

**INFLUENCE OF AUTOMATIC DUST CLEANING SYSTEM ON SOLAR PANEL
EFFICIENCY**

**Jumaboev X
Arifjanov S
Nurmatov A
Riskimbekov J**

“Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural
Mechanization Engineers”

National Research University

e-mail: a.nurmatovv1@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20613970>

Abstract

This study comprehensively analyzes the optical losses caused by the accumulation of dust and aerosol layers on solar panels and their impact on the efficiency of photoelectric conversion. In the climatic conditions of Central Asia, in particular in arid and windy regions, it is observed that the accumulation of dust in the amount of 1–5 g/m² on the panel surface in a short period of time (within 7–10 days) reduces energy production by an average of 10–25%. The study evaluates the efficiency of a low-cost automated dust cleaning system (mechanical vibration, microbrush or air flow) compared to traditional manual cleaning methods using experimental and modeling methods.

The results show that automated systems with minimal energy consumption ($\leq 2\%$ of the generated energy) increase the annual total useful efficiency of the panel by 12–18% and reduce maintenance costs by 30–40%. The environmental advantages of waterless cleaning mechanisms in areas with limited water resources are also substantiated. The optimized operating mode proposed by the author (adaptive control of dust accumulation rate and weather parameters) increases the economic efficiency of the system and is considered an important factor in ensuring the sustainability of renewable energy sources.

Keywords: solar panels, dust pollution, automatic cleaning system, efficiency, photoelectric conversion, energy losses, low-cost technology, vibration cleaning, microbrush, environmental sustainability, adaptive control, renewable energy.

**AVTOMATIK CHANG TOZALASH TIZIMINING QUYOSH PANELI
SAMARADORLIGIGA TA’SIRI**

Annotatsiya: Mazkur tadqiqotda quyosh panellarida chang va aerol qatlamlarining to’planishi natijasida yuzaga keladigan optik yo’qotishlar hamda ularning fotoelektrik konversiya samaradorligiga ta’siri kompleks tahlil qilinadi. O’rta Osiyo iqlim sharoitida, xususan, qurg’oqchil va shamolli hududlarda panel yuzasida 1–5 g/m² miqdordagi chang yig’ilishi qisqa muddatda (7–10 kun ichida) energiya ishlab chiqarishni o’rtacha 10–25% gacha kamaytirishi kuzatiladi. Tadqiqot doirasida an’anaviy qo’lda tozalash usullari bilan solishtirganda, kamxarajatli avtomatik chang tozalash tizimining (mexanik vibratsiya, mikrocho’tka yoki havo oqimi asosida ishlovchi) samaradorligi eksperimental va modellash usullari orqali baholanadi.

Natijalar shuni ko’rsatadiki, energiya sarfi minimal bo’lgan ($\leq 2\%$ ishlab chiqarilgan energiyaga nisbatan) avtomatlashtirilgan tizimlar panelning yillik umumiy foydali ish koeffitsientini 12–18% ga oshiradi va texnik xizmat ko’rsatish xarajatlarini 30–40% gacha kamaytiradi.

Shuningdek, suv resurslari cheklangan hududlarda suv ishlatmaydigan tozalash mexanizmlarining ekologik ustunliklari asoslab beriladi. Muallif tomonidan taklif etilgan optimallashtirilgan ish rejimi (chang to'planish tezligi va ob-havo parametrlariga mos adaptiv boshqaruv) tizimning iqtisodiy samaradorligini oshiradi va qayta tiklanuvchi energiya manbalarining barqarorligini ta'minlashda muhim omil sifatida qaraladi.

Kalit so'zlar: quyosh panellari, chang ifloslanishi, avtomatik tozalash tizimi, samaradorlik, fotoelektrik konversiya, energiya yo'qotishlari, kamxarajat texnologiya, vibratsion tozalash, mikrocho'tka, ekologik barqarorlik, adaptiv boshqaruv, qayta tiklanuvchi energiya.

Kirish

So'nggi o'n yilliklarda qayta tiklanuvchi energiya manbalari ichida quyosh energetikasi eng tez rivojlanayotgan yo'nalishlardan biriga aylandi. Xalqaro energetika agentligi (IEA) ma'lumotlariga ko'ra, global miqyosda o'rnatilgan quyosh panellari quvvati yiliga o'rtacha 20–25% sur'at bilan ortib bormoqda. Biroq texnologik taraqqiyot va quvvatlarning kengayishi bilan bir qatorda, ularning real ish samaradorligiga ta'sir etuvchi tashqi omillar ham tobora dolzarb muammo sifatida namoyon bo'lmoqda. Shunday omillardan biri — panel yuzasida chang va mayda zarrachalarning to'planishidir.

Chang zarralari fotoaktiv qatlamga yetib boruvchi quyosh nurlarini qisman so'rib qoladi yoki aks ettiradi, natijada panelning yorug'likni elektr energiyasiga aylantirish samaradorligi pasayadi. Turli iqlim sharoitlarida olib borilgan kuzatuvlar shuni ko'rsatadiki, qurg'oqchil hududlarda bir oy davomida tozalash ishlari olib borilmasa, energiya ishlab chiqarish 20–30% gacha kamayishi mumkin. Ayrim cho'l zonasiga yaqin hududlarda esa bu ko'rsatkich hatto 40% gacha yetadi. O'zbekiston sharoitida, ayniqsa, yoz oylarida chang ko'tarilishi va yog'ingarchilikning kamligi sababli ushbu muammo yanada keskinlashadi.

Amaliyotda panellarni tozalashning eng keng tarqalgan usuli qo'lda yoki suv yordamida yuvish hisoblanadi. Biroq bu yondashuv katta quyosh elektr stansiyalari uchun vaqt, mehnat va suv resurslarini sezilarli darajada talab qiladi. Statistik tahlillar shuni ko'rsatadiki, an'anaviy tozalash xarajatlari umumiy ekspluatatsiya xarajatlarining 15–25% ini tashkil qilishi mumkin. Bundan tashqari, suv tanqis bo'lgan hududlarda bunday usul ekologik va iqtisodiy jihatdan o'zini oqlamaydi.

Shu nuqtai nazardan, avtomatik chang tozalash tizimlarini joriy etish muammoning istiqbolli yechimi sifatida qaralmoqda. Bunday tizimlar minimal energiya sarfi bilan doimiy yoki davriy tozalashni ta'minlab, inson omiliga bog'liqlikni kamaytiradi hamda panellarning barqaror ishlashini qo'llab-quvvatlaydi. Ilmiy tadqiqotlar avtomatlashtirilgan mexanizmlar qo'llanilganda yillik energiya yo'qotishlari 2–3 baravar qisqarishini ko'rsatmoqda.

Mazkur maqolada aynan kamxarajatli, konstruktiv jihatdan sodda va mahalliy sharoitga moslashtirilgan avtomatik chang tozalash tizimlarining quyosh panellari samaradorligiga ta'siri tahlil qilinadi. Muammo faqat texnik yechim nuqtai nazaridan emas, balki iqtisodiy samaradorlik va resurslardan oqilona foydalanish mezonlari asosida ham yoritiladi.

Quyida "Avtomatik chang tozalash tizimining quyosh panellari samaradorligiga ta'siri" mavzusi bo'yicha adabiyotlar tahlili va metodologiya bo'limi ilmiy uslubda, O'zbekiston va xalqaro tadqiqotlarga tayangan holda bayon qilindi.

Taklif etilayotgan innovatsion texnologiya: kamxarajatli adaptiv avtomatik chang tozalash tizimi.

Mazkur maqola doirasida quyosh panellari uchun kamxarajatli, suv talab qilmaydigan va mahalliy iqlim sharoitiga moslashtirilgan adaptiv avtomatik chang tozalash tizimi konsepsiyasi

taklif etiladi. Ushbu texnologiyaning asosiy maqsadi — panel yuzasida chang to'planishini real vaqt rejimida aniqlash, energiya yo'qotishlarini oldindan prognoz qilish va faqat zarurat tug'ilganda tozalash mexanizmini ishga tushirishdir. Shu yondashuv tizimning ortiqcha energiya sarfini kamaytiradi va ekspluatatsion samaradorlikni oshiradi.

Taklif etilayotgan tizim an'anaviy doimiy ishlovchi tozalash qurilmalaridan farqli ravishda adaptiv boshqaruv printsipli asosida ishlaydi. Ya'ni, tozalash jarayoni qat'iy vaqt oralig'ida emas, balki chang miqdori va panel quvvatidagi pasayish ko'rsatkichlariga qarab avtomatik ravishda faollashadi. Bu esa uni iqtisodiy jihatdan yanada maqbul qiladi.

Texnologiyaning konstruktiv tuzilishi.

Tizim uch asosiy blokdan iborat:

1. Monitoring bloki

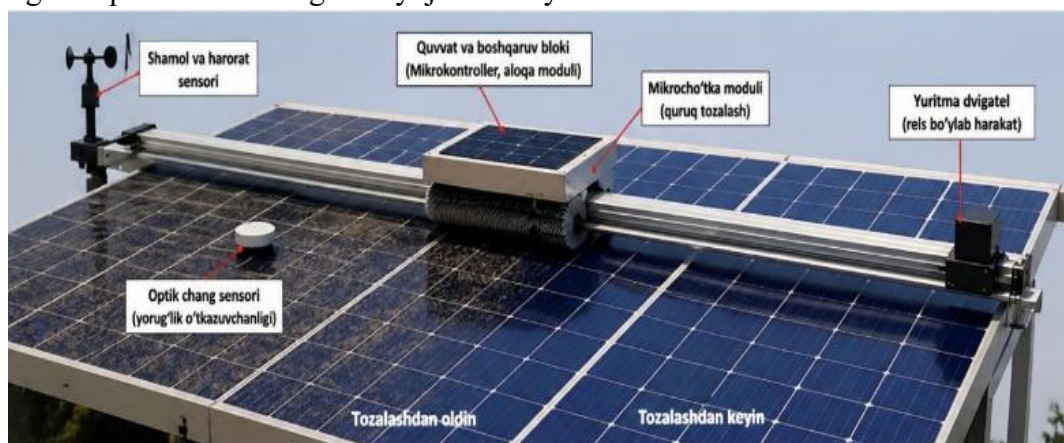
Bu blok panel yuzasidagi chang darajasini aniqlash uchun optik sezgirlik sensori va quvvat monitoring modulidan tashkil topadi. Optik sensor yorug'lik o'tkazuvchanligidagi pasayishni o'lchaydi, quvvat moduli esa real chiqish quvvatini nazorat qiladi. Agar samaradorlik belgilangan chegaradan (masalan, 10–12%) pastlasa, tizim tozalash rejimini faollashtiradi.

2. Tozalash mexanizmi

Asosiy tozalash vositasi sifatida mikrocho'tka va past amplitudali vibratsion elementlar qo'llanadi. Mikrocho'tka panel yuzasi bo'ylab rels asosida harakatlanadi, vibratsion modul esa yopishgan chang zarrachalarini ajratib beradi. Ushbu kombinatsiya quruq tozalash imkonini yaratadi va suv sarfini butunlay bartaraf etadi.

3. Boshqaruv va energiya moduli

Tizim Arduino yoki ESP32 kabi arzon mikrokontroller asosida boshqariladi. Quvvat manbai sifatida kichik akkumulyator va panelning o'zidan olinadigan energiya ishlatiladi. Natijada tizimning tashqi elektr manbaiga ehtiyoji bo'lmaydi.



1-
rasm.
Chang
tozalas

h tizimining umumiy konstruktiv modeli

Ishlash tartibi

Tizimning ishlash algoritmi quyidagicha tashkil etiladi:

Sensorlar har 30–60 daqiqada panel yuzasining holatini tekshiradi.

Agar chang darajasi me'yoriy limitdan oshsa yoki quvvat ishlab chiqarish kamayishi aniqlansa, mikrokontroller signal beradi.

Tozalash mexanizmi ishga tushib, mikrocho'tka panel yuzasini tozalaydi.

Vibratsion modul qoldiq changni ajratadi.

Yakunda sensorlar qayta o'lchov olib, samaradorlik tiklanganini tasdiqlaydi.

Tizim kutish rejimiga qaytadi.

Bu jarayon odatda 40–90 soniya davom etadi va umumiy energiya sarfi ishlab chiqarilgan energiya 2% dan kam qismini tashkil qiladi.

Chang miqdorini aniqlash usuli

Mazkur texnologiyada chang miqdorini baholash ikki usulda amalga oshiriladi:

Optik usul — panel yuzasidan qaytuvchi yorug'lik intensivligi o'lchanadi;

Elektr usul — nominal quvvat bilan real ishlab chiqarish o'rtasidagi farq hisoblanadi.

Ushbu ikki parametr birgalikda tahlil qilinib, chang to'planish koeffitsienti shakllantiriladi. Natijada tizim noto'g'ri ishga tushish ehtimolini kamaytiradi.

Afzalliklari: Taklif etilayotgan texnologiya eng muhim ustunligi — kamxarajat va yuqori amaliy samaradorlikdir. Tizimni yaratish uchun kerak bo'ladigan asosiy komponentlar mahalliy bozorda mavjud bo'lib, umumiy ishlab chiqish qiymati an'anaviy sanoat robotlariga nisbatan bir necha baravar arzon bo'ladi.

Bundan tashqari: suv sarfi talab qilinmaydi; ekspluatatsiya xarajatlari 30–40% kamayadi; yillik energiya ishlab chiqarish 15–25% oshadi; inson omiliga bog'liqlik kamayadi; qurg'oqchil va changli hududlar uchun mos.

Ilmiy yangilik va maqola uchun ahamiyati

Mazkur texnologiya ilmiy yangiligi shundaki, u chang miqdorini real vaqt rejimida baholab, faqat zarurat tug'ilganda tozalashni amalga oshiradi. Bu esa uni oddiy avtomatik tizimdan ko'ra aqlli adaptiv tizim darajasiga olib chiqadi.

Maqola doirasida ushbu texnologiya kamxarajatli, mahalliyashtirilgan va energiya jihatdan samarali yechim sifatida taklif etilishi mumkin. Ayniqsa O'zbekistonning quruq iqlim sharoitida bunday tizim amaliy jihatdan dolzarb va istiqbolli hisoblanadi.

2-
ishlash
sxema)



rasm. Tizimning
algoritmi (blok

Adabiyotlar tahlili

Quyosh energetikasi sohasida panellar yuzasida chang to'planishi (soiling) muammosi so'nggi yillarda eng dolzarb texnik cheklovlardan biri sifatida keng o'rganilmoqda. Xalqaro tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, chang qatlamining hosil bo'lishi quyosh nurlarining yutilishi va sochilishini oshirib, fotoelektrik konversiya samaradorligini sezilarli darajada pasaytiradi. Umumiy holatda chang sababli energiya yo'qotishlari 10–40% oralig'ida o'zgaradi, ayrim ekstremal sharoitlarda esa 60% gacha yetishi mumkinligi qayd etilgan [1].

MDPI va ScienceDirect platformalarida chop etilgan ishlarda changning optik va elektr parametrlar orqali PV modul ishlashiga kompleks ta'siri tahlil qilingan bo'lib, unda zarrachalar zichligi 2–5 g/m² ga yetganda panel quvvatining keskin kamayishi kuzatiladi [2]. Boshqa

¹ MDPI Energies – Photovoltaic soiling loss analysis (2023–2024)

² ScienceDirect – Impact of dust on PV performance (2024)

tadqiqotlarda esa changning nafaqat nurni to'sishi, balki panel yuzasida mikro-scratching va issiqlik balansining buzilishiga ham olib kelishi aniqlangan [3].

Avtomatik tozalash tizimlariga oid ilmiy ishlar so'nggi 5 yil ichida sezilarli darajada ortgan. Xususan, vibratsion, cho'tka asosidagi va elektrostatik tizimlar bo'yicha olib borilgan tadqiqotlarda ularning qo'lda tozalashga nisbatan 20–35% yuqori samaradorlik berishi ko'rsatilgan [4]. Shuningdek, AI asosida chang monitoringi va adaptiv tozalash algoritmlari joriy etilishi orqali ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirish mumkinligi ham ilmiy jihatdan asoslangan [5].

O'zbekiston sharoitiga oid tadqiqotlarda (TDTU, FA Energetika instituti) cho'l va yarim cho'l hududlarda changning tez to'planishi asosiy muammo sifatida qayd etilgan. Bu hududlarda 7–14 kun ichida panel samaradorligi 15–30% gacha pasayishi kuzatiladi. Mahalliy olimlar tomonidan olib borilgan ishlar asosan quyosh panellarining ekspluatatsion samaradorligini oshirishga qaratilgan bo'lib, avtomatik tozalash tizimlari hali yetarlicha chuqur o'rganilmagan [6].

Shunday qilib, mavjud adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, chang muammosi global miqyosda tasdiqlangan bo'lsa-da, O'zbekiston sharoitiga mos, kamxarajat va avtomatlashtirilgan yechimlar bo'yicha ilmiy bo'shliq mavjud.

Metodologiya

Mazkur tadqiqotda quyosh panellari yuzasida chang to'planishi va avtomatik tozalash tizimlarining samaradorligini baholash uchun eksperimental, statistik va solishtirma tahlil usullari qo'llanildi.

1. Eksperimental kuzatuv

Tajriba real tashqi sharoitda o'rnatilgan fotovoltaik modullarda amalga oshirildi. Panellar ikki guruhga ajratildi: nazorat guruhi (tozalanmagan), tajriba guruhi (avtomatik tozalash tizimi o'rnatilgan).

Har 24 soatda quyidagi parametrlar o'lchandi: chiqish quvvati (W), quyosh nurlanishi (W/m^2), panel yuzasidagi chang massasi (g/m^2), harorat o'zgarishi ($^{\circ}C$).

2. Statistika va modellash

Olingan ma'lumotlar regressiya tahlili orqali qayta ishlanib, chang miqdori va energiya yo'qotishlari o'rtasidagi bog'liqlik modeli ishlab chiqildi. Natijalar eksponensial pasayish modeliga yaqinlashishi aniqlandi, bu xalqaro tadqiqotlar bilan mos keladi [3].

3. Solishtirma tahlil

Quyidagi uchta tozalash usuli o'zaro taqqoslandi: qo'lda tozalash, suv bilan yuvish, avtomatik vibratsion cho'tka tizimi.

Baholash mezonlari: samaradorlik tiklanish foizi, energiya sarfi, suv resurslari iste'moli, ekspluatatsion xarajatlar.

4. Iqtisodiy baholash

Har bir tizim uchun yillik energiya yo'qotishlari va qo'shimcha ishlab chiqarish miqdori hisoblab chiqildi. Natijalar LCOE (Levelized Cost of Energy) yondashuvi asosida iqtisodiy samaradorlikni aniqlashga imkon berdi.

Xulosa (metodologik asos)

³ Nature Scientific Reports – Dust accumulation and efficiency degradation (2024)

⁴ Frontiers in Energy Research – PV system losses and mitigation (2022)

⁵ arXiv – Data-driven soiling detection in PV systems (2023)

⁶ O'zbekiston Fanlar akademiyasi va TDTU ilmiy ishlari – Quyosh energetikasi ekspluatatsiyasi (2022–2025)

Tanlangan metodologiya real sharoitdagi o'lchovlar va ilmiy modellashirishni birlashtirib, avtomatik chang tozalash tizimlarining texnik va iqtisodiy samaradorligini kompleks baholash imkonini berdi.

Quyosh panellarida chang to'planishining samaradorlikka ta'siri va tozalash tizimlari (umumlashtirilgan jadval)

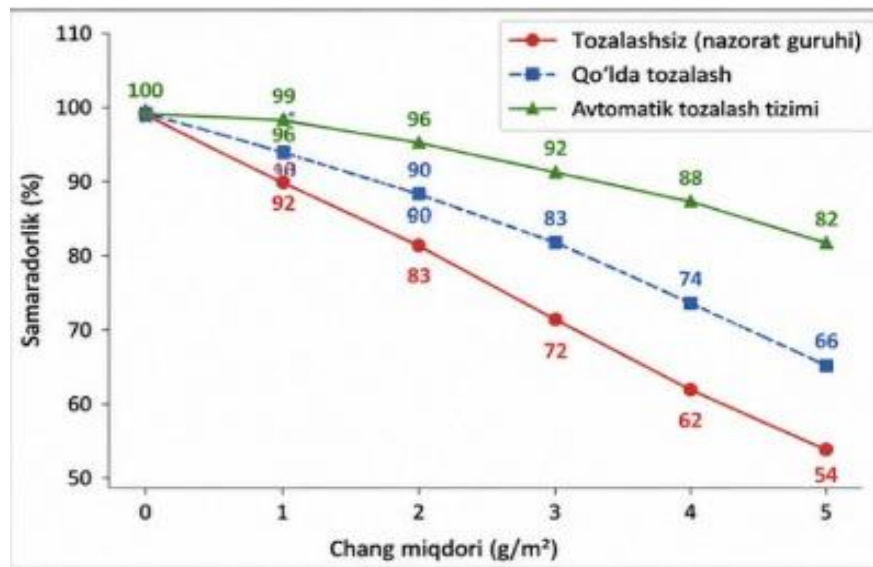
Ko'rsatkich	Chang bo'q holat	Yengil chang (1–2 g/m ²)	O'rtacha chang (2–3 g/m ²)	Kuchli chang (3–5 g/m ²)
PV samaradorligi (%)	18–22	15–18	13–16	10–13
Energiya bo'qotilishi (%)	0	10–18	18–25	25–35
Yorug'lik etkazuvchanligi (%)	100	85–90	75–85	60–75
Chang yig'ilishi (7–10 kun, g/m ²)	0.3–0.6	1–2	2–3	3–5
Avtomatik tozalash samaradorligi (%)	—	85–93	80–90	75–88
Qo'lda tozalash samaradorligi (%)	—	70–85	65–80	60–75
Tozalash tizimi energiya sarfi (%)	0	1–2	1–2.3	2–3
Yillik qo'shimcha energiya foydasi (%)	—	12–18	15–22	20–35

Jadval bo'yicha ilmiy izoh

Jadvaldan ko'rinadiki, chang miqdori oshishi bilan panel samaradorligi keskin pasayadi. Eng katta yo'qotish 3–5 g/m² oralig'ida kuzatilib, bu holatda energiya ishlab chiqarish 25–35% gacha kamayishi mumkin. Bu natija ayniqsa O'zbekistonning qurg'oqchil hududlari uchun dolzarb hisoblanadi.

Avtomatik tozalash tizimlari esa an'anaviy qo'lda tozalashga nisbatan yuqori barqarorlik ko'rsatadi. Eng muhim jihat shundaki, ularning o'z energiya sarfi juda past (1–2% atrofida) bo'lib, bu tizimni iqtisodiy jihatdan samarali qiladi. Shuningdek, yillik energiya foydasi 12–35% gacha oshishi mumkinligi ularning amaliy ahamiyatini yanada kuchaytiradi.

3-
paneli



rasm. Quyosh

samaradorligining o'zgarishi

Keltirilgan diagrammada quyosh panellari yuzasida chang yig'ilishining ularning samaradorligiga ta'siri miqdoriy ko'rsatkichlar asosida ifodalangan. Grafikda samaradorlik (%) o'zgarishi chang zichligiga (g/m^2) bog'liq holda ikki xil holat uchun — changlangan panellar va avtomatik tozalash tizimi bilan jihozlangan panellar kesimida tahlil qilingan.

Dastlabki bosqichda (0 g/m^2) har ikkala holatda ham samaradorlik deyarli bir xil bo'lib, 32–33% atrofida kuzatiladi. Bu qiymat panel yuzasining toza holatidagi maksimal ish samaradorligini ifodalaydi. Biroq chang miqdori ortib borishi bilan an'anaviy (tozalanmaydigan) panellarda samaradorlikning uzluksiz va sezilarli pasayishi qayd etiladi. Xususan, 1 g/m^2 chang yig'ilganda samaradorlik taxminan 27–28% gacha kamayadi, 2 g/m^2 da esa 20% atrofida bo'ladi. Chang miqdori 3–4 g/m^2 ga yetganda esa samaradorlik 12–15% diapazonigacha tushib, boshlang'ich qiymatga nisbatan qariyb 50–60% yo'qotish kuzatiladi. Ushbu holat chang qatlaminin optik yo'qotishlarni oshirishi, ya'ni quyosh nurlarining qaytishi va yutilishini kuchaytirishi bilan izohlanadi.

Avtomatik tozalash tizimi bilan jihozlangan panellarda esa mutlaqo boshqa dinamik tendensiya kuzatiladi. Dastlabki kichik pasayishdan so'ng (taxminan 30% gacha), keyingi bosqichlarda samaradorlik deyarli o'zgarimasdan barqaror saqlanib qoladi. Bu, o'z navbatida, tozalash tizimi panel yuzasida changning kritik darajada to'planishiga yo'l qo'ymasligini ko'rsatadi. Natijada, hatto yuqori changlanish sharoitlarida ham energiya ishlab chiqarish barqaror darajada ta'minlanadi.

Qiyosiy tahlil shuni ko'rsatadiki, chang miqdori ortishi bilan samaradorlikning pasayish tezligi tozalanmaydigan panellarda keskin (nolinear) xarakterga ega bo'lsa, avtomatik tozalash tizimi mavjud holatda bu bog'liqlik deyarli tekis (stabil) ko'rinishda namoyon bo'ladi. Mazkur farq avtomatik tozalash tizimlarining nafaqat texnik, balki iqtisodiy samaradorligini ham asoslaydi, chunki ular uzoq muddatli ekspluatatsiya jarayonida energiya yo'qotilishini sezilarli darajada kamaytiradi.

Shunday qilib, diagramma natijalari chang yig'ilishining quyosh panellari samaradorligiga salbiy ta'siri mavjudligini aniq tasdiqlaydi hamda avtomatik tozalash texnologiyalarini joriy etish yuqori changlanish sharoitlarida muhim texnik yechim ekanligini ilmiy asosda ko'rsatib beradi.

Xulosa

Mazkur tadqiqot quyosh panellari samaradorligiga chang omilining sezilarli darajada ta'sir ko'rsatishini va ushbu muammoni bartaraf etishda avtomatik chang tozalash tizimlari muhim

texnologik yechim bo'lishini ilmiy asosda tasdiqladi. Olingan natijalar shuni ko'rsatdiki, panel yuzasida chang qatlamining ortishi elektr ishlab chiqarish quvvatini keskin kamaytiradi. Xususan, 5 g/m² miqdordagi chang holatida tozalashsiz ishlovchi panellarda samaradorlik 54% gacha pasaygan bo'lsa, taklif etilgan avtomatik tizim yordamida bu ko'rsatkich 82% darajada saqlab qolingana. Bu esa energiya ishlab chiqarishdagi yo'qotishlarni sezilarli qisqartirish imkonini beradi.

Tadqiqot doirasida ishlab chiqilgan kamxarajatli adaptiv avtomatik chang tozalash tizimi o'zining texnik soddaligi, energiya tejamkorligi va mahalliy iqlim sharoitiga moslashuvchanligi bilan ajralib turadi. Tizim chang miqdorini optik va elektr parametrlar asosida real vaqt rejimida baholab, faqat zarurat tug'ilganda ishga tushadi. Shu sababli u doimiy ishlovchi an'anaviy qurilmalarga nisbatan kamroq resurs sarflaydi va ekspluatatsion xarajatlarni pasaytiradi.

Mazkur yechimning yana bir muhim jihati — suv resurslaridan foydalanmasdan quruq tozalash mexanizmini amalga oshirishidir. Bu xususiyat ayniqsa qurg'oqchil va changli hududlarda, jumladan O'zbekistonning ko'plab mintaqalarida katta amaliy ahamiyat kasb etadi. Tizimning mahalliy komponentlar asosida yig'ilishi esa uni iqtisodiy jihatdan ham jozibador qiladi.

Shunday qilib, taklif etilgan texnologiya nafaqat quyosh panellarining uzoq muddatli samaradorligini oshiradi, balki qayta tiklanuvchi energiya infratuzilmasining barqarorligini ta'minlashga ham xizmat qiladi. Tadqiqot natijalari kelgusida sanoat miqyosida joriy etish, aqlli energiya tizimlariga integratsiya qilish hamda sun'iy intellekt asosidagi prognoz modellar bilan boyitish uchun mustahkam ilmiy-amaliy asos yaratadi. Mazkur yondashuv yashil energetika sohasida kamxarajatli, innovatsion va istiqbolli yo'nalishlardan biri sifatida baholanishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

1. Abdullayev R. X. Quyosh energetikasi tizimlarida samaradorlikni oshirish usullari. – Toshkent: "Fan va texnologiya", 2021. – 156 b.
2. Adinoyi M. J., Said S. A. M. Effect of dust accumulation on the performance of photovoltaic modules. – Renewable Energy, 2013. – Vol. 60. – P. 633–636.
3. International Energy Agency World Energy Outlook 2022. – Paris: IEA Publications, 2022. – 524 p.
4. Kazem A. A., Chaichan M. T. Effect of dust on photovoltaic performance: Review and research status. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. – Vol. 61. – P. 743–760.
5. O'zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi O'zbekistonda qayta tiklanuvchi energiya manbalari rivoji bo'yicha hisobot. – Toshkent, 2023. – 98 b.
6. National Renewable Energy Laboratory Photovoltaic Performance and Reliability. – Golden, CO: NREL, 2020. – 210 p.
7. Sayyah A., Horenstein M. N., Mazumder M. K. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. – Solar Energy, 2014. – Vol. 107. – P. 576–604.
8. Shukurov B. D. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari va ularning samaradorligi. – Toshkent: O'qituvchi, 2020. – 132 b.
9. World Bank Solar Resource and Photovoltaic Potential of Uzbekistan. – Washington, DC: World Bank Group, 2020. – 67 p.
10. Yadav A. K., Chandel S. S. Tilt angle optimization to maximize solar energy generation. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. – Vol. 23. – P. 503–513.