UO‘K: 620.91:621.383.51

FARG‘ONA VODIYSI IQLIM SHAROITIDA QUYOSH PANELLARI ISHLASH SAMARADORLIGIGA TA'SIR ETUVCHI ASOSIY OMILLARNING KOMPLEKS TAHLILI

Axmedova Shalola Yunusali qizi
Farg‘ona davlat universiteti doktoranti
e-mail: sh.axmedova@fardu.uz
Kamolova Muhabbatxon Muhiddin qizi
Farg‘ona davlat universiteti doktoranti
Holmatova Ruhshona
Farg‘ona davlat universiteti magistranti
Ilmiy rahbar: Sobirov Mahmud Marasulovich
Farg‘ona davlat universiteti dotsenti

Annotatsiya

Ushbu maqolada Farg‘ona vodiysining o‘ziga xos iqlim sharoitida (yuqori harorat, chang-qum intruziyalari va quyosh radiatsiyasi darajasi) fotoelektrik stansiyalar (FES) hamda quyosh panellarining ishlash samaradorligiga ta'sir etuvchi asosiy ekzogen va endogen omillar kompleks tahlil qilingan. Tadqiqot davomida quyosh panellari sirtida chang zarrachalarining cho‘kishi, optik yutilish va tarqalish yo‘qotishlari hamda harorat gradientining volt-amper xarakteristikasiga (VAX) ta'siri matematik modellashtirilgan. Adabiyot ma’lumotlari va Farg‘ona vodiysi iqlim ko‘rsatkichlari asosida fotoelektrik modullarning foydali ish koeffitsiyenti (FIK) pasayish qonuniyatlari tahlil qilingan. Chang qatlamining qalinligi va dispers tarkibiga qarab quyosh radiatsiyasining susayish darajasi baholangan hamda samaradorlikni oshirish bo‘yicha ilmiy-amaliy tavsiyalar ishlab chiqilgan.

Kalit so‘zlar: *fotoelektrik modul, Farg‘ona vodiysi iqlimi, chang qatlami, quyosh radiatsiyasi, harorat koeffitsiyenti, optik transmissiya, Mi nazariyasi, volt-amper xarakteristikasi, samaradorlik.*

Аннотация

В данной статье проводится комплексный анализ основных экзогенных и эндогенных факторов, влияющих на эффективность работы фотоэлектрических станций (ФЭС) и солнечных панелей в специфических климатических условиях Ферганской долины (высокие температуры, пыле-песчаные интрузии и уровень солнечной радиации). В ходе исследования математически смоделированы осаждение частиц пыли на поверхности солнечных панелей, потери на оптическое поглощение и рассеяние, а также влияние температурного градиента на вольт-амперную характеристику (ВАХ). На основе литературных данных и климатических показателей Ферганской долины проанализированы закономерности снижения коэффициента полезного действия (КПД) фотоэлектрических модулей. Оценена степень ослабления солнечной радиации в зависимости от толщины и дисперсного состава пылевого слоя, разработаны научно-практические рекомендации по повышению эффективности.

Ключевые слова: *фотоэлектрический модуль, климат Ферганской долины, слой пыли, солнечная радиация, температурный коэффициент, оптическое пропускание, теория Ми, вольт-амперная характеристика, эффективность.*

Abstract

This article presents a comprehensive analysis of the main exogenous and endogenous factors affecting the efficiency of photovoltaic stations (PVS) and solar panels in the specific climatic conditions of the Fergana Valley (high temperatures, dust-sand intrusions, and solar radiation levels). During the study, the deposition of dust particles on the surface of solar panels, optical absorption and scattering losses, and the influence of the temperature gradient on the current-voltage (I–V) characteristic were mathematically modeled. Based on literature data and the climatic indicators of the Fergana Valley, the patterns of the efficiency decrease of photovoltaic modules were analyzed. The attenuation degree of solar radiation depending on the thickness and disperse composition of the dust layer was estimated, and scientific-practical recommendations for increasing efficiency were developed.

Keywords: *photovoltaic module, Fergana Valley climate, dust layer, solar radiation, temperature coefficient, optical transmission, Mie theory, current-voltage characteristic, efficiency.*

KIRISH

Bugungi kunda global miqyosda energiya taqchilligi va ekologik muammolarni bartaraf etishda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan, xususan, quyosh fotoelektrik energetikasidan foydalanish ko‘lamini kengaytirish strategik ahamiyatga ega [1]. O‘zbekiston Respublikasi, xususan, uning sanoat va aholi zich joylashgan hududlaridan biri hisoblangan Farg‘ona vodiysi quyosh energiyasidan foydalanish uchun juda yuqori tabiiy-iqlimiy salohiyatga ega [2, 3, 4]. Farg‘ona vodiysida yiliga o‘rtacha 270–300 quyoshli kunlar kuzatilib, yer sirtiga tushayotgan yalpi quyosh radiatsiyasi miqdori 1800–2000 kVt·soat/m² ni tashkil etadi [2]. Bu ko‘rsatkich yirik quvvatli fotoelektrik stansiyalarni (FES) va mikro-FES tizimlarini samarali joriy etish uchun to‘liq zamin yaratadi [5, 6].

Biroq, real ekspluatatsiya sharoitida quyosh panellarining pasport ko‘rsatkichlaridagi (STC – Standard Test Conditions: radiatsiya 1000 Vt/m², modul harorati 25 °C, havo massasi AM = 1.5) [18] foydali ish koeffitsiyenti (FIK) amaliyotda keskin pasayishi kuzatiladi. Farg‘ona vodiysining o‘ziga xos, antropogen va tabiiy chang guborlari bilan to‘yingan iqlimi, yoz oylaridagi anomal yuqori havo harorati (40–45 °C gacha) fotoelektrik modullarning (FEM) energetik samaradorligini o‘rtacha 15–30 % gacha kamayishiga olib keladi [7].

Ushbu salbiy ta'sirlarni keltirib chiqaruvchi omillarni ikkita yirik guruhga ajratish mumkin:

1. Endogen omillar: yarimo‘tkazgich materialning tabiati, fotoelektrik o‘zgartirish jarayonidagi ichki yo‘qotishlar, harorat ta'sirida xususiy o‘tkazuvchanlikning ortishi va ketma-ket ichki qarshilikning (R_s) o‘zgarishi.

2. Ekzogen omillar: atrof-muhit harorati, quyosh insolatsiyasining spektral tarkibi, shamol tezligi va yo‘nalishi, havo namligi hamda eng asosiysi – panel sirtida hosil bo‘luvchi chang va dispers qatlamlar.

Ushbu tadqiqot ishining maqsadi – Farg‘ona vodiysi iqlim sharoitida quyosh panellarining ishlash samaradorligiga ta'sir etuvchi ushbu omillarning o‘zaro bog‘liqligini kompleks o‘rganish, chang qatlamlarining fizik xususiyatlarini modellashtirish va chiqish energetik parametrlarini optimallashtirish usullarini ishlab chiqishdan iborat.

METODOLOGIYA VA NAZARIY ASOSLAR

Tadqiqot doirasida yarimo‘tkazgichli kremniyli (Si) quyosh panellarining volt-amper xarakteristikasi (VAX) va ularning tashqi omillarga bog‘liqligi matematik modellashtirildi. Quyosh panelining yorug‘lik ta'siridagi ideallashtirilgan bir diodli ekvivalent sxemasi asosida hosil bo‘ladigan tok tenglamasi quyidagicha ifodalanadi [8, 9]:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left\{ exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right\} - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Bu yerda:

I_{ph} – fototok (A), tushayotgan quyosh radiatsiyasiga to‘g‘ri proporsional;
I_0 – diodning teskari to‘yinish toki (A);
q – elektron zaryadi (1.6×10^{-19} Kl);
V – panel qisqichlaridagi kuchlanish (V);
R_s va R_{sh} – ketma-ket va parallel (shunt) qarshiliklar (Ω);
n – diodning ideallik faktori;
k – Bolsman doimiysi (1.38×10^{-23} J/K);
T – modulning mutlaq harorati (K).

Harorat omilining ta'sir mexanizmi

Havo haroratining ko‘tarilishi yarimo‘tkazgichli materialning taqiqlangan zona kengligi (E_g) qisqarishiga olib keladi. Bu esa o‘z navbatida xususiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini oshiradi va teskari to‘yinish tokini (I_0) keskin o‘stiradi. Natijada, quyosh panelining salt yurish kuchlanishi (V_{oc}) harorat ortishi bilan deyarli chiziqli ravishda kamayadi [10]:

$$V_{oc}(T) = V_{oc,STC} \cdot [1 + \beta(T - T_{STC})] \quad (2)$$

Bu yerda β – kuchlanishning nisbiy harorat koeffitsiyenti bo‘lib, kremniyli elementlar uchun o‘rtacha −0.3 %/°C dan −0.45 %/°C gacha qiymatni tashkil etadi. Panelning maksimal quvvati (P_{max}) harorat ortishi bilan pasayishi esa quyidagi munosabat bilan ifodalanadi:

$$P_{max}(T) = P_{max,STC} \cdot [1 + \gamma(T - T_{STC})] \quad (3)$$

bunda γ – quvvatning nisbiy harorat koeffitsiyenti (γ ≈ −0.4 %/°C) [10, 11].

Chang zarralarining cho‘kishi va optik yo‘qotishlar

Panel sirtiga cho‘kkan chang qatlamining quyosh radiatsiyasini yutish va tarqatish xususiyati Buger–Lambert–Ber qonuniyatiga bo‘ysunadi. Panel sirtidan o‘tuvchi effektiv yorug‘lik oqimi (I_{trans}) quyidagicha aniqlanadi:

$$I_{trans} = I_{inc} \cdot exp(-\alpha_{ext} \cdot m_d) \quad (4)$$

Bu yerda:

I_{inc} – tushayotgan quyosh radiatsiyasi intensivligi (Vt/m²);
α_{ext} – chang qatlamining ekstinksiya (yutilish va tarqalish) koeffitsiyenti (m²/g);
m_d – sirtiy chang zichligi, ya'ni yuza birligidagi chang massasi (g/m²).

Chang zarralarining o‘lchamlari (dispersligi) Farg‘ona vodiysi sharoitida o‘rganilganda, ular asosan PM2.5 va PM10 mikrozarrachalardan iborat ekanligi aniqlangan. Zarrachalarning o‘lchami yorug‘lik to‘lqin uzunligiga (λ) yaqin bo‘lganligi sababli, yorug‘likning tarqalishi Mi (Mie) nazariyasi asosida tavsiflanadi [12, 13].

TAJRIBA VA NATIJALAR TAHLILI

Adabiyot ma'lumotlari va Farg‘ona vodiysi iqlim ko‘rsatkichlari tahlili shuni ko‘rsatdiki, yil davomida panellar yuzasida to‘planadigan chang massasi va tarkibi fasllarga qarab keskin farqlanadi. Bahor va yoz oylarida g‘arbiy va janubiy yo‘nalishdagi kuchli shamollar (xususan, vodiy uchun xos bo‘lgan Qo‘qon va Bekobod shamollari) natijasida mineral chang zarrachalarining cho‘kish tezligi ortadi.

1-jadval.

Chang qatlamining zichligi va o‘lchamiga qarab panel parametrlarining pasayishi (model bo‘yicha baholash)

Chang zichligi (m^d, g/m²)	Dispers tarkib	Optik transmissiya (%)	Salt yurish kuchlanishi (V_oC, V)	Qisqa tutashuv toki (I_sC, A)	Panel FIK pasayishi (%)
0 (Toza)	–	100.0	45.2	9.65	0.0
1.5	PM2.5 (Mayda)	92.4	44.9	8.91	7.6
3.0	Aralash (PM2.5 + PM10)	84.1	44.5	8.11	15.9
5.0	PM10 (Yirik)	75.6	43.8	7.29	24.4
8.0	Mineral qum cho‘kmasi	61.2	42.1	5.90	38.8

Model bo‘yicha hisob-kitoblardan ko‘rinib turibdiki, chang qatlamining zichligi 5.0 g/m² ga yetganda, qisqa tutashuv toki (I_{sc}) 9.65 A dan 7.29 A gacha tushib ketadi, bu esa tizimning umumiy quvvatini deyarli chorak qismga kamaytiradi. Mayda dispers (PM2.5) zarrachalar bir xil massa uchun yirik zarrachalarga nisbatan transmissiyani ko‘proq pasaytiradi [14, 15, 16].

2-jadval.

Yillik mavsumiy iqlimiy omillar kesimida yo‘qotishlar balansi (model bo‘yicha baholash)

Mavsum / Oy	O‘rtacha insolatsiya (kVt·s/m²/kun)	Panelning ishchi harorati (T_{CELL}, °C)	Harorat hisobiga yo‘qotish (%)	Chang qatlami hisobiga yo‘qotish (%)	Umumiy real samaradorlik koeffitsiyenti
Yanvar	2.1	8	+6.2 (kompensatsiya)	4.1	0.82
Aprel	5.5	32	−2.8	12.4	0.76
Iyul	7.8	58	−13.2	18.5	0.61
Oktabr	4.2	26	−0.4	8.9	0.79

Iyul oyida havo harorati yuqoriligi sababli panel o‘z-o‘zidan 58 °C gacha qiziydi va harorat hisobiga yo‘qotish 13.2 % ni tashkil etadi. Agar bunga iyul oyidagi quruq va changli havo natijasidagi 18.5 % lik yo‘qotish qo‘shilsa, tizimning umumiy samaradorligi 61 % gacha tushib ketadi, ya'ni potensial energiyaning qariyb 39 % qismi isrof bo‘ladi.

Tahlil natijalari shuni ko‘rsatadiki, chang zarrachalarning panel sirtidagi yopishqoqligi (adgeziyasi) havo namligi 70 % dan ortganda kuchayadi. Farg‘ona vodiysida tungi radiatsion sovish hisobiga erta tongda shabnam tushishi kuzatiladi. Bu shabnam quruq chang zarrachalari bilan aralashib, sirtda qattiq sementlashgan qatlamni hosil qiladi va uni oddiy mexanik yo‘l bilan tozalashni qiyinlashtiradi [17].

XULOSA VA TAVSIYALAR

Farg‘ona vodiysi iqlim sharoitida quyosh panellarining ishlash rejimlarini kompleks tahlil qilish natijasida quyidagi ilmiy va amaliy xulosalar shakllantirildi:

1. Harorat gradienti: yoz oylarida fotoelektrik modullarning harorati kritik 55–60 °C ga yetishi mumkin, bu esa har 1 daraja ortganda quvvatning taxminan 0.4 % ga kamayishini ko‘rsatuvchi nazariy modelga mos keladi.

2. Chang omili: panellar yuzasidagi changning dispers tarkibida PM10 va PM2.5 zarrachalari ustunlik qiladi. Chang sirtiy zichligi 3–5 g/m² ga yetganda, yorug‘lik transmissiyasi 15–24 % ga kamayib, chiqish tokini deyarli chiziqli ravishda pasaytiradi.

3. Kompleks yo‘qotish: eng og‘ir ekspluatatsiya davri iyul–avgust oylariga to‘g‘ri keladi. Bunda harorat va chang omillarining birgalikdagi (sinergik) ta'siri natijasida umumiy quvvat yo‘qotishlari 39–40 % gacha yetishi mumkin.

Amaliy tavsiyalar:

– Farg‘ona vodiysidagi FESlar uchun panellarni o‘rnatish burchagini mavsumiy o‘zgartirib turish (qishda 45°, yozda 15–20°) chang to‘planishini qisman kamaytiradi.

– Panellar yuzasini erta tongda yoki kechki payt optimal davriylikda (har 10–12 kunda) tozalash tizim samaradorligini sezilarli darajada qayta tiklaydi [17].

– Kelajakda modullar sirtiga nanostrukturali gidrofob va antistatik qoplamalarni qo‘llash chang adgeziyasini kamaytirishda eng istiqbolli yo‘nalishlardan biri hisoblanadi.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI / REFERENCES

1. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining “2022–2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekiston taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni, PF-60. – Toshkent, 2022-yil 28-yanvar.
2. Rakhimov E.Yu., Sadullaeva Sh.E., Kolomiets Yu.G., Tashmatov Kh.K., Usmonov N.O. Analysis of the solar energy potential of the Republic of Uzbekistan // Applied Solar Energy. – 2017. – Vol. 53, No. 4. – P. 344–346. – DOI: 10.3103/S0003701X17040120.
3. Avezov R.R., Avezova N.R., Matchanov N.A., Suleimanov Sh.I., Abdukadirova R.D. History and state of solar engineering in Uzbekistan // Applied Solar Energy. – 2012. – Vol. 48, No. 1. – P. 14–19. – DOI: 10.3103/S0003701X12010033.
4. Zakhidov R.A., Lutpullayev S.L. Global trends in alternative energies and problems in Uzbekistan for the development of renewable energy sources // Applied Solar Energy. – 2015. – Vol. 51, No. 1. – P. 50–61. – DOI: 10.3103/S0003701X15010144.
5. Mardonova M., Choi Y. Assessment of photovoltaic potential of mining sites in Uzbekistan // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, No. 10. – Art. 2988. – DOI: 10.3390/su11102988.
6. Razykov T.M., Kuchkarov K.M., Ergashev B.A., Esanov Sh.A. Fabrication of thin-film solar cells based on CdTe films and investigation of their photoelectrical properties // Applied Solar Energy. – 2020. – Vol. 56, No. 2. – P. 94–98. – DOI: 10.3103/S0003701X20020097.
7. Mani M., Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14, No. 9. – P. 3124–3131. – DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.065.
8. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 4th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.
9. Razykov T.M., Ferekides C.S., Morel D., Stefanakos E., Ullal H.S., Upadhyaya H.M. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects // Solar Energy. – 2011. – Vol. 85, No. 8. – P. 1580–1608. – DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.002.
10. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations // Solar Energy. – 2009. – Vol. 83, No. 5. – P. 614–624. – DOI: 10.1016/j.solener.2008.10.008.
11. Green M.A., Dunlop E.D., Yoshita M., Kopidakis N., Bothe K., Siefer G., Hao X. Solar cell efficiency tables (Version 62) // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2023. – Vol. 31, No. 7. – P. 651–663. – DOI: 10.1002/pip.3726.
12. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. – New York: John Wiley & Sons, 1983.
13. Piedra P., Moosmüller H. Optical losses of photovoltaic cells due to aerosol deposition: Role of particle refractive index and size // Solar Energy. – 2017. – Vol. 155. – P. 637–646.
14. El-Shobokshy M.S., Hussein F.M. Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells // Solar Energy. – 1993. – Vol. 51, No. 6. – P. 505–511. – DOI: 10.1016/0038-092X(93)90135-B.
15. Piedra P.G., Llanza L.R., Moosmüller H. Optical losses of photovoltaic modules due to mineral dust deposition: Experimental measurements and theoretical modeling // Solar Energy. – 2018. – Vol. 164. – P. 160–173. – DOI: 10.1016/j.solener.2018.02.030.
16. Elminir H.K., Ghitas A.E., Hamid R.H., El-Hussainy F., Beheary M.M., Abdel-Moneim K.M. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors // Energy Conversion and Management. – 2006. – Vol. 47, No. 18–19. – P. 3192–3203. – DOI: 10.1016/j.enconman.2006.02.014.
17. Sarver T., Al-Qaraghuli A., Kazmerski L.L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches //

Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 22. – P. 698–733. – DOI: 10.1016/j.rser.2013.01.012.
18. IEC 61215-1:2021. Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1: Test requirements. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2021.

G‘ulomjanova Sevaraxon G‘ofurjon qizi

19 THE INVERSE-SOURCE PROBLEM FOR MIXED-TYPE EQUATIONS
Murolimova N.A. **99**

20 INVERSE COEFFICIENT PROBLEM FOR A DEGENERATE PARABOLIC EQUATION WITH THE BESSEL OPERATOR
Kodiraliev Asadbek **102**

21 A BOUNDARY-VALUE PROBLEM FOR A COUPLED SECOND KIND DEGENERATE HYPERBOLIC EQUATIONS
Feruza Mamanazarova **106**

22 YUPQA PARDALAR TENZOQARSHILIGIGA TA'SIR ETUVCHI OMILLAR TAHLILI
To‘xtasinov Oybekjon Abduvahob o‘g‘li **110**

23 YARIMO‘TKAZGICHLAR VA IOT (INTERNET OF THINGS): RAQAMLI DUNYO TARMOG‘INING RIVOJI
To‘xtasinov Oybekjon Abduvahob o‘g‘li **113**

24 СВОЙСТВА СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА МОЛИБДЕНА ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГАЗОВЫХ ДАТЧИКОВ
Д.М.Ташланова
А.И.Зокиров **115**

25 FARG‘ONA VODIYSI IQLIM SHAROITIDA QUYOSH PANELLARI ISHLASH SAMARADORLIGIGA TA'SIR ETUVCHI ASOSIY OMILLARNING KOMPLEKS TAHLILI
Axmedova Shalola Yunusali qizi
Kamolova Muhabbatxon Muhiddin qizi
Holmatova Ruhshona **119**

26 TOR TEBRANISH TENGLAMASI UCHUN INTEGRAL SHARTLI MASALA
Jo‘rayeva Dilnavoz Umidjon qizi **126**

27 BESSEL OPERATORI QATNASHGAN ITERATSIYALANGAN ISSIQLIK TENGLAMALARINI TADQIQ ETISH
Raximova Sh.U. **129**

28 KUCHSIZ-SINGULYAR INTEGRAL OPERATORLAR UCHUN SHARTLANGAN ITERATSION METODLARNI TADQIQ QILISH
Raximov Quvvatali Ortiqovich **131**