

ГРАФИЧНО ИЗОБРАЖЕНИЕ НА КОЛИЧЕСТВОТО СЛЪНЧЕВА ЕНЕРГИЯ ПАДАЩА НА ЗЕМЯТА ЗА РАЗЛИЧНИ ВРЕМЕВИ ПЕРИОДИ

Веселин Ташев¹, Ролф Вернер¹, Ангел Манев¹, Димитър Вълев¹, Мариана Горанова²

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

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

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

Резюме: Данните за слънчевия енергиен добив са измерени и акумулирани с помощта на автоматичната метеорологична станция Vantage Pro2 Plus. Слънчевия енергиен добив представлява полученото количество енергия за определен период от време от единица площ на земната повърхност. Директно получените данни от сензора на метеостанцията за слънчева радиация са интегрирани и преизчислени за да се получат резултати за акумулираната слънчева енергия. Най-късия период на измерване е 15 минути. Обработката на тези данни дава възможност да се проследи изменението на енергийните слънчеви характеристики през различните периоди от време. Измерванията са извършени за период от 8 години. Най-голяма повтораемост се наблюдава при дългосрочните периоди, каквито са годишните.

GRAPHICAL REPRESENTATION OF THE AMOUNT OF SOLAR ENERGY FALLING ON THE GROUND FOR DIFFERENT TIME PERIODS

Veselin Tashev¹, Rolf Werner¹, Angel Manev¹, Dimitar Valev, Mariana Goranova²

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

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

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

Abstract: Data on solar energy flux are measured and accumulated using the automatic meteorological Vantage Pro2 Plus. The solar energy flux represents the amount of energy received over a given period of time per unit area of the earth's surface. Directly received data from the solar radiation sensor are integrated and recalculated to produce results for the accumulated solar energy. The shortest measurement period is 15 minutes. The processing of these data makes it possible to trace the change of the solar energy characteristics during the different time periods. The measurements were performed over a period of 8 years. The highest repeatability is observed for long-term periods, such as annual ones.

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 падащи 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 Langley = 11.622 Wh/m²

2. Теоретични данни за слънчевата радиация и слънчевата енергия падаща 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 падащата 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 ѝ от водните пари в инфрачервената област на спектъра, озоното поглъщане в ултравиолетовата област и разсейването от частиците прах 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, излъчвана от земната повърхност. Следователно добивът на енергия за различните региони може да е съвсем различен в зависимост от техните особености.

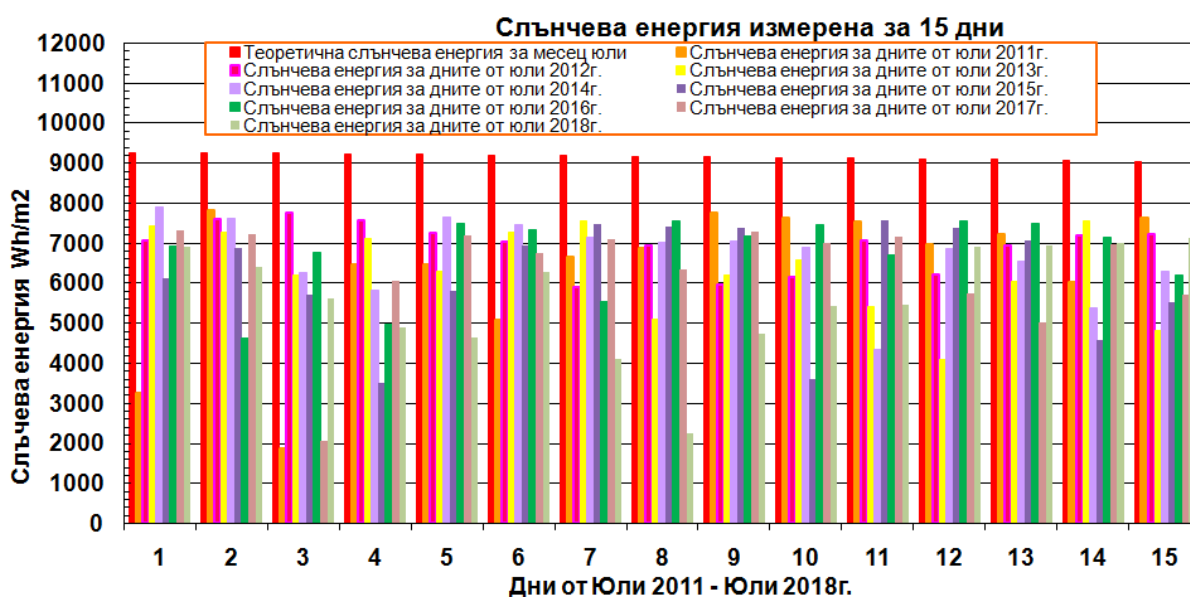
Слънчевата радиация представлява плътността на лъчистия енергиен поток излъчван от слънцето, измерван на разстояние една астрономическа единица върху единица хоризонтална площ за единица време. Тя се измерва в единици ват на квадратен метър [W/m²]. Количеството слънчева енергия на квадратен метър за 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*h/m²].

Слънчевата радиация падаща 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 88 месеца съдържа около 254 000 измервания. След това данните в [Langley] се преобразоват във [W*h/m²], 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.

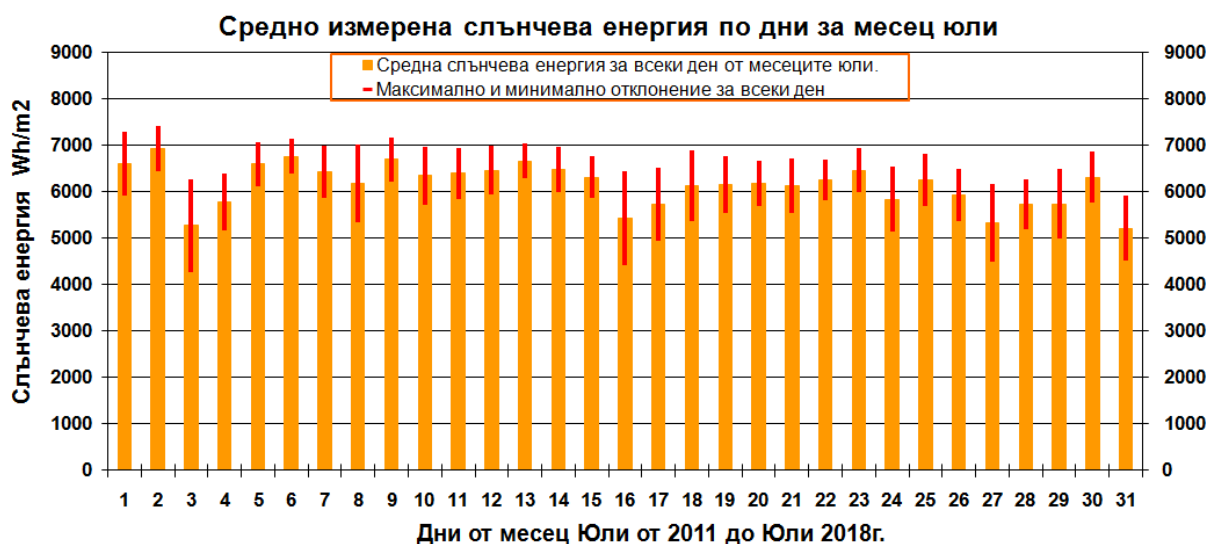


Фиг. 1. Слънчева енергия измерена за всеки ден от 1 до 15 юли от 2011 до 2018 г.

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 до месец юли 2018 години е показана във вид на ленти с различен цвят.

С червен цвят са оцветени лентите 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 5,6 и 12 юли стойностите са почти едни и същи, като разликата е по-малка от 1000 Wh/m². За сравнение се вижда, че за ден 3 и 8 юли те се променят от 2000 до 7500 Wh/m² или с повече от 5000 Wh/m². 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 8 години. За разлика от фиг. 1 тук е показана средно измерената стойност за посочените години, както и максималните и минимални отклонения за всеки ден.



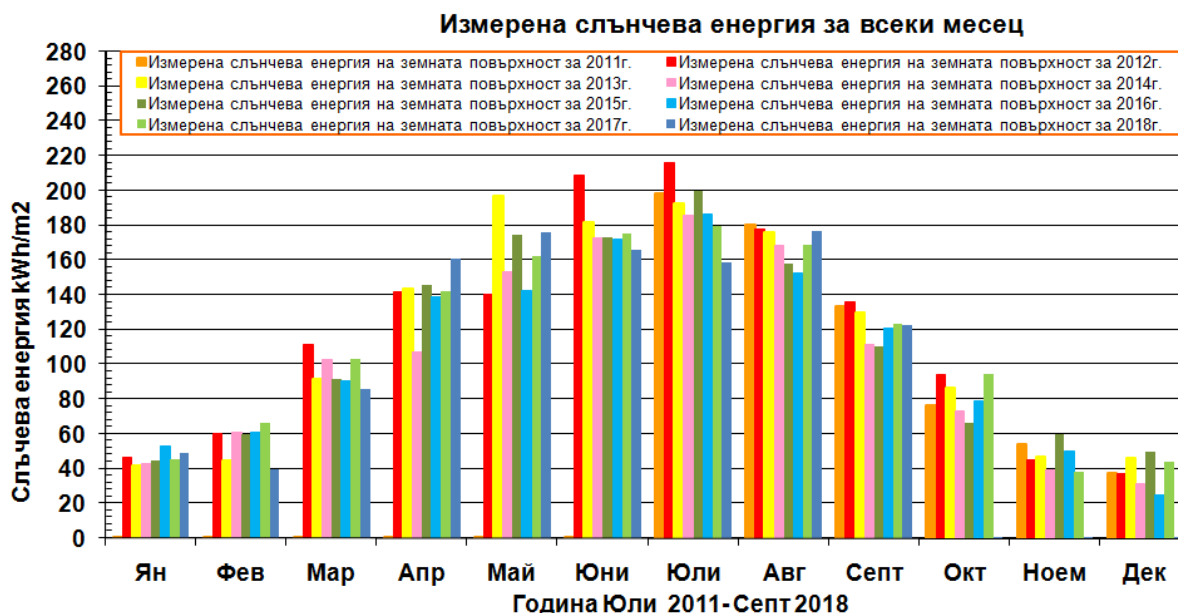
Фиг. 2. Средно измерена слънчева енергия за всеки ден от месец юли от 2011 до 2018 г.

С жълти ленти е показана средната стойност за всеки ден от месеците Юли, през осемте години, а с червени линии е отбелязано дневното минимално и максимално отклонение от средната стойност. Тук още по-ясно се вижда динамиката в стойностите за 5 и 6 ден, когато е минимална спрямо 3 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.

4. Изследване на месечния ход на слънчевото греене

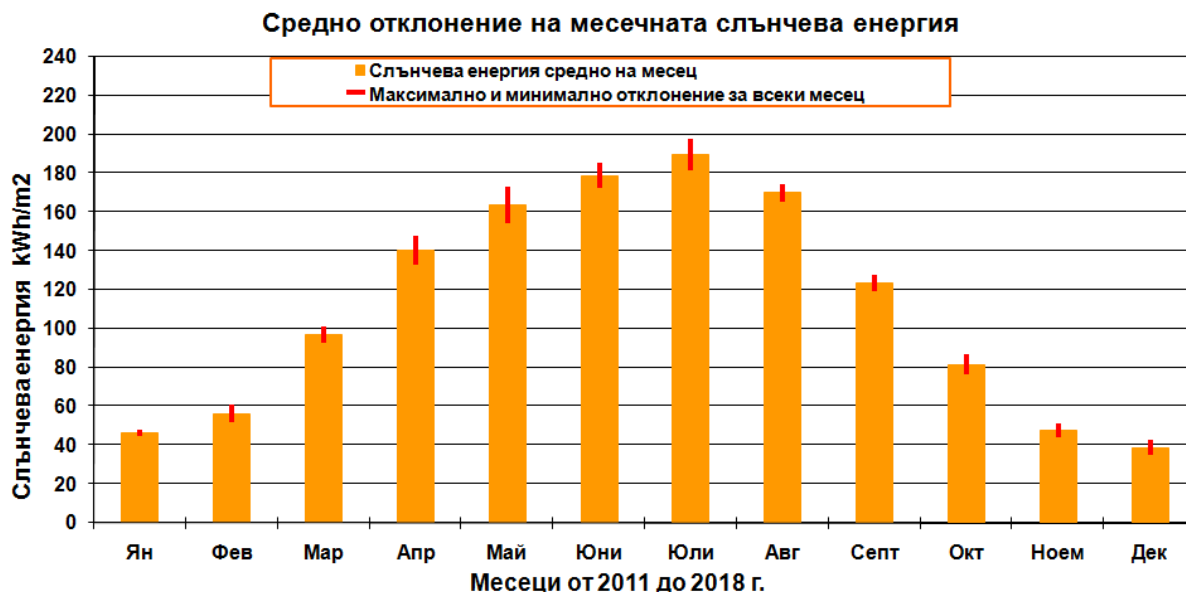
На фиг. 3 са показани стойностите на слънчевата енергия измерена за всеки месец в продължение на около 8 години. За всяка една от осемте години лентите, показващи съответните месечни стойности са изобразени с различни цветове.



Фиг. 3. Слънчева енергия измерена за всеки месец от 2011 до 2018 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.

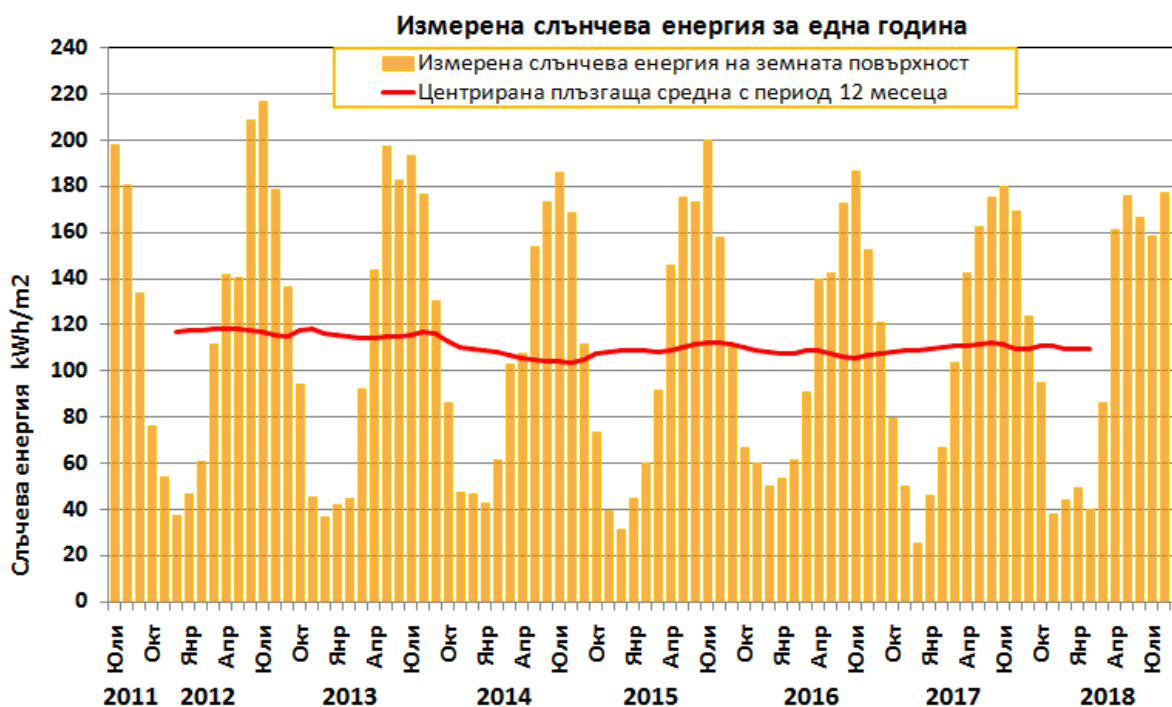
На фиг. 4 е показана средно измерената слънчева енергия за всеки месец в продължение на 8 години, за разлика от фиг. 3, където са показани действителните стойности на месеците. С оранжеви ленти е показана средната месечна стойност, а с червени линии е отбелязано минималното и максимално отклонение от 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 2018 години, показани на фиг. 1 и фиг. 2 измерената слънчева енергия се различава значително, както отбелязахме по-горе, но за осемте 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/m², спрямо 1 юли 2014 г. с измерена стойност 7800 Wh/m² показват динамика от 2.5 пъти, а за ден 3-ти съответно за 3 Юли 2011 г. с измерена стойност 1800 Wh/m² спрямо 3 юли 2012 г. с измерена стойност 7600 Wh/m² показват динамика повече от 4 пъти. В същото време разликата в измерената енергия за осемте месеца август от 2011 до август 2018 г. е по-малка от 17 %, (28/170), което се вижда от месечното разпределение, показано в таблица 1, намираща се по-долу в текста. Подобни минимални разлики се получават и за другите месеци. Например за месеците септември тя е по-малка от 19 %, а най-голямата за месец декември – само 60 %. С други думи наблюдаваме едно усредняване на месечна база. Тези първоначални резултати, въпреки че не са достатъчно продължителни, дават основание да се предположи, че колкото периода на измерване е по-голям, толкова отклоненията от средната стойност са по-малки.

На фиг. 5 е показано месечното разпределение на слънчевата енергия от месец юли 2011 година до месец септември 2018 година, заедно с центрирана аритметична средна с период 12 месеца в продължение на около 8 години. С жълти ленти е отбелязана стойността на измерената енергия за всеки месец, а с червена линия стойността на центрирана аритметична средна. От графиката се вижда, че стойността на центрираната аритметична средна е почти постоянна, т.е. годишното отклонение е по-малко от месечното. Този факт потвърждава извода направен по-горе, че колкото периодът на усредняване е по-голям, толкова прогнозите за стойността на слънчевото греене стават по-точни.



Фиг. 5. Плъзгаща се центрирана математическа средна на слънчева енергия по 12 месеца

В таблица 1 са показани измерените и средните стойности за всички месеци в периода от 2011 г. до 2018 г. В графа „Максимална разлика“ е изчислена разликата между максималната и минималната стойност за едноименните месеци за този период.

От таблица 1 се вижда, че максималната разлика между стойностите на средната слънчева енергия от 58 kWh/m² се получават през месец юли вероятно защото слънчевите и облачните дни често се сменят. Теоретичната слънчева енергия от фиг. 1 за месец юли съгласно формула (1) е:

$$(1) \quad E_{teor} = \frac{9.1 \times 31}{0.81} = 348 \frac{kWh}{m^2},$$

където: 9,1 – средната дневна енергия,
 0.81 – коригиращия коефициент, съгласно т. 2.
 31 – броя на дните в месец юли.

От друга страна, средно измерената слънчева енергия за месец юли от таблица 1 е 190 kWh/m². От тук получаваме, че реалните стойности на измерената слънчевата енергия за регион Стара Загора в следствие на облачността през летните месеци е 54,6 % (190/348) от теоретично максималната енергия, което добре съвпада с теорията.

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 2011–2018 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	124	95	38	44
2018г. kWh/m ²	49	40	86	161	176	166	159	176	123			
Средна стойност	46	56	96	140	164	178	190	170	124	82	48	39
Макс. Разл. kWh/m ²	12	26	25	54	56	43	58	28	26	28	22	25
Стандартно Отклонение kWh/m ²	3,6	9,2	8,4	14,6	18,9	13,0	15,8	9,6	8,8	9,9	7,2	8,1
Относителен Спад [%]	7,8	16,3	8,7	10,6	11,5	7,3	8,3	5,6	7,11	12,1	15,2	20,8

Освен, разпределението на слънчевата енергия по месеци, в таблица 1 са показани и средната стойност, стандартното отклонение и относителният спад. От таблицата се вижда, че стандартното отклонение и относителния спад сравнено за месеците през различните сезони на осемте 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 в относителния спад са през зимните месеци съответно за месец декември са 20,8 % и февруари 13,3 %. За летните месеци отклоненията леко намалят – август 5,6 % и юни 7,3 %.

Същото може да се каже и за стандартното отклонение. То е най-голямо през месец май – 18,9 kWh/m², а най-малко през януари 3,6 kWh/m². Най-голямата разлика също е през месец май – 56 kWh/m².

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

Табл. 2. Разпределение на слънчевата енергия по години

Години	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Количество енергия kWh/m ²	1360	1416	1380	1250	1334	1273	1345	1515

Изчислената средна годишна енергия от тази таблица е 1360 kWh/m². Максималната разлика $E_{разл}$ е между 1515 kWh/m² за 2018 г. и 1250 kWh/m² за 2014 г. и е равна на:

$$(2) \quad E_{разл} = 1515 - 1250 = 265 \frac{kWh}{m^2},$$

В проценти:

$$(3) \quad E_{разл} \% = \frac{265}{1360} = 19.5\%,$$

където : 1360 kWh/m² е средна годишна енергия,
265 е максималната разлика.

От друга страна, ако направим същите изчисления за месечните отклонения с данни за месец юли, талица 1, ще получим следните резултати:

$$(4) \quad E_{разл} \% = \frac{58}{190} = 30.5\%,$$

където: 190 kWh/m² е средната стойност за месец юли,
58 kWh/m² е максималното отклонение за месец юли.

От сравнение на резултатите във формула (3) и формула (4) се вижда, че месечните отклонения са по-големи от годишните. От по-горе в текста също установихме, че месечните отклонения са по-големи от годишните. Следователно отново се налага извода, че колкото е по-голям периода на усредняване, толкова разликите и прогнозите са по-точни.

От фиг. 5 виждаме, че средната стойност на центрираната движеща средна е 110 kWh/m². От тук изчисляваме средната годишна стойност Еср. год. :

$$(5) \quad E_{ср. год.} = 110 * 12 = 1320 \frac{kWh}{m^2},$$

където: 110 е средната стойност на центрираната движеща средна,
12 е броя на месеците.

С данни от таблица (2) изчислихме, че годишната средна стойност на енергията е 1360 kWh/m², а от формула (5) 1320 kWh/m². Тъй като тези 2 числа са много близки се налага извода, че центрираната движеща средна върху месечните данни може успешно да се използва за намиране на средните годишни стойности на слънчевата енергия.

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. Разликата е 196 kWh/m².

Този диапазон сравнително точно съвпада с получените от нас резултати с минимум 1250 kWh/m² до и максимум 1515 kWh/m² или средно 1360 kWh/m² (табл. 2). Разликата е 265 kWh/m².

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.