

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**



**Назив студијског програма: Машинско инжењерство**

**Ниво студија: Основне академске студије**

**Модул: Енергетика и процесна техника**

**Предмет: Енергија и животна средина**

**Број индекса: 3/2013**

**Вукашин С. Шћекић**

**Утицај појединих фактора на ефикасност прикупљања сунчеве енергије фотонапонским панелима**

**Завршни рад**

**Комисија за преглед и одбрану:**

**1. Др Давор Кончаловић-ментор**

**2. \_\_\_\_\_**

**3. \_\_\_\_\_**

**Датум одбране: \_\_\_\_\_**

**Оцена: \_\_\_\_\_**

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да експериментално испита и опише утицај различитих фактора на ефикасност прикупљања сунчеве енергије фотонапонским панелима и то:

- утицај облачности;
- утицај угла и евентуалног праћења положаја Сунца током дана;
- утицај температура панела и;
- утицај запрљаности панела на његову ефикасност.

Препоручена литература:

- **Небојша Лукић, Милун Бабић.**  
*Соларна енергија.* 2008
- **Masters, Gilbert M.** *Renewable and Efficient Electric Power Systems,*  
Stanford Universty.

У Крагујевцу,  
новембар 2016. године

Ментор:

---

Др Давор Кончаловић

## Резиме

Соларна енергија представља енергију Сунчевог зрачења која се може манифестовати у облику топлоте и светлости. То је обновљив и неограничен извор енергије, који поред непосредног зрачења које греје нашу планету и ствара климатске услове у свим појасевима, узрокује и стално обнављање енергије ветра, морских струја, таласа, водених токова... Ова енергија се сматра обновљивим извором енергије, зато што се њеним коришћењем не ремети равнотежа и ток материје и енергије у природи, а нам је доступна на сваком кораку и представља потпуно бесплатан извор енергије.

У овом завршном раду биће испитане излазне карактеристике ПВ панела у зависности од услова експлоатације. Биће приказани резултати који су добијени на одговарајућој локацији, који ће дати јасну слику о потенцијалу коришћења ПВ панела, где на основу експерименталних резултата можемо закључити колика је стварна оправданост коришћења ПВ панела у различитим условима експлоатације. Поред тога, овај рад за циљ има популарисање и упознавање са могућностима добијања електричне енергије из фотонапонских система, односно ПВ панела.

**Кључне речи:** Соларна енергија, Фотонапонски панели, Ефикасност

## Abstract

Solar energy represents the energy of solar radiation, which can be manifested in the shape of heat and light. It is a renewable and unlimited source of energy, which creates optimal climate conditions for all zones with the radiation and the heat it generates, as well as the one that causes the constant renewal of wind energy, sea currents, waves and water currents. This energy is considered a renewable source of energy because it doesn't create disturbances in the balance and flow of matter and all the energy in the nature, and we have it available at every step of the way as a completely free source of energy. In this final paper, we will test the output characteristics of the PV panels depending on the conditions of the exploitation.

The results obtained at the appropriate location will be shown, which will give us a vivid picture about the potential usage of PV panels, and we will be able to conclude based on the experimental results just how real the justification of usage of PV panels is, in different conditions of exploitation. Nevertheless, this work aims to popularize and familiarize the possibilities of obtaining electricity through photo-voltaic systems, i.e. the PV panels.

**Keywords:** Solar energy; Photovoltaic panels; Efficiency

## Списак коришћених скраћеница и страних речи

|                                                     |   |                 |
|-----------------------------------------------------|---|-----------------|
| Обновљиви извори енергије                           | - | OIE             |
| Светска метеролошка организација                    | - | WMO             |
| Фотонапонска                                        | - | PV              |
| Струја кратког споја                                | - | I <sub>sc</sub> |
| Напон празног хода                                  | - | U <sub>oc</sub> |
| Волтметар                                           | - | V               |
| Амперметар                                          | - | A               |
| Републички Хидрометеоролошки Завод                  | - | RHMZ            |
| Национална Ваздухопловна и Свемирска Администрација | - | NASA            |
| Јединица рада у апсолутном систему мера             | - | erg             |

## Списак илустрација

|                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Слика 1.- Слојеви масе Сунца.....                                                                                                                                                                                          | 3  |
| Слика 2.- Подела сунчевог спектра .....                                                                                                                                                                                    | 4  |
| Слика 3.- Просек дневне енергије глобалног зрачења .....                                                                                                                                                                   | 6  |
| Слика 4.- Земља у односу на правац сунчевих зрака у положају зимских равнодневнице .....                                                                                                                                   | 13 |
| Слика 5.- Географска ширина $l$ , часовни угао $h$ и деклинација сунца $d$ .....                                                                                                                                           | 14 |
| Слика 6.- Углови положаја Сунца- $\alpha$ - азумит Сунца према југу; $\beta$ - висина сунца; $\gamma$ - Сунчано-зидни азумит; $\theta$ - упадни угао; $\Sigma$ - угао нагиба површине на коју доспева сунчево зрачење..... | 15 |
| Слика 7.- Попречни пресек соларне ћелије .....                                                                                                                                                                             | 18 |
| Слика 8.- Ефикасност соларних панела (%) .....                                                                                                                                                                             | 19 |
| Слика 9.- Поређење цена соларних панела (€/W) .....                                                                                                                                                                        | 20 |
| Слика 10.- Соларна ћелија, модул, панели .....                                                                                                                                                                             | 20 |
| Слика 11.- Редно везивање соларних ћелија .....                                                                                                                                                                            | 21 |
| Слика 12.- Паралелно везивање соларних ћелија .....                                                                                                                                                                        | 21 |
| Слика 13.- Поликристални панел .....                                                                                                                                                                                       | 22 |
| Слика 14.- Вентилатор .....                                                                                                                                                                                                | 23 |
| Слика 15.- Инфрацрвени безконтактни мерач .....                                                                                                                                                                            | 23 |
| Слика 16.- Дигитални мултиметри .....                                                                                                                                                                                      | 24 |
| Слика 17.- ПВ панели у експлоатацији .....                                                                                                                                                                                 | 25 |
| Слика 18.- Снага ПВ панела по ведром дану (24.04.2017).....                                                                                                                                                                | 26 |
| Слика 19.- Снага ПВ панела по полуоблачном дану (17.04.2017) .....                                                                                                                                                         | 27 |
| Слика 20.- Снага ПВ панела по облачном дану (28.04.2017) .....                                                                                                                                                             | 28 |
| Слика 21.- Зависност снага ПВ панела од спољних атмосферских утицаја.....                                                                                                                                                  | 29 |
| Слика 22.- Интезит сунчевог зрачења ( $W/m^2$ ) .....                                                                                                                                                                      | 29 |
| Слика 23.- Ефикасност ПВ панела у односу на временске услове.....                                                                                                                                                          | 30 |
| Слика 24.- Средње вредности ефикасности панела за различите дане.....                                                                                                                                                      | 30 |
| Слика 25.- Једноосно ротациони модул.....                                                                                                                                                                                  | 32 |
| Слика 26.- Двоосно ротациони модул.....                                                                                                                                                                                    | 32 |
| Слика 27.- Покретни и фиксни панел.....                                                                                                                                                                                    | 32 |
| Слика 28.- Интезит сунчевог зрачења (26.04.2017).....                                                                                                                                                                      | 33 |
| Слика 29.- Поређење електричне снаге покретног и фиксног ПВ панела.....                                                                                                                                                    | 34 |
| Слика 30.- Ефикасност фиксног и покретног панела .....                                                                                                                                                                     | 35 |
| Слика 31.- Хлађење панела .....                                                                                                                                                                                            | 36 |
| Слика 32.- Интезит сунчевог зрачења ( $W/m^2$ ), (27.04.2017) .....                                                                                                                                                        | 37 |
| Слика 33.- Утицај хлађења на снагу ПВ панела.....                                                                                                                                                                          | 38 |
| Слика 34.- Поређење промена температуре нехлађеног и хлађеног ПВ панела .....                                                                                                                                              | 39 |
| Слика 35.- Ефикасност нехлађеног и хлађеног панела .....                                                                                                                                                                   | 39 |
| Слика 36.- Запрљан ПВ панел.....                                                                                                                                                                                           | 40 |
| Слика 37.- Интезит Сунчевог зрачења ( $W/m^2$ ) (25.04,2017).....                                                                                                                                                          | 41 |
| Слика 38.- Утицај запрљаности ПВ панела на снагу истог за сунчан дан .....                                                                                                                                                 | 42 |
| Слика 39.- Ефикасност чистог и запрљаног панела по ведром времену .....                                                                                                                                                    | 43 |
| Слика 40.- Интезит Сунчевог зрачења ( $W/m^2$ ), (28.04.2017).....                                                                                                                                                         | 43 |
| Слика 41.- Утицај запрљаности ПВ панела на снагу истог за облачан дан .....                                                                                                                                                | 45 |
| Слика 42.- Ефикасност чистог и запрљаног панела по облачном времену .....                                                                                                                                                  | 45 |
| Слика 43.- Панели под углом од $60^\circ$ (лево) и $30^\circ$ (десно) .....                                                                                                                                                | 46 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Слика 44.-</b> Интезитет сунчевог зрачења ( $W/m^2$ ), (1.05.2017).....  | 47 |
| <b>Слика 45.-</b> Интезитет сунчевог зрачења ( $W/m^2$ ), (15.04.2017)..... | 48 |
| <b>Слика 46.-</b> Зависност снаге од нагиба угла.....                       | 50 |
| <b>Слика 47.-</b> Ефикасност панела у зависности од угла ПВ панела .....    | 50 |
| <b>Слика 48.-</b> Средње ефикасности панела за различите углове.....        | 52 |

## Списак табела

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Табела 1.-</b> Хемијски састав Сунца .....                                                                                  | 2  |
| <b>Табела 2.-</b> Дневна (по месецима) и годишња инсолација у (kWh/m <sup>2</sup> ) за поједине градове и места у Србији ..... | 5  |
| <b>Табела 3.-</b> Месечни просек трајања инсолације за град Аранђеловац (часови).....                                          | 6  |
| <b>Табела 4.-</b> Интезитет екстратерестријског сунчевог зрачења, директног зрачења, и дифузиони фактор .....                  | 8  |
| <b>Табела 5.-</b> Средњи месечни соларни угао у односу на хоризонталну раван(°) .....                                          | 8  |
| <b>Табела 6.-</b> Месечни просек ведрих дана.....                                                                              | 9  |
| <b>Табела 7.-</b> Месечни просек дифузионог зрачења на хоризонталну површину (kWh/m <sup>2</sup> /dan) (4) .....               | 10 |
| <b>Табела 8.-</b> Албеда за различите површине ( % ).....                                                                      | 12 |
| <b>Табела 9.-</b> Средња месечна вредност албеда за град Аранђеловац (0 ÷ 1) .....                                             | 12 |
| <b>Табела 10.-</b> Средња месечна деклинација за град Аранђеловац (°).....                                                     | 14 |
| <b>Табела 11.-</b> Средњи месечни часовни угао за град Аранђеловац (°).....                                                    | 14 |
| <b>Табела 12.-</b> Азумит сунца за град Аранђеловац .....                                                                      | 16 |
| <b>Табела 13.-</b> Излазни параметри ПВ панела по ведром дану .....                                                            | 26 |
| <b>Табела 14.-</b> Излазни параметри ПВ панела по полуоблачном дану .....                                                      | 27 |
| <b>Табела 15.-</b> Излазни параметри ПВ панела по облачном дану .....                                                          | 28 |
| <b>Табела 16.-</b> Излазни параметри ПВ фиксног панела по ведром дану .....                                                    | 33 |
| <b>Табела 17.-</b> Излазни параметри ПВ покретног панела по ведром дану .....                                                  | 34 |
| <b>Табела 18.-</b> Излазни параметри ПВ панела за фиксни панел под углом 44° .....                                             | 37 |
| <b>Табела 19.-</b> Излазни параметри ПВ панела за фиксни панел са хлађењем под углом 44° .....                                 | 38 |
| <b>Табела 20.-</b> Излазни параметри ПВ панела за фиксни запрљан панел под углом 44°, за сунчан дан .....                      | 41 |
| <b>Табела 21.-</b> Излазни параметри ПВ панела за фиксни чист панел под углом 44°, за сунчан дан .....                         | 42 |
| <b>Табела 22.-</b> Излазне карактеристике запрљаног фиксног панела по облачном времену 44                                      |    |
| <b>Табела 23.-</b> Излазне карактеристике чистог фиксног панела по облачном времену.....                                       | 44 |
| <b>Табела 24.-</b> Излазне карактеристике ПВ панела за угао од 0° .....                                                        | 47 |
| <b>Табела 25.-</b> Излазне карактеристике ПВ панела за угао од 30° .....                                                       | 48 |
| <b>Табела 26.-</b> Излазне карактеристике ПВ панела за угао од 60° .....                                                       | 49 |
| <b>Табела 27.-</b> Излазне карактеристике ПВ панела за угао од 90° .....                                                       | 49 |
| <b>Табела 28.-</b> Средње вредности зрачења за углове 0° и 90° ( kWh/m <sup>2</sup> /dan) .....                                | 51 |

# Садржај

|                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. УВОД.....</b>                                                                      | <b>1</b>  |
| <b>2. ЕНЕРГИЈА И ПОТЕНЦИЈАЛ СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА .....</b>                                   | <b>2</b>  |
| 2.1. <i>Порекло сунчеве енергије .....</i>                                               | 3         |
| 2.2. <i>Сунчева енергија на Земљи.....</i>                                               | 4         |
| 2.3. <i>Инсолација.....</i>                                                              | 4         |
| 2.4. <i>Директно и дифузионо сунчево зрачење .....</i>                                   | 6         |
| 2.4.1. <i>Директно Сунчево зрачење .....</i>                                             | 7         |
| 2.4.2. <i>Дифузионо Сунчево зрачење.....</i>                                             | 9         |
| 2.4.3. <i>Рефлектовано зрачење.....</i>                                                  | 11        |
| <b>3. СОЛАРНА ГЕОМЕТРИЈА .....</b>                                                       | <b>13</b> |
| 3.1. <i>Углови положаја Сунца.....</i>                                                   | 15        |
| <b>4. АНАЛИЗА ФОТОНАПОНСКИХ ЋЕЛИЈА.....</b>                                              | <b>17</b> |
| 4.1. <i>Принцип рада соларне ћелије.....</i>                                             | 17        |
| 4.2. <i>Материјал и технологија израде соларних ћелија.....</i>                          | 18        |
| 4.3. <i>Соларни панели .....</i>                                                         | 20        |
| <b>5. ЕКСПЕРИМЕНТ .....</b>                                                              | <b>22</b> |
| 5.1. <i>Опрема за експеримент.....</i>                                                   | 22        |
| 5.2. <i>Резултати мерења и њихово тумачење.....</i>                                      | 24        |
| 5.2.1. <i>Утицај Сунчевог зрачења на излазне параметре ПВ панела .....</i>               | 25        |
| 5.2.1.1. <i>Разлика између покретног и фиксног панела на излазне карактеристике.....</i> | 31        |
| 5.2.2. <i>Утицај температуре на излазне параметре ПВ панела .....</i>                    | 36        |
| 5.2.3. <i>Утицај задржаности на излазне параметре ПВ панела .....</i>                    | 40        |
| 5.2.4. <i>Утицај нагиба ПВ панела на излазне параметре .....</i>                         | 46        |
| <b>6. ЗАКЉУЧАК.....</b>                                                                  | <b>53</b> |
| <b>7. ЛИТЕРАТУРА.....</b>                                                                | <b>54</b> |

## 1. Увод

Све интензивније коришћење фосилних горива током 20-ог века, довело је до значајног смањења тих резерви. Са друге стране повећан број становништва са 2.5 милијарди 1950 године на предпостављених 10 милијарди 2050 године, са побољшањем комфора живота доводи до огромног повећања потрошње енергије. Проблеми су постали очигледни, и након енергетске кризе 1973 године кренуло се са изналажењем нових извора енергије како би се криза учинила подношљивом. Као највећи извор енергије на Земљи, али пре свега извор који не загађује животну средину, Сунце је нашло примену у обновљивим изворима енергије. Услед растуће цене фосилних горива, као и јачање свести о очувању животне средине, све је више интересовања за коришћењем соларне енергије.

Соларна енергија се може употребити на два основна начина. Први је претварање зрачења у топлотну енергију, док је други претварање у електричну енергију.

Основна хипотеза од које се пошло у овом раду је да се испита експерименталним путем да ли и колики ће утицај имати различити услови експлоатације панела на излазне карактеристике истог. У овом завршном раду биће испитане како излазне карактеристике панела, тако и услови под којим је могуће остварити што боље резултате, односно што већу ефикасност панела. Вршена су мерења и посматрани случајеви који се најчешће срећу у експлоатацији панела, сумирани постигнути резултати, и донети одговарајући закључци који ће побољшати ефикасност панела.

Завршни рад се састоји из увода, четири поглавља, закључка, предговора и литературе.

У првом поглављу *Енергија и потенцијал Сунчевог зрачења* дат је приказ хемијског састава Сунца, као и потенцијал Сунца. Било је нешто речи и о пореклу Сунчевог зрачења, енергији која стиже на Земљу, инсолацији као једном јако битном параметру, подели сунчевог зрачења на директно, дифузионо и рефлектовано сунчево зрачење.

Друго поглавље се односило на *Соларну геометрију* са подтачком која је везана за углове положаја Сунца, чиме се у потпуности могао описати један фотонапонски систем. Сви подаци који су приказани у табелама, а велика већина баш у ова два поглавља, то су вредности које смо добили за мерено подручје за град Аранђеловац са сајта NASA, и представља бесплатну базу података. За ова два поглавља можемо рећи да представљају улазне параметре за пројектовање фотонапонских система, зато што нам дају целокупну слику о енергији Сунчевог зрачења.

У трећем поглављу *Анализа фотонапонских ћелија* представљен је кратак историјат соларних ћелија, затим принцип рада соларне ћелије, материјал и технологија израде соларних ћелија, као и соларни панели који представљају склоп повезаних соларних ћелија у једну целину.

Завршно четврто поглавље носи назив *Експеримент*, где је прво представљена опрема за извођење истог, а затим приказани резултати мерења и њихово тумачење. Ти резултати су графички представљени, и у складу са тим су донети одговарајући закључци као и предлози за побољшање ефикасности соларних панела.

У литератури је дат преглед коришћења литературе током израде овог завршног рада.

## 2. Енергија и потенцијал сунчевог зрачења

Сунце је Земљи најближа звезда и захваљујући његовој гравитацији, наша планета по елиптичној путањи кружи око њега. Наша звезда се око своје осе окрене за 25 дана (екватор), односно за 33 дана на половима, што указује на њено флуидно стање (заправо стање плазме). Сунце је ужарена лопта, масе од  $1,99 \cdot 10^{30}$  kg, средње густине од  $1410 \text{ kg/m}^2$  пречника  $1\,391\,980 \text{ km}$  (фотосфера), која у спољашњем слоју садржи око 75% водоника, који се у унутрашњости, под високим притиском и температуром која достиже десетине милиона Келвина (процена је  $13\,600\,000 \text{ K}$ ), у току процеса термонуклеарне физије претвара у хелијум. Та термонуклеарна физија производи огромну количину енергије која се излучује у Космос. Сунчева луминисценција (исијавање) износи  $3,83 \cdot 10^{33} \text{ erg/sek}$  или  $3,83 \cdot 10^{20} \text{ MW}$ . Средња температура површине Сунца (далеко од „термонуклеарног реактора“ у унутрашњости) износи  $5800 \text{ K}$ . После брзином светлости пређеног пута од  $149\,597\,892 \text{ km}$  (средње удаљење Земље од Сунца), Сунчево зрачење стиже до Земље. Од укупне Сунчеве енергије, на горњу границу Земљине атмосфере стигне  $174,3 \cdot 10^9 \text{ MW}$ , што представља њен  $4,55 \cdot 10^{-10}$  део. (1)

На Сунцу је детектовано око 67 различитих елемената, али већина њих је толико мало заступљено да инструменти једва могу да их детектују. У табели доле приказана је заступљеност 10 најчешћих елемената на Сунцу. (2)

| Елемент    | Проценат од укупног броја атома | Проценат од укупне масе Сунца |
|------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Водоник    | 92                              | 73,4                          |
| Хелијум    | 7.8                             | 25,0                          |
| Угљеник    | 0,03                            | 0,3                           |
| Азот       | 0,008                           | 0,1                           |
| Кисеоник   | 0,06                            | 0,8                           |
| Неон       | 0,008                           | 0,1                           |
| Магнезијум | 0,002                           | 0,05                          |
| Силицијум  | 0,003                           | 0,07                          |
| Сумпор     | 0,002                           | 0,04                          |
| Гвожђе     | 0,004                           | 0,2                           |

Табела 1.- Хемијски састав Сунца (2)

Потенцијал енергије сунчевог зрачења је огроман, томе говори и чињеница да је енергија Сунчевог зрачења 170 пута већа од енергије укупних резерви угља у свету, и да је сунчева енергија која стигне на површину Земље у току само 6 часова довољна да задовољи све светске потребе на годишњем нивоу. Што се тиче потенцијала сунчеве енергије у Србији оно представља 16,7% од укупног искористивог потенцијала ОИЕ.

Ради поређења, просечне вредности глобалног зрачења за територију Немачке износи око  $1000 \text{ kWh/m}^2$ , док је за Србију та вредност око  $1400 \text{ kWh/m}^2$ .

## 2.1. Порекло сунчеве енергије

Порекло Сунчеве енергије открио је и објаснио *Hans Albert Bethe* (1906-2005. године) 1938. године. Он је показао да се на Сунцу енергија ствара у термонуклеарном процесу фузије водоника у хелијуму. Површина Сунца која се види са Земље (слика 1) назива се фотосфера и има просечну температуру око  $6000^\circ\text{C}$  и притисак од 0.01 бар, а дебљине је од неколико стотина километара (C). Са спољне стране фотосфере је хромосфера (B), дебљине 3 000 до 10 000 km, која се састоји од ужареног водоника. Изнад хромосфере је корона (A), развучен омотач од гасова мале густине, чији слој варира од више стотина хиљада до преко милион километара. (3)

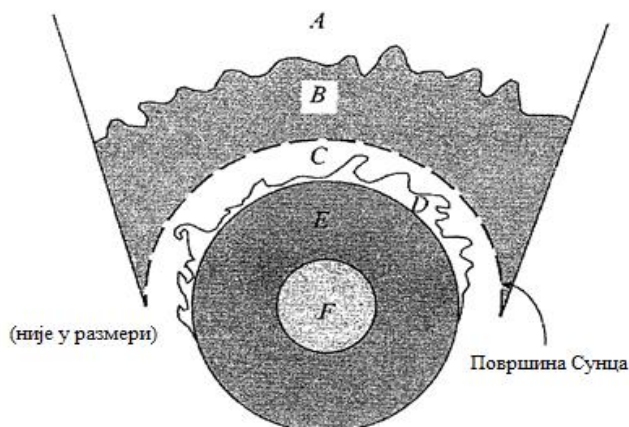
У дубини Сунчеве масе у језгру Сунца(F) енергија се ствара термонуклеарним реакцијама и пробија кроз масу E. Температура од  $15 \cdot 10^6 \text{ K}$ , са притиском од  $70 \cdot 10^9$  земаљског притиска омогућава фузију лакших честица(језгро водоника) и стварање течних честица(језгра хелијума) па је водоник „гориво“ Сунчаног „нуклеарног реактора“. Фузијом се сматра процес у коме се честице атома водоника спајају формирајући један атом хелијума уз губитак мање количине масе, која се појављује као енергија према Ајнштајновом закону:

$$E=mc^2$$

где је  $E$  произведена енергија,  $m$  је изгубљена маса, а  $c$  брзина светлости.

Највећи део сунчеве енергије преноси се високофреквентним електромагнетним таласима, првенствено гама зрацима, који се пробијају према фотосфери, ометани разним интеракцијама са електромагнетним честицама. Губитак енергије на том путу умањује фреквенцију и температуру зрачења, тако да се добија вредност око  $6000^\circ\text{C}$ . Са сунчеве површине навећи део енергије се емитује фреквенцијом видљиве светлости.

Снага емисије Сунца је око  $63 \text{ MW/m}^2$  са површине фотосфере, а само мали део овог зрачења доспева на Земљу. На границу Земљине атмосфере стиже  $1350 \text{ W/m}^2$ . (3)



Слика 1. - Слојеви масе Сунца (3)

Пошто се у нуклеарним реакцијама на Сунцу губи маса ( $4,5 \cdot 10^6$  t/s), Сунце ће се једног дана угасити и нестати, што ће се догодити, с обзиром на њену садашњу масу, за неколико милијарди година. (3)

## 2.2. Сунчева енергија на Земљи

Енергија створена у језгру Сунца доспева на Земљу у виду електромагнетних таласа. Средњи топлотни флуks Сунчевог зрачења на површини Земљине атмосфере (екстратерестијално зрачење) назива се соларном константом и износи  $I_0 = 1376 \text{ W/m}^2$  (табела 4). Међутим, на промену интензитета током године утиче и одстојање Сунца, а оно се мења због благо елиптичне путање Земље. Највеће екстратерестијско зрачење је  $1417 \text{ W/m}^2$  при најближем положају Земље према Сунцу, а најслабије када је Земља најудаљенија од Сунца када износи  $1328 \text{ W/m}^2$ . Расподела Сунчевог зрачења на Земљи се може дати на следећи начин: од укупног годишњег Сунчевог терестијалног зрачења, које износи просечно  $343 \text{ W/m}^2$ , 30% отпада на Земљин алbedo, 25% апсорбују гасови и аеросоли (облаци), а 45% загрева површину Земље (водене и копнене површине). Терестијално зрачење је Сунчево зрачење које после проласка кроз Земљину атмосферу доспева на Земљу. Сунчев спектар садржи зрачења таласних дужина мањих од 100 нанометара па све до 3 микрометра. Основна подела електромагнетног зрачења је на јонизујуће ( $\lambda < 100 \text{ nm}$ , гама и икс зраци) и нејонизујуће зрачење ( $\lambda > 100 \text{ nm}$ ). На срећу, разорно јонизујуће зрачење не продире кроз Земљину атмосферу. Нејонизујуће зрачење са Сунца се може поделити на ултравиолетно, видљиво и инфрацрвено (слика 2). (1)

| Невидљиво зрачење |                | Видљиво зрачење |       |        |      |           |        |                             | Невидљиво зрачење |  |
|-------------------|----------------|-----------------|-------|--------|------|-----------|--------|-----------------------------|-------------------|--|
|                   | Ултраљубичасто | Љубичасто       | Плаво | Зелено | Жуто | Нараџасто | Црвено | Инфрацрвено (краткоталасно) |                   |  |
| 100               | 400            | 425             | 490   | 575    | 585  | 650       | 700    |                             | 14000             |  |

Слика 2.- Подела сунчевог спектра (1)

## 2.3. Инсолација

Количина Сунчевог зрачења на Земљиној површини зависи од много фактора: географска ширина места, годишњег доба, доба дана, чистоће атмосфере, облачности, оријентације и нагиба површине. Овај податак је веома битан јер се преко њега врши прорачун исплативости уређаја који користе Сунчево зрачење. Просечно Сунчево зрачење, на годишњем нивоу на јединичну хоризонталну површину, назива се годишња инсолација (или само инсолација) и веома је важан метеоролошки податак за посматрану локацију на Земљи. У следећој табели су приказани подаци о средњој инсолацији за градове и места у Србији, по месецима и збирно на годишњем нивоу.

| Место у Србији | Јануар | Фебруар | Март | Април | Мај  | Јун  | Јул  | Август | Септембар | Октобар | Новембар | Децембар | Годишње |
|----------------|--------|---------|------|-------|------|------|------|--------|-----------|---------|----------|----------|---------|
| Аранђеловац    | 1.42   | 2.27    | 3.34 | 4.25  | 5.30 | 5.81 | 5.97 | 5.38   | 3.87      | 2.61    | 1.50     | 1.18     | 1306.7  |
| Београд        | 1.42   | 2.27    | 3.34 | 4.25  | 5.30 | 5.81 | 5.97 | 5.38   | 3.87      | 2.61    | 1.50     | 1.18     | 1306.7  |
| Киkinda        | 1.35   | 2.24    | 3.39 | 4.40  | 5.42 | 5.85 | 5.93 | 5.34   | 3.85      | 2.59    | 1.48     | 1.10     | 1306.7  |
| Крагујевац     | 1.42   | 2.27    | 3.34 | 4.25  | 5.30 | 5.81 | 5.97 | 5.38   | 3.87      | 2.61    | 1.50     | 1.17     | 1306.7  |
| Ниш            | 1.59   | 2.42    | 3.41 | 4.13  | 5.08 | 5.75 | 6.00 | 5.42   | 3.95      | 2.67    | 1.62     | 1.28     | 1317.65 |
| Нови Сад       | 1.40   | 2.27    | 3.38 | 4.28  | 5.33 | 5.80 | 5.94 | 5.28   | 3.85      | 2.53    | 1.43     | 1.12     | 1295.75 |
| Сомбор         | 1.40   | 2.27    | 3.38 | 4.28  | 5.33 | 5.80 | 5.94 | 5.28   | 3.85      | 2.53    | 1.43     | 1.12     | 1295.75 |
| Суботица       | 1.31   | 2.24    | 3.22 | 4.25  | 5.28 | 5.70 | 5.77 | 5.12   | 3.78      | 2.44    | 1.38     | 1.04     | 1262.9  |
| Трстеник       | 1.64   | 2.39    | 3.36 | 4.11  | 4.96 | 5.36 | 5.92 | 5.26   | 3.85      | 2.64    | 1.60     | 1.32     | 1299.4  |
| Ваљево         | 1.44   | 2.25    | 3.26 | 4.11  | 5.12 | 5.67 | 5.91 | 5.26   | 3.82      | 2.54    | 1.46     | 1.15     | 1277.5  |
| Вршац          | 1.35   | 2.24    | 3.39 | 4.40  | 5.42 | 5.85 | 5.93 | 5.34   | 3.85      | 2.59    | 1.48     | 1.10     | 1306.7  |
| Златибор       | 1.64   | 2.43    | 3.43 | 4.12  | 4.93 | 5.67 | 5.97 | 5.28   | 3.90      | 2.62    | 1.58     | 1.33     | 1306.7  |

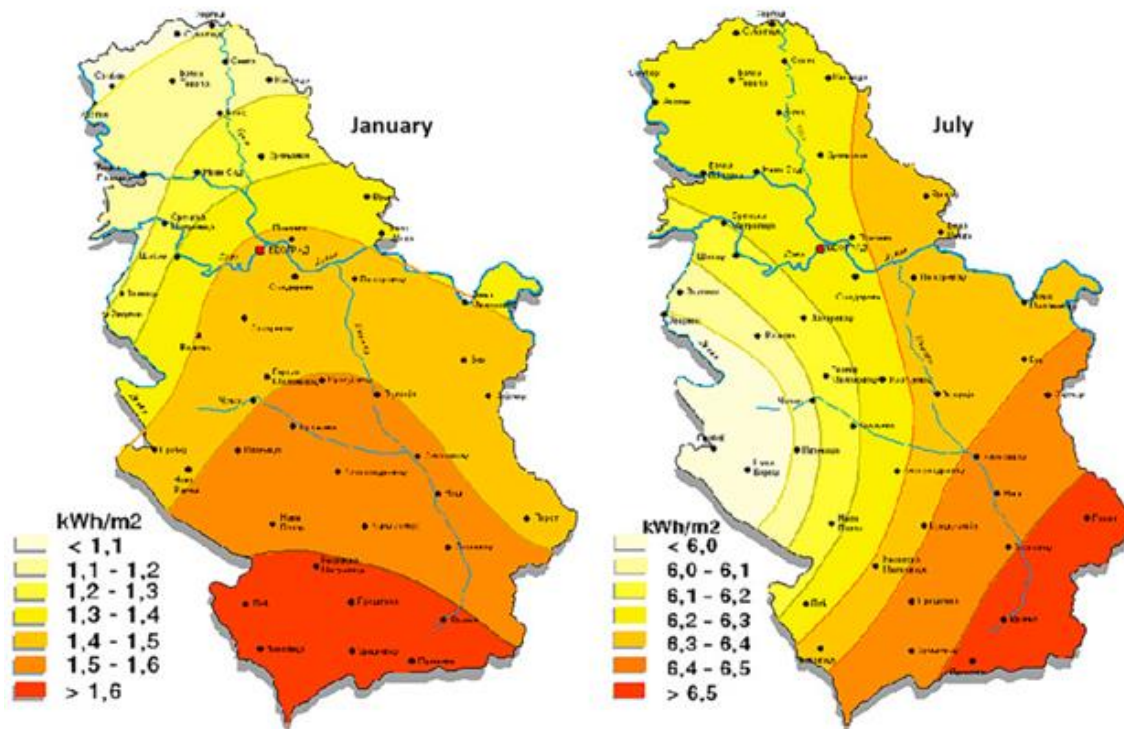
Табела 2.- Дневна (по месецима) и годишња инсолација у (kWh/m<sup>2</sup>) за поједине градове и места у Србији (4)

Пошто је инсолација јако битан податак за прорачун исплативости уређаја за коришћење сунчеве енергије, у наредној табели је дат месечни просек трајања инсолације за град Аранђеловац, као и слика на којој су представљени дневни просек глобалног зрачења за површину нагнуту под углом за месец Јануар и Јул за Србију.

| Месец  | Јан  | Феб  | Мар  | Апр  | Мај  | Јун  | Јул  | Авг  | Сеп  | Окт  | Нов  | Дец  |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Просек | 9.28 | 10.5 | 11.9 | 13.4 | 14.7 | 15.4 | 15.1 | 14.0 | 12.5 | 11.0 | 9.68 | 8.93 |

Табела 3.- Месечни просек трајања инсолације за град Аранђеловац (часови) (4)

Наравно да је трајање инсолације знатно краће од вредности приказаних у табели због појаве облачности и магле, као и због стања атмосфере на посматраном подручју( загађеност). За подручје државе Србије просечна вредност трајања инсолације је око 2000 сати.



Слика 3.- Просек дневне енергије глобалног зрачења

## 2.4. Директно и дифузионо сунчево зрачење

Проласком кроз Земљину атмосферу сунчево зрачење трпи одређене промене, услед чега интензитет слаби, па на Земљину површину стиже умањена количина енергије у односу на ону коју прима спољна ивица атмосфере. То умањење је последица рефлексије и апсорпције сунчевог зрачења у атмосфери, при чему се разликују :

- 1) одбијање сунчевог зрачења од молекула идеалних гасова (кисеоника и азота ), које се посебно дешава у опсегу кратких таласних дужина, што је узрок и плаве боје неба;

- 2) рефлексija која је последица наилаaska сунчевих зрака на молекуле водене паре и делића прашине, чије присуство у атмосфери варира;
- 3) апсорпција од стране идеалних гасова и водене паре, при чему несиметрични молекули гасова ( $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ) имају већу способност апсорпције од симетричних ( $N_2$ ,  $O_2$ ); ова апсорпција назива се и селективном, јер је израженија на одређеним таласним дужинама.

Део сунчевог зрачења пробија се кроз атмосферу директно. Међутим, рефлектовано зрачење се простире у свим правцима, па се делимично враћа у свемир, а само делом доспева на Земљу. Слично је и са апсорбованим зрачењем, које се накнадно емитује, такође у најразличитијим правцима, па тако и у правцу Земље. На тај начин површина Земље прима сунчево зрачење директним и индиректним путем, па се тако разликује директно и дифузионо сунчево зрачење.

Услед расипања енергије током проласка зрака кроз атмосферу, директно зрачење је ослабљено, па је интензитет зрачења које доспева на Земљу мање од екстратерестријског. Ово умањења не погађа једнако све таласне дужине, тако да се расподела енергије у спектру неједнако мења. Промена ће зависити од тренутног састава атмосфере, односно од метеоролошких фактора, од којих је облачност примарна, као и од загађености саме атмосфере. Веће слабљење директног зрачења прати пораст дифузионог, и обрнуто. (3)

### 2.4.1. Директно Сунчево зрачење

Директно сунчево зрачење представља компоненту укупног (глобалног) Сунчевог зрачења које директно доспева на површину Земље.

За израчунавање енергије директног Сунчевог зрачења ( $I_{BC}$ ) које у јединици времена доспева под неким углом  $\theta$  на квадратни метар површине нагнуте под углом  $\Sigma$  у односу на хоризонталну раван на Земљи при јасном и ведром дану, погодна је користити апроксимативни израз:

$$I_{BC} = I_B \cos \theta,$$

где је  $I_B$  – енергија директног Сунчевог зрачења које у јединици времена доспева нормално на квадратни метар површине,  $\theta$  – упадни угао Сунчевих зрака на квадратни метар површине и  $\Sigma$  – угао нагиба пријемне површине у односу на хоризонталну раван на Земљи.

| Месец          | $I_o$<br>$W/m^2$ | $I_B$<br>$kWh/m^2/дан$ | C     |
|----------------|------------------|------------------------|-------|
| Јануар         | 1416             | 2.47                   | 0,058 |
| Фебруар        | 1404             | 3.34                   | 0,060 |
| Март           | 1383             | 3.94                   | 0,071 |
| Април          | 1360             | 4.06                   | 0,097 |
| Мај            | 1339             | 4.88                   | 0,121 |
| Јун            | 1330             | 5.35                   | 0,134 |
| Јул            | 1328             | 5.91                   | 0,136 |
| Август         | 1343             | 5.83                   | 0,122 |
| Септембар      | 1364             | 4.41                   | 0,092 |
| Октобар        | 1386             | 3.55                   | 0,073 |
| Новембар       | 1408             | 2.30                   | 0,063 |
| Децембар       | 1417             | 2.11                   | 0,057 |
| Годишњи просек | 1373             | 4.02                   | /     |

Табела 4.- Интезитет екстратерестријског сунчевог зрачења, директног зрачења, и дифузиони фактор

Упадни угао Сунчевих зрака ( $\theta$ ) који доспевају на јединичну површину нагнуту под неким углом  $\Sigma$  у односу на хоризонталну раван на Земљи се може изразити помоћу следеће релације:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos (\phi_s - \phi_c) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma$$

где је  $\beta$  – висина Сунца,  $\phi_s$  – азумит Сунца,  $\phi_c$  – азумитни угао јединичне површине.

| Месец  | Јан  | Феб  | Мар  | Апр  | Мај  | Јун  | Јул  | Авг  | Сеп  | Окт  | Нов  | Дец  |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Просек | 24.9 | 33.3 | 43.9 | 55.4 | 64.5 | 68.7 | 66.9 | 59.4 | 48.7 | 37.2 | 27.5 | 22.8 |

Табела 5.- Средњи месечни соларни угао у односу на хоризонталну раван(°) (4)

За израчунавање енергије директног Сунчевог зрачења ( $I_{BH}$ ) које у јединици времена доспева на квадратни метар хоризонталне површине на Земљи при јасном и ведром дану, погодно је користити апроксимативни израз:

$$I_{BH} = I_B \sin \beta,$$

где је  $\beta$  – висина Сунца,  $I_B$  – енергија Сунчевог зрачења која у јединици времена пада нормално на квадратни метар површине Земље.

| Месец  | Јан | Феб | Мар | Апр | Мај | Јун | Јул | Авг | Сеп | Окт | Нов | Дец |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Просек | 2   | 2   | 2   | 1   | 2   | 3   | 6   | 7   | 5   | 4   | 2   | 2   |

Табела 6.- Месечни просек ведрих дана (4)

Приликом проласка кроз Земљину атмосферу Сунчево зрачење слаби услед расејавања и апсорпције на атомима, молекулима и јонима присутних гасова. Степен слабења зависи од дужине пута Сунчевог зрачења кроз Земљину атмосферу и њених физичких и хемијских карактеристика. Ово смањење енергије може се описати помоћу Bouguer-Lambert-Berogov закона:

$$I_B = A e^{-km}$$

где је:  $I_B$  – енергија Сунчевог зрачења која у јединици времена пада нормално на квадратни метар површине Земље ( $W/m^2$ ),

$A = 1160 + 75 \sin \left[ \frac{360 \cdot (n-275)}{365} \right]$  – енергија екстратерестичног зрачења које у јединици времена пада на нормално на квадратни метар површине ( $W/m^2$ )

$k = 0,174 + 0,035 \left[ \frac{360 \cdot (n-100)}{365} \right]$  – коефицијент атеунације Сунчевог зрачења у Земљиној атмосфери који зависи од састава и промене у атмосфери,

$m$  – оптичка ваздушна маса, која зависи од упадног угла Сунчевог зрачења и

$n$  – редни број дана у години почевши од 1. Јануара.

У соларној енергетици оптичка ваздушна маса представља однос дужине пута сунчевих зрака кроз атмосферу и дужине пута сунчевих зрака кроз Земљину атмосферу када је Сунце у зениту:

$$m = \frac{1}{\cos \alpha}$$

где је  $\alpha$  угао између упадних Сунчевих зрака и нормале на површину Земље. (5)

## 2.4.2. Дифузионо Сунчево зрачење

Дифузионо Сунчево зрачење настаје расејавањем Сунчевог зрачења на атомима и молекулима гасова и честицама нечистоћа у ваздушном омотачу Земље. Са повећањем облачности, концентрације водене паре и аеросола у ваздуху, повећава се удео дифузионог у глобалном Сунчевом зрачењу.

С обзиром на стохастичку природу дифузионог Сунчевог зрачења, аналитички модел дифузионог зрачења је веома компликован. Постоје различити модели функције расподеле дифузионог Сунчевог зрачења. Најједноставнији модел је изотропни модел који су развили Lui, Jordan i Klein. По овом моделу дифузиона компонента Сунчевог зрачења ( $I_{DH}$ ), која пада на хоризонталну површину на Земљи, има исти интензитет из свих праваца, пропорционална је директној компоненти сунчевог зрачења, без обзира на позицију Сунца на небу у том тренутку и може се израчунати помоћу формуле :

$$I_{DH} = C I_B$$

где је  $I_{DH}$  – дифузиона компонента сунчевог зрачења које у јединици времена пада на јединичну хоризонталну површину на Земљи,  $I_B$  – компонента директног сунчевог зрачења које у јединици времена пада нормално на јединичну површину на Земљи и  $C$  – дифузни фактор ( табела 4).

Дифузни фактор се може израчунати помоћу апроксимативног израза:

$$C = 0,095 + 0,04 \cdot \sin \left[ \frac{360 \cdot (n-100)}{365} \right]$$

где је  $n$ - редни број дана у години почевши од 1. Јануара.

За израчунавање енергије дифузионог сунчевог зрачења ( $I_{DC}$ ) које у јединици времена пада под неким углом  $\theta$  на квадратни метар површине негнуте под углом  $\Sigma$  у односу на хоризонталну раван на Земљи при јасном и ведром дану погодно је користити апроксимативни израз:

$$I_{DC} = I_{DH} \left( \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = C I_B \left( \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right)$$

| Месец          | Минимум | Максимум | 22-годишњи просек |
|----------------|---------|----------|-------------------|
| Јануар         | 0.62    | /        | 0.66              |
| Фебруар        | 0.88    | 0.97     | 0.96              |
| Март           | 1.33    | 1.43     | 1.42              |
| Април          | 1.82    | 1.94     | 1.93              |
| Мај            | 1.99    | 2.27     | 2.28              |
| Јун            | 2.20    | 2.50     | 2.43              |
| Јул            | 2.08    | 2.40     | 2.27              |
| Август         | 1.62    | 2.07     | 1.91              |
| Септембар      | 1.34    | 1.59     | 1.56              |
| Октобар        | 0.94    | 1.12     | 1.10              |
| Новембар       | 0.73    | 0.71     | 0.74              |
| Децембар       | 0.56    | /        | 0.57              |
| Годишњи просек | 1.34    | /        | 1.49              |

Табела 7.- Месечни просек дифузионог зрачења на хоризонталну површину (kWh/m<sup>2</sup>/dan) (4)

Када сунчево зрачење на свом путу доспе до молекула гасова и честица, побуђује их на осциловање и зрачење, чиме они постају извор електромагнетног зрачења одређене таласне дужине. На тај начин, примљена енергија предаје се неједнако у свим смеровима, у зависности од својства гасова и честица. Енергија се више не шири у једном смеру као пре уласка у атмосферу већ на све стране. Утицај дифузије је двојак: с једне стране смањује јачину директног Сунчевог зрачења, а са друге стране узрокује

распршено зрачење неба. Један део сунчевог зрачења се враћа у међупланетарни простор и он је изгубљен за процес у атмосфери. Побуђени молекули или честице не емитују електромагнетну енергију са истом спектралном расподелом енергије, већ мењају релативни удео појединих таласних дужина.

Дифузионо сунчево зрачење садржи више краткоталасну него дуготаласну енергију сунчевог зрачења. При малим оптичким путевима зрачења, средином дана, дифузионо зрачење садржи највише краткоталасно зрачење дајући небу плаву боју. Спуштањем сунца, расејавање краткоталасног зрачења се повећава, оно све више слаби и његов релативни удео у укупном расејаном зрачењу се смањује. (5)

### 2.4.3.Рефлектовано зрачење

На нагнуту површину у односу на Земљу пада директно и дифузионо сунчево зрачење са неба и рефлектовано зрачење са Земље и околних предмета. Након проласка кроз атмосферу, сунчево зрачење наилази на тло или на водене површине (мора, језера, реке, итд.). У зависности од својства подлоге, већи или мањи део зрачења ће се рефлектовати. Могућа су три процеса рефлексије. *Огледалска(спекуларна) рефлексија* на равним површинама (у природи на мирним водама), када је храпавост површине мања од таласне дужине Сунчевог зрачења. Ако је храпавост површине упоредива са таласном дужином зрачења, могућа је *распришујућа рефлексија* која се састоји од више огледалских рефлексија у свим елементарним равнима од којих се површина састоји. *Запреминска рефлексија* се догађа када зрачење продире кроз површину и одбије се од различитих слојева испод површине. Укупна рефлексија представља збир огледалске, дифузне и запреминске рефлексије.

Својства подлоге да одбије зрачење се може изразити *коэффициентом рефлексије* или *албедо*. Албедо представља однос јачине рефлектоване зрачења према укупном упадном зрачењу на посматрано тело. Потпуно бело тело има албедо 1,0 јер потпуно одбија зрачење, а потпуно црно тело има албедо нула. Ако тело има албедо 0,5 значи да одбија половину зрачења које пада на њега. Тела у природи имају врло различита албеда. Вегетација, по правилу, има релативно низак албедо, јер добар део зрачења апсорбују биљни пигменти (хлорофил, каротен, ксантофи). Због своје структуре које се састоји од ретко распоређених малих кристала леда који узрокују многобројне рефлексије на контакту леда и светлости, свежи снег је једна од природних површина са најмањим албедом.

|                      |      |
|----------------------|------|
| Снег који је тек пао | 85   |
| Кварцни песак        | 35   |
| Речни песак          | 29   |
| Хумус                | 26   |
| Зелена трава         | 26   |
| Град као целина      | 10   |
| Водена површина      | 2-80 |
| Бетон                | 40   |
| Црвена цигла         | 44   |

Табела 8.- Алbedo за различите површине ( % )

У наредној табели су дате вредности албеда на месечном и годишњем нивоу, за град Аранђеловац:

| Месец             | Јан  | Феб  | Мар  | Апр  | Мај  | Јун  | Јул  | Авг  | Сеп  | Окт  | Нов  | Дец  | Год. просек |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| 22-годишњи просек | 0.25 | 0.22 | 0.14 | 0.14 | 0.19 | 0.20 | 0.20 | 0.18 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.20 | 0.17        |

Табела 9.- Средња месечна вредност албеда за град Аранђеловац (0 ÷ 1) (4)

Рефлектовано Сунчево зрачење према препорукама светске метеоролошке организације WMO, мери се на висини од 1 до 2 m, по могућности изнад покошене травнате површине. За подручје где се зими задржава снег, потребно је инструмент уградити на механизам који регулише једнаку удаљеност од површине без обзира на висину снега. Сам носач инструмента не сме утицати на мерење и треба га поставити са северне стране инструмента.

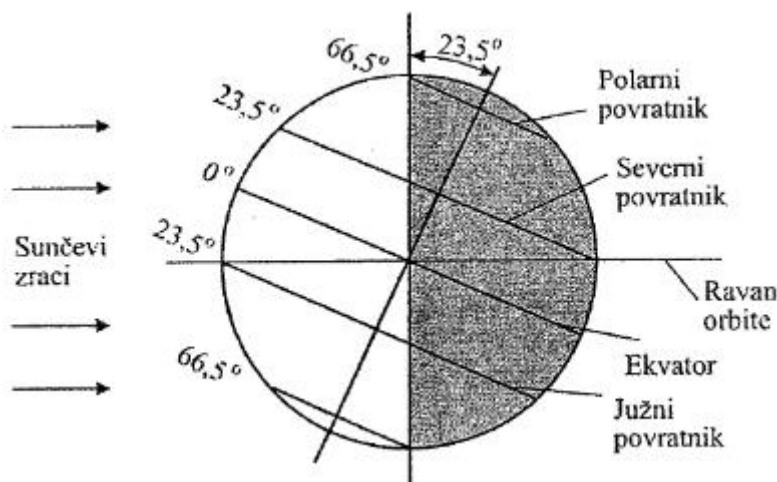
За израчунавање енергије рефлектованог Сунчевог зрачења ( $I_{RC}$ ) које у јединици времена пада на квадратни метар површине нагнуте под углом  $\Sigma$  у односу на хоризонталну раван на Земљи при јасном и ведром дану погодна је користити апроксимативни израз :

$$I_{RC} = \rho (I_{BH} + I_{DH}) \left( \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) = \rho I_B (C + \sin \beta) \left( \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right)$$

где је  $\beta$ - висина Сунца,  $\Sigma$ - угао нагиба јединичне површине у односу на хоризонталну раван на Земљи и  $\rho$ - коефицијент рефлексије (алbedo). (5)

### 3. Соларна геометрија

Да би се у потпуности описао један фотонапонски систем, поред познавања електричних и особина које су везане за технологију израде самих фотонапонских ћелија, јако је битно познавати геометријски положај фотонапонских система у односу на Сунце, као извор енергије. Први корак јесте упознавање основних појмова соларне геометрије. Зрачење које прима Земља зависи и од одређеног места на њеној површини, чији се положај према Сунцу мења током године, с обзиром на нагиб осе Земљиног обртања према равни њене еклиптике. Угао нагиба је  $23.5^\circ$  и заједно са Земљиним дневном ротацијом и годишњим кружењем око Сунца, изазива промене у дужини дана и ноћи, као и постојање годишњих доба (слика 4). (3)



**Слика 4.- Земља у односу на правац сунчевих зрака у положају зимских равнодневнице (3)**

Положај неког места на Земљиној површини одређен је географском ширином ( $l$ ), часовним углом ( $h$ ) и деклинацијом ( $d$ ), који су приказани на слици 5 за тачку  $P$  на северној полулопти.

**Географска ширина** представља угаоно растојање тачке  $P$  од равни екватора, односно угао који заклапа дуж  $OP$  и њена пројекција на раван екватора.

**Часовни угао  $h$**  је угао између пројекције дужи која спаја центар Земље и тачку  $P$  на раван екватора и права која пролази кроз центар Сунца и Земље. У тренутку када је Сунце у највишој тачки изнад неког места, часовни угао је нула, па у ствари овај угао представља време у току дана у односу на највиши положај Сунца. Из овог произилази да се Земља обрне за  $15^\circ$  у току 1 часа:

$$1h = 360/24 = 15^\circ$$

Часовни угао се мења са променом места посматрања, као и са привидним дневним кретањем Сунца.

Часовни угао,  $h$  одређује право сунчано време, а разликује се од светског времена које се очитава на часовнику,  $t_0$ :

$$h = (h_0 - 12 - TZ + \frac{\lambda}{15}) \cdot \frac{\pi}{12},$$

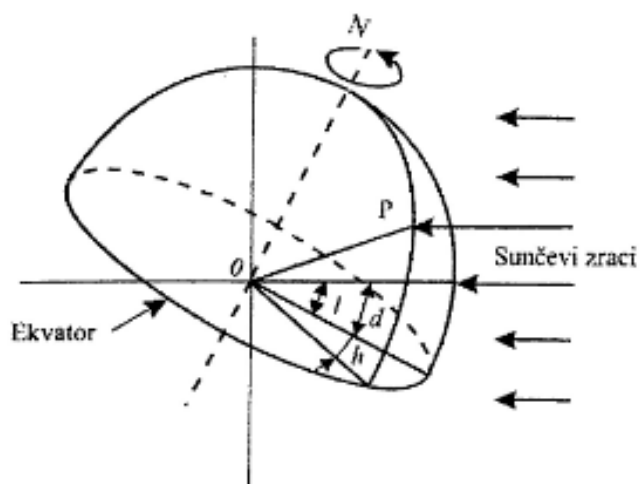
где су:  $h$  (rad) право сунчано време,  $h_0$  (h) светско време, TZ(-) временска зона (од -12 до 12),  $\lambda(^{\circ})$  географска дужина места.

**Деклинација** је угаоно растојање директних сунчевих зрака, односно дужи која спаја средиште Земље и Сунца и пројекције ове дужи на раван Земљиног екватора. Величина деклинације варира током године од  $+23.5^\circ$  до  $-23.5^\circ$ , због нагиба Земљине осе према равни еклиптике који је  $23.5^\circ$ .

Деклинација се задовољавајућом тачношћу може израчунати као:

$$\delta = \left( 23 + \frac{27}{60} \right) \cdot \sin \left( \frac{2\pi \cdot brd21}{365,25} \right) \cdot \frac{\pi}{180}$$

где је  $brd21$  (-) број дана протеклих од пролећне равнодневнице на северној хемисфери. (3)



Слика 5.- Географска ширина  $l$ , часовни угао  $h$  и деклинација сунца  $d$  (3)

| Град<br>Аранђеловац | Јан   | Феб   | Мар   | Апр  | Мај  | Јун  | Јул  | Авг  | Сеп  | Окт   | Нов   | Дец   |
|---------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Просек              | -20.7 | -12.3 | -1.79 | 9.71 | 18.8 | 23.0 | 21.2 | 13.7 | 3.08 | -8.46 | -18.1 | -22.8 |

Табела 10.- Средња месечна деклинација за град Аранђеловац ( $^\circ$ ) (4)

| Град<br>Аранђеловац | Јан  | Феб  | Мар  | Апр  | Мај | Јун | Јул | Авг | Сеп  | Окт  | Нов  | Дец  |
|---------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Просек              | 68.2 | 77.6 | 88.2 | 99.6 | 109 | 114 | 112 | 103 | 93.0 | 81.6 | 71.3 | 65.6 |

Табела 11.- Средњи месечни часовни угао за град Аранђеловац ( $^\circ$ ) (4)

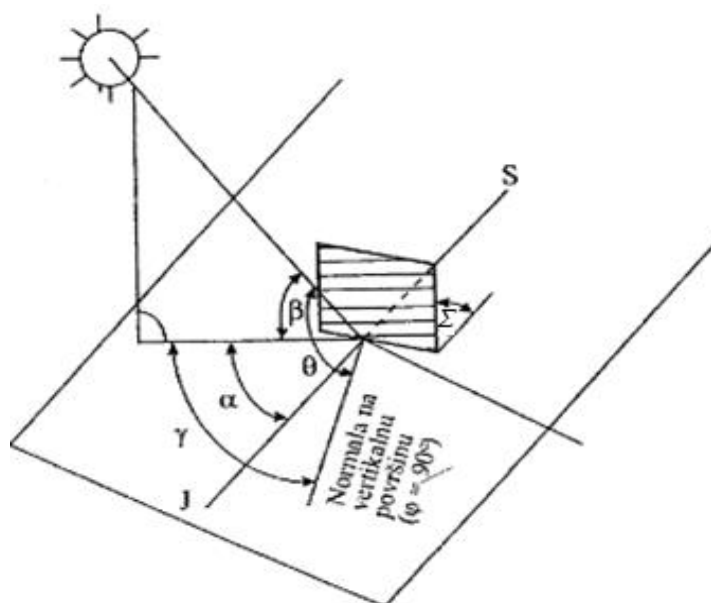
### 3.1. Углови положаја Сунца

Тренутни положај Сунца према некој тачки на Земљи одређује се углом висине Сунца ( $\beta$ ). Висински угао, или само **висина Сунца**, јесте угао који заклапају директни сунчеви зраци са хоризонталном равни (слика 6). У истом тренутку величина овог угла је различита на различитим местима на површини Земље, а варира и током године са променом међусобног удаљења Земље од Сунца, па зависи од географске ширине места ( $l$ ), часовног угла ( $h$ ) и деклинације Сунца ( $\delta$ ). Израчунава се по обрасцу:

$$\sin \beta = \sin \delta \sin l + \cos \delta \cos l \cos h$$

**Азумит** одређује положај Сунца према странама света и представља угаоно растојање између хоризонталне пројекције директних сунчевих зрака и правца север-југ. Изражава се у степенима источно или западно од правца југа, а често и као угао од  $0^\circ$  до  $360^\circ$  према правцу севера. Нумерички се одређује према релацији:

$$\cos \alpha = \frac{(\sin \beta \cdot \sin l - \sin \delta)}{(\cos \beta \cdot \cos l)}$$



Слика 6.- Углови положаја Сунца-  $\alpha$ - азумит Сунца према југу;  $\beta$ - висина сунца;  $\gamma$ - Сунчано-зидни азумит;  $\theta$ - упадни угао;  $\Sigma$ - угао нагиба површине на коју доспева сунчево зрачење (3)

**Упадни угао** ( $\theta$ ) је онај под којим сунчеви зраци падају на одређену површину, у односу на њену нормалу. Дефинисан је углом висине сунца ( $\beta$ ) и нагибом површине ( $\Sigma$ ) према хоризонталној равни. (3)

| Сунчано<br>време | Јан | Феб | Мар  | Апр  | Мај  | Јун  | Јул  | Авг  | Сеп  | Окт | Нов | Дец |
|------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| 03:00            | /   | /   | /    | /    | /    | 57.0 | /    | /    | /    | /   | /   | /   |
| 04:00            | /   | /   | /    | 76.5 | 70.7 | 67.0 | 67.2 | 72.8 | /    | /   | /   | /   |
| 05:00            | /   | /   | 93.7 | 86.9 | 80.6 | 76.7 | 77.0 | 83.0 | 92.4 | 102 | /   | /   |
| 06:00            | /   | 110 | 104  | 97.5 | 90.7 | 86.4 | 86.9 | 93.4 | 103  | 113 | 119 | /   |
| 07:00            | 127 | 121 | 116  | 109  | 102  | 97.2 | 97.7 | 104  | 115  | 125 | 131 | 132 |
| 08:00            | 139 | 134 | 129  | 123  | 115  | 110  | 110  | 118  | 129  | 138 | 144 | 144 |
| 09:00            | 153 | 148 | 145  | 141  | 134  | 128  | 128  | 136  | 146  | 154 | 158 | 157 |
| 10:00            | 167 | 165 | 164  | 163  | 161  | 157  | 155  | 160  | 167  | 172 | 174 | 172 |
| 11:00            | 183 | 182 | 184  | 189  | 194  | 194  | 189  | 188  | 190  | 191 | 190 | 187 |
| 12:00            | 198 | 199 | 204  | 213  | 222  | 225  | 220  | 214  | 211  | 208 | 205 | 201 |
| 13:00            | 212 | 215 | 222  | 232  | 241  | 245  | 241  | 234  | 228  | 224 | 219 | 215 |
| 14:00            | 225 | 229 | 237  | 247  | 256  | 259  | 256  | 249  | 243  | 237 | 231 | 227 |
| 15:00            | 236 | 241 | 249  | 259  | 267  | 271  | 268  | 262  | 255  | 249 | 242 | /   |
| 16:00            | /   | 252 | 260  | 270  | 278  | 281  | 278  | 272  | 266  | /   | /   | /   |
| 17:00            | /   | /   | /    | 280  | 288  | 290  | 288  | 282  | /    | /   | /   | /   |
| 18:00            | /   | /   | /    | /    | /    | 300  | 298  | /    | /    | /   | /   | /   |

Табела 12.- Азумит сунца за град Аранђеловац (4)

## 4. Анализа фотонапонских ћелија

Директна конверзија Сунчевог зрачења у електричну енергију врши се помоћу соларних ћелија, које су израђене од полупроводничких материјала. Предности оваког начина претварања Сунчеве у електричну енергију је то што су соларне ћелије једноставне грађе, немају покретне делове, не загађују животну средину, и имају релативно дуг век трајања (просечно 25 година).

Развој соларних ћелија почиње 1839. године када је *Becquerela* приметио да се јачина струје између две електроде у електролиту повећава приликом осветљавања електрода. Исти ефекат на чврстом телу (селену) први су приметили *Adams* и *Day* 1877. године. Захваљујући овоме убрзо је направљен уређај за мерење интензитета светлости. Одмах затим истраживачи су се окренули решавању проблема коришћења соларних ћелија као комерцијалних извора електричне енергије. Нагли развој соларних ћелија почиње 1954. године када су *Pearson*, *Fuller* и *Chapin* направили прву соларну ћелију од монокристалног силицијума. Почев од лансирања првог сателита 1958. године соларне ћелије представљају незаменљив извор електричне енергије на сателитима, свемирским бродовима и станицама. У земаљским условима, од самог почетка развоја, соларне ћелије су нашле примену на усамљеним објектима, светионицима, аеродромима, истраживачким платформама на мору, стамбеним објектима и индустријским објектима, итд. (5). Од појаве прве практичне ћелије 1954. године, оне су биле оправдано запостављене, иако су се уграђивали у сателитима. Разлог таквог заборава лежи у томе што би 1W електричне снаге добијен из соларне ћелије коштао чак 250 \$, у поређењу са 2\$-3\$ снаге добијене из електране на угаљ. После енергетске кризе у свету 1970-их година, по први пут се уочава да не постоје неограничене залихе фосилних горива, да се требају развити и потражити нови енергетски обновљиви извори, међу којима су и PV панели, сачињени од соларних ћелија.

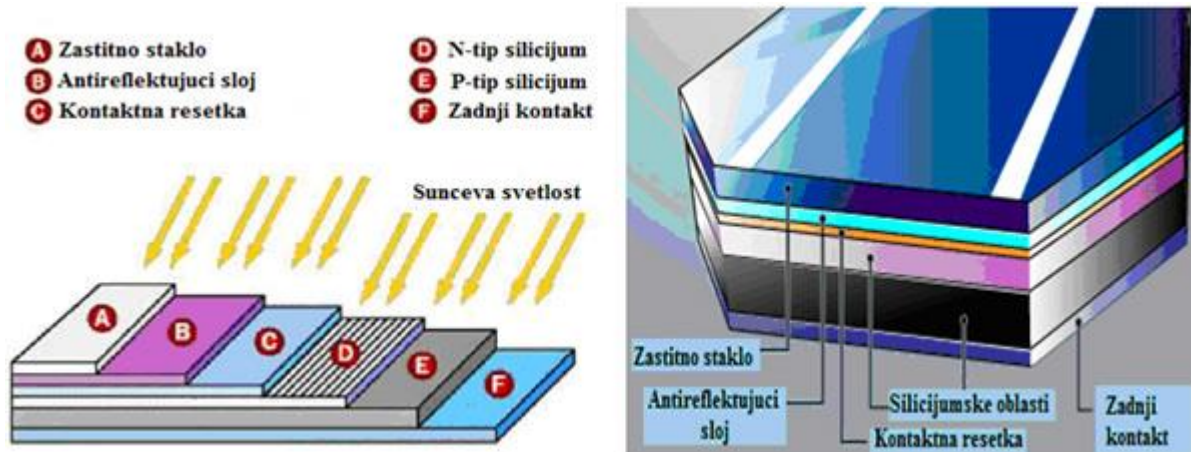
### 4.1. Принцип рада соларне ћелије

Када се соларна ћелија осветли, односно када апсорбује сунчево зрачење, помоћу фотонапонског ефекта на њеним крајевима се појављује електромоторна сила (напон), и таква соларна ћелија постаје извор електричне енергије. Када бисмо такву ћелију повезали у струјно коло, кроз потрошач би протекла струја.

Соларна ћелија је темељни блок фотонапонског система, која је сачињена од полупроводничког малетријала (најчешће силицијума). Она у ствари представља р-п спој који помоћу фотонапонског ефекта производи једносмерну струју, односно служи као исправљачки уређај који пропушта струју у само једном смеру. РN-спој настаје када се једном делу кристала чистог полупроводника додају тровалентне (акцепторске) примесе, тако да настане п-тип полупроводника, а другом делу петеровалентне (донорске) примесе, те настаје р-тип полупроводника. Међу тровалентне примесе спадају бор (B), алуминијум (Al), галијум (Ga) и индијум (In), а међу петовалентне примесе фосфор (P), арсеном (As) или антимоном (Sb). Када дође до апсорбовања сунчевог зрачења у р-п споју се јављају парови електрон-шупљина. Приликом сунчевог зрачења унутар или у близини р-п споја, унутрашње електрично поље раздваја електроне и шупљине. При томе се електрони крећу према п страни, а шупљине према р страни р-п споја, и као последица тога јавља се потенцијална разлика, односно напон.

На следећој слици је приказан попречни пресек једне типичне соларне ћелије ма ког типа (у овом случају је за пример узета силицијумска соларна ћелија). Први слој је

заштитно стакло тј.  $\text{SiO}_2$ , које штити ћелију од спољашњих утицаја. Испод је антирефлектујући слој који смањује рефлексију светлости и обезбеђује да што више енергије доспе до полупроводника (повећава се искоришћење ћелије). Затим се налази систем транспарентних електрода, ТСО. Он контактира полупроводник са рп спојем у коме се врши захватање фотона Сунчеве светлости. Са доње стране је метализација-задњи контакт. (6)



Слика 7.- Попречни пресек соларне ћелије

## 4.2. Материјал и технологија израде соларних ћелија

Као ретко која технологија у данашње време, соларне ћелије имају убрзан технолошки напредак у истраживању материјала за израду соларних ћелија и процеса њихове производње. Силицијум је основни материјал за израду, који апсолутно доминира, са уделом око 98 %. Нека основна подела материјала за израду фотонапонских ћелија као и технологија израде се може поделити на:

- **Силицијум (Si)** – укључујући монокристални силицијум (c-Si), поликристални силицијум (p-Si), и аморфни силицијум (a-Si).
- **Поликристални танкослојни материјали** (поликристални танки филм)- укључујући CIS спој полупроводничких материјала (Бакар-Индијум-Диселенид), CdTe (Кадмијум-Телурид), те танкослојни силицијум (већином аморфни силицијум).
- **Монокристални танкослојни материјали** (монокристални танки филм)- већином изведени од Галијума-Арсенида (Ga-As).
- **Вишеслојне структуре материјала**- комбинације разних полупроводничких материјала.

Због економских и технолошких разлога за производњу се највише користи силицијум, који је после кисеоника највише заступљен у земљиној кори (27.6 %). Неке предности силицијума су то што се лако добија и прерађује, није токсичан и не гради једињења која су штетна по околину. У овој савременој електронској индустрији силицијум представља главни полупроводнички елемент, који је постојан на

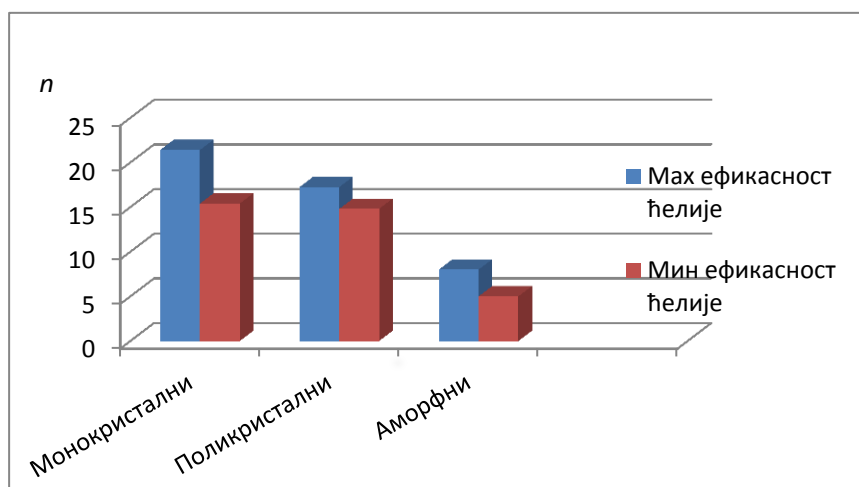
температурама и до 200 °C. Због свега предходно наведеног, у наставку ће највише пажње бити посвећено монокристалном, поликристалном и аморфном силицијуму.

**Поликристални силицијум**- добија се од кварцног песка  $\text{SiO}_2$ , редукцијом угљеником на високој температури (1500-1750 °C), чиме се добија Si чистоте 99 %. У односу на процес производње монокристалних ћелија, процес производње поликристалних ћелија је знатно јефтинији, па самим тим и имају мању ефикасност. Теоријска ефикасност ових ћелија је око 18 %, док је стварна ефикасност негде између 13 и 17 %.

**Монокристални силицијум** – фотонапонске ћелије израђене од монокристалног силицијума имају тзв. једнолику структуру, што значи да се састоје од истог материјала који је модификован тако да је на једној страни ћелије p-слој, а на другој n-слој Si полупроводника. Површина ових ћелија се креће око 5-10  $\text{cm}^2$ , дебљине од 200 до 300  $\mu\text{m}$ , и напона од 0,55 до 0,70 V. Једна од малобројних мана ових ћелија је висока цена производње, због компликованог процеса истог.

**Аморфни силицијум** – је материјал који има низ предности, и као такав обећава много у будућности. Он упија сунчево зрачење 40 пута ефикасније у односу на монокристални силицијум, тако да кад се ћелија обасја, слој дебљине од 1  $\mu\text{m}$  може упити и до 90 % енергије сунчевог зрачења. Ово својство аморфног силицијума би могло знатно снижити цену ФН технологије. Велика предност аморфног силицијума тиче се економског карактера, то је да се овај материјал може произвести на ниским температурама, да може бити положен на неке јефтиније подлоге попут пластике, стакла, метала и сл., где се може уграђивати као саставни део објеката. Међу највећим недостацима аморфног силицијума је нестабилност. Наког првог излагања сунчевом зрачењу, долази до смањења излазне снаге кроз одређени временски период. Ови губици излазне снаге су од 20 %, док се ћелија аморфног силицијума нестабилизује. Теоријска ефикасност ћелије аморфног силицијума је око 11.5 %, док је стварна ефикасност око 7 %.

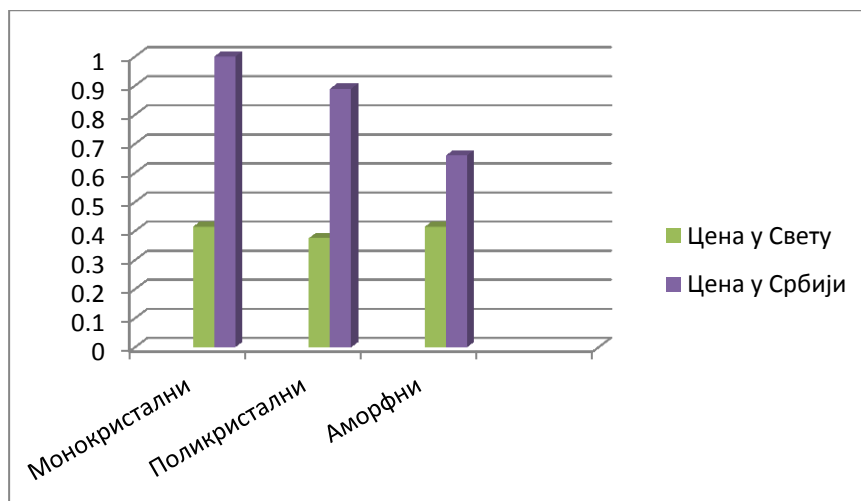
На наредним графицима биће приказане основне карактеристике соларних ћелија, за различите типове и технологије истих. Данас у свету је соларна технологија у успону, па тако и ефикасност ћелија која диктира цену на тржишту, као и технологија производње. Та ефикасност се може кретати за најјефикасније ћелије између 40 до 50 %, али у овом раду ће бити приказане само оне које се користе у домаћинствима, које дају оптималан однос цене и ефикасности.



Слика 8.- Ефикасност соларних панела (%)

Ефикасност као и цена панела поред тога што зависи од технологије и материјала израде, тако зависи и од произвођача истих, па тако имамо да цена на тржишту може варирати и до 30 % у поређењу немачким и кинеских произвођача. Животни век панела је углавном подељен на следеће етапе:

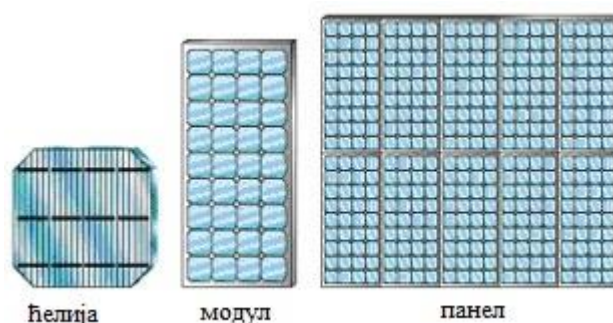
- 10 година гаранција производа
- 12 година да ће карактеристика номиналне снаге бити изнад 90 % од почетне
- 25 година да ће карактеристика номиналне снаге бити изнад 80 % од почетне



Слика 9.- Поређење цена соларних панела (€/W)

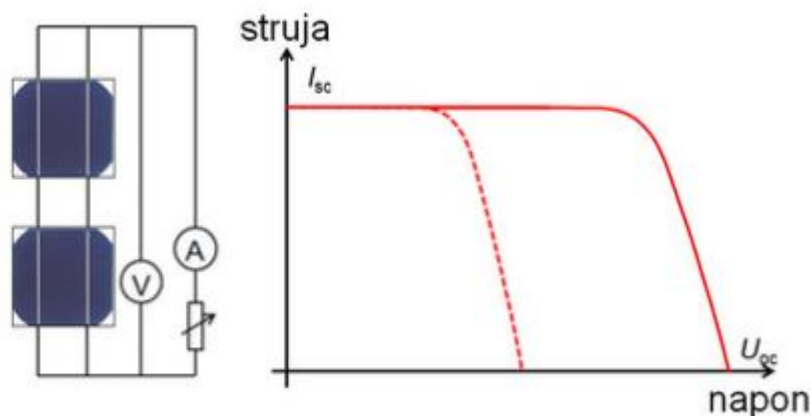
### 4.3. Соларни панели

На данашњем тржишту се могу наћи соларне ћелије различитих димензија. Те димензије се крећу од 10cm × 10cm, 12.5cm × 12.5cm, 15cm × 15cm, до 21cm × 21cm. Снага соларне ћелије је мала, и негде ограничена до 2 W, па самим тим нема неку значајну улогу као јединка. Због тога се она везује механички и електрични у једну целину која се назива модул. Да би се добила што већа снага, модули се повезују у низ панела на исти начин, тако да снага панела може износити и до неколико MW(слика 10 ).

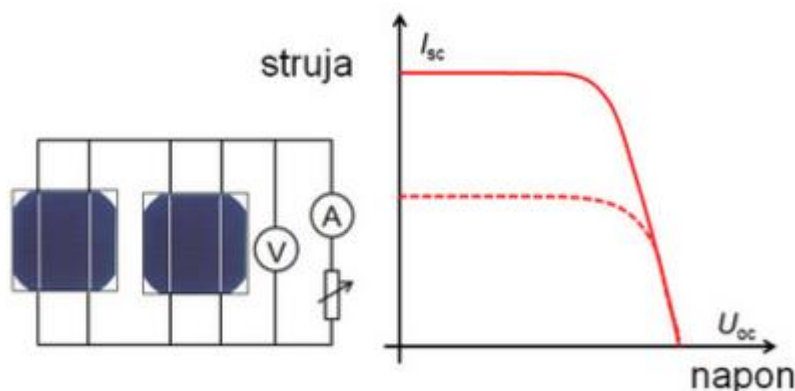


Слика 10.- Соларна ћелија, модул, панели

Повезивање ћелија се може вршити редно и паралелно. Уколико желимо да повећамо струју одабраног број ћелија онда те ћелије треба (електрично) везати паралелно, док уколико хоћемо да повећамо напон тих ћелија онда их везујемо редно што је приказано на сликама 11 и 12.



Слика 11.- Редно везивање соларних ћелија



Слика 12.- Паралелно везивање соларних ћелија

Фотонапонски панели могу бити постављени као фиксни, или панели који могу пратити кретање Сунца. Панели који прате кретање Сунца исплативи су једино уколико се ради о некој већој фотонапонској мрежи. Стога су ПВ панели који се уграђују на кровне конструкције објеката у већини случајева постављени као фиксни. Ти фиксни панели ће апсорбовати мање сунчевог зрачења у односу на системе који прате кретање Сунца, и то је једна од великих недостатака овог система.

## 5. Експеримент

У наредном делу овог завршног рада урађено је неколико практичних експеримената са ПВ панелима, и представљени резултати тих мерења. Мерење је вршено за град Аранђеловац, географског положаја 44 степени 12 минута северне географске ширине, и 20 степени и 25 минута источне географске ширине, надморске висине око 250m. У првом делу овог експеримента биће приказана опрема која се користила при извођењу овог мерења, док ће други део бити посвећен различитим практичним примерима која су се обрађивала на терену.

### 5.1. Опрема за експеримент

Опрема коришћена за извођење практичних експеримената у овом раду се састоји од:

- ✓ Два ПВ панела произвођача *h-tes* са магнетном основом који омогућавају промену угла нагиба према хоризонталној равни и то за углове од 0, 30, и 60°. Номинални напон панела је 2V, док је номинална струја 600mA. Панели су од поликристалног силицијума, димеизија 135x95x30 mm.



Слика 13.- Поликристални панел

- ✓ Вентилатор снаге 10 mW такође произвођача *h-tes*, димензија 135x40x60 mm, који је коришћен у овом раду за хлађење панела.



Слика 14.- Вентилатор

- ✓ Инфрацрвени *EXTECH* безконтактни ласерски мерач чије је подручје мерења  $-50 \div 538$  °C.



Слика 15.- Инфрацрвени безконтактни мерач

- ✓ Два мерна инструмента фирме *h-tes*, односно дигитални мутиметри. Поседују могућност мерења једносмерног и наизмечног напона и струје, као и отпорности. У овом раду коришћене су опције мерења једносмерног напона и струје.



Слика 16.- Дигитални мултиметри

## 5.2. Резултати мерења и њихово тумачење

Овај део рада бавиће се практичним примерима симулације панела на терену, и приказивати различите услове у којима су панели били изложени при мерењу. Ти примери се могу поделити на следеће:

- ✓ утицај Сунчевог зрачења на излазне параметре ПВ панела:
- ✓ утицај покретног и фиксног панела на излазне карактеристике:
- ✓ утицај температуре на излазне параметре ПВ панела:
- ✓ утицај запрљаности на излазне параметре ПВ панела:
- ✓ утицај нагиба ПВ панела на излазне параметре:

Овим су обухваћени неки од најзначајнијих конкретних проблема који прате експлоатацију ПВ панела, извршена су мерења и донети одговарајући закључци у складу са подацима који су мерени на терену. Детаљни приказ тога биће представљен у наредном поглављу.

### 5.2.1. Утицај Сунчевог зрачења на излазне параметре ПВ панела

Сунчево зрачење представља основни извор енергије за производњу електричне енергије из фотонапонских система, и као такво јак је битно сагледати какве су могућности за конверзију зрачења у електричну енергију. Утицај сунчевог зрачења у самом претварању енергије утицаће и на ефикасност панела у раду, тако да је од велике важности знати колико зрачење можемо конвертовати у корисну енергију путем ПВ панела. Један од најбитнијих фактора који утичу на интензитет Сунчевог зрачења, а самим тим и на ефикасност јесу временски услови који се код нашег становништва најчешће олако схватају. До овог закључка смо дошли у разговору са особама које нису упућене у област соларне енергије, а верујемо да и велика већина становништва би имало овакво мишљење због недовољне информисаности о овој грани енергије. Па тако би на пример у практичним условима имали следећу ситуацију: уколико имамо максимални интензитет Сунчевог зрачења од  $1000 \text{ W/m}^2$ , и панел снаге  $100 \text{ W}$ , то би значило да тај панел сваки сат производи  $100 \text{ W}$ . Када интензитет Сунчевог зрачења опадне на  $500 \text{ W/m}^2$  нпр. услед временских услова, исти панел би требало да произведе  $50 \text{ W}$ , а уколико бисмо имали врло лоше временске услове са тамним облацима, интензитет би могао пасти и на  $100 \text{ W/m}^2$  што би значило да тај панел производи свега  $10 \text{ W}$  по сату. Из свега ово наведеног можемо да закључимо да временски услови јак утичу на интензитет Сунчевог зрачења, тако и на ефикасност, и да се при пројектовању мора обратити велика пажња на овај параметар. Ова теза нам даје управо те одговоре, какав је утицај сунчевог зрачења на напон, струју, снагу и ефикасност ПВ панела у зависности од временских услова, и да ли се производња енергије креће у просечним границама за период у којим је мерење и вршено.

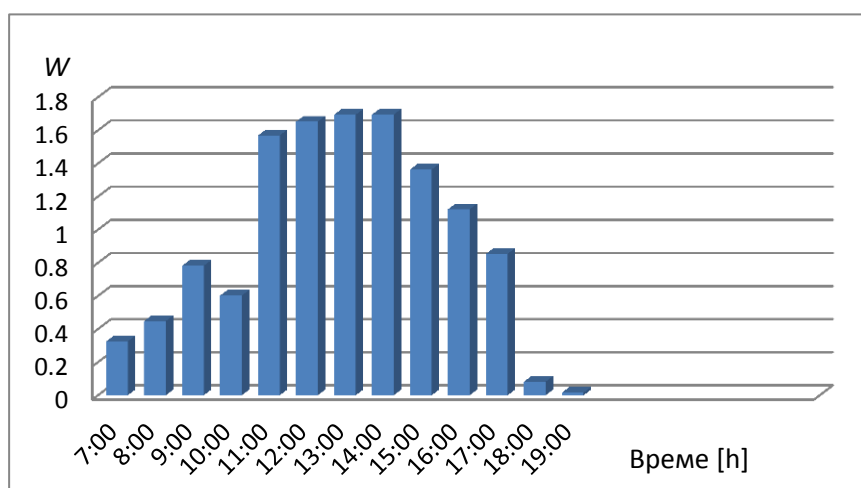
Мерење је вршено за град Аранђеловац, за временске услове од потпуно облачног дана, преко полуоблачног дана до сунчаног дана. Коришћена је опрема која је наведена у предходној тачки, односно ПВ панел, мерни инструмент и инфрацрвени безконтактни мерач температуре. Мерења су вршена на сваких петнаест минута за посматрани сат, и затим приказане вредности у табелама представљају средње вредности излазних параметара, тј. читавање су вредности на дигиталном мерном инструменту напона и струје, а помоћу мерача температуре су бележене вредности температуре панела. Панели су у сва три случаја постављена под фиксним углом од  $44^\circ$  према хоризонталној равни, и усмерени према југу. У наставку су дати резултати мерења.



Слика 17.- ПВ панели у експлоатацији

| Време (h)  | Напон (V)               | Струја (mA) | Температура<br>панела (°C) |
|------------|-------------------------|-------------|----------------------------|
| 07:00      | 2.32                    | 140         | 15.4                       |
| 08:00      | 2.36                    | 190         | 19.7                       |
| 09:00      | 2.37                    | 330         | 27.2                       |
| 10:00      | 2.36                    | 255         | 20.65                      |
| 11:00      | 2.36                    | 665         | 35.3                       |
| 12:00      | 2.36                    | 700         | 38.55                      |
| 13:00      | 2.37                    | 715         | 38.3                       |
| 14:00      | 2.29                    | 740         | 36.85                      |
| 15:00      | 2.37                    | 575         | 36.7                       |
| 16:00      | 2.34                    | 480         | 35.6                       |
| 17:00      | 2.34                    | 365         | 30.9                       |
| 18:00      | 2.13                    | 38.6        | 16.7                       |
| 19:00      | 1.65                    | 9.52        | 12.46                      |
| 20:00      | Мерење завршено у 19:46 |             |                            |
| 24.04.2017 |                         |             |                            |

Табела 13.- Излазни параметри ПВ панела по ведром дану

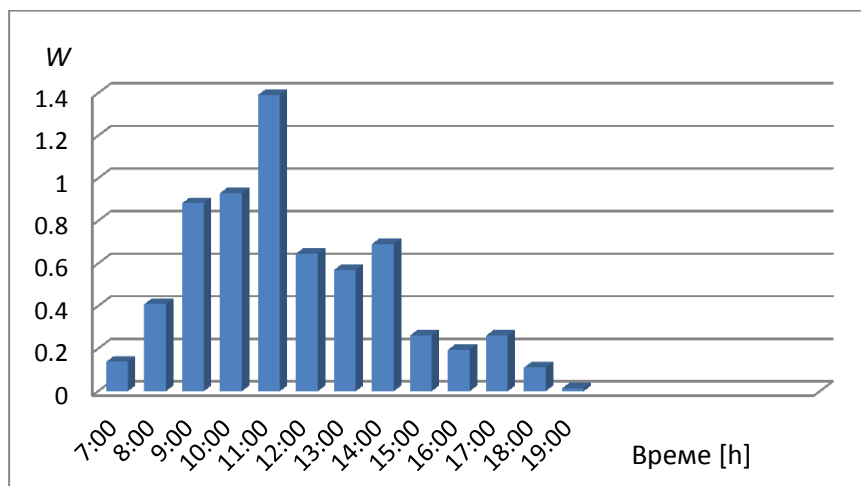


Слика 18.- Снага ПВ панела по ведром дану (24.04.2017)

На дијаграму на слици 18 можемо видети да снага коју производи панел по ведром дану сразмерно расте са повећањем интензитета Сунчевог зрачења, и обратно.

| Време (h)  | Напон (V)               | Струја (mA) | Температура<br>панела (°C) |
|------------|-------------------------|-------------|----------------------------|
| 07:00      | 2.31                    | 60          | 8.3                        |
| 08:00      | 2.39                    | 171         | 14.5                       |
| 09:00      | 2.42                    | 365         | 21.62                      |
| 10:00      | 2.45                    | 380         | 24.2                       |
| 11:00      | 2.40                    | 580         | 28.65                      |
| 12:00      | 2.49                    | 260         | 19.3                       |
| 13:00      | 2.375                   | 240         | 20.6                       |
| 14:00      | 2.385                   | 290         | 21.95                      |
| 15:00      | 2.325                   | 112.5       | 16.8                       |
| 16:00      | 2.30                    | 85          | 15.2                       |
| 17:00      | 2.31                    | 113         | 15.6                       |
| 18:00      | 2.22                    | 50.5        | 14.6                       |
| 19:00      | 1.59                    | 8.48        | 9.63                       |
| 20:00      | Мерење завршено у 19:36 |             |                            |
| 17.04.2017 |                         |             |                            |

Табела 14.- Излазни параметри ПВ панела по полуоблачном дану

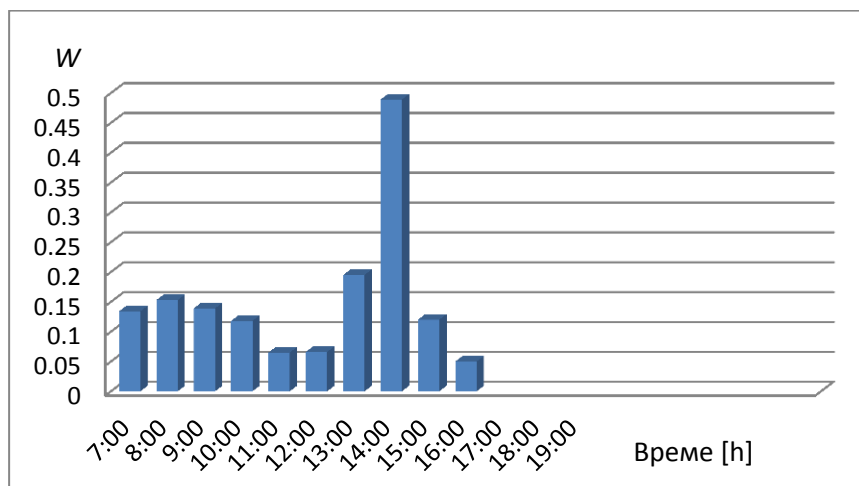


Слика 19.- Снага ПВ панела по полуоблачном дану (17.04.2017)

Дијаграм на слици 19 нам даје приказ производње корисне снаге по полуоблачном дану, и ту имамо одређене осцилације током времена у сагласности са интензитетом Сунчевог зрачења који је и приказан на слици 22.

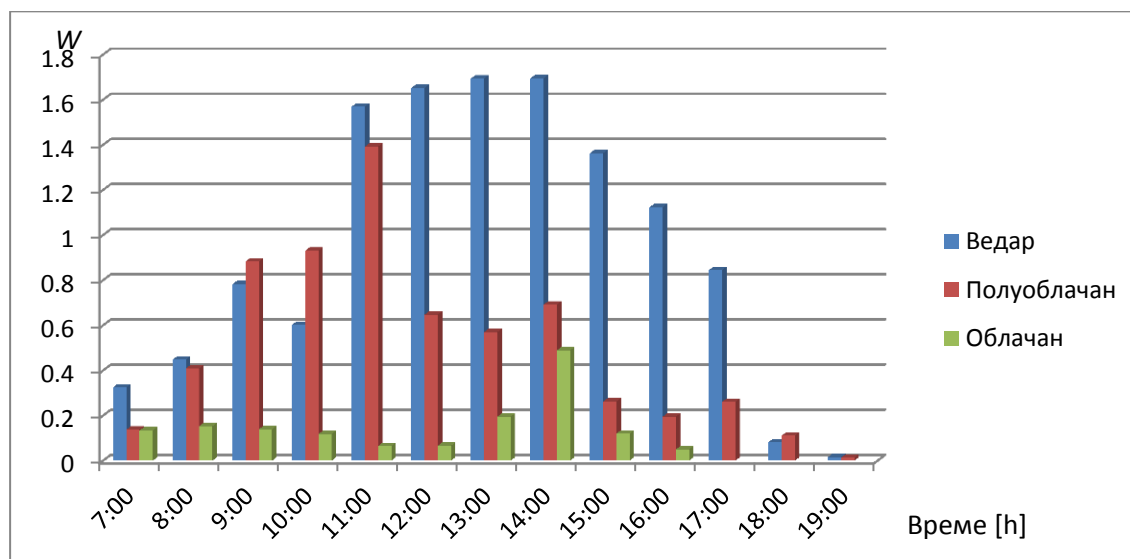
| Време (h)  | Напон (V)                         | Струја (mA) | Температура<br>панела (°C) |
|------------|-----------------------------------|-------------|----------------------------|
| 07:00      | 2.16                              | 62          | 20.4                       |
| 08:00      | 2.19                              | 70          | 23.7                       |
| 09:00      | 2.18                              | 63.8        | 23.8                       |
| 10:00      | 2.16                              | 54.45       | 22.95                      |
| 11:00      | 2.07                              | 31.45       | 22.45                      |
| 12:00      | 2.07                              | 32          | 22.45                      |
| 13:00      | 2.21                              | 88.5        | 25.4                       |
| 14:00      | 2.29                              | 213.5       | 30.8                       |
| 15:00      | 2.14                              | 56          | 25                         |
| 16:00      | 2.00                              | 25          | 23.7                       |
| 17:00      | <i>Мерење прекинуто због кише</i> |             |                            |
| 18:00      |                                   |             |                            |
| 19:00      |                                   |             |                            |
| 20:00      |                                   |             |                            |
| 28.04.2017 |                                   |             |                            |

Табела 15.- Излазни параметри ПВ панела по облачном дану

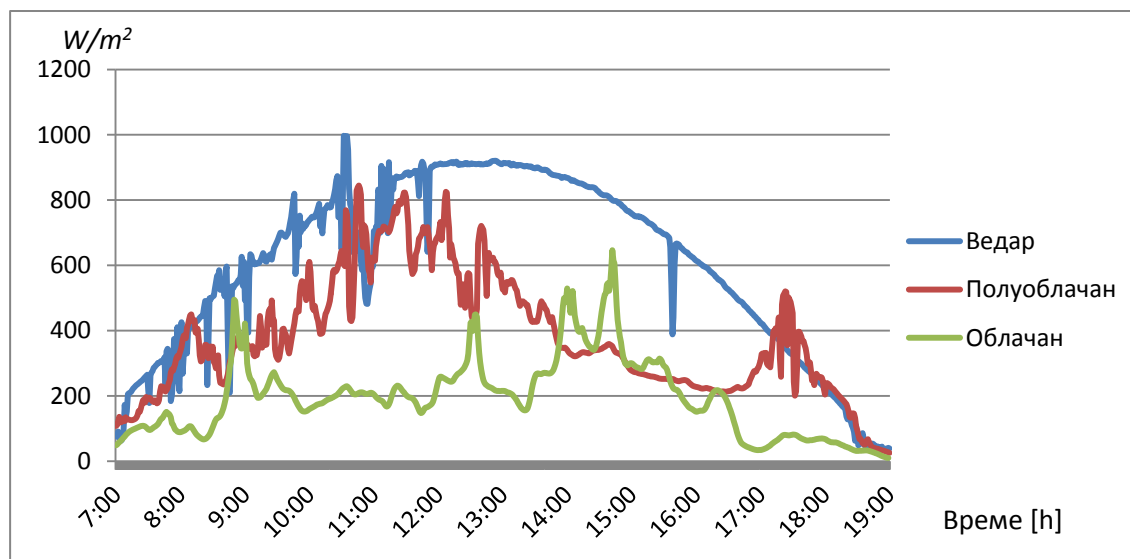


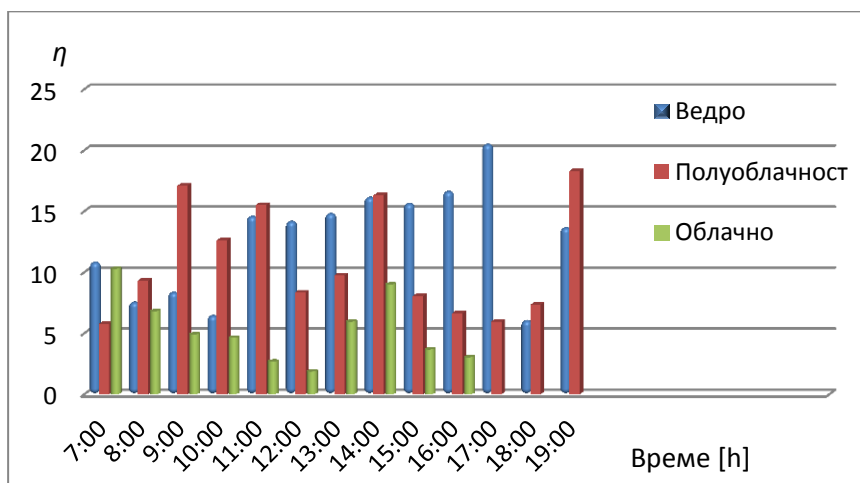
Слика 20.- Снага ПВ панела по облачном дану (28.04.2017)

Са дијаграма на слици 20 се види утицај потпуног наоблачења неба на производњу енергије.

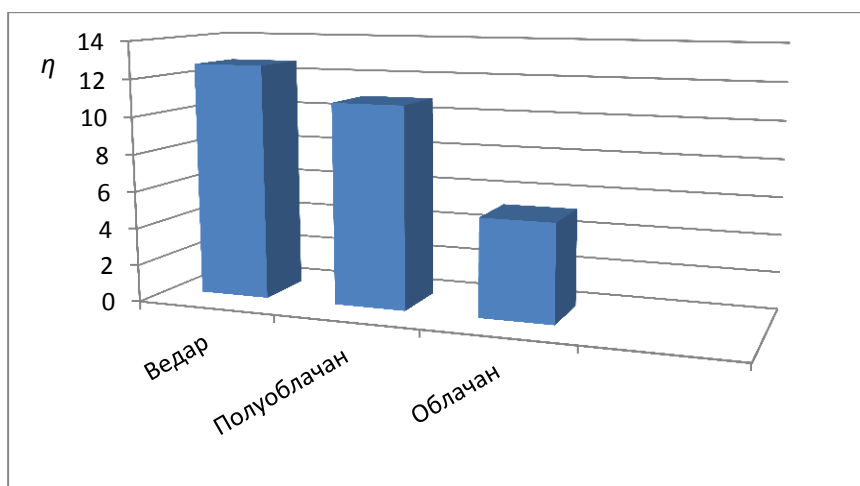


Слика 21.- Зависност снага ПВ панела од спољних атмосферских утицаја

Слика 22.- Интезит сунчевог зрачења ( $W/m^2$ ) (7)



Слика 23.- Ефикасност ПВ панела у односу на временске услове



Слика 24.- Средње вредности ефикасности панела за различите дане

У табелама 13,14 и 15 су дати резултати мерења, док су на сликама 18,19 и 20 приказане снаге панела за различите временске услове у зависности од времена. Снага је рачуната као производ напона на крајевима панела и струје, односно  $P=U \cdot I$  [W]. Ефикасност фотонапонског панела се може дефинисати као однос електричне снаге коју даје панел и снаге сунчевог зрачења :

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{sol}} = \frac{U \cdot I}{E \cdot A}$$

где су:

$P_{el}$  [W]- излазна електрична снага фотонапонског панела

$P_{sol}$  [W]- снага сунчевог зрачења

$U$  [V]- ефективна вредност излазног напона

$I$  [A]- ефективна вредност излазне струје

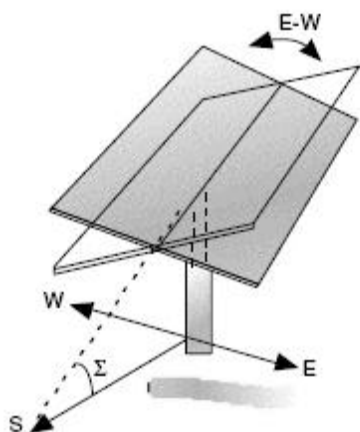
$E$  [W/m<sup>2</sup>]- интензитет сунчевог зрачења

$A$  [m<sup>2</sup>]- површина панела

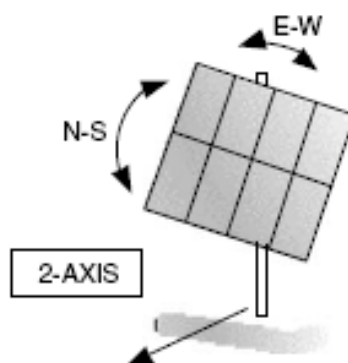
Можемо приметити на дијаграму са слике 19 да се јављају осцилације услед наглог наоблачења неба, због чега опадају вредности зрачења на површину панела, опадају вредности напона и струје на крајевима панела, а то директно утиче на производњу електричне енергије. Још један од фактора који може утицати на производњу енергије, а којег треба споменути јесте ветар који хлади панеле, али сматрамо да у овом случају то није био узрок јер нису забележени изразито јаки удари ветра према подацима РХМЗ, а и даље ће у тексту бити више речи о утицају хлађења на ефикасност панела, тако да се у овом случају као једини релевантан утицај може констатовати наоблачење. Дијаграм на слици 20 нам приказује да ће панел бити ускраћен максималних вредности директних Сунчевих зрака због наоблачења, а насупрот томе расту вредности дифузионог Сунчевог зрачења (3). То ће имати за узрок драстично смањење производње електричне енергије, односно да при јако великим наоблачењима неба имамо малу производњу енергије, и то је истина и један од великих недостатака целокупних соларних система. У овом нашем случају бисмо имали дневну производњу за потпуно облачан дан око  $120 \text{ W/m}^2$ , што би могло да покрије рад кућне сијалице са ужареним влакном снаге  $60\text{W}$  свега два сата. Када бисмо то гледали са процентуалне стране можемо рећи за ова три случаја да ћемо имати ефикаснији рад панела током ведрога дана у односу на облачан за скоро 60%, а у односу на полуоблачан за 15%.

#### **5.2.1.1.    *Разлика између покретног и фиксног панела на излазне карактеристике***

У циљу унапређења и постизања што веће ефикасности примењују се системи који прате кретање Сунце, како би се искористио што већи део Сунчевог зрачења које пада на површину панела, поготово директног Сунчевог зрачење које је доминантније у укупном зрачењу (4). Фиксно постављени панели су они који су позиционирани према правцу север-југ и који немају могућност закретања панела по једној, односно две осе. Код пријемника који могу пратити кретање Сунца имамо два случаја. Један је да имамо закретање панела по једној (вертикалној) оси, где пратимо кретање Сунца у току дана од истока ка западу, односно инклинационог угла (слика 24). Други случај је да поред овог закретања имамо закретање панела у правцу север-југ, тј. пратимо азимутни угао (слика 25). За закретање панела користе се електромотори који такође користе електричну енергију из одређених акумулатора или градске мреже. За контролу окретања ротора користе се одговарајући централизовани рачунарски системи, а у случају да дође до отказивања система соларни модули се могу ручно подешавати према Сунцу.

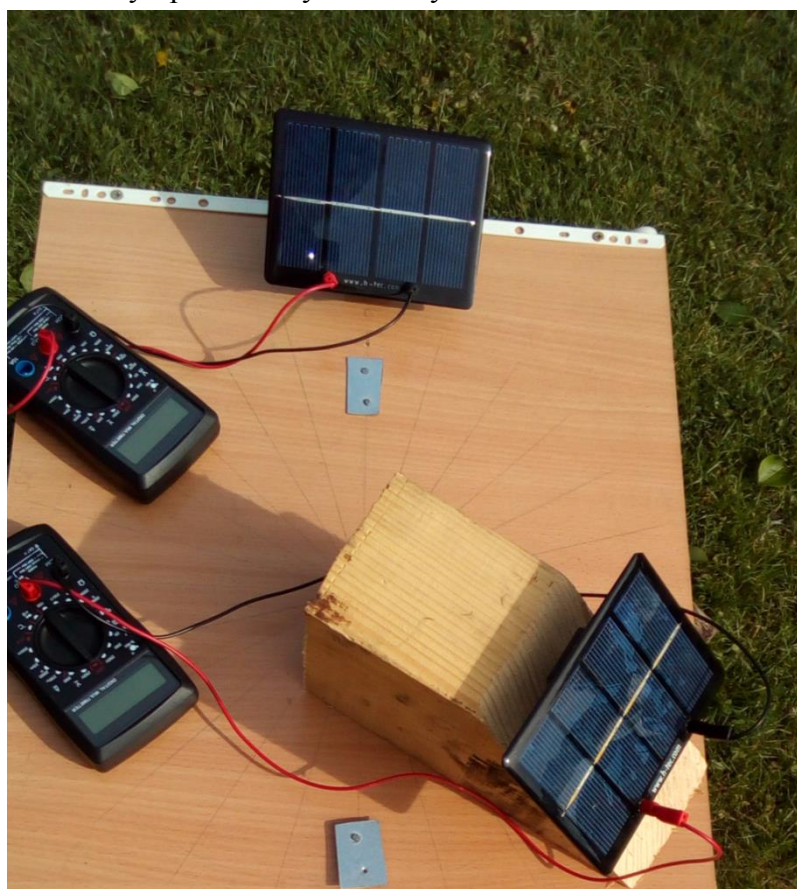


Слика 25.- Једноосно ротациони модул

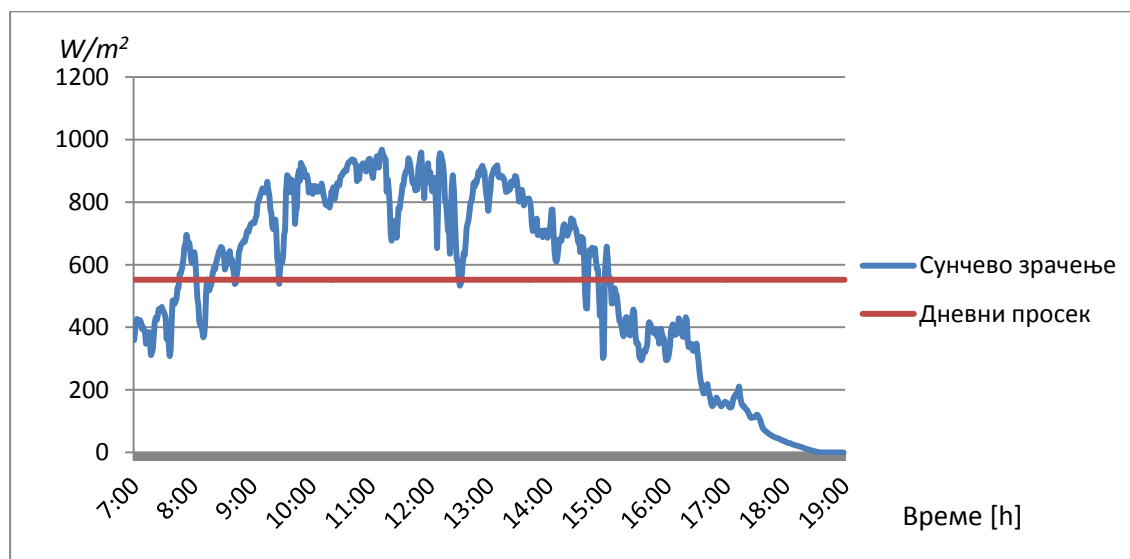


Слика 26.- Двоосно ротациони модул

За ову симулацију коришћена су два соларна панела, мерни инструменти унимери и безконтактни мерач температуре. Панели су истих површина као и истих номиналних вредности струје и напона. Један панел је постављен као фиксни под углом од  $44^\circ$  према хоризонталној равни, док је други панел служио као једноосно померан и пратио кретање Сунца од истока према западу (слика лево). Мерење је вршено током сунчаног дана, а измерени подаци су приказани у наставку текста.



Слика 27.- Покретни и фиксни панел



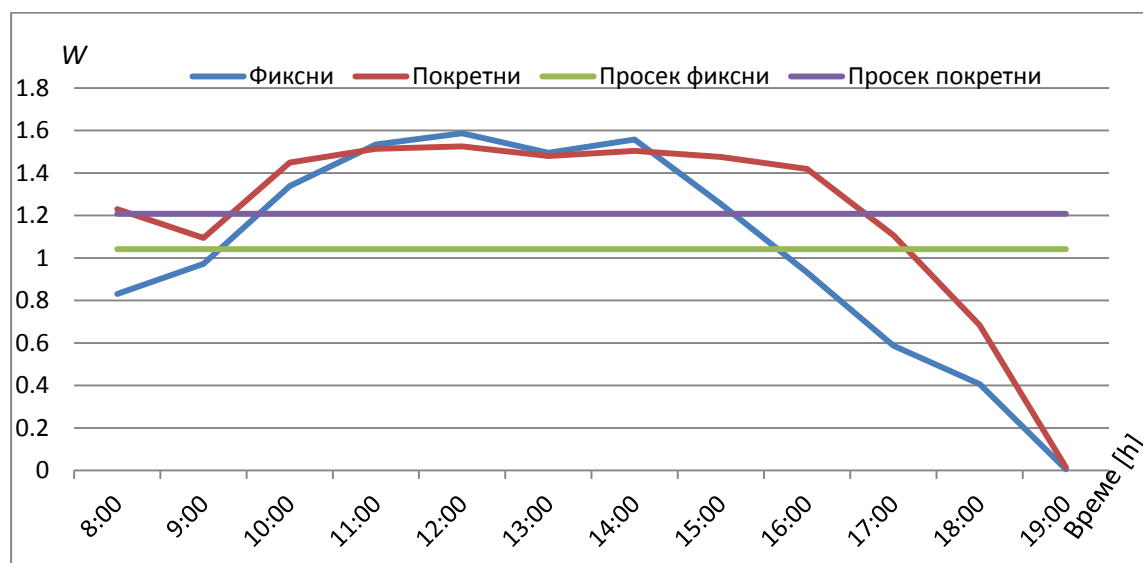
Слика 28.- Интезитет сунчевог зрачења (26.04.2017) (7)

| Време (h)  | Напон (V) | Струја (mA) | Температура панела (°C) |
|------------|-----------|-------------|-------------------------|
| 08:00      | 2.34      | 355         | 31.7                    |
| 09:00      | 2.355     | 413         | 32.15                   |
| 10:00      | 2.32      | 577         | 41.9                    |
| 11:00      | 2.28      | 673         | 47.8                    |
| 12:00      | 2.30      | 690         | 49.2                    |
| 13:00      | 2.29      | 653         | 45                      |
| 14:00      | 2.29      | 680         | 45.7                    |
| 15:00      | 2.28      | 555         | 43.5                    |
| 16:00      | 2.30      | 405         | 39                      |
| 17:00      | 2.26      | 260         | 36.9                    |
| 18:00      | 2.26      | 180         | 30.61                   |
| 19:00      | 1.16      | 4.8         | 19.3                    |
| 26.04.2017 |           |             |                         |

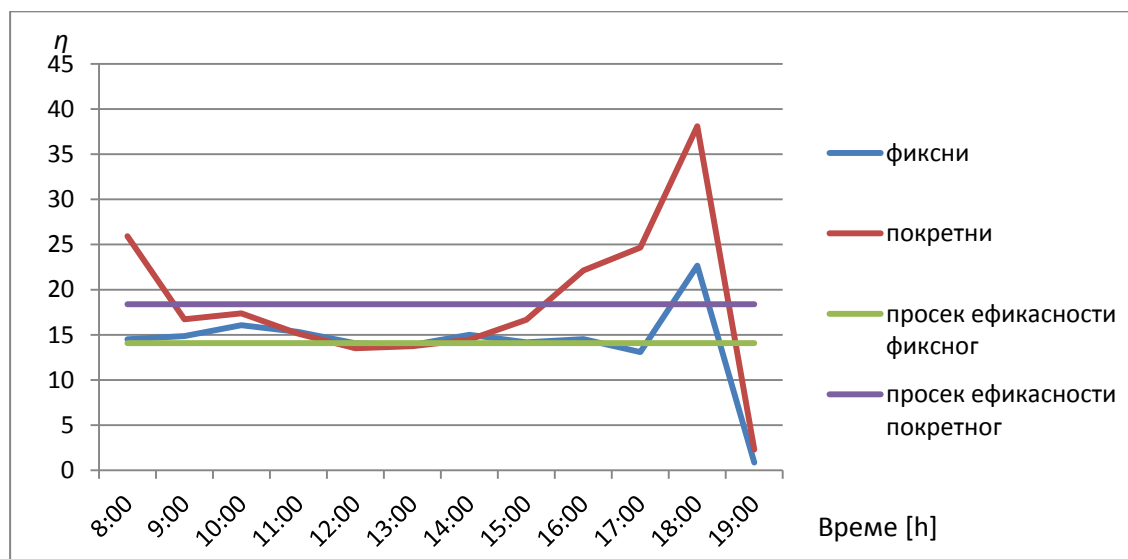
Табела 16.- Излазни параметри ПВ фиксног панела по ведром дану

| Време (h)  | Напон (V) | Струја (mA) | Температура панела (°C) |
|------------|-----------|-------------|-------------------------|
| 08:00      | 2.31      | 532.5       | 37.9                    |
| 09:00      | 2.32      | 470         | 35.4                    |
| 10:00      | 2.30      | 630         | 44.6                    |
| 11:00      | 2.26      | 670         | 48.6                    |
| 12:00      | 2.26      | 675         | 49.6                    |
| 13:00      | 2.26      | 655         | 46.7                    |
| 14:00      | 2.28      | 660         | 44.2                    |
| 15:00      | 2.27      | 650         | 45.3                    |
| 16:00      | 2.27      | 625         | 46.9                    |
| 17:00      | 2.26      | 490         | 46.7                    |
| 18:00      | 2.28      | 300         | 32.1                    |
| 19:00      | 1.43      | 10.37       | 19.73                   |
| 26.04.2017 |           |             |                         |

Табела 17.- Излазни параметри ПВ покретног панела по ведром дану



Слика 29.- Поређење електричне снаге покретног и фиксног ПВ панела



Слика 30.- Ефикасност фиксног и покретног панела

На слици 28 дат је приказ интезитета Сунчевог зрачења за посматрани дан као и дневни просек Сунчевог зрачења. У табелама 16 и 17 приказани су резултати мерења који представљају средње вредности за посматрани сат. Сlike 29 и 30 показују кључне податке код поређења фиксног и покретног панела. Код поређења снаге фиксног и покретног панела у подневним сатима имамо приближно исте вредности што се се не може рећи и за преподневне и поподневне сате. Управо су то предности једноосног система, наиме имамо стално праћење Сунчевих зрака од истока према западу у току дана, што у великој мери утиче на производњу електричне енергије иако пратимо кретање само инклинационалног угла. Када би смо гледали период од 8-11 часова видимо да у том интервалу имамо губитак електричне снаге од  $50 \text{ W/m}^2$  што се тиче фиксног панела, а за поподневни период од 15 до 19 часова имали бисмо губитак од скоро  $120 \text{ W/m}^2$ . То значи да дневно можемо изгубити више енергије у случају немоторизације једноосног модула по  $\text{m}^2$  него што би смо произвели за облачан дан што је доказано у предходној тачки. Са праћењем висине Сунца имали бисмо већу искоришћеност сунчевог зрачења по неким истраживањима и за 25-30 % (5), али са тим расту трошкови одржавања таквог модула. У оваквим условима у којима је вршена симулација имамо ефикаснији рад једноосног закретања панела у односу на фиксни за чак 23% што представља одличне резултате за једноосни систем. Иако се ове вредности губитка неке могу учинити малим, када би смо имали соларну електрану од 10 kW са фиксним модулима а то би могло бити 40 панела по 250 W, то би значило да за овакав један дан за који је вршено мерење имамо губитак нешто виши од 11 kW у односу на једноосно закретање модула, а то је довољно за једну дневну потрошњу електричне енергије просечне српске породице коју чине три члана према подацима Републичког завода за статистику.

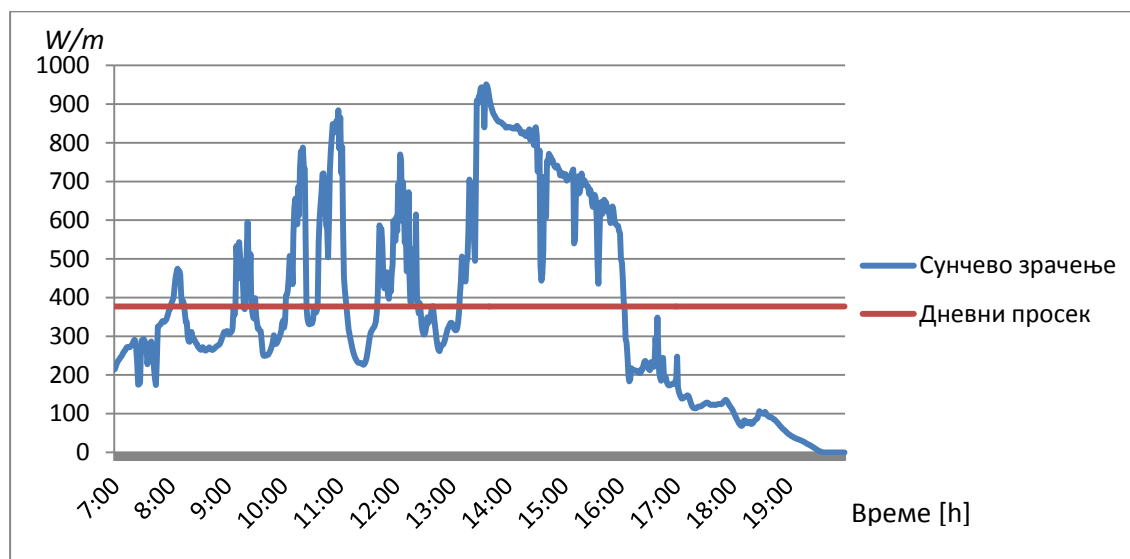
### 5.2.2. Утицај температуре на излазне параметре ПВ панела



Слика 31.- Хлађење панела

Још један од великих недостатака соларних ПВ панела, како стручњаци тврде, а који утиче на ефикасност панела јесте и температура панела. За сваки панел произвођач дефинише температуру при номиналним условима рада (*NOCT–Nominal Operation Cell Temperature*). *NOCT* је температура панела при амбијентној температури 20 °C, соларној ирадијацији 800 W/m<sup>2</sup>, брзини ветра 1 m/s. У овом поглављу биће више речи о утицају хлађења панела на производњу и ефикасност панела, тј. питањем побољшања излазних параметара принудном циркулацијом ваздуха како су навели литературни подаци (8), као и питањем исплативости улагања електричне енергије на хлађење панела и повећање производње електричне енергије.

Опрема која је коришћена у овом експерименту се састоји од два ПВ панела истих перформанси, два унимера, безконтактни мерач температуре, и вентилатор снаге 10 mW. Оба панела су постављена као фиксна под углом од 44° према хоризонталној равни и усмерени ка југу. У даљем делу ове тачке биће приказани резултати мерења за посматрани дан.

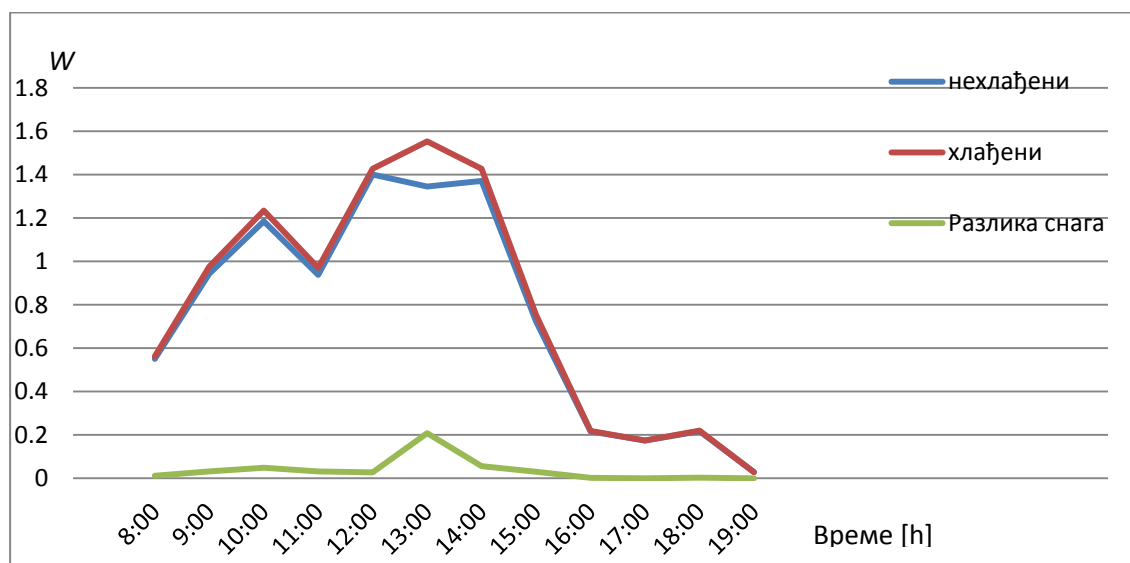
Слика 32.- Интезитет сунчевог зрачења ( $\text{W/m}^2$ ), (27.04.2017) (7)

| Време (h)  | Напон (V)                                             | Струја (mA) | Температура панела ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|------------|-------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------|
| 07:00      | Температура панела је била испод $25^{\circ}\text{C}$ |             |                                           |
| 08:00      | 2.34                                                  | 235         | 23.2                                      |
| 09:00      | 2.30                                                  | 410         | 34.4                                      |
| 10:00      | 2.30                                                  | 515         | 37.4                                      |
| 11:00      | 2.26                                                  | 415         | 40.5                                      |
| 12:00      | 2.24                                                  | 625         | 47.5                                      |
| 13:00      | 2.26                                                  | 595         | 44.5                                      |
| 14:00      | 2.23                                                  | 615         | 50                                        |
| 15:00      | 2.16                                                  | 335         | 49                                        |
| 16:00      | 2.16                                                  | 100         | 33.6                                      |
| 17:00      | 2.17                                                  | 80          | 27.7                                      |
| 18:00      | 2.17                                                  | 100         | 31.5                                      |
| 19:00      | 1.94                                                  | 15          | 23                                        |
| 27.04.2017 |                                                       |             |                                           |

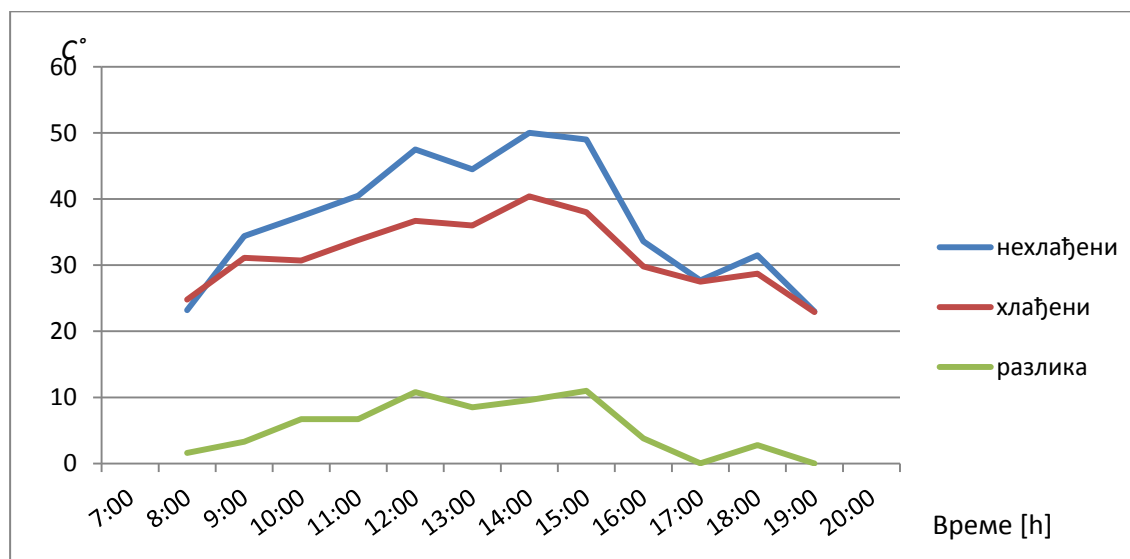
Табела 18.- Излазни параметри ПВ панела за фиксни панел под углом  $44^{\circ}$

| Време (h)  | Напон (V)                              | Струја (mA) | Температура панела (°C) |
|------------|----------------------------------------|-------------|-------------------------|
| 07:00      | Температура панела је била испод 25 °C |             |                         |
| 08:00      | 2.34                                   | 240         | 24.8                    |
| 09:00      | 2.35                                   | 415         | 31.1                    |
| 10:00      | 2.35                                   | 525         | 30.7                    |
| 11:00      | 2.31                                   | 420         | 33.8                    |
| 12:00      | 2.32                                   | 615         | 36.7                    |
| 13:00      | 2.30                                   | 675         | 36                      |
| 14:00      | 2.32                                   | 615         | 40.4                    |
| 15:00      | 2.25                                   | 335         | 38                      |
| 16:00      | 2.18                                   | 100         | 29.8                    |
| 17:00      | 2.17                                   | 80          | 27.5                    |
| 18:00      | 2.20                                   | 100         | 28.7                    |
| 19:00      | 1.88                                   | 15          | 22.9                    |
| 27.04.2017 |                                        |             |                         |

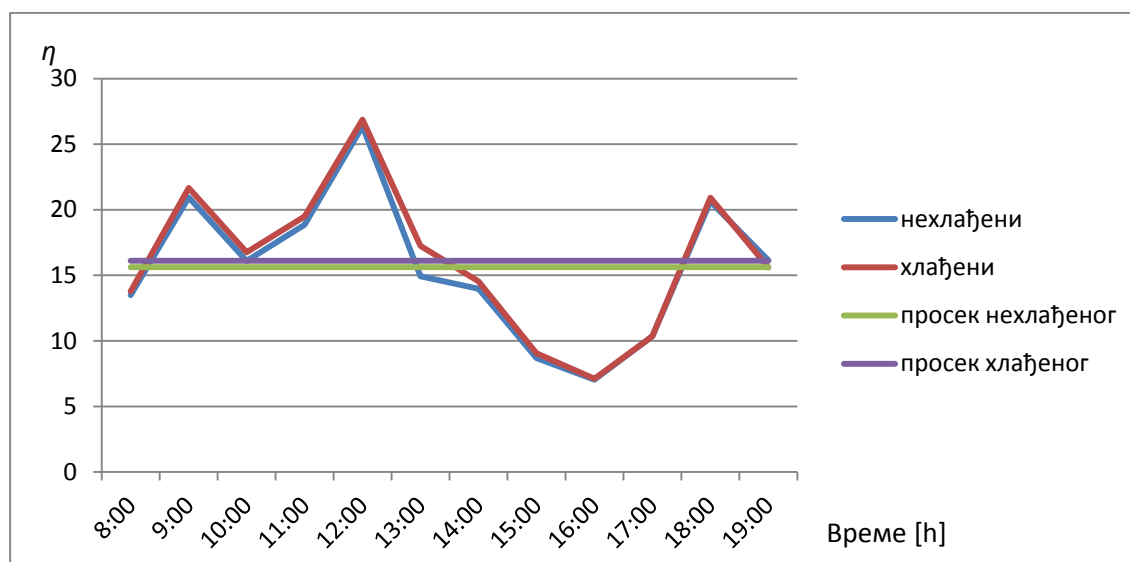
Табела 19.- Излазни параметри ПВ панела за фиксни панел са хлађењем под углом 44°



Слика 33.- Утицај хлађења на снагу ПВ панела



Слика 34.- Поређење промена температуре нехлађеног и хлађеног ПВ панела

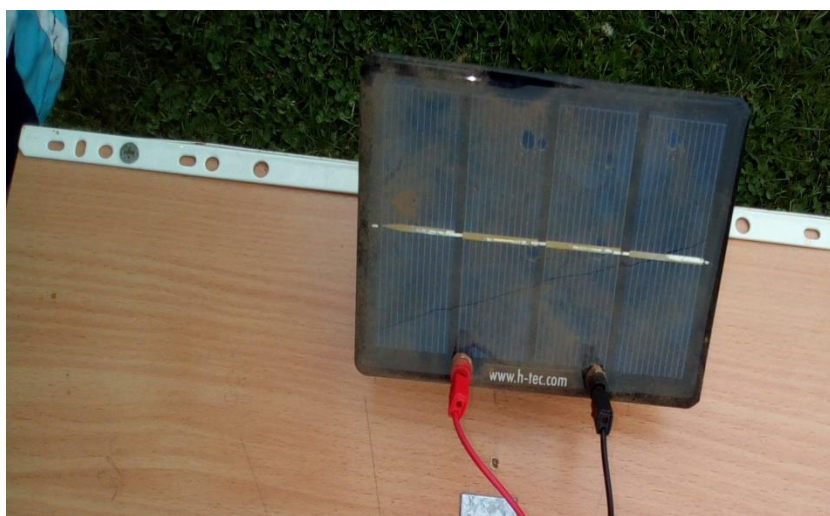


Слика 35.- Ефикасност нехлађеног и хлађеног панела

Према истраживањима (8) оптимално је хладити панел уколико им температура пређе  $25^{\circ}\text{C}$  и та препорука је прихваћена у овом раду. Та температуре је измерена након осам сати ујутро, после чега се кренуло са мерењем. Сва снага која је произведена у току дана помоћу соларних панела коришћена је на покретање вентилатора да би се остварило хлађење, и поред тога температуру панела није било могуће одржати испод  $25^{\circ}\text{C}$  током целог дана што је вероватно и у великој мери утицало на крајње резултате изложене у овом поглављу. Максимална остварена разлика у температури износила је око  $11^{\circ}\text{C}$ , и то у подневним сатима кад је забележена и максимална производња електричне енергије. Са слике 33 можемо видети да је разлика у производњи електричне енергије безначајна, осим у подневним сатима тј. од 12 до 14 часова. Максималан добитак електричне снаге за измерен дан хлађеног панела је  $35 \text{ W/m}^2$ , при чему треба имати у виду да је за хлађење коришћена електрична енергија

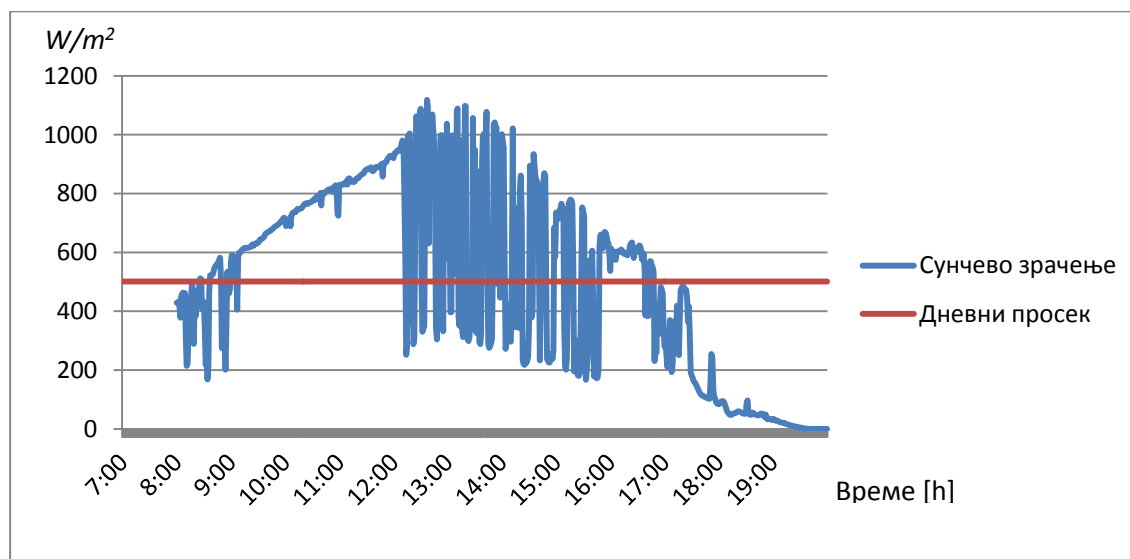
произведена са оба панела, која није занемарљива. Видљива промена која се може очитати при мерењу јесте да са порастом температуре долази до пада напона на крајевима панела, а струја остаје приближно иста. Што се тиче ефикасности панела регистроване промене услед хлађења једног од панела су од малог значаја. Максималан пораст ефикасности који можемо очекивати при хлађењу је до 3%, одакле можемо закључити да са релативно много уложене енергије на хлађење панела добијамо мали пораст ефикасности.

### **5.2.3. Утицај запрљаности на излазне параметре ПВ панела**



Слика 36.- Запрљан ПВ панел

Приликом дужег излагања спољашњим условима долази до накупљања прљавштине на панел. Да би видели какве ће последице имати утицај прљавштине на ефикасност и излазне карактеристике панела, вршена су испитивања панела са чистим и са намерно запрљаним панелима по ведром и облачном времену. Код намерно запрљаног панела коришћена је земљана прашина као најчешћи узрок прљавштине. Опрема која је коришћена за овај експеримент су два ПВ панела истих номиналних карактеристика, два унимера и бесконтактни мерач температуре. У даљем тексту су представљени резултати мерења.

Слика 37.- Интезитет Сунчевог зрачења ( $W/m^2$ ) (25.04,2017) (7)

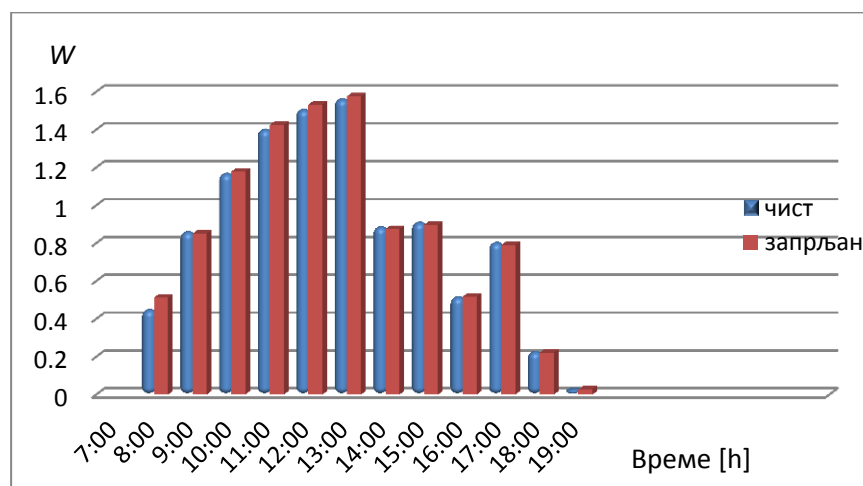
Интезитет Сунчевог зрачења који је представљен на слици горе је приказан помоћу података РХМЗ-а, тако што су мерења вршена на сваки минут и затим уношени подаци у график како би се добила крива која је представљена на слици 37. Све слике са интезитетом Сунчевог зрачења који су представљени у овој петој тачки су добијени од РХМЗ-а, и представљају оригиналне податке добијене са мерне станице Панчево.

| Време (h)  | Напон (V) | Струја (mA) | Температура панела ( $^{\circ}C$ ) |
|------------|-----------|-------------|------------------------------------|
| 08:00      | 2.33      | 220         | 26.2                               |
| 09:00      | 2.33      | 365         | 32.8                               |
| 10:00      | 2.31      | 510         | 40                                 |
| 11:00      | 2.28      | 625         | 46.8                               |
| 12:00      | 2.27      | 675         | 49.7                               |
| 13:00      | 2.30      | 685         | 44.6                               |
| 14:00      | 2.27      | 385         | 36.2                               |
| 15:00      | 2.30      | 390         | 31.5                               |
| 16:00      | 2.28      | 227         | 30.3                               |
| 17:00      | 2.29      | 345         | 36.2                               |
| 18:00      | 2.22      | 100         | 25.9                               |
| 19:00      | 1.60      | 16.4        | 19.7                               |
| 25.04.2017 |           |             |                                    |

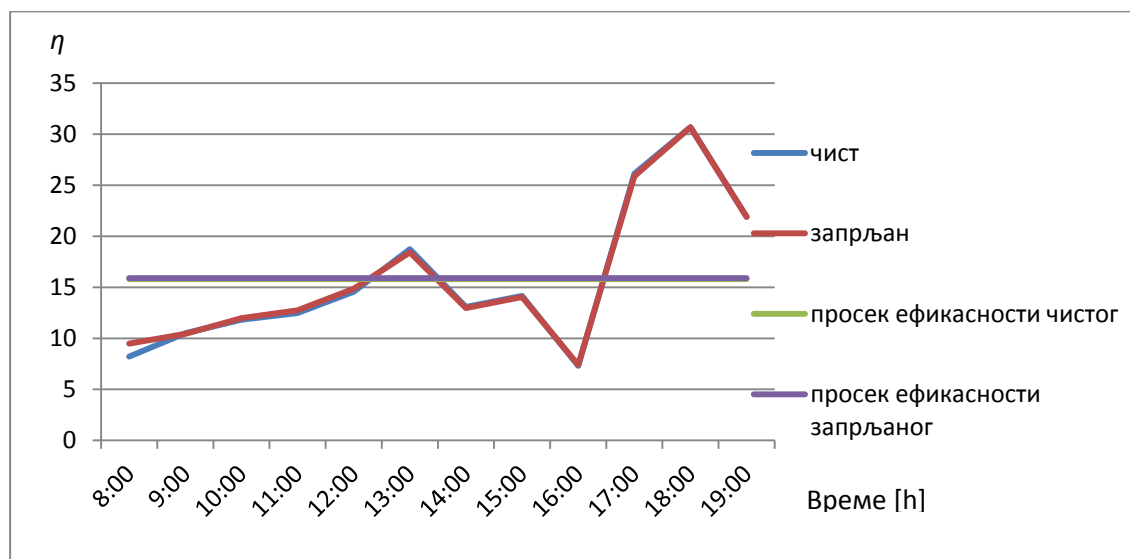
Табела 20.- Излазни параметри ПВ панела за фиксни запрљан панел под углом  $44^{\circ}$ , за сунчан дан

| Време (h)  | Напон (V) | Струја (mA) | Температура панела (°C) |
|------------|-----------|-------------|-------------------------|
| 08:00      | 2.11      | 210         | 25.4                    |
| 09:00      | 2.31      | 370         | 33.2                    |
| 10:00      | 2.28      | 510         | 40.7                    |
| 11:00      | 2.27      | 615         | 46.4                    |
| 12:00      | 2.24      | 670         | 49                      |
| 13:00      | 2.29      | 680         | 44.7                    |
| 14:00      | 2.23      | 395         | 36.1                    |
| 15:00      | 2.29      | 395         | 31.3                    |
| 16:00      | 2.25      | 227         | 30.25                   |
| 17:00      | 2.28      | 350         | 34                      |
| 18:00      | 2.22      | 100         | 26.1                    |
| 19:00      | 1.64      | 16          | 19.83                   |
| 25.04.2017 |           |             |                         |

Табела 21.- Излазни параметри ПВ панела за фиксни чист панел под углом 44°, за сунчан дан

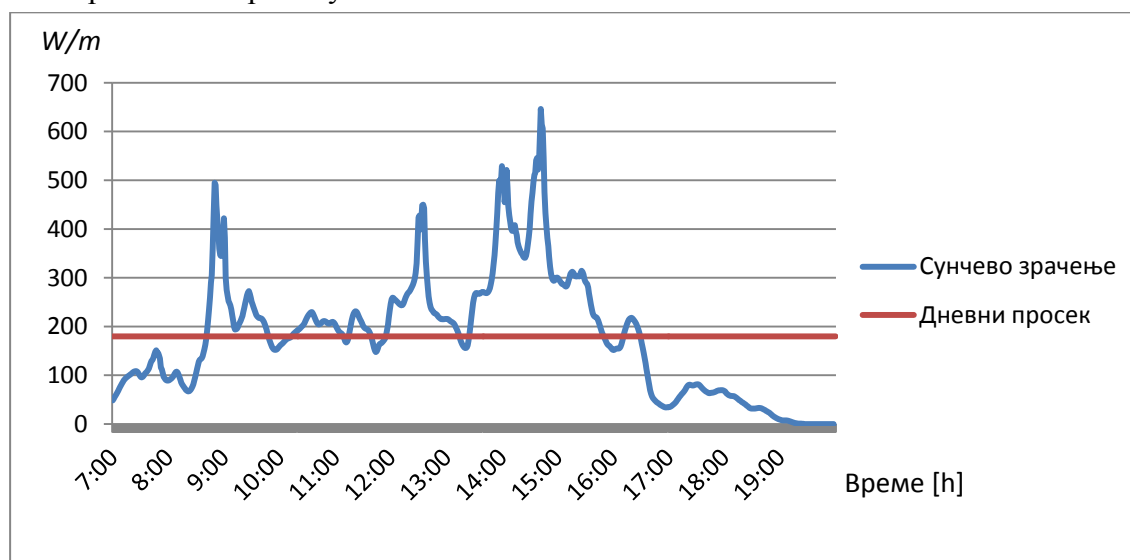


Слика 38.- Утицај запрљаности ПВ панела на снагу истог за сунчан дан



Слика 39.- Ефикасност чистог и запрљаног панела по ведром времену

Када посматрамо један променљиво облачан дан као у овом случају, прво што можемо уочити са приказаних резултата и графика то је свакако ефикасност запрљаног и чистог панела. На претходном графику видимо да немамо побољшану ефикасност у случају чистог панела, да су то просечне вредности око 16 %, и да утицај земљане прашине на панелу не доводи до значајног смањења производње електричне енергије. Оно што видимо са слике 38 је да у подневним часовима од 11 до 13 часова имамо већу производњу електричне снаге од препоручених вредности које је дао произвођач за панел, а и да немамо неких битнијих осцилација у производњи енергије током дана што нас наводи на закључак да земљана прашина по сунчаном времену не утиче на производњу и ефикасност панела. У наставку рада су посматрани случајеви са немерно запрљаним и чистим панелом за облачан дан. Поново је коришћена земљана прашина за намерно запрљан панел, и ти резултати мерења су представљени у табелама 22. и 23. Мерења су вршена до 16:00 часова, после чега је дошло до појаве кише због чега је мерење морало бити прекинуто.



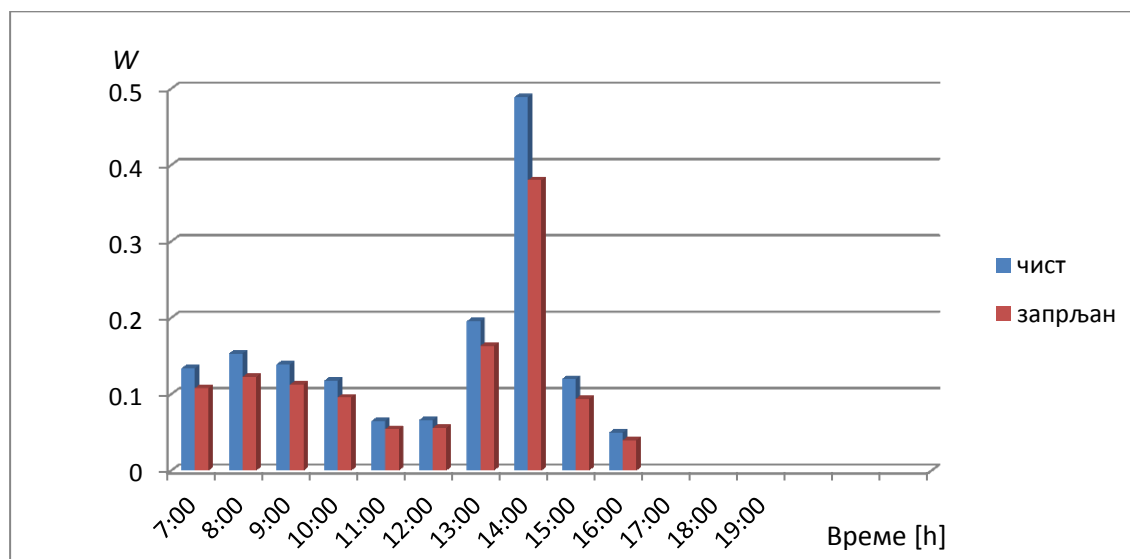
Слика 40.- Интензитет Сунчевог зрачења (W/m²), (28.04.2017) (7)

| Време (h)  | Напон (V)                  | Струја (mA) | Температура<br>панела (°C) |
|------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
| 07:00      | 2.15                       | 50.3        |                            |
| 08:00      | 2.17                       | 56.5        | 23.4                       |
| 09:00      | 2.15                       | 52.45       | 23.6                       |
| 10:00      | 2.14                       | 44.8        | 22.95                      |
| 11:00      | 2.06                       | 26.4        | 22.3                       |
| 12:00      | 2.07                       | 27          | 22.25                      |
| 13:00      | 2.19                       | 74.5        | 25.45                      |
| 14:00      | 2.25                       | 169         | 30.25                      |
| 15:00      | 2.13                       | 44          | 25.3                       |
| 16:00      | 2.00                       | 20          | 24                         |
| 17:00      | Мерење прекинуто због кише |             |                            |
| 28.04.2017 |                            |             |                            |

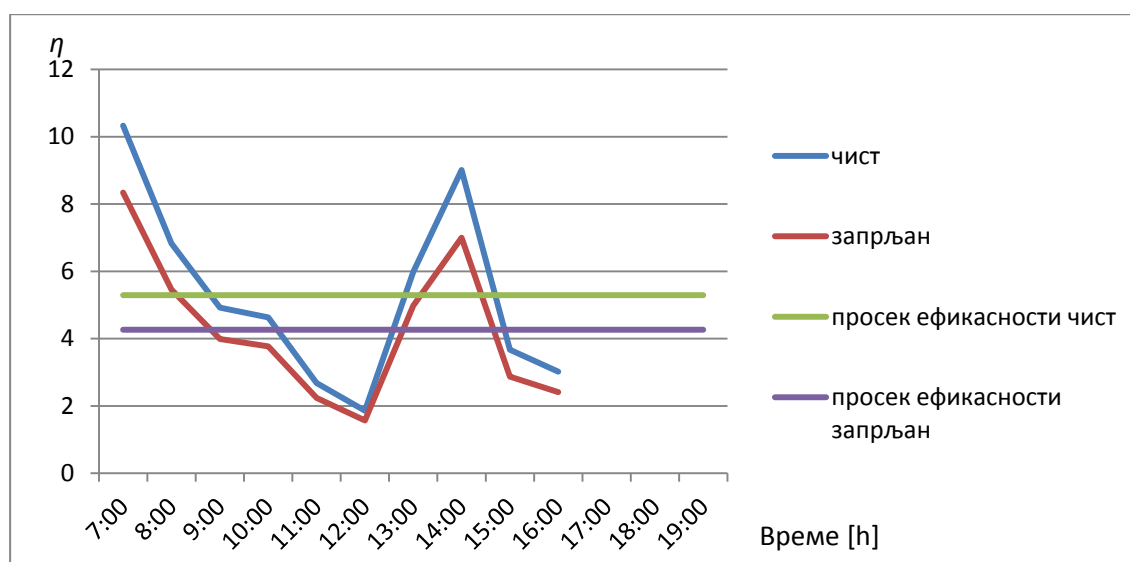
Табела 22.- Излазне карактеристике запрљаног фиксног панела по облачном времену

| Време (h)  | Напон (V)                  | Струја (mA) | Температура<br>панела (°C) |
|------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
| 07:00      | 2.16                       | 62          | 20.4                       |
| 08:00      | 2.19                       | 70          | 23.7                       |
| 09:00      | 2.18                       | 63.8        | 23.8                       |
| 10:00      | 2.16                       | 54.45       | 22.95                      |
| 11:00      | 2.07                       | 31.45       | 22.45                      |
| 12:00      | 2.07                       | 32          | 22.45                      |
| 13:00      | 2.21                       | 88.5        | 25.4                       |
| 14:00      | 2.29                       | 213.5       | 30.8                       |
| 15:00      | 2.14                       | 56          | 25                         |
| 16:00      | 2.00                       | 25          | 23.7                       |
| 17:00      | Мерење прекинуто због кише |             |                            |
| 28.04.2017 |                            |             |                            |

Табела 23.- Излазне карактеристике чистог фиксног панела по облачном времену



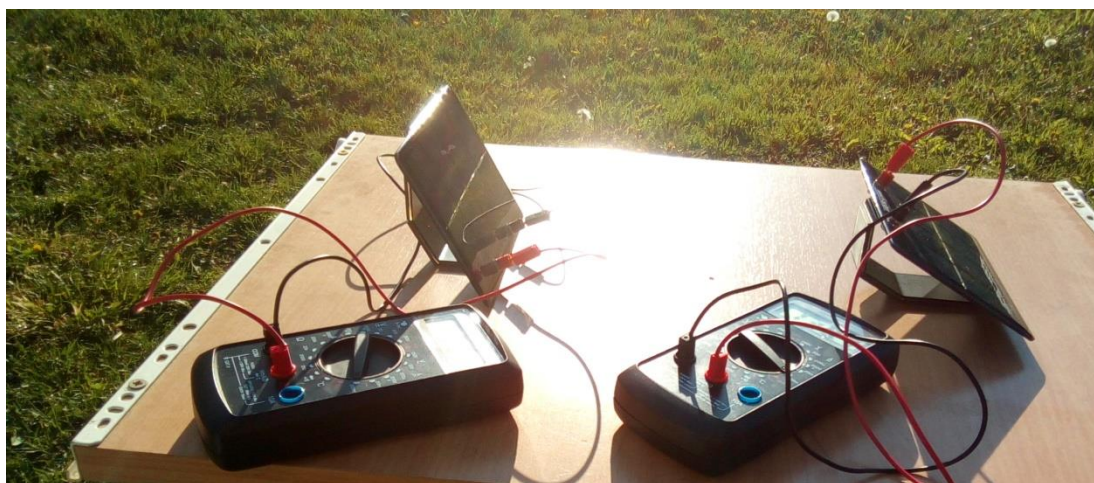
Слика 41.- Утицај запрљаности ПВ панела на снагу истог за облачан дан



Слика 42.- Ефикасност чистог и запрљаног панела по облачном времену

Оно што није био случај код симулације панела по сунчаном дану, по облачном дану и дифузионом зрачењу то јесте. Ту се јавља одговарајућа разлика код ефикасности а и у производњи електричне снаге по облачном дану чак за 20 % код поређења запрљаног и чистог панела. Дрastiчна разлика која се јавља при поређење запрљаног панела по ведром и облачном времену расте и преко 70 %, док је код чистог панела та разлика око 65%. Уколико бисмо посматрали само период облачности у том случају имамо добитак електричне снаге од  $23 \text{ W/m}^2$ / дан тако да је јако незахвално саветовати да ли треба чистити панеле, али да свакако са знатним повећањем површине панела треба вршити периодично чишћење.

#### 5.2.4. Утицај нагиба ПВ панела на излазне параметре

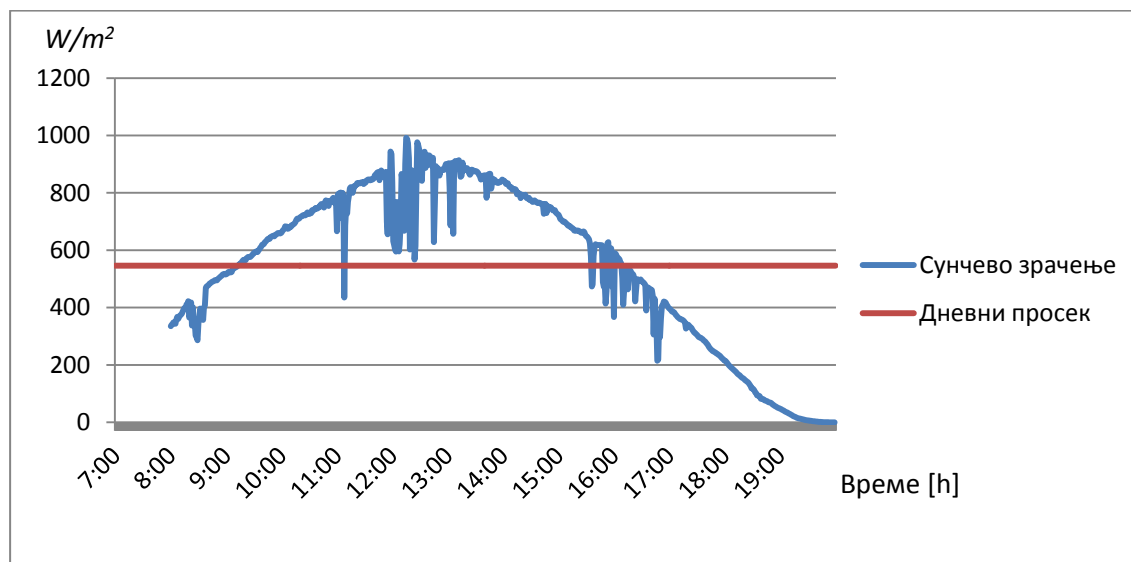


Слика 43.- Панели под углом од 60° (лево) и 30° (десно)

У циљу повећања ефикасности панела неопходно је правилно оријентисати и поставити панел под нагибом, тако да можемо максимално искористити интензитет Сунчевог зрачења. Променом нагиба површине панела можемо утицати на производњу електричне енергије. Генерално, када би смо хтели да искористимо што више зрачења које пада на површину панела, услед дневне и годишње промене положаја Сунца морали би смо да мењамо угао панела, односно да имамо системе за праћење Сунца. Друга опција је промена угла услед годишњих доба. Тако би за јесењи и пролетњи период одговарао угао од  $41.8037^\circ$  према хоризонталној равни, за летњи  $16.37^\circ$  и зимски угао од  $68.87^\circ$ , док је за фиксни угао вредност  $44^\circ$ . Ове вредности угла се односе за град Аранђеловац где је мерење и вршено, а оптималне вредности угла за Србију крећу се од  $41^\circ$  до  $44^\circ$  за фиксни панел. Овде ће бити вршена мерења за већ унапред дефинисане углове, и то за углове од  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  и  $90^\circ$  према хоризонталној равни, а опрема која је коришћена су соларни панели, унимери, и безконтактни мерач температуре. Резултати тих мерења су представљени даље у тексту.

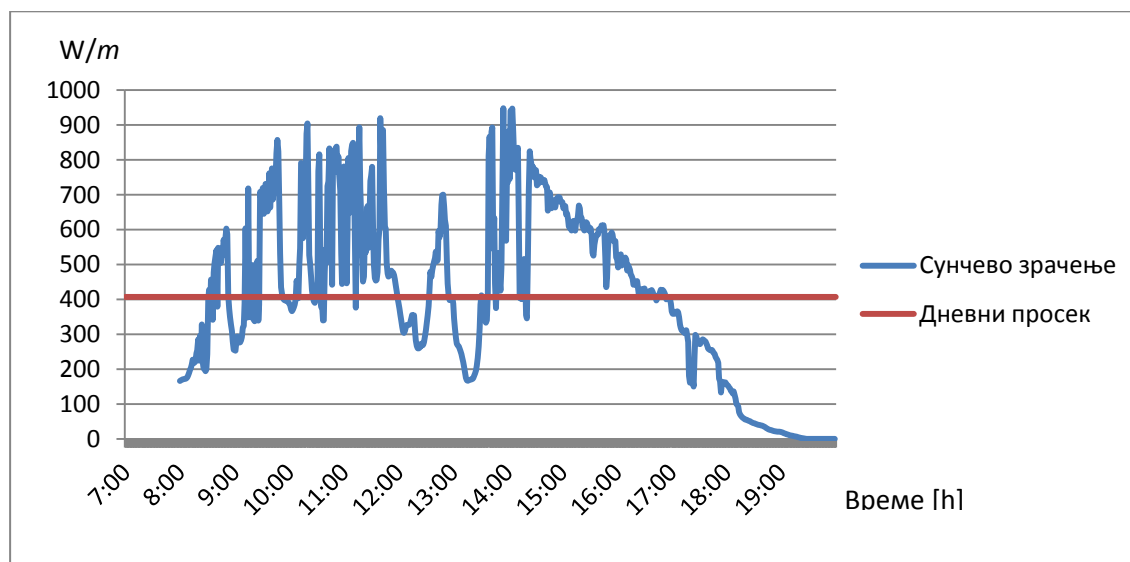
| Време (h) | Напон (V)       | Струја (mA) | Температура<br>панела (°C) |
|-----------|-----------------|-------------|----------------------------|
| 07:00     |                 |             |                            |
| 08:00     | 2.33            | 260         | 25.8                       |
| 09:00     | 2.37            | 375         | 28.5                       |
| 10:00     | 2.38            | 435         | 29.05                      |
| 11:00     | 2.32            | 435         | 34.75                      |
| 12:00     | 2.34            | 485         | 35.9                       |
| 13:00     | 2.32            | 520         | 39.65                      |
| 14:00     | 2.26            | 510         | 41.2                       |
| 15:00     | 2.28            | 445         | 41.2                       |
| 16:00     | 2.29            | 345         | 36.4                       |
| 17:00     | 2.26            | 210         | 32.95                      |
| 18:00     | 2.21            | 89.5        | 26.4                       |
| 19:00     | 2.00            | 20.8        | 20.8                       |
| 20:00     | Мерење завршено |             |                            |
| 1.05.2017 |                 |             |                            |

Табела 24.- Излазне карактеристике ПВ панела за угао од 0°

Слика 44.- Интезитет сунчевог зрачења ( $W/m^2$ ), (1.05.2017) (7)

| Време (h)  | Напон (V)                         | Струја (mA) | Температура<br>панела (°C) |
|------------|-----------------------------------|-------------|----------------------------|
| 08:00      | 2.32                              | 137         | 17.7                       |
| 09:00      | 2.32                              | 310         | 31.4                       |
| 10:00      | 2.30                              | 430         | 38                         |
| 11:00      | 2.32                              | 560         | 38.3                       |
| 12:00      | 2.36                              | 610         | 32                         |
| 13:00      | 2.28                              | 460         | 36.3                       |
| 14:00      | 2.27                              | 670         | 48.4                       |
| 15:00      | 2.24                              | 150         | 29.5                       |
| 16:00      | 2.21                              | 80          | 25.5                       |
| 17:00      | <i>Мерење прекинуто због кише</i> |             |                            |
| 18:00      |                                   |             |                            |
| 19:00      |                                   |             |                            |
| 20:00      |                                   |             |                            |
| 15.04.2017 |                                   |             |                            |

Табела 25.- Излазне карактеристике ПВ панела за угао од 30°

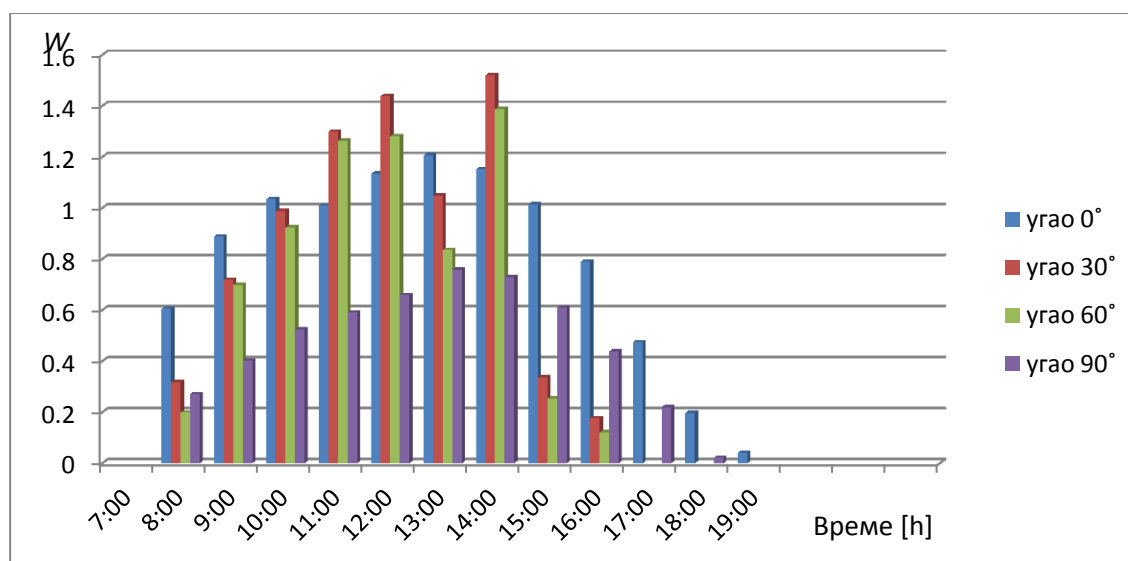
Слика 45. – Интезитет сунчевог зрачења ( $W/m^2$ ), (15.04.2017) (7)

| Време (h)         | Напон (V)                         | Струја (mA) | Температура<br>панела (°C) |
|-------------------|-----------------------------------|-------------|----------------------------|
| 08:00             | 2.29                              | 87          | 16.3                       |
| 09:00             | 2.33                              | 300         | 29.6                       |
| 10:00             | 2.31                              | 400         | 36.9                       |
| 11:00             | 2.34                              | 540         | 39.1                       |
| 12:00             | 2.33                              | 550         | 31.8                       |
| 13:00             | 2.26                              | 370         | 36.9                       |
| 14:00             | 2.24                              | 620         | 47.6                       |
| 15:00             | 2.21                              | 115         | 29.3                       |
| 16:00             | 2.21                              | 55          | 25.2                       |
| 17:00             | <i>Мерење прекинуто због кише</i> |             |                            |
| 18:00             |                                   |             |                            |
| 19:00             |                                   |             |                            |
| <i>15.04.2017</i> |                                   |             |                            |

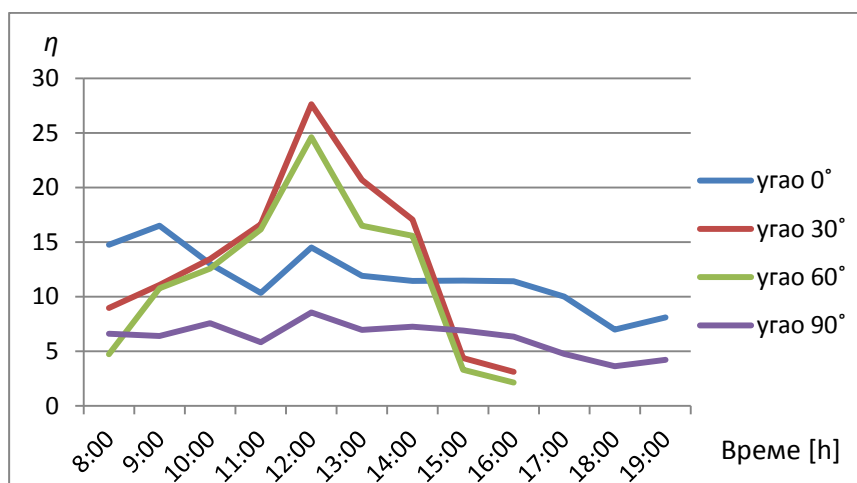
Табела 26.- Излазне карактеристике ПВ панела за угао од 60°

| Време (h) | Напон (V) | Струја (mA) | Температура панела (°C) |
|-----------|-----------|-------------|-------------------------|
| 07:00     |           |             |                         |
| 08:00     | 2.26      | 120         | 21.9                    |
| 09:00     | 2.30      | 175         | 23.3                    |
| 10:00     | 2.33      | 225         | 23.8                    |
| 11:00     | 2.29      | 258         | 28.2                    |
| 12:00     | 2.31      | 285         | 28.9                    |
| 13:00     | 2.30      | 330         | 32.1                    |
| 14:00     | 2.28      | 320         | 33.6                    |
| 15:00     | 2.26      | 270         | 34.9                    |
| 16:00     | 2.25      | 195         | 30.3                    |
| 17:00     | 2.20      | 100         | 28                      |
| 18:00     | 2.12      | 43.8        | 24.7                    |
| 19:00     | 1.90      | 11.4        | 20.8                    |
| 1.05.2017 |           |             |                         |

Табела 27.- Излазне карактеристике ПВ панела за угао од 90°



Слика 46.- Зависност снаге од нагиба угла



Слика 47.- Ефикасност панела у зависности од угла ПВ панела

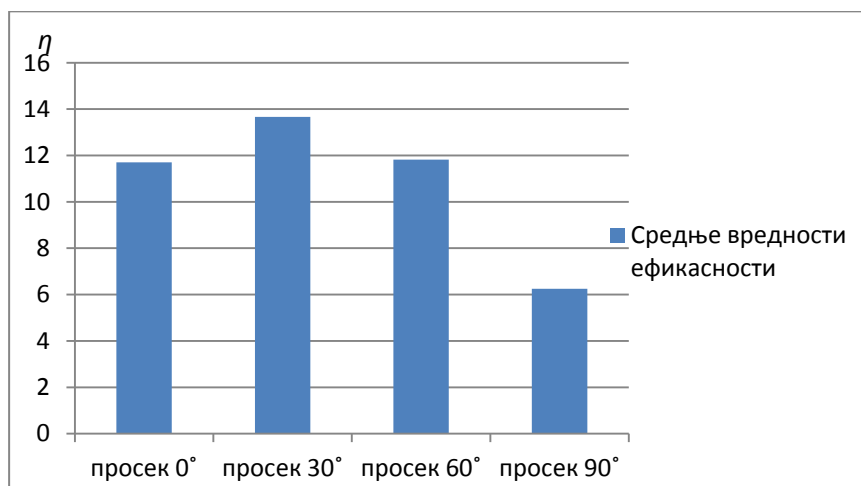
Због немогућности једнодневног праћења различитих углова панела, мерења су вршена за два различита дана тако да је ову тачку најбоље посматрати кроз график ефикасности панела за различите углове. Табеле 24,25,26 и 27 приказују измерене податке за посматране временске интервале, док слике 44 и 45 представљају вредности интензитета Сунчевог зрачења за два посматрана дана. Логично је да ћемо због различитог интензитета Сунчевог зрачења имати и различиту производњу електричне енергије за те дане, тако да је незахвално на тај начин доносити закључке и фаворизовати неки од предложених углова. Оно на шта се можемо ослонити је свакако ефикасност панела у раду, одакле можемо донети адекватн суд о углу панела који ће резултовати највећом количином произведене енергије. Како смо већ рекли ови панели којима су вршена мерења имају металну основу са магнетом који могу да мењају угао, а ти углови које смо посматрали су  $0,30,60$  и  $90$  степени. Што се тиче панела под угловима од  $0^\circ$  и  $90^\circ$  њихова будућност свакако ће зависити од могућности интеграције панела у конструкције зграда, нпр. аутопутева као што је урадила Француска, иако њихова ефикасност није на завидном нивоу (9). Тако за потпуно вертикалан панел, односно панел под углом од  $90^\circ$  имамо просечну ефикасност од 6.25 %, а за потпуно

хоризонталан панел под углом од  $0^\circ$  просечна ефикасност иде и до непуних 12%. Можемо приметити са слике 46. да производња електричне снаге за ова два угла током целог дана не достиже вредности које је произвођач прописао односно испод 1.2 W по панелу. Посматрањем графика на слици 46 за угао од  $0^\circ$  можемо видети да је он у бољој могућности да произведе већу количину електричне енергије у односу на панел под углом од  $90^\circ$ . Један од разлога може бити и тај да са променом висине Сунца на хоризонталан панел доспева већи интензитет Сунчевог зрачења, односно упадни угао сунчевих зрака се повећава са повећањем висине Сунца на небу што ће директно утицати на количину сунчевог зрачења које пада на хоризонталан панел. У томе иде и тврдња која је дата у следећој табели која приказује дневне месечне и годишње просеке зрачења на површине панела под угловима од  $0^\circ$  и  $90^\circ$ .

| Угао            | Јан  | Феб  | Мар  | Апр  | <b>Мај</b>  | Јун  | Јул  | Авг  | Сеп  | Окт  | Нов  | Дец  | Год. просек |
|-----------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Угао $0^\circ$  | 1.41 | 2.22 | 3.30 | 4.23 | <b>5.25</b> | 5.83 | 5.99 | 5.35 | 3.81 | 2.59 | 1.49 | 1.12 | 3.56        |
| Угао $90^\circ$ | 2.43 | 2.90 | 3.10 | 2.78 | <b>2.69</b> | 2.66 | 2.81 | 3.13 | 3.14 | 3.08 | 2.26 | 1.96 | 2.74        |

**Табела 28.-** Средње вредности зрачења за углове  $0^\circ$  и  $90^\circ$  ( kWh/m<sup>2</sup>/dan) (4)

Морамо имати у виду да је мерење вршено у мају, те се просечне вредности ова два угла увелико разликују. Код панела под углом од  $90^\circ$  за преподневне и поподневне часове према подацима РХМЗ-а на слици 44 имамо мање вредности интензитета Сунчевог зрачења за 50 % а управо у том периоду овај панел добија директне Сунчеве зраке који стижу под мањим упадним углом у односу на нормалу панела, што ће имати за последицу боље искоришћење Сунчевог зрачења. Панели под угловима од  $30^\circ$  и  $60^\circ$  су очигледно показали најбоље резултате у овом мерењу са просечним вредностима ефикасности за угао од  $30^\circ$  је 13.68%, односно за угао од  $60^\circ$  је 11.82%. У подневним часовима имамо производњу енергије већу него што је назначио произвођач панела, и са јако добром преподневном производњом, али не и са поподневном где је, због кише, у великој мери смањена производња енергије, као и ефикасност панела. Како би био још видљивији и јаснији узрок промене нагиба угла панела према хоризонталној равни поредићемо два дана у којима је мерење и вршено. За први дан у којима је вршено мерење угла панела од  $0^\circ$  и  $90^\circ$  имамо просечне вредности интензитета Сунчевог зрачења од 545 W/m<sup>2</sup>, а за други дан за угао од  $30^\circ$  и  $60^\circ$  имамо 407 W/m<sup>2</sup>. Уколико посматрамо производњу енергије до 16:00 часова до појаве кише, имамо да је интензитет Сунчевог зрачења првог дана већи за 25% у односу на други дан, тј. производњу енергије за угао панела од  $0^\circ$  је 689 W/m<sup>2</sup>, а за угао панела од  $90^\circ$  је 388 W/m<sup>2</sup>. То су резултати измерени за наведене углове првог дана мерења. За други дан мерења имамо следећи случај. За углове панела од  $30^\circ$  и  $60^\circ$  имамо мањи интензитет Сунчевог зрачења за наведених 25% у односу на први дан, а производњу енергије за угао панела од  $30^\circ$  је 611 W/m<sup>2</sup>, а за угао панела од  $60^\circ$  производњу од 543 W/m<sup>2</sup>. Видимо да за угао од  $90^\circ$  са знатно већим зрачењем имамо мању производњу енергије у односу на други дан од 28 до 36%. Када посматрамо само први дан и углове од  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , примећујемо да потпуно вертикалан панел дневно губи 337 W/m<sup>2</sup> или 45% потенцијалне енергије. То је довољна чињеница и ограничење примене за панел под углом од  $90^\circ$ , и јасно показује од колике је важности правилно поставити и усмерити панел.



Слика 48.- Средње ефикасности панела за различите углове

## 6. Закључак

У оквиру овог завршног рада приказани су експериментални резултати симулације ПВ панела на терену. Циљ овог рада био је да се утврди колики је потенцијал и ефикасност коришћења фотонапонских система у практичним условима експлоатације, чиме смо дошли након мерења. Вршена су мерења како за различите услове у експлоатацији, тако и за различите интензитета Сунчевог зрачења али и временске услове. Са променом номиналних услова рада панела долази до осцилација у производњи електричне енергије, што ће утицати и на ефикасност панела. Зато из предходних примера у којима су вршени експерименти са панелима можемо закључити следеће:

- У великој мери временски услови утичу на ефикасност, производњу и исплативост соларних система. Са наоблачење долази до драстичног смањења вредности наведених параметара, у појединим местима у свету и до ограничења овог вида производње енергије. Поређења ради, производња енергије по ведром дану је  $950 \text{ W/m}^2$  насупрот  $120 \text{ W/m}^2$  по облачном дану, где је очигледан однос за скоро осам пута у корист ведрога времена. Наша земља има добар потенцијал за коришћење соларне енергије са просечних  $1400 \text{ kWh/m}^2$  глобалног зрачења.
- За повећање ефикасности панела користе се системи за праћење кретања Сунца, где смо експериментално доказали да имамо ефикасност једноосног покретног панела од 23% у односу на фиксно постављен панел. Мана овог система је у томе што су модули са панелима зависни од електричне енергије која покреће електромотор да би дошло до закретања модула.
- Хлађење панела којим је приказано у овом раду показало се потпуно неефикасним, али постоје одговарајући примери хлађења са којим долази до повећања ефикасности и они искључују коришћење електричне енергије на хлађење панела, што смо ми користили у овом раду.
- Запрљаност панела по сунчаном времену није утицала на ефикасност, док за полуоблачно време имамо мало побољшање ефикасности, тачније  $23 \text{ W/m}^2$  у корист чистог панела, тако да би било пожељно вршити периодично чишћење панела.
- Вероватно најјефтинији начин за повећањем ефикасности панела можемо постићи променом нагиба панела, где немамо додатно трошење енергената као код система за праћење Сунца или хлађења панела. Са променом нагиба панела можемо значајно утицати на ефикасност, а показатељ тога је да имамо више него двоструко већу ефикасност панела под углом од  $30^\circ$  у односу на угао од  $90^\circ$ .

## 7. Литература

1. Небојша Лукић, Милун Бабић. *Соларна енергија*. 2008.
2. Милошевић, М. [Приступљено: 10.11.2016.], Преузето са: *Астрономски магазин*:  
<http://static.astronomija.org.rs/suncsist/Sunce/sunce/9.htm>
3. Тодоровић, Б. (2009). *Климатизација*.
4. НАСА. [Приступљено: 21.11.2016.], Преузето са: [https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=201135&lat=44.3&hgt=100&submit=Submit&veg=17&sitelev=&email=&p=grid\\_id&step=2&lon=20.6](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=201135&lat=44.3&hgt=100&submit=Submit&veg=17&sitelev=&email=&p=grid_id&step=2&lon=20.6).
5. Милосављевић, Драган. *Проучавање енергетске ефикасности соларних електрана у Републици Србији и Републици Српској*. [Приступљено: 18.1.2017], Преузето са: <http://www.pmf.ni.ac.rs/pmf/doktorati/doc/2013-11-21-md.pdf>
6. Соларни панели. [Приступљено: 3.4.2017.], Преузето са :  
<http://solarnipaneli.org/solarni-paneli-2/>
7. Републички хидрометеоролошки завод [Приступљено: 15.5.2017.], Преузето са: <http://www.hidmet.gov.rs/ciril/orhmrz/imenik.php>
8. Masters, Gilbert M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Stanford University.
9. EurActive. [Приступљено: 12.6.2017.], Преузето са: [www.euractiv.rs/odrzivi-razvoj/10827-put-pod-solarnim-panelima-u-francuskoj](http://www.euractiv.rs/odrzivi-razvoj/10827-put-pod-solarnim-panelima-u-francuskoj)