

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

Милисав Р. Продановић

**Анализа примене фотонапонског система за
производњу електричне енергије неопходне
за рад електричних уређаја и осветљења у
оквиру једног студентског дома**

Завршни рад

Крагујевац, 2019.

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Грејање, климатизација и соларна енергија

Број индекса: 28/2016

Милисав Р. Продановић

**Анализа примене фотонапонског система за
производњу електричне енергије неопходне
за рад електричних уређаја и осветљења у
оквиру једног студентског дома**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Новак Николић - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат ће извршити процену енергетских и економских перформанси примене фотонапонског (ФН) система у оквиру студентског дома у граду Крагујевцу коришћењем софтвера за симулацију енергетског понашања зграда. За одабрани студентски дом, ФН систем ће бити димензионисан према следећим захтевима: да обезбеди подмиривање основне потрошње електричне енергије електричних уређаја (Случај 1) и подмиривање целокупне потрошње електричне енергије за рад осветљења (Случај 2). Симулације за реалне временске податке за град Крагујевац ће обухватити детаљне годишње распореде рада осветљења, електричних уређаја и годишње шаблоне присуства људи.

Препоручена литература:

[1] Н. Лукић, М. Бабић, Соларна енергија, Машински факултет у Крагујевцу, Центар за РГЕ, Крагујевац, 2008.

Крагујевац, 2019.

Ментор:

Др Новак Николић, доцент

Садржај

1. Увод	4
2. Сунце.....	5
2.1 Сунчево зрачење	7
2.2 Инсолација	7
3. Електрична енергија	8
4. Примена соларних система	10
4.1 Пасивни соларни системи.....	10
4.2 Активни соларни системи.....	12
5. Фотонапонске ћелије	14
6. Предности и недостаци фотонапонских система	18
6.1 Предности.....	18
6.2 Недостаци.....	19
6.2.1 Проблем „duck curve“	20
7. Коришћени софтвери	21
7.1 Google SketchUp	21
7.2 EnergyPlus.....	22
8. Фотонапонски систем.....	23
8.1 Карактеристике фотонапонског панела	24
8.2 Инвертор фотонапонског система и додатна опрема	25
9. Опис објекта	26
10. Потрошња електричне енергије у оквиру студентског дома.....	29
11. Производња електричне енергије у оквиру студентског дома	32
12. Анализа исплативости уградње фотонапонског модула.....	37
Закључак	44
Литература.....	45

Abstract

In this paper the possibility of implementation of photovoltaic system that would meet the electricity requirements necessary for the operation of electrical appliances of a student dormitory in the territory of the city of Kragujevac was investigated. The energy-economic analysis, conducted by using software for simulation of the building energy behavior, involves three cases: Case 1 - covering of the basic electricity consumption of the electrical appliances; Case 2 - provision of total lighting electricity consumption and Case 3 - covering the basic consumption of appliances and total lighting consumption. Economic analysis includes determination of the return on investment with and without neglecting the impact of PV module efficiency reduction during their period of operation. Among other things, the number of PV modules was determined in case the student dormitory would be surrounded by other buildings (Case 4). The obtained values for return on investment parameter have the following values: 6.12 (6.46) (Case 1); 7.12 (7.52) (Case 2); 6.08 (6.42) (Case 3) and 5.75 (6.06) (Case 4). These values would be significantly lower with government incentives either through subsidized equipment purchases or subsidized sale of produced electricity.

Keywords: Residential building; photovoltaic system; EnergyPlus; simulation.

Резиме

У овом раду истражена је могућност примене фотонапонског система за подмиривање потреба за електричном енергијом неопходном за рад електричних уређаја једног студентског дома на територији града Крагујевца. Енергетско-економска анализа, спроведена коришћењем софтвера за симулацију енергетског понашања зграда, обухвата три случаја: Случај 1 - подмиривање потреба основне потрошње електричне енергије уређаја; Случај 2 - обезбеђивање свеукупне потрошње електричне енергије осветљења и Случај 3 - покривање збирне основне потрошње уређаја и укупне потрошње осветљења. Економска анализа је подразумевала одређивање периода повраћаја инвестиција са и без занемаривања утицаја смањења ефикасности модула током периода њиховог рада. Између осталог одређен је и број фотонапонских модула за случај када би студентски дом био окружен другим објектима (Случај 4). Добијене вредности периода отплате су: 6,12 (6,46) (Случај 1); 7,12 (7,52) (Случај 2); 6,08 (6,42) (Случај 3) и 5,75 (6,06) (Случај 4) година. Ове вредности би биле значајно ниже уз подстицаје државе било кроз субвенционисану куповину опреме или субвенционисану продају произведене електричне енергије.

Кључне речи: Стамбена зграда; фотонапонски систем; EnergyPlus; симулација.

1. Увод

Како би преживели људима није потребна електрична енергија, али како се свет развија све више зависе од ње, јер су на неки начин заборавили живот без ње. Производња електричне енергије представља све већи проблем, првенствено у погледу глобалног загревања и емисије штетних материја у околину. Тренутно водећи видови производње овог облика енергије доводе до значајног повећања концентрације угљен-диоксида у природи, који као најутицајнија компонента гасова стаклене баште неминовно доводи до повећања Земљине температуре, што итекако ремети климатску равнотежу.

У циљу спречавања, тј. смањења ових утицаја тежи се све већој примени обновљивих извора енергије за које је познато да поседују мањи утицај на планету у поређењу са применом фосилних горива. Адекватан корак у решавању проблема превелике употребе фосилних горива јесте сазнање о томе да су Уједињене Нације у Копенхагену потписале сопствени климатски споразум, унутар којег се чланице обавезују да смање емисије и да повећају примену обновљивих извора енергије и енергетску ефикасност.

Сунце, као наша најближа Звезда, представља извор од кога потичу готово сви облици енергије, јер ипак фосилна горива настају из биомасе при одговарајућим условима (температура, притисак). Количина Сунчеве енергије која доспе на Земљу је све осим занемарљиве, стога је можда управо овај извор енергије будућност људи.

Могућност примене Сунчеве енергије је велика, почев од грејања воде, загревања домова, до производње електричне енергије применом фотонапонских панела. Поред тога у далекој прошлости се могу уочити различити видови примене ове енергије у циљу унапређења живота. Дobar део људи је још у детињству уочио дејство Сунчеве енергије коришћењем лупе која обезбеђује концентрисање Сунчевог зрачења на жељено место, чиме би се генерисала знатна количина топлоте.

Проблем у коришћењу енергије која потиче од Сунца представља период без Сунчевог зрачења, тј. ноћ. Тај проблем је могуће решити адекватним складиштењем енергије током дана, која би се потом користила ноћу. Проблем таквог начина рада јесте превелика цена батерија, као и потреба за провером пуњења истих због сигурносних разлога.

У наставку рада биће речи о основним информацијама везаних за Сунце, Сунчево зрачење, као и објашњење функционисања фотонапонских панела (фотонапонски ефекат). Кроз примену софтвера ће бити приказан читав процес производње електричне енергије фотонапонског система, а самим тим и његова економска и енергетска исплативост.

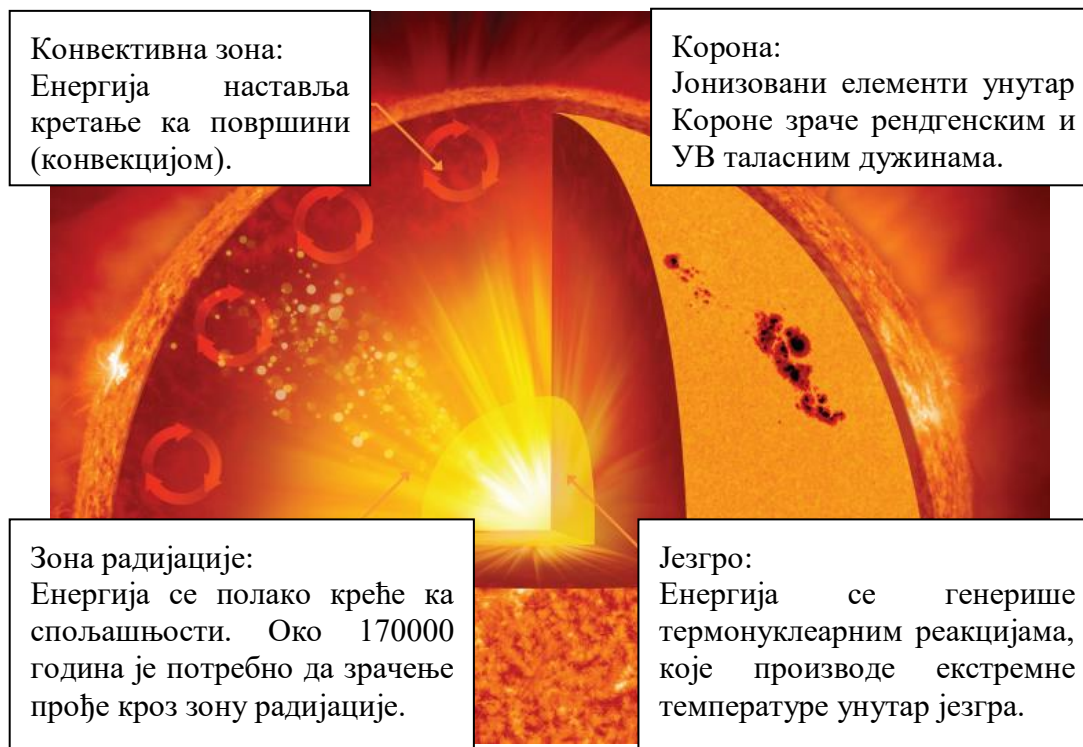
2. Сунце

Сунце представља средиште нашег Соларног система. Емитује енергију у виду електромагнетног зрачења, која уколико се адекватно искористи може представљати водећи извор данашње енергије. Основне карактеристике Сунца су представљене у табели 1. Спољашњи слој Сунца се састоји од око 75 % водоника, 23 % хелијума и 2 % осталих усијаних гасова под великим притиском [1].

Табела 1 – Карактеристике Сунца [1]

Пречник	1382000 km
Маса	$2 \cdot 10^{30}$ kg
Запремина	$1,41 \cdot 10^{27}$ m ³
Густина	1400 kgm ⁻³

Сунце се састоји из неколико слојева, који су приказани на слици 1. Под одређеним условима могуће је да се неколико атома једног истог елемента споје, и на тај начин формирају нови елемент (фузија). Исто тако је могуће и један атом раздвојити на неколико појединачних атома (фисија). Управо то се и дешава на Сунцу, низ реакција, које се јављају на нивоу атома, доводе до тога да се водоник претвара у хелијум. Те реакције су познате као нуклеарне фузије. Процес нуклеарне фузије се дешава унутар језгра Сунца, унутар кога се готово сва значајна количина топлоте и ствара (99 %) [2].



Слика 1 – Анатомија Сунца [3]

Због огромне количине топлоте која долази од Сунца, поставља се питање колика је његова спољашња температура. У циљу одређивања температуре Сунца неопходно је обратити пажњу на карактеристике електромагнетног зрачења које оно изазива. Wilhelm Wien (1864–1928.) је уочио законитост [4]:

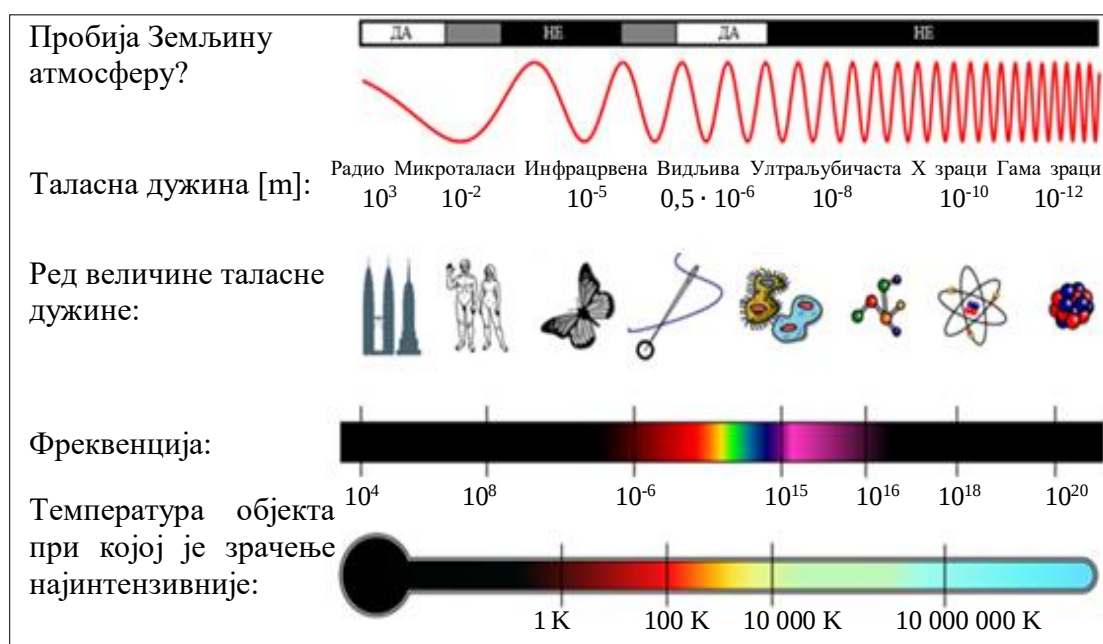
$$\lambda_m = b \cdot T^{-1} \quad (1)$$

λ_m -таласна дужина максималног интензитета [μm];

b -константа [μmK], $b = 2898 \mu\text{mK}$;

T -апсолутна температура [K];

Таласну дужину максималног интензитета могуће је уочити посматрањем спектра електромагнетног зрачења, који је приказан на слици 2, где је: $\lambda_m = 0,5 \mu\text{m}$.



Слика 2 – Спектар електромагнетног зрачења [5]

Следи:

$$\lambda_m = b \cdot T^{-1} \quad (2)$$

$$T \cdot \lambda_m = b \quad (3)$$

$$T \cdot 0,5 = 2898 \quad (4)$$

$$T = 5796 \text{ K} \quad (5)$$

Stefan-Boltzman-ов закон гласи да је енергија коју емитује црно тело у секунди по јединичној површини пропорционална четвртој степену апсолутне температуре [4], односно:

$$P/A = \sigma \cdot T^4 \quad (6)$$

P -снага [W]; A -површина [m^2]; T -апсолутна температура [K]; σ -константа зрачења апсолутно црног тела [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$], која је једнака $5,6703 \times 10^{-8} [\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}]$;

Ако Сунце посматрамо као апсолутно црно тело тада ће снага којом зрачи један m^2 површине Сунца бити:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (7)$$

$$P = 5,6703 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 5796^4 \quad (8)$$

$$P = 6,391 \cdot 10^7 \text{ W} \quad (9)$$

Ова вредност говори о томе да сваке секунди један m^2 површине Сунца одзрачи $6,391 \cdot 10^7 \text{ W}$ енергије.

2.1 Сунчево зрачење

Променом квадрата растојања Земље од Сунца мења се Сунчево зрачење које доспева на Земљину атмосферу. Јачина Сунчевог зрачења која доспева на површину (нормално постављену према правцу простирања зракова) при средњој удаљености Земље од Сунца износи око 1350 W/m^2 [6]. Поменута вредност позната је као соларна константа. Поред удаљености Земље од Сунца постоје и други фактори који утичу на количину енергије коју Земља прими путем Сунчевог зрачења. Један од фактора јесте угао под којим зраци падају. Стога се јављају видне разлике у интензитету Сунчевог зрачења при посматрању (и упоређивању) летњих и зимских месеци. Кретање Сунца је такво да је угао под којим зраци падају у зимским месецима мањи, док је у летњим месецима, услед достизања веће висине на којој се Сунце налази, тај угао већи. Због тога се надстрешница користи као заштита (смањење топлотних добитака) од Сунчевог зрачења у летњим месецима, а да притом зими не ремети доспевање Сунчевог зрачења у просторију.

Основна подела Сунчевог зрачења је на:

- Директно и
- Дифузно зрачење.

Директно Сунчево зрачење доспева на површину Земље простирањем електромагнетног зрачења, док се под дифузним сматра оно зрачење које настаје због проласка кроз Земљину атмосферу. Од укупног дела директног зрачења један сегмент наилази на молекуле у Земљиној атмосфери (кисеоник, водена пара, озон,...) при чему се један део овог зрачења рефлектује, а остатак апсорбује и потом емитује ка Земљи. Одакле и назив дифузно зрачење. Збир директног и дифузног зрачења назива се глобално зрачење.

2.2 Инсолација

Просечно Сунчево зрачење на јединичну хоризонталну површину (на годишњем нивоу) назива се годишња инсолација или само инсолација [7]. Инсолација представља јако битан податак у погледу могућности искоришћења Сунчевог зрачења у различитим деловима Земље, односно то је важан параметар при провери исплативости примене уређаја који за рад користе Сунчево зрачење (соларни пријемници, фотонапонски панели). У погледу исплативости система повољнији услови су наравно у јужним пределима Земље.

Вредност просечне годишње инсолације за Републику Србију, у поређењу са Европом, говори у прилог примени система који за рад користе Сунчево зрачење. За Европу просечна годишња инсолација је око 1096 kWh/m^2 , а за Републику Србију та вредност износи 1400 kWh/m^2 [7]. Како се испитивани објекат налази на територији града Крагујевца у табели 2 дата је средња инсолација за Крагујевац, по месецима.

Табела 2 – Средња инсолација у $[\text{kWh/m}^2]$ за град Крагујевац [7]:

Место у Србији:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Крагујевац	1,5	2,4	3,35	4,8	5,85	6,1	6,45	5,9	4,85	3,3	1,7	1,3	1447,85

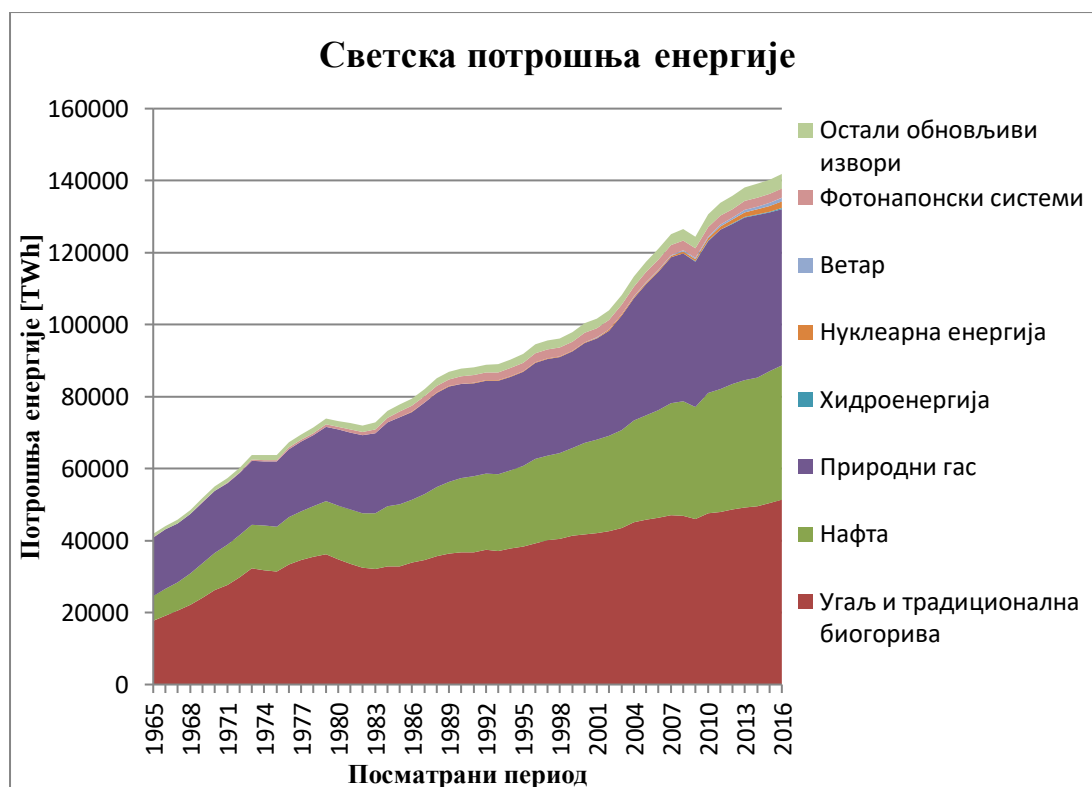
У табели бројеви у оспегу од 1 до 12 представљају месеце у годину, док је бројем 13 означена годишња инсолација за посматрани град.

3. Електрична енергија

Електрична енергија представља скуп ситних честица, познатим под именом електрони и добија се трансформацијом из механичке, топлотне, хемијске, нуклеарне и сл. Релативно једноставно се може претворити у остале корисне облике енергије. Због многобројних предности и повољности електрична енергија је тренутно најважнији и најкоришћенији облик енергије [8]. Постоје два облика електричне енергије, једносмерна (DC) и наизменична (AC). Електрична енергија добијена применом фотонапонских панела је једносмерна.

Један, можда и највећи, проблем са којим се свет данас сусреће јесте константан пораст у потражњи енергије. Људска популација непрестано расте, а са њом расте и потражња енергије, узрокована већим бројем потрошача. Такође се већи захтеви за енергијом примећују при достизању развијеног стања земље. Стога је неопходно поставити питање: „Да ли је могуће помоћи неразвијеним земљама да напредују, а да се притом не наруши здравље планете“?

На слици 3 је приказан тренд пораста потрошње енергије [9].

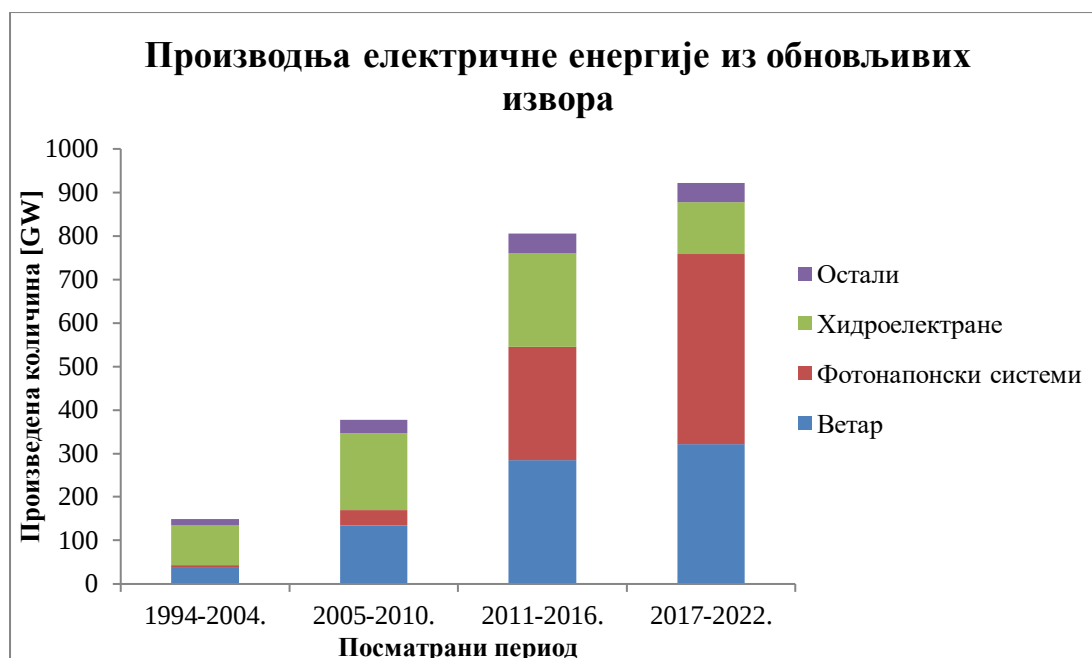


Слика 3 – Укупна светска потрошња енергије

На слици се уочава доминантност у производњи електричне енергије путем сагоревања фосилних горива.

Још један проблем везан за електричну енергију јесте њена дистрибуција, јер је неопходно да у мрежи увек постоји већа количина електричне енергије од потребне, што суштински говори о производњи оне количине енергија која надмашује њено коришћење. Стога разлика произведене и употребљене енергије не представља ништа друго него губитак. Поред тога допремање електричне енергије са једног места на друго је праћено губицима, јер је потребно премашити удаљености које некад достижу и стотине километара. Управо из тог разлога примена Сунчеве енергије, односно коришћење Сунца за производњу електричне енергије данас има све већу примену, јер је у недоступним, удаљеним местима потпуно неисплативо доводити електричну енергију конвенционалним путем. Такви домови могу имати довољне количине електричне енергије преко фотонапонских панела, а да при томе нису приказани на мрежу.

Последњих година, примећен је значајан пораст у производњи електричне енергије применом обновљивих извора енергије (слика 4), како у Европи, тако и остатку Земље, са Кином као својим представником. Кина је заслужна за 40 % пораст у примени обновљивих извора енергије [10].



Слика 4 – Пораст у примени обновљивих извора енергије

Претходна слика приказује пораст у коришћењу обновљивих извора енергије по категоријама, где се увиђа да фотонапонски системи из године у годину имају све већу употребу.

4. Примена соларних система

Коришћење Сунчеве енергије датира још у далеку прошлост. Сократ је у V веку пре н.е. говорио о томе како је потребно оријентисати кућу да би се лети хладила, а зими грејала [11]. Под соларним системом подразумева се систем који Сунчеву енергију претвара у неки други вид енергије (топлотну или електричну).

Разликују се две основне групе соларних система:

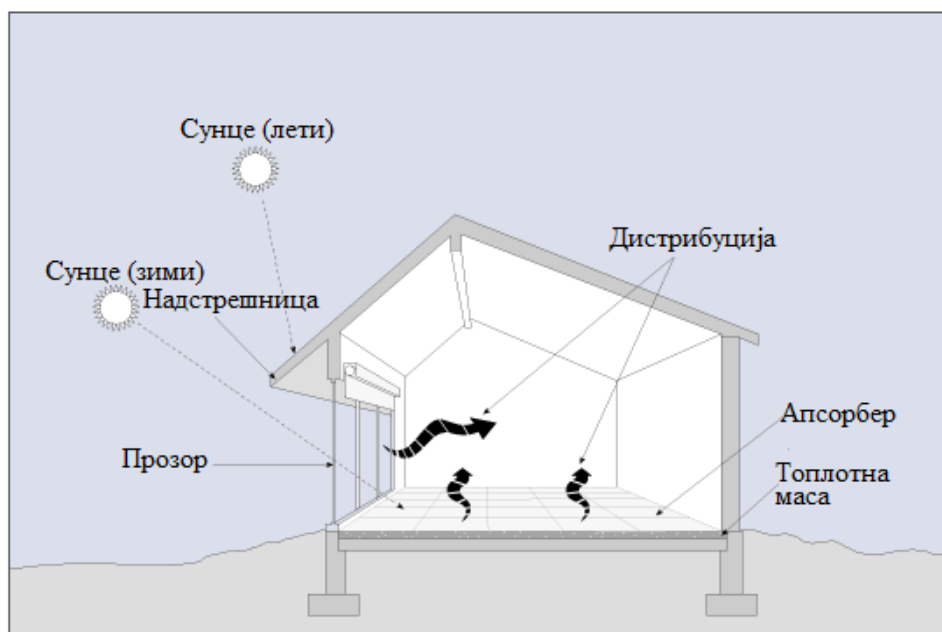
- Пасивни и
- Активни соларни системи.

Комбиновањем пасивног и активног система добија се мешовити соларни систем.

4.1 Пасивни соларни системи

Пасивни системи се свode на ону примену Сунчеве енергије са којом људи најчешће и долазе у контакт. Један пример представља возња аутобусом сунчаним даном. Температура унутар аутобуса повећава се услед дејства Сунчевог зрачења. Овакав вид коришћења енергије се још може уочити и у принципу рада стакленика.

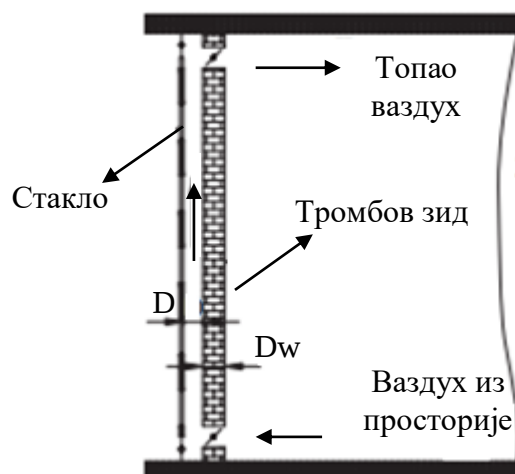
Код пасивног грејања домова значајну улогу има оријентација куће, као и сама изолација коју кућа поседује. Приказ овакве примене соларне енергије дат је на слици 5.



Слика 5 – Пасивни соларни систем [12]

Може се приметити због чега је положај куће, а и њена сама конструкција битна у погледу пасивног коришћења Сунчеве енергије. Познато је да је положај Сунца у летњим месецима на већој висини у односу на зимске месеце. Тако ће приказан објект у зимским месецима преко продора Сунчеве енергије кроз прозорско стакло чинити дом топлијим, док ће ти исти зраци у летњим месецима завршити на надстрешници. Један од начина накнадног побољшања и енергетске ефикасности у зимским, односно летњим месецима би била садња листопадног дрвета са јужне стране куће, при чему би се обезбедила заштита од Сунчевог зрачења у летњим периодима, док би у зимским месецима зрачење било могуће због опадања листова. Поред тога обезбедила би се и заштита дома од ветра.

Поред наведеног примера, данас велику примену има и Тромбов зид (слика 6), који се израђује тако да поседује висок топлотни капацитет и поставља се са јужне стране (застакљена страна) тако да између зида и прозора постоји удаљеност која обезбеђује природно струјање ваздуха. Ради спречавања загревања дома у летњим месецима и Тромбов зид може да користи надстрешницу, као и постављање застора са унутрашње стране прозора.



Слика 6 – Тромбов зид [13]

На слици је са D обележена удаљеност зида од прозора, а са D_w дебљина самог зида.

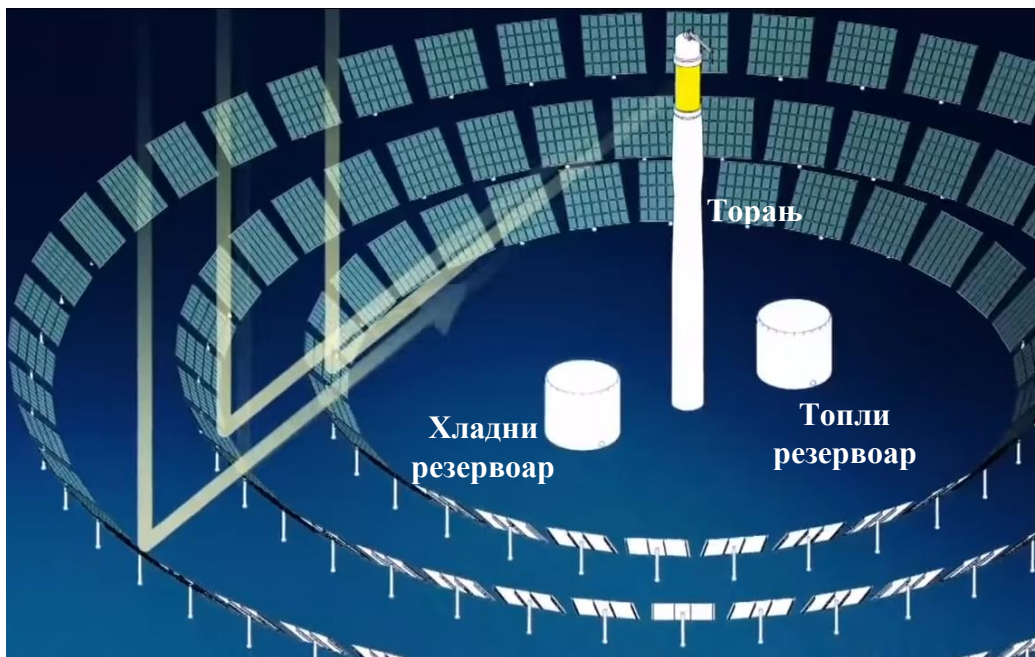
4.2 Активни соларни системи

За активне системе је примена соларне енергије окарактерисана већом ефикасношћу у односу на пасивну, али се принцип рада врло мало разликује. Главна разлика јесте у томе што за разлику од пасивних система активни захтевају учешће адекватних уређаја за претварање енергије у жељени облик. Коришћењем соларне енергије на овакав начин могуће је генерисати топлоту, али и производити електричну енергију.

Случај примене соларне енергије за грејање дома или топле воде јесте када се користе соларни пријемници помоћу којих се греје флуид, којим су испуњене цеви пријемника. Даље се тај флуид доводи до резервоара одакле се користи у зависности од намене. За овакву примену највише је у употреби раван соларни пријемник. Поред равних пријемника концентришући пријемници представљају још један вид примене Сунчеве енергије.

Соларни (концентришући) пријемници су системи чији се принцип рада темељи на примени „дупе“ уз помоћ које се Сунчево зрачење усмерава на жељено место, на коме долази до повећања температуре. Овакви пријемници су засновани на примени огледала, која омогућавају адекватну рефлексiju Сунчеве светлости и њено фокусирање на жељено место. На овакав начин се стотине Сунчевих зрака фокусира на део торња који се налази у средини ових огледала.

У јужној Аустралији се налази једна од највећих соларно концентришућих електрана на свету (слика 7), која може да производи струју 24 часа дневно. Сунчеви зраци се одбијају од сваког огледала и усмеравају ка апсорберу, који се налази на торњу. Соли натријума и калијум нитрита се пумпама транспортују из хладног резервоара соли до загрејаног торња, где се загревају и достижу температуру од $565\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тако загрејане соли се потом транспортују у топли резервоар, где се могу користити за производњу електричне енергије коришћењем топлотног мотора [14].



Слика 7 – Соларно концентришућа електрана у јужној Аустралији [14]

Соларни фотонапонски системи, за разлику од соларних торњева, се користе за производњу и акумулацију електричне енергије применом фотонапонских ћелија. Саставни делови овог система су [7]:

- Соларни пријемник, фотонапонске ћелије,
- Регулатор пуњења,
- Акумулатор 12 V,
- Инвертор 12 V DC-220 V AC 50 Hz,
- Потрошачи једносмерне струје од 12 V,
- Потрошачи наизменичне струје од 220 V.

Ова грана производње електричне енергије данас има значајну примену, чија се шира употреба очекује у скорој будућности.

5. Фотонапонске ћелије

Ради разумевања принципа на ком раде фотонапонске ћелије, неопходно је разјаснити појам који се зове фотонапонски ефекат. У периодном систему елемената постоји елемент који се зове силицијум, и који данас налази своју примену у изради фотонапонских панела. Силицијум спада у групу полупроводника, тј. елемената који поседују проводност знатно већу од изолатора, а мању од проводника (метала). Атомски број силицијума је 14, његов масени број је 28, а број орбитала је 3 [15].

Коришћењем основних знања из хемије лако се може одредити број протона, неутрона и електрона.

$$Z = N(p^+) = N(e^-) \quad (10)$$

$$14 = N(p^+) = N(e^-) \quad (11)$$

$$A = N(p^+) + N(n^0) \quad (12)$$

$$28 = 14 + N(n^0) \quad (13)$$

$$N(n^0) = 28 - 14 \quad (14)$$

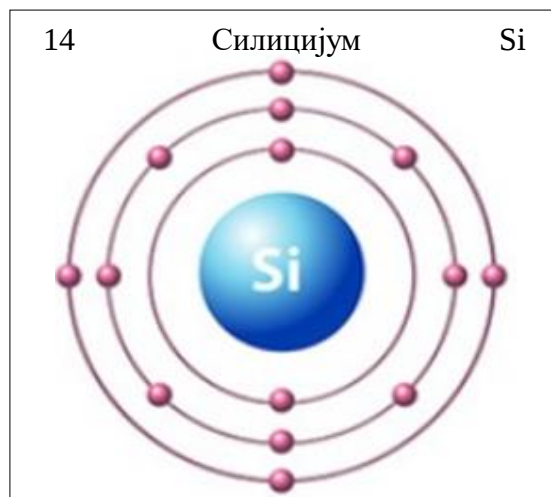
$$N(n^0) = 14 \quad (15)$$

A-масени број;

Z-атомски број;

p^+ - број протона; n^0 - број неутрона; e^- - број електрона;

Електронска конфигурација овог елемента представљена је на слици 8.



Слика 8 – Електронска конфигурација силицијума [15]

Посматрањем расподеле електрона на претходној слици уочава се да атом силицијума није стабилан јер је трећа орбитала непопуњена (садржи 4 електрона), док је супротан случај са прве две орбитале (стабилне су, прва орбитала садржи 2 електрона, а друга 8 електрона).

За појашњење рада фотонапонских ћелија неопходно је посматрати електроне у трећој орбитали. У циљу постизања стабилности неопходно је путем формирања ковалентних веза основати молекул силицијума који садржи више атома силицијума. На тај начин је обезбеђено да сваки атом силицијума поседује 8 електрона у трећој орбитали. Те везе омогућавају очување равнотеже у погледу једнаког броја протона и електрона. Сунчева светлост емитује фотоне који су у стању, уколико имају довољну количину енергије, да избаце електрон из орбитале силицијума.

На температурама вишим од 0 K ковалентне везе почињу да се раздвајају услед апсорбовања топлотне енергије, што доводи до настанка слободних електрона и појаве празних поља (рупа-места са којих се електрон померио) [16]. Тада читав атом силицијума постаје позитивно наелектрисан, јер има 13 електрона, а 14 протона, али и даље тежи успостављању прекинуте ковалентне везе. То поновно остварење везе се обезбеђује тако што електрон вишег енергетског нивоа (из суседне везе) попуњава празно место, чиме се поступак понавља. Оно што се овим путем ослобађа јесте кинетичка енергија електрона.

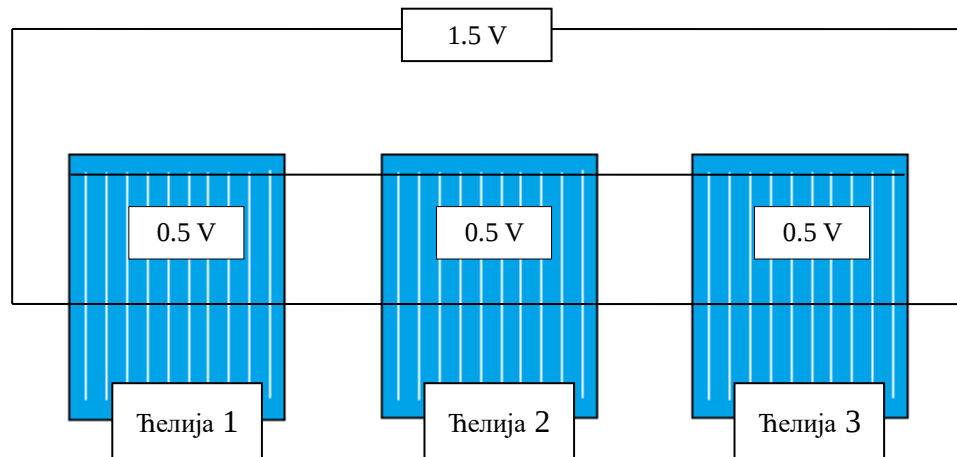
Нека се фотонапонска ћелија посматра као ћелија израђена од два слоја силицијума. Горњи слој је израђен тако да је негативно наелектрисан, што се успоставља комбиновањем силицијума са елементима који су негативнији од њега ($e^- > 14$), као на пример фосфором. Стога горњи слој поседује већи број електрона који могу слободно да се крећу, чинећи слој бољим проводником. Доњи слој је позитивно наелектрисан ($e^- < 14$) што се остварује комбиновањем силицијума са на пример бором. Тако се добија мањи број електрона који могу слободно да се крећу, што доњи слој чини лошијим проводником. Објашњена манипулација наелектрисања самог силицијума назива се допинговање.

Како би фотонапонска ћелија радила неопходно је обезбедити контакт између p и n типа слојева силицијума. P тип настаје допинговањем силицијума бором (p због образовања позитивног слоја), а n тип фосфором (n због образовања негативног слоја). Дуж пута који електрон треба да прође, како би дошао до доњег слоја, могуће је поставити неки потрошач електричне енергије, као што је сијалица. Тада ће се непосредно енергија електрона који пролази кроз сијалицу користити за остветљење.

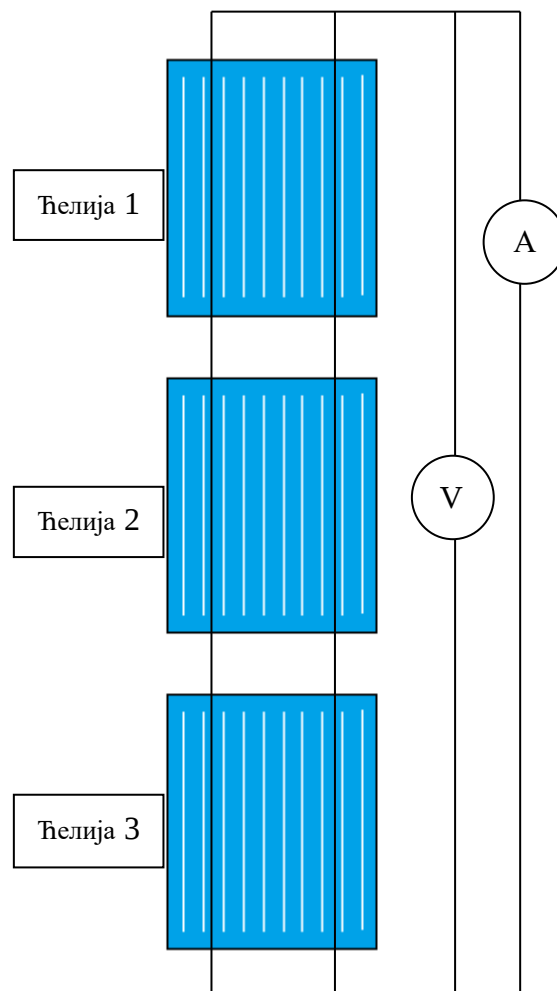
Основну поделу фотонапонских ћелија могуће је извршити на [7]:

- Монокристалне фотонапонске ћелије: Код њих се из истопљене масе силицијума издваја потпуно чист силицијум специјалним поступком у веома танке плоче. Овако добијена фотонапонска ћелија је најквалитетнија и поседује највећу ефикасност.
- Поликристалне фотонапонске ћелије: Течни силицијум се лије у калупе, где се кристализује у ситније неправилне кристале, а потом реже у танке плоче.
- Фотонапонске ћелије од аморфног силицијума: Настају при наношењу силицијумског слоја на стакло или на неки други материјал (подлогу) у виду филма. Овакве ћелије су најјефтиније и имају најмању ефикасност.

Већи број фотонапонских ћелија групасних заједно чине фотонапонски модул. Фотонапонски модул је неизоставни део сваког система који генерише електричну енергију при дејству Сунчевог зрачења. Постоје два начина помоћу којих је могуће повезати фотонапонске ћелије у циљу формирања модула, и то путем редне и паралелне везе, слика 9, односно 10 респективно.



Слика 9 – Редна веза фотонапонских ћелија



Слика 10 – Паралелна веза фотонапонских ћелија

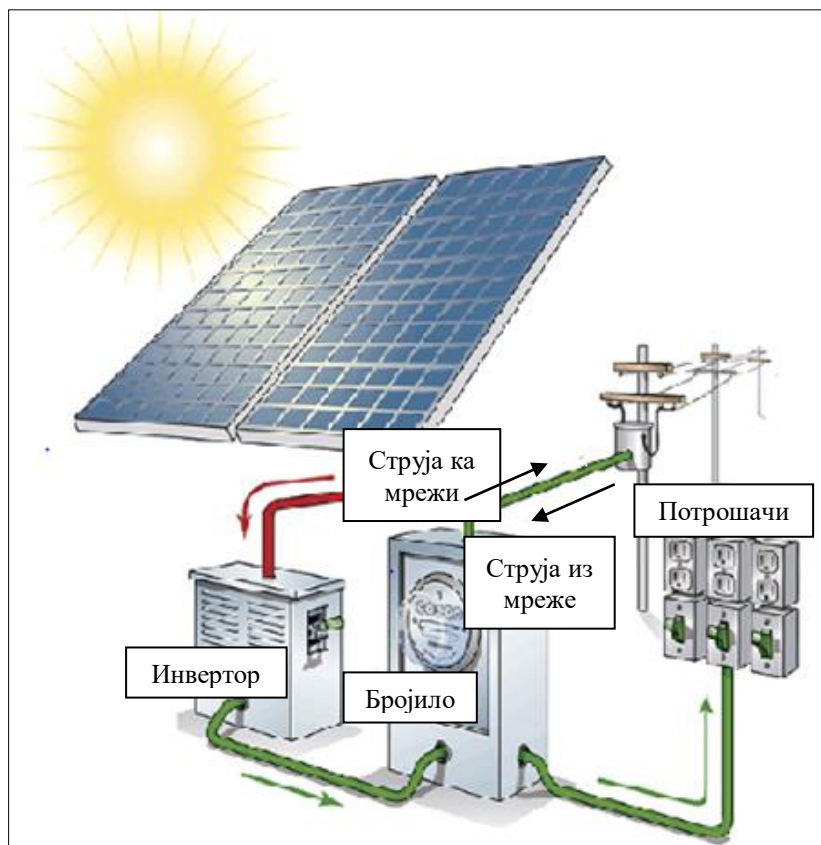
Редна веза (слика 9) фотонапонских ћелија обезбеђује сабирање напона [V] сваке ћелије, тако да ће укупна вредност напона коју пружа модул бити једнака збиру напона свих фотонапонских ћелија повезаних на такав начин.

При паралелном повезивању (слика 10) остварује се одржавање напона [V], док се повећава количина струје [A] која је једнака збиру струја кроз сваку фотонапонску ћелију. Амперметар (A), ће при раду показати укупно одавану струју, која је једнака збиру сваке појединачне. Волтметар (V) показује напон овако везаних ћелија који је једнак напону сваке појединачне.

У погледу вршења симулације начин везивања фотонапонских ћелија није узиман у обзир, односно сваки панел поседује засебну везу.

Произведену електричну енергију путем фотонапонских ћелија је могуће складиштити у акумулаторе и користити по потреби. Битно је споменути да је велики проблем данашњице низак степен корисности оваквих система. Додавање батерија усложњава систем што додатно смањује ефикасност. Електрична енергија која се генерише употребом споменутих система је једносмерна (DC), коју је путем одговарајућег инвертора могуће превести у наизменичну струју (AC).

На слици 11 приказан је пример генерисања Сунчеве енергије помоћу система који садржи: фотонапонске панеле, инвертор, бројило, као и сву пратећу опрему за адекватно повезивање и прикључак система на мрежу.



Слика 11 – Систем за производњу електричне енергије применом фотонапонских панела [17]

Карактеристично за систем приказан на претходној слици јесте да уколико панели производе већу количину електричне енергије од оне која се у том тренутку троши, та разлика електричне енергије ће бити послата мрежи, па ће се тада бројило вртети у супротну страну.

Како се унутар фотонапонских панела само електрони сматрају покретним деловима, овакви уређаји могу трајати и више деценија, због чега је повраћај новца и поред не тако ниске цене присутан.

6. Предности и недостаци фотонапонских система

Данас не постоји облик енергије који је могуће користити за производњу електричне а да притом не утиче на загађење животне средине. То исто важи и за фотонапонске панеле, јер иако при раду не производе угљен-диоксид, и разне друге штетне материје, у току њихове производње то се чини.

6.1 Предности

- Могућност обезбеђивања приступа електричној енергију у местима где је то немогуће, или економски неисплативо урадити путем довођења електродистрибутивне мреже;
- На основу коришћења Сунчеве енергије могуће је смањити количине штетних супстанци које се свакодневно испуштају у атмосферу, посебно у развијеним градовима, јер би се производња панела вршила на једном месту, док би њихова производња електричне енергије била на територији самог града. Ово би се могло повезати са данашњом применом електричних аутобуса, који видно загађују најчешће приградска насеља, јер се управо у њима врши изградња постројења за производњу електричне енергије (применом фосилних горива), док се у самом центру града ниво загађења смањује због смањења сагоревања горива у возилима;
- Због мањка покретних делова унутар самог уређаја век трајања панела је на завидном нивоу. Већина произвођача гарантује да ће фотонапонски панел после 25 година коришћења остваривати ефикасност која је виша од 80 % од укупне ефикасности панела [18];
- Најважнија карактеристика Сунчеве енергије јесте што је 100 % обновљива, односно може се обновити у истој мери у којој се и користи, што у погледу неких других обновљивих извора енергије није случај;
- Фотонапонски панели не захтевају посебну бригу након њиховог монтирања, тј. одржавање је јефтино;
- У погледу предности примене соларних система немогуће је изоставити приступачност Сунца, тј. чињеницу да је Сунчево зрачење бесплатно;

- Предност у погледу примене оваквог начина генерисања енергије јесте и тенденција смањења цене фотонапонских ћелија из године у годину (податак приказан на слици 12, где су цене фотонапонских ћелија представљене у \$/W).



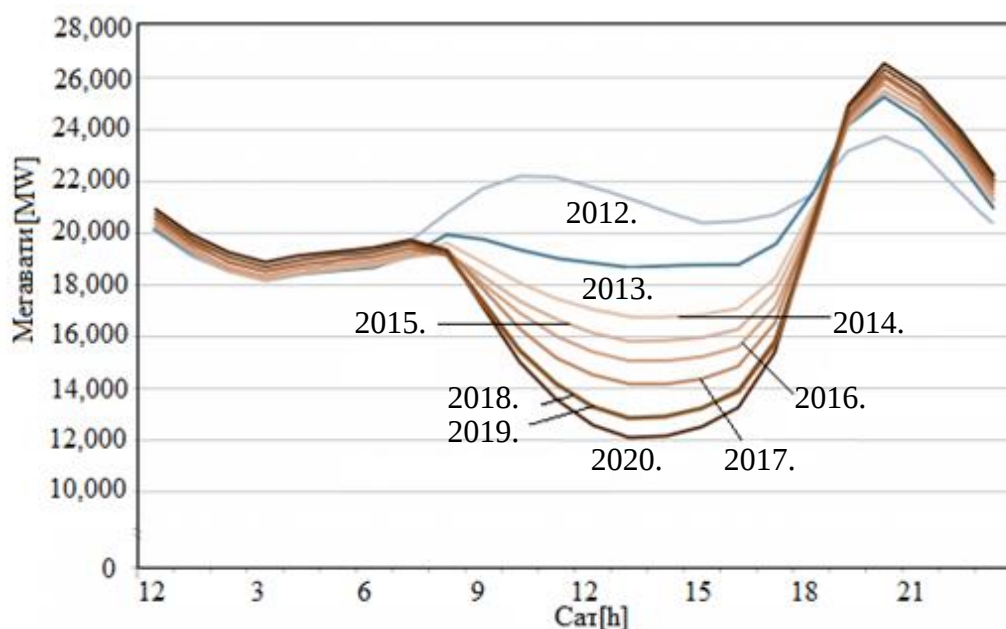
Слика 12 – Приказ пада цене фотонапонских ћелија из године у годину [19,20]

6.2 Недостаци

- Мада знатна количина енергије долази путем Сунчевог зрачења, сигурност у производњи која се поседује коришћењем на пример природног гаса је и даље присутна. Та сигурност се огледа и у могућности да се ноћу обезбеди жељена количина електричне енергије.
- Коришћење панела јесте погодно у погледу незагађивања атмосфере, али ипак производња огромних електрана ремети природне циклусе у погледу заузимања станишта неким животињским врстама, праћено производњом угљен-диоксида и других штетних честица.
- Ниска вредност ефикасности фотонапонских система такође представља огроман проблем. Већина произвођача фотонапонских панела ефикасност приказује у оквиру 20 % [21].
- Велики проблем у погледу примене соларне енергије представља ограничено време за њено сакупљање, тј. ноћ, као и чињеница да Сунчева енергија у довољној количини није присутна читавој планети.
- Још један недостатак јесте и проблем „duck curve“ који је приказан на слици 13.

6.2.1 Проблема „duck curve“

Уколико се сагледа потражња за електричном енергијом у току дана примећује се да постоје скокови и падови у зависности од периода дана. Поређењем криве из 2012. године са кривама осталих година уочава се да како расте примена соларне енергије тако долази до све већег обарања криве у периоду када је Сунчево зрачење најефикасније. Тада се уочава да крива има облик патке, отуда карактеристичан назив. Ово изазива проблеме. Најпре онда када је потражња за електричном енергијом највећа, тада Сунце залази и производња електричне енергије од стране Сунца се завршава. То доводи до тога да је потребно огромну количину електричне енергије довести у мрежу путем сагоревања фосилних горива. Други проблем је економске природе.



Слика 13 – Дијаграмски приказ потражње електричне енергије [22]

Пошто се Сунчевом енергијом производи значајна количина енергије средином дана, када потрошња исте није значајна, то доводи до тога да у мрежи постоји довољна, ако не и ризична количина електричне енергије. Како та количина не би довела до преоптерећења мреже неопходно је искључити неке електране на фосилна горива. Како електране на угаљ нису погодне за крени/стани принцип рада, електране на природни гас се користе. Тако да је задатак електрана на природни гас да надоместе скок у потражњи (пик) који се јавља увече, док се притом са времена на време искључују, што повећава трошкове рада и одржавања [22]. Али због компликованости поступка, често се дешава да се део произведене електричне енергије једноставно не користи.

Могуће решење овом проблему представљају реверзибилне хидроелектране, које путем коришћења произведене електричне енергије у току дана могу допремити воду до потребног места акумулације. Стога се у тренутку појаве вршне потрошње такве хидроелектране пуштају у погон, чиме се обезбеђује електрична енергија и у периоду највеће потражње.

7. Коришћени софтвери

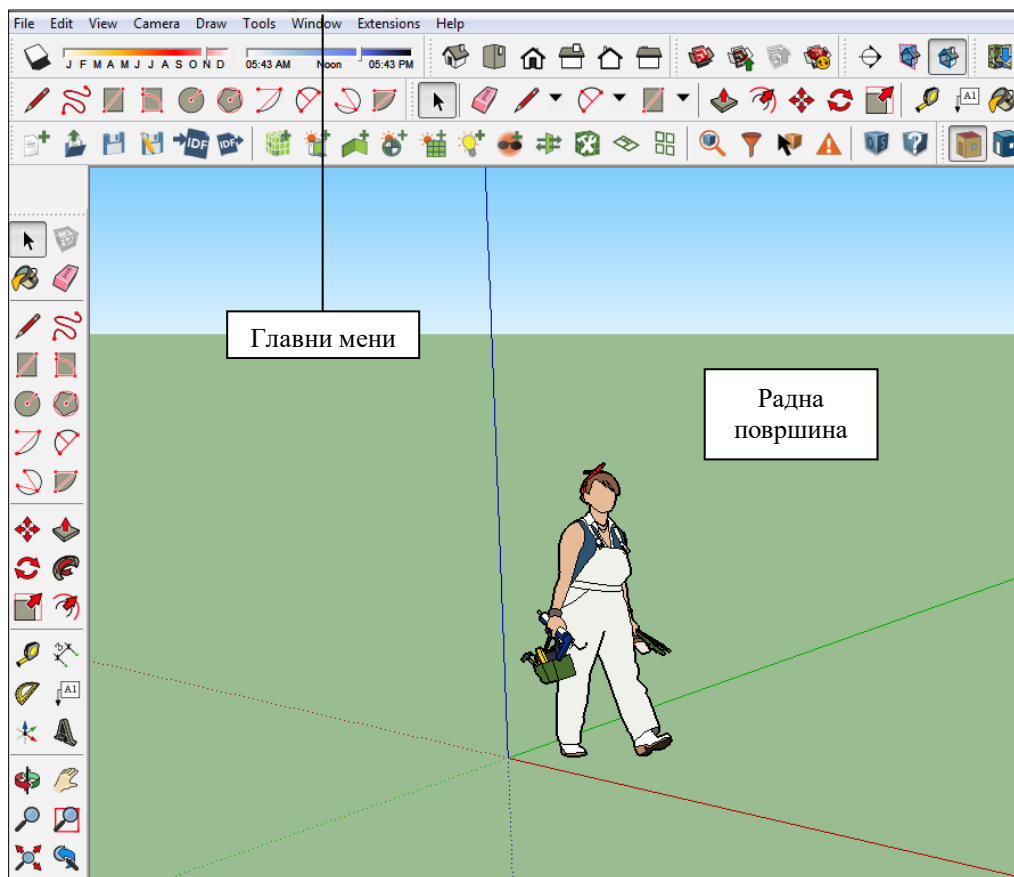
За анализу производње електричне енергије употребом фотонапонских модула коришћена су два софтвера: Google SketchUp и EnergyPlus, где се помоћу OpenStudio програма омогућава повезивање израђеног 3Д модела са EnergyPlus програмом.

7.1 Google SketchUp

Пре неколико деценија постојање 3Д софтвера, који је бесплатан и доступан свима је било незамисливо. Само одређена неколицина људи у то време познавала је какав такав рад са постојећим 3Д софтверима, чија је тадашња цена била незамислива.

Google SketchUp је најпре био израђен као помоћ архитектама при обављању свог посла. То је јако користан програм за стварање и визуелизацију идеја у 3Д приказу, који је притом релативно једноставан за употребу. Израђен је тако да укомбинује елегантност и спонтаност ручног цртања са брзином и флексибилношћу данашњих рачунара [23].

У радном прозору (слика 14) могу се уочити основне опције програма.



Слика 14 – Изглед радног окружења у Google SketchUp-у

Најзначајније карактеристике програма (посматрано са аспекта овог рада) су те да је могуће моделирати објекат са више просторија и исти сачувати као EnergyPlus датотеку, притом додељујући том објекту све потребне податке. При изради објекта обавезно је креирати површине на које се постављају фотонапонски панели.

Тако креирана датотека се може симулирати у EnergyPlus-у од прорачуна топлотних губитака/добитака, па све до прорачуна могућег генерисања електричне енергије применом фотонапонских панела. Значајну предност Google SketchUp софтвера представља и могућност позиције објекта у односу на стране света, и опција посматрања кретања сенке за жељени период, што има велику улогу при каснијем избору места постављања, као и међусобне удаљености фотонапонских панела.

7.2 EnergyPlus

Више деценија је влада САД подржавала два програма за симулацију енергетских оптерећења објеката, а то су: BLAST и DOE-2. Основна разлика споменута два програма је био прорачун унетих података, тачније BLAST се базирао на равнотежи топлоте, док је DOE-2 највећи значај пружао масивности саме просторије. Временом настаје проблем употребе споменутих програма због коришћења кода старог више од двадесет година, а и самог фортрана. Престанак финансијске подршке BLAST-у, довео је до покушаја спајања BLAST-а и DOE-2 у циљу добијања једног програма, који има најбоље аспекте оба. Тако је након доста уложеног труда креиран заједнички програм, под називом EnergyPlus, и то путем израде потпуно новог кода [24].

На тај начин је креиран EnergyPlus, који се сврстава у ред најзначајнијих научних софтвера данашњице.

У почетку је сврха примене била само енергетска ефикасност у погледу топлотних губитака/добитака, али се веома брзо раширила и на могућност примене соларних пријемника за грејање топле воде, па и фотонапонских система за производњу електричне енергије.

Важност примене овог програма се огледа и у могућности одабира временске зоне за дати објекат, која пружа адекватан поглед на просечну годишњу температуру, инсолацију што пружа реалан увид у резултате добијене симулације.

При отварању EnergyPlus датотеке, креиране у Google SketchUp-у, добра, али понекад узнемирујућа ставка јесте немогућност покретања симулације док се све могуће грешке начињене у Google SketchUp-у не исправе. Тек након адекватног припремања 3Д модела у Google SketchUp-у могуће је покренути жељену симулацију.

За рад са фотонапонским системом у EnergyPlus-у је потребно обратити пажњу на наредне картице:

- Generator:Photovoltaic – која је неопходна за дефинисање површине на коју се постављају панели;
- PhotovoltaicPerformance:Simple – која се везује за претходну картицу и која садржи ефикасност панела;
- ElectricLoadCenter:Generators – помоћу којег се дефинише које генераторе треба укључити у симулацију, за тему овог раду повезиван је са Generator:Photovoltaic;
- ElectricLoadCenter:Inverter:Simple – унутар кога се уписује ефикасност инвертора;
- ElectricLoadCenter:Distribution – управља инвертором;
- Output:Meter – којом се програм усмерава тако да пружи месечни извештај о производњи електричне енергије.

8. Фотонапонски систем

Основни начин поделе фотонапонских система, у погледу њиховог инсталирања, врши се према [25] на:

- Систем који је везан за мрежу,
- Систем који је везан за мрежу и који поседује батерије,
- Систем који није везан за мрежу.

Сваки од наведених има своје предности и мане, али због већ постојеће везе објекта са мрежом трећи начин инсталирања система на дати објект не долази у обзир.

Систем који је везан за мрежу користи стандардни инвертор и нема складиште за батерију. То су једноставни и врло ефикасни системи јер имају релативно мали број компоненти. Систем који је везан за мрежу и који поседује батерије је идеалан за кориснике који имају проблем са честим нестанком струје на свом подручју [25]. Највећа предност система са батеријама јесте могућност складиштења електричне енергије у периодима када је производња већа од потрошње. Тако се на пример у ноћном периоду енергија из батерија може користити као извор енергије. Недостаци система су: виша цена, поседовање већег броја компоненти, потреба за контролом пуњења [25].

Из поменутих разлога у овом раду прорачун економске исплативости фотонапонског система је спроведен само за први случај (систем који је везан за мрежу).

8.1 Карактеристике фотонапонског панела

Главни параметри који утичу на одабир панела јесу његова цена и ефикасност. Поред ефикасности чију вредност произвођач пружа неопходно је обратити пажњу на промену ефикасности фотонапонског панела са променом спољашње температуре. Одабрани фотонапонски панел је поликристалног типа, произведен од стране компаније Luxor, чије су карактеристике представљене у табели 3.

Табела 3 – Карактеристике одабраног фотонапонског панела [26]

Модел фотонапонског панела	Luxor Eco Line P60/275
Снага [W]	275
Ефикасност [%]	16,94
Опсег радне температуре [°C]	-40 до +85
Промена ефикасности са променом спољашње температуре [%/°C]	±0,41

Поред горе наведених података произвођач пружа и информације о промени ефикасности панела током година експлоатације (табела 4).

Табела 4 – Опадање ефикасности са старењем панела [27]

Година	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Ефикасност [%]	97	96,5	96	95,5	95	94,5	94	93,5	93	92,5	92	91,5	
Година	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Ефикасност [%]	91	90,5	90	89,5	89	88,5	88	87,5	87	86,5	86	85,5	85

При каснијој економској анализи биће више речи о овим подацима.

У оквиру софтвера EnergyPlus не постоји могућност дефинисања утицаја температуре модула на његову ефикасност. Како би се ипак тај утицај на неки начин узео у обзир на основу зависности температуре модула и његове ефикасности коју приказује произвођач усвојена је константна вредност ефикасности од 15,2 %.

Физичке карактеристике фотонапонског панела представљене су табелом 5, док је на слици 15 дат његов изглед.

Табела 5 – Физичке карактеристике одабраног фотонапонског панела [26]

Тип	Luxor Eco Line P60/275
Број ћелија	60 (6 × 10)
Димензије [mm]	1640×992×35
Површина [m ²]	1,628
Тежина [kg]	18,5
Предње стакло	Каљено стакло дебљине 3,2 mm
Оквир	Елоксирана легура алуминијума



Слика 15 – Изглед фотонапонског панела произвођача Luxor [28]

8.2 Инвертор фотонапонског система и додатна опрема

Инвертор има улогу да једносмерну струју претвара у наизменичну. За јавне зграде, попут објекта у овом раду, у склопу инвертора постоји прекидач чији је задатак да читав систем одвоји од електродистрибуције у случају промена напона и фреквенције (адекватна вредност је око 50 Hz) [29]. Изглед инвертора приказан је на слици 16.



Слика 16 – SolarEdge инвертор [30]

Под додатном опремом подразумевају се каблови за спајање фотонапонских панела, као и носачи (слика 17) за исте. Нема потребе за коришћењем регулатора пуњења, односно контролера јер је реч о систему који не поседује батерије.



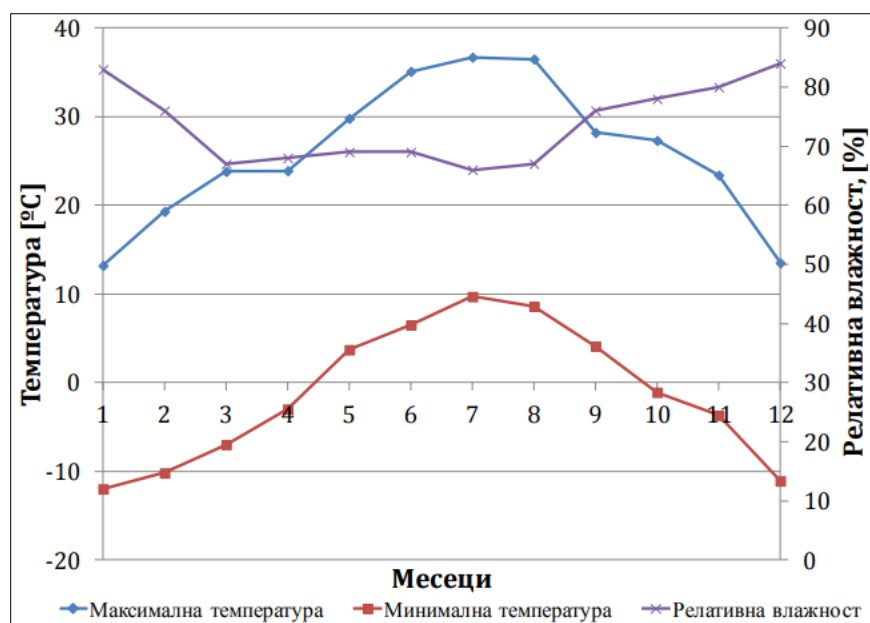
Слика 17 – Изглед носача фотонапонског панела [31]

9. Опис објекта

Стамбени објекат се састоји од три етажe и укупно садржи 42 просторије нето површине 479,98 m².

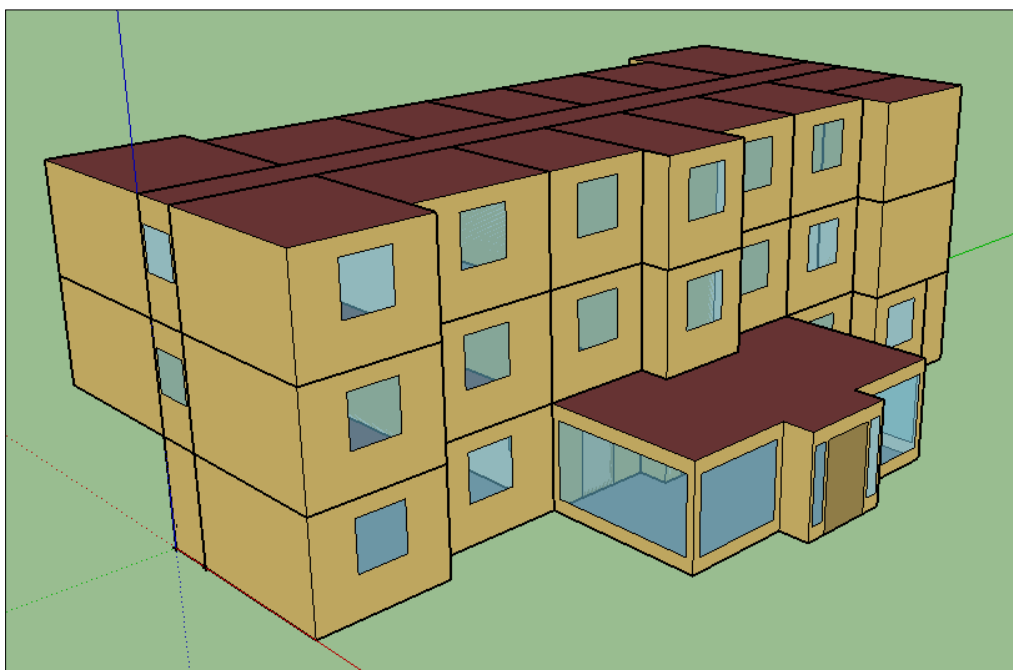
Енергетско понашање дома симулирано је коришћењем софтвера EnergyPlus (верзија 8.4.0) [24]. Софтвер узима у обзир све факторе који утичу на топлотне губитке и оптерећења у згради, као што су електрични уређаји, осветљење, присуство људи, сунчево зрачење, ветар, инфилтрација и осенченост [32,33]. Симулација је спроведена за реалне временске податке за град Крагујевац (Србија).

Слика 18 приказује временске податке, минималну и максималну температуру, као и релативну влажност ваздуха, по месецима за град Крагујевац из временске датотеке софтвера EnergyPlus.

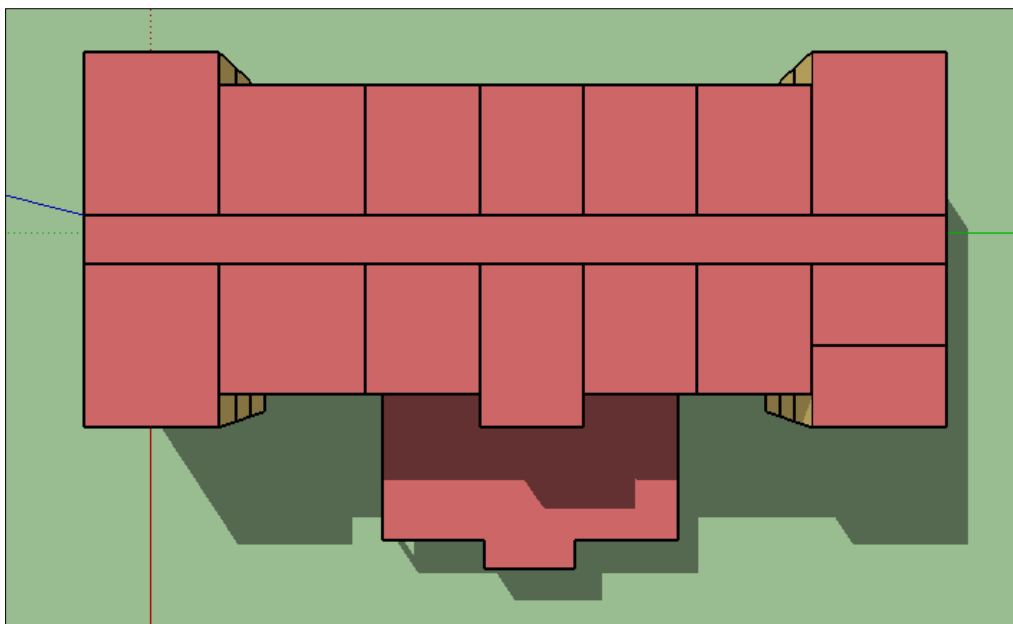


Слика 18 – Временски подаци за Крагујевац

Објекат поседује трокреветне и четворокреветне собе које обезбеђују боравак за 77 студената. Расположиве површине за једноставно постављање фотонапонских модула су површина крова објекта и површина крова ресторана (слика 19 и 20) [34].



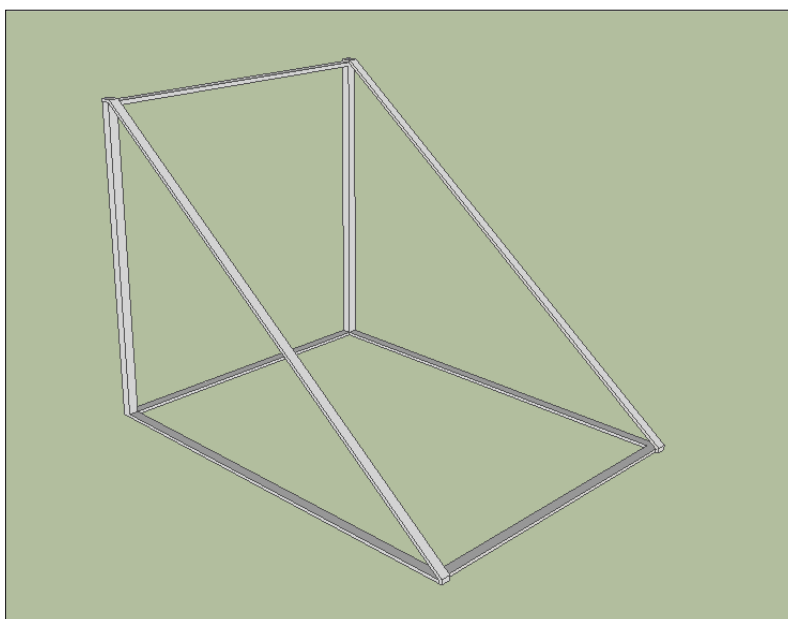
Слика 19 – Изометријски изглед



Слика 20 – Приказ крова објекта и крова ресторана

Због равне површине крова омогућено је путем постављања носача остварити оптималан годишњи угао постављања фотонапонских панела, који за територију града Крагујевца износи $37,5^\circ$ [35].

Постављање панела под одређеним углом доводи до усложњавања одабира носача, јер велики број носача у продаји није конструисан управо за ту вредност угла. Из тог разлога се уместо носача са слике 17 за монтирање панела користи носач приказан на слици 21.



Слика 21 – Носач фотонапонског панела

Адекватна удаљеност фотонапонских панела ће бити утврђена уз помоћ софтвера SketchUp, како би утицај освјетљења био минималан.

Присуство људи за спаваће собе, тоалете, купатила и ресторана дато је у табели 6. Детаљни годишњи обрасци (распореди) укључују присуство људи у дому током недеља (дана) предавања на факултетима, присуство током недеља трајања одмора, као и присуство студената у дому за време националних празника Републике Србије за 2017. годину [36]. Претпоставило се да добитак топлоте по особи износи 99 W, што је повезано са активношћу читања (седећи положај) [37]. Распореди присуства дефинисани су према активностима и понашању студената са оближњих факултета, који су смештени у одабраном дому.

Табела 6 – Боравак људи и електрично оптерећење по просторијама [38]

Просторија	Максималан број људи [-]	Потрошња за рад осветљења [W]	Потрошња електричних уређаја [W]
Једнокреветна соба	1	23	90
Трокреветна соба	3	27	270
Четворокреветна соба	4	36	360
Купатило	4	18	-
Тоалет	4	18	-
Ресторан	123	81	-

Распореди рада за осветљење одговарају распоредима присуства људи, са разликом када су светла искључена током спавања и када је ниво дневне светлости задовољавајући.

10. Потрошња електричне енергије у оквиру студентског дома

Циљ овог завршног рада јесте анализа могућности примене фотонапонских модула за подмиривање основне потрошње електричних уређаја (Случај 1) и подмиривање целокупне потрошње електричне енергије за рад осветљења (Случај 2).

Поред наведена два случаја у овом раду разматраће се и трећи случај, који се односи на подмиривање целокупне потрошње електричне енергије за рад осветљења и основну потрошњу електричне енергије електричних уређаја. Појам основне потрошње биће дефинисан у наставку рада.

У табели 6 приказани су присуство људи и снага осветљења и електричних уређаја у просторијама у којима бораве студенти. Највећа потрошња електричне енергије у објекту везује се за електричне уређаје који се налазе у ресторану (кухињи), у којој се врши припрема оброка у јутарњим, поподневним и вечерњим часовима.

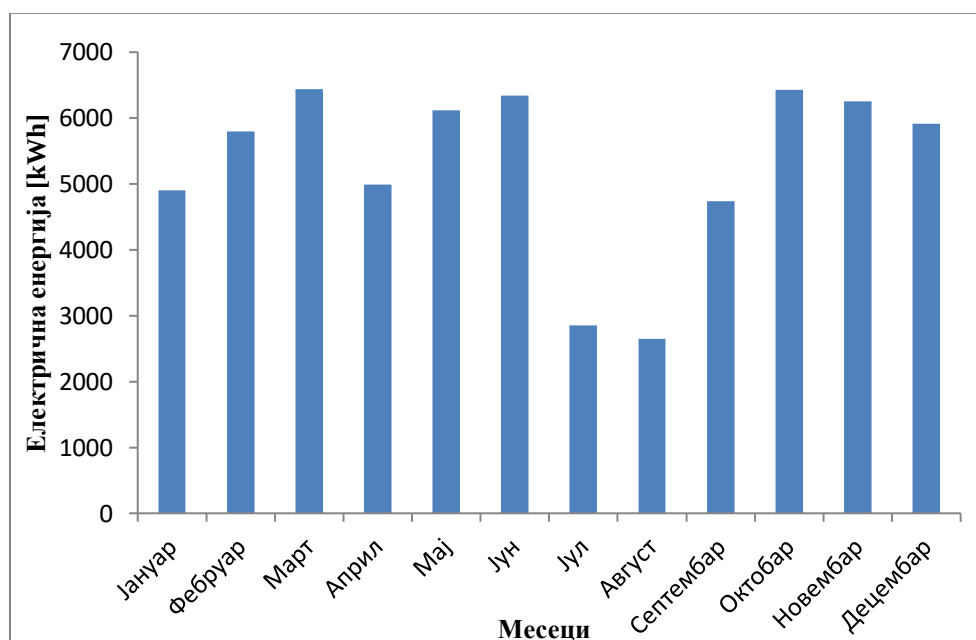
Како би се симулирао стварни рад ових уређаја, односно потрошња електричне енергије, употребљени су подаци о потрошњи електричне енергије прикупљени за 14 ресторана (комерцијалних кухиња) у Великој Британији [39]. Сви подаци о потрошњи електричне енергије су прикупљени искључиво за све уређаје за припрему и складиштење хране и не укључују потрошњу електричне енергије система за вентилацију кухиње (табела 7).

Табела 7 – Просечна укупна дневна потрошња електричне енергије уређаја за припрему и складиштење хране и уређаја за прање и сушење [38].

	Фрижидери	Замрзивачи	Остали уређаји за спремање хране	Шпорети и рерне
Потрошња [kWh]	13,81	39,17	6,08	35,71
	Остали расхладни уређаји	Машине за прање веша	Машине за сушење веша	Машине за прање судова
Потрошња [kWh]	70,13	6	13,76	12,96

Вредност потрошње електричне енергије уређаја за прање и сушење преузети су из каталога произвођача. Четири машине за прање веша и четири машине за сушење веша обезбеђују прање и сушење постељина, док се за прање судова користе четири судомашине. Треба напоменути да су подаци дати у претходној табели дефинисани за максимално присуство људи у дому. Другим речима потрошња електричне енергије уређаја одговара присуству људи [38].

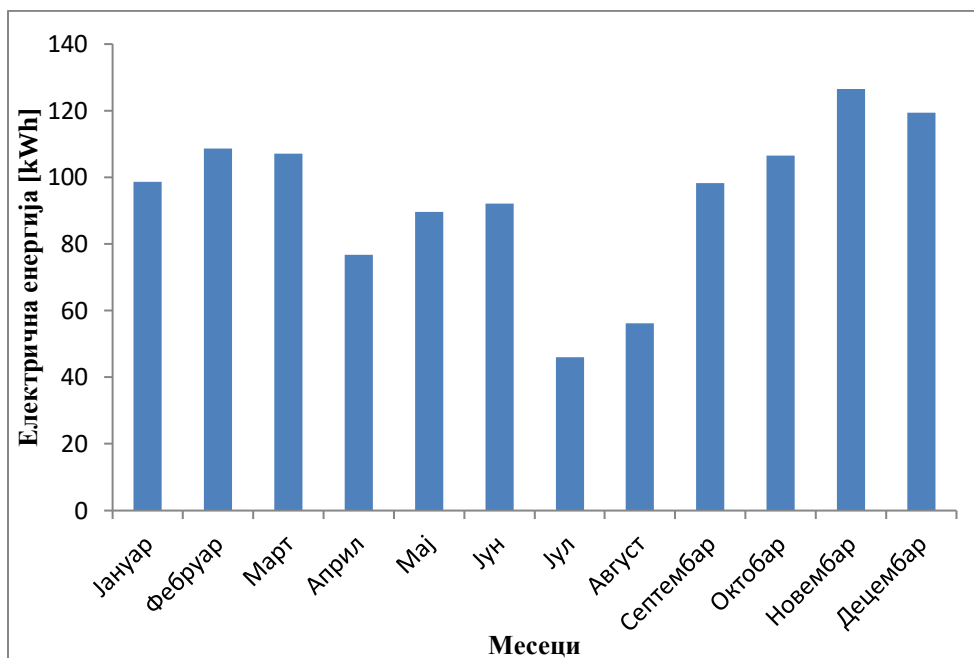
На слици 22 дата је потрошња енергије електричних уређаја по месецима.



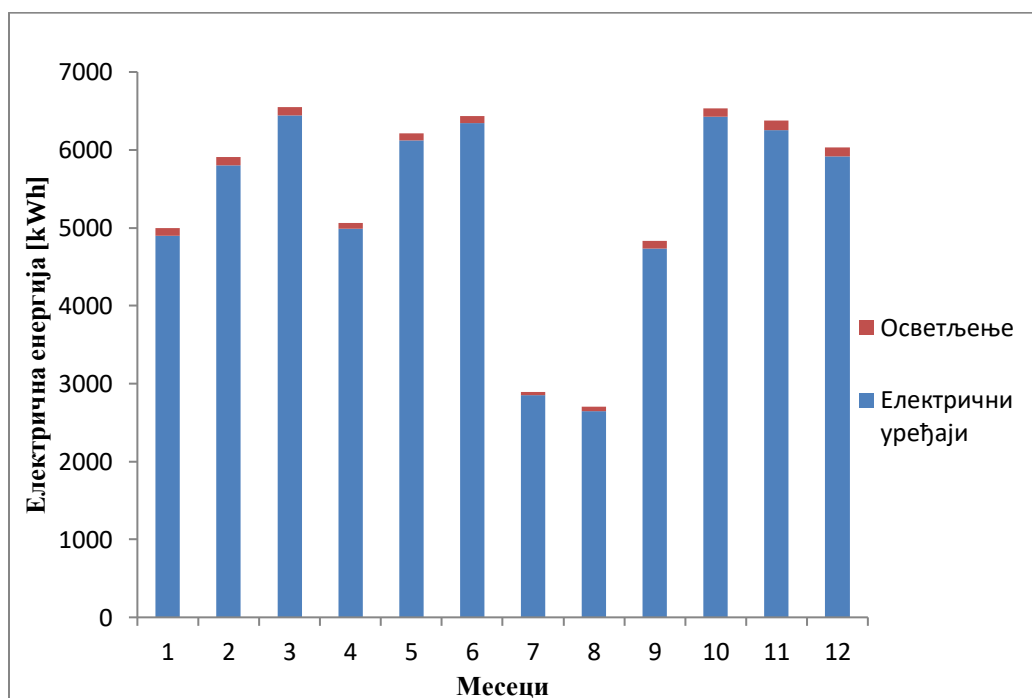
Слика 22 – Потрошња електричне енергије електричних уређаја

На слици 22 се види да је најмања потрошња електричне енергије електричних уређаја у августу и износи 2644,3 kWh. Разлог најмање потрошње електричне енергије у овом месецу је најмање присуство студената. Треба истаћи да се припрема топле потрошне воде одвија коришћењем гасног загрејача воде.

Приказ потрошње електричне енергије за рад осветљења дат је на слици 23, док је збирна потрошња електричних уређаја и осветљења дата на слици 24.



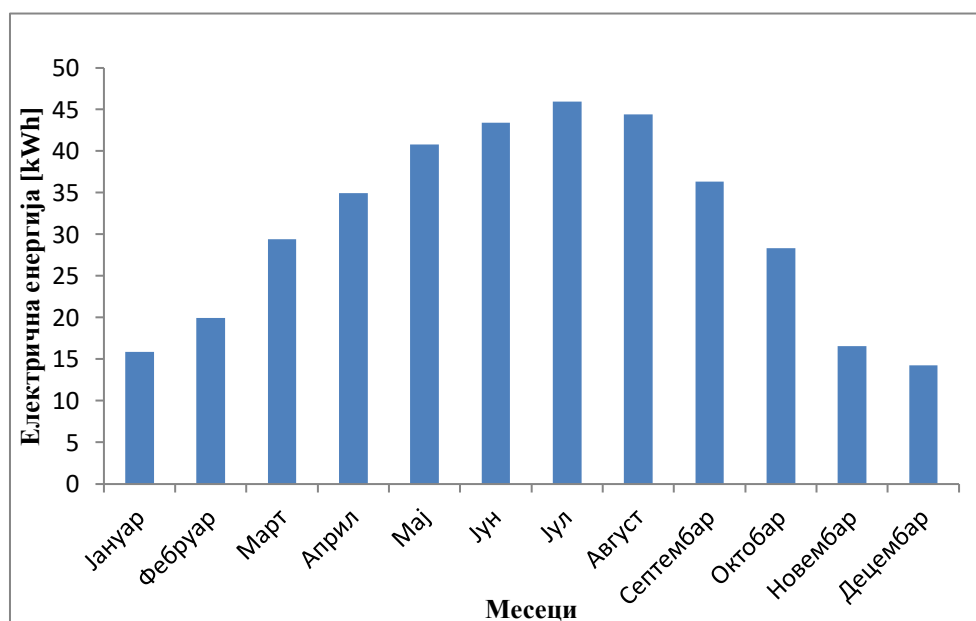
Слика 23 – Потрошња електричне енергије осветљења



Слика 24 – Збирна потрошња електричне енергије електричних уређаја и осветљења

11. Производња електричне енергије у оквиру студентског дома

Анализа примене фотонапонског модула укључује три различита случаја. Случај 1 подразумева производњу електричне енергије за подмиривање основне потрошње електричних уређаја. Случај 2 се односи на уградњу модула површине која обезбеђује подмиривање целокупне потрошње електричне енергије за рад осветљења. Случај 3 подразумева уградњу модула којима ће се подмити основна потрошња електричне енергије уређаја као и целокупна потрошња електричне енергије осветљења. Другим речима случај 3 представља комбинацију првог и другог случаја. Вредност произведене електричне енергије за сва три разматрана случаја се одређује на основу производње једног фотонапонског панела (слика 25).



Слика 25 – Произведена електрична енергија једног фотонапонског панела

Под појмом основне потрошње подразумева се потрошња која је једнака производу минималне месечне потрошње електричне енергије (у овом случају потрошње за месец август (2644,3 kWh)) и укупног броја месеци у току године. За анализирани објекат годишња основна потрошња износи:

$$2644,3 \cdot 12 = 31731,6 \text{ kWh} \quad (16)$$

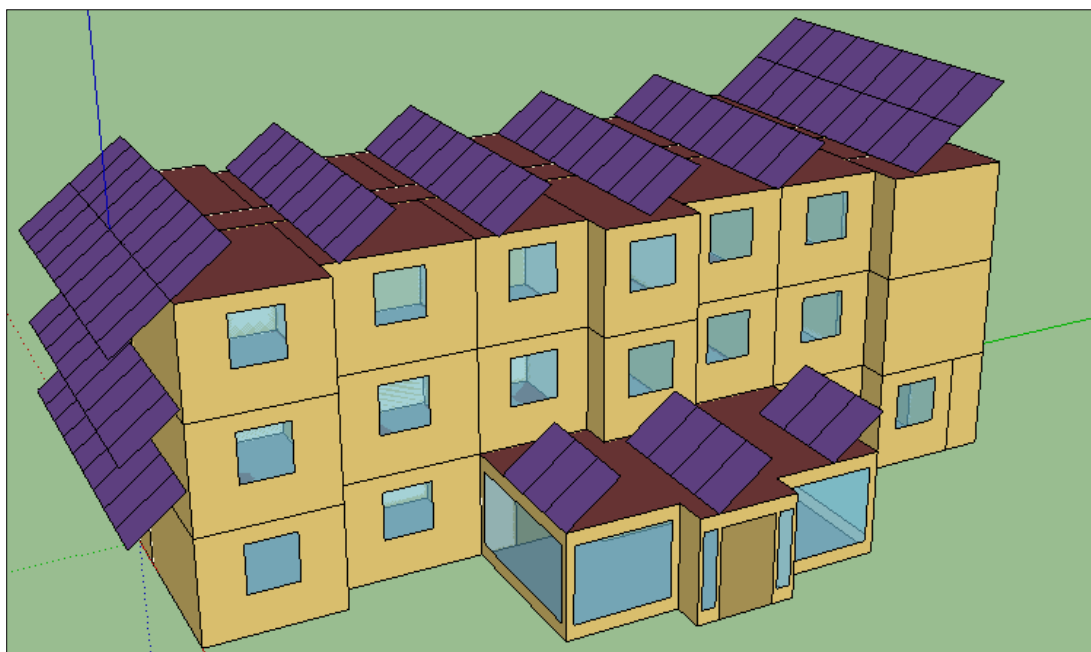
Како је укупна годишња производња једног фотонапонског панела 370,43 kWh (слика 25) следи да минималан број модула за подмиривање основне потрошње износи:

$$31731,6 / 370,43 \approx 86 \quad (17)$$

Добијеним бројем модула (86) би се задовољила основна потрошња али само у случају да одзраченост свих модула у сваком тренутку буде максимална могућа.

Постављањем 86 модула на расположиву површину крова објекта и крова ресторана и симулацијом енергетског понашања истог примећено је да због осенчености модула износ укупно произведене електричне енергије мањи од 31731,6 kWh.

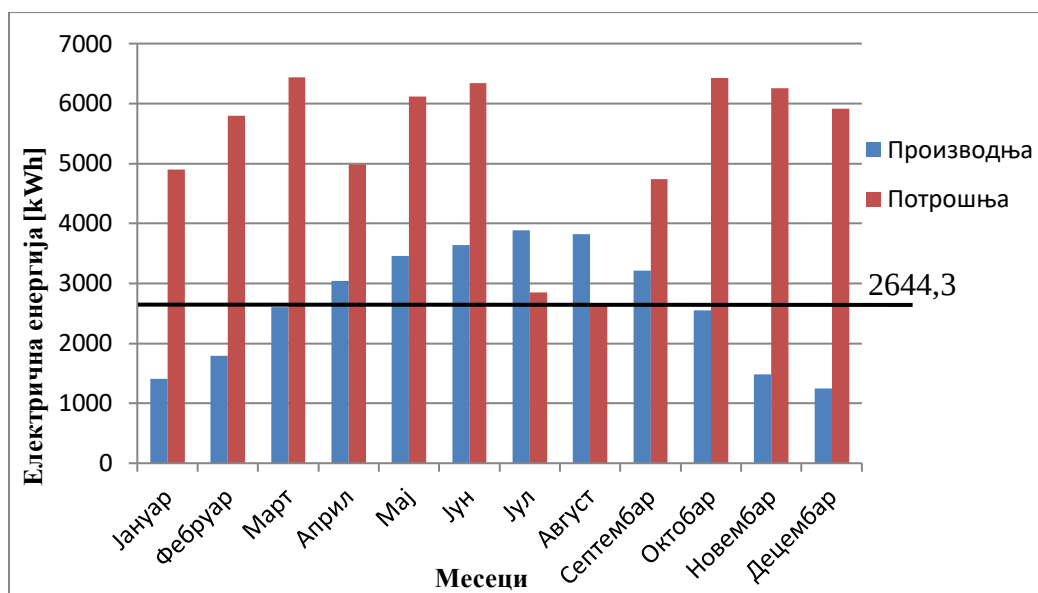
Уз помоћ софтвера Google SketchUp и EnergyPlus одређен је положај и број фотонапонских модула за који укупно произведена електрична енергија има минималну вредност од 31731,6 kWh. Добијен број модула је 96, а износ произведене електричне енергије 32134,88 kWh. Као што се може видети са слике 26 површине, које су као расположиве употребљене за постављање модула су кров објекта, јужни зид и кров ресторана.



Слика 26 – Начин постављања фотонапонских модула за Случај 1

Најповољније место за инсталирање фотонапонских модула јесте кров објекта. Један од разлога за то је најмања могућност заклањања модула како сенком суседних објеката, тако и сенком других фотонапонских модула.

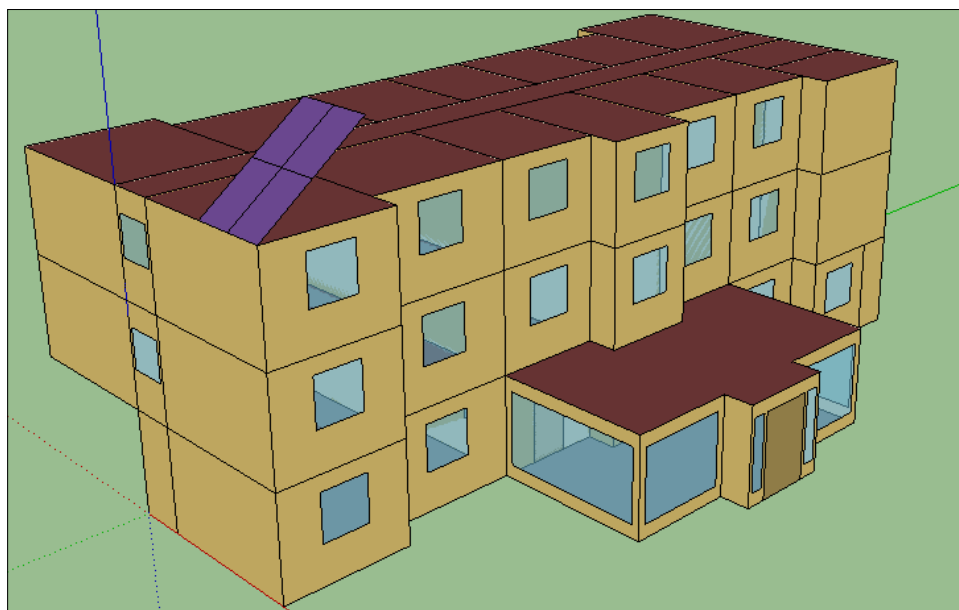
При инсталирању 96 фотонапонских модула остварује се производња електричне енергије приказана на слици 27.



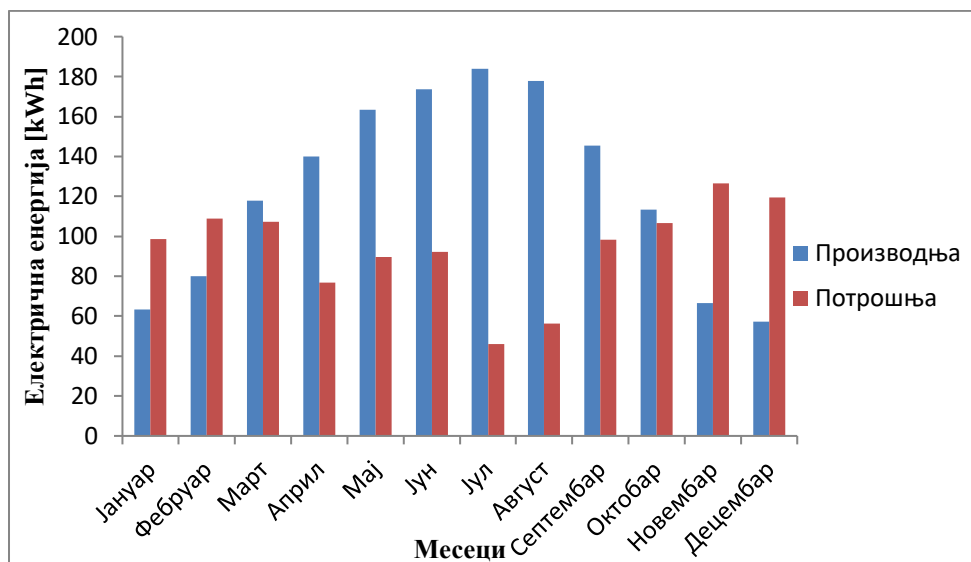
Слика 27 – Произведена и утрошена електрична енергија (Случај 1)

На слици је црном линијом приказана минимална месечна потрошња (2644,3 kWh) на основу које је одређена основна годишња потрошња. У месецима током зимског периода (новембар, децембар, јануар, фебруар) произведен је износ електричне енергије који је видно нижи од основне потрошње, али то је очекивано због мањег интензитета Сунчевог зрачења, појачане облачности, снега,... Мањак произведене електричне енергије током ових месеци надокнађен је током периода од априла до септембра. Укупно произведена електрична енергија износи 32134,88 kWh.

По истом принципу одређен је број модула који треба да подмири укупну потрошњу електричне енергије осветљења од 1126,24 kWh (са слике 23). Укупан број модула за овај случај износи 4 (слика 28 и 29).



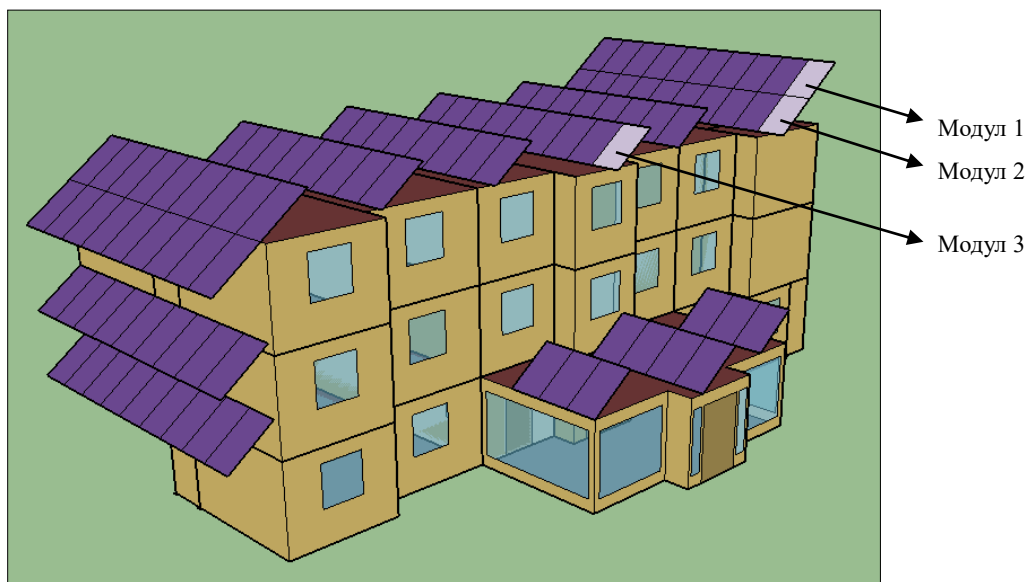
Слика 28 – Начин постављања фотонапонских модула за Случај 2



Слика 29 – Произведена и утрошена електрична енергија (Случај 2)

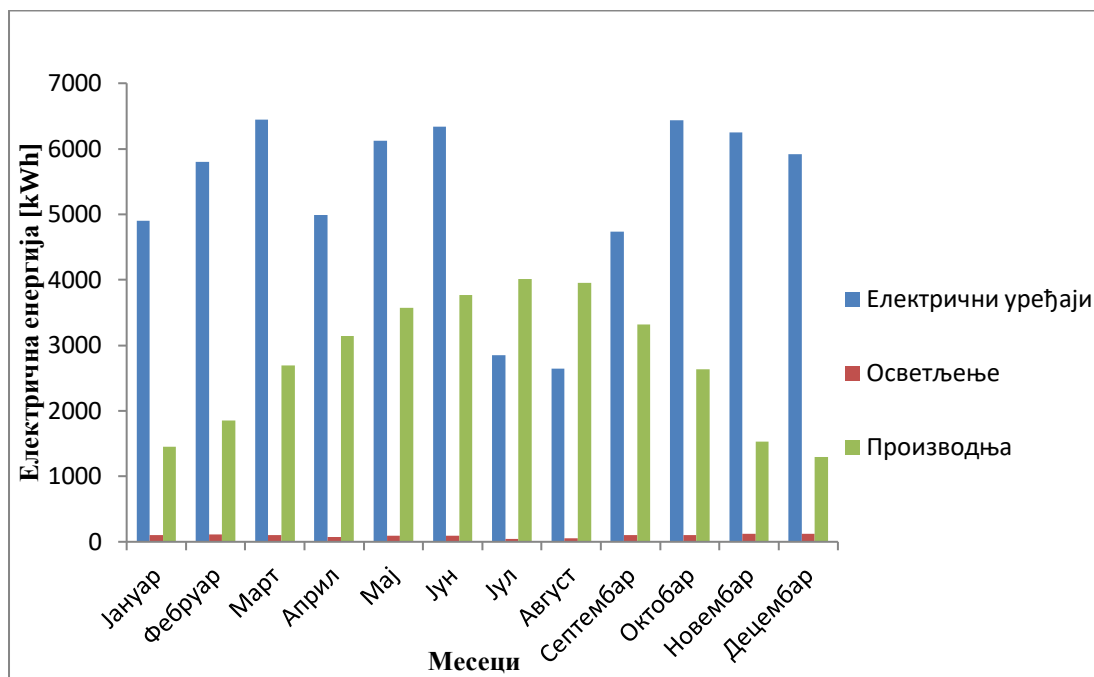
Овакав начин прорачуна је вршен за случај да инвеститор тренутно није у могућности да издвоји већу количину новчаних средстава за уградњу 96 модула. На слици 28 се види да овакав начин постављања модула пружа велику могућност касније надоградње путем инсталирања додатних модула.

Код Случаја 3 укупно произведена електрична енергија мора бити већа или једнака збиру основне утрошене електричне енергије електричних уређаја и укупне електричне енергије утрошене при раду осветљења (32857,84 kWh). Спровођењем истог поступка прорачуна као и код претходна два случаја усвојен је неопходан број фотонапонских модула од 99. На слици 30 дат је приказ постављених фотонапонских модула за Случај 3. Треба нагласити да су сви фотонапонски системи оријентисани ка југу.



Слика 30 – Начин постављања фотонапонских модула за Случај 3

У односу на Случај 1 вршено је додавање три модула који су означени на претходној слици. Укупно произведена електрична енергија овог фотонапонског система има вредност 33215,6 kWh (слика 31).



Слика 31 – Произведена и утрошена електрична енергија (Случај 3)

Поред потпуног подмиривања Случаја 3 инсталирањем 99 фотонапонских модула остварује се и суфицит производње у јулу и августу у вредности од 1116,88 kWh, односно 1248,21 kWh респективно.

Приказ месечне производње електричне енергије за сва три разматрана случаја дат је у табели 8.

Табела 8 –Производња електричне енергије са различитим бројем модула

Месеци	Производња [kWh]		
	4 модула	96 модула	99 модула
Јануар	63,46	1407,24	1453,21
Фебруар	79,92	1791,61	1850,56
Март	117,77	2608,41	2695,40
Април	139,87	3043,36	3145,49
Мај	163,24	3455,39	3573,39
Јун	173,60	3638,43	3764,62
Јул	183,90	3880,08	4013,28
Август	177,69	3820	3948,77
Септембар	145,27	3212,34	3319,45
Октобар	113,48	2551,29	2635,40
Новембар	66,40	1476,82	1525,36
Децембар	57,15	1249,90	1290,66
Укупно	1481,74	32134,88	33215,60

12. Анализа исплативости уградње фотонапонског модула

Како се економска анализа спроводи за три случаја неопходно је познавати инвестиционе трошкове за све фотонапонске системе, као и остварене годишње економске уштеде њиховом применом. Инвестициони трошкови за сва три разматрана случаја су представљени наредном табелом.

Табела 9 – Инвестициони трошкови уградње фотонапонског модула [40]

Делови система	Цена [РСД]		
	Случај 1	Случај 2	Случај 3
Фотонапонски модул Luxor 275 W	1713600	71400	1767150
Инвертор	449463	56168	449463
Уградња и додатна опрема	960000	40000	990000
Укупно	3123063	167568	3206613

За Случај 1 и Случај 3 користио би се мрежни инвертор бренда Fronius, а за Случај 2 инвертор Solax X1-1.5 Mini [41,42].

Трошкови и уштеде електричне енергије утрошене за рад електричних уређаја и осветљења израчунате су множењем износа утрошене електричне енергије у kWh и цене електричне енергије, дефинисане према тарифном систему плаћања датом у табели 10.

Табела 10 – Тарифни систем плаћања утрошене електричне енергије [38]

Домаћинства	Виша дневна тарифа [РСД/ kWh]	Нижа дневна тарифа [РСД/ kWh]
Зелена зона: 0 – 350 kWh	5,962	1,491
Плава зона: 350 – 1600 kWh	8,943	2,236
Црвена зона: преко 1600 kWh	17,887	4,472

Приказане вредности цене електричне енергије не укључују порезе.

Тарифни систем плаћања се састоји од две тарифне категорије: више дневне тарифе и ниже дневне или ноћне тарифе. Износи утрошене и уштеђене електричне енергије у обе тарифне категорије одређени су на основу распореда рада електричних уређаја и осветљења. С тим у вези усвојено је да је 85 % електричне енергије утрошено током трајања више дневне тарифе, а 15 % током трајања ниже дневне тарифе [38].

Приликом спровођења економске анализе претпостављено је да ће се вишак произведене електричне енергије, уз дозволу предузећа за дистрибуцију електричне енергије (ЕПС), убацивати у електричну мрежу, а да ће се током периода мање производње електричне енергије у односу на захтевану, из електричне мреже узимати електрична енергија.

Вредности годишњих новчаних уштеда израчунатих према износима неутрошене односно произведене електричне енергије приказане су у табелама 11, 12 и 13 за сва три анализирана случаја.

Табела 11 – Уштеда за Случај 1

Месеци	Потрошња [kWh]	Производња [kWh]	Уштеда [РСД]
Јануар	4899,54	1407,24	22339,63
Фебруар	5800,70	1791,61	28441,42
Март	6440,72	2608,41	41407,90
Април	4989,64	3043,36	48312,60
Мај	6120,01	3455,39	54853,46
Јун	6341,10	3638,43	57759,10
Јул	2850,34	3880,08	61595,22
Август	2644,30	3820	60641,54
Септембар	4735,85	3212,34	50995,04
Октобар	6430,21	2551,29	40501,16
Новембар	6251,94	1476,82	23444,19
Децембар	5913,85	1249,90	19841,85
Укупно	510133,11		

Табела 12 – Уштеда за Случај 2

Месеци	Потрошња [kWh]	Производња [kWh]	Уштеда [РСД]
Јануар	98,75	63,46	1007,35
Фебруар	108,74	79,92	1268,74
Март	107,14	117,77	1869,64
Април	76,75	139,87	2220,40
Мај	89,66	163,24	2591,35
Јун	92,06	173,60	2755,79
Јул	46,07	183,90	2919,34
Август	56,26	177,69	2820,81
Септембар	98,29	145,27	2306,07
Октобар	106,55	113,48	1801,44
Новембар	126,60	66,40	1054,14
Децембар	119,36	57,15	907,18
Укупно	23522,25		

Табела 13 – Уштеда за Случај 3

Месеци	Потрошња [kWh]	Производња [kWh]	Уштеда [РСД]
Јануар	4998,29	1453,21	23069,42
Фебруар	5909,44	1850,56	29377,17
Март	6547,86	2695,40	42788,82
Април	5066,39	3145,49	49933,86
Мај	6209,67	3573,39	56726,73
Јун	6433,16	3764,62	59762,36
Јул	2896,41	4013,28	63709,86
Август	2700,56	3948,77	62685,79
Септембар	4834,14	3319,45	52695,43
Октобар	6536,76	2635,40	41836,32
Новембар	6378,54	1525,36	24214,64
Децембар	6033,21	1290,66	20488,91
Укупно	527289,30		

Након израчунавања годишњих уштеда приступило се израчунавању периода отплате, чије су вредности за сва три разматрана случаја приказане у табели 14.

Табела 14 – Период отплате инвестиција за анализиране случајеве

	Случај 1	Случај 2	Случај 3
Инвестициони трошкови [РСД]	3123063	167568	3206613
Укупна годишња уштеда [РСД]	510133,11	23522,25	527289,30
Период отплате [год.]	6,12	7,12	6,08

Према претходној табели најнеповољнија солуција је Случај 2 јер је период отплате највећи. Разлог томе јесте цена инвертора која је по kW видно већа у односу на цену инвертора који је одабран за Случај 1, тј Случај 3. За остала два случаја период повраћаја има приближно исту вредност од 6,1 год.

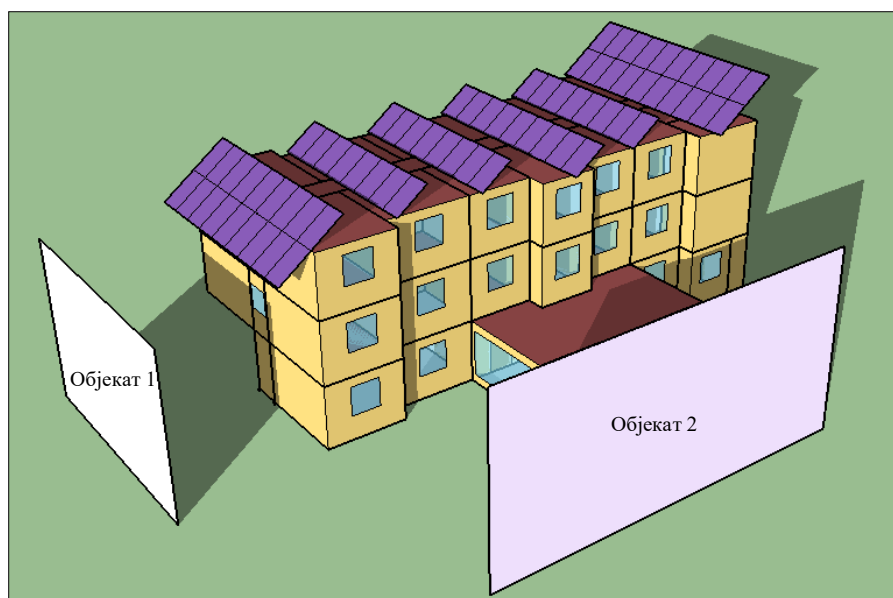
Претходно приказани подаци су добијени под претпоставком да се ефикасност система током година рада не мења. У стварности то није случај (табела 4). Уколико се узме у обзир промена ефикасности фотонапонског система са старењем модула (табела 4) вредности периода отплате ће имати следеће вредности (табела 15).

Табела 15 – Период отплате инвестиција за анализиране случајеве при узимању у обзир промене ефикасности модула током периода рада

	Случај 1	Случај 2	Случај 3
Инвестициони трошкови [РСД]	3123063	167568	3206613
Просечна годишња уштеда [РСД]	483351,12	22287,33	499606,61
Период отплате [год.]	6,46	7,52	6,42

Годишња уштеда је израчуната према просечној десетогодишњој вредности произведене електричне енергије при утицају промене ефикасности датој у каталогу произвођача.

У претходном делу рада објашњен је поступак одређивања површине озрачености фотонапонског система за три различита случаја потрошње електричне енергије. Претпостављено је да су једине расположиве површине за постављање модула кров објекта, кров ресторана и јужни зид објекта и да исти објекат није окружен суседним објектима. Када би студентски дом био окружен другим грађевинским објектима, због великог утицаја осенчења, једина расположива површина за уградњу модула би била површина крова дома (слика 32). Ово представља случај који се најчешће може срести у пракси. За овај случај (Случај 4) број инсталираних фотонапонских модула био би 71 (слика 32). Укупно произведена електрична енергија овог фотонапонског система износи 25969,4 kWh, чиме се обезбеђује 81,84 % потреба основне потрошње електричне енергије електричних уређаја.



Слика 32 – Начин постављања фотонапонских модула за Случај 4

Инвестициони трошкови за разматрани Случај 4 су представљени табелом 16.

Табела 16 – Инвестициони трошкови уградње фотонапонског модула за Случај 4 [40]

Делови система	Цена [РСД]
Фотапонски модул Lухог 275 W	1267350
Инвертор	391391
Уградња и додатна опрема	710000
Укупно	2368741

Одабран је инвертор произвођача Касо [43]. Коришћењем исте методе прорачуна као у претходна три случаја добијени су периоди отплате фотонапонског модула (табела 17 и 18).

Табела 17 – Период отплате инвестиција за случај 4

Инвестициони трошкови [РСД]	2368741
Укупна годишња уштеда [РСД]	412257,78
Период отплате [год.]	5,75

Табела 18 – Период отплате инвестиција за случај 4 при узимању у обзир промене ефикасности модула током периода рада

Инвестициони трошкови [РСД]	2368741
Просечна годишња уштеда [РСД]	390614,25
Период отплате [год.]	6,06

Израчуната вредност периода отплате за Случај 4 износи 5,75 и 6,06 год. У поређењу са претходно анализираним случајевима период отплате је нижи за приближно 4 месеца. Разлог лежи у чињеници да је утицај осенчења објекта и суседних модула мањи. На приближно идентичну вредност периода отплате анализираних случајева утицала је вредност цене електричне енергије која је за све случајеве била иста.

Закључак

Потенцијал који поседује Сунчева енергија је огроман, а са све већим развојем човечанства остварују се могућности за што бољу примену тог вида енергије. Фотонапонски системи представљају један корак напред у погледу очувања животне средине. Њихов основни недостатак јесте ниска ефикасност, где, посматрано за одабрани фотонапонски панел, она има вредност од 15,2 %.

Овај рад путем примене адекватних софтвера (Google SketchUp, EnergyPlus) приказује данашње стање у погледу примене оваквог начина производње електричне енергије. Овим радом истражена је могућност примене фотонапонског система за подмиривање потреба за електричном енергијом неопходном за рад електричних уређаја једног студентског дома на територији града Крагујевца. Анализа укључује приближно реалне распореде присуства људи и потрошње електричне енергије у дому. Разматрана су три случаја: Случај 1 - подмиривање потреба основне потрошње електричне енергије уређаја; Случај 2 - обезбеђивање свеукупне потрошње електричне енергије осветљења и Случај 3 - покривање збирне основне потрошње уређаја и укупне потрошње осветљења. За сва три случаја симулирано је енергетско понашање модула и спроведена економска анализа. Економска анализа је подразумевала одређивање периода повраћаја инвестиционих трошкова са и без занемаривања утицаја смањења ефикасности модула током периода њиховог рада. Између осталог одређен је и број фотонапонских модула за случај када би студентски дом био окружен другим објектима (Случај 4). Добијене вредности периода отплате су: 6,12 (6,46) (Случај 1); 7,12 (7,52) (Случај 2); 6,08 (6,42) (Случај 3) и 5,75 (6,06) (Случај 4) година. Може се закључити да је период повраћаја релативно низак и приближно исти за случајеве 4, 3 и 1. Ове вредности би биле значајно ниже уз подстицаје државе било кроз субвенционисану куповину опреме или субвенционисану продају произведене електричне енергије.

Литература

- [1] С. Зрнић, Ж. Тулум, Грејање и климатизација са применом соларне енергије, Научна књига, Београд 1991.
- [2] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Nuclear_fusion_in_the_Sun (приступљено 15.07.2019.).
- [3] https://www.nasa.gov/pdf/637244main_MysteriesOfTheSun_Book.pdf (приступљено 15.07.2019.).
- [4] http://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/2_3_%20zracenje%20crnog%20tjela.pdf (приступљено 15.07.2019.).
- [5] <https://earthsky.org/space/what-is-the-electromagnetic-spectrum> (приступљено 15.07.2019.).
- [6] Б. Тодоровић, Пројектовање постројења за централно грејање, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2009.
- [7] Н. Лукић, М. Бабић, Соларна енергија, Машински факултет у Крагујевцу, Центар за РГЕ, Крагујевац, 2008.
- [8] С. Шкулетић, З. Секулић, Производња електричне енергије, Завод за уџбенике и наставна средства, Подгорица, 2019.
- [9] <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources> (приступљено 15.08.2019.).
- [10] <https://www.iea.org/renewables2017/> (приступљено 10.08.2019.).
- [11] S. A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, No. 3, 2004, pp 231-295.
- [12] <https://sustainability.williams.edu/green-building-basics/passive-solar-design> (приступљено 10.08.2019.).
- [13] B. Jiang, J. Ji, H. Yi, The influence of PV coverage ratio on thermal and electrical performance of photovoltaic-Trombe wall, Renewable energy, Vol. 33, No. 11, 2008, pp 2491-2498.
- [14] <http://www.erpecnewslive.com/article/1236/australias-energy-security--24/7-concentrated-solar-thermal-power-plus-molten-salt-storage> (приступљено 10.08.2019.).
- [15] <http://www.chemistrylearner.com/silicon.html> (приступљено 10.08.2019.).
- [16] K. Jäger, O. Isabella, A. H. M. Smets, R. A. C. M. M. van Swaaij, M. Zeman, Solar Energy: Fundamentals, Technology and Systems, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2014.
- [17] <https://www.solarlifetech.com/about> (приступљено 10.08.2019.).
- [18] <https://www.solarpowerrocks.com/solar-basics/how-long-solar-panels-last/> (приступљено 10.08.2019.).

- [19] <https://www.forbes.com/sites/peterdiamandis/2014/09/02/solar-energy-revolution-a-massive-opportunity/#7ca058b6c900> (приступљено 10.08.2019.).
- [20] <http://southerntiersolarworks.org/learn-more> (приступљено 28.08.2019.).
- [21] <https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/> (приступљено 10.08.2019.).
- [22] <https://www.vox.com/2016/2/10/10960848/solar-energy-duck-curve> (приступљено 10.08.2019.).
- [23] https://mafiadoc.com/project-spectrum-manual-of-ideas_59c166eb1723ddd1fb9d3251.html (приступљено 05.09.2019.).
- [24] 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, Vol. 33, 2001, pp 319-331.
- [25] https://www.suncica.co.rs/media/wysiwyg/pdf/solarni_paneli/Ebook_prevod.pdf (приступљено 01.08.2019.).
- [26] <https://zerohomebills.com/wp-content/uploads/Luxor-Solar-LX-270-290W-Poly-156-60-Data-sheet-on-ZEROhomebills.com-by-solaranna.pdf> (приступљено 29.08.2019.).
- [27] <https://zerohomebills.com/wp-content/uploads/Luxor-Solar-Guarantee-Declaration-Eco-Line-zerohomebills.com-by-solaranna.pdf> (приступљено 29.08.2019.).
- [28] <https://www.suncica.co.rs/solarni-paneli-i-oprema/solarni-paneli/solarni-polikristalni-panel-luxor-275w.html> (приступљено 28.08.2019.).
- [29] <http://www.bogatic.rs/ler/cms/download/studija-solarna-energija-1.pdf> (приступљено 01.08.2019.).
- [30] <https://www.civicsolar.com/product/solaredge-20kw-480vac-inverter-se20k-usr48nnu4> (приступљено 01.08.2019.).
- [31] <https://www.suncica.co.rs/solarni-paneli-i-oprema/nosac-solarnih-panela-za-ravan-krov-za-montazu-dva-panela.html> (приступљено 26.08.2019.).
- [32] M. Bojić, N. Nikolić, D. Nikolić, J. Skerlić, I. Miletić, Toward a positive-netenergy residential building in Serbian conditions, Applied Energy, Vol. 88, No. 7, 2011, pp 2407-2419.
- [33] N. Lukić, N. Nikolić, S. Timotijević, S. Tasić, Influence of an unheated apartment on the heating consumption of residential building considering current regulations - case of Serbia, Energy and Buildings, Vol. 155, 2017, pp 16-24.

- [34] Л. Цветановић, Прорачун топлотног оптерећења једног студентског дома на територији града Крагујевца, завршни рад, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [35] J. Skerlić, M. Bojić, Optimizing performances of solar collectors by using EnergyPlus and Hooke Jeevs algorithm, 41th International HVAC&R conference, December 1-3. 2010, Belgrade, Serbia, Conference proceedings, pp 472-479.
- [36] N. Nikolić, N. Lukić, V. Dagović, A. Nešović, M. Matejić, Impact of the methods of occupancy schedule defining on people heat gains within a student dormitory, 49th International Congress and Exhibition on Heating, Refrigeration and Air-conditioning, Belgrade, Serbia, 2018, 5th -7th of December, pp 207-216.
- [37] ASHRAE Handbook of Fundamentals, ASHRAE, Atlanta, 2005.
- [38] <http://oaji.net/articles/2019/766-1557774091.pdf> (приступљено 26.08.2019.).
- [39] S. Mudie, E. Essah, A. Grandison, R. Felgate, Electricity use in the commercial kitchen, International Journal of Low-Carbon Technologies, Vol. 11, No. 1, 2016, pp 66-74.
- [40] <https://www.suncica.co.rs/> (приступљено 29.08.2019.).
- [41] <https://www.suncica.co.rs/solarni-paneli-i-oprema/invertori-on-the-grid/on-grid-mrezni-invertor-fronius-eco-27-0-3-s-light.html> (приступљено 13.09.2019.).
- [42] <https://www.suncica.co.rs/solarni-paneli-i-oprema/invertori-on-the-grid/mrezni-invertor-x1-1-5-mini.html> (приступљено 13.09.2019.).
- [43] <https://www.suncica.co.rs/solarni-paneli-i-oprema/invertori-on-the-grid/on-grid-mrezni-invertor-kaco-blueplanet-20-0-tl3.html> (приступљено 13.09.2019.).