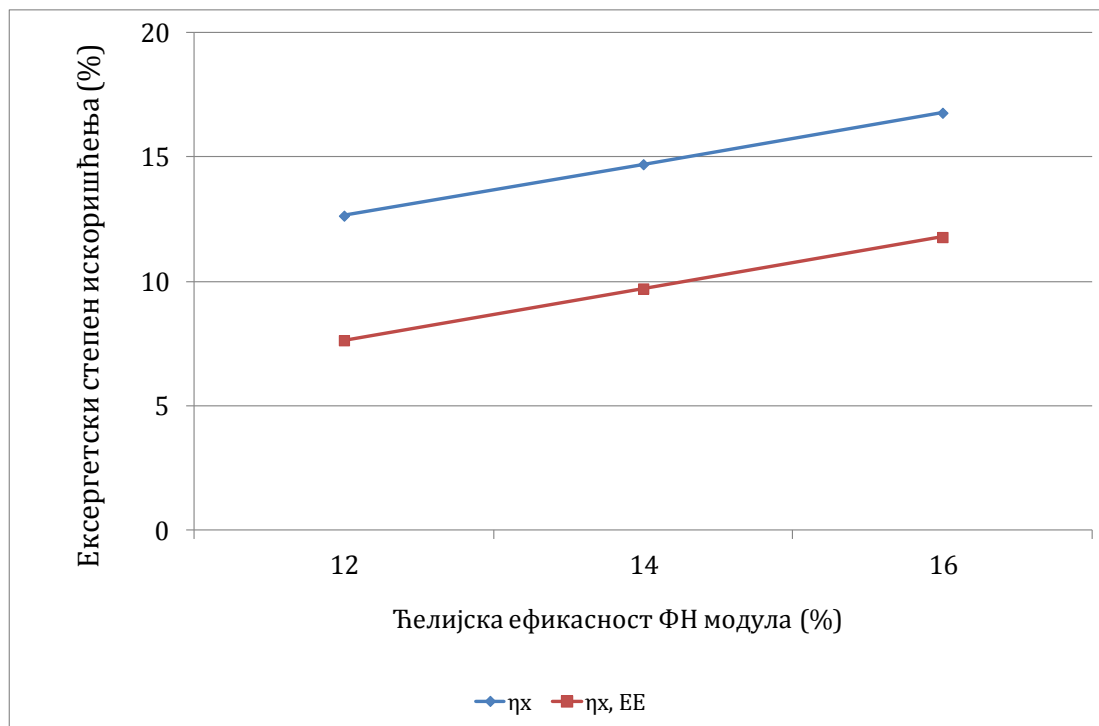
Код ових симулација анализирани су случајеви различите ћелијске ефикасности инсталираних фотонапонских панела. Симулирана је употреба ФН модула са истим ћелијским ефикасностима као код енергетске оптимизације. Тако су испитивани ФН модули са ћелијском ефикасношћу од 12 % (референтни случај), а вршена је још и симулација и опимизација за ћелијску ефикасност модула од 14 % и 16 %. Укупна годишња потрошња енергије у згради се није мењала (68,36 GJ финалне енергије, тј. 207,81 GJ примарне енергије).

Резултати добијени ексергетском оптимизацијом дати су у Табели 9.26.

**Табела 9.26** – Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве ФН модула са различитом ћелијском ефикасношћу

	Ћелијска ефикасност ФН модула		
	12 % - Реф	14 %	16 %
$\eta_x$ (%) - ексергетски степен искоришћења без угр. ексергије	12,64	14,71	16,78
$\eta_{x, EE}$ (%) - ексергетски степен искоришћења са угр. ексергијом	7,63	9,71	11,78
$e_x$ - однос потребне и добијене ексергије (без угр. ексергије)	1,075	0,9236	0,8095
$e_{x, EE}$ - однос потребне и добијене ексергије (са угр. екс.)	1,78	1,4	1,153
$E_{x, POT}$ - укупна потребна ексергија потрошача (GJ)	54,45	54,45	54,45
$E_{x, PV-KOL}$ - ексергија добијена из соларних система (GJ)	50,65	58,96	67,26
$E_{x, PV-KOL, EE}$ - ексергија добијена из сол. система (са угр. екс.)	30,6	38,91	47,21
$E_{EL}$ - Укупна потрошња електричне енергије (GJ)	68,36	68,36	68,36
$E_{EL, PRIM}$ - Примарна енергија укупне потрошње ел. ен (GJ)	207,81	207,81	207,81
Удео ФН панела на крову (%)	98,75	98,75	98,75
Генерисана енергија (GJ)	55,68	64,42	73,17
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)	169,27	195,85	222,43
$E_{PRIM}$ - уштеда прим. енергије GJ	149,02	175,6	202,18
<b>Тип зграде (без уграђене енергије)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>PNEB</b>
<b>Тип зграде (са уграђеном енергијом)</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>	<b>NNEB</b>

Из горње табеле се види да са порастом ћелијске ефикасности фотонапонских модула, долази до значајнијег пораста оба ексергетска степена искоришћења (са и без уграђене ексергије). Тако, коефицијент ексергетске ефикасности  $\eta_x$  за вредности ћелијске ефикасности модула 12 %, 14 % и 16 % износи 12,64 %, 14,71 % и 16,78 %, респективно, док коефицијент ексергетске ефикасности  $\eta_{x, EE}$  за исте ћелијске ефикасности ФН модула има вредности 7,63 %, 9,71 % и 11,78 %, респективно. У односу на референтни случај од 12 %, за ћелијске ефикасности модула 14 % и 16 % коефицијент  $\eta_x$  је већи за 2,07% и 4,14 %, респективно, а коефицијент ексергетске ефикасности  $\eta_{x, EE}$  је већи за 2,08 % и 4,15%, респективно. Приказ оба коефицијента ексергетске ефикасности дат је на Слици 9.52.

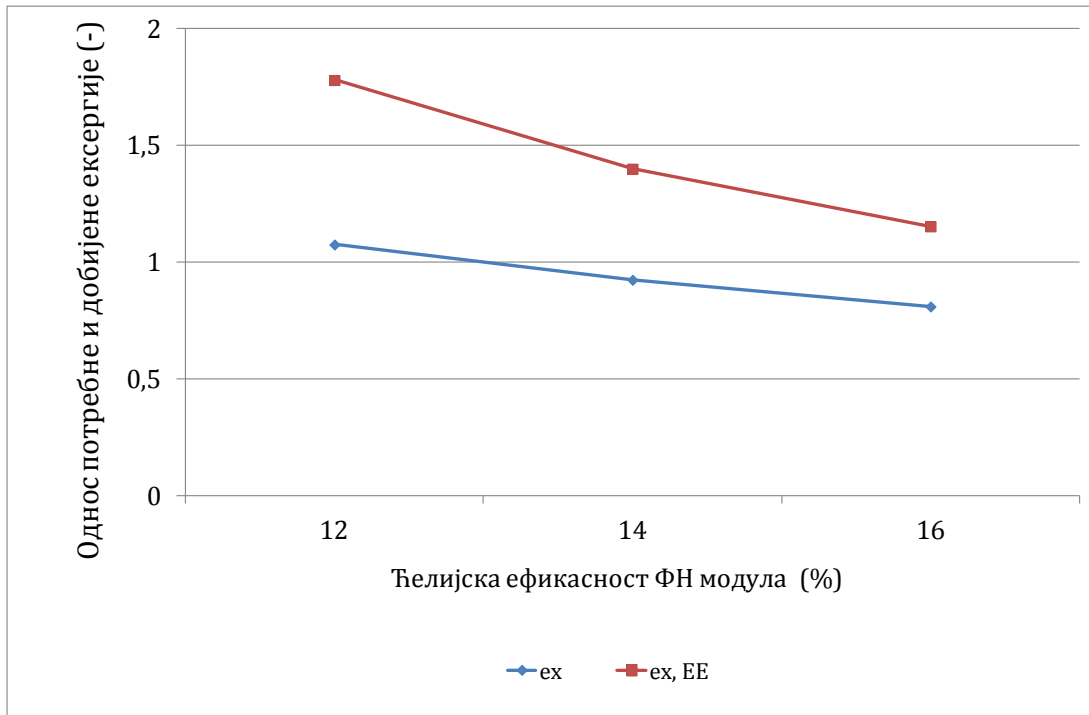


**Слика 9.52** – Ексергетски степени искоришћења за зграде са електричним грејањем и ФН модулима различите хелијске ефикасности

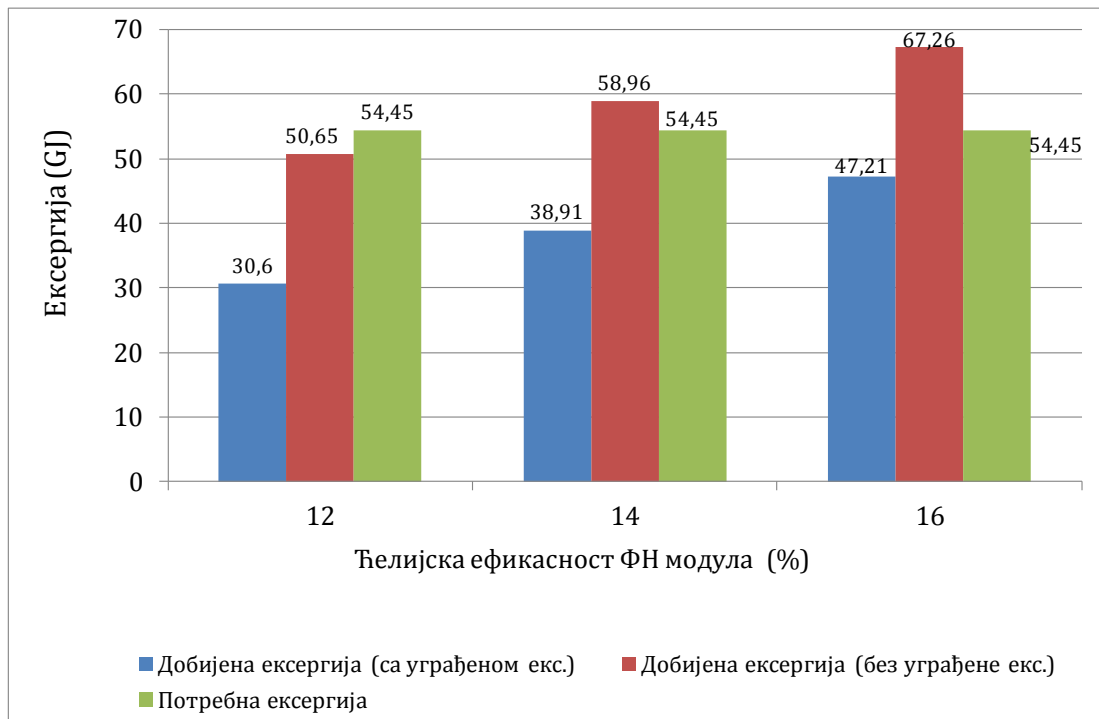
Односи потребне и добијене ексергије  $e_x$  и  $e_{x, EE}$ , рачунати са и без уграђене ексергије соларних система, опадају са порастом хелијске ефикасности ФН модула. За ефикасност од 12 %, 14 % и 16 %, однос потребне и добијене ексергије, рачунат без уграђене ексергије, износи 1,075, 0,9236 и 0,8095, респективно, док је однос потребне и добијене ексергије рачунат са уграђеном ексергијом 1,78, 1,4 и 1,153, респективно. Види се да се са применом ФН модула хелијске ефикасности 14 % и 16 % постижу вредности односа потребне и добијене ексергије  $e_x < 1$ . Ово значи да се из инсталираних соларних система добија више ексергије од потребне ексергије свих потрошача у кући (без уграђене ексергије). Графички приказ односа потребне и добијене ексергије у зависности од хелијске ефикасности ФН модула дат је на Слици 9.53.

Потребна ексергија потрошача и ексергије добијене из соларних система са и без уграђене ексергије, за различиту хелијску ефикасност уграђених фотонапонских модула и систем електричног грејања, графички су приказане на Слици 9.54. Са порастом хелијске ефикасности, добијене ексергије из соларних система ће имати значајан пораст, без обзира да ли су рачунате са или без уграђене ексергије. Потребна ексергија је једнака у свим анализираним случајевима и износи 54,45 GJ.

И у овом случају, удео фотонапонских панела на крову је при свим испитиваним вредностима хелијске ефикасности у свим случајевима био исти и износио је 98,75 %, (79,6 m<sup>2</sup> ФН панела и 1 m<sup>2</sup> соларних колектора), што омогућава генерисање 169,27 GJ примарне енергије, при чему је максимална избегнута потрошња примарне енергије 149,02 GJ.

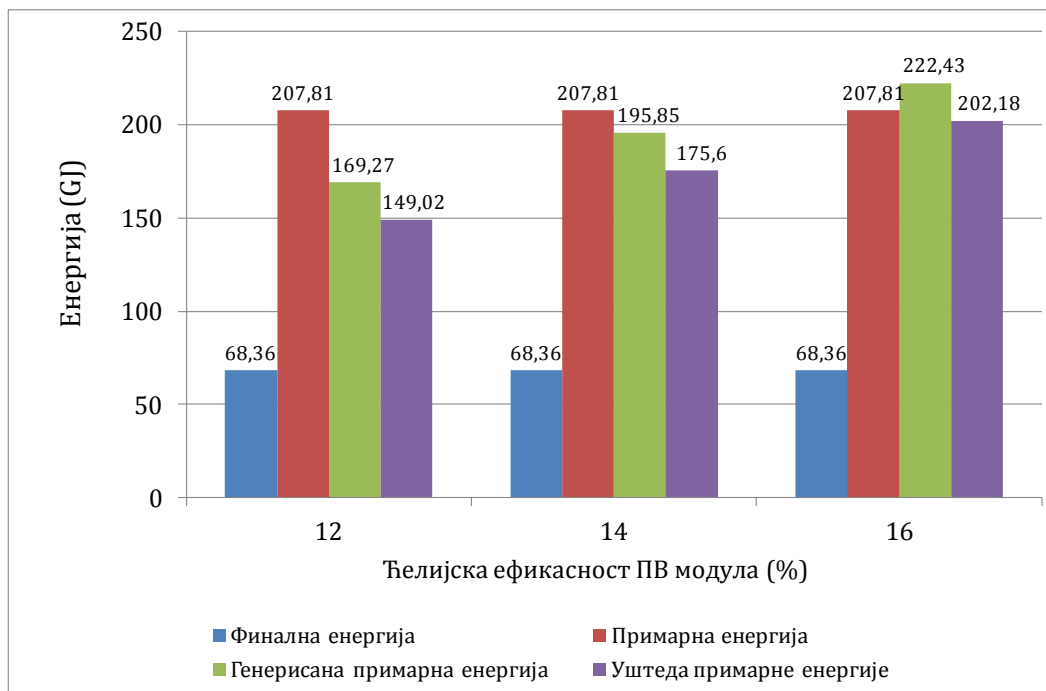


Слика 9.53 – Однос потребне и добијене ексергије за зграду са електричним грејањем и различитом ћелијском ефикасношћу ФН модула



Слика 9.54 – Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом ћелијском ефикасношћу ФН модула и електричним грејањем

Слика 9.55 представља потрошњу енергије, генерисану енергију и уштеду примарне енергије за различиту вредност ћелијске ефикасности фотонапонских модула у згради са електричним грејањем.



**Слика 9.55** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту ћелијску ефикасност ФН модула

У случајевима ћелијске ефикасности фотонапонских панела 12 % и 14 % анализиране зграде су биле нето-негативне потрошње енергије (NNEB) по оба приступа – са и без уграђене енергије. Међутим, употребом ФН модула са ћелијском ефикасношћу од 16 %, могуће је постићи концепт зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) ако се не узима у обзир уграђена енергија инсталираних соларних система и изолације. Уколико се она узима у обзир, кућа је нето-негативне потрошње енергије (NNEB). Употребом модула са ћелијском ефикасношћу од 16 %, генерише се 222,43 GJ примарне енергије, што је више од енергетских потреба зграде (207,81 GJ).

## 9.2.2 Даљинско и гасно грејање

### Различита дебљина изолације зграде

Као код ексергетске оптимизације зграде са електричним грејањем, и код ексергетске оптимизације зграда са даљинским и гасним грејањем, вршена је оптимизација односа величина фотонапонских панела и соларних колектора у циљу достизања највеће ексергетске ефикасности. У овом делу истраживања анализирани су случајеви зграда са раније посматраним дебљинама изолације: 0,05 m, 0,1 m, 0,15 m (референтни случај) и 0,2 m. Табела 9.12 даје детаљан приказ потрошње енергије у згради, по ставкама, за различите дебљине изолације, за систем даљинског грејања (ДГ) и за систем гасног грејања (ГГ).

Резултати ексергетске оптимизације зграде са различитом дебљином изолације дати су у Табели 9.27.

У свим анализраним случајевима дебљине изолације ексергетски степен искоришћења рачунат без уграђених ексергија соларних има константну вредност и

износи 12,64 %, а ексергетски степен искоришћења рачунат са уграђеном ексергијом соларних система, једнак је такође за све дебљине изолације и износи 7,63 %.

**Табела 9.27** – Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са различитом дебљином изолације

		Дебљина изолације			
		0,05 m	0,1 m	0,15 m – Реф	0,2 m
$\eta_x$ (%) - ексергетски степен искоришћења без угр. ексергије		12,64	12,64	12,64	12,64
$\eta_{x, EE}$ (%) - ексергетски степен искоришћења са угр. ексергијом		7,63	7,63	7,63	7,63
$e_x$ - однос потребне и добијене ексергије (без угр. ексергије)		0,3341	0,3341	0,3341	0,3341
$e_{x, EE}$ - однос потребне и добијене ексергије (са угр. екс.)		0,5531	0,5531	0,5531	0,5531
$E_{x, POT}$ - укупна потребна ексергија потрошача (GJ)		16,92	16,92	16,92	16,92
$E_{x, PV-KOL}$ - ексергија добијена из соларних система (GJ)		50,65	50,65	50,65	50,65
$E_{x, PV-KOL, EE}$ - ексергија добијена из сол. система (са угр. екс.)		30,6	30,6	30,6	30,6
Удео ФН панела на крову (%)		98,75	98,75	98,75	98,75
Генерисана енергија (GJ)		55,68	55,68	55,68	55,68
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		169,27	169,27	169,27	169,27
$E_{PRIM}$ - уштеда примарне енергије (GJ)		150,47	149,75	149,02	148,29
ДГ	$E_{TOT, PRIM, DG}$ - Укупна потрошња прим. ен. (GJ)	179,44	173,6	170,94	169,43
	<b>Тип зграде (без угр. ен.)</b>	NNEB	NNEB	NNEB	NNEB
	<b>Тип зграде (са угр. ен.)</b>	NNEB	NNEB	NNEB	NNEB
ГГ	$E_{TOT, PRIM, GG}$ - Укупна потрошња прим. ен. (GJ)	139,54	136,03	134,96	133,88
	<b>Тип зграде (без угр. ен.)</b>	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB
	<b>Тип зграде (са угр. ен.)</b>	PNEB	PNEB	PNEB	PNEB

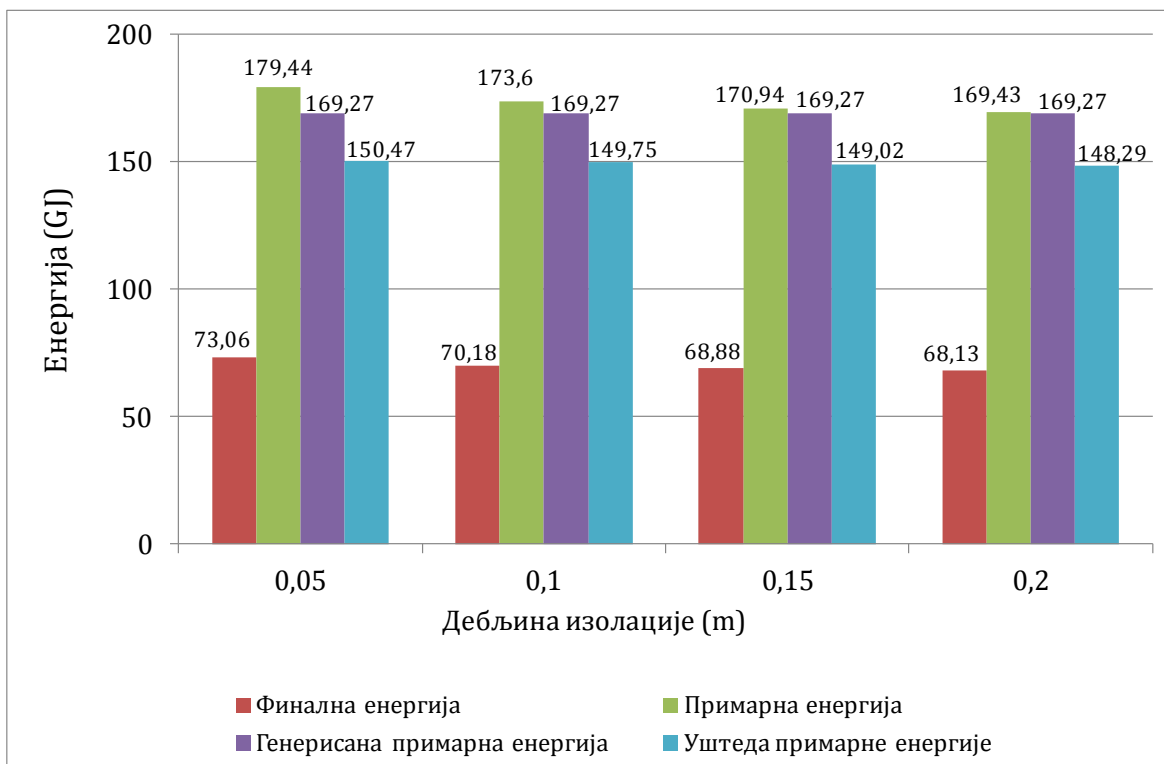
Раније је наведено да однос потребне и добијене ексергије треба да буде што мањи, јер се у том случају из инсталираног соларног система добија већа ексергија од потребне ексергије. Са електричним грејањем то је било тешко оствариво због велике потрошње електричне енергије. Међутим, у случају даљинског и гасног грејања, потрошња електричне енергије је значајно мања, па се из инсталираних

система добија ексергија која је доста већа од потребне ексергије. То значи да су вредности односа потребне и добијене ексергије мањи од 1.

При анализама зграда са даљинским и гасним грејањем и различитим дебљинама изолационог слоја, због непромењене потрошње електричне енергије, однос потребне и добијене ексергије рачунат без уграђене ексергије соларних система ( $e_x$ ) је био исти за све вредности дебљина изолације и износио је 0,3341. Истовремено, однос потребне и добијене ексергије рачунат са уграђеном ексергијом соларних система ( $e_{x, EE}$ ) је такође био исти за све вредности дебљина изолације и износио је 0,5531.

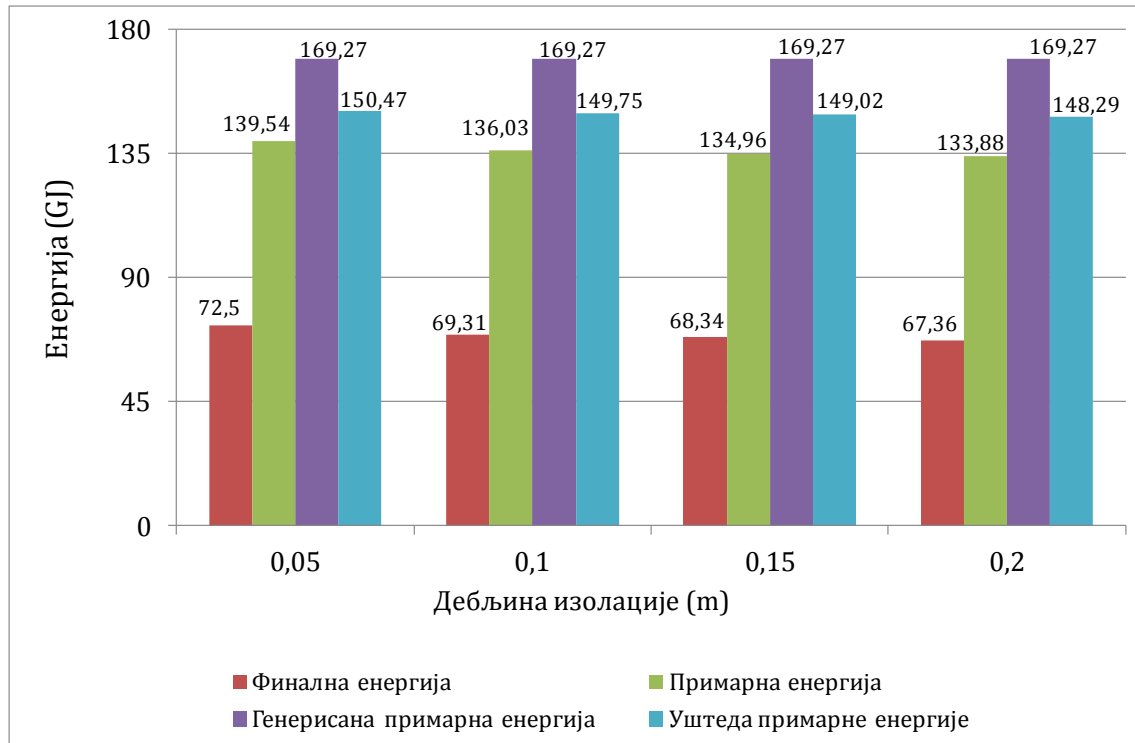
Вредност добијене ексергије из соларних инсталација, рачуната без уграђене ексергије, иста је за све разматране дебљине изолационог слоја и износи 50,65 GJ. Вредност добијене ексергије из соларних инсталација, рачуната са уграђеном ексергијом, такође је иста за све разматране дебљине изолационог слоја и износи 30,6 GJ. Потребна ексергија је једнака у свим анализираним случајевима дебљине изолације (16,92 GJ) јер није било промена у количини потребне електричне енергије.

Удео фотонапонских панела на крову у свим случајевима дебљине изолације је био исти и износио је 98,75 % ( 79,6 m<sup>2</sup> површине крова прекривено је са ФН панелима, а 1,25 % површине, тј. 1 m<sup>2</sup> прекривено је соларним колекторима). На овај начин се годишње генерише 52,46 GJ електричне енергије, и 3,22 GJ топлотне енергије. Овом износу генерисане енергије путем соларних система одговара 169,27 GJ примарне енергије.



**Слика 9.60** – Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту дебљину изолације у згради са даљинским системом грејања

Услед пораста уграђене енергије изолације, уштеда тј. максимална избегнута потрошња примарне енергије опада у мањем износу са порастом дебљине изолације. Слика 9.60 представља потрошње финалне и примарне енергије, као и генерисану примарну енергију у уштеду примарне енергије за различите дебљине изолације при уделу ФН панела од 98,75 % у случају даљинског грејања, док су на Слици 9.56 дати исти параметри за случај гасног грејања.



**Слика 9.56** – Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту дебљину изолације у згради са гасним системом грејања

Код система даљинског грејања, у свим анализираним случајевима без обзира на вредност дебљине изолације, испитиване зграде су биле нето-негативне потрошње енергије (NNEB) по оба критеријума, јер генерисана енергија из соларних система није могла да задовољи енергетске потребе зграде.

Насупрот зградама са даљинским грејањем, зграде са гасним системом грејања су у свим анализираним случајевима без обзира на вредност дебљине изолације, биле зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) по оба критеријума. Код њих је укупна потрошња примарне енергије била мања, па је генерисана енергија задовољила њихове енергетске потребе.

### Различита месечна потрошња топле воде

Исте величине месечне потрошње топле воде су посматране код оптимизације зграде са даљинским и гасним грејањем у односу на зграду са електричним грејањем - 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup> (референтни случај), 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>. Са повећањем потрошње топле воде, расте и потрошња електричне енергије у згради, која је дата у Табели 9.14. Подсећања ради, за месечну потрошњу топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup> у



згради са даљинским грејањем, потрошња финалне енергије износи 65,06GJ, 68,88 GJ, 78,56 GJ и 88,37 GJ, респективно. У згради са гасним системом грејања, за исте потрошње топле воде, потрошња финалне енергије износила је 64,52GJ, 68,34 GJ, 78,02 GJ и 87,83 GJ, респективно.

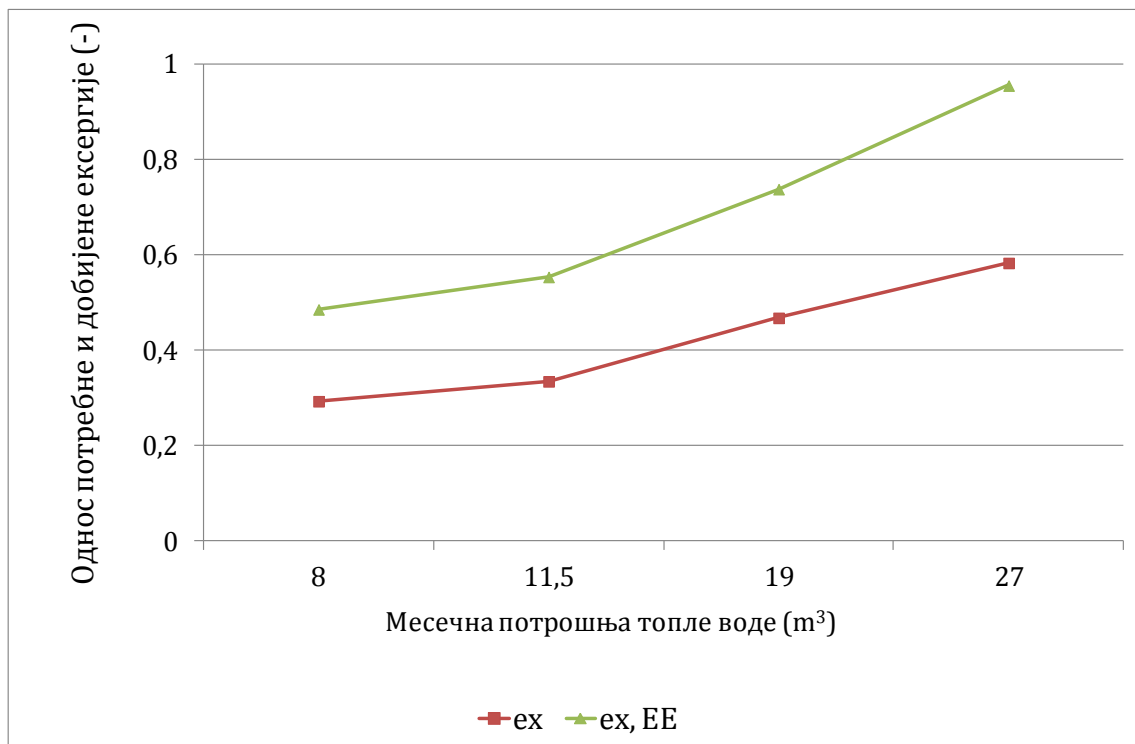
У циљу добијања што већег ексергетског степена искоришћења, спроведена је ексергетска оптимизација и резултати оптимизације зграде са различитом месечном потрошњом топле воде, за зграду са даљинским и гасним системом грејања, дати су у Табели 9.28.

**Табела 9.28** – Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са различитом месечном потрошњом топле воде

		Месечна потрошња топле воде (m <sup>3</sup> )			
		8	11,5 - Реф	19	27
$\eta_x$ (%) - ексергетски степен искоришћења без угр. ексергије		12,6	12,64	12,73	12,83
$\eta_{x,EE}$ (%) - ексергетски степен искоришћења са угр. ексергијом		7,6	7,63	7,73	7,83
$e_x$ - однос потребне и добијене ексергије (без угр. ексергије)		0,2924	0,3341	0,4673	0,5825
$e_{x,EE}$ - однос потребне и добијене ексергије (са угр. екс.)		0,485	0,5531	0,7373	0,9546
$E_{x,ROT}$ - укупна потребна ексергија потрошача (GJ)		14,76	16,92	22,85	29,96
$E_{x,PV-KOL}$ - ексергија добијена из соларних система (GJ)		50,49	50,65	51,04	51,43
$E_{x,PV-KOL,EE}$ - ексергија добијена из сол. система (са угр. екс.)		30,44	30,6	30,99	31,38
Удео ФН панела на крову (%)		98,75	98,75	98,75	98,75
Генерисана енергија (GJ)		55,68	55,68	55,68	55,68
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		169,27	169,27	169,27	169,27
$E_{PRIM}$ - уштеда примарне енергије (GJ)		149,02	149,02	149,02	149,02
ДГ	$E_{TOT, PRIM, DG}$ - Укупна потрошња прим. ен. (GJ)	159,33	170,94	200,37	228,11
	<b>Тип зграде (без угр. ен.)</b>	PNEB	NNEB	NNEB	NNEB
	<b>Тип зграде (са угр. ен.)</b>	NNEB	NNEB	NNEB	NNEB
ГГ	$E_{TOT, PRIM, GG}$ - Укупна потрошња прим. ен. (GJ)	123,35	134,96	164,39	194,21
	<b>Тип зграде (без угр. ен.)</b>	PNEB	PNEB	PNEB	NNEB
	<b>Тип зграде (са угр. ен.)</b>	PNEB	PNEB	NNEB	NNEB

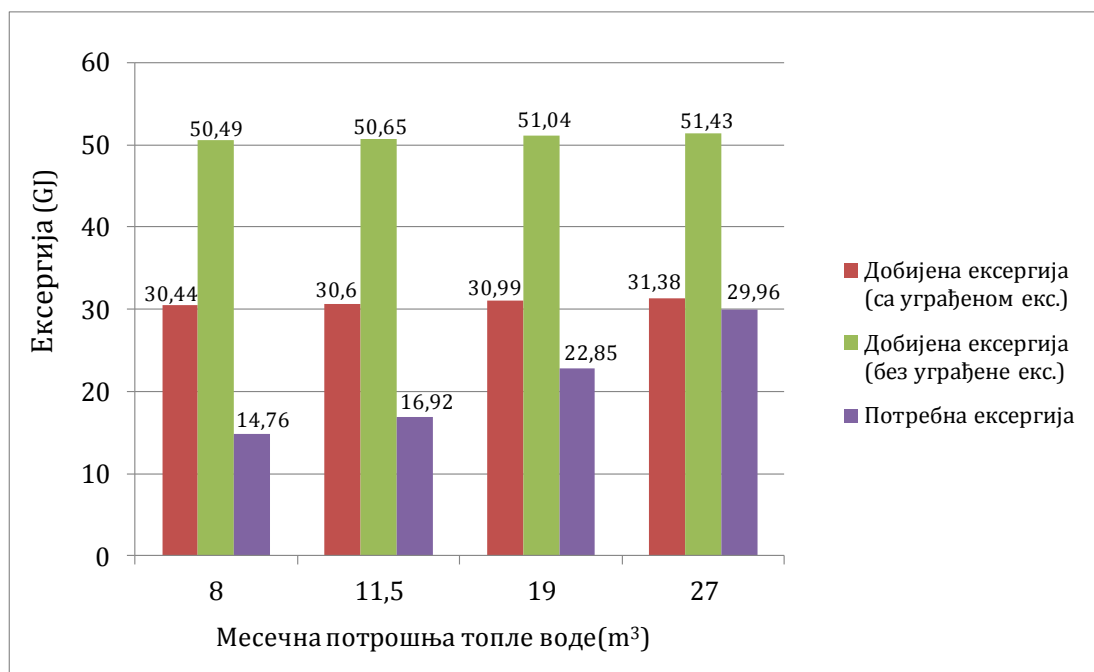
Из Табеле 9.28 може се закључити да ексергетски степен искоришћења, рачунат према оба приступа – са и без уграђених ексергија соларних инсталација, благо расте се порастом месечне потрошње топле воде у згради. Он има исте вредности за сва три разматрана система грејања. Тако, коефицијент ексергетске ефикасности  $\eta_x$  за месечне вредности потрошње топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup> износи 12,6 %, 12,64 %, 12,73 % и 12,83 %, респективно, док коефицијент ексергетске ефикасности  $\eta_{x, EE}$  за исте вредности потрошње топле воде има вредности 7,6 %, 7,63 %, 7,73 % и 7,83 %, респективно.

Са порастом месечне потрошње топле воде, расту и односи потребне и добијене ексергије, рачунати са и без уграђене ексергије соларних система, јер се значајно повећава потребна ексергија. За оба анализирана система грејања и све вариране потрошње топле воде њихове вредности су < 1, што значи да се из инсталираних соларних система добија више од потребне ексергије. За потрошњу топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>, однос потребне и добијене ексергије, рачунат без уграђене ексергије, износи 0,294, 0,3341, 0,4673 и 0,5825, респективно, док је однос потребне и добијене ексергије рачунат са уграђеном ексергијом 0,485, 0,5531, 0,7373 и 0,9546, респективно. Графички приказ односа потребне и добијене ексергије у зависности од потрошње топле воде дат је на Слици 9.57.



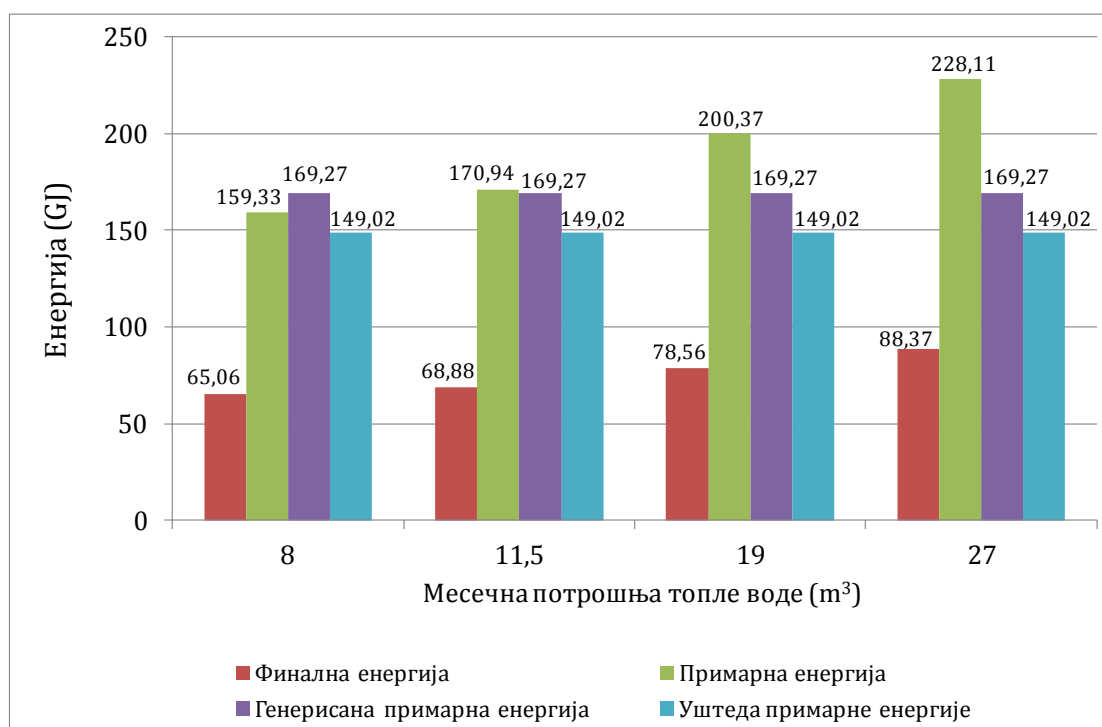
**Слика 9.57** – Однос потребне и добијене ексергије за зграду са даљинским и гасним грејањем и различитом потрошњом топле воде

Са порастом потрошње топле воде расте и потребна ексергија потрошача, као и ексергије добијене из соларних система са и без уграђене ексергије. Ове вредности су такође исте међусобно за случај даљинског и гасног грејања, и графички су приказане на Слици 9.58.



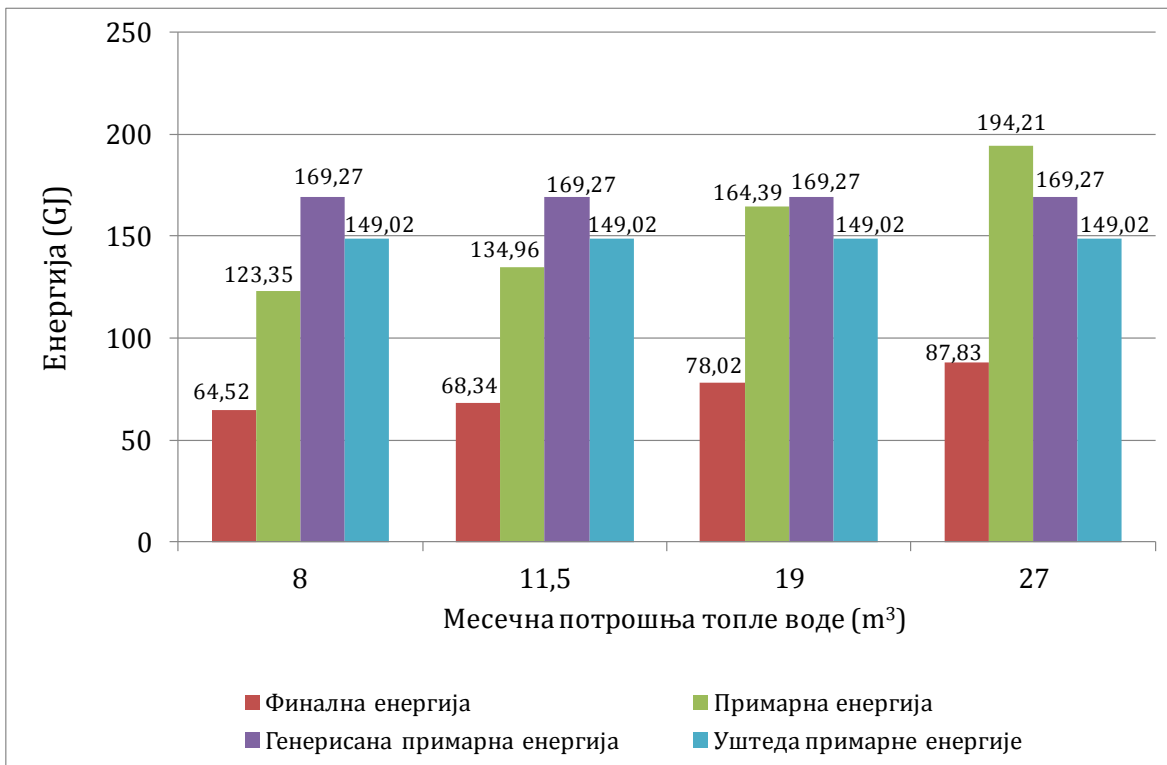
**Слика 9.58** – Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом потрошњом топле воде и даљинским или гасним системом грејања

Удео фотонапонских панела на крову, као у свим претходним случајевима износио је 98,75 %, (79,6 m<sup>2</sup> ФН панела и 1 m<sup>2</sup> соларних колектора), што омогућава генерисање 169,27 GJ примарне енергије.



**Слика 9.59** – Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту потрошњу топле воде у згради са даљинским системом грејања

На Слици 9.59 приказана је потрошња финалне и примарне енергије, као и генерисана примарна енергија и уштеда исте за различиту месечну потрошњу топле воде и систем даљинског грејања, а на Слици 9.60 дат је графички приказ истих параметара за систем гасног грејања.



**Слика 9.60** – Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту потрошњу топле воде у згради са гасним системом грејања

Код система даљинског грејања, све анализирани зграде су биле зграде нето-негативне потрошње енергије (NNEB) по оба критеријума, изузев зграде са најнижом потрошњом енергије, која је била зграда нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према приступу без урачунате уграђене енергије.

Код анализе зграда са гасним системом грејања, зграде са месечном потрошњом топле воде од 8 m³ и 11,5 m³ су према оба приступа биле зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB). Зграда са месечном потрошњом топле воде од 19 m³ је била зграда нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према критеријуму без урачунате уграђене енергије, а према критеријуму са урачунавом уграђеном енергијом, зграда је била нето-негативне потрошње енергије (NNEB). При највећој месечној потрошњи топле воде од 27 m³ зграда је била нето-негативне потрошње енергије (NNEB) према оба критеријума.

## Различита потрошња електричне енергије расвете и електро-уређаја

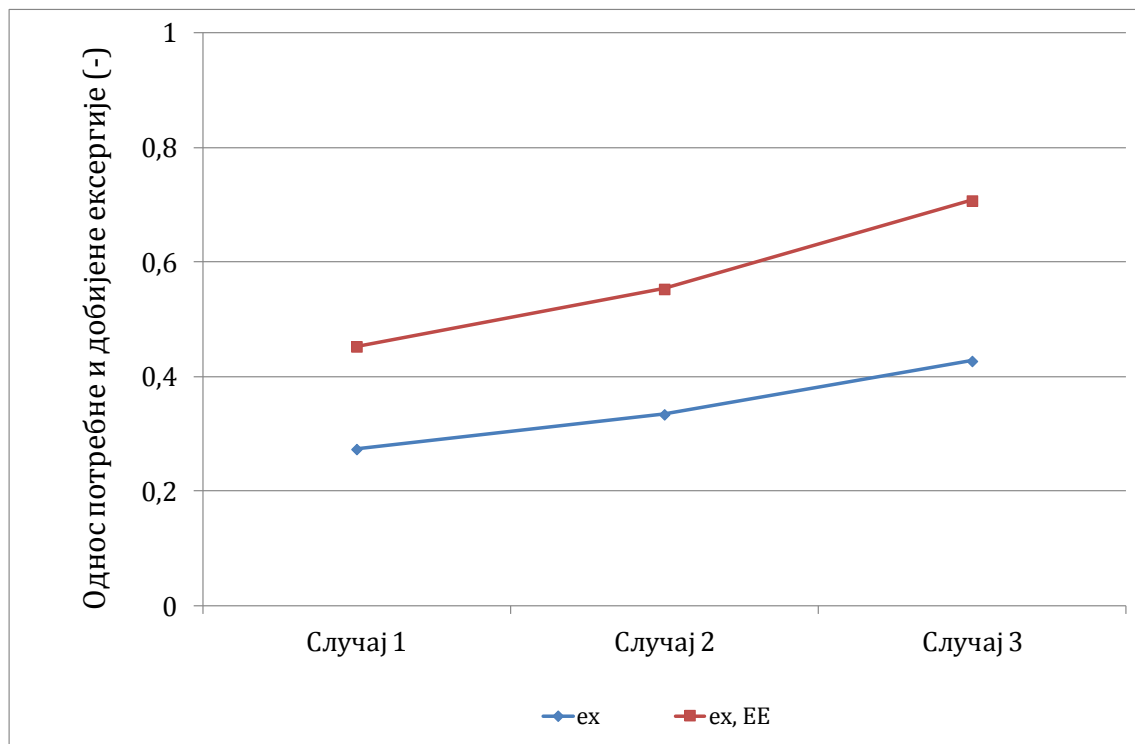
Код ових симулација разматрана је различита потрошња електричне енергије расвете и електричних уређаја, на исти начин као код претходно наведене енергетске и ексергетске оптимизације. Анализирана су 3 случаја потрошње електричне енергије – Случај 1, Случај 2 (референтни) и Случај 3, чије су потрошње износиле 65,81 GJ, 68,88 GJ и 73,61 GJ, респективно, за даљинско грејање и 65,27 GJ, 68,34 GJ и 73,07 GJ, респективно, за гасно грејање. Табела 9.5 даје приказ потрошње електричне енергије, а резултати добијени оптимизацијом дати су у Табели 9.29.

**Табела 9.29** – Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са различитом потрошњом електричне енергије и системом даљинског, тј. гасног грејања

		Различита потрошња електричне енергије		
		Случај 1	Случај 2 - Реф	Случај 3
$\eta_x$ (%) - ексергетски степен искоришћења без угр. ексергије		12,64	12,64	12,64
$\eta_{x, EE}$ (%) - ексергетски степен искоришћења са угр. ексергијом		7,63	7,63	7,63
$e_x$ - однос потребне и добијене ексергије (без угр. ексергије)		0,2735	0,3341	0,4273
$e_{x, EE}$ - однос потребне и добијене ексергије (са угр. екс.)		0,4528	0,5531	0,7074
$E_{x, POT}$ - укупна потребна ексергија потрошача (GJ)		13,85	16,92	21,64
$E_{x, PV-KOL}$ - ексергија добијена из соларних система (GJ)		50,65	50,65	50,65
$E_{x, PV-KOL, EE}$ - ексергија добијена из сол. система (са угр. екс.)		30,6	30,6	30,6
Удео ФН панела на крову (%)		98,75	98,75	98,75
Генерисана енергија (GJ)		55,68	55,68	55,68
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		169,27	169,27	169,27
$E_{PRIM}$ - уштеда примарне енергије (GJ)		148,82	148,82	148,82
ДГ	$E_{TOT, PRIM, DG}$ - Укупна потрошња прим. ен. (GJ)	163	170,94	183,18
	Тип зграде (без угр. ен.)	PNEB	NNEB	NNEB
	Тип зграде (са угр. ен.)	NNEB	NNEB	NNEB
ГГ	$E_{TOT, PRIM, GG}$ - Укупна потрошња прим. ен. (GJ)	125,63	134,96	149,34
	Тип зграде (без угр. ен.)	PNEB	PNEB	PNEB
	Тип зграде (са угр. ен.)	PNEB	PNEB	NNEB

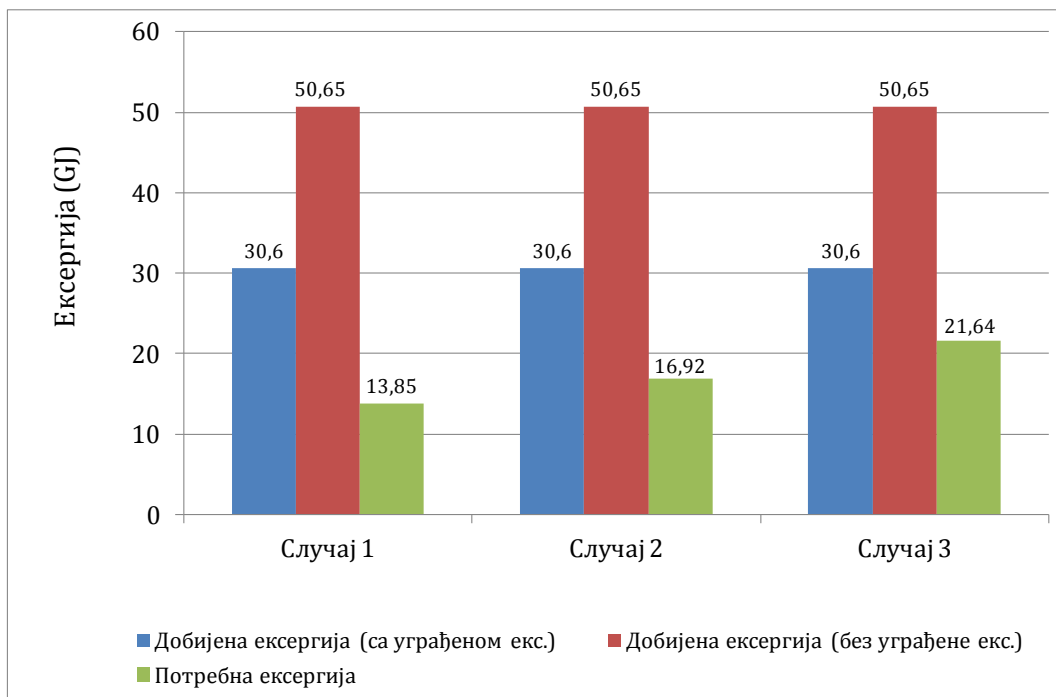
Ексергетски степени искоришћења, рачунати са и без уграђених ексергија соларних система, били су једнаки у свим разматраним случајевима, и износили су 12,64 % и 7,63 %, респективно, у свим анализираним случајевима различите потрошње електричне енергије.

Са порастом потрошње електричне енергије расту односи потребне и добијене ексергије, рачунати са и без уграђене ексергије соларних система. За случајеве различите потрошње електричне енергије у анализираној згради 1, 2 и 3, однос потребне и добијене ексергије, рачунат без уграђене енергије, износи 0,2735, 0,3341 и 0,4273, респективно, а однос потребне и добијене ексергије рачунат са уграђеном ексергијом соларних система износи 0,4528, 0,5531 и 0,7074, респективно. Графички приказ односа потребне и добијене ексергије у зависности од потрошње електричне енергије дат је на следећој Слици 9.61.



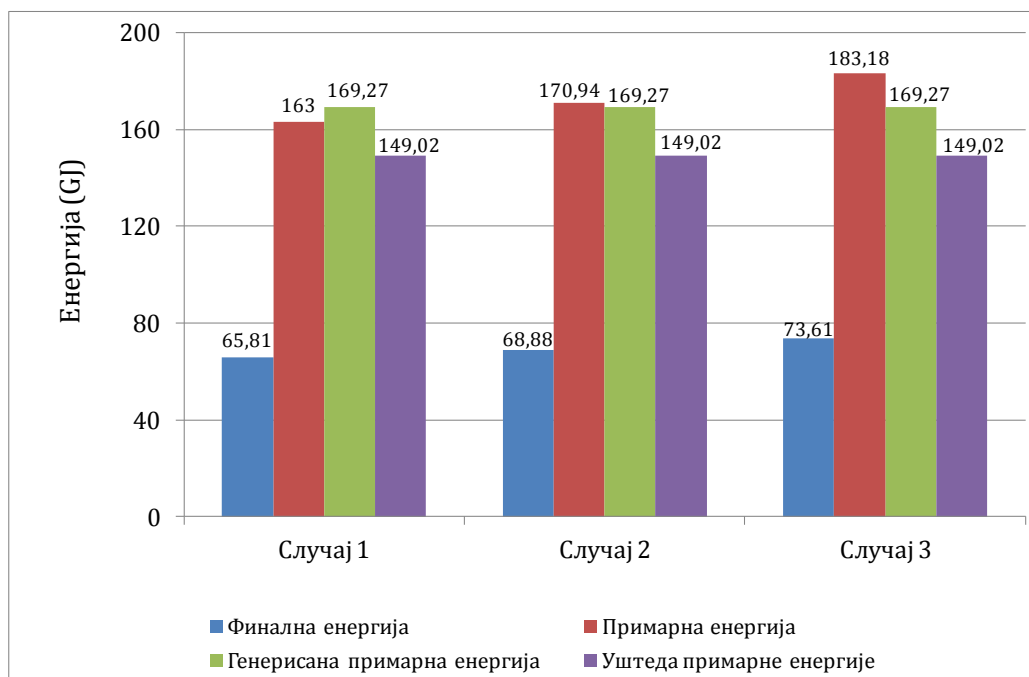
**Слика 9.61** – Однос потребне и добијене ексергије за зграду са даљинским тј. гасним системом грејања и различитом потрошњом електричне енергије

Са порастом потрошње електричне енергије, потребна ексергија такође расте. За Случај 1 (најмања потрошња електричне енергије) потребна ексергија је износила 13,85 GJ, за референтни Случај 2 потребна ексергија 16,92 GJ и за Случај 3 (највећа потрошња електричне енергије) потребна ексергија је износила 21,64 GJ. У односу на референтни случај, зграда са мањом потрошњом електричне енергије има потребну ексергију мању за 3,07 GJ (18,1 %), док зграда веће потрошње електричне енергије има потребну ексергију већу за 4,72 GJ (27,9 %). Добијене ексергије из соларних система са и без уграђене ексергије се нису мењале и износиле су 30,6 GJ и 50,65 GJ за оба система грејања, и даљински и гасни. Графички приказ ових параметара дат је на Слици 9.62.



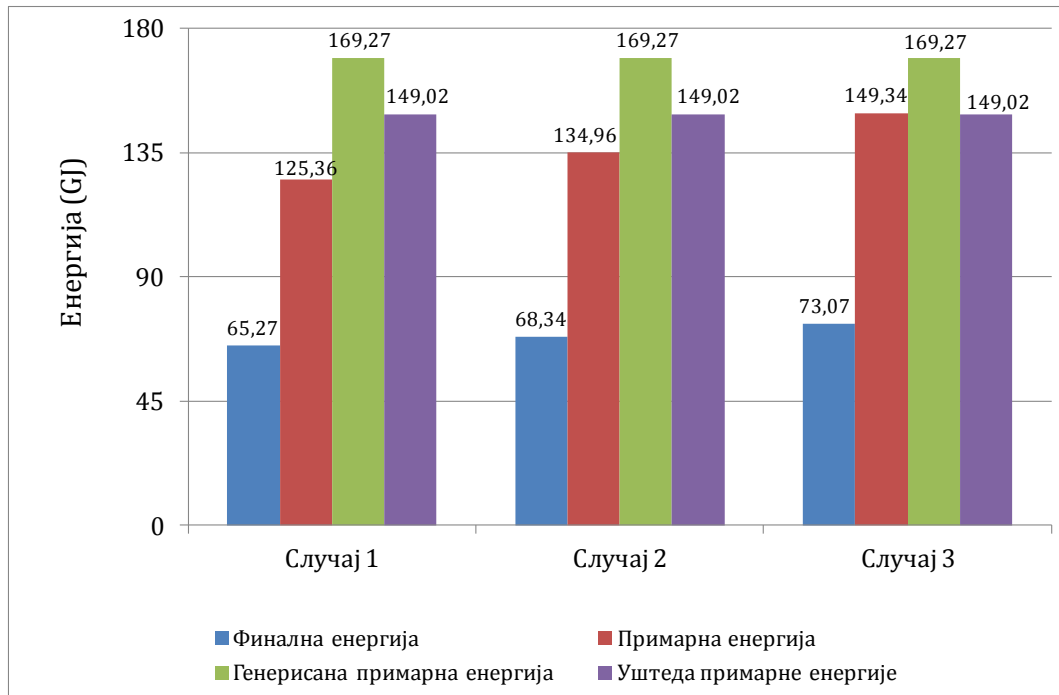
**Слика 9.62** – Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом потрошњом електричне енергије и даљинским, тј. гасним системом грејања

Удео фотонапонских панела на крову је у свим случајевима био исти као и у претходним анализама и износио је 98,75 %, чиме се генерише 169,27 GJ примарне енергије, а уштеда исте је 149,02 GJ. Слика 9.63 представља потрошњу енергије, генерисану енергију и уштеду примарне енергије за различиту потрошњу електричне енергије у згради са даљинским системом грејања.



**Слика 9.63** – Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту потрошњу електричне енергије и систем даљинског грејања

Слика 9.64 представља потрошњу енергије, генерисану енергију и уштеду примарне енергије за различиту потрошњу електричне енергије у згради са гасним системом грејања.



**Слика 9.64** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и уштеда примарне енергије за различиту потрошњу електричне енергије и систем гасног грејања

Код система даљинског грејања, све анализиране зграде су биле зграде нето-негативне потрошње енергије (NNEB) по оба критеријума, изузев зграде са најнижом потрошњом енергије, која је била зграда нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према приступу без урачунате уграђене енергије.

Код анализе зграда са гасним грејањем, зграде са најмањом и референтном потрошњом електричне енергије су према оба приступа биле зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB). Зграда са највећом потрошњом електричне енергије је била зграда нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према критеријуму без урачунате уграђене енергије, а према критеријуму са урачунатом уграђеном енергијом, зграда је била нето-негативне потрошње енергије (NNEB).

### Различита температура топле воде у бојлеру соларне инсталације

У овим истраживањима мењана је температура топле воде у бојлеру у соларној инсталацији за грејање санитарне воде за зграду са даљинским и гасним системом грејања, на исти начин као код ексергетске оптимизације зграде са електричним грејањем – посматране су температуре 50 °C (референтни случај), 60 °C и 70 °C.

Услед виших захтеваних температура топле воде, порасла је и потрошња електричне енергије, тако да је за температуре 50 °C, 60 °C и 70 °C и систем даљинског грејања, потрошња финалне енергије износила 68,88 GJ, 69,52 GJ и



70,73GJ, (примарне енергије 170,94 GJ, 172,89 GJ и 176,57 GJ, респективно) а за систем гасног грејања потрошња финалне енергије износила 68,34 GJ, 68,98 GJ и 70,19 GJ, (примарне 134,96 GJ, 136,91 GJ и 140,58 GJ, респективно).

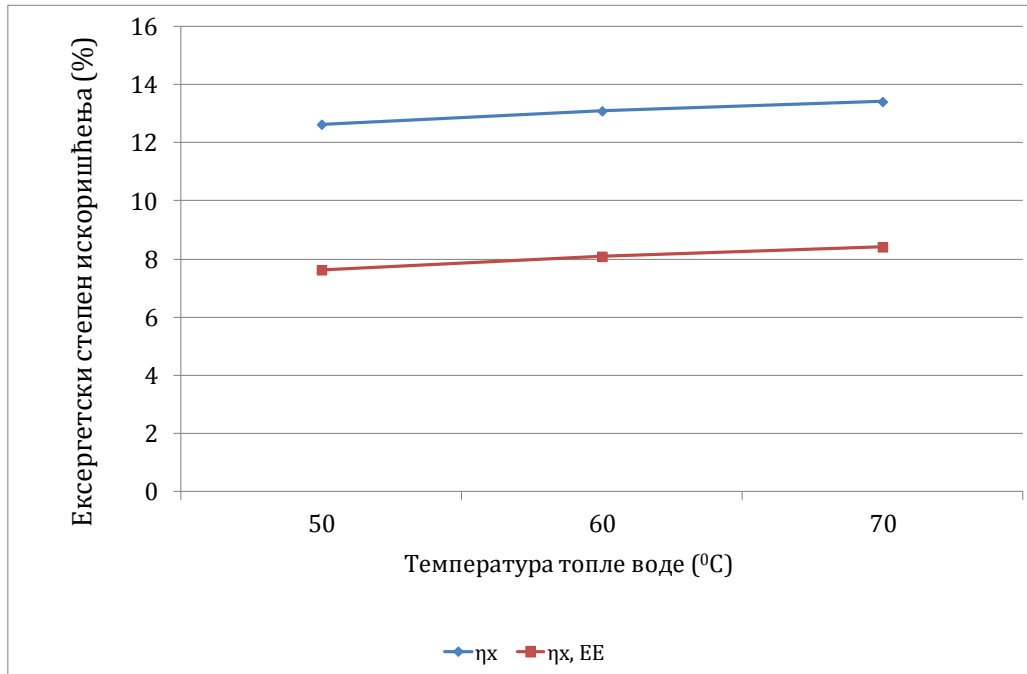
Резултати добијени ексергетском оптимизацијом дати су у Табели 9.30.

**Табела 9.30** – Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за случајеве зграда са различитом температуром воде у бојлеру соларне инсталације и системом даљинског и гасног грејања

		Различита температура у бојлеру (°C)		
		50- Реф	60	70
$\eta_x$ (%) - ексергетски степен искоришћења без угр. ексергије		12,64	13,10	13,42
$\eta_{x, EE}$ (%) - ексергетски степен искоришћења са угр. ексергијом		7,63	8,09	8,42
$e_x$ - однос потребне и добијене ексергије (без угр. ексергије)		0,3341	0,3626	0,3668
$e_{x, EE}$ - однос потребне и добијене ексергије (са угр. екс.)		0,5531	0,5866	0,5898
$E_{x, POT}$ - укупна потребна ексергија потрошача (GJ)		16,92	19,03	19,73
$E_{x, PV-KOL}$ - ексергија добијена из соларних система (GJ)		50,65	52,49	53,8
$E_{x, PV-KOL, EE}$ - ексергија добијена из сол. система (са угр. екс.)		30,6	32,44	33,45
Удео ФН панела на крову (%)		98,75	98,75	98,75
Генерисана енергија (GJ)		55,68	55,68	55,68
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		169,27	169,27	169,27
$E_{PRIM}$ - уштеда примарне енергије (GJ)		148,82	148,82	148,82
ДГ	$E_{TOT, PRIM, DG}$ - Укупна потрошња прим. ен. (GJ)	170,94	172,89	176,57
	<b>Тип зграде (без угр. ен.)</b>	NNEB	NNEB	NNEB
	<b>Тип зграде (са угр. ен.)</b>	NNEB	NNEB	NNEB
ГГ	$E_{TOT, PRIM, GG}$ - Укупна потрошња прим. ен. (GJ)	134,96	136,91	140,58
	<b>Тип зграде (без угр. ен.)</b>	PNEB	PNEB	PNEB
	<b>Тип зграде (са угр. ен.)</b>	PNEB	PNEB	PNEB

Из табеле се види да са порастом температуре топле воде у бојлеру соларне инсталације, расту и ексергетски степени искоришћења који су међусобно једнаки за оба примењена система грејања у згради – и даљинско и гасно грејање. Тако,

коэффициент ексергетске ефикасности  $\eta_x$  за вредности температура топле воде 50 °C, 60 °C и 70 °C износи 12,64 %, 13,1 % и 13,42 %, респективно, док коэффициент ексергетске ефикасности  $\eta_{x, EE}$  износи 7,63 %, 8,09 % и 8,42 %, респективно. Приказ оба коэффициента ексергетске ефикасности у зависности од температуре топле воде у бојлеру соларне инсталације дат је на Слици 9.65.

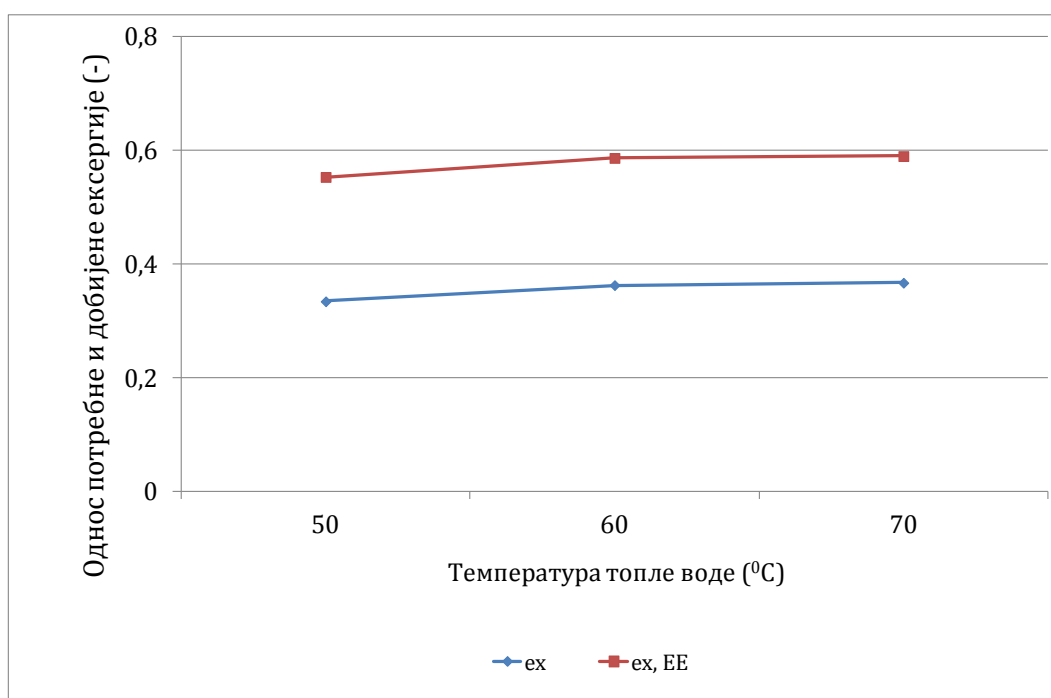


**Слика 9.65** – Ексергетски степени искоришћења за зграде са даљинским и гасним грејањем и различитом температуром топле воде у бојлеру

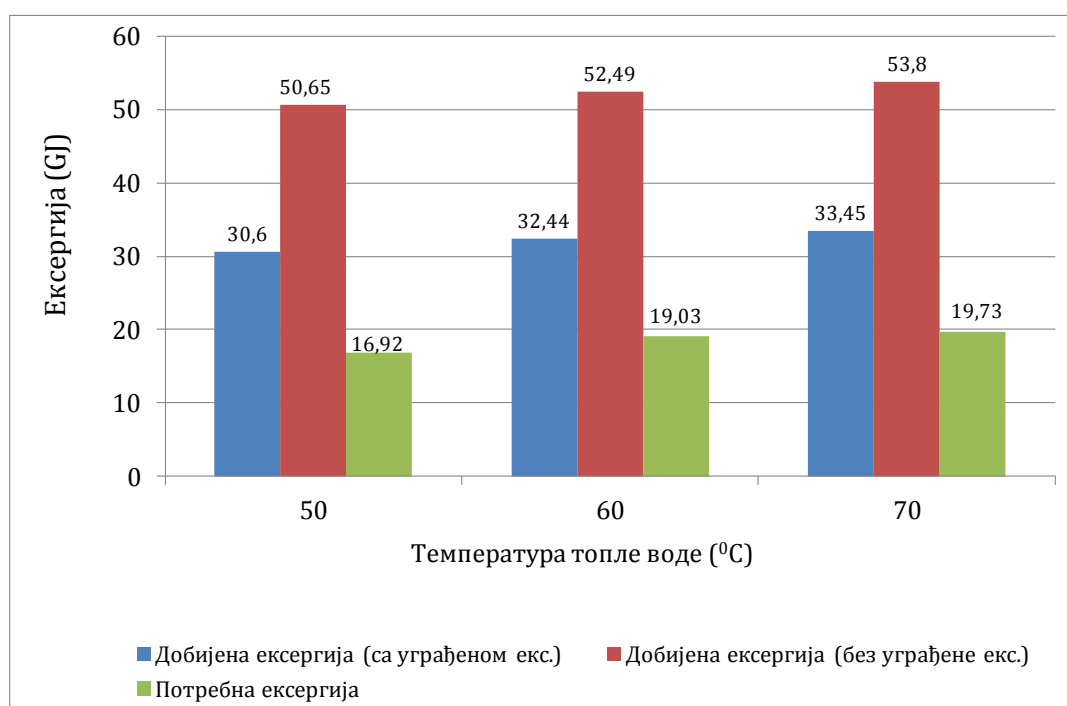
Са порастом температуре топле воде у бојлеру соларне инсталације расту и односи потребне и добијене ексергије  $e_x$  и  $e_{x, EE}$ , рачунати са и без уграђене ексергије соларних система. Графички приказ односа потребне и добијене ексергије у зависности од температуре топле воде дат је на Слици 9.66. Мале вредности ових односа говоре да се из инсталираних соларних инсталација и у овом случају добија више ексергије него што су ексергетске потребе зграде.

Потребна ексергија потрошача расте са порастом захтеване температуре топле воде у бојлеру соларне инсталације. Такође расту и ексергије добијене из соларних система, посматране са и без уграђене ексергије, за оба анализирана система грејања. У односу на референтни случај са температуром топле воде од 50 °C, и потребном ексергијом 16,92 GJ, ако је захтевана температура топле воде 60 °C, потребна ексергија је већа за 2,81 GJ (16,6 %). Ако је захтевана температура топле воде 70 °C, потребна ексергија је већа за 2,11 GJ (12,5 %). Графички приказ потребне ексергије зграде, као и добијених ексергија из инсталираног соларног система дат је на Слици 9.67.

Удео фотонапонских панела на крову је у свим случајевима био исти и износио је 98,75 % без обзира на захтевану температуру топле воде у бојлеру соларне инсталације. То значи да је на крову инсталирано 79,6 m<sup>2</sup> ФН панела и 1 m<sup>2</sup> соларних колектора. Овим односом се генерише 169,27 GJ примарне енергије, при чему је максимална избегнута потрошња примарне енергије 149,02 GJ у свим анализираним случајевима, без обзира да ли се ради о даљинском или гасном грејном систему.

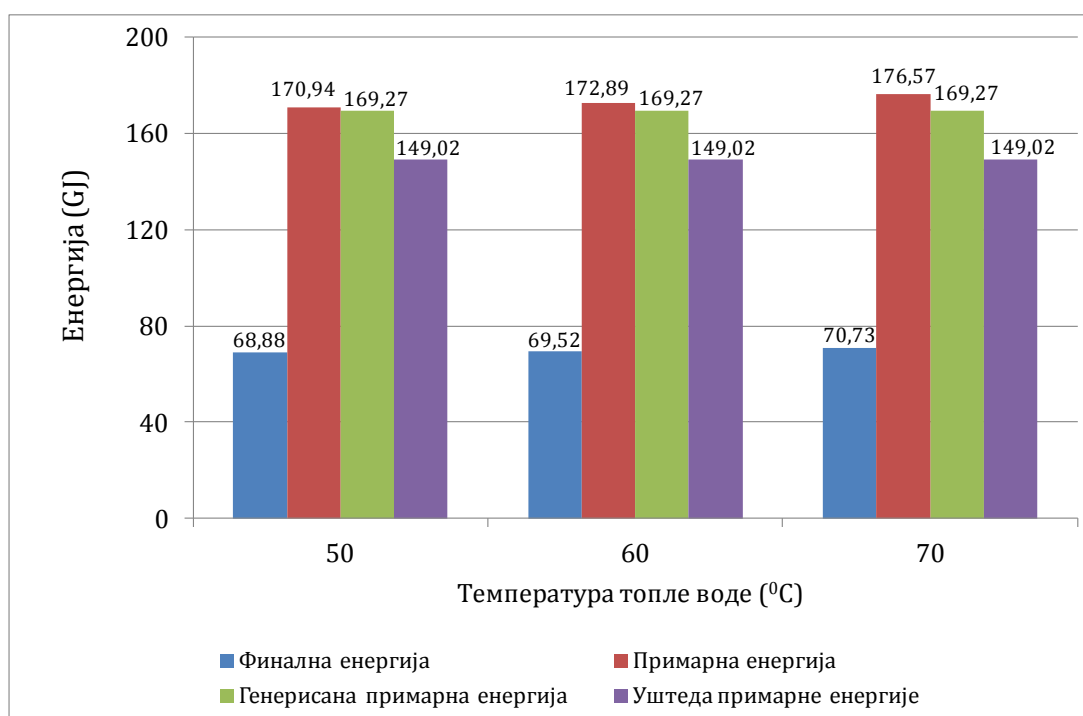


**Слика 9.66** – Однос потребне и добијене ексергије за зграду са даљинским и гасним грејањем и различитом температуром топле воде

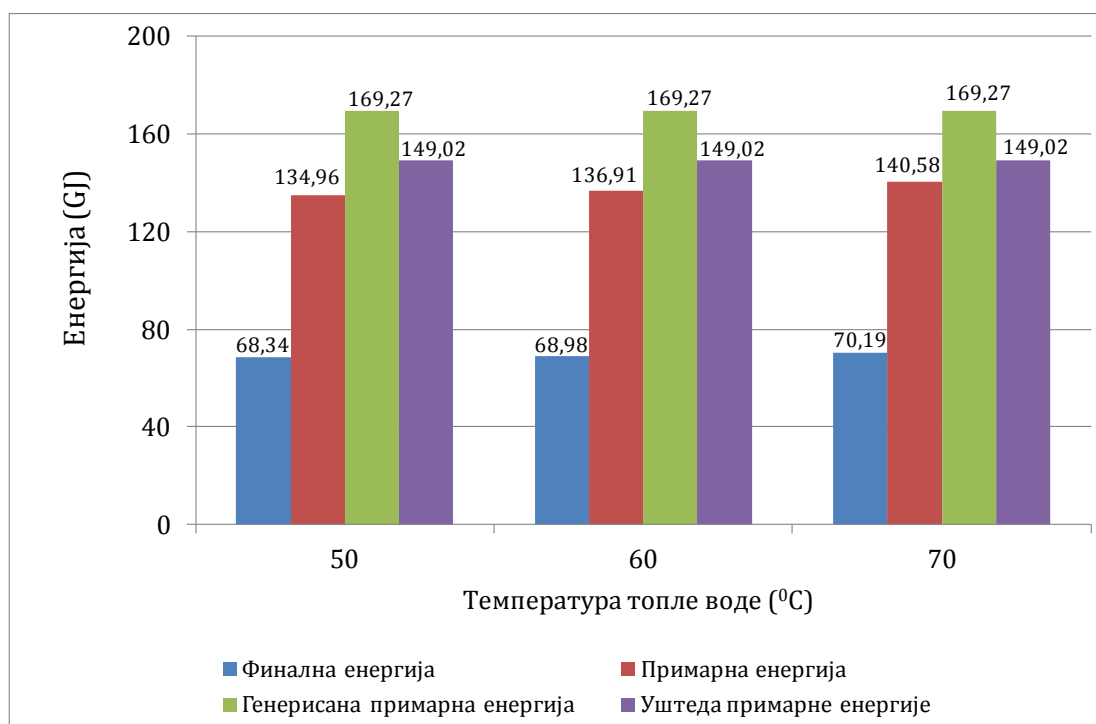


**Слика 9.67** – Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом температуром топле воде и даљинским и гасним грејањем

Слика 9.68 представља потрошњу енергије, генерисану енергију и уштеду примарне енергије за различите температуре топле воде у згради са даљинским системом грејања, док су исти параметри за гасно грејање дати на Слици 9.69.



**Слика 9.68** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту температуру топле воде и даљински систем грејања



**Слика 9.69** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту температуру топле воде и гасни систем грејања

Код даљинског грејања све анализиране зграде су биле нето-негативне потрошње енергије (NNEB) према оба приступа, док су све зграде са гасним грејањем биле нето-позитивне потрошње енергије(PNEB), према оба приступа.

## Различита ћелијска ефикасност фотонапонских модула

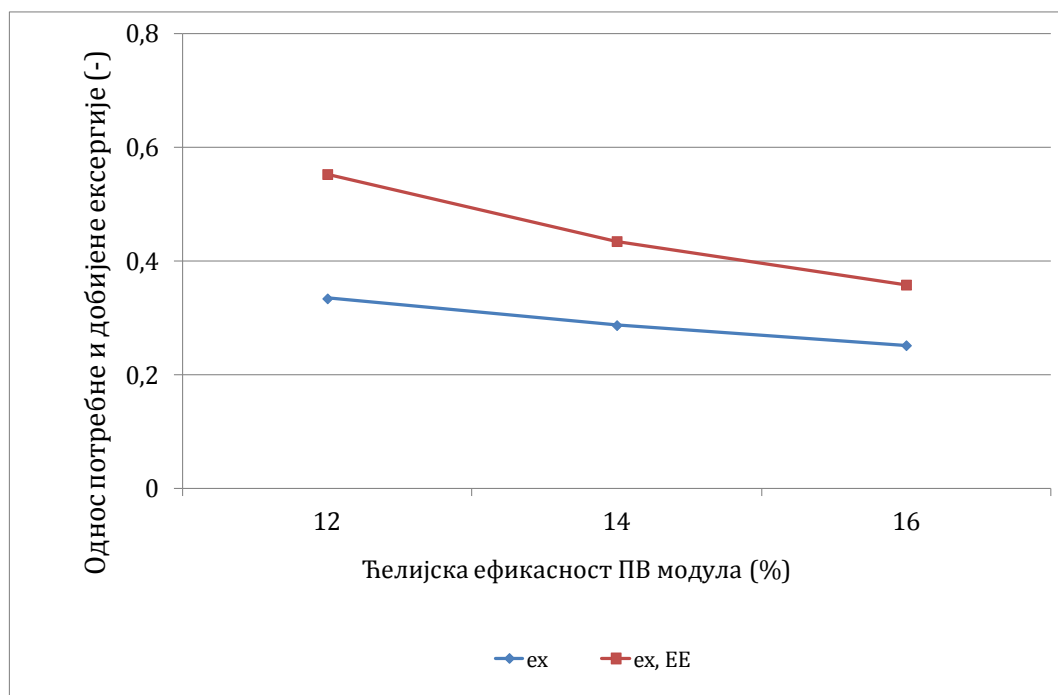
Као и у претходним симулацијама и оптимизацијама, анализирани су фотонапонски модули ћелијске ефикасности 12 %, 14 % и 16 %. Укупна годишња потрошња енергије у згради се није мењала и износила је 68,88 GJ финалне енергије, тј. 170,94 GJ примарне енергије за систем даљинског грејања и 68,34 GJ финалне енергије, тј. 134,96 GJ примарне енергије за систем гасног грејања. Резултати добијени ексергетском оптимизацијом дати су у Табели 9.31.

**Табела 9.31** – Ексергетске и енергетске величине добијене оптимизацијом за ФН модуле различите ћелијске ефикасности и даљинско, тј. гасно грејање

		Ћелијска ефикасност ФН модула (%)		
		12- Реф	14	16
$\eta_x$ (%) - ексергетски степен искоришћења без угр. ексергије		12,64	14,71	16,78
$\eta_{x, EE}$ (%) - ексергетски степен искоришћења са угр. ексергијом		7,63	9,71	11,78
$e_x$ - однос потребне и добијене ексергије (без угр. ексергије)		0,3341	0,287	0,2516
$e_{x, EE}$ - однос потребне и добијене ексергије (са угр. екс.)		0,5531	0,435	0,3584
$E_{x, POT}$ - укупна потребна ексергија потрошача (GJ)		16,92	16,92	16,92
$E_{x, PV-KOL}$ - ексергија добијена из соларних система (GJ)		50,65	58,96	67,26
$E_{x, PV-KOL, EE}$ - ексергија добијена из сол. система (са угр. екс.)		30,6	38,91	47,21
Удео ФН панела на крову (%)		98,75	98,75	98,75
Генерисана енергија (GJ)		55,68	64,42	73,17
Примарна енергија генерисане енергије (GJ)		169,27	195,85	222,43
$E_{PRIM}$ - уштеда примарне енергије (GJ)		148,82	175,6	202,18
ДГ	$E_{TOT, PRIM, DG}$ - Укупна потрошња прим. ен. (GJ)	170,94	170,94	170,94
	Тип зграде (без угр. ен.)	NNEB	PNEB	PNEB
	Тип зграде (са угр. ен.)	NNEB	PNEB	PNEB
ГГ	$E_{TOT, PRIM, GG}$ - Укупна потрошња прим. ен. (GJ)	134,96	134,96	134,96
	Тип зграде (без угр. ен.)	PNEB	PNEB	PNEB
	Тип зграде (са угр. ен.)	PNEB	PNEB	PNEB

Из Табеле 9.31 се закључује да са порастом ћелијске ефикасности фотонапонских модула, расту оба ексергетска степена искоришћења (са и без уграђене ексергије). Они су међусобно једнаки за сва три разматрана система грејања у згради (види Сliku 9.52).

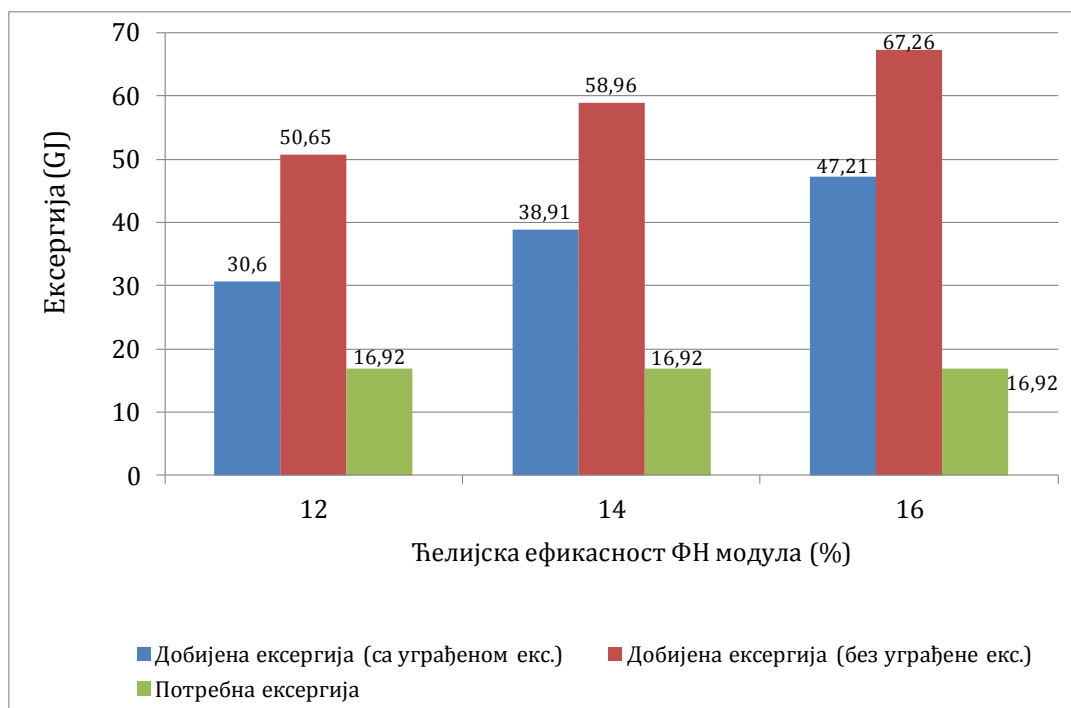
Односи потребне и добијене ексергије  $e_x$  и  $e_{x, EE}$ , рачунати са и без уграђене ексергије соларних система, опадају са порастом ћелијске ефикасности ФН модула, јер добијена ексергија расте. За ефикасност од 12 %, 14 % и 16 %, однос потребне и добијене ексергије, рачунат без уграђене ексергије, износи 0,3341, 0,287 и 0,2516, респективно, док је однос потребне и добијене ексергије рачунат са уграђеном ексергијом 0,5531, 0,435 и 0,3584, респективно. Како су све вредности  $<1$ , то значи да се из инсталираних соларних система добија више ексергије од потребне ексергије свих потрошача. Графички приказ односа потребне и добијене ексергије у зависности од ћелијске ефикасности фотонапонских модула дат је на Слици 9.70.



**Слика 9.70** – Однос потребне и добијене ексергије за зграду са даљинским, тј. гасним грејањем и различитом ћелијском ефикасношћу ФН модула

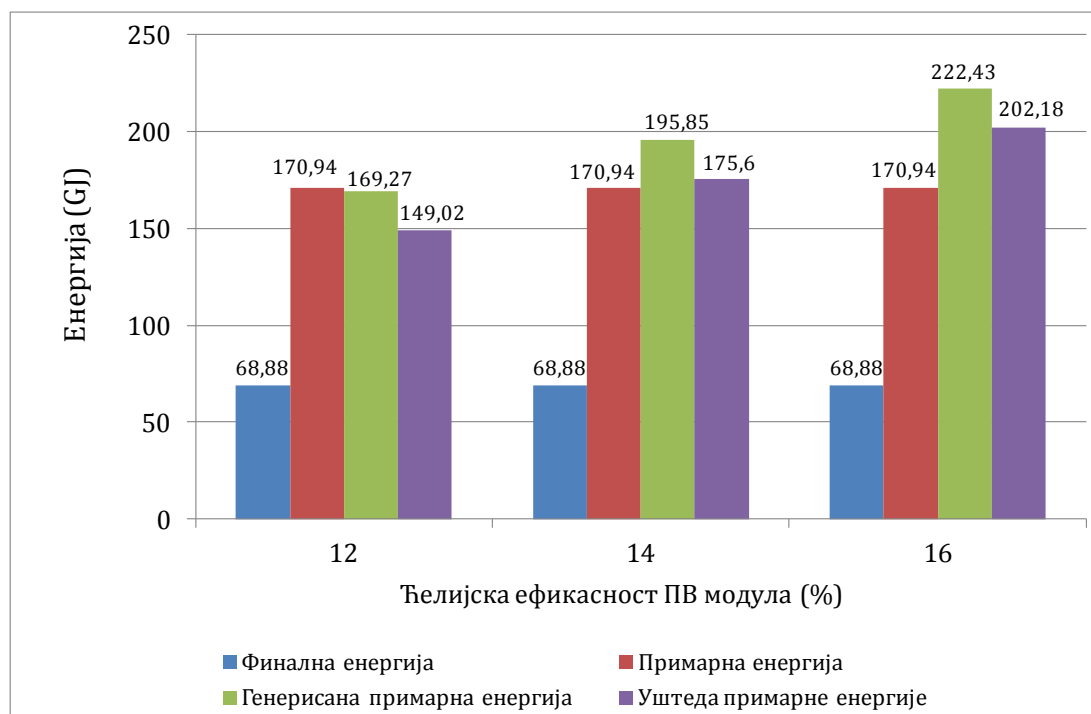
На Слици 9.71 графички је приказана потребна ексергија потрошача и ексергије добијена из соларних система, са и без уграђене ексергије, за различиту ћелијску ефикасност ФН модула и систем даљинског и гасног грејања. Са порастом ћелијске ефикасности, добијене ексергије из соларних система ће имати значајан пораст, без обзира да ли су рачунате са или без уграђене ексергије. Потребна ексергија је једнака у свим анализираним случајевима и износи 16,92 GJ.

За оба разматрана система грејања удео фотонапонских панела на крову је за све анализираних ћелијске ефикасности ФН модула био исти и износио је 98,75 %, (79,6 m<sup>2</sup> ФН панела и 1 m<sup>2</sup> соларних колектора), што омогућава генерисање 169,27 GJ примарне енергије, при чему је максимална избегнута потрошња примарне енергије 149,02 GJ – као и у свим до сада извршеним ексергетским оптимизацијама.



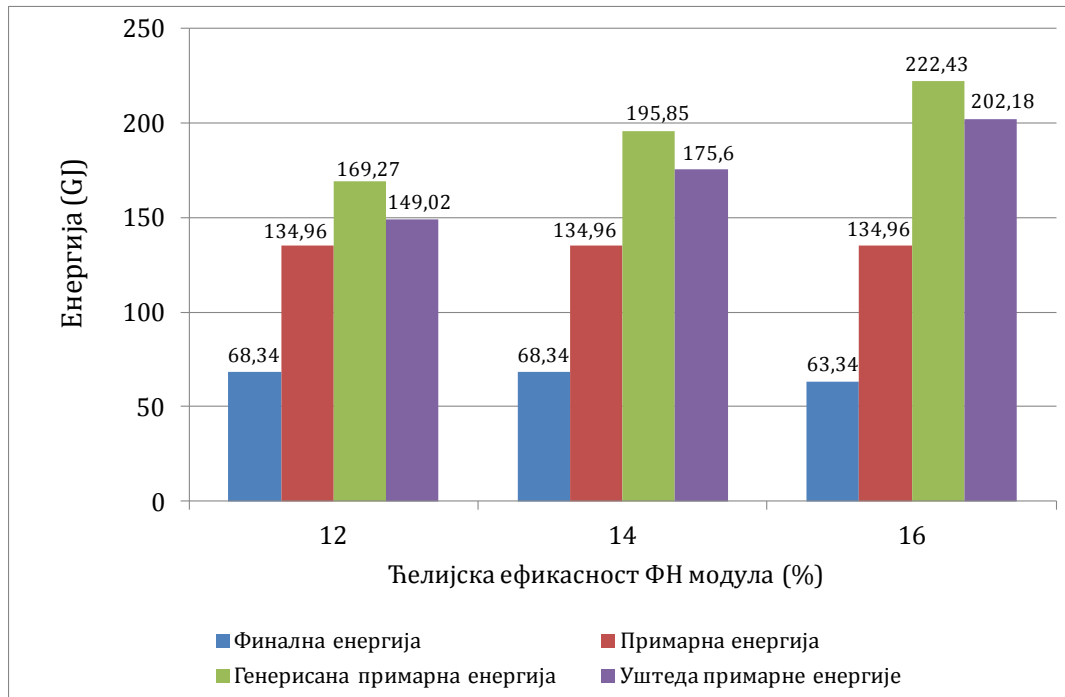
**Слика 9.71** – Потребна и добијена ексергија за зграду са различитом ћелијском ефикасношћу ФН модула и даљинским и гасним грејањем

Слика 9.72 представља потрошњу енергије, генерисану енергију и уштеду примарне енергије за различиту вредност ћелијске ефикасности фотонапонских модула у згради са даљинским грејањем.



**Слика 9.72** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту ћелијску ефикасност ФН модула и систем даљинског грејања

Слика 9.73 представља потрошњу енергије, генерисану енергију и уштеду примарне енергије за различиту вредност ћелијске ефикасности фотонапонских модула у згради са гасним грејањем.



**Слика 9.73** –Годишња потрошња финалне и примарне енергије, генерисана примарна енергија и њена уштеда за различиту ћелијску ефикасност ФН модула и систем гасног грејања

Када се посматрају зграде са даљинским системом грејања, у случају ћелијске ефикасности фотонапонских панела 12 %, зграда ће према оба приступа бити нето-негативне потрошње енергије (NNEB). За ФН модуле са ћелијском ефикасношћу од 14% и 16 %, зграде ће бити нето-позитивне потрошње енергије (PNEB).

Код гасног грејања све анализиране зграде са применом било којих фотонапонских панела, без обзира на њихову ћелијску ефикасност су биле нето-позитивне потрошње енергије (PNEB), према оба приступа.



## 9.3 Економска оптимизација

### 9.3.1 Електрично грејање

#### Различита дебљина изолације зграде

Циљ економске оптимизације је одређивање оптималног односа површина фотонапонских панела и соларних колектора који ће генерисати електричну и топлотну енергију, а да се при томе оствари највећа могућа финансијска добит (D). Такође је приказан добијени период отплате соларних инсталација, вишак продате електричне енергије, нето купљена и укупно купљена електрична енергија.

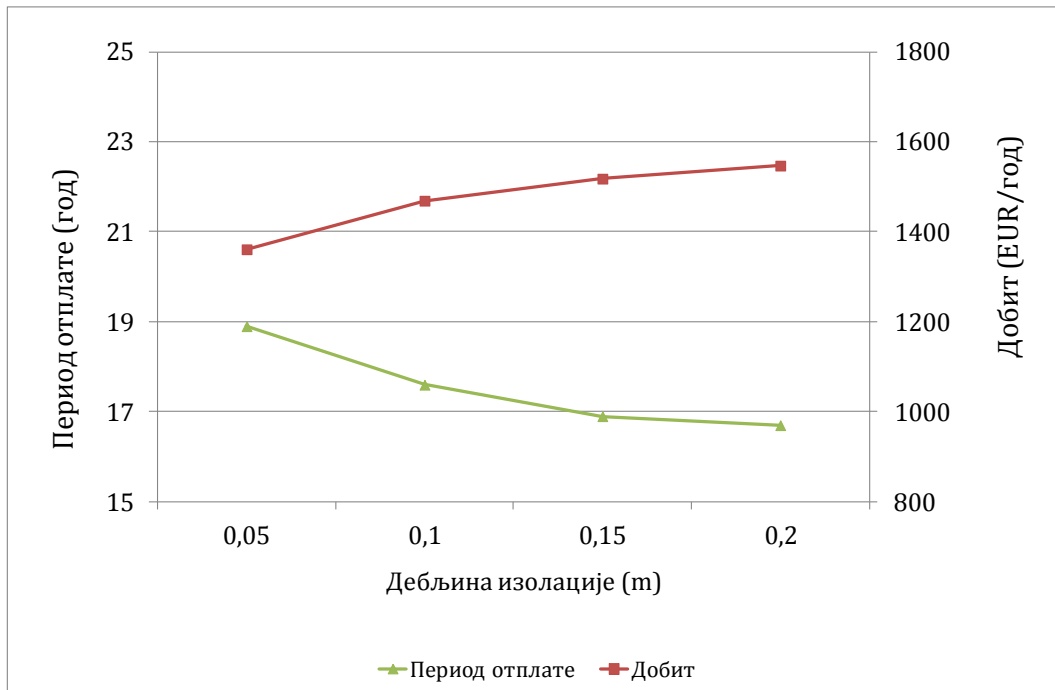
Исте дебљине изолација су разматране као у случајевима енергетске и ексергетске опимизације – 0,05 m, 0,1 m, 0,15 m и 0,2 m. Резултати економске оптимизације су дати у Табели 9.32.

**Табела 9.32** – Резултати економске оптимизације за различиту дебљину изолације у зградама са електричним грејањем

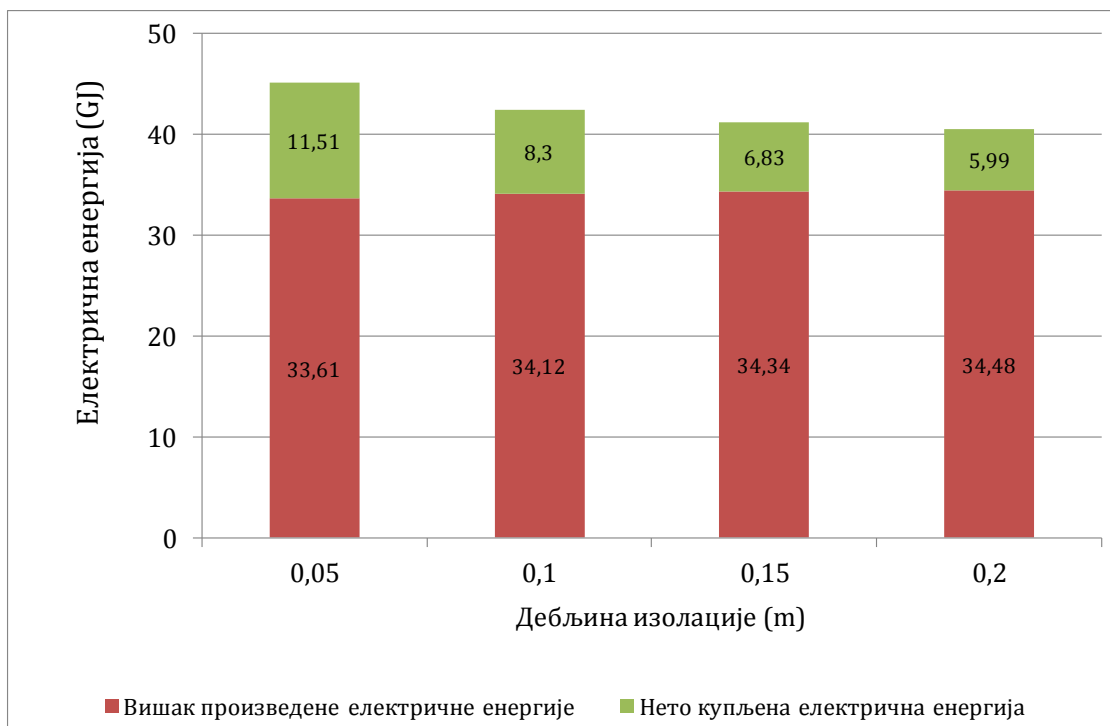
	Дебљина изолације			
	0,05 m	0,1 m	0,15 m - Реф	0,2 m
D (EUR)- годишња финансијска добит од соларних система	1361	1469	1518	1547
PВ (год)- период отплате инвестиција	18,9	17,6	16,9	16,7
Удео ФН панела на крову (%)	95	95	95	95
Генерисана енергија (GJ)	60,61	60,61	60,61	60,61
$S_{PV}$ (m <sup>2</sup> ) - Површина ФН панела	76,6	76,6	76,6	76,6
$S_{COL}$ (m <sup>2</sup> ) – Површина колектора	4	4	4	4
$E_{PV,S}$ - Вишак електричне енергије (GJ)	33,61	34,12	34,34	34,48
$E_{P,NET}$ - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	11,51	8,3	6,83	5,99
$E_P$ - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	45,12	42,42	41,17	40,47

Из Табеле 9.32 се види да са порастом дебљине изолације расте и годишња финансијска добит, док период отплате инвестиција опада. За дебљину изолације у опсегу 0,05 m – 0,2 m, добит је износила између 1360 – 1550 EUR, а период отплате приближно 17-19 година. Разлог је веома велика потрошња електричне енергије у згради са електричним системом грејања. У односу на референтни случај дебљине изолације од 0,15 m, употребом изолације од 0,05 m и 0,1 m, годишња добит се смањује за 157 EUR (10,3 %) и 49 EUR (3,2 %), респективно. Употребом изолације од 0,2 m добит се повећава за 29 EUR (1,9 %). Када је у питању период отплате, у односу на референтни случај употребом изолације од 0,05 m и 0,1 m, период отплате се

повећава за 2 год. (11,8 %) и 0,7 год. (4,1 %), респективно. Употребом изолације од 0,2 m период отплате се смањује за 0,2 год. (1,2 %). Графички приказ наведених финансијских добити и периода отплате соларних инсталација дат је на Слици 9.74.



Слика 9.74 – Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са различитом дебљином изолације и електричним грејањем



Слика 9.75 – Вишак произведене електричне енергије и нето купљена електрична енергија за зграду са различитом дебљином изолације и електричним грејањем

Удео ФН панела на површини крова је за све случајеве дебљине изолације био исти и износио је 95% (76,6 m<sup>2</sup>), осталих 5 % (4 m<sup>2</sup>) је удео колектора. Овим односом се генерише 50,47 GJ електричне енергије и 10,14 GJ топлотне енергије.

Са порастом дебљине изолационог слоја расте вишак произведене електричне енергије који се продаје дистрибутивној мрежи, док нето-купљена количина електричне енергије опада, као и укупна купљена количина електричне енергије. За дебљине изолација 0,05 m, 0,1 m, 0,15 m и 0,2 m, укупна купљена количина електричне енергије је износила 45,12 GJ, 42,42 GJ, 41,17 GJ и 40,47 GJ, респективно – Слика 9.75. То значи да се са употребом изолације дебљине 0,15 m, у односу на изолације дебљина 0,1 m и 0,15 m, може остварити уштеда у укупно купљеној електричној енергији од 3,95 GJ (9,6 %) и 1,25 GJ (3 %). Употреба изолације дебљине 0,2 m, у односу на референтни случај, допринела би уштеди од 0,7 GJ (1,7 %).

Јасно је да су све зграде нето-негативне потрошње енергије јер се електрична енергија за подмиривање енергетских потреба докупљује из мреже (NNEB).

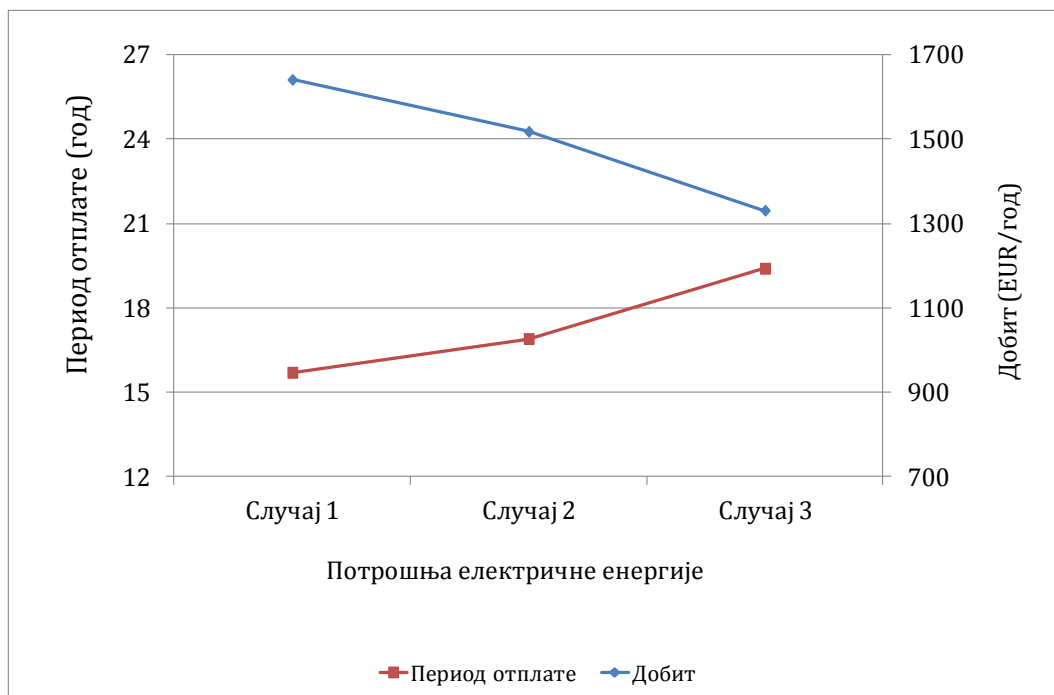
### Различита потрошња електричне енергије расвете и електро-уређаја

Код економске оптимизације зграда са различитом потрошњом електричне енергије, разматрани су исти случајеви потрошње електричне енергије као код претходних оптимизација. То су случајеви 1, 2 и 3, чија је укупна потрошња електричне енергије била 66,05 GJ, 68,36 GJ и 71,88 GJ, респективно, а за које је детаљна потрошња електричне енергије дата у Табели 9.5. Резултати добијени економском оптимизацијом дати су у Табели 9.33.

**Табела 9.33** – Резултати економске оптимизације за различиту потрошњу електричне енергије у зградама са електричним грејањем

	Различита потрошња ел. енергије		
	Случај 1	Случај 2-реф	Случај 3
D (EUR)- годишња финансијска добит од соларних система	1641	1518	1331
PВ (год)- период отплате инвестиција	15,7	16,9	19,4
Удео ФН панела на крову (%)	95	95	95
Генерисана енергија (GJ)	60,61	60,61	60,61
S <sub>PV</sub> (m <sup>2</sup> ) - Површина ФН панела	76,6	76,6	76,6
S <sub>COL</sub> (m <sup>2</sup> ) – Површина колектора	4	4	4
E <sub>PV,S</sub> - Вишак електричне енергије (GJ)	35,49	34,34	32,58
E <sub>P,NET</sub> - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	4,55	6,83	10,34
E <sub>P</sub> - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	40,04	41,17	42,92

Може се закључити да са порастом потрошње електричне енергије у разматраној згради, опада годишња вредност финансијске добити а расте период отплате инвестиција. У односу на референтни случај потрошње електричне енергије (2) за који је добит износила 1518 EUR и период отплате 16,9 година, у случају 1 (мања потрошња електричне енергије) добит је већа за 123 EUR (8,1 %), а период отплате мањи за 1,2 год. (7,1 %). У случају 3 (већа потрошња електричне енергије) добит је мања за 187 EUR (12,3 %), а период отплате већи за 2,5 год. (14,8 %). Графички приказ добити и периода отплате за различиту потрошњу електричне енергије у згради, дат је на Слици 9.76.

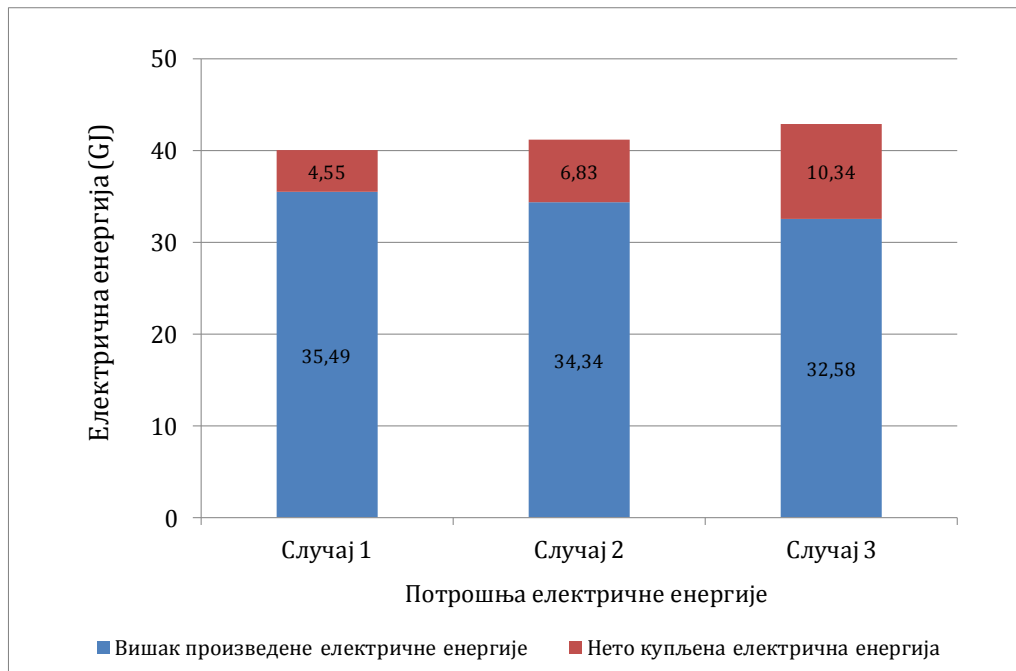


**Слика 9.76** – Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са различитом потрошњом електричне енергије и електричним грејањем

Удео ФН панела на површини крова је и код економске оптимизације зграда са различитом потрошњом електричне енергије у свим случајевима био исти као код различите дебљине изолације, и износио је 95% (76,6 m<sup>2</sup>) а осталих 5 % (4 m<sup>2</sup>) је удео соларних колектора.

Са порастом потрошње електричне енергије, вишак произведене електричне енергије опада, а купљена количина електричне енергије (нето и укупна) расту. За случајеве потрошње електричне енергије 1, 2 и 3, укупна купљена количина електричне енергије је износила 40,04 GJ, 41,17 GJ и 42,92 GJ, респективно – Слика 9.77. У односу на референтни случај 2, у случају мање потрошње електричне енергије (случај 1), уштеда укупно купљене електричне енергије износи 1,13 GJ (2,7 %). У случају веће потрошње електричне енергије, укупна купљена електрична енергија је већа за 1,75GJ (4,25 %).

И у овим разматрањима, све зграде су зграде нето-негативне потрошње енергије (NNEB).



**Слика 9.77** – Вишак електричне енергије и нето купљена електрична енергија за зграду са различитом потрошњом електричне енергије и електричним грејањем

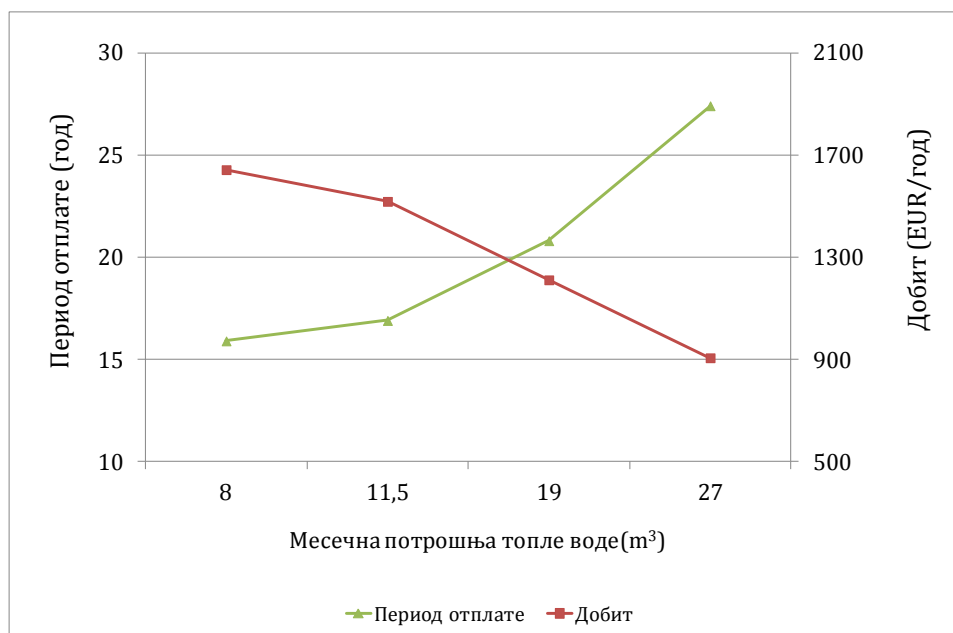
### Различита месечна потрошња топле воде

Економска оптимизације зграда са различитом месечном потрошњом топле воде је рађена са истим потрошњама као код свих претходних случајева оптимизације. Оне су износиле 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup> (референтни случај), 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>, а резултати економске оптимизације су дати у Табели 9.34.

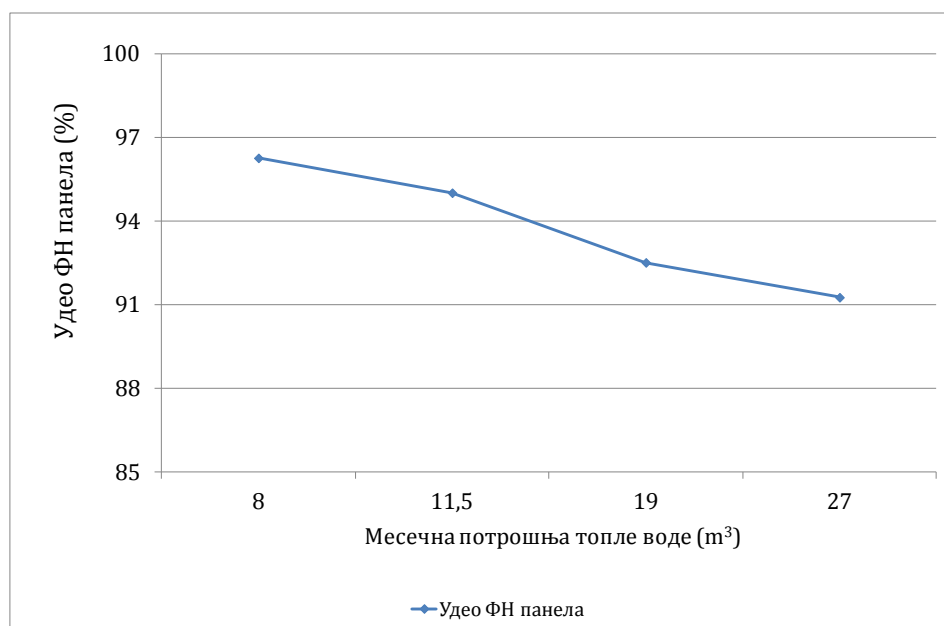
**Табела 9.34** – Резултати економске оптимизације за различиту месечну потрошњу топле воде у згради са електричним грејањем

	Месечна потрошња топле воде (m <sup>3</sup> )			
	8	11,5 - Реф	19	27
D (EUR)- годишња финансијска добит од соларних система	1642	1518	1211	906
PВ (год)- период отплате инвестиција	15,9	16,9	20,8	27,4
Удео ФН панела на крову (%)	96,25	95	92,5	91,25
Генерисана енергија (GJ)	59,07	60,61	63,39	65,15
S <sub>PV</sub> (m <sup>2</sup> ) - Површина ФН панела	77,6	76,6	74,6	73,6
S <sub>COL</sub> (m <sup>2</sup> ) – Површина колектора	3	4	6	7
E <sub>PV,S</sub> - Вишак електричне енергије (GJ)	35,45	34,34	31,98	30,13
E <sub>P,NET</sub> - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	4,26	6,83	14,07	22,26
E <sub>P</sub> - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	39,71	41,17	46,05	52,39

Са порастом месечне потрошње топле воде нагло опада годишња финансијска добит, док период отплате инвестиција нагло расте. Разлог је веома велика потрошња електричне енергије за загревање веће количине санитарне воде у згради. У односу на референтни случај зграде са месечном потрошњом топле воде од  $11,5 \text{ m}^3$ , са потрошњом топле воде у згради од  $8 \text{ m}^3$ , годишња добит се повећава за 124 EUR (8,2 %) а период отплате инвестиција се смањује за 1 год (11,8 %). Код зграда са месечном потрошњом топле воде од  $19 \text{ m}^3$  и  $27 \text{ m}^3$  годишња добит се смањује за 307 EUR (20,2 %) и 609 EUR (40,1 %), респективно, а период отплате се повећава за 3,9 год. (23,1 %) и 10,5 год. (62,1 %), респективно. Графички приказ наведених добити и периода отплате дат је на Слици 9.78.



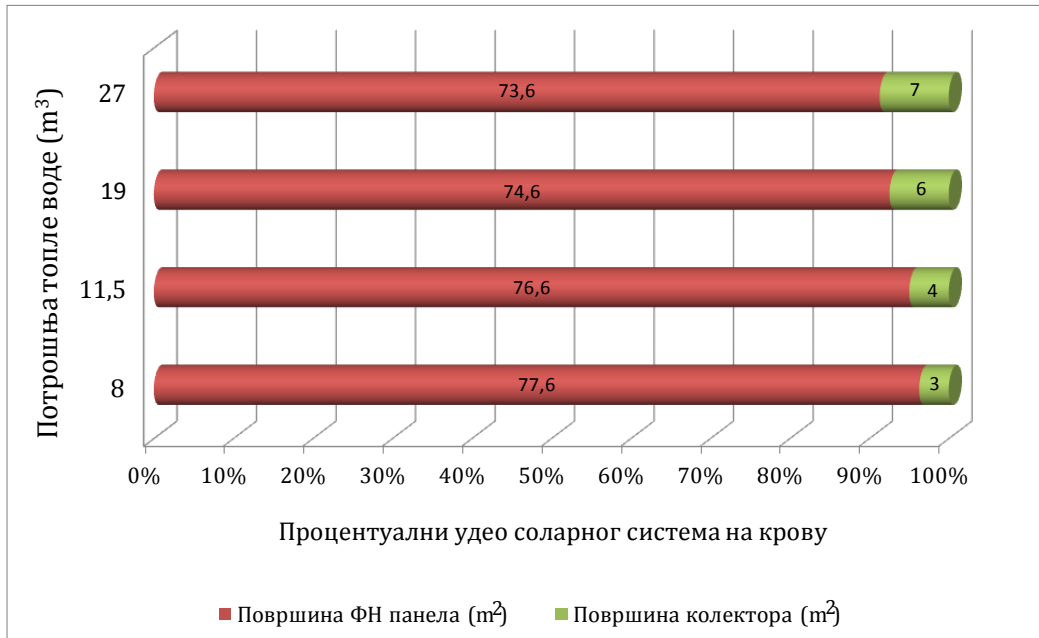
**Слика 9.78** – Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са различитом месечном потрошњом топле воде и електричним грејањем



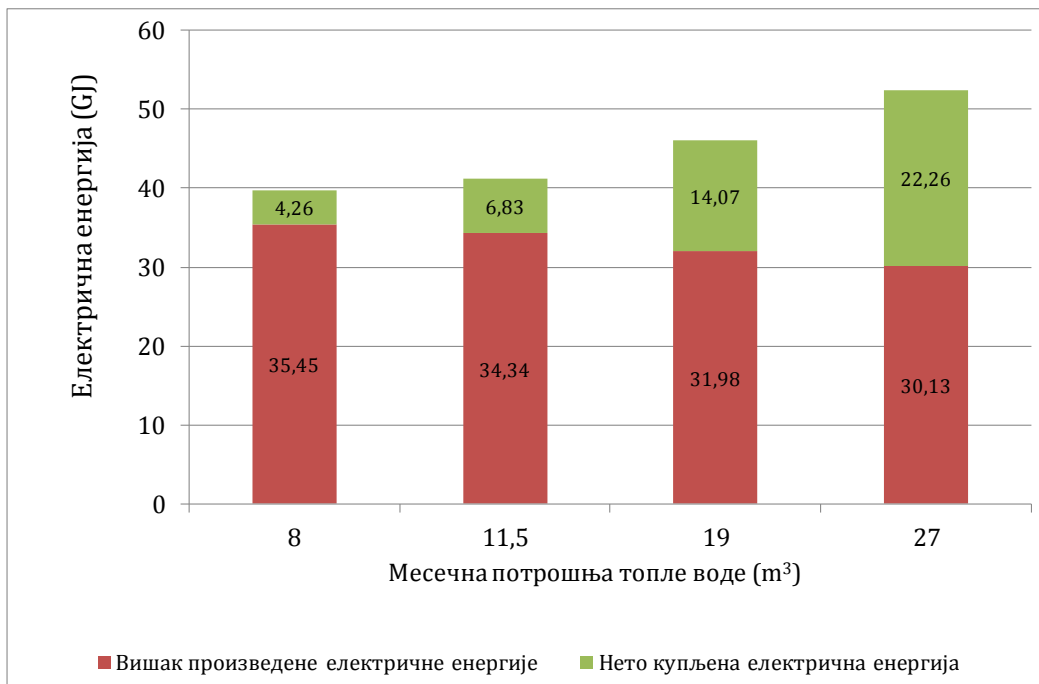
**Слика 9.79** – Удео ФН панела за различиту месечну потрошњу топле воде

Код ових економских оптимизација удео ФН панела се мењао, и опадао је са порастом потрошње топле воде, што је и логично, јер у случају веће потрошње топле воде соларни колектори треба да заузимају већу површину. Слика 9.79 приказује промену удела фотонапонских панела са променом месечне потрошње топле воде.

Однос површина фотонапонских панела и соларних колектора графички је приказан на Слици 9.80.



Слика 9.80 –Графички приказ односа површина фотонапонских панела и соларних колектора на крову, за различиту потрошњу топле воде



Слика 9.81 – Вишак произведене електричне енергије и нето купљена електрична енергија за зграду са различитом потрошњом топле воде и електричним грејањем

Са порастом потрошње топле воде опада вишак произведене електричне енергије који се продаје дистрибутивној мрежи, док нето-купљена количина електричне енергије расте, као и укупна купљена количина електричне енергије. За месечне потрошње топле воде  $8 \text{ m}^3$ ,  $11,5 \text{ m}^3$ ,  $19 \text{ m}^3$  и  $27 \text{ m}^3$ , укупна купљена количина електричне енергије је износила 39,71 GJ, 41,17 GJ, 46,05 GJ и 52,39 GJ, респективно, што је заједно са вишком и нето количином купљене енергије приказано на Слици 9.81. То значи да ако се месечна потрошња топле воде смањи на  $8 \text{ m}^3$ , може се остварити уштеда у укупно купљеној електричној енергији од 1,46 GJ (3,5 %). Са друге стране за месечне потрошње топле воде  $19 \text{ m}^3$  и  $27 \text{ m}^3$ , укупна купљена количина електричне енергије у односу на референтни случај је већа за 4,88GJ (11,9%) и 11,22 GJ (27,3%). Све анализиране зграде су биле нето-негативне потрошње енергије (NNEB).

### Различита ћелијска ефикасност ФН модула

У овим истраживањима разматрани су фотонапонски панели различите ћелијске ефикасности – 12 % (референтни случај), 14 % и 16 %, исто као и код претходних оптимизација. Резултати економске оптимизације дати су у Табели 9.35.

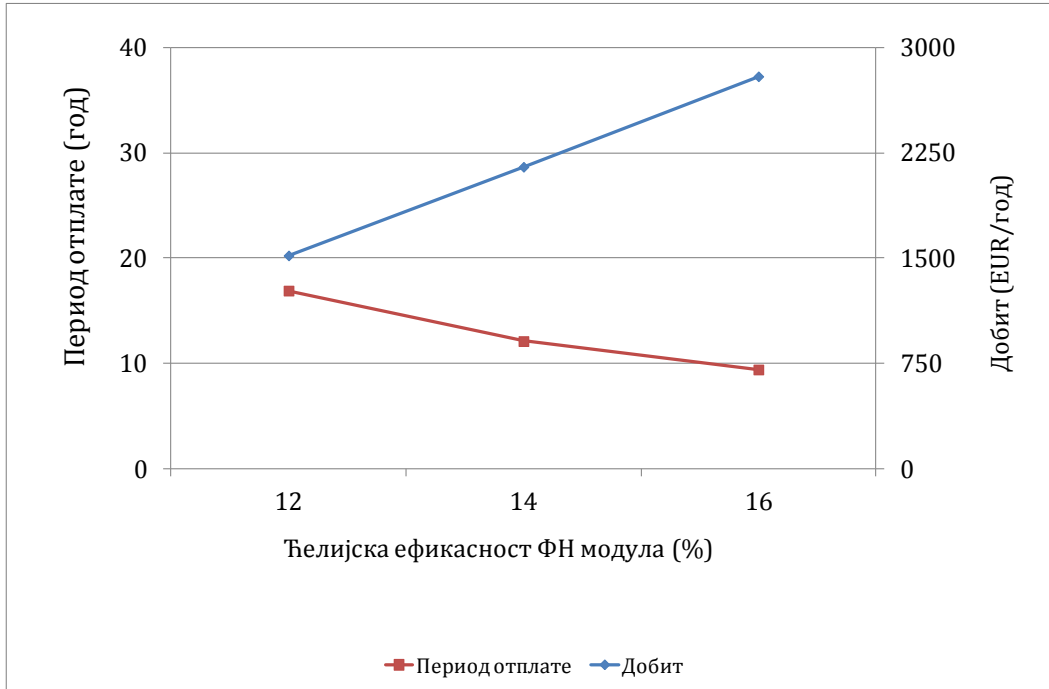
**Табела 9.35** – Резултати економске оптимизације за различиту ћелијску ефикасност ФН модула у зградама са електричним грејањем

	Различита ћелијска ефикасност ФН модула (%)		
	12 - реф	14	16
D (EUR)- годишња финансијска добит од соларних система	1518	2150	2795
PВ (год)- период отплате инвестиција	16,9	12,1	9,4
Удео ФН панела на крову (%)	95	95,63	96,25
Генерисана енергија (GJ)	60,61	68,52	76,44
$S_{PV}$ ( $\text{m}^2$ ) - Површина ФН панела	76,6	77,1	77,6
$S_{COL}$ ( $\text{m}^2$ ) – Површина колектора	4	3,5	3
$E_{PV,S}$ - Вишак електричне енергије (GJ)	34,34	41,9	49,7
$E_{P,NET}$ - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	6,83	-1,22	-9,29
$E_P$ - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	41,17	40,67	40,41

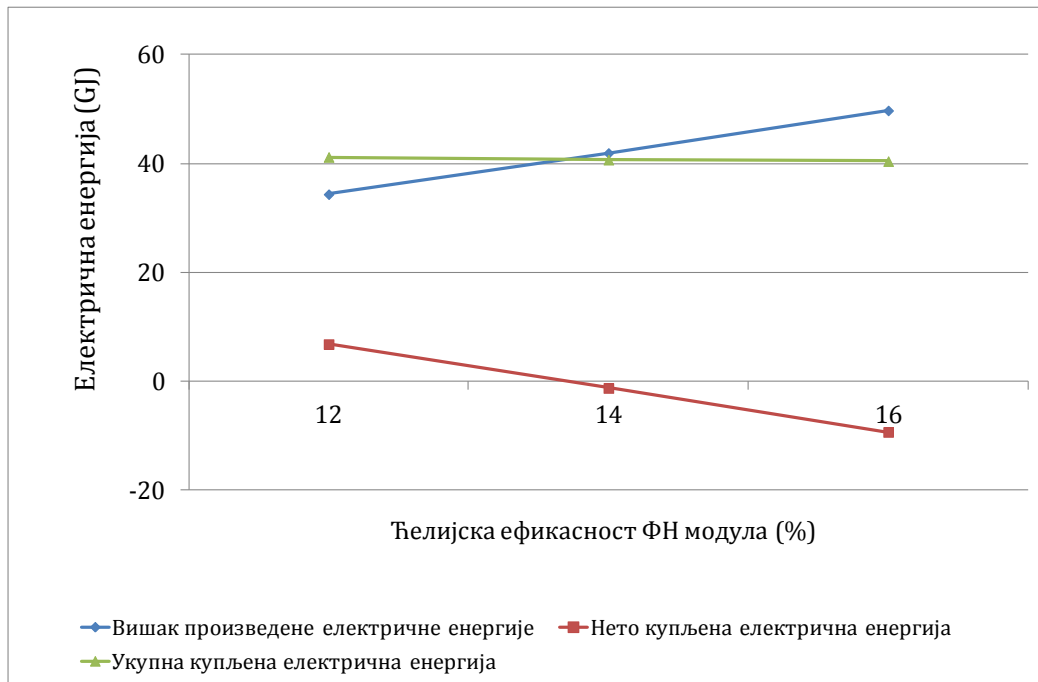
Може се закључити да са порастом ћелијске ефикасности уграђених фотонапонских панела, долази до наглог пораста годишње финансијске добити, док период отплате нагло пада. У односу на референтни случај ћелијске ефикасности ФН модула од 12 %, за који је добит износила 1518 EUR и период отплате 16,9 година, у случају примене ФН модула са ћелијском ефикасношћу 14 %, годишња добит је већа



за 632 EUR (41,6 %), а период отплате мањи за 4,8 год. (28,4 %). У случају примене ФН модула са ћелијском ефикасношћу од 16 %, годишња добит је већа за 1277 EUR (84,1%), а период отплате мањи за 7,5 год. (44,4 %). Графички приказ добити и периода отплате за примену фотонапонских модула различите ћелијске ефикасности дат је на Слици 9.82.



Слика 9.82 – Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са ФН панелима различите ћелијске ефикасности



Слика 9.83 – Вишак, нето-купљена и укупно-купљена електрична енергија за ФН панеле различите ћелијске ефикасности

Удео ФН панела на површини крова у овом случају је имао благи тренд раста, од 95 - 96,25 %, за модуле ћелијске ефикасности 12 – 14 %. Ћелијској ефикасности ФН модула од 14 %, одговарао је удео ФН панела 95,63 % (77,1 m<sup>2</sup> ФН панела и 3,5 m<sup>2</sup> соларних колектора), а ћелијској ефикасности ФН модула од 16 %, одговарао је удео ФН панела 96,25 % (77,6 m<sup>2</sup> ФН панела и 3m<sup>2</sup> соларних колектора).

Са порастом ћелијске ефикасности ФН модула, нагло расте вишак произведене електричне енергије који се продаје електро-мрежи, услед повећања количине генерисане енергије. Истовремено опада нето-купљена количина електричне енергије, а са њом и укупна купљена електрична енергија – Слика 9.83. У односу на референтну ћелијску ефикасност 12 %, за ћелијске ефикасности 14 % и 16 % вишак енергије који се продаје мрежи је већи за 7,56 GJ (22%) и 15,36 GJ (44,7 %). За ћелијску ефикасност од 14 % и 16 % нето-купљена електрична енергија је негативна, што значи да се из дистрибутивне мреже купује (за величину нето износа) мање електричне енергије него што јој је као вишак продато. Ово значи да су зграде са ћелијском ефикасношћу ФН модула 14 % и 16% нето-позитивне потрошње енергије, док је зграда са ћелијском ефикасношћу 12% нето-негативне потрошње енергије.

### 9.3.2 Даљинско и гасно грејање

#### Различита дебљина изолације зграде

За даљински, тј. гасни систем грејања исте дебљине изолације су посматране при економској оптимизацији величина ФН панела и соларних колектора као код претходних оптимизација - разматрани су случајеви дебљине изолације 0,05 m, 0,1 m, 0,15 m и 0,2 m. Добијени резултати економске оптимизације нису зависили од дебљине изолационог слоја, и дати су у Табели 9.36.

**Табела 9.36** – Резултати економске оптимизације за различиту дебљину изолације у зградама са даљинским, тј. гасним системом грејања

	Дебљина изолације
	0,05 m, 0,1 m, 0,15 m – Реф, 0,2 m
D (EUR)- годишња финансијска добит од соларних система	2930
PВ (год)- период отплате инвестиција	8,8
Удео ФН панела на крову (%)	95
Генерисана енергија (GJ)	60,61
S <sub>PV</sub> (m <sup>2</sup> ) - Површина ФН панела	76,6
S <sub>COL</sub> (m <sup>2</sup> ) – Површина колектора	4
E <sub>PV,S</sub> - Вишак електричне енергије (GJ)	42,77
E <sub>P,NET</sub> - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	-30,7
E <sub>P</sub> - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	12,07

Укупна потрошња електричне енергије у згради са системом даљинског, тј. гасног грејања износи 30,82 GJ.

За све разматране дебљине изолационог слоја, годишња финансијска добит је износила 2930 EUR, а период отплате инвестиције 8,8 година.

Удео фотонапонских панела је у свим случајевима износио 95 %, чему одговара површина под ФН системом од 76,6 m<sup>2</sup>, док је површина крова под колекторима 4 m<sup>2</sup>. Са овим површинама соларних система генерише се 50,47 GJ електричне енергије и 10,14 GJ топлотне енергије, што укупно представља 60,61 GJ генерисане енергије

Електрична енергија која се као вишак продаје електро-мрежи у свим случајевима је износила 42,77 GJ, због мањих енергетских потреба од генерисане енергије нето-купљена електрична енергија је износила -30,77 GJ, и укупна купљена електрична енергија је имала вредност 12,07 GJ.

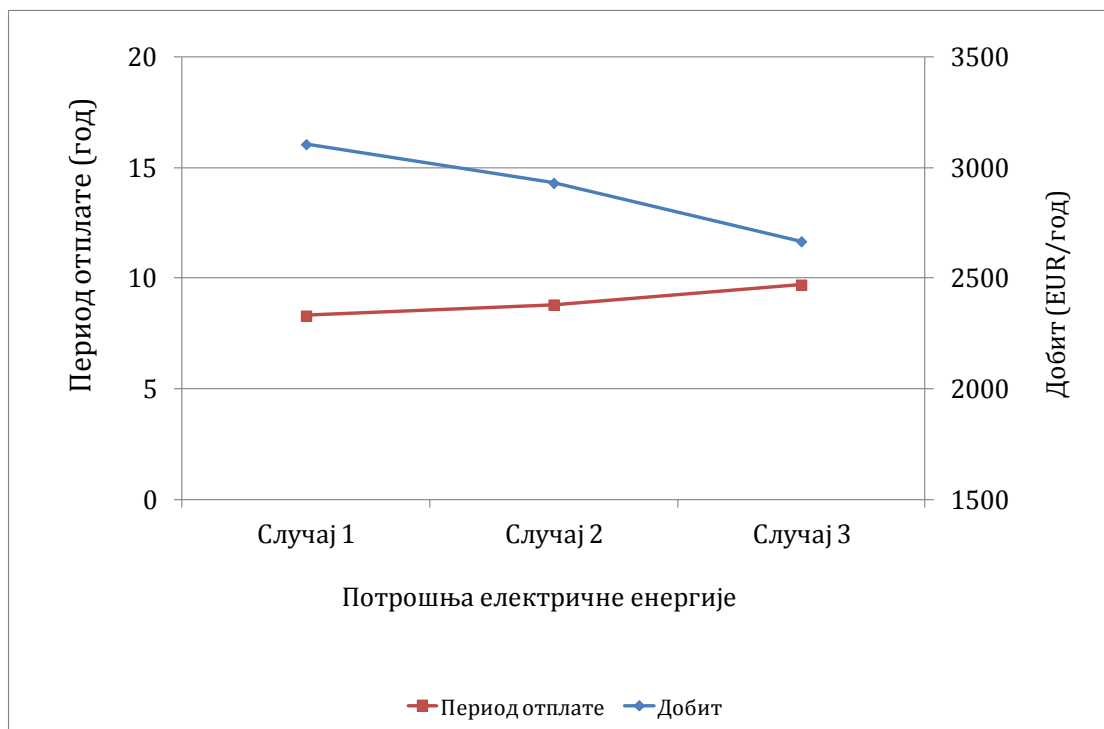
### Различита потрошња електричне енергије расвете и електро-уређаја

Разматрани су већ познати случајеви различите потрошње електричне енергије расвете и електричних уређаја - случајеви 1, 2 и 3, чија је укупна потрошња електричне енергије била 27,75 GJ, 30,82 GJ и 35,55 GJ, респективно, за оба анализирана система грејања. Резултати добијени економском оптимизацијом дати су у Табели 9.37.

**Табела 9.37** – Резултати економске оптимизације за различиту потрошњу електричне енергије у зградама са даљинским, тј. гасним грејањем

	Различита потрошња ел. енергије		
	Случај 1	Случај 2-реф	Случај 3
D (EUR)- годишња финансијска добит од соларних система	3105	2930	2666
PВ (год)- период отплате инвестиција	8,3	8,8	9,7
Удео ФН панела на крову (%)	95	95	95
Генерисана енергија (GJ)	60,61	60,61	60,61
S <sub>PV</sub> (m <sup>2</sup> ) - Површина ФН панела	76,6	76,6	76,6
S <sub>KOL</sub> (m <sup>2</sup> ) – Површина колектора	4	4	4
E <sub>PV,S</sub> - Вишак електричне енергије (GJ)	44,49	42,77	40,19
E <sub>P,NET</sub> - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	-33,78	-30,77	-25,98
E <sub>P</sub> - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	10,71	12,07	14,21

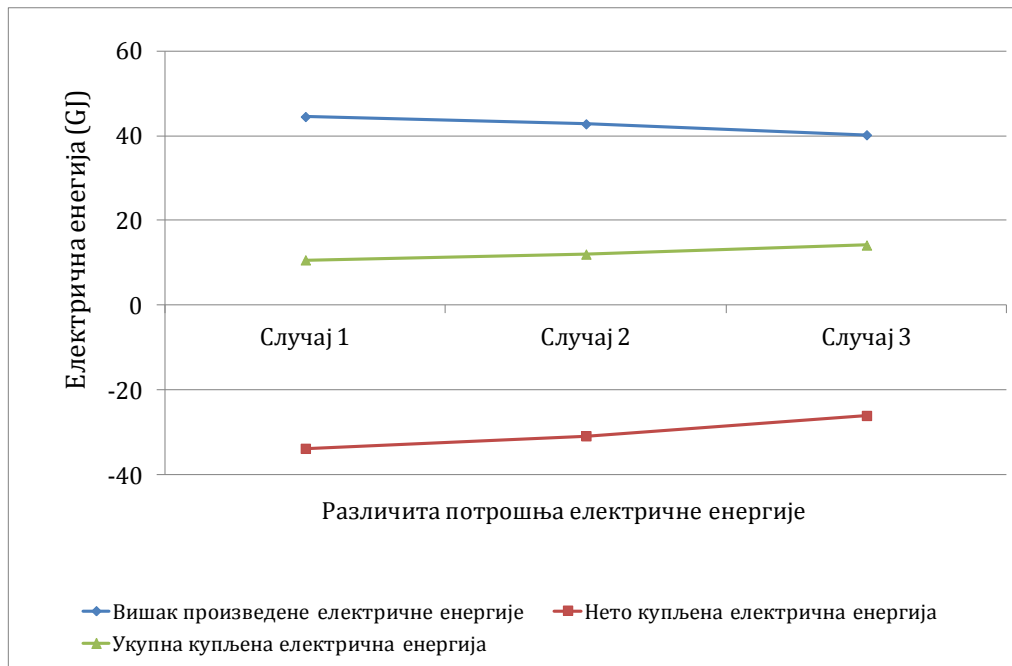
И у овом случају са порастом потрошње електричне енергије у разматраној згради, опада вредност финансијске добити а расте период отплате инвестиција. У односу на референтни случај потрошње електричне енергије (2) за који је добит износила 2930 EUR и период отплате 8,8 година, у случају мање потрошње електричне енергије (случај 1) добит је већа за 175 EUR (5,6 %), а период отплате мањи за 0,5 год. (5,7 %). У случају веће потрошње електричне енергије (случај 3) добит је мања за 264 EUR (9 %), а период отплате већи за 0,9 год. (10,2 %). На Слици 9.84 дат је графички приказ добити и периода отплате за различиту потрошњу електричне енергије у згради и систем даљинског, тј. гасног грејања.



**Слика 9.84** – Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са различитом потрошњом електричне енергије

Удео фотонапонских панела на површини крова је у свим случајевима био исти као код различите дебљине изолације, и износио је 95% (76,6 m<sup>2</sup>), а осталих 5 % (4 m<sup>2</sup>) је удео соларних колектора.

Уколико расте потрошња електричне енергије зградама са даљинским, тј. гасним системом грејања, вишак произведене електричне енергије опада, док укупно купљена електрична енергија као и нето-купљена електрична енергија расту. За случајеве потрошње електричне енергије 1, 2 и 3, укупна купљена количина електричне енергије је износила 10,71 GJ, 12,07 GJ и 14,21 GJ, респективно – Слика 9.85. У односу на референтни случај 2, у случају 1, уштеда укупно купљене електричне енергије износи 1,36 GJ (12,7 %). У случају 3 укупна купљена електрична енергија је већа за 2,14GJ (17,7 %).



**Слика 9.85** – Вишак, нето-купљена и укупно-купљена електрична енергија за различиту потрошњу електричне енергије у згради са даљинским, тј. гасним грејањем

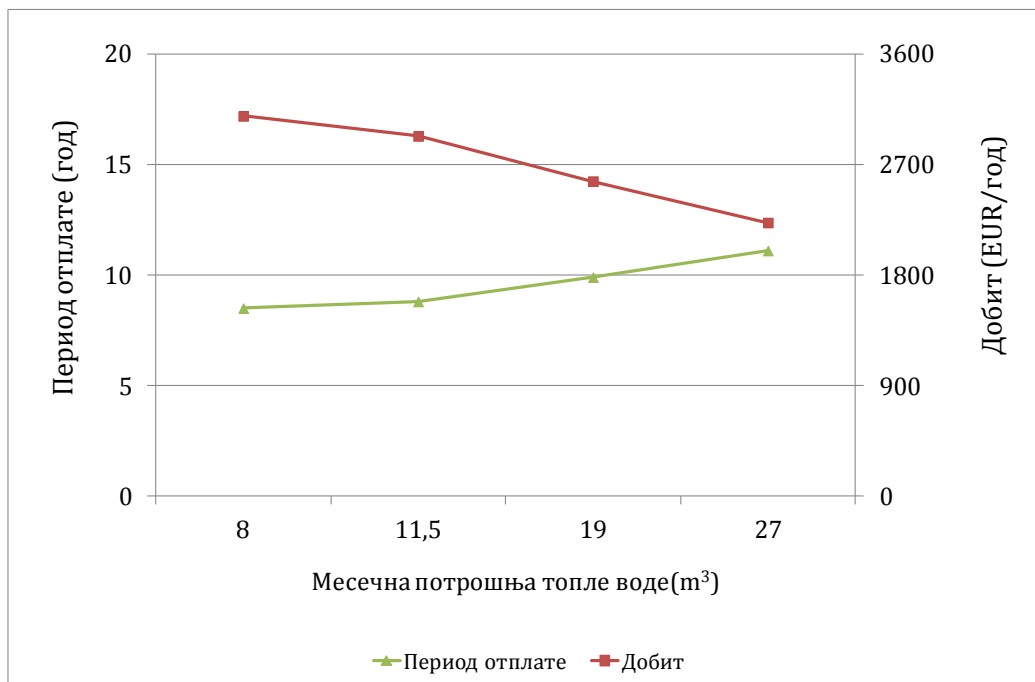
### Различита месечна потрошња топле воде

Поново су разматрани случајев зграда са даљинским, односно гасним грејањем и раније анализираним месечним потрошњама топле воде које су износиле 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup> (референтни случај), 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>, а резултати оптимизације дати су у Табели 9.38.

**Табела 9.38** – Резултати економске оптимизације за различиту месечну потрошњу топле воде у згради са даљинским, тј. гасним грејањем

	Месечна потрошња топле воде (m <sup>3</sup> )			
	8	11,5 - Реф	19	27
D (EUR)- годишња финансијска добит од соларних система	3093	2930	2563	2226
PВ (год)- период отплате инвестиција	8,5	8,8	9,9	11,1
Удео ФН панела на крову (%)	96,25	95	93,13	91,25
Генерисана енергија (GJ)	59,07	60,61	63,05	65,15
S <sub>PV</sub> (m <sup>2</sup> ) - Површина ФН панела	77,6	76,6	75,1	73,6
S <sub>COL</sub> (m <sup>2</sup> ) – Површина колектора	3	4	5,5	7
E <sub>PV,S</sub> - Вишак електричне енергије (GJ)	44,55	42,7	39,51	36,97
E <sub>P,NET</sub> - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	-33,27	-30,7	-23,19	-15,26
E <sub>P</sub> - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	11,28	12,07	16,32	21,71

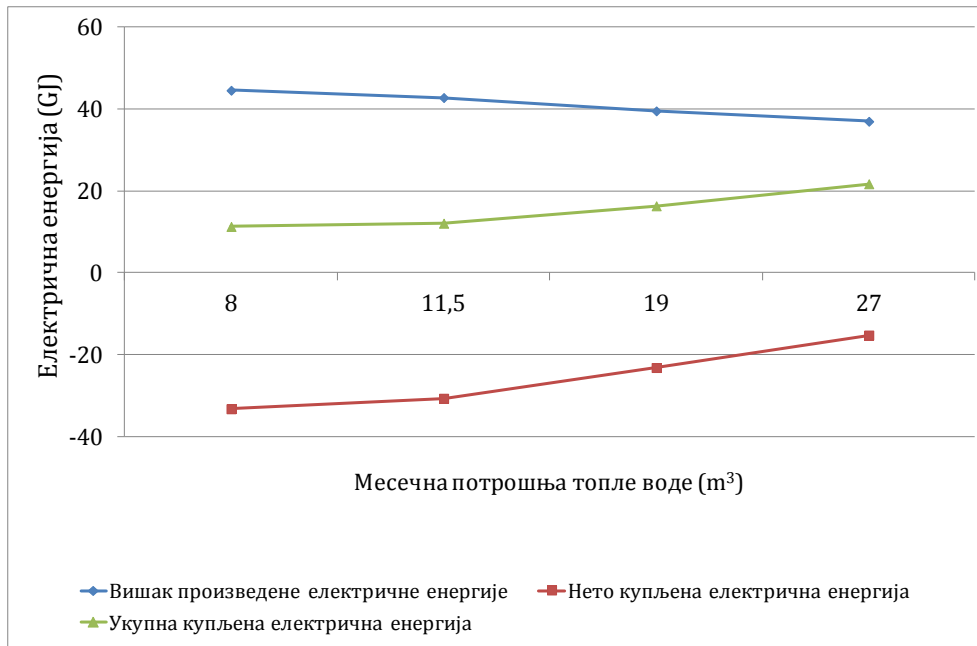
Финансијска добит опада са порастом месечне потрошње топле воде, док период отплате инвестиција расте. Разлог је већа потрошња електричне енергије за загревање воде. У односу на референтни случај зграда са месечном потрошњом топле воде од  $11,5 \text{ m}^3$ , са потрошњом топле воде у згради од  $8 \text{ m}^3$ , годишња добит се повећава за 163 EUR (5,62 %) а период отплате инвестиција се смањује за 0,3 год (3,4%). Код зграда са месечном потрошњом топле воде од  $19 \text{ m}^3$  и  $27 \text{ m}^3$  годишња добит се смањује за 367 EUR (12,52 %) и 704 EUR (24 %), респективно, а период отплате се повећава за 1,1 год. (12,5 %) и 2,3 год. (26,1 %), респективно. Добит и период отплате за различиту месечну потрошњу топле воде дат је на Слици 9.86.



**Слика 9.86** – Годишња добит и период отплате инвестиција за зграду са различитом месечном потрошњом топле воде и даљинским, тј. гасним грејањем

Код економских оптимизација зграда са даљинским, тј. гасним системом грејања, удео ФН панела се мењао, и благо је опадао је са порастом потрошње топле воде. Вредности су биле исте као код економске оптимизације зграде различите потрошње топле воде и електричног грејања. Изузетак је само удео ФН панела за потрошњу од  $19 \text{ m}^3$  који је износио 93,13 %.

Са порастом потрошње топле воде опада вишак произведене електричне енергије који се продаје електро-дистрибутивној мрежи. Укупно купљена количина електричне енергије расте, а такође расте и нето-купљена количина електричне енергије. За месечне потрошње топле воде  $8 \text{ m}^3$ ,  $11,5 \text{ m}^3$ ,  $19 \text{ m}^3$  и  $27 \text{ m}^3$ , укупна купљена количина електричне енергије је износила 11,28 GJ, 12,07 GJ, 16,32 GJ и 21,71GJ, респективно, што је заједно са вишком и нето количином купљене енергије приказано на Слици 9.87. Уколико је месечна потрошња топле воде  $8 \text{ m}^3$ , у односу на референтни случај потрошње од  $11,5 \text{ m}^3$ , остварује се уштеда у укупно купљеној електричној енергији од 0,79 GJ (6,5 %). За месечне потрошње топле воде  $19 \text{ m}^3$  и  $27 \text{ m}^3$ , укупна купљена количина електричне енергије у односу на референтни случај је већа за 4,25GJ (35,2%) и 9,64 GJ (79,9 %).



Слика 9.87 – Вишак, нето-купљена и укупно-купљена електрична енергија за различиту потрошњу топле воде у згради са даљинским, тј. гасним грејањем

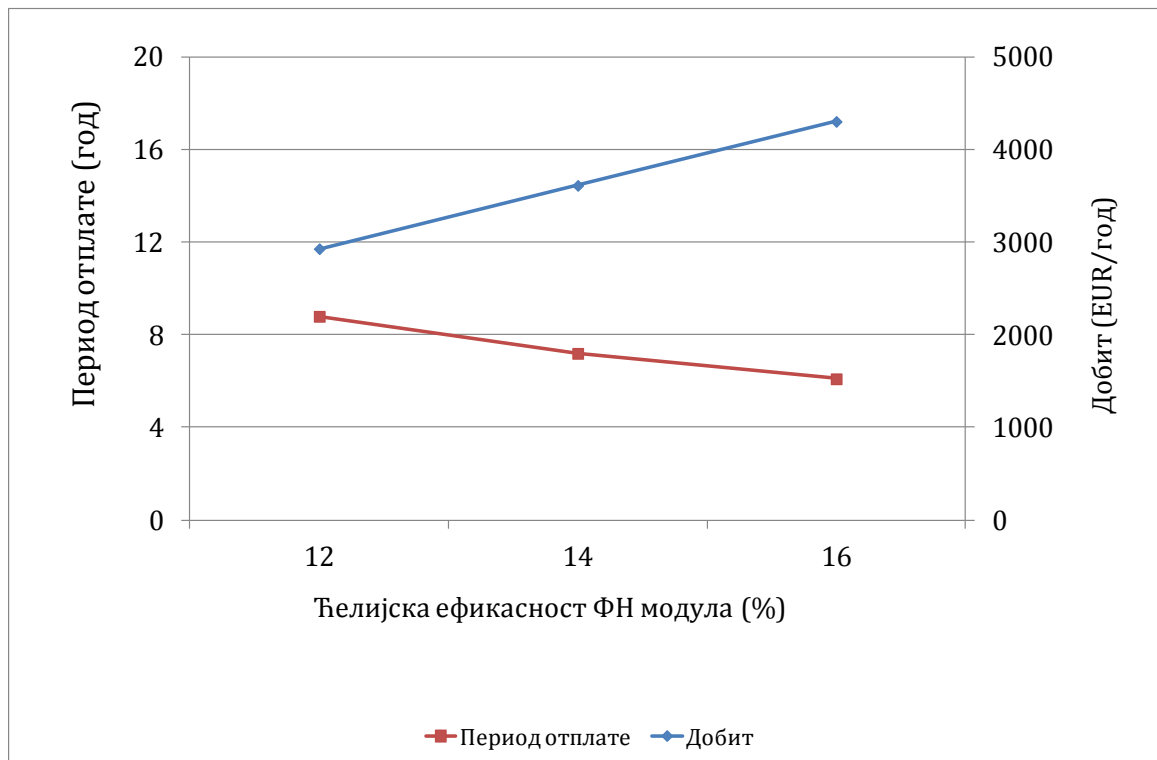
### Различита ћелијска ефикасност ФН модула

Иста, већ анализирана ћелијска ефикасност ФН модула разматрана је и у овим истраживањима - 12 % (референтни случај), 14 % и 16 %, исто као код претходних оптимизација. Резултати економске оптимизације за зграду са даљинским, тј. гасним грејањем дати су у Табели 9.39.

Табела 9.39 – Резултати економске оптимизације за различиту ћелијску ефикасност ФН модула у зградама са даљинским, тј. гасним грејањем

	Различита ћелијска ефикасност (%)		
	12 - реф	14	16
D (EUR)- годишња финансијска добит од соларних система	2930	3614	4305
PВ (год)- период отплате инвестиција	8,8	7,2	6,1
Удео ФН панела на крову (%)	95	95,63	96,25
Генерисана енергија (GJ)	60,61	68,52	76,44
S <sub>PV</sub> (m²) - Површина ФН панела	76,6	77,1	77,6
S <sub>COL</sub> (m²) – Површина колектора	4	3,5	3
E <sub>PV,S</sub> - Вишак електричне енергије (GJ)	42,77	51,25	59,84
E <sub>P,NET</sub> - Нето-купљена електрична енергија (GJ)	-30,7	-38,75	-46,82
E <sub>P</sub> - Укупна купљена електрична енергија (GJ)	12,07	12,5	13,02

Уколико ћелијска ефикасност ФН модула расте, долази до наглог пораста годишње финансијске добити, а период отплате се нагло смањује. У односу на референтни случај ћелијске ефикасности ФН модула од 12 %, за који је добит износила 2930 EUR и период отплате 8,8 година, у случају примене ФН модула са ћелијском ефикасношћу 14 %, годишња добит је већа за 684 EUR (23,3 %), а период отплате мањи за 1,6 год. (18,2 %). У случају примене ФН модула са ћелијском ефикасношћу од 16 %, годишња добит је већа за 1375 EUR (46,9%), а период отплате мањи за 2,7 год. (30,7 %). Графички приказ добити и периода отплате за примену фотонапонских модула различите ћелијске ефикасности дат је на Слици 9.88.

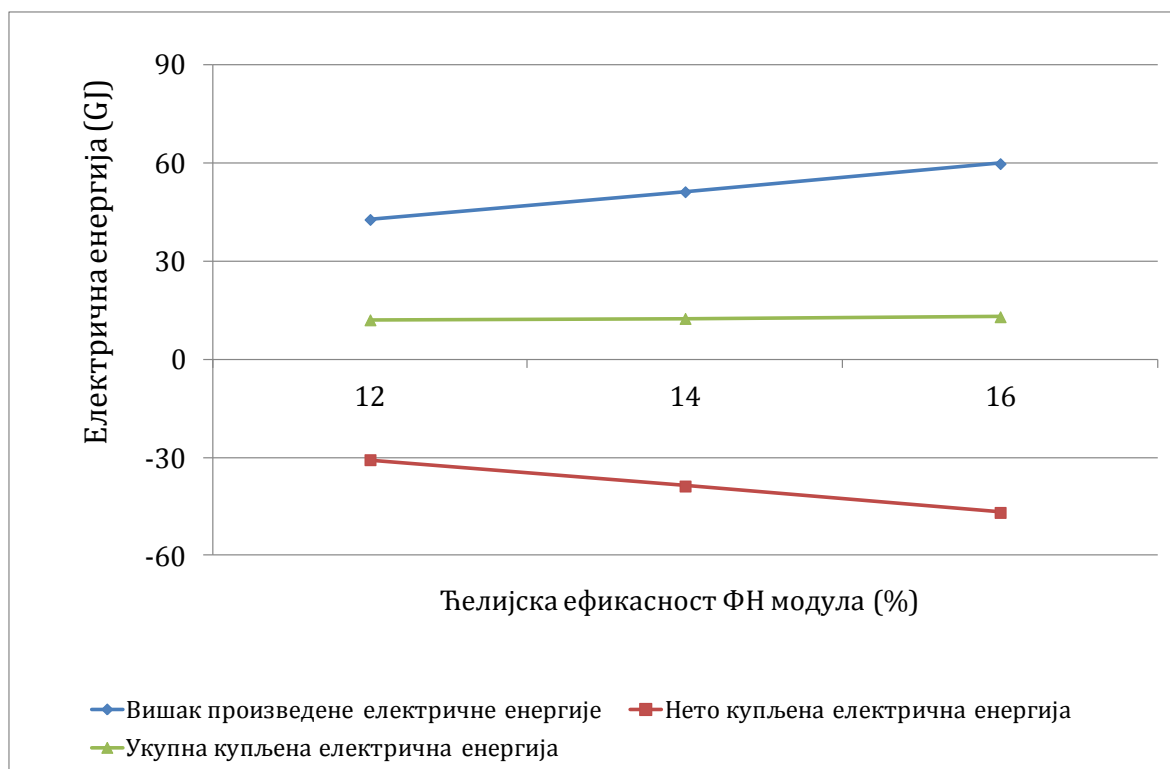


**Слика 9.88** – Годишња финансијска добит и период отплате инвестиција за зграду са ФН панелима различите ћелијске ефикасности

Удео ФН панела на површини крова је при економској оптимизацији зграде са даљинским, тј. гасним грејањем имао исте вредности као код аналогних зграда са електричним грејањем, и износио је од 95 - 96,25 %, за модуле ћелијске ефикасности 12 - 14 %. Ћелијској ефикасности ФН модула од 14 %, одговарао је удео ФН панела 95,63 % а ћелијској ефикасности ФН модула од 16 %, одговарао је удео ФН панела 96,25 %.

Са порастом ћелијске ефикасности ФН модула, нагло расте вишак произведене електричне енергије који се продаје електро-мрежи. Истовремено опада нето- количина купљене електричне енергије, а такође опада и укупна купљена електрична енергија – Слика 9.89. У односу на референтну ћелијску ефикасност 12 %, за ћелијске ефикасности 14 % и 16 % вишак енергије који се продаје мрежи је већи за 8,48 GJ (19,8) и 17,07 GJ (39,9 %).





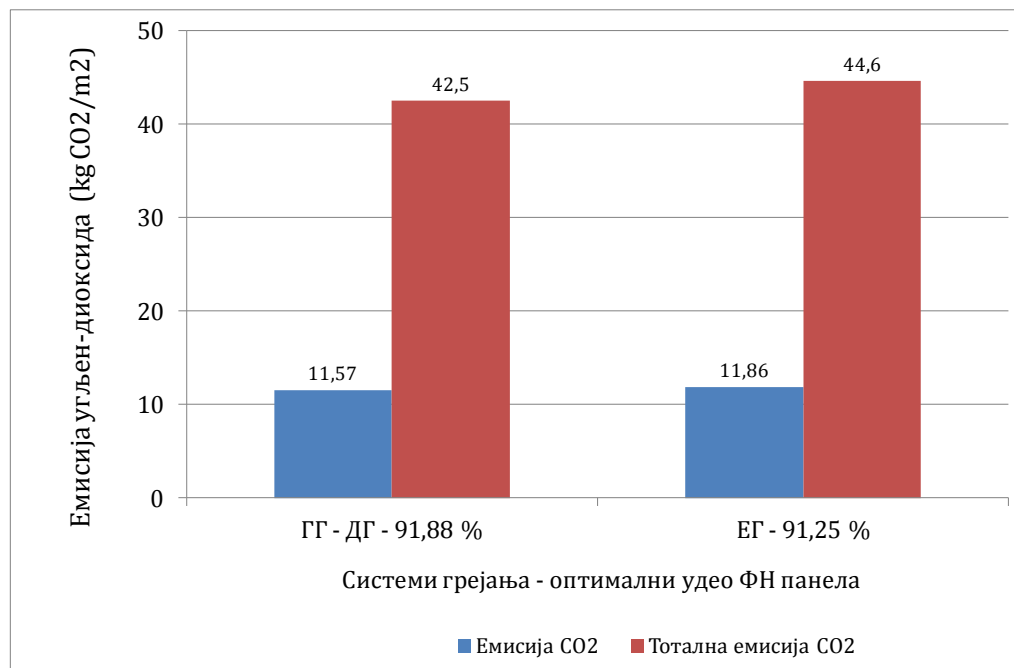
**Слика 9.89** – Вишак, нето-купљена и укупно-купљена електрична енергија за ФН панеле различите ћелијске ефикасности

## 9.4 Резултати еколошке анализе соларних система

### 9.4.1 Еколошка анализа најповољнијих решења енергетске оптимизације

У свим анализираним случајевима зграда са електричним грејањем, оптимални удео ФН панела на крову је износио углавном 91,25 % (при ћелијској ефикасности модула 12 %), што одговара површини инсталираних ФН панела од 73,6 m<sup>2</sup> и површини инсталираних соларних колектора од 7 m<sup>2</sup>. При овом односу површина генерише се 48,48 GJ електричне и 14,19 GJ топлотне енергије. Када су у питању зграда са даљинским, тј. гасним грејањем, оптимални удео ФН панела на крову је износио 91,88 %, (површина инсталираних ФН панела 74,1 m<sup>2</sup>, површина са соларним колекторима 6,5 m<sup>2</sup>) и на тај начин се генерише 48,81 GJ електричне и 12,75 GJ топлотне енергије.

Наведени подаци значе да је у случају зграда са електричним грејањем, годишња емисија угљен-диоксида соларних система за генерисање енергије 11,86 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације, док је у случају зграда са даљинским или гасним грејањем годишња емисија угљен-диоксида соларних система 11,57 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације. Тотална емисија угљен-диоксида соларних система за зграду са електричним грејањем износи 44,6 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације, а за зграду са даљинским, тј. гасним грејањем, тотална емисија CO<sub>2</sub> износи 42,5 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације. Графички приказ резултата је дат на Слици 9.90.

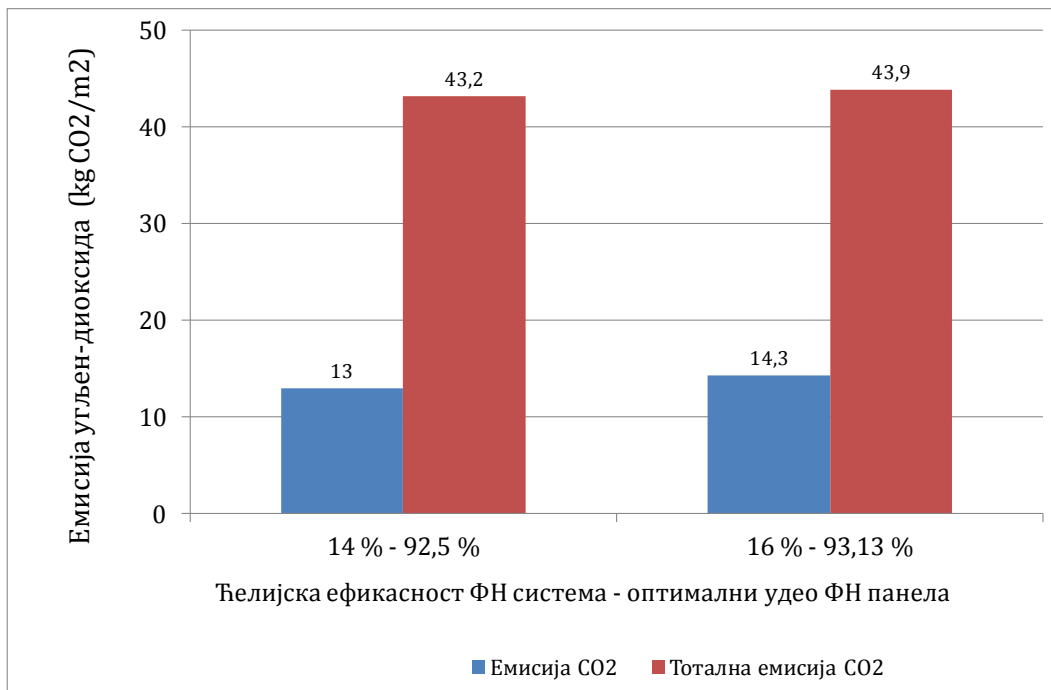


**Слика 9.90** – Емисија и тотална емисија угљен-диоксида при енергетској оптимизацији зграда са различитим системима грејања и ФН системом ћелијске ефикасности 12 %

Важан параметар који показује утицај соларних система на животну средину је њихово емисионо време отплате EMPB (*emission payback-time*). За анализиране

зграде са електричним грејањем емисионо време отплате износи 2,8 година, а за зграду са даљинским, тј. гасним грејањем, ЕМРВ је незнатно мање - 2,7 год.

Ако би се на крову анализираних зграда инсталирали фотонапонски панели ћелијске ефикасности 14 % и 16 %, у свим зградама без обзира на врсту грејања које се користи, оптималан удео ФН панела би износи 92,5 % (површина ФН панела 74,6m<sup>2</sup>, површина са соларним колекторима 6 m<sup>2</sup>), односно 93,13 % (површина ФН панела 75,1 m<sup>2</sup>, површина са соларним колекторима 5,5 m<sup>2</sup>). Тада, у случају фотонапонских панела ћелијске ефикасности 14 % годишња емисија угљен-диоксида соларних система за генерисање енергије износи 13 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације, док је тотална емисија угљен-диоксида соларних система 43,2 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације. У случају ФН панела ћелијске ефикасности 16 % годишња емисија угљен-диоксида соларних система износи 14,3 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације, а тотална емисија угљен-диоксида соларних система је 43,9 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације (Слика 9.91). Може се закључити да са порастом ћелијске ефикасности ФН модула расте и емисија угљен-диоксида.



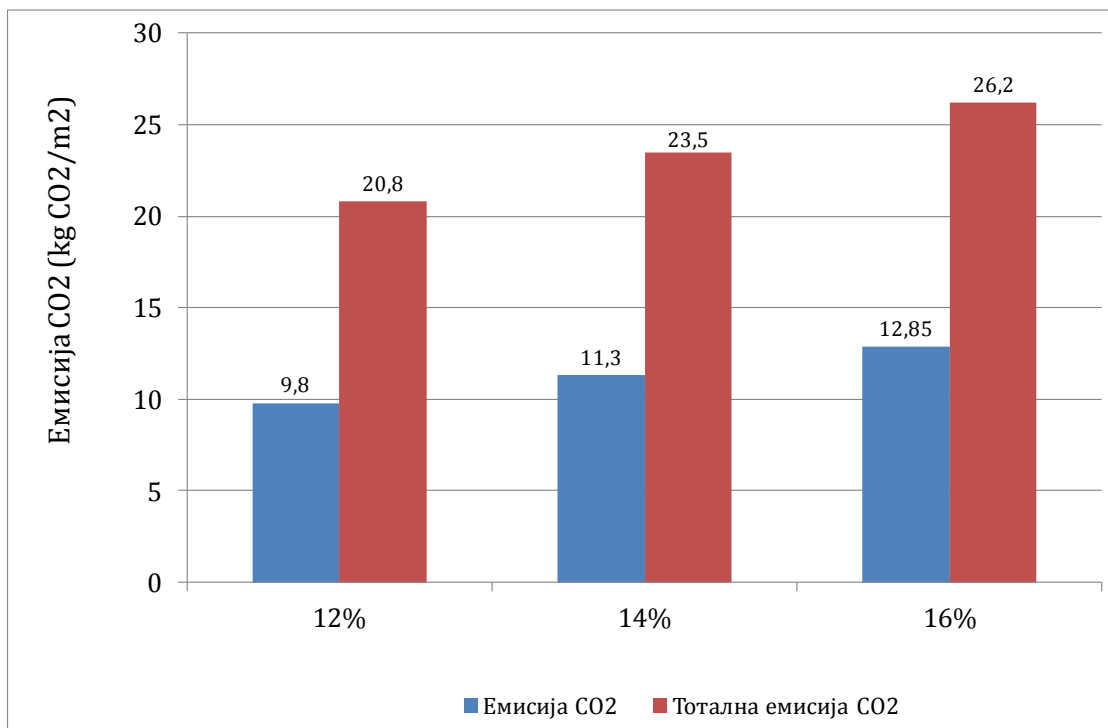
**Слика 9.91** – Емисија и тотална емисија угљен-диоксида код енергетске оптимизације зграда са различитим системима грејања, при ћелијској ефикасности ФН система 14 % и 16 %

Емисионо време отплате за анализираних зграда са фотонапонским системом ћелијске ефикасности 14 %, без обзира на грејни систем, износи 2,3 године, а за фотонапонски систем ћелијске ефикасности модула од 16 %, емисионо време отплате износи 2,1 годину (за све врсте система грејања). Види се да са порастом ћелијске ефикасности модула долази до пада емисионог времена отплате услед повећања количине генерисане електричне енергије. Наиме, ФН систем ћелијске ефикасности 14 % при оптималном уделу ФН панела генерише 57,33 GJ електричне енергије и 12,4 GJ топлотне енергије. ФН систем ћелијске ефикасности 16 % при оптималном уделу ФН панела генерише чак 65,96 GJ електричне енергије и 11,98 GJ топлотне енергије.

## 9.4.2 Еколошка анализа најповољнијих решења ексергетске оптимизације

При ексергетској оптимизацији у свим анализираним случајевима зграда без обзира на грејни систем оптимални удео ФН панела на крову је износио 98,75 % при свим разматраним вредностима ћелијске ефикасности ФН модула. Овој вредности удела одговара површина ФН панела од 79,6 m<sup>2</sup> и површина соларних колектора од само 1 m<sup>2</sup>. За случај ФН система ћелијске ефикасности 12 %, таде се генерише 52,46GJ електричне енергије и 3,22 GJ топлотне енергије. Када би се инсталирао ФН систем са ћелијском ефикасношћу модула 14 %, генерисало би се 61,2 GJ електричне енергије док би се помоћу ФН модула ћелијске ефикасности 16 % генерисало 69,95 GJ електричне енергије. Количина генерисане топлотне енергије је иста у свим случајевима и износи 3,22 GJ.

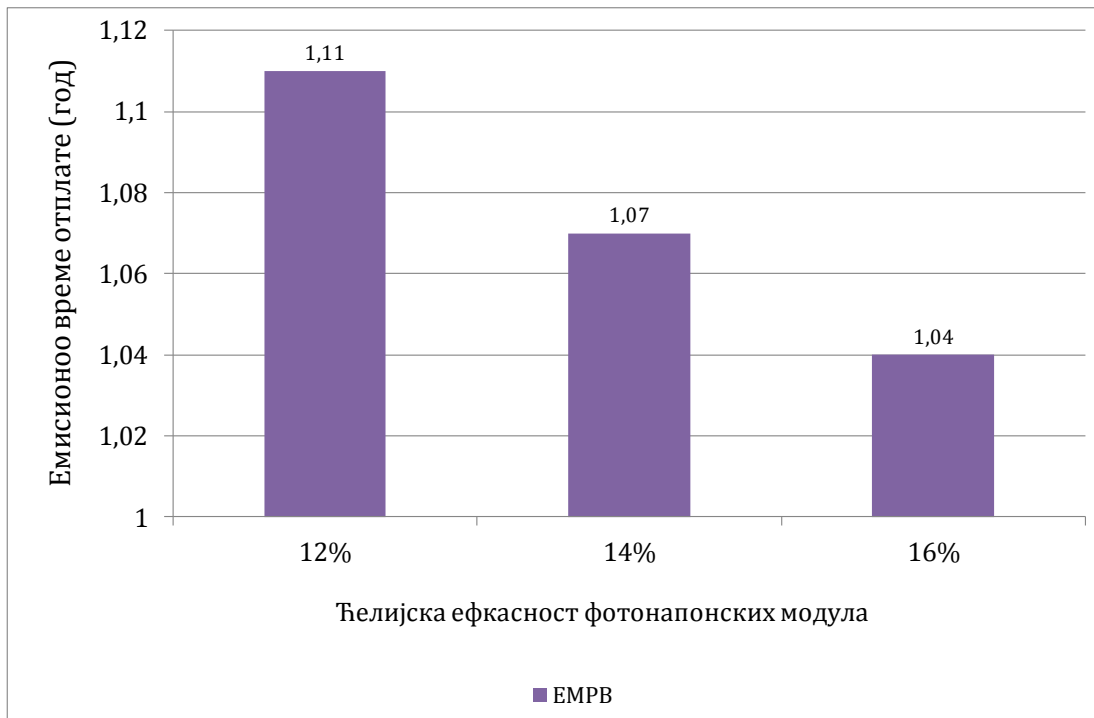
Емисија угљен-диоксида соларних система при примени ФН система ћелијске ефикасности 12 % износи 9,8 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације, а тотална емисија угљен-диоксида износи 20,8 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације. У случају ФН система ћелијске ефикасности 14 % и 16 %, емисија угљен-диоксида износи 11,3 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> и 12,85 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, респективно. Тотална емисија угљен-диоксида за ФН системе ћелијске ефикасности 14 % и 16 %, износи 23,5 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> и 26,2 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, респективно, што значи да емисије CO<sub>2</sub> расту са порастом количине генерисане енергије. Наведене емисије CO<sub>2</sub> су приказане на Слици 9.92.



**Слика 9.92** – Емисија и тотална емисија угљен-диоксида при ексергетској оптимизацији зграда са ФН системима различите ћелијске ефикасности

Емисионо време отплате се смањује са повећањем ћелијске ефикасности модула, услед веће количине генерисане електричне енергије. Код ФН система ћелијске ефикасности 12 %, 14 % и 16 %, респективно, емисионо време отплате износи 1,11 година, 1,07 година и 1,04 године респективно (Слика 9.93). Код

ексергетске оптимизације удео ФН панела на крову је већи него код енергетске оптимизације, тако да се генерише већа количина електричне енергије. Стога се и значајно смањује емисионо време отплате.

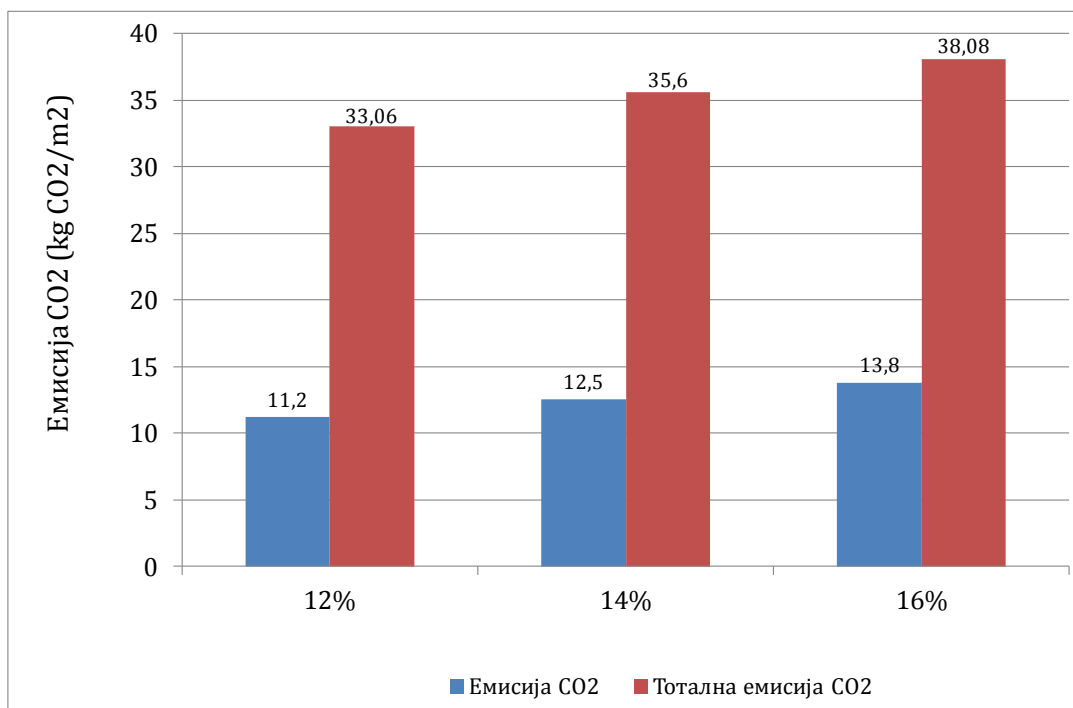


**Слика 9.93** – Емисионо време отплате за ФН системе различите ћелијске ефикасности при ексергетској оптимизацији зграда

### 9.4.3 Еколошка анализа најповољнијих решења економске оптимизације

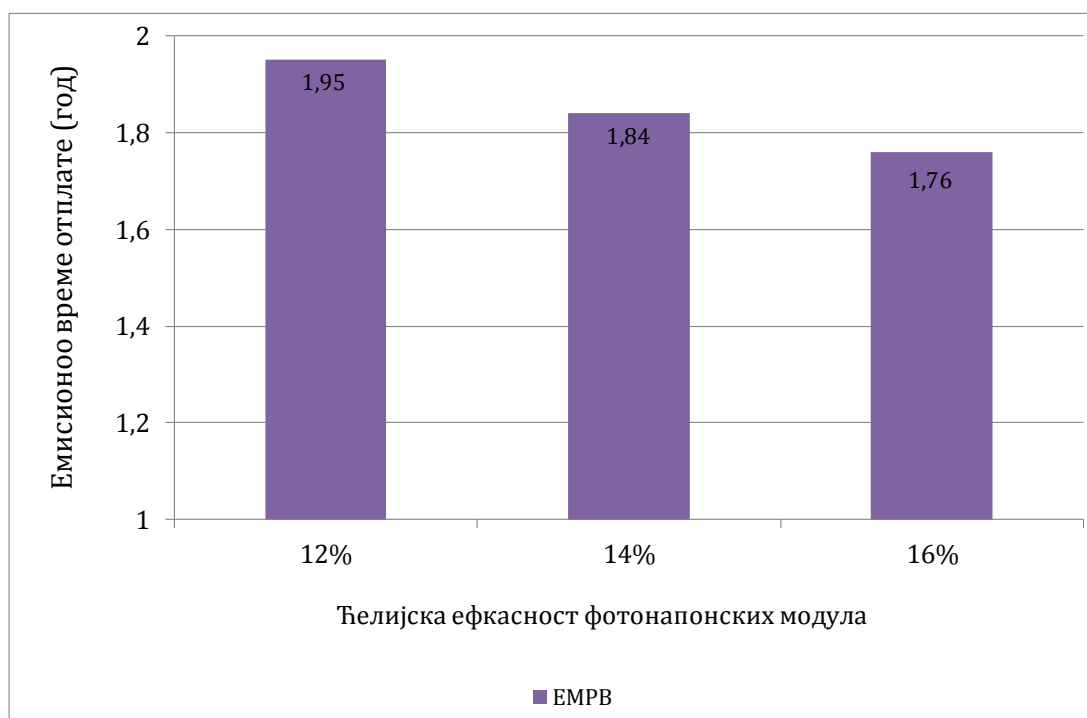
Слично ексергетској оптимизацији приказаној у претходном одељку, и при економској оптимизацији у свим анализираним случајевима зграда без обзира на грејни систем оптимални удео ФН панела је био приближно исти и износио је око 95% (чак и при свим разматраним вредностима ћелијске ефикасности ФН модула). Овај удео одговара површини инсталираних фотонапонских панела од 76,6 m<sup>2</sup> и површини соларних колектора од 4 m<sup>2</sup>. При овом односу површина соларних система и за случај ФН система ћелијске ефикасности 12 %, генерише се 50,47 GJ електричне и 10,14 GJ топлотне енергије. Када би се инсталирао ФН систем са ћелијском ефикасношћу модула 14 % и 16 %, респективно, генерисало би се 59,27 GJ и 68,18 GJ електричне енергије, респективно, као и 9,25 GJ и 8,26 GJ топлотне енергије, респективно.

Емисија угљен-диоксида добијена анализом најповољнијих случајева економске оптимизације, за ФН системе ћелијске ефикасности 12 %, 14 % и 16 % респективно, износи 11,2 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације, 12,5 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације 13,8 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације, респективно. Тотална емисија угљен-диоксида за посматране ћелијске ефикасности модула износи 33,06 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације, 35,6 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације и 38,1 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> соларне инсталације, респективно. Дате емисије CO<sub>2</sub> су приказане на Слици 9.94.



**Слика 9.94** – Емисија и тотална емисија угљен-диоксида код зграда са ФН системима различите ћелијске ефикасности при економској оптимизацији

Емисионо време отплате се смањује са повећањем ћелијске ефикасности модула, као и у претходним случајевима. Код економске оптимизације зграда са ФН системом ћелијске ефикасности 12 %, 14 % и 16 %, респективно, емисионо време отплате износи 1,95 година, 1,84 година и 1,76 година респективно (Слика 9.95).



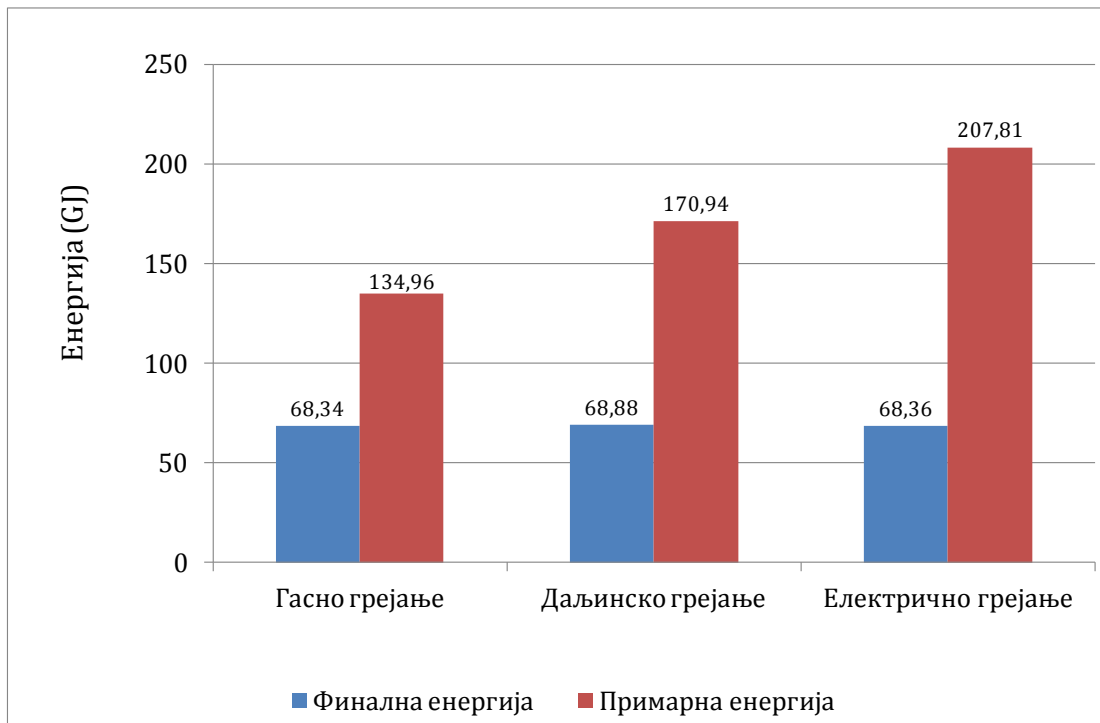
**Слика 9.95** – Емисионо време отплате за економску оптимизацију зграда са ФН системима различите ћелијске ефикасности

## 9.5 Поређење резултата

### 9.5.1 Енергетска анализа

У одељцима 9.1.1 и 9.1.2 представљена је енергетска анализа и енергетска оптимизација зграде са три различита система грејања: електричним грејањем, даљинским грејањем и грејањем на гас. Са инсталираним фотонапонским панелима и соларним колекторима генерише се електрична и топлотна енергија. Енергетским оптимизацијама је одређиван оптимални однос површина ФН панела и соларних колектора при којима се остваривала максимална уштеда примарне енергије (или максимална избегнута потрошња примарне енергије). При томе је узимана у обзир уграђена енергија соларних система и изолације зграде.

Слика 9.96 приказује потрошњу финалне и примарне енергије за референтну зграду, за сва три разматрана система грејања.



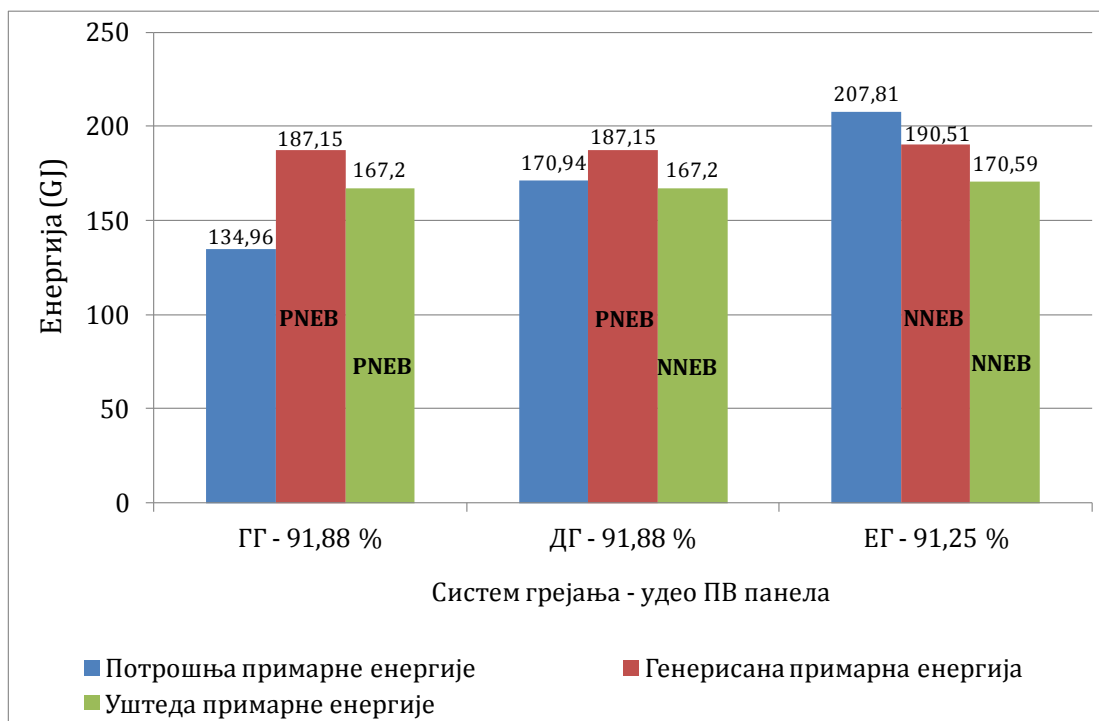
Слика 9.96 – Потрошња финалне и примарне енергије референтне зграде, за различите системе грејања

Потрошња примарне енергије је најмања за зграду са системом гасног грејања, а највећа за зграду са системом електричног грејања. Разлог је у високом фактору конверзије електричне енергије у примарну енергију (3,04) у односу на коефицијент конверзије примарне енергије за природни гас (1,1). У поређењу са системом гасног грејања, потрошња примарне енергије у згради са даљинским грејањем је већа за 35,98 GJ (26,7 %). У случају зграде са електричним грејањем, потрошња примарне енергије је већа за 72,85 GJ (54 %). Ако би поредили зграду са даљинским и електричним грејањем, зграда са електричним грејањем би имала већу потрошњу примарне енергије за 36,87 GJ (21,6 %). Са аспекта потрошње примарне енергије, најбоље решење свакако представља зграда са уграђеним системом гасног грејања.

Ово се односи на анализу зграда у Србији, са датим коефицијентима конверзије енергије, јер су коефицијенти конверзије финалне у примарну енергију различити у различитим државама.

Нумеричким симулацијама је показано да је са инсталирањем соларних система на крову зграде, којима се генерише енергија, могуће остварити концепт зграде нето-позитивне потрошње енергије нарочито када су у питању зграде са мањом потрошњом примарне енергије. То су зграде са гасним грејањем, које су скоро у свим случајевима биле нето-позитивне потрошње енергије.

За зграде са електричним грејањем, оптимални удео ФН панела на крову је износио углавном 91,25 %, што значи да је површина инсталираних ФН панела 73,6m<sup>2</sup>, а површина са постављеним колекторима 7 m<sup>2</sup>. Овакав однос значи генерисање 48,48 GJ електричне и 14,19 GJ топлотне енергије, тј. 190,51 GJ примарне енергије. Уштеда примарне енергије са употребом соларних инсталација у овом случају износи 170,59 GJ. Изузетак су случајеви симулација где се значајно повећавала потрошња топле воде, па је и потребан удео колектора био до 5 % већи. За зграде са даљинским, тј. гасним грејањем, оптимални удео ФН панела на крову је износио око 91,88 %, што значи да је површина инсталираних ФН панела 74,1 m<sup>2</sup>, а површина са постављеним колекторима 6,5 m<sup>2</sup>. Овакав однос значи генерисање 48,81 GJ електричне и 12,75 GJ топлотне енергије, тј. 187,15 GJ примарне енергије. Уштеда примарне енергије са употребом соларних инсталација у овом случају износи 167,2 GJ. Изузетак су и овде случајеви са повећањем потрошње топле воде (удео колектора до 5 % већи). Слика 9.97 приказује генерисану примарну енергију (са и без уграђене енергије) и потрошњу примарне енергије за оптималне вредности удела ФН панела код различитих система грејања (у референтној згради).

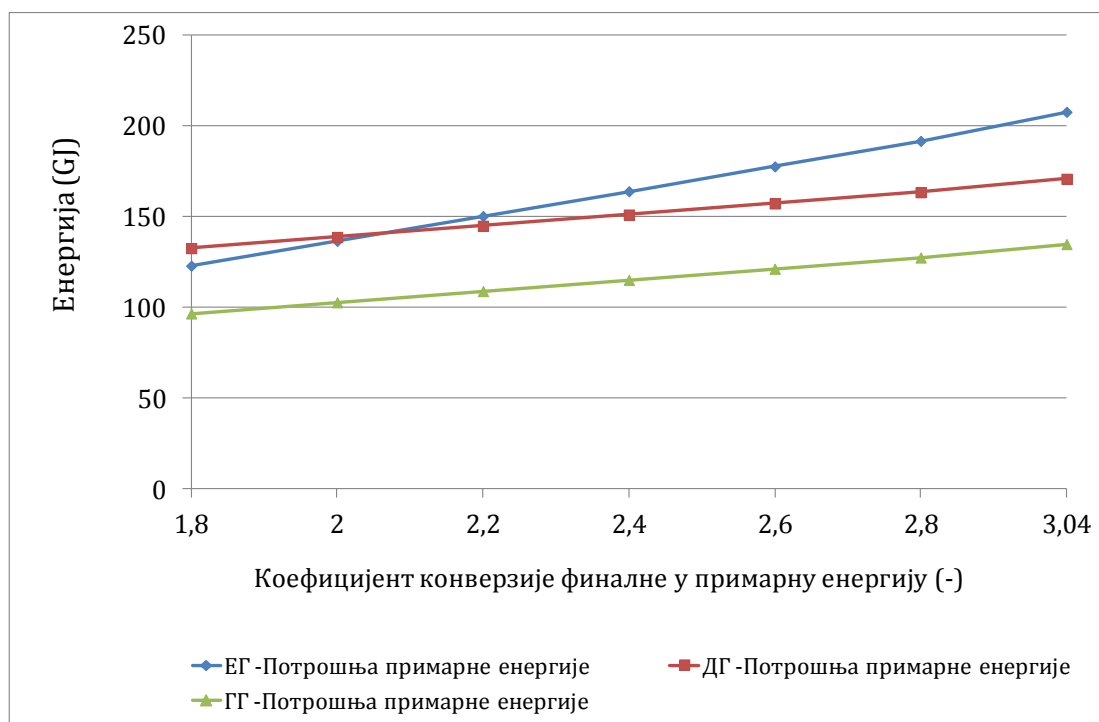


Слика 9.97 – Потрошња примарне енергије и генерисана примарна енергија референтне зграде, за различите системе грејања (уделе ФН панела)



Са горње слике се види да је зграда са гасним системом грејања нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према оба приступа, зграда са даљинским грејањем је нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према генерисаној примарној енергији и нето-негативне потрошње енергије (NNEB) према максималној уштеди примарне енергије, док је зграда са електричним системом грејања према оба приступа нето-негативне потрошње енергије (NNEB).

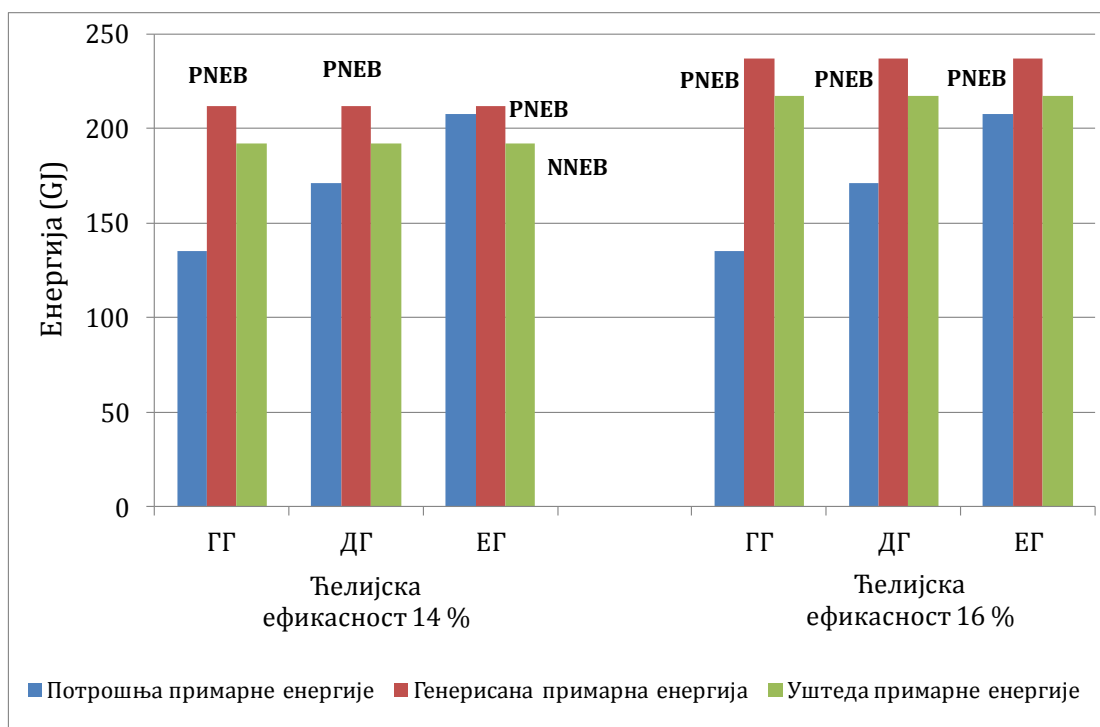
У анализи добијених резултата више пута је помињан висок коефицијент конверзије електричне у примарну енергију. Његова тренутна вредност 3,04 има тежњу опадања у будућности, па је на следећој слици дата зависност потрошње примарне енергије посматраних референтних зграда за сва три случаја грејања, у зависности од различите вредности коефицијента конверзије електричне у примарну енергију (Слика 9.98). Вредности коефицијента конверзије за даљинско грејање и гас нису мењане и износиле су 2,03 и 1,1, респективно. Нараво, што је коефицијент конверзије електричне у примарну енергију мањи и укупна потрошња примарне енергије ће бити мања. Интересантна је пресечна тачка потрошње примарне енергије за електрично и даљинско грејање. Посматрајући је, закључује се да би потрошња примарне енергије у референтној згради била мања у случају електричног грејања него у случају даљинског грејања, ако би коефицијент конверзије електричне у примарну енергију износио  $< 2,06$ , што је тешко оствариво, без обзира на тенденцију смањивања овог коефицијента. Нису реалне очекивања да његова вредност буде мања од 2.



**Слика 9.98** – Потрошња примарне енергије референтне зграде у зависности од коефицијента конверзије електричне у примарну енергију, за различите примењене системе грејања

Последњих година фотонапонска технологија бележи велики напредак у развоју тако да се у широј употреби све више налазе модули веће ћелијске ефикасности. Тако је посебно битна анализа генерисане и потрошене примарне

енергије за фотонапонске модуле ћелијске ефикасности 14 % и 16 %. Применом ових модула генерише се знатно већа количина електричне енергије у поређењу са модулима ћелијске ефикасности 12 %, па је испитивањима добијен и другачији однос оптималних површина ФН модула и соларних колектора. За ФН модуле ћелијске ефикасности 14 %, добијен је њихов њихов оптимални удео на крову 92,5 % (површина ФН панела 74,6 m<sup>2</sup>, а површина са соларним колекторима 6 m<sup>2</sup>) за сва три система грејања, а за модуле ћелијске ефикасности 16 % њихов оптимални удео је износио 93,13 % (површина ФН панела 75,1 m<sup>2</sup>, а површина са соларним колекторима 5,5 m<sup>2</sup>), такође за све разматране грејне системе. Слика 9.99 приказује генерисану примарну енергију (са и без уграђене енергије) и потрошњу примарне енергије за оптималне вредности удела ФН панела код различитих система грејања, за примену модула ћелијске ефикасности 14 % и 16 %. Приказани подаци се односе на референтну зграду.

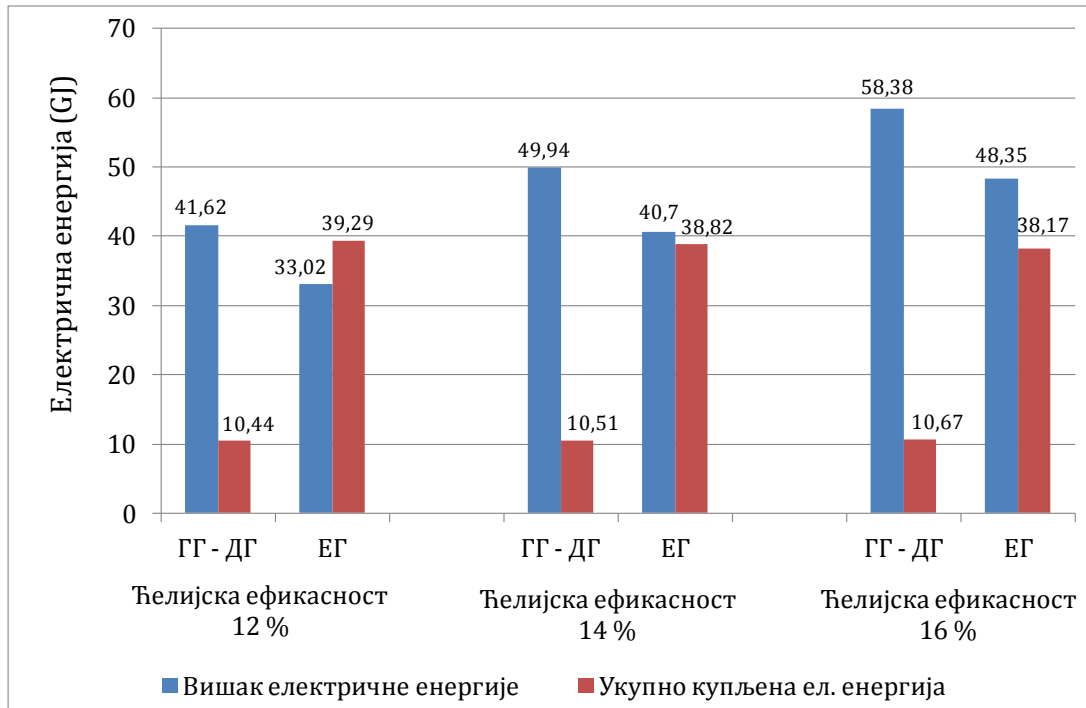


**Слика 9.99** – Потрошња примарне енергије и генерисана примарна енергија референтне зграде (при оптималним вредностима удела ФН панела и различитим системима грејања) за различите ћелијске ефикасности ФН модула

Са горње слике се види да применом фотонапонских модула са ћелијском ефикасношћу од 14 %, зграде са гасним и даљинским грејањем су према оба приступа биле зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB), док је зграда са електричним грејањем била зграда нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према генерисаној примарној енергији, а нето-негативне потрошње енергије (NNEB) према максималној уштеди примарне енергије. Применом фотонапонских модула са ћелијском ефикасношћу од 16 %, све разматране зграде су зграде нето-позитивне потрошње енергије (PNEB) према оба приступа.

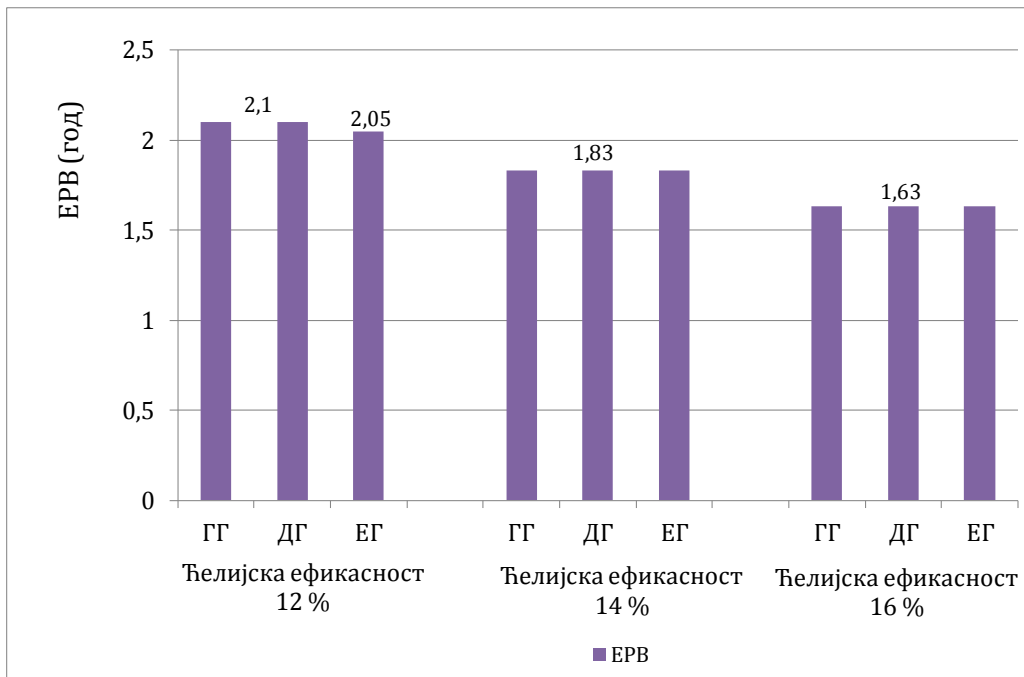
Као што је већ речено, са порастом ћелијске ефикасности ФН модула, расте количина генерисане електричне енергије. Она је у свим случајевима референтне

зграде са даљинским или гасним грејањем, без обзира на ћелијску ефикасност ФН модула, већа од потребне количине електричне енергије, па је нето-купљена електрична енергија негативна. Тако је и у случајевима зграда са електричним системом грејања, и ћелијском ефикасношћу 14 % и 16 %. Све наведене зграде су нето-позитивне потрошње енергије. Једино је за модул ћелијске ефикасности 12 %, генерисана енергија мања од енергетских потреба и она је нето-негативне потрошње енергије. Слика 9.100 даје вишак електричне енергије и укупно купљену електричну енергију за референтну зграду са сва три анализирана система грејања и ФН модулима ћелијске ефикасности од 12 %, 14 % и 16 % (при оптималном односу површина ФН панела и соларних колектора).



**Слика 9.100** – Вишак и купљена електрична енергија референтне зграде (при оптималним вредностима удела ФН панела и различитим системима грејања) за различите ћелијске ефикасности ФН модула

Још један од битних параметара енергетске анализе зграда је свакако енергетско време отплате ЕРВТ (*energy payback-time*) инсталираних соларних система. За анализиране референтне зграде и ћелијску ефикасност модула од 12 %, енергетско време отплате за зграде са даљинским и гасним грејањем је износило 2,1 годину, а за зграду са електричним грејањем, било је незнатно мање и износило је 2,05 год. Уколико би се инсталирали фотонапонски модули ћелијске ефикасности 14%, енергетско време отплате за све анализиране зграде, без обзира на грејни систем, би износило 1,83 год., а за ФН систем ћелијске ефикасности модула од 16 %, ЕРВ би износило 1,63 год. (за све врсте система грејања). Слика 9.101 приказује енергетско време отплате за референтну зграду са сва три анализирана система грејања и ФН модулима ћелијске ефикасности од 12 %, 14 % и 16 % (при оптималном односу површина ФН панела и соларних колектора).

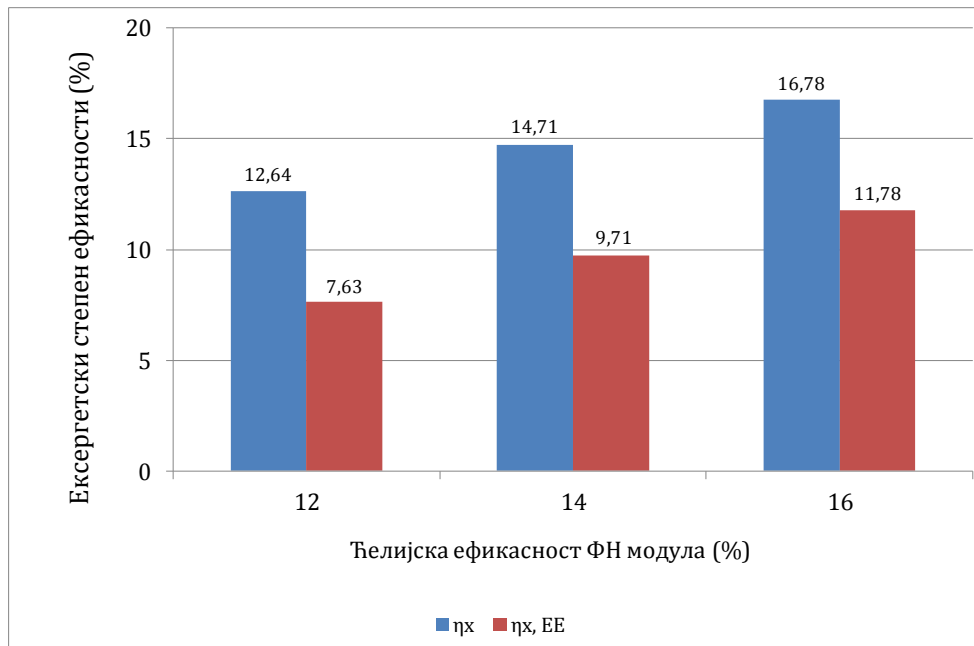


**Слика 9.101** – Енергетско време отплате соларних система референтне зграда (при оптималним вредностима удела ФН панела и различитим системима грејања) за различите ћелијске ефикасности ФН модула

## 9.5.2 Ексергетска анализа

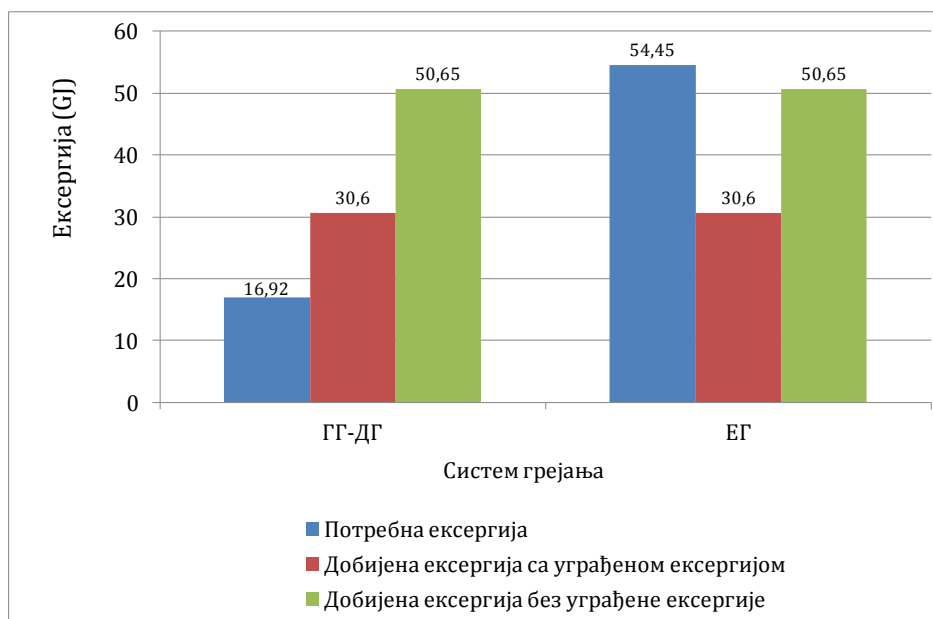
Ексергетска оптимизација (одељак 9.2) је имала за циљ да одреди максимални ексергетски степен ефикасности инсталираних соларних система (са и без уграђене ексергије). Максимални ексергетски степен ефикасности се постиже при одређеном, ексергетски оптималном односу површина фотонапонских панела и соларних колектора. Пошто је ексергетска ефикасност фотонапонских панела много већа од ексергетске ефикасности соларних колектора, то је и удео фотонапонских панела на крову већи. Овај однос површина, тј. удео ФН панела на крову зграда се разликује од оптималног удела површина код енергетске оптимизације. За целокупну ексергетску оптимизацију зграда рађену у овим истраживањима, по свим варираним параметрима добијен је оптимални удео фотонапонских панела 98,75 %, чему одговара површина од 79,6 m<sup>2</sup> панела и само 1m<sup>2</sup> соларних колектора.

За скоро све анализиране случајеве зграда и разне варијабилне параметре (дебљина изолације, потрошња топле воде, потрошња електричне енергије, температура топле воде у систему), без обзира на систем грејања, добијена је вредност ексергетског степена ефикасности  $\eta_x=12,64$  % на годишњем нивоу, док је добијена вредност ексергетског степена ефикасности са уграђеном ексергијом  $\eta_{x,EE}=7,63$  %. Веома мала одступања од ових вредности су била у случају повећања потрошње топле воде и њене температуре у систему ( $\eta_x=12,83$  % и  $\eta_{x,EE}=7,83$  %). Значајније одступање је било у случају примене ФН модула веће ћелијске ефикасности, тако да су за ћелијску ефикасност 14 % вредности ексергетских степена ефикасности износили  $\eta_x=14,71$  % и  $\eta_{x,EE}=9,71$  %. За ФН модуле ћелијске ефикасности 16 %, вредности ексергетских степена ефикасности износили су  $\eta_x=16,78$  % и  $\eta_{x,EE}=11,78$  % (Слика 9.102).



**Слика 9.102** – Ексергетски степени ефикасности у зависности од ћелијске ефикасности ФН панела, за све анализиране системе грејања

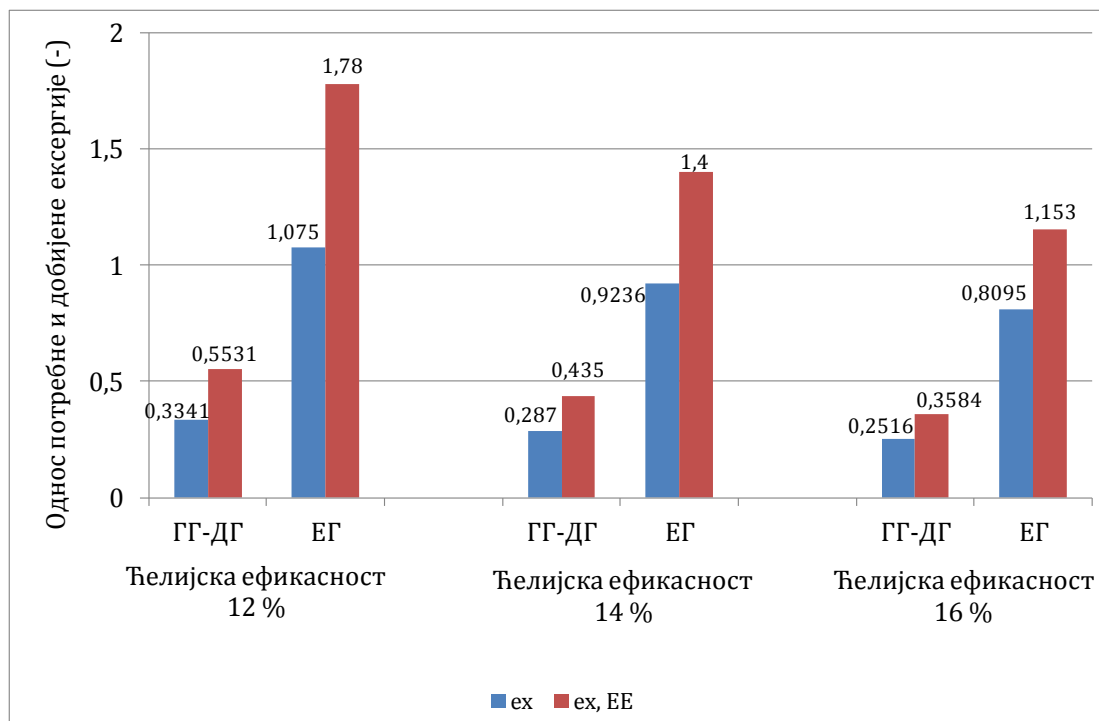
У овим истраживањима је анализирана ексергија која се може добити из инсталираних система, и она је рачуната са и без уграђене ексергије. Потребна ексергија се односи искључиво на потрошњу електричне енергије у разматраној згради. У случају електричног грејања, узет је у обзир део ексергије који се односи на грејање зграде, а у случајевима даљинског и гасног грејања није разматрана додатна ексергија потребна за грејање. Из тог разлога је потребна ексергија зграде са електричним грејањем много већа од потребне ексергије код зграде са другим системима грејања. Слика 9.1037 даје приказ добијене и потребне ексергије референтне зграде за сва три разматрана система грејања.



**Слика 9.103** – Потребна и добијена ексергија референтне зграде, за различите системе грејања

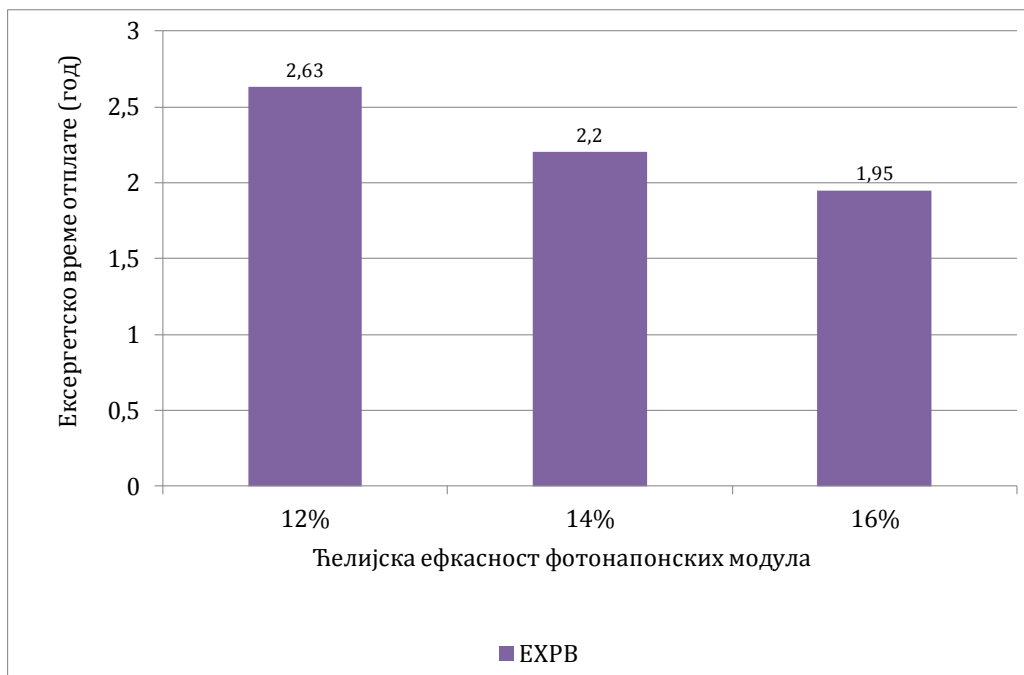
Због различитих вредности потребне ексергије потрошача, однос потребне и добијене ексергије се значајно разликује за анализиране грејне системе. Што је ексергетска ефикасност већа, већа је ексергија добијена из соларних система, па је однос потребне и добијене ексергије мањи. Томе и треба тежити у процесима оптимизације. Однос потребне и добијене ексергије је, као и ексергетски степен ефикасности, рачунат без уграђене ексергије ( $e_x$ ) и са уграђеном ексергијом ( $e_{x,EE}$ ). Због мање вредности потребне ексергије код зграда са даљинским или гасним системом грејања, односи потребне и добијене ексергије ће бити увек  $< 1$ . Наведени ексергетски односи се за анализирани систем грејања нису много мењали варирањем параметара за које је вршена оптимизација (до 5 %). Изузетак је примена фотонапонских панела веће ћелијске ефикасности.

Слика 9.104 даје приказ односа добијене и потребне ексергије референтне зграде за сва три разматрана система грејања и ћелијску ефикасност фотонапонских модула 12 %, 14 % и 16 %. Види се да са порастом ћелијске ефикасности, долази до смањивања односа потребне и добијене ексергије.



**Слика 9.104** – Однос потребне и добијене ексергије референтне зграде, за различите системе грејања и за различиту ћелијску ефикасност ФН модула 12 %

Код ексергетске анализе соларних система, као битан показатељ израчунава се ексергетско време отплате ЕХРВ (*exergy payback-time*). Како у случају ексергетске оптимизације соларни колектори заузимају само 1,25 % површине крова, а фотонапонски панели 98,75 % површине крова, при прорачуну ексергетског времена отплате узет је у обзир само фотонапонски систем. Тако је за референтну зграду са било којим анализираним системом грејања и ћелијском ефикасности фотонапонских модула од 12 %, добијено ексергетско време отплате од 2,63 год. Уколико би се инсталирали фотонапонски модули ћелијске ефикасности 14%, ексергетско време отплате за све анализираним зградама, без обзира на грејни систем, би износило 2,2 год., а за ФН систем ћелијске ефикасности модула од 16 %, ЕХРВ би износило 1,95 година (Слика 9.105).



**Слика 9.105** – Ексергетско време отплате фотонапонских система референтне зграде за различите ћелијске ефикасности ФН модула

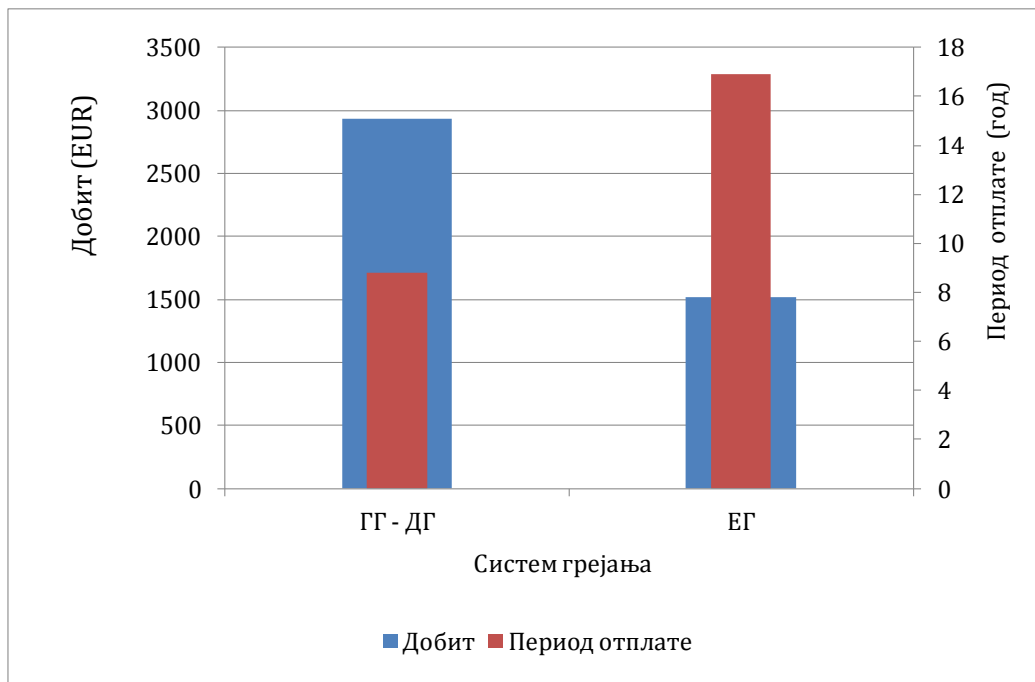
### 9.5.3 Економска анализа

Економска оптимизација је имала за циљ одређивање оптималне вредности површина ФН панела и соларних колектора на крову зграде, при коме би се остварила највећа финансијска добит. Финансијска добит је рачуната преко вишка електричне енергије који се продаје електро-дистрибутивној мрежи по feed-in тарифи (0,2066 EUR/kWh), нето купљене електричне енергије из мреже, која се купује по званичној цени електричне енергије и преко годишњег расхода инсталираних соларних система. Такође је, према годишњој финансијској добити (D), одређен и период отплате (PB).

За све анализиране случајеве зграда са сва три система грејања, добијен је оптимални удео ФН панела на крову 95 %, што одговара површини од 76,6 m<sup>2</sup>, а површина од 4 m<sup>2</sup> је у том сличају прекривена соларним колекторима. Одступање од ових вредности је било за различиту потрошњу топле воде, где је удео ФН панела износио 96,25 %, 95 %, 92,5 % и 91,25 %, за месечну потрошњу топле воде од 8 m<sup>3</sup>, 11,5 m<sup>3</sup>, 19 m<sup>3</sup> и 27 m<sup>3</sup>, респективно. У случају веће потрошње топле воде, оправданије је енергетски грејање воде системом соларних колектора, који је при наведеним случајевима потрошње имао површине 3 m<sup>2</sup>, 4 m<sup>2</sup>, 6 m<sup>2</sup> и 7 m<sup>2</sup>.

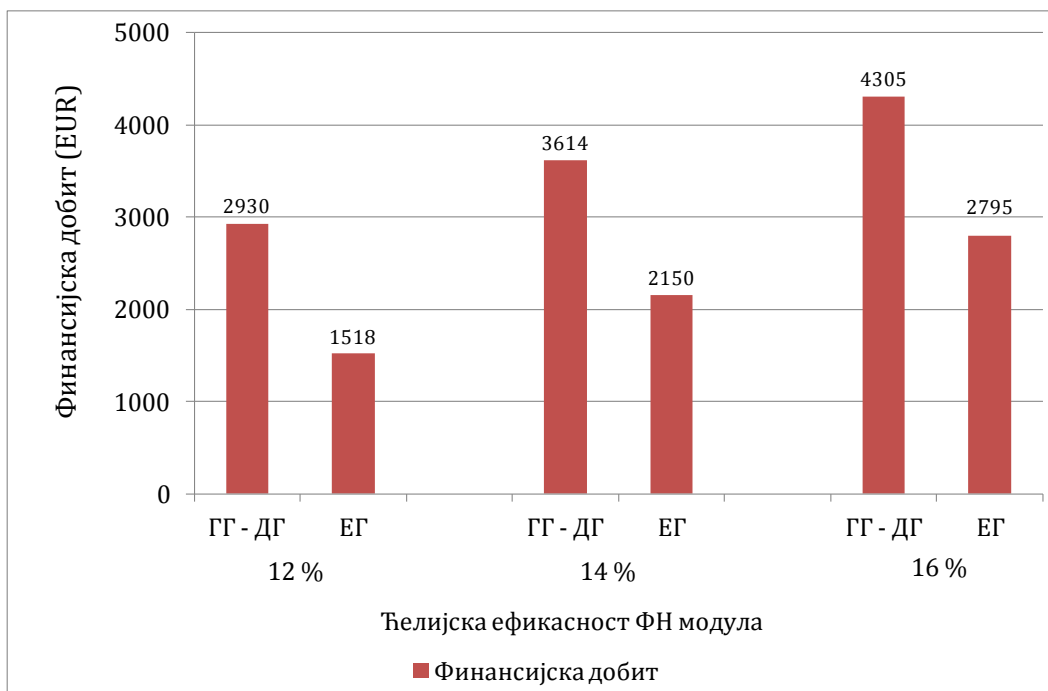
При овом уделу ФН панела, референтна зграда са електричним грејањем има период отплате 16,9 год. и добит 1518 EUR, док је референтна зграда са даљинским или гасним грејањем имала период отплате 8,8 година и добит 2930 EUR.

Слика 9.106 даје графички приказ финансијске добити D и периода отплате PB инвестиција у соларне системе за референтну зграду и различите грејне системе.



Слика 9.106 – Финансијска добит и време отплате соларних система референтне зграде за различите системе грејања

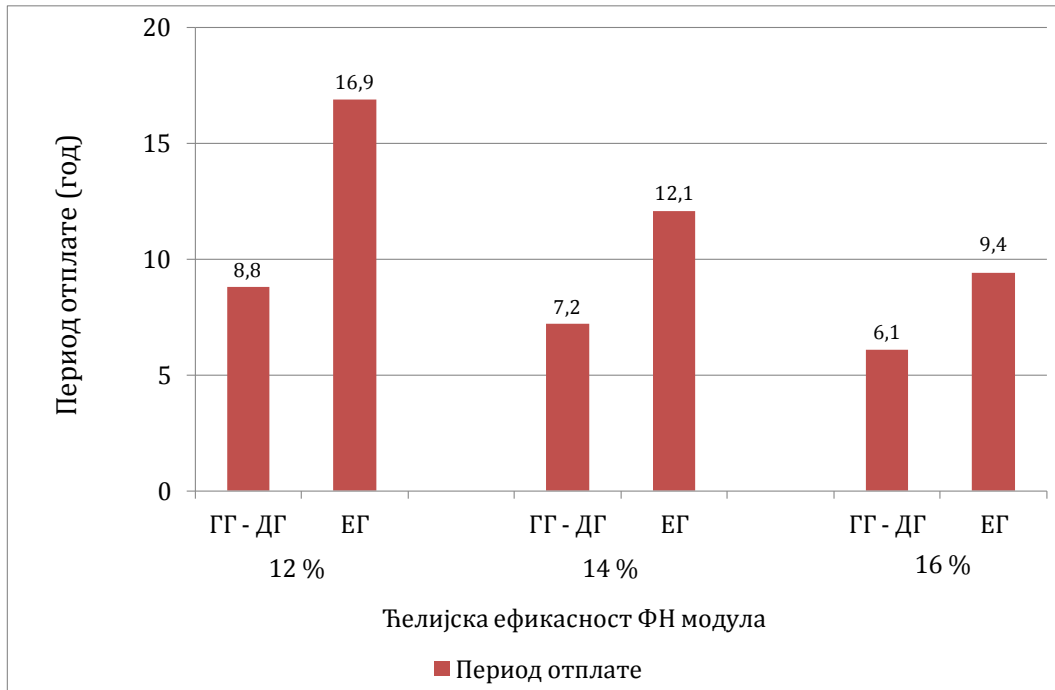
Са порастом ћелијске ефикасности ФН модула, долази до пораста годишње финансијске добити, без обзира о ком се систему грејања ради. Графички приказ добити у зависности од ћелијске ефикасности ФН модула, за анализиране системе грејања, дат је на Слици 9.107. Због веће потрошње електричне енергије у згради са електричним системом грејања, финансијска добит је мања него у случају зграде са даљинским или гасним грејањем.



Слика 9.107 – Финансијска добит соларних система референтне зграде за различите системе грејања и различиту ћелијску ефикасност

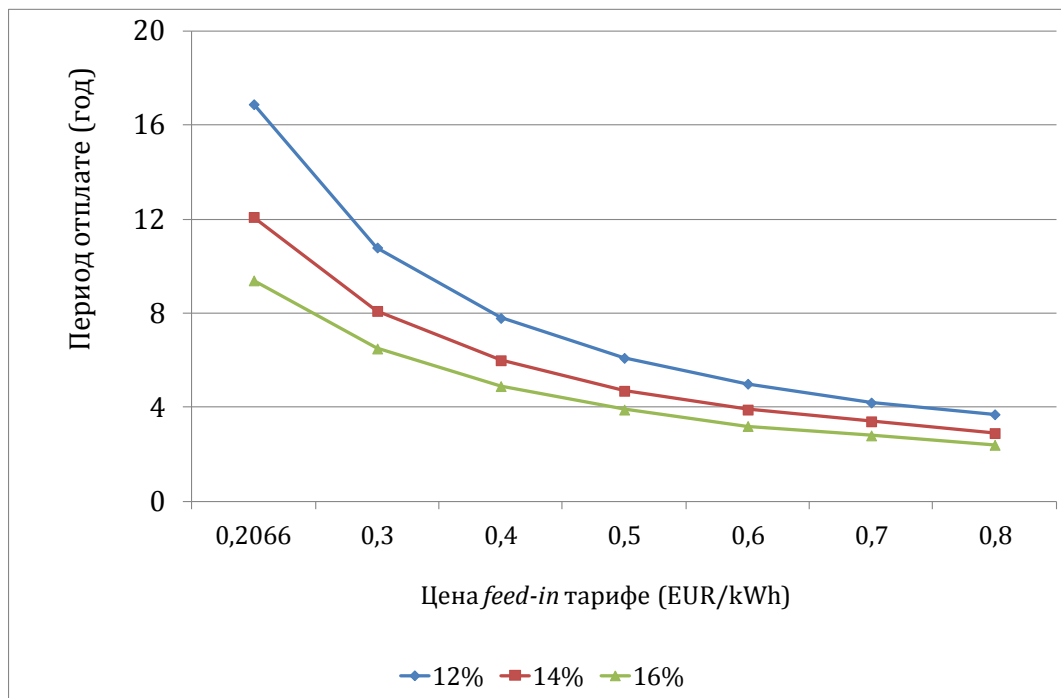


Са порастом финансијске добити, период отплате се смањује. На Слици 9.108 дат је приказ периода отплате инвестиција у соларне системе у зависности од ћелијске ефикасности ФН модула, за анализирание системе грејања.



**Слика 9.108** – Период отплате соларних система референтне зграде за различите системе грејања и различиту ћелијску ефикасност

Са економског аспекта, интересантна је анализа периода отплате соларних система у зависности од *feed-in* тарифе, за зграду са електричним грејањем.



**Слика 9.109** – Период отплате соларних система референтне зграде са електричним грејањем за различиту ћелијску ефикасност ФН система

Ова зграда је изабрана за анализу, јер се њена укупна потрошња финалне енергије односи само на електричну енергију. Слика 9.109 представља период отплате инсталираних соларних система на референтној згради, у зависности од feed-in тарифе.

Према садашњој цени *feed-in* тарифе, највећи период отплате има фотонапонски систем са најмањом ћелијском ефикасношћу (16,9 година). Што је ћелијска ефикасност већа – то је период отплате мањи (за 14 % -  $PB = 12,1$  год, за 16% -  $PB = 9,4$  год). За *feed-in* тарифу од 0,35 EUR/kWh, период отплате је 6 – 10 година, у зависности од ћелијске ефикасности. За *feed-in* тарифу од 0,5 EUR/kWh, период отплате је 4 – 6 година, док за *feed-in* тарифу од 0,7EUR/kWh, период отплате пада на 3-4,5 године.

За побољшање економских перформанси, препорука је постизање концепта нето-позитивне потрошње енергије. Већ је показано у претходним истраживањима, да су зграде са електричним грејањем и ФН модулима ћелијске ефикасности 14 % и 16 % биле зграде нето-позитивне потрошње енергије. Њихова генерисана енергија је била већа од сопствених енергетских потреба. Имајући у виду тренутно стање на домаћем енергетском тржишту, feed-in тарифа у Србији не обећава много за убрзану имплементацију ФН технологија. Међутим, то лако може бити и промењено у будућности, обзиром на убрзан развој и све нижу цену фотонапонских модула.

## 10. ЗАКЉУЧАК

---

Основни циљ ове докторске дисертације био је да се применом нумеричких метода најпре дефинишу енергетске потребе зграде а затим и утврде утицаји инсталираних соларних система - фотонапонских панела и соларних колектора на максималну могућу количину генерисане енергије и ексергије, максималну уштеду примарне енергије, максималну економску добит и минимално загађење животне средине. Да би се све наведено остварило, неопходно је дефинисати оптималан однос површина система фотонапонских панела и соларних колектора који су инсталирани на крову зграде. На овај начин могуће је достизање концепта куће са нето-нултом потрошњом енергије, а корак даље је, наравно и постизање концепта куће са нето-позитивном потрошњом енергије. Основни концепт на коме се заснива истраживање је да кућа сама производи енергију из обновљивих извора енергије којом делимично или потпуно задовољава своје енергетске потребе.

У том смислу, развијен је математички модел и алгоритам за динамичку симулацију и оптимизацију рада соларних система инсталираних на крову анализиране зграде. Нумеричка истраживања су спроведена помоћу програма *EnergyPlus* који веома добро симулира енергетско понашање зграде и свих инсталираних система, узимајући при томе у обзир све реалне утицаје. Софтверски пакет *EnergyPlus* је већ дужи низ година добро познат научној јавности као моћан алат за симулацију зграда. Затим је вршена енергетска, ексергетска и економска оптимизација помоћу софтвера GenOpt. На почетку је дефинисан референтни модел зграде који је имао реалне параметре конструкције и реалну потрошњу електричне енергије и топле воде која одговара просечној четворочлавној породици у Србији. Разматрана је зграда са три тренутно најзаступљенија система грејања у Србији: систем електричног грејања, систем даљинског грејања и систем грејања помоћу котла на природни гас.

У одељцима 9.1.1 и 9.1.2 урађена је енергетска анализа и енергетска оптимизација зграде са разматраним системима грејања. Енергетским оптимизацијама је одређен оптимални однос површина ФН панела и соларних колектора при којима се остварује максимална уштеда примарне енергије (са урачунатом уграђеном енергијом соларних система и изолације зграде). Потрошња примарне енергије је најмања за зграду са системом гасног грејања, а највећа за зграду са системом електричног грејања. У поређењу са системом гасног грејања, потрошња примарне енергије у згради са даљинским грејањем је већа за 26,7 %. У случају

зграде са електричним грејањем, потрошња примарне енергије је већа за 54 %. Са аспекта потрошње примарне енергије, најбоље решење свакако представља зграда са уграђеним системом гасног грејања.

Нумеричким симулацијама је показано да је са инсталирањем соларних система на крову зграде, могуће остварити концепт зграде нето-позитивне потрошње енергије нарочито када су у питању зграде са мањом потрошњом примарне енергије. То су зграде са гасним грејањем, које су скоро у свим случајевима биле нето-позитивне потрошње енергије.

За зграде са електричним грејањем, оптимални удео ФН панела на крову је износио углавном 91,25 %, за све вариране параметре симулација, што значи да је површина инсталираних ФН панела 73,6 m<sup>2</sup>, а површина са постављеним колекторима 7 m<sup>2</sup>. За зграде са даљинским, тј. гасним грејањем, оптимални удео ФН панела на крову је износио око 91,88 %, што одговара површини инсталираних ФН панела од 74,1 m<sup>2</sup> и површини соларних колектора од 6,5 m<sup>2</sup>. Изузетак су случајеви симулација где се повећавала потрошња топле воде, па је и потребан удео колектора био до 5 % већи. Зграда са гасним системом грејања је PNEB према оба приступа, док је зграда са електричним системом грејања према оба приступа NNEB нето-негативне потрошње енергије.

Посебно су разматрани ФН модули веће хелијске ефикасности и примена ових модула показала је другачији однос оптималних површина. За ФН модуле хелијске ефикасности 14 %, добијен је њихов њихов оптимални удео на крову 92,5 % (површина ФН панела 74,6 m<sup>2</sup>, површина са соларним колекторима 6 m<sup>2</sup>), а за модуле хелијске ефикасности 16 % њихов оптимални удео је износио 93,13 % (површина ФН панела 75,1 m<sup>2</sup>, површина са соларним колекторима 5,5 m<sup>2</sup>), за сва три система грејања. Применом ФН модула са већом хелијском ефикасношћу, лакше се достигао концепт нето-позитивне потрошње енергије код свих анализираних зграда.

За анализирани референтне зграде и хелијску ефикасност модула од 12 %, енергетско време отплате за све разматране зграде износи око 2 године. Уколико би се инсталирали ФН модули хелијске ефикасности 14%, енергетско време отплате за све анализирани зграде износило би 1,83 год., а за ФН систем хелијске ефикасности модула од 16 %, ЕРВ би износило 1,63 год., без обзира на грејни систем.

Ексергетска оптимизација (одељак 9.2) је имала за циљ да одреди максимални ексергетски степен ефикасности инсталираних соларних система. За целокупну ексергетску оптимизацију зграда по свим верираним параметрима, добијен је оптимални удео фотонапонских панела 98,75 %, чему одговара површина од 79,6 m<sup>2</sup> панела и само 1m<sup>2</sup> соларних колектора.

За скоро све анализирани случајеве зграда и разне варијабилне параметре, без обзира на систем грејања, добијена је вредност ексергетског степена ефикасности  $\eta_x=12,64$  % на годишњем нивоу, док је добијена вредност ексергетског степена ефикасности са уграђеном ексергијом  $\eta_{x,EE}=7,63$  %. Веома мала одступања су била у случају повећања потрошње топле воде и њене температуре у систему. Значајније одступање је било у случају примене ФН модула веће хелијске ефикасности, тако да су за хелијску ефикасност 14 % вредности ексергетских степена ефикасности износили  $\eta_x=14,71$  % и  $\eta_{x,EE}=9,71$  %, а за ФН модуле хелијске ефикасности 16 %, вредности ексергетских степена ефикасности износили су  $\eta_x=16,78$  % и  $\eta_{x,EE}=11,78$  %. Разлог је у већим количинама генерисане електричне енергије преко ФН система. Потребна ексергија зграде са електричним грејањем је много већа од потребне

ексергије код зграде са другим системима грејања, због веће потрошње електричне енергије. Односи потребне и добијене ексергије се нису много мењали варирањем параметара за које је вршена оптимизација (до 5 %). Изузетак је и овде примена фотонапонских панела веће ћелијске ефикасности.

За референтну зграду са било којим системом грејања и ћелијском ефикасношћу ФН модула од 12 %, добијено ексергетско време отплате је 2,63 год., за модуле ћелијске ефикасности 14 % ексергетско време отплате износи 2,2 год., а за ФН систем ћелијске ефикасности модула од 16 %, ЕХРВ износи 1,95 год.

Економска оптимизација (одељак 9.3) је имала за циљ одређивање оптималне вредности површина ФН панела и соларних колектора на крову зграде, при коме би се остварила највећа финансијска добит. Према годишњој финансијској добити одређен је период отплате инвестиција инсталираних соларних система. За све анализиране случајеве зграда са сва три система грејања, добијен је оптимални удео ФН панела на крову 95 %, што одговара површини од 76,6 m<sup>2</sup>, а површина соларних колектора је 4 m<sup>2</sup>. При овом уделу ФН панела, референтна зграда са електричним грејањем има период отплате 16,9 год. и добит 1518 EUR, док је референтна зграда са даљинским или гасним грејањем имала период отплате 8,8 година и добит 2930 EUR. Мало одступање од ових вредности је било за различиту потрошњу топле воде. Са порастом ћелијске ефикасности ФН модула, долази до пораста годишње финансијске добити, без обзира о ком се систему грејања ради, док се период отплате смањује (за зграде са електричним грејањем од 16,9 год. до 9,4 год., а за зграде са даљинским тј. гасним грејањем од 8,8 год до 6,1 год.).

Еколошка анализа (одељак 9.4) је показала утицај инсталираних соларних система на животну средину, као и емисионо време отплате ових система, за најповољнија добијена решења енергетске, ексергетске и економске оптимизације. Велика предност коришћења соларне енергије је управо у веома малом степену загађења животне средине, па се ФН технологија сматра једном од најчистијих обновљивих технологија. Емисионо време отплате се значајно смањује са повећањем удела ФН панела на површини крова, као и са повећањем ћелијске ефикасности ФН модула. ЕМРВ је износило између 1,04 године и 2,8 година, при чему се већа вредност ЕМВР односи на зграду са електричним грејањем.

Генерални закључак је да се одговарајућим односом површина фотонапонских панела и соларних колектора може постићи велика уштеда у укупној потрошњи енергије у згради, без обзира о ком систему грејања се ради. Такође се може остварити и извесна финансијска добит. Применом соларних система у великој мери се смањује утицај највећег загађивача - угљен-диоксида на животну средину. Могуће је и достизање концепта зграда нето-позитивне потрошње енергије, нарочито ако се примене ФН модули веће ћелијске ефикасности.

Што се тиче смерница за даља истраживања – то је свакако примена нискотемпературних система грејања и додатних обновљивих технологија (нпр. геотермалних пумпи) чиме би се потрошња примарне енергије свела на још мању меру.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 30, 2004, 231–295
- [2] T. M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, *Solar energy* 85, 2011, 1580–1608
- [3] A. Zervos, C. Kjaer: Pure Power–Wind Energy Scenarios up to 2030, EWEA (European Wind Energy Association), March 2008.
- [4] Министарство за инфраструктуру и енергетику, Енергија и клима у Србији – Изазови и могућности, Београд, 2012.
- [5] З. Живковић, Предлог мера за финансирање енергетске ефикасности у зградарству у Србији, Грађевинска књига, Нови Сад, 2011.
- [6] <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>, (март 2015.).
- [7] Sayigh AAW. Renewable energy: global progress and examples. *Renewable Energy* 2001, WREN 2001; 15–17.
- [8] D.Suna, R Haas., A. L Polo., Analysis of PV system’s values beyond energy - by Country and Stakeholder, International Energy Agency - Photovoltaic Power system programme - Report IEA-PVPS T10-02:2008, Institute of Power Systems and Energy Economics, Energy Economics Group - EEG, Vienna, Austria, March 2008
- [9] S. Podolinsky, Socialism and the unity of physical forces, *Organization & Environment* 17 (1), 2004, 61-75
- [10] P. Hernandez, P. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB), *Energy and Buildings* 42, 2010, 815-821
- [11] H.T. Odum, Energy, Ecology, and Economics, *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 2 (6), 1973, 220–227
- [12] C. Cleveland, R. Costanza, Net energy analysis, in: *Encyclopedia of Earth, Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment*, Washington [http://www.eoearth.org/article/Net\\_energy\\_analysis](http://www.eoearth.org/article/Net_energy_analysis), март 2013.
- [13] B. Hannon, et al., Energy and labor in the construction sector, *Science* 202 (4370), 1978, 837–847.
- [14] Natural Resources Canada, R-2000 Standard, 2005
- [15] Passive House Institute, [www.passiv.de](http://www.passiv.de)

- [16] A. Robert, M. Kummert, Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past, *Building and Environment* 55, 2012, p. 150–158.
- [17] A. J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano, Zero energy building – a review of definitions and calculation methodologies, *Energy and Buildings* 43, 2011, 971–979.
- [18] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru, Zero energy buildings: a critical look at the definition, <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>
- [19] M. Kapsalaki, V. Leal, M. Santamouris, A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings, *Energy and Buildings* 55, 2012, p. 765 - 778.
- [20] M. Bojić, N. Nikolić, D. Nikolić, J. Skerlić, I. Miletić, Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 7, 2011, p. 2407-2419.
- [21] Н. Лукић, М. Бабић, Соларна енергија, Машински факултет у Крагујевцу, Центар за РЕЕ, Крагујевац, 2008.
- [22] <http://www.populationdata.net/>. (март 2015.)
- [23] <http://www.kgh.kvartetv.com/fajlovi/3-2007/Todorovic.pdf>
- [24] B. Parida, S. Iniyar, Ranko Goic, A review of solar photovoltaic technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1625–1636
- [25] M. A. Green, J. Zhao, A. Wang, S. R. Wenhan, Progress and outlook for high efficiency crystalline silicon solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 65, 2001, 9–16
- [26] C. Becker, T. Sontheimer, S. Steffens, S. Scherf, B. Rech, Polycrystalline silicon thin-films by high-rate electron beam evaporation for photovoltaic applications — influence of substrate texture and temperature, *EnergyProcedia* 10, 2011.
- [27] V.V. Tyagi, A.A. Nurul, N. A. Rahim, A. Jeyraj, L. Selvaraj, Progress in solar PV technology: Research and achievement, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20, 2013, 443-461
- [28] Fundamentals of PV material, (1998), [/userwww.sfsu.edu/\\_ciotola/solar/pv.pdfS](/userwww.sfsu.edu/_ciotola/solar/pv.pdfS)
- [29] L.El Chaar, L. A.Lamont, N. El Zein., Review of photovoltaic technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2011, pp. 2165-2175
- [30] Md K. Nazeeruddin, E. Baranoff, M. Gratzel, Dye-sensitized solar cells: a brief overview, *Solar Energy* 85, 2011, 1172–1178
- [31] E. Serrano, G. Rus, J. Garcia-Martinez, Nanotechnology for sustainable energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 2009, 2372-2384
- [32] <http://www.solarbuzz.com/> (децембар 2014.)
- [33] P. Norton, C. Christensen, A cold-climate case study for affordable zero energy homes. In: Solar 2006 conference, Denver, Colorado; July 9–13, 2006
- [34] S. Citherlet, T.Defaux, Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span, *Building and Environment* 42, 2007, 591–8
- [35] A.K. Athienitis, Design of a solar home with BIPV-thermal system and ground source heat pump. In: 2nd Canadian solar buildings conference. Calgary; 2007.

- 
- [36] A. Chel, G. N. Tiwari, Thermal performance and embodied energy analysis of a passive house – case study of vault roof mud-house in India, *Applied Energy* 86, 2009, 1956-69
- [37] J. Llovera, X. Potau, M. Medrano, L.Cabeza, Design and performance of energy-efficient solar residential house in Andorra, *Applied Energy*, 2010, doi:10.1016/j.apenergy.2010.10.015
- [38] N. Aste, R. Adhikari, M. Buzzetti, Beyond the EPBD: the low energy residential settlement Borgo Solare, *Applied Energy* 87 (2), 2010, 629–42
- [39] H.Janne, K. Genku, S. Cao, H. Ala, S. Kai, Renewable energy production support schemes for residential-scale solar photovoltaic systems in Nordic conditions, *Energy Policy* 79, 2015, 72-86
- [40] L. Yang, B. He, M. Ye, The application of solar technologies in building energy efficiency: BISE design in solar-powered residential buildings, *Technology in Society* 38, 2014, 111-118
- [41] J. Eshraghi, N. Narjabadifam, N. Mirkhani, S. Sadoughi Khosroshahi, M. Ashjaee, A comprehensive feasibility study of applying solar energy to design a zero energy building for a typical home in Tehran, *Energy and Buildings* 72, 2014, 329-339
- [42] A. Palzer, H. M. Henning, A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies—Part I: Methodology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30, 2014, 1003-1018
- [43] A. Palzer, H. M. Henning, A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies—Part II: The Results, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30, 2014, 1019-1034
- [44] M. Leckner, R. Zmeureanu, Life cycle cost and energy analysis of a Net Zero Energy House with solar combisystem, *Applied Energy* 88 (1), 2011, 232-241
- [45] L. Zhang, O. Gudmundsson, J. E. Thorsen, H. Li, S. Svendsen, Technical Comparison of Domestic Hot Water System Which Used in China and Denmark, *Energy Procedia* 61, 2014, 2509-2513
- [46] J.K. Kaldellis, K. El-Samani, P. Koronakis, Feasibility analysis of domestic solar water heating systems in Greece *Renewable Energy* 30 (5), 2005, 659-682
- [47] M.C. Rodríguez-Hidalgo, P.A. Rodríguez-Aumente, A. Lecuona, M. Legrand, R. Ventas, *Domestic hot water consumption vs solar thermal energy storage: The optimum size of the storage tank*, *Applied Energy* 97, 2012, 897-906
- [48] G. Comodi, M. Bevilacqua, F. Caresana, L. Pelagalli, P. Venella, C. Paciarotti, LCA Analysis of Renewable Domestic Hot Water Systems with Unglazed and Glazed Solar Thermal Panels, *Energy Procedia* 61, 2014, 234-237
- [49] R. O’Hegarty, O. Kinnane, S. McCormack A Simplified Procedure for Sizing Solar Thermal Systems; Based on National Assessment Methods in the UK and Ireland, *Energy Procedia* 62, 2014, 647-655
- [50] S. R. Asaee, V. I. Ugursal, I. B. Morrison, N. Ben-Abdallah, Preliminary study for solar combisystem in Canadian houses, *Applied Energy* 130, 2014, 510-518
-



- 
- [51] A.L.Biaou, M.A.Bernier. Achieving total domestic hot water production with renewable energy, *Building and Environmental* 43, 2008, 651–60
- [52] M. Leckner, R. Zmeureanu, Life cycle cost and energy analysis of a Net Zero Energy House with solar combisystem, *Applied Energy* 88, 2011, 232–41
- [53] Y. Hamada, M. Nakamura, K. Ochifuji, Nagano K, S. Yokoyama, Field performance on a Japanese low energy home relaying on renewable energy, *Energy and Building* 33. 2001, 805–14
- [54] A. Gallo, B. T. Molina, M. Prodanovic, J. G. Aguilar, M. Romero, Analysis of Net Zero-energy Building in Spain: Integration of PV Solar domestic Hot Water and Air-conditioning Systems, *Energy Procedia* 48, 2014, 828-836
- [55] Immobilier Bouygues. Bouygues Immobilier launches first large positive-energy building. The Green Office project in Meudon; 25 October, 2007.  
[http://www.bouygues-immobilier.com/jahia/Jahia/lang/en/aboutus/espace\\_de\\_presse/pid/2407](http://www.bouygues-immobilier.com/jahia/Jahia/lang/en/aboutus/espace_de_presse/pid/2407)
- [56] C. Trotter, Positive energy building in Masdar, Abu Dhabi. 03/06/08,  
<http://inhabitat.com/2008/03/06/world's-first-positive-energy-building-planned-for-masdar/retrived>
- [57] L. Gustavsson, A. Joelsson, R. Sathre, Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building, *Energy and Buildings* 42, 2010, 230–242
- [58] S. Sanaye, M.A. Meybodi, M. Chahartaghi, Modeling economic analysis of gas engine heat pumps for residential and commercial buildings in various climate regions of Iran, *Energy and Buildings* 42, 2010, 1129–1138
- [59] K. Kroetz, A. Friedland, Comparing costs and emissions of northern New England space heating fuel options, *Biomass and bioenergy* 32, 2008, 1359–1366
- [60] M. Tolga Balta, I. Dincer, A. Hepbasli, Performance and sustainability assessment of energy options for building HVAC applications, *Energy and Buildings* 42, 2010, 1320–1328
- [61] V. Shah, D. Col Debella, R. Ries, Life cycle assessment of residential heating and cooling systems in four regions in the United States, *Energy and Buildings* 40, 2008, 503–513
- [62] D. Jenkins, R. Tucker, M. Ahadzi, R. Rawlings, The performance of air-source heat pumps in current and future offices, *Energy and Buildings* 40, 2008, 1901–1910
- [63] M. Thyholt, A.G. Hestnes, Heat supply to low-energy buildings in district heating areas analyses of CO<sub>2</sub> emissions and electricity supply security, *Energy and Buildings* 40, 2008, 131–139
- [64] A.M. Papadopoulos, S. Oxizidis, G. Papanditsas, Energy, economic and environmental performance of heating systems in Greek buildings, *Energy and Buildings* 40, 2008, 224–230.
- [65] M. Bojić, S. Djordjević, J. Malesević, D. Cvetković, M. Miletić, A simulation appraisal of a switch of district to electric heating due to increased heat efficiency in an office building, *Energy and Buildings* 50, 2012, 324-330

- 
- [66] 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
- [67] Anonymous, ENERGYPLUS, Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, University of Illinois & Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009
- [68] Lawrence Berkeley National Laboratory. EnergyPlus - Engineering documentation: the reference to EnergyPlus calculations. University of Illinois & Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001
- [69] R.H. Henninger, M.J. Witte, D.B. Crawley, Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100-E200 test suite, *Energy and Buildings* 36 (8), 2004, 855–863
- [70] M. Bojić, J. Skerlić, D. Nikolić, D. Cvetković, M. Miletić, Toward future: positive net - energy buildings, 4<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources, EXPRES 2012, March 9-10, 2012., Subotica, Serbia, Proceedings, 49-54
- [71] M. Wetter, GenOpt, Generic Optimization Program. User Manual, Lawrence Berkeley National Laboratory, Technical Report LBNL- 54199, 2004.
- [72] C. Audet, J.E. Dennis Jr., Analysis of generalized pattern searches, *SIAM Journal on Optimization* 13 (3), 2003, 889–903
- [73] M. Wetter, E. Polak, Building design optimization using a convergent pattern search algorithm with adaptive precision simulations, *Energy and Buildings*, 37, 2005, 603–612
- [74] R. Hooke, T.A. Jeeves, Direct search solution of numerical and statistical problems, *Journal of the Association for Computing Machinery* 8, 1961, 212–229
- [75] Solar Rating and Certification Corporation. 2004. Directory of SRCC Certified Solar Collector Ratings, [http://edge.rit.edu/edge/Resources/public/SRCCDocuments/OG100DIRFULL\\_20061115.pdf](http://edge.rit.edu/edge/Resources/public/SRCCDocuments/OG100DIRFULL_20061115.pdf)
- [76] J. Skerlić, M. Bojić, Optimizing performances of solar collectors by using EnergyPlus and Hooke Jeeves algorithm, 41<sup>th</sup> International HVAC&R conference, December 1-3. 2010., Belgrade, Serbia, Conference proceedings, 472-479
- [77] <http://www.etazgrejanje.com/katalog/elektricni-grejac-za-radijator-mek/>
- [78] E. A. Alsema, Energy pay-back time and CO<sub>2</sub> emissions of PV systems, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 8(1), 2000, 17–25
- [79] E. A. Alsema, Energy pay-back time of photovoltaic energy systems: present status and prospect, <http://www.econologie.info/share/partager2/1266076754HnbtJP.pdf>
- [80] E. A. Alsema, E. Nieuwlaar, Energy viability of photovoltaic systems, *Energy Policy*, 28 (14), 2000, 999–1010
- [81] J Sanchez, PV Energy Payback, [www.homepower.com](http://www.homepower.com)
- [82] C. Bankier, S. Gale, Energy Payback of Roof Mounted Photovoltaic Cells, *Energy Bulletin*, 2006
-

- [83] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, V. Lo Brano, Life cycle assessment of a solar thermal collector, *Renewable Energy* 30, 2005, 1031– 1054
- [84] Centre for Alternative Technology, <http://info.cat.org.uk>
- [85] E. Colombo M. V. Rocco, C. Toro, E. Sciubba, An exergy-based approach to the joint economic and environmental impact assessment of possible photovoltaic scenarios: A case study at a regional level in Italy,
- [86] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, V. Lo Brano, Life cycle assessment of a solar thermal collector, *Renewable Energy* 30, 2005, 1031– 1054
- [87] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, V. Lo Brano, Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances, *Renewable Energy* 30, 2005, p. 109–130
- [88] S. Kalogirou, Environmental benefits of domestic solar energy systems, *Energy Conversion and Management* 45, 2004, 3075–3092
- [89] R. Battisti, A. Corrado, Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage, *Journal of Cleaner Production* 13, 2005, p. 1295-1300
- [90] T. Pavlović, D. Milosavljević, I. Radonjić, L. Pantić, A. Radivojević, M. Pavlović, Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20, 2013, 201–218
- [91] L.F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez, A. Castell, Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, 2014, 394–416
- [92] M. Bojić, N. Nikolić, D. Nikolić, J. Skerlić, I. Miletić, A simulation appraisal of performance of different hvac systems in an office building, *Energy and Buildings*, Volume 43 - Issue 6, 2011, 2407-2419
- [93] M. Banjac, Osnove energetskog bilansiranja zgrade, <http://www.ingkomora.org.rs/>
- [94] Уредба о мерама подстицаја за повлашћене произвођаче електричне енергије, Службени гласник РС 57/11, 80/11, 93/12 и 124/12
- [95] [http://www.eps.rs/SiteAssets/Lists/Sitemap/EditForm/20130708\\_EPS%20Snabdevanje.pdf](http://www.eps.rs/SiteAssets/Lists/Sitemap/EditForm/20130708_EPS%20Snabdevanje.pdf)
- [96] <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56487.pdf>
- [97] <http://www.edfenergy.com/energyfuture/energy-gap-climate-change>
- [98] Правилник о уловима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда, Службени гласник Р. Србије, бр 61/11
- [99] Building Energy Rating (BER), <http://www.winterspm.com/>