International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА СЛЪНЧЕВАТА РАДИАЦИЯ ЧРЕЗ ДАННИ ОТ РЕАЛНИ ИЗМЕРВАНИЯ И PVGIS В РАЙОНА НА ГАБРОВО ТЕХ ПАРК

Ивайло Лазаров

Технически университет - Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ 4, 5300 Габрово, България
**кореспондиращ автор: iv_lazarov@tugab.bg*

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOLAR IRRADIANCE USING REAL-WORLD MEASUREMENT DATA AND PVGIS IN THE REGION OF GABROVO TECH PARK

Ivaylo Lazarov

Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar Str., 5300 Gabrovo, Bulgaria
**Corresponding author: iv_lazarov@tugab.bg*

Abstract

This report presents a validation of theoretical solar radiation data - calculated for the plane of the photovoltaic (PV) modules - against actual measurements taken from the rooftop power plant at Gabrovo Tech Park. The dataset, derived from the monitoring system, covers a 12-month period in 2022 and records solar radiation in the plane of the PV modules at a 5-minute sampling interval. The measured data were obtained from a reference cell installed at a 33° tilt and an azimuth of 18.4° east and were compared with theoretical values from the current SARAH-3 satellite-based database (accessed via PVGIS 5.3).

The results of the linear regression analysis demonstrate high accuracy and reliability for the satellite model, yielding a global annual coefficient of determination of $R^2 = 0.98$, while the average monthly coefficient of determination is $R^2 = 0.92$. On an annual basis, the model exhibits a moderate long-term overestimation of +3.03%, with a mean bias error (MBE) of +49.58 kWh/m². This low percentage is the result of a seasonal compensatory effect. During the summer, PVGIS overestimates the solar radiation in the plane of the modules (G_{POA}), with the systematic error peaking in July (MBE = +20.13 kWh/m²); this is attributed to unaccounted-for high temperatures and local atmospheric aerosols. During the transitional months (March, September, and October), the model exhibits a slight, conservative underestimation compared to the values recorded by the monitoring system. An analysis of the regression equations reveals that, during the winter period, the slope of the regression line is close to unity (Slope = 0.95–1.05), whereas the intercept takes on significantly negative values (reaching as low as -0.3167) - a discrepancy caused by the presence of fog and snow accumulation on the reference cell.

Keywords: PVGIS 5.3; irradiance in plane of array; linear regression analysis.

ВЪВЕДЕНИЕ

Точната оценка на слънчевия потенциал за дадена локация е от критично значение при проектирането и финансовата оценка на една фотоволтаична електроцентрала (ФвЕЦ). Въпреки че наземните метеорологични станции осигуряват прецизни данни за слънчевата радиация, околната температура и скоростта на вятъра, тяхното внедряване често е ограничено от високите разходи за оборудване, поддръжка и техния ограничен пространствен обхват. В региони, където липсват директни наземни измервания,

проектантите разчитат на спътникови бази данни и софтуерни модели за прогнозиране. Сред тях най-широко използвана в световен мащаб е географската информационна система PVGIS, разработена от Съвместния изследователски център (JRC) на Европейската комисия.

Точността на сателитните модели обаче показва сериозна вариация, обусловена от регионалния микроклимат, атмосферните аерозоли и географските особености на релефа. Международни изследвания за валидиране на PVGIS в Южна Европа отчитат висока точност за глобална хоризонтална радиация (R^2 = 0.82–0.92), но при динамична облачност неопределеността нараства значително при разделянето на дифузната и директната компонента [1]. В Северна Европа (Ирландия) се наблюдава добро дългосрочно съвпадение (средна абсолютна процентна грешка около 6.8%), но локалните аномалии не са отчетени от данните в PVGIS [2]. Сравнителните анализи в Португалия, Бразилия и Саудитска Арабия доказват, че прецизността зависи в много голяма степен от избора на конкретния спътников масив (напр. климатичните серии от фамилията SARAH спрямо реанализите на ERA5) [3].

Тези отклонения се засилват при валидиране на радиацията в равнината на фотоволтаичните модули (Gpoa), която дефинира реалния входящ енергиен ресурс. Симулацията на (Gpoa) е математически по-сложна от тази на глобалната хоризонтална радиация, защото включва пространствените параметри на наклона, азимута и отраженията от земната повърхност (албедо). В райони със сложен географски релеф, каквито са предпланинските региони на Централна България и Стара планина, са налични специфични микроклиматични условия – сутрешни мъгли в котловините, купесто-дъждовна облачност и локални засенчвания. Последните технически доклади на JRC подчертават, че най-големите несъответствия между сателитните модели и наземните измервания възникват именно при такива сложни терени [4].

В проведените до момента изследвания на територията на „Габрово Тех Парк“ е анализирана реалната сезонна динамика на (Gpoa) за 2021 г., като е установено изменение от пикови стойности до 208.82 kWh/m² през юли и август до критични минимуми от 45.42 kWh/m² през декември и януари [5]. В последващ научен труд чрез полиноми са апроксимирани почасовите изменения на слънчевата радиация в равнината на модулите [6].

Тези анализи дават основа за оценка на ресурса, но същевременно разкриват необходимостта от по-детайлно валидиране на реалните физически измервания спрямо широко използваните сателитни данни от PVGIS.

ИЗЛОЖЕНИЕ

А) Изходни данни

Преди да се пристъпи към регресионен анализ и изчисляване на средната системна грешка (MBE) е извършена обработка на данните от реалните измервания за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули и данните за слънчевата радиация от PVGIS.

Реалните данни за слънчевата радиация са получени директно от системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала, разположена на покрива на Центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“. Измерванията са регистрирани от референтна клетка, разположена в една и съща равнина с фотоволтаичните модули. Фотоволтаичните модули и референтната клетка са монтирани под наклон 33° спрямо хоризонта и ориентация 18,4° на изток. Данните се отчитат с времева стъпка 5 минути.

Измерените стойности за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (G_POA), са сравнени с

данните от слънчевата радиация на най-актуалната версия на географската информационна система на Европейската комисия — PVGIS 5.3, като е използвана най-актуалната база данни за слънчевата радиация SARAH 3. Предимството им спрямо предходните бази данни (SARAH 2) е въвеждането на нов алгоритъм за разпознаването на снежна покривка, което прави данните за слънчевата радиация по-точни в зимни условия и в планински райони. Друго предимство на базата данни SARAH 3 е, че използва като климатичен модел съвременния климатичен модел ERA 5 при моделиране на водните пари и озона в атмосферата. При симулацията на данните за слънчевата радиация са конфигурирани същият наклон и азимут на фотоволтаичните модули, както на реалната фотоволтаична електроцентрала.

Получените данни от системата за мониторинг от симулациите в PVGIS са обработени и структурирани в MS Excel, което позволява последващата им обработка.

Б) Резултати и дискусия

За годишна оценка точността на точността на данните за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули е извършен регресионен анализ между измерените стойности получените стойности от симулациите в PVGIS за 2022 г.

Получените стойности за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули и изчислените стойности за средната системна грешка (MBE) са дадени в Таблица 1.

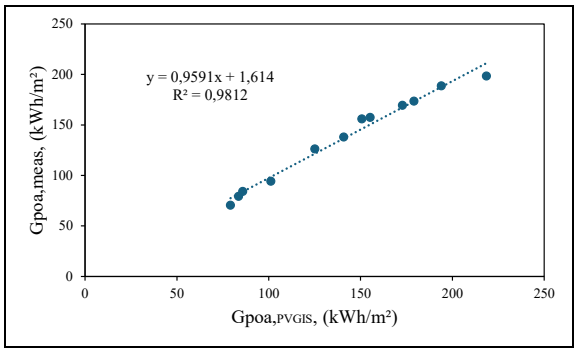
На годишна база от симулациите в PVGIS е получена стойност за Gpoa от 1685,54 kWh/m², а от системата за мониторинг е получена стойност от 1635,96 kWh/m². Получената разлика е 49,58 kWh/m², т.е. моделът надценява реалните данни. Изразено в проценти тази разлика е 3,03%.

Таблица 1. *Сумарни месечни стойности на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (G_{poa}) от реални измервания и от PVGIS и изчислени стойности за средна системна грешка (MBE) за 2022 г.*

Месец	G_{poa},PVGIS, (kWh/m²)	$G_{poa,meas,}$ (kWh/m²)	MBE, (kWh/m²)
януари	83,51	79,34	4,17
февруари	101,10	94,24	6,86
март	125,09	126,26	-1,17
април	140,81	137,93	2,88
май	193,99	188,76	5,23
юни	179,04	173,60	5,44
юли	218,54	198,41	20,13
август	172,76	169,46	3,30
септември	155,15	157,47	-2,32
октомври	150,63	155,97	-5,34
ноември	85,77	84,04	1,73
декември	79,15	70,48	8,67
общо	**1685,54**	**1635,96**	**49,58**

За юли е отчетена максималната стойност за средната системна грешка. Моделът отчита сумарна месечна стойност за Gpoa от 218,54 kWh/m², а сумарната месечна стойност за Gpoa от референтната клетка е 198,41 kWh/m². Тази ясно изразена положителна грешка показва, че моделът не отчита високите температури и финитe прахови частици (аерозоли), които редуцират слънчевите лъчи, достигнали до Земята. Най-ниска грешка е отчетена през март, което показва, че базата данни SARAH 3 отчита по-добре снежната покривка и албедото. Високата стойност за грешката през януари и февруари се дължи на наличието на мъгли в сутрешните часове, които моделът не отчита.

На фиг. 1 е показано сравнение на сумарните месечни стойности за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (Gpoa) за 2022 г. между получените от модела и измерените от референтната клетка.

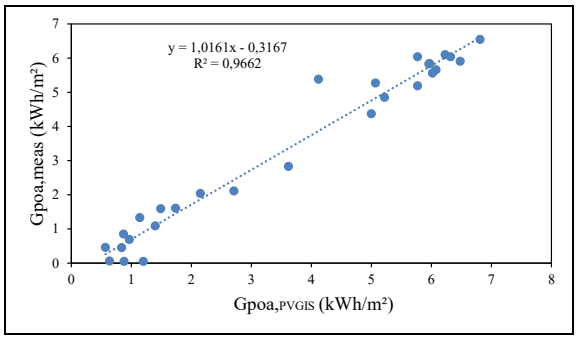


***Фиг. 1**. Сравнение на сумарните месечни стойности на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (G_{poa}) от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала в Габрово Тех Парк за 2022 г.*

Получената стойност за коефициента на детерминация показва, че сезонната вариация на G_{poa} в района на Габрово Тех Парк за 2022 г. се описва отлично от модела в PVGIS 5.3. Получената стойност за наклона на правата (0,951) е под единица, което показва, че PVGIS надценява системно реалните данни за Gpoa, получени от системата за мониторинг.

На годишна база, слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (G_{poa}) от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала на Габрово Тех Парк за 2022 г. се характеризира с отлична точност. Интерес представлява изменението на сумарните дневни стойности на слънчевата радиация отчетени от PVGIS и системата за мониторинг, при което се отчита динамиката на климата през различните месеци. Подробни графични резултати са показани за месеци от четирите климатични сезона и за един месец с повишена динамика на климата.

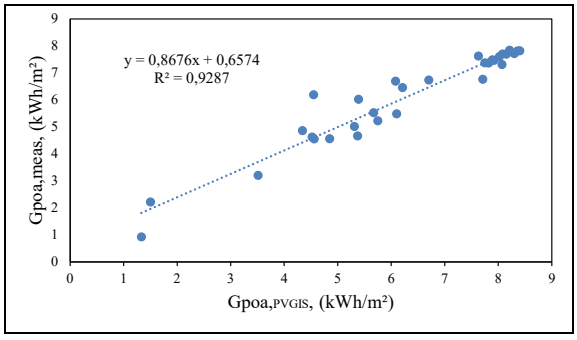
На фиг. 2 е показано сравнение на сумарните дневни стойности за G_{poa} от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала на Габрово Тех Парк за февруари 2022 г.



***Фиг. 2**. . Сравнение на сумарните дневни стойности на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (G_{poa}) от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала на Габрово Тех Парк за февруари 2022 г.*

За този месец моделът демонстрира много висока точност, като за коефициентът на детерминация получена стойност $R^2 = 0,97$. От полученото регресионно уравнение се вижда, че наклонът на линията е близък до единица, което показва отлично съвпадение на данните за дни с ясно и слънчево време. Получената отрицателна стойност за свободния член на уравнението показва систематично надценяване на данните от модела за дни с облачно и мрачно време.

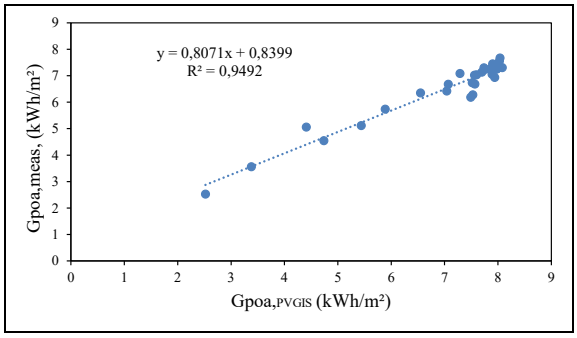
На фиг. 3. е показано сравнение на сумарните дневни стойности за Gpoa от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала за май 2022 г.



***Фиг. 3**. Сравнение на сумарните дневни стойности на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (Gpoa) от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала на Габрово Тех Парк за май 2022 г.*

Моделът отново демонстрира висока точност, като за коефициента на детерминация е получена стойност $R^2 = 0,93$. Стойността за наклона от регресионното уравнение е по-малка от единица (0,8676), което показва, че при увеличаване на околната температура моделът надценява данните от системата за мониторинг. Свободният член на уравнението е с положителна стойност (+0,6574), което показва, че измерените стойности компенсират грешката на математическия модел при ниски нива на радиацията, породени от бързо развиваща се купеста облачност в следобедните часове.

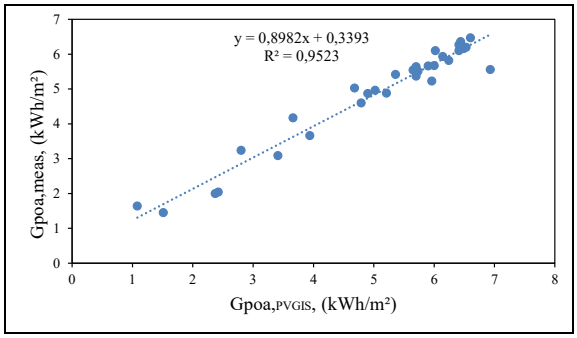
На фиг. 4. е показано сравнение на сумарните дневни стойности на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (G_{poa}) от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала на Габрово Тех Парк за юли 2022 г.



***Фиг. 4**. Сравнение на сумарните дневни стойности на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (Gpoa) от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала на Габрово Тех Парк за юли 2022 г.*

Въпреки получената висока стойност за коефициента на детерминаци (R2 = 0,95), за наклона на правата е получена най-ниска стойност(0,8071), което показва, че моделът надценява с почти 19 % данните от системата за мониторинг. Причина за това е високата температура, температурната турбулентност и атмосферните аерозоли. Получената висока положителна стойност за свободния член на регресионното уравнение компенсира ниския наклон на правата при средните стойности на слънчевата радиация.

Сравнение на сумарните дневни стойности на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (Gpoa) от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала на Габрово Тех Парк за октомври 2022 г. е показано на фиг. 5.



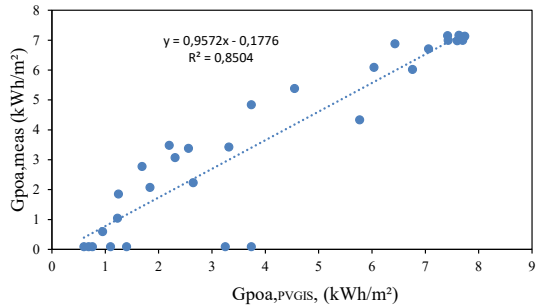
***Фиг. 5**. Сравнение на сумарните дневни стойности на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (Gpoa) от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала на Габрово Тех Парк за октомври 2022 г.*

През есента моделът отново възвръща своята точност като се за коефициентът на детерминация се получава висока стойност $R^2 = 0,95$. За този месец моделът надценява данните от системата за мониторинг с 10%. През слънчевите периоди от месеца експерименталните точки се подреждат плътно около линията на тренда.

На фиг. 6. е показано сравнение между сумарните дневни стойности за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (Gpoa) от PVGIS и системата за мониторинг за март 2022 г.

За този месец е получена най-ниската стойност за коефициента на детерминация (0,85) и се наблюдава най-голяма разсейване на данните. При ниски стойности за слънчевата радиация са наблюдават най-големи отклонения на данните от линията на тренда. Отчетените стойности от системата за мониторинг са близки до нула, а получените стойности

от PVGIS са между 3 и 4 W/m². Това се дължи на заснежаване или заснежаване на референтната клетка, които не са отчетени от алгоритмите на базата данни SARAH 3.



***Фиг. 6**. Сравнение на сумарните дневни стойности на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули (Gpoa) от PVGIS 5.3 и системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала на Габрово Тех Парк за март 2022 г.*

В Таблица 2 е дадено сравнение на статистическите показатели за месеците от 2022 г.

***Таблица 2.** Сравнение на статистически показатели за месеци от 2022 г.*

Месец	R^2	Наклон на линията (Slope)	Свободен член (Intercept)
януари	0,92	1,054	-0,2761
февруари	0,97	1,016	-0,3167
март	0,85	0,957	-0,1776
април	0,94	0,958	+0,1017
май	0,93	0,868	+0,6574
юни	0,89	0,878	+0,5361
юли	0,95	0,807	+0,8399
август	0,93	0,830	+0,8400
септември	0,94	0,938	+0,4005
октомври	0,95	0,898	+0,3393
ноември	0,85	0,953	+0,2045
декември	0,91	0,963	-0,1854
средна аритметична стойност	**0,92**	**0,927**	**+0,247**

Забележка: R^2 – коефициент на детерминация.

Резултатите от извършения линейно-регресионен анализ показват, че данните за слънчевата радиация са надежден източник за прогнозиране на слънчевия потенциал на територията на Габрово Тех Парк, като получената средна аритметична стойност за коефициента на детерминация е 0,92. Моделът описва най-добре денонощното изменение на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули през февруари (R2 = 0,97), докато най-голямо разсейване на данните е получено за преходните месеци март и ноември, за които са получени и най-ниските стойности за коефициента на детерминация (R2 = 0,85). Получената средната стойност за наклона на тренда е 0,93, което показва леко надценяване на модела при ясни и слънчеви дни. Тази тенденция е най-ясно изразена за периода май-август, за който стойността на коефициента пред независимата променлива намалява до стойности от 0,80 до 0,87. За стойностите на свободния член от получените регресионни уравнения са получени отрицателни стойности за зимните месеци, което показва надценяване при наличието на мъгли и снежна покривка. За летните месеци са получени високи положителни стойности за свободния член, което компенсира моделът при облачно време.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

След извършения статистическия анализ на месечните данни за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули за 2022 г. от PVGIS 5.3 (SARAH-3) и реалните данни от системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала в Габрово Тех Парк, могат да се направят следните изводи:

Получената висока средногодишна стойност за коефициента на детерминация (R^2 = 0,92) показва, че данните за слънчевата радиация от PVGIS 5.3 (SARAH-3) са надежден източник за оценка на слънчевия потенциал на тери-

торията на Габрово Тех Парк. Получената средна годишна системна грешка е +49,58 kWh/m² (3,03%). Получените стойности показват, че моделът на PVGIS 5.3 умерено надценява получените данни от системата за мониторинг.

Моделът надценява измерените данни за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули за девет от дванадесетте месеца в годината, като най-висока месечна системна грешка е получена за юли (MBE = +20,13 kWh/m²).

Анализът на коефициентите на получените месечни регресионни модели показва, че през летните месеци моделът надценява най-сериозно данните от системата за мониторинг за ясни и слънчеви дни, докато наклонът на правата на тренда достига най-ниски стойности. Обратно, през зимните месеци наклонът на правата достига стойности, приблизително равни на единица (0,95-1,05), което доказва отличното съвпадение на данните при чисто небе поради внедрените в SARAH-3 нови алгоритми за разпознаване на албедо и сняг. През зимните месеци за свободния член от регресионните модели са получени отрицателни стойности, което показва, че моделът надценява радиацията в мрачни дни, породено от наличието на мъгли или заснежаване на референтната клетка.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Psiloglou, B. E. et al. Comparison between MRM simulations, CAMS and PVGIS databases with measured solar radiation components at the Methoni station, Greece. Renewable Energy, Vol. 146, 2020, pp. 1372–1391. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.058

[2] Alfaraj, M., R. Popovici et al. Solar Irradiance Database Comparison for PV System Design: A Case Study. Sustainability, Vol. 16, No. 15, 2024, art. no. 6436. DOI: 10.3390/su16156436.

[3] Sousa, J. Mendonça, R. Pilão, P. Pinto в Renewable Energies, Environment & Power Quality Journal (REE&PQJ), Vol. 25, No. 2, 2026, стр. 136 – 140.Литературен източник. DOI: 10.24084/reepqj25-522.

[4] Falangas, A., O. Gounari, A. Martinez, N. Taylor. Photovoltaic Geographic Information System 6: Dataset Report & comparison with PVGIS 5.3. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2026. Technical Report EUR 31800 EN, JRC145834. DOI: 10.2760/6046202.

[5] Tsankov, P., & Lazarov, I. (2023). Izsledvane na slanchevata radiacia v rajona na Gabrovo Teh Park [Study of the solar irradiation in the area of Gabrovo Tech Park]. In Proceedings of the International Scientific Conference "UNITECH'23" (Vol. 1, pp. 61–65). Technical University of Gabrovo. (In Bulgarian)

[6] Tsankov, P., I. Lazarov. Research and Analysis of the Hourly Variation of Solar Radiation at the Photovoltaic Power Plants in Gabrovo Tech Park. // Proceedings of the 2024 Ninth Junior Conference on Lighting (Lighting). Sozopol, Bulgaria: IEEE, 2024. DOI:10.1109/Lighting61737.2024.10590679.