

ИЗСЛЕДВАНЕ И СРАВНЕНИЕ НА ГОДИШНИТЕ И МЕСЕЧНИТЕ КОЛИЧЕСТВА НА СЛЪНЧЕВА ЕНЕРГИЯ ПОПАДАЩИ НА ЗЕМЯТА ИЗМЕРЕНИ С МЕТЕОСТАНЦИЯ Vantage Pro2 Plus

Веселин Ташев¹, Ролф Вернер¹, Ангел Манев¹, Мариана Горанова²

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

²Технически университет София, Факултет по компютърни системи и управление
e-mail: veselint@abv.bg;

Ключови думи: Слънчева радиация, слънчева енергия, метеорологични измервания.

Резюме: Измерването и изследването на слънчевия енергиен добив е извършено в продължение на период от 2011 до 2017г. Изчислени са количеството на акумулираната слънчева енергия за определен период от време от единица площ на земната повърхност. За целта се използват данните за слънчевата радиация. Те са измерени и акумулирани с помощта на автоматичната метеорологична станция Vantage Pro2 Plus. Директно получените данни от сензора за слънчева радиация са интегрирани и преизчислени за да се получат резултати за акумулираната слънчева енергия. Обработката на тези данни дава възможност да се проследи изменението на енергийните слънчеви характеристики през различните периоди от време. Месечните периоди са, свързани със сезонния характер на положението на Слънцето. Изчислена е и годишната повтаряемост на измерванията. Високата повтаряемост, която се наблюдава в годишните резултати се използва за да се прогнозира слънчевия енергиен добив за следващите години в енергийните соларни станции.

RESEARCH AND COMPARISON OF THE ANNUAL AND MONTHLY QUANTITIES OF SOLAR ENERGY FALLING TO THE GROUND MEASURED WITH THE WEATHER STATION Vantage Pro2 Plus

Veselin Tashev¹, Rolf Werner¹, Angel Manev¹, Mariana Goranova²

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²Technical University Sofia, Faculty of Computer Systems and Control
e-mail: veselint@abv.bg

Keywords: Solar radiation, solar energy, measurement of meteorological parameters

Abstract: The measurement and investigation of solar energy extraction is performed over a period of 2011 to 2017 g. The amount of solar energy accumulated over a period of time by the surface area of the ground is calculated. For this purpose, is used the data on the solar radiation. They are measured and accumulated using the automatic weather station Vantage Pro2 Plus. Directly received data from the solar radiation sensor are integrated and recalculated to obtain results for the accumulated solar energy. The processing of these data makes it possible to trace the change in energy solar characteristics during the different periods of time. The monthly periods are related to the seasonal nature of the situation of the sun. The annual repeatability of measurements is also calculated. The high repeatability observed in annual results is used to predict solar energy yield for the next years in the solar power stations.

1. Въведение

За измерване и събиране на данни за слънчевата радиация и енергия бе използвана метеорологичната станция Vantage Pro2 Plus, която е локализирана в регион Стара Загора. Тя измерва и събира данни за всеки период от 15 минути [1]. Метеостанциите от типа на Vantage Pro, са снабдени с допълнителни сензори за измерване на слънчевата радиация и слънчевото ултравиолетово излъчване попадащи на земната повърхност. Така получените данни за метеорологичните параметри се експортират чрез файл с текстови формат в съответното

приложение за тяхната по-нататъшна обработка. Автоматичната измервателна станция Vantage Pro 2 Plus предоставя на своите потребители освен данни за слънчевата радиация, така и данни за слънчевата енергия (Solar Energy). Известно е, че съществува зависимост между слънчевата радиация и слънчевата енергия. От тази зависимост, данни за слънчевата енергия се получават в специфичната единица Langley:

$$1 \text{ Langley} = 11.622 \text{ Wh/m}^2$$

2. Теоретични данни за слънчевата радиация и слънчевата енергия попадаща върху единица земна площ

Известно е, че слънчевата радиация зависи от много фактори и съвсем логично е да се очаква, че добивът на енергия за различните региони може да е съвсем различен. Това се дължи на факта, че само част от слънчевата енергия достига до земната повърхност. Една част от попадащата слънчевата радиация върху земната атмосфера се рефлектира директно обратно в космоса, а друга част се абсорбира в стратосферата и тропосферата. Общо около 19% от слънчевата енергия не достига долните слоеве на земната повърхност [4].

Интензитетът на слънчевата радиация намалява главно поради поглъщането от водните пари в инфрачервената област на спектъра, озоновото поглъщане в ултравиолетовата област и разсейването от частиците във въздуха. Такива компоненти като въглеродния двуокис и някои други газове, които се съдържат в по-малки количества в атмосферата, поглъщат част от топлинната радиация, излъчена от земната повърхност. Следователно добивът на енергия за различните региони може да е съвсем различен в зависимост от техните особености.

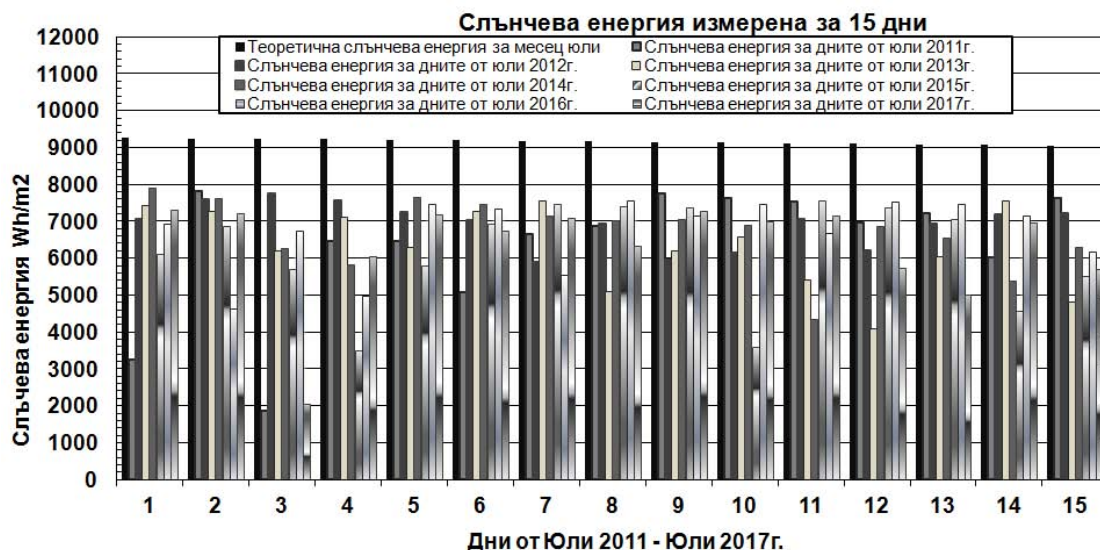
Слънчевата радиация представлява плътността на лъчистия енергиен поток излъчван от слънцето, измерван на разстояние една астрономическа единица върху единица хоризонтална площ за единица време. Тя се измерва в единици ват на квадратен метър $[W/m^2]$. Количеството слънчева енергия на квадратен метър за определен период от време се получава чрез интегриране на слънчевата радиация по време. Следователно количеството слънчева енергия се измерва в единици ватчас на квадратен метър $[W \cdot h/m^2]$.

Слънчевата радиация попадаща върху дадена повърхност има две компоненти. Едната е директната радиация, падаща върху повърхността без изменение на посоката. Другата е дифузната радиация, която представлява сумата от разсеяната в атмосферата и отразена от почвата и околните предмети радиация, падаща върху дадена повърхност. Наличието на облаци води до отслабване на директната и увеличаване на разсеяната радиация.

3. Изследване на дневния ход на слънчевото греене

Директно получените данни от метеорологичната станция се запазват във файлове за период от един месец, като за всеки 15 минути е направено по едно измерване. Общия обем на информацията за период от 74 месеца съдържа около 216 000 измервания. След това данните в [Langley] се преобразоват във $[W \cdot h/m^2]$, съгласно т. 1. Получените резултати за всеки час, за всеки ден и за всеки месец са показани в графичен и табличен вид.

На фиг. 1 е показана измерената слънчева енергия за различни дни за да се види как се изменя слънчевата енергия за един и същи ден, за един и същи месец през съответната година



Фиг. 1. Слънчева енергия измерена за всеки ден от 1 до 15 юли от 2011 до 2017 година

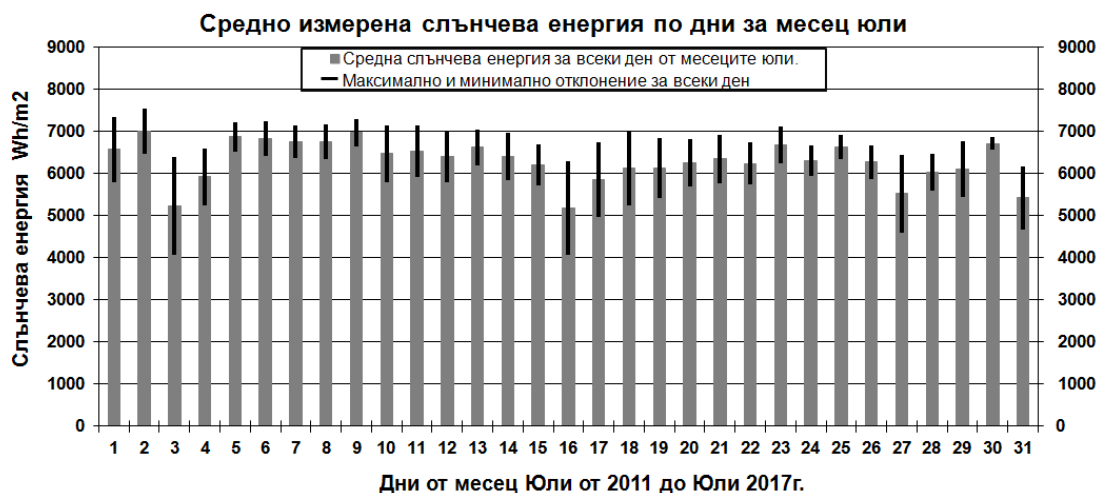
За пример са избрани първите 15 дни от месеците Юли, тъй като това е месеца с най-интензивна слънчева радиация. Сумарната слънчева енергия за всеки един ден от първите 15 дни на месец Юли 2011, Юли 2012, Юли 2013, Юли 2014, Юли 2015, Юли 2016 и Юли 2017 години е показана с различна гама на черния цвят.

С черен цвят е оцветена графиката на теоретично изчислената слънчева енергия за всеки един ден. От тази графика се вижда, че през месец Юли се наблюдава бавно намаляване на теоретичното количество слънчева енергия, в следствие на намаляване на общата излъчена енергия от Слънцето, което пък е следствие на неговото променено положение спрямо зенита. Същата констатация не важи за измерената слънчева енергия за месеците Юли през годините. Промяната на вариациите на радиацията в следствие на облаците, обаче е по-силна от този тренд на теоретичната линия. Поради тази причина се наблюдава факта, че слънчевата енергия за различните дни от месеца значително се различава по стойност за разлика от теоретично пресметната. Например за почти безоблачните дни 2, 7 и 13 юли стойностите са почти едни и същи, като разликата е по-малка от 1000 Wh/m^2 . За сравнение се вижда, че за ден 1 и 3 юли те се променят от 2000 до 7500 Wh/m^2 или с повече от 5000 Wh/m^2 . Въпреки, че височината на слънцето не се променя съществено практически, измерените резултати се различават, защото атмосферата е с различна пропускателна способност за различните дни. Пропускливостта на атмосферата значително се влияе както от облаци, така и от влага, прах и други замърсители, които поглъщат слънчевата енергия.

На фиг. 2 е показана средно измерена слънчева енергия за всеки ден от месец Юли в продължение на 7 години. За разлика от фиг. 1 тук е показана средно измерената стойност за посочените години, както и максималните и минимални отклонения за всеки ден.

Със сиви стълбчета е показана средната стойност за всеки ден от месеците Юли, през седемте години, а с черни линии е отбелязано дневното минимално и максимално отклонение от средната стойност. Тук още по-ясно се вижда динамиката в стойностите за 25 и 30-ти ден, когато е минимална спрямо 1 и 16 ден, когато е значително по-голяма. Тази динамика може да се проследи и за останалите дни.

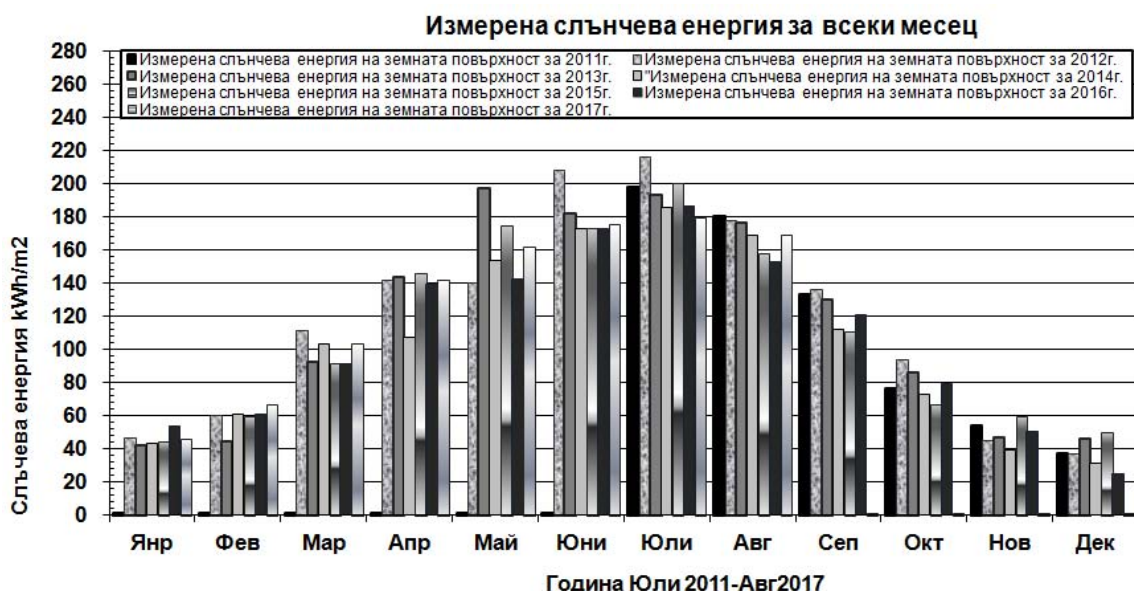
От тук може да се направи заключението, че измерените стойности на слънчевото греене са значително по-колебливи от теоретичните, което е свързано и с по-големите промени в пропускливостта на атмосферата, както отбелязахме по-горе. Отслабването на слънчевата радиация, респективно на слънчевата енергия в атмосферата не е едно и също за различните части на нейния спектър, а освен това зависи както от съдържанието на влага в атмосферата, така и от облачността. Например абсолютно сухият и чист въздух притежава най-голяма прозрачност за инфрачервената радиация и най-малка за ултравиолетовата радиация. Наличието на озон в атмосферата също оказва влияние в поглъщането на радиация в ултравиолетовия и в далечния инфрачервен диапазон. Коя от компонентите какво влияние оказва тук не може точно да се посочи, но в случая е важно каква част от енергията достига до повърхността на земята.



Фиг. 2. Средно измерена слънчева енергия за всеки ден от месец Юли от 2011 до 2016 г.

4. Изследване на месечния ход на слънчевото греене

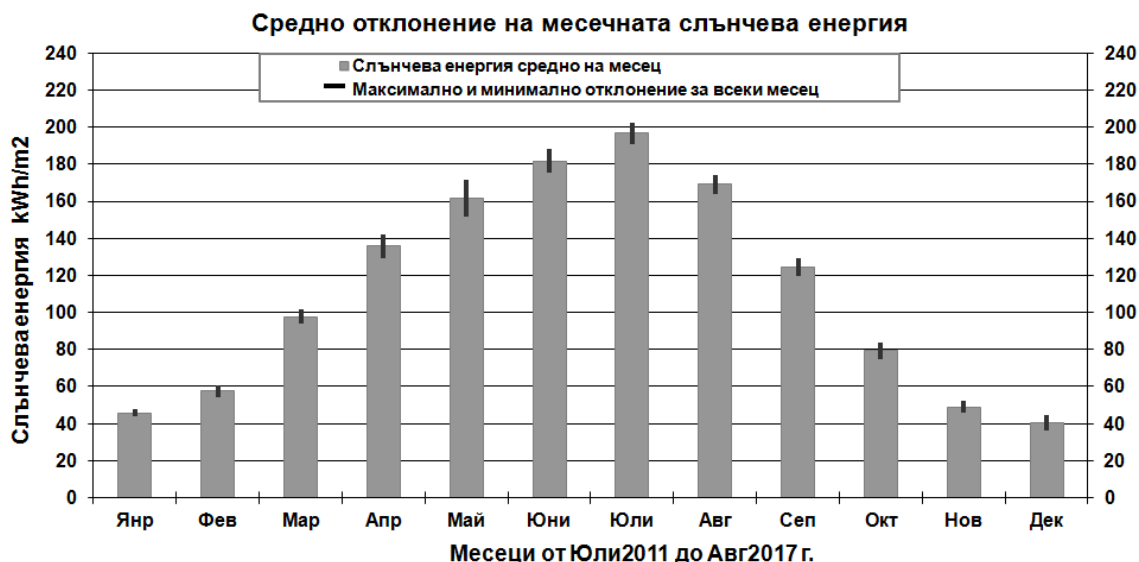
На фиг.3 са показани стойностите на слънчевата енергия измерена за всеки месец в продължение на около 7 години. За всяка една от седемте години стълбчетата, показващи съответните месечни стойности са изобразени с различна гама на черния цвят.



Фиг. 3. Слънчева енергия измерена за всеки месец от 2011 до 2016 г.

От графиката ясно се вижда сезонния характер в изменението на слънчевото греене. То е най-голямо през месеците Юни и Юли и най-малко през месеците Януари и Декември. Най-интересен, обаче е фактът, че динамиката в изменение на стойностите за едноименните месеци през годините показани на фиг. 3, е много по-малка отколкото тази на едноименните дни показана на фиг. 2 и фиг.1.

На фиг. 4 е показана средно измерената слънчева енергия за всеки месец в продължение на 7 години, за разлика от фиг. 3, където са показани действителните стойности на месеците. Със сиви стълбчета е показана средната месечна стойност, а с черни линии е отбелязано минималното и максимално отклонение от средната стойност за всеки месец.



Фиг. 4. Средно измерена слънчева енергия за всеки месец

На тази графика още по-добре се вижда по-малката динамика в месечното отклонение спрямо дневното. Например за едни и същи дни от месеците Юли 2011, Юли 2012, ...Юли 2017 години, показани на фиг. 1 и фиг. 2 измерената слънчева енергия се различава значително, както отбелязахме по-горе, но за шесте или седемте едноименни месеца показани на фиг. 3 и фиг. 4 общият добив е почти един и същ. Числовите данни за ден 1, съответно за 1 Юли 2011 г. с измерена стойност 3200 Wh/m^2 , спрямо 1 Юли 2014 г. с измерена стойност 7800 Wh/m^2 показват динамика от 2.5 пъти, а за ден 3-ти съответно за 3 Юли 2011 г. с измерена стойност 1800 Wh/m^2 спрямо 3 Юли 2012 г. с измерена стойност 7600 Wh/m^2 показват динамика

Реалните стойности на слънчевата радиация през летните и ранните есенни месеци е около 50% от теоретично максималната радиация, а за късните есенни и наблюдаваните зимни месеци за 2011 – 2017 г, тя е около 30% от теоретично максималната радиация. Доколкото слънчевата енергия е акумулираната във времето слънчева радиация тази констатация би трябвало да се отнася и за нея.

Табл. 1. Разпределение на слънчевата енергия по едноименни месеци

Месец	Ян	Фев	Март	Апр	Май	Юни	Юли	Авг	Септ	Окт	Ноем	Дек
Стойности												
2011 г. kWh/m ²							198	181	133	76	54	37
2012г. kWh/m ²	47	61	111	142	140	209	216	178	136	94	45	37
2013г. kWh/m ²	42	45	92	144	197	182	193	176	130	86	47	46
2014г. kWh/m ²	43	61	103	108	153	173	186	169	112	73	39	31
2015г. kWh/m ²	45	60	91	146	175	173	200	158	110	66	59	49
2016г. kWh/m ²	53	61	91	139	142	172	187	153	121	79	50	25
2017г. kWh/m ²	46	67	103	142	162	175	180	168				
Средна стойност	45	59	99	137	162	181	194	169	124	79	49	38
Макс. Разл. kWh/m ²	12	22	21	38	57	36	37	28	26	28	21	25
Стандартно Отклонение	3,7	6,8	7,7	13,2	19,7	12,9	11,3	9,7	10,2	8,9	6,6	8,4
Относителен Спад [%]	8,1	11,5	7,8	9,7	12,2	7,2	5,8	5,8	8,2	11,3	13,3	22,3

Освен това в таблица 1 е показано разпределението на слънчевата енергия по месеци, а заедно с това средната стойност, стандартното отклонение и относителният спад. От таблицата се вижда, че стандартното отклонение и относителния спад сравнено за месеците през различните сезони на седемте години се различават значително. Това е показателно, че факторите, които влияят на слънчевата енергия като облаци, прах и други, имат случаен характер, но с течение на времето за по-дълги периоди взаимно се компенсират и осредняват. От таблица 1 се вижда, че най-големите отклонения са съответно за месец Май 19,7% и Юни 12,9%. За зимните месеци отклоненията леко намалят – Януари 3,7% и февруари 6,8%.

Друг интересен извод, който може да се направи е, че измерената слънчева енергия за период от една година е почти една и съща. Резултатите от тези разчети са дадени в табл. 2.

В колонка 2 е изчислена слънчевата енергия за период от 1 година между 2 едноименни месеца, а в колонка 3 средната месечна стойност за една година, т.е. за един период от 12 поредни месеца или центрираната математическа средна от фиг 5. Например за периода Юли 2011 до Юли 2012 тази стойност е 1398 kWh/m², а средномесечната изчислена от плъзгащата се математическа средна е 116,5 kWh/m² на месец.

Динамиката на средната годишна стойност се вижда от максималните показанията за периода Юни 2012г. – Юни 2013г., които са 118,5 и минималните за периода Март 2014г. – Март 2015г., които са 103.8. В колонка 4 е изчислена средната годишна стойност за всички 12-месечни периоди и тя е 111.1 kWh/m². В колонка 5 е показана разликата между месечната стойност за всеки период в колонка 3 и средната стойност в колонка 4. В колонка 6 е изчислена същата разлика в проценти. Най – голяма разлика се получава за периода Юни 2012г. – Юни 2013г., с показание – 7,4 kWh/m² или -6,2 %, а най – малка за периода Януари 2015г. – Януари 2016г. с показание – 0,5 kWh/m² или 0,4 %. Такива малки отклонения има и за редица други годишни изчисления показани в колонка 5 и 6. Тази ниски разлики показват, че едногодишните стойности се различават твърде малко по отношение на енергийния добив за разлика от месечните (таблица 1), където отклоненията са относително по-големи и дневните, където са най-големи.

В последните редове на табл. 2 са пресметнати стандартното отклонение за всички едногодишни периоди и относителният спад. Те са 4.35 Kwh / m² и 3,92 % съответно. Тези ниски стойности още веднъж показват, че отклоненията в слънчевата радиация и респективно в слънчевия енергиен добив на годишна база са много ниски. В този смисъл дори и краткосрочните изследвания ще дават много точни прогнози за следващите години.

Тази констатация ни дава основание да пресметнем средногодишен добив (СГД) на електроенергия в регион Стара Загора:

СГД = Средномесечна енергия x 12 месеца. От тази формула получаваме:

$$(2) \quad СГД = 111,1 \times 12 = 1333,2 \text{ kWh} / \text{m}^2$$

или приблизително 1330 kWh/m².

Табл. 2. Разпределение на слънчевата енергия по години

Период	Сл. енергия за година [Kwh/m ²]	Матем. сред. за месец [Kwh/m ²]	Средна стойн. год. [Kwh/m ²]	Разлика [Kwh/m ²]	Разлика [%]
1	2	3	4	5	6
Юли 2011 – Юли 2012	1398	116,5	111,1	5,4	4,6
Авг. 2011 – Авг. 2012	1406	117,2	111,1	6,1	5,2
Септ. 2011 – Септ. 2012	1406	117,2	111,1	6,1	5,2
Окт. 2011 – Окт. 2012	1417	118,0	111,1	6,9	5,9
Ноем. 2011 – Ноем. 2012	1421	118,4	111,1	7,3	6,2
Дек. 2011 – Дек. 2012	1416	118,0	111,1	6,9	5,9
Ян. 2012 – Ян. 2012	1414	117,8	111,1	6,7	5,7
Февр. 2012 – Февр. 2013	1403	116,9	111,1	5,8	5,0
Март 2012 – Март 2013	1385	115,5	111,1	4,4	3,8
Апр. 2012 – Апр. 2013	1377	114,7	111,1	3,6	3,2
Май 2012 – Май 2013	1407	117,2	111,1	6,1	5,2
Юни 2012 – Юни 2013	1422	118,5	111,1	7,4	6,2
Юли 2012 – Юли 2013	1397	116,4	111,1	5,3	4,6
Авг. 2012 – Авг. 2013	1384	115,3	111,1	4,2	3,7
Септ. 2012 – Септ. 2013	1380	115,0	111,1	3,9	3,4
Окт. 2012 – Окт. 2013	1373	114,4	111,1	3,3	2,9
Ноем. 2012 – Ноем. 2013	1370	114,2	111,1	3,1	2,7
Дек. 2012 – Дек. 2013	1376	114,6	111,1	3,5	3,1
Ян. 2013 – Ян. 2013	1381	115,1	111,1	4,0	3,5
Февр. 2013 – Февр. 2014	1390	115,8	111,1	4,7	4,1
Март 2013 – Март 2014	1403	116,9	111,1	5,8	5,0
Апр. 2013 – Апр. 2014	1391	115,9	111,1	4,8	4,1
Май 2013 – Май 2014	1351	112,5	111,1	1,4	1,3
Юни 2013 – Юни 2014	1324	110,3	111,1	-0,8	-0,7
Юли 2013 – Юли 2014	1316	109,6	111,1	-1,5	-1,3
Авг. 2013 – Авг. 2014	1308	109,0	111,1	-2,1	-1,9
Септ. 2013 – Септ. 2014	1295	108,0	111,1	-3,1	-2,9
Окт. 2013 – Окт. 2014	1280	106,6	111,1	-4,5	-4,2
Ноем. 2013 – Ноем. 2014	1269	105,8	111,1	-5,3	-5,1
Дек. 2013 – Дек. 2014	1258	104,8	111,1	-6,3	-6,0
Ян. 2014 – Ян. 2014	1251	104,3	111,1	-6,8	-6,5
Февр. 2014 – Февр. 2015	1252	104,3	111,1	-6,8	-6,5
Март 2014 – Март 2015	1245	103,8	111,1	-7,3	-7,1
Апр. 2014 – Апр. 2015	1259	104,9	111,1	-6,2	-5,9
Май 2014 – Май 2015	1289	107,4	111,1	-3,7	-3,5
Юни 2014 – Юни 2015	1299	108,3	111,1	-2,8	-2,6
Юли 2014 – Юли 2015	1307	108,9	111,1	-2,2	-2,0
Авг. 2014 – Авг. 2015	1308	109,0	111,1	-2,1	-1,9
Септ. 2014 – Септ. 2015	1302	108,5	111,1	-2,6	-2,4
Окт. 2014 – Окт. 2015	1299	108,2	111,1	-2,9	-2,7
Ноем. 2014 – Ноем. 2015	1306	108,8	111,1	-2,3	-2,1
Дек. 2014 – Дек. 2015	1325	110,4	111,1	-0,7	-0,6
Ян. 2015 – Ян. 2016	1339	111,6	111,1	0,5	0,4
Февр. 2015 – Февр. 2016	1344	112,0	111,1	0,9	0,8
Март 2015 – Март 2016	1344	112,0	111,1	0,9	0,8
Апр. 2015 – Апр. 2016	1340	111,7	111,1	0,6	0,5

Табл. 2. Разпределение на слънчевата енергия по години (продължение)

Май 2015 – Май 2016	1321	110,1	111,1	-1,0	-0,9
Юни 2015 – Юни 2016	1304	108,7	111,1	-2,4	-2,2
Юли 2015 – Юли 2016	1298	108,1	111,1	-3,0	-2,7
Авг. 2015 – Авг. 2016	1288	107,3	111,1	-3,8	-3,5
Септ. 2015 – Септ. 2016	1291	107,6	111,1	-3,5	-3,3
Окт. 2015 – Окт. 2016	1302	108,5	111,1	-2,6	-2,4
Ноем. 2015 – Ноем 2016	1304	108,6	111,1	-2,5	-2,3
Дек. 2015 – Дек. 2016	1286	107,2	111,1	-3,9	-3,7
Ян. 2016 – Ян. 2017	1270	105,8	111,1	-5,3	-5,0
Февр. 2016 – Февр. 2017	1269	105,8	111,1	-5,3	-5,0
Март 2016 – Март 2017	1278	106,5	111,1	-4,6	-4,3
Апр. 2016 – Апр. 2017	1286	107,2	111,1	-3,9	-3,7
Май 2016 – Май 2017	1297	108,1	111,1	-3,0	-2,8
Юни 2016 – Юн 2017	1309	109,1	111,1	-2,0	-1,9
Юли 2016 – Юли 2017	1307	108,9	111,1	-2,2	-2,0
Авг. 2016 – Авг. 2017	1311	109,3	111,1	-1,8	-1,7
Средна стойност	111,1				
Стандартно отклонение	4,35				
Относителен спад [%]	3,92				

5. Заключение

В сайта EMDE Solar (www.emde-solar.com) е посочена стойност за слънчев добив на енергия от минимум 1314 kWh/m² до максимум 1510 kWh/m² като годишна база в регион Стара Загора или средно 1412 kWh/m². Този диапазон сравнително точно съвпада с получените от нас резултати от 1330 kWh/m². При нас стандартното отклонение съгласно таблица 3 е значително по-малко и има стойност 4.49 kWh/m² или 4.01 %. Възможно е, ниската стойност на нашето отклонение да се дължи на факта, че измерванията са правени в една точка, но от друга страна, средните стойности на двете независими измервания съвпадат много точно.

От теоретична гледна точка споменахме много фактори, които оказват съществено влияние върху потока на слъчевата радиация, респективно върху количеството слънчева енергия, което достига до земята. Това се потвърди и от краткосрочните измервания с помощта на метеорологичната станция. При по-дългосрочните измервания, обаче се наблюдава едно усредняване и подтискане на разликата, особено на годишна база. Това се дължи на факта, че тези изменения във времето са с различен знак, както положителни така и отрицателни и при тяхното сумиране за по-дълъг период от време те взаимно се компенсират и осредняват.

Натрупаната база данни е все още сравнително малка за да се направят категорични научни заключения, но се надяваме, че бъдещите изследвания ще потвърдят направените в този доклад първоначални констатации. Резултатите от това изследване могат да послужат като важен ориентир, за да се изчисли предварително очакваната енергия от фотоволтаичните преобразователи в определен географски регион.

Литература:

1. Davis Instruments Corp. *Vantage Pro2 Plus*. Reference Guide.
2. Meeus, J. *Astronomische Algorithmen*, Johann Ambrosius Barth Verlag, Leipzig-Berlin-Heidelberg, 1993
3. Lean, J. L., *Solar irradiance and climate forcing in the near future*, Geophys. Res. Lett. 28, pp. 4119-4122, 2001.
4. Roedel, W. *Physik unserer Umwelt*, 2. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S.48, 1994.