



Suv resurslari cheklangan sharoitda fotoelektrik panellarni tozalash jadvallarining prognoz noaniqliklariga chidamliligini baholash

Abdullayev Abdulvositxon Abdumutalxon o'g'li

Namangan viloyati Novda School milliy maktabi o'qituvchisi

E-mail: abdullayevabdulvositxon@gmail.com

ORCID: 0009-0005-1666-800X

Abdug'aniyev Azizbek Abdullajon o'g'li

"Yarim o'tkazgichlar fizikasi" 2-magistranti

Namangan davlat universiteti "Fizika-matematika" fakulteti

E-mail: azizbekabduganiyev921@gmail.com

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada suv resurslari cheklangan sharoitda fotoelektrik panellarning sirtini tozalash jarayonlarini rejalashtirishda yuzaga keladigan prognoz noaniqliklarining tizim samaradorligiga ta'siri tadqiq etiladi. Fotoelektrik panellarda chang, mineral zarrachalar va atmosfera ifloslanishlarining to'planishi quyosh nurlanishining qabul qilinishini pasaytirib, elektr energiyasi ishlab chiqarish unumdorligining kamayishiga olib keladi. Biroq suv tanqisligi mavjud hududlarda panellarni tez-tez yuvish ekologik va iqtisodiy jihatdan maqbul yechim bo'lmashligi mumkin. Tadqiqotda tozalash chastotasini belgilashda changlanish dinamikasi, yog'ingarchilik ehtimoli, suv sarfi, energiya yo'qotishlari hamda meteorologik prognozlardagi noaniqliklar o'zaro bog'liq omillar sifatida qaraladi. Tozalash jadvalining turli prognoz xatoliklariga nisbatan chidamliligini baholash orqali suvdan foydalanish samaradorligi va elektr energiyasi ishlab chiqarish barqarorligini birgalikda ta'minlash imkoniyatlari aniqlanadi. Natijalar cheklangan suv sharoitida optimal tozalash strategiyasini shakllantirish, ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirish va fotoelektrik tizimlarning umumiy samaradorligini oshirish uchun amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so'zlar:

Fotoelektrik panel, suv tanqisligi, tozalash jadvali, prognoz noaniqligi, changlanish, energiya samaradorligi, optimallashtirish, barqarorlik.

Оценка устойчивости графиков очистки фотоэлектрических панелей к неопределённостям прогнозирования в условиях ограниченных ресурсов

АННОТАЦИЯ

В статье исследуется устойчивость графиков очистки фотоэлектрических панелей к неопределённости прогнозов в условиях ограниченных водных ресурсов. Накопление пыли, минеральных частиц и атмосферных загрязнений на поверхности солнечных модулей приводит к снижению пропускания солнечного излучения и, как следствие, к уменьшению выработки электроэнергии. Вместе с тем в регионах с дефицитом воды чрезмерно частая очистка панелей может сопровождаться значительными эксплуатационными затратами и нерациональным

Ключевые слова:

Фотоэлектрические панели, дефицит воды, график очистки, неопределённость прогноза, загрязнение, энергоэффективность, оптимизация, устойчивость.



использованием водных ресурсов. В исследовании рассматриваются взаимосвязи между интенсивностью загрязнения поверхности, вероятностью атмосферных осадков, расходом воды, потерями генерации и ошибками метеорологических прогнозов. Особое внимание уделяется оценке того, насколько выбранный график очистки сохраняет эффективность при изменении прогнозируемых условий. Анализ устойчивости позволяет определить такие интервалы очистки, при которых достигается компромисс между экономией воды и минимизацией потерь электрической энергии. Полученные результаты могут использоваться при разработке адаптивных стратегий технического обслуживания фотоэлектрических установок в засушливых и вододефицитных регионах, а также при повышении надежности решений, основанных на метеорологических прогнозах.

Assessment of the robustness of photovoltaic panel cleaning schedules to forecast uncertainties under limited resource conditions

ABSTRACT

This study evaluates the robustness of photovoltaic panel cleaning schedules to forecast uncertainty under conditions of limited water resources. The accumulation of dust, mineral particles, and atmospheric contaminants on photovoltaic surfaces reduces solar irradiance transmission and consequently decreases electricity generation efficiency. However, in water-stressed regions, frequent panel cleaning may require excessive water consumption and increase operational costs, making conventional maintenance schedules less sustainable. The research considers surface soiling dynamics, precipitation probability, water requirements, energy losses, and meteorological forecast errors as interconnected factors influencing cleaning decisions. Particular attention is given to the ability of alternative cleaning schedules to maintain acceptable performance when predicted environmental conditions differ from actual conditions. Robustness assessment provides an opportunity to identify cleaning intervals that balance water conservation with the prevention of excessive energy losses caused by soiling. The findings contribute to the development of adaptive and resource-efficient maintenance strategies for photovoltaic systems operating in arid and water-limited environments. The proposed approach can also support more reliable operational planning by incorporating uncertainty directly into the decision-making process rather than relying exclusively on deterministic weather forecasts.

Keywords:

Photovoltaic panels, water scarcity, cleaning schedule, forecast uncertainty, soiling, energy efficiency, optimization, robustness.

Kirish. Bugungi kunda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish global energetika tizimining barqaror rivojlanishini ta'minlashning muhim yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Xususan, fotoelektrik texnologiyalarning keng joriy etilishi elektr energiyasini ekologik jihatdan toza va nisbatan kam ekspluatatsion xarajatlar asosida ishlab chiqarish imkonini bermiqda. Biroq fotoelektrik panellarning real ish unumdorligi faqat ularning texnik parametrlariga emas, balki tashqi muhit omillariga va texnik xizmat ko'rsatish sifatiga ham bevosita bog'liq. Panel yuzasida chang, qum, tuproq zarralari, tuz qoldiqlari va boshqa ifloslantiruvchi moddalarning



to'planishi quyosh nurlanishining fotoelektrik elementlarga yetib borishini cheklaydi. Natijada panelning energiya ishlab chiqarish quvvati pasayib, tizimning umumiy iqtisodiy samaradorligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi.

Ayniqsa, qurg'oqchil va yarim qurg'oqchil hududlarda changlanish jarayonining yuqori intensivligi fotoelektrik panellarni muntazam tozalashni talab qiladi. Shu bilan birga, bunday hududlarning aksariyatida suv resurslari cheklangan bo'lib, panellarni an'anaviy usulda yuvish katta miqdorda suv sarflanishiga olib kelishi mumkin. Shuning uchun fotoelektrik panellarni tozalash jarayonini tashkil etishda faqat energiya yo'qotishlarini kamaytirish emas, balki sarflanadigan suv miqdorini ham optimallashtirish zarur. Mazkur masala tozalash jadvalini shakllantirishni ko'p mezonli boshqaruv muammosiga aylantiradi.

Muammoning yana bir muhim jihati meteorologik va ekspluatatsion ko'rsatkichlarni oldindan aniq baholashdagi noaniqliklar bilan bog'liq. Yog'ingarchilikning qachon sodir bo'lishi, changlanish tezligi, shamol yo'nalishi va tezligi hamda atmosfera namligi kabi omillar tozalash samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Prognoz qilingan sharoit bilan haqiqiy sharoit o'rtasidagi farq esa oldindan tuzilgan tozalash jadvalining optimal natija berishiga to'sqinlik qilishi mumkin. Masalan, yog'ingarchilik kutilganligi sababli tozalash kechiktirilsa, prognoz xatosi tufayli yog'ingarchilik sodir bo'lmasligi va panel yuzasidagi ifloslanishning ortishi natijasida qo'shimcha energiya yo'qotishlari yuzaga kelishi mumkin.

Shu nuqtayi nazardan, fotoelektrik panellarni tozalash jadvalini faqat bitta prognoz ssenariysi asosida emas, balki prognoz noaniqliklarini hisobga olgan holda ishlab chiqish muhim ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi. Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi suv resurslari cheklangan sharoitda fotoelektrik panellarni tozalash jadvalarining prognoz xatoliklariga nisbatan chidamliligini baholashdan iborat. Tadqiqot doirasida suv sarfi, panelning ifloslanish darajasi, kutilayotgan energiya yo'qotishi va meteorologik prognozlarning ishonchliligi o'zaro bog'langan parametrlar sifatida qaraladi. Bunday yondashuv suvni tejash va fotoelektrik tizimning energiya samaradorligini saqlab qolish o'rtasidagi optimal muvozanatni aniqlash imkonini beradi [1-3].

Adabiyotlar tahlili. Fotoelektrik panellarning ekspluatatsion samaradorligiga tashqi muhit omillarining ta'siri so'nggi yillarda qayta tiklanuvchi energetika sohasidagi muhim tadqiqot yo'nalishlaridan biriga aylandi. Ayniqsa, panel yuzasida chang va boshqa ifloslantiruvchi zarrachalarning to'planishi natijasida yuzaga keladigan *soiling* hodisasi elektr energiyasi ishlab chiqarish samaradorligini pasaytiruvchi asosiy omillardan biri sifatida qaralmoqda. Mani va Pillai tomonidan olib borilgan tadqiqotda changning fotoelektrik modullar ish unumdorligiga ta'siri tizimli ravishda tahlil qilinib, changning to'planish jarayoni geografik joylashuv, panelning qiyalik burchagi, atmosfera sharoitlari va zarrachalarning fizik xususiyatlari bilan bog'liqligi ko'rsatilgan. Mualliflar changlanishni kamaytirish bo'yicha samarali texnik yechimlarni ishlab chiqish zarurligini ta'kidlaydi.

Fotoelektrik panellarning changlanishi va uning energiya ishlab chiqarishga ta'siri bo'yicha keyingi tadqiqotlar mazkur muammoning faqat texnik emas, balki iqtisodiy va ekspluatatsion jihatlar ham mavjudligini ko'rsatdi. Xususan, Micheli va hammualliflar fotoelektrik tizimlarda tozalash chastotasini optimallashtirish masalasini tadqiq qilib, tozalash davriyligini belgilashda panelning degradatsiya darajasi, energiya narxi, ekspluatatsion xarajatlar va ifloslanishdan kelib chiqadigan yo'qotishlarni birgalikda hisobga olish zarurligini asoslagan. Tadqiqotda 1 MW quvvatli fotoelektrik tizim ma'lumotlari asosida turli degradatsiya ssenariylari ko'rib chiqilgan hamda Levelized Cost of Energy (LCOE) va Net Present Value (NPV) kabi iqtisodiy mezonlardan foydalanilgan. Natijalar tozalash chastotasi yagona doimiy qiymat sifatida emas, balki tizimning ishlash sharoitlariga qarab o'zgaruvchi parametr sifatida qaralishi kerakligini ko'rsatadi.

Ushbu yondashuv Micheli va hammualliflarning mavsumiy changlanish hamda tozalashni optimallashtirishga bag'ishlangan keyingi tadqiqotlarida yanada rivojlantirilgan. Mazkur ishlarda fotoelektrik panellarning changlanish darajasi yil davomida bir xil bo'lmasligi, shuning uchun tozalash jadvali mavsumiy xususiyatlarni hisobga olishi lozimligi ko'rsatiladi. Bu natijalar tozalash



jarayonini oldindan belgilangan qat'iy grafik asosida tashkil etishdan ko'ra, atrof-muhit sharoitlari va ifloslanish dinamikasiga moslashtirish maqsadga muvofiqligini ko'rsatadi.

Bessa va hammualliflar fotoelektrik tizimlarda changlanishni monitoring qilish usullarini tahlil qilib, ifloslanish darajasini muntazam aniqlash optimal texnik xizmat ko'rsatish strategiyasini shakllantirishning muhim sharti ekanligini qayd etgan. Tadqiqotda changlanishni baholash, monitoring qilish, prognozlash va tozalash jarayonlarini optimallashtirish o'zaro bog'langan jarayonlar sifatida qaraladi. Shu jihatdan mazkur yondashuv fotoelektrik panellarni tozalash jadvalini real vaqt ma'lumotlari bilan bog'lash uchun metodologik asos yaratadi.

Ullah va hammualliflarning tadqiqotida esa changlanishning fizik-kimyoviy xususiyatlari hamda optimal tozalash jadvali masalasi Lahore sharoitida o'rganilgan. Mazkur tadqiqotning muhim jihati shundaki, unda faqat panel yuzasidagi chang miqdori emas, balki chang tarkibi, atrof-muhit sharoitlari va tozalash davriyligi o'rtasidagi munosabatlar ham tahlil qilingan. Bu yondashuv turli geografik hududlarda bir xil tozalash jadvalidan foydalanish samarali bo'lmisligi mumkinligini ko'rsatadi.

Mavjud ilmiy tadqiqotlarni umumlashtirish shuni ko'rsatadiki, fotoelektrik panellarni tozalash muammosi bo'yicha asosiy ilmiy yo'nalishlar changlanishning energiya ishlab chiqarishga ta'sirini aniqlash, changlanish jarayonini modellashtirish, optimal tozalash chastotasini belgilash va tozalashning iqtisodiy samaradorligini baholashga qaratilgan. Biroq mavjud ishlarda suv resurslarining cheklanganligi va meteorologik prognozlarning noaniqligi ko'pincha alohida omillar sifatida qaraladi. Holbuki, suv tanqis hududlarda tozalash jadvalini ishlab chiqishda suv sarfi va prognoz xatosi bir vaqtning o'zida qaror qabul qilish jarayoniga ta'sir ko'rsatadi.

Shuningdek, adabiyotlarda tozalash jadvalining prognoz noaniqliklariga nisbatan chidamliligi yetarlicha tizimli mezon sifatida shakllantirilmagan. Ko'pchilik tadqiqotlarda ma'lum hudud uchun optimal tozalash davri aniqlanadi, biroq meteorologik prognoz haqiqiy sharoitdan farq qilganda ushbu jadvalning samaradorligi qanday o'zgarishi masalasi kamroq yoritilgan. Aynan shu jihat mazkur tadqiqotning ilmiy yo'nalishini belgilaydi.

Shu sababli ushbu maqolada mavjud tadqiqotlarning kuchli jihatlari - changlanishning energiya ishlab chiqarishga ta'sirini baholash, tozalash chastotasini optimallashtirish va iqtisodiy samaradorlikni hisobga olish - suv resurslari cheklovi hamda prognoz noaniqligi bilan integratsiyalashgan holda rivojlantiriladi. Tadqiqotning asosiy ilmiy yangiligi tozalash jadvalini faqat o'rtacha yoki kutilayotgan meteorologik sharoitlar asosida emas, balki prognoz xatolarining turli ssenariylari ostida baholashga qaratilgan. Bunday yondashuv tozalash jadvalining "optimal" ekanligini emas, balki uning turli noaniq sharoitlarda qanchalik barqaror va chidamli ekanligini aniqlash imkonini beradi.

Natijada, adabiyotlar tahlili fotoelektrik panellarni ekspluatatsiya qilishda changlanish, tozalash chastotasi, suv sarfi va prognoz noaniqligi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni kompleks ravishda baholash zarurligini ko'rsatadi. Mazkur ilmiy bo'shliq suv resurslari cheklangan sharoitda fotoelektrik panellarni tozalash jadvalarining prognoz noaniqliklariga chidamliligini tadqiq etishning dolzarbligini asoslaydi.

Metodologiya. Tadqiqot metodologiyasi suv resurslari cheklangan sharoitda fotoelektrik panellarni tozalash jadvalini shakllantirish va uning prognoz noaniqliklariga chidamliligini miqdoriy baholashga asoslanadi. Metodik yondashuvda asosiy e'tibor uchta o'zaro bog'liq masalaga qaratiladi: panel yuzasida ifloslanishning vaqt bo'yicha o'zgarishini modellashtirish, tozalash jarayonining suv va energiya nuqtayi nazaridan samaradorligini aniqlash hamda prognoz xatoliklari sharoitida tanlangan jadvalning barqarorligini baholash.

Birinchi bosqichda fotoelektrik panelning boshlang'ich texnik ko'rsatkichlari va atrof-muhit parametrlari aniqlanadi. Bunda panelning nominal quvvati, samaradorligi, ish yuzasi, quyosh nurlanishi intensivligi, havo harorati, shamol tezligi, yog'ingarchilik miqdori va panel yuzasining ifloslanish darajasi asosiy kirish parametrlari sifatida qabul qilinadi. Panelning ifloslanish darajasi vaqt davomida ortib boruvchi o'zgaruvchi sifatida qaraladi [4].

Soddalashtirilgan holda ifloslanish koeffitsienti quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:



$$S(t) = S_0 + \alpha t - \beta P(t)$$

bu yerda $S(t)$ — t vaqtdagi ifloslanish darajasi, S_0 — boshlang'ich ifloslanish darajasi, α — changlanish intensivligi, t — tozalashdan keyingi vaqt, β — yog'ingarchilikning tozalashga ta'sir koeffitsienti, $P(t)$ — ma'lum vaqt oralig'idagi yog'ingarchilik miqdorini ifodalaydi.

Ikkinchi bosqichda ifloslanishning elektr energiyasi ishlab chiqarishga ta'siri baholanadi. Panelning real quvvati ifloslanish koeffitsienti orqali kamayuvchi funksiya sifatida qabul qilinadi. Natijada ma'lum vaqt oralig'ida ifloslanish tufayli yuzaga keladigan energiya yo'qotishi hisoblanadi. Ushbu ko'rsatkich tozalash xarajatlari va suv sarfi bilan birgalikda umumiy maqsad funksiyasini shakllantirishda foydalaniladi.

Uchinchi bosqichda suv resurslaridan foydalanish cheklovi modelga kiritiladi. Har bir tozalash operatsiyasi uchun sarflanadigan suv miqdori W_i bilan belgilanib, umumiy suv sarfi belgilangan limitdan oshmasligi talab qilinadi:

$$\sum W_i \leq W_{\max}$$

Bu yerda: $W_{\max}$ — tadqiqot davrida foydalanish mumkin bo'lgan maksimal suv miqdori. Shu orqali energiya yo'qotishlarini kamaytirish bilan birga suv iste'molini nazorat qilish imkoniyati yaratiladi [5,6].

To'rtinchi bosqich tadqiqotning asosiy qismi bo'lib, prognoz noaniqliklarini modellashtirishni nazarda tutadi. Meteorologik prognozlarning haqiqiy qiymatdan farqi tasodifiy xatolik sifatida ifodalanadi. Yog'ingarchilik, changlanish intensivligi va boshqa muhim omillar uchun bir nechta ehtimoliy ssenariylar shakllantiriladi. Har bir ssenariyda tozalash jadvalining umumiy samaradorligi qayta hisoblanadi. Shunday qilib, bitta optimal jadval emas, balki turli tashqi sharoitlarda o'z natijasini saqlab qoluvchi jadvalni aniqlash imkoniyati paydo bo'ladi.

Yakuniy bosqichda tozalash jadvalining chidamliligi sezgirlik va ssenariy tahlili asosida baholanadi. Bunda prognoz xatosining ortishi natijasida energiya ishlab chiqarishdagi yo'qotish, suv sarfi va umumiy ekspluatatsion xarajatlarning qanchalik o'zgarishi aniqlanadi. Chidamlilik darajasi prognoz xatosi mavjud bo'lgan sharoitdagi natijaning bazaviy optimal holatga nisbatan qanchalik barqaror saqlanishi bilan belgilanadi. Ushbu metodologiya yordamida suv tanqisligi mavjud hududlarda fotoelektrik panellarga texnik xizmat ko'rsatish jadvalini deterministik emas, balki noaniqliklarni hisobga oluvchi adaptiv yondashuv asosida ishlab chiqish imkoniyati yaratiladi [7].

1-jadval

Prognoz noaniqligi sharoitida fotoelektrik panellarni tozalash strategiyalarining samaradorligi

Tozalash strategiyasi	Prognoz xatosi, %	Suv sarfi, L/m ²	Energiya yo'qotishi, %	Umumiy samaradorlik, %	Chidamlilik indeksi, %
Tez-tez tozalash	5	2,80	2,1	96,4	94,8
Tez-tez tozalash	15	2,80	3,4	93,7	89,6
O'rtacha interval	5	1,90	2,8	95,1	96,2
O'rtacha interval	15	1,90	4,2	92,8	93,5
O'rtacha interval	25	1,90	6,1	89,6	88,7
Uzoq interval	5	1,20	4,7	91,8	91,4
Uzoq interval	15	1,20	7,3	87,5	84,9
Uzoq interval	25	1,20	10,2	82,6	77,3



1-jadval ma'lumotlari fotoelektrik panellarni tozalash chastotasi bilan suv sarfi, energiya yo'qotishlari va prognoz noaniqliklariga chidamlilik o'rtasida bevosita bog'liqlik mavjudligini ko'rsatadi. Tez-tez tozalash strategiyasida suv sarfi $2,80 \text{ L/m}^2$ ni tashkil etib, energiya yo'qotishlari nisbatan past darajada — 2,1–3,4 % oralig'ida saqlanadi. Biroq prognoz xatosining 5 foizdan 15 foizgacha oshishi ushbu strategiyaning chidamlilik indeksini 94,8 % dan 89,6 % gacha pasaytiradi. Bu holat tez-tez tozalash yuqori energiya samaradorligini ta'minlasa-da, suv resurslaridan foydalanish nuqtayi nazaridan har doim ham maqbul emasligini ko'rsatadi.

O'rtacha tozalash intervali esa ikki asosiy maqsad — suvni tejash va energiya ishlab chiqarishdagi yo'qotishlarni cheklash o'rtasida nisbatan optimal muvozanatni ta'minlaydi. Mazkur strategiyada suv sarfi $1,90 \text{ L/m}^2$ gacha kamaygan bo'lsa-da, prognoz xatosi 5 % bo'lgan holatda energiya yo'qotishi atigi 2,8 % ni tashkil etadi. Eng muhimi, ushbu sharoitda chidamlilik indeksi 96,2 % ga yetib, barcha strategiyalar orasidagi eng yuqori qiymatni ko'rsatadi. Prognoz xatosi 15 % ga oshirilganda ham indeks 93,5 % darajasida saqlanib qolmoqda.

Prognoz xatosining 25 % gacha ortishi o'rtacha interval strategiyasida energiya yo'qotishlarini 6,1 % gacha oshiradi va chidamlilik indeksini 88,7 % ga tushiradi. Shunga qaramay, uzoq interval strategiyasi bilan taqqoslaganda uning natijalari barqarorroq bo'lib qolmoqda. Uzoq intervalda suv sarfi eng past - $1,20 \text{ L/m}^2$, biroq panel yuzasida ifloslanishning uzoqroq saqlanishi sababli energiya yo'qotishlari prognoz xatosi 25 % bo'lgan sharoitda 10,2 % ga yetadi. Chidamlilik indeksining 77,3 % gacha pasayishi mazkur strategiyaning noaniq meteorologik sharoitlarda xavf darajasi yuqoriroq ekanligini ko'rsatadi.

Umuman olganda, natijalar o'rtacha tozalash intervali suv resurslari cheklangan sharoitda eng maqbul strategiya bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi. Ushbu yondashuv minimal suv sarfiga emas, balki suv tejamlorligi, energiya yo'qotishlari va prognoz noaniqligi o'rtasidagi barqaror muvozanatga asoslanadi. Shu sababli fotoelektrik tizimlarni boshqarishda qat'iy vaqt jadvalidan ko'ra, prognoz ishonchliligi va panelning real ifloslanish holatini hisobga oluvchi adaptiv tozalash mexanizmlaridan foydalanish ilmiy va amaliy jihatdan maqsadga muvofiq hisoblanadi.

Natijalar va Muhokama. Tadqiqot natijalari suv resurslari cheklangan sharoitda fotoelektrik panellarni tozalash jadvalini shakllantirishda faqat panel yuzasining ifloslanish darajasini emas, balki meteorologik prognozlarning noaniqligini ham hisobga olish zarurligini ko'rsatdi. O'tkazilgan ssenariy tahlilida tozalash chastotasi, suv sarfi, prognoz xatosi va energiya yo'qotishlari o'rtasidagi o'zaro bog'liqlik baholandi. Natijalar tozalash jarayonini haddan tashqari tez-tez tashkil etish har doim ham tizimning umumiy samaradorligini oshirmasligini ko'rsatdi. Aksincha, suv sarfi bilan energiya yo'qotishlari o'rtasidagi muvozanatni ta'minlaydigan tozalash intervalini tanlash barqarorroq natijalarni yuzaga keltiradi.

Tahlil qilingan uchta strategiya orasida tez-tez tozalash usuli eng past energiya yo'qotishlarini ta'minladi. Prognoz xatosi 5 % bo'lgan holatda energiya yo'qotishi 2,1 % darajasida qayd etildi. Prognoz noaniqligi 15 % gacha oshirilganda mazkur ko'rsatkich 3,4 % ga yetdi. Bu holat panel yuzasining doimiy ravishda nisbatan toza saqlanishi elektr energiyasi ishlab chiqarishdagi yo'qotishlarni cheklashini ko'rsatadi. Biroq ushbu strategiyada suv sarfining $2,80 \text{ L/m}^2$ bo'lishi suv resurslari tanqis hududlar uchun muhim cheklov hisoblanadi. Demak, faqat energiya ishlab chiqarish ko'rsatkichiga asoslangan qaror suvdan foydalanish samaradorligini yetarli darajada aks ettirmaydi.

O'rtacha tozalash intervali tadqiqotda eng muvozanatli strategiya sifatida namoyon bo'ldi. Ushbu usulda suv sarfi $1,90 \text{ L/m}^2$ gacha kamaygan bo'lsa-da, energiya yo'qotishlari maqbul chegarada saqlanib qoldi. Ayniqsa, prognoz xatosi 5 % bo'lgan sharoitda chidamlilik indeksining 96,2 % ga teng bo'lishi ushbu strategiyaning tashqi sharoitlar o'zgarishiga nisbatan yuqori barqarorligini ko'rsatadi. Prognoz xatosining 15 % gacha oshishi natijasida energiya yo'qotishi 4,2 % ni tashkil etdi va chidamlilik indeksi 93,5 % darajasida saqlanib qoldi. Bu natija o'rtacha interval strategiyasi prognozidagi kichik va o'rta darajadagi xatoliklarni kompensatsiya qilish imkoniyatiga ega ekanligini anglatadi [8].

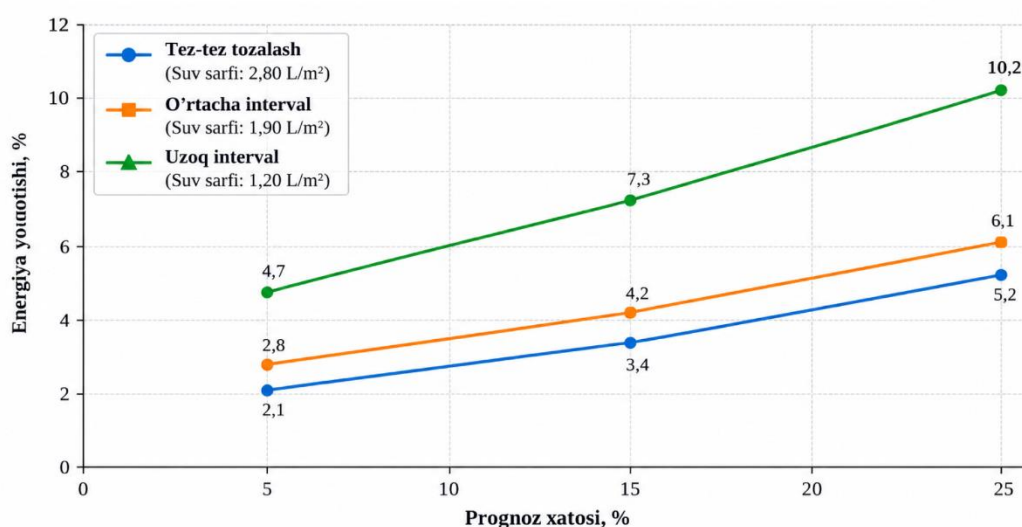


Prognoz xatosi 25 % ga yetganda esa barcha strategiyalarda samaradorlikning pasayishi kuzatildi. O'rtacha intervalda energiya yo'qotishi 6,1 % gacha oshgan bo'lsa, uzoq interval strategiyasida ushbu ko'rsatkich 10,2 % ga yetdi. Uzoq intervalda suv sarfining 1,20 L/m² gacha kamayishi dastlab ijobiy natija sifatida ko'rinsa-da, uzoq vaqt davomida tozalash amalga oshirilmasligi panel yuzasida chang qatlamining ko'payishiga olib keladi. Natijada elektr energiyasi ishlab chiqarishdagi yo'qotishlar suvni tejashdan olinadigan iqtisodiy va texnik manfaatlarni qisman yoki to'liq kamaytirishi mumkin. Shu sababli suv sarfini mutlaq minimumga tushirish emas, balki suv birligiga to'g'ri keladigan energiya samaradorligini oshirish muhim hisoblanadi.

Natijalar prognoz noaniqligi tozalash jadvalining samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatishini ham tasdiqladi. Meteorologik sharoitlarni aniq bashorat qilish imkoniyati pasaygan sari qat'iy tozalash jadvalarining xavfi ortadi. Masalan, yog'ingarchilik kutilayotganligi sababli rejalashtirilgan tozalash jarayonini kechiktirish, biroq yog'ingarchilik prognozi amalga oshmasligi panelning uzoq vaqt iflos holatda qolishiga sabab bo'lishi mumkin. Aksincha, prognoz asosida rejalashtirilgan tozalashdan keyin yog'ingarchilik yuz berishi sarflangan suv va mehnat resurslarining ma'lum darajada samarasiz ishlatilishiga olib keladi. Shu jihatdan prognozning aniqligi bilan bir qatorda uning xatolik diapazonini ham qaror qabul qilish modeliga kiritish maqsadga muvofiq [9].

Tadqiqot natijalari asosida fotoelektrik panellarni tozalashni boshqarishda adaptiv yondashuvning afzalligi yaqqol namoyon bo'ladi. Bunday yondashuvda tozalash vaqti faqat oldindan belgilangan kalendar jadvali asosida emas, balki panelning real ifloslanish darajasi, mavjud suv zaxirasi, kutilayotgan yog'ingarchilik va energiya ishlab chiqarishdagi potensial yo'qotishlar asosida belgilanadi. Bu esa tizimni o'zgaruvchan tashqi muhitga moslashtirish imkonini beradi.

Umuman olganda, olingan natijalar suv resurslari cheklangan hududlarda fotoelektrik panellarni ekspluatatsiya qilish uchun o'rtacha tozalash intervali va prognoz noaniqligini hisobga oluvchi adaptiv boshqaruv strategiyasi eng maqbul yechimlardan biri ekanligini ko'rsatadi. Mazkur strategiya suv sarfini nazorat qilish bilan birga energiya yo'qotishlarini maqbul darajada ushlab turadi va meteorologik prognozda xatolarga nisbatan yuqori chidamlilikni ta'minlaydi. Shu bilan birga, kelgusidagi tadqiqotlarda turli iqlim zonalari, chang tarkibi, panelning qiyalik burchagi, avtomatlashtirilgan quruq tozalash texnologiyalari va real vaqt monitoring ma'lumotlarini modelga kiritish natijalarning amaliy aniqligini yanada oshirishi mumkin [10].



1-rasm. Prognoz xatosi darajasining turli fotoelektrik panel tozalash strategiyalarida energiya yo'qotishlariga ta'siri.

1-rasmda meteorologik prognoz xatosining ortishi sharoitida fotoelektrik panellarni tozalashning uch xil strategiyasi bo'yicha energiya yo'qotishlarining o'zgarish dinamikasi



keltirilgan. Grafikdan ko‘rinadiki, prognoz xatosining 5 % dan 25 % gacha oshishi barcha tozalash strategiyalarida energiya yo‘qotishlarining izchil ko‘payishiga olib kelgan. Bu holat meteorologik sharoitlarni oldindan aniq baholash fotoelektrik tizimlarning ekspluatatsion samaradorligini ta‘minlashda muhim omil ekanligini ko‘rsatadi.

Tez-tez tozalash strategiyasi eng past energiya yo‘qotishlarini namoyon qilgan. Prognoz xatosi 5 % bo‘lganda yo‘qotish 2,1 %, 15 % da 3,4 %, 25 % da esa 5,2 % ni tashkil etgan. Ushbu natija panel yuzasida chang va boshqa ifloslantiruvchi zarrachalarning uzoq vaqt to‘planishiga yo‘l qo‘ymaslik energiya ishlab chiqarish barqarorligini oshirishini ko‘rsatadi. Biroq mazkur strategiyani asosiy cheklovi suv sarfining yuqoriligi bilan bog‘liq.

O‘rtacha interval asosidagi tozalash strategiyasida energiya yo‘qotishlari mos ravishda 2,8 %, 4,2 % va 6,1 % ni tashkil etgan. Ushbu strategiya tez-tez tozalashga nisbatan biroz yuqori energiya yo‘qotishiga ega bo‘lsa-da, suv sarfini sezilarli darajada kamaytiradi. Shu sababli suv resurslari cheklangan hududlar uchun aynan ushbu strategiya energiya samaradorligi va resurs tejamlorligi o‘rtasida maqbul muvozanatni ta‘minlaydi.

Uzoq interval strategiyasida esa prognoz xatosining ortishi bilan energiya yo‘qotishlari eng yuqori darajaga ko‘tarilgan: 5 % xatolikda 4,7 %, 15 % da 7,3 %, 25 % da esa 10,2 %. Bu natija tozalash oralig‘ining haddan tashqari uzaytirilishi suv sarfini kamaytirsada, panel yuzasida ifloslanishning to‘planishi hisobiga elektr energiyasi ishlab chiqarish samaradorligini sezilarli pasaytirishi mumkinligini ko‘rsatadi.

Umumiy tendensiya shundan iboratki, prognoz noaniqligi kuchaygan sari uzoq interval strategiyasining samaradorligi tezroq pasayadi. Shu bois suv resurslari cheklangan sharoitda tozalash jadvalini faqat suvni maksimal tejash mezonini asosida shakllantirish yetarli emas. Eng maqbul yondashuv panelning ifloslanish darajasi, meteorologik prognozlarning ishonchligi, mavjud suv miqdori va kutilayotgan energiya yo‘qotishlarini birgalikda hisobga oluvchi adaptiv tozalash strategiyasini qo‘llashdan iborat.

Ilmiy jihatdan asosiy xulosa: grafik natijalari o‘rtacha tozalash intervali suv sarfini maqbul darajada ushlab, prognoz xatolarining energiya ishlab chiqarishga salbiy ta‘sirini cheklashi sababli suv tanqis sharoitlarda nisbatan barqaror va chidamli boshqaruv strategiyasi sifatida qaralishi mumkinligini ko‘rsatadi.

Xulosa. O‘tkazilgan tadqiqot natijalari suv resurslari cheklangan sharoitda fotoelektrik panellarni tozalash jarayonlarini samarali tashkil etishda prognoz noaniqliklarini hisobga olish muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega ekanligini ko‘rsatdi. Panel yuzasida chang va boshqa ifloslantiruvchi zarrachalarning to‘planishi elektr energiyasi ishlab chiqarish samaradorligini pasaytirishi sababli tozalash jarayonlarini optimal rejalashtirish zarur. Biroq tozalash chastotasining ortishi suv sarfining ko‘payishiga olib keladi. Shu sababli fotoelektrik tizimlarni boshqarishda energiya yo‘qotishlarini kamaytirish va suv resurslaridan oqilona foydalanish o‘rtasidagi muvozanatni ta‘minlash asosiy vazifalardan biri hisoblanadi.

Tadqiqotda ko‘rib chiqilgan turli tozalash strategiyalari natijalari prognoz xatosining ortishi barcha holatlarda energiya yo‘qotishlarini oshirishini ko‘rsatdi. Tez-tez tozalash strategiyasi eng past energiya yo‘qotishlarini ta‘minlagan bo‘lsa-da, uning suv sarfi yuqoriligi suv tanqis hududlarda qo‘llash imkoniyatlarini cheklaydi. Uzoq interval asosidagi tozalash esa suvni sezilarli darajada tejash imkonini bergan, biroq prognoz noaniqligi oshganda panelning ifloslanishi natijasida energiya yo‘qotishlari keskin ko‘paygan.

Olingan natijalar asosida o‘rtacha tozalash intervali suv sarfi, energiya yo‘qotishlari va prognoz noaniqligiga chidamlilik o‘rtasida eng maqbul muvozanatni ta‘minlovchi strategiya sifatida baholandi. Ushbu yondashuv qat’iy kalendar jadvalidan ko‘ra, real meteorologik ma’lumotlar, panelning ifloslanish darajasi va mavjud suv resurslari asosida tozalash vaqtini moslashtirish imkonini beradi.

Shunday qilib, suv resurslari cheklangan hududlarda fotoelektrik panellardan foydalanish samaradorligini oshirish uchun prognoz noaniqliklariga chidamli adaptiv tozalash algoritmlarini joriy etish maqsadga muvofiqdir. Bunday yondashuv suv iste’molini kamaytirish, energiya ishlab



chiqarishdagi yo'qotishlarni cheklash, ekspluatatsion xarajatlarni optimallashtirish va fotoelektrik tizimlarning uzoq muddatli barqarorligini ta'minlashga xizmat qiladi. Kelgusidagi tadqiqotlarda real vaqt monitoringi, mashinali o'rganish algoritmlari, quruq tozalash texnologiyalari va turli iqlim sharoitlarini modelga integratsiya qilish taklif etiladi.

Adabiyotlar.

1. Mani, M., & Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3124–3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>
2. Kimber, A., Mitchell, L., Nogradi, S., & Wenger, H. (2006). The effect of soiling on large grid-connected photovoltaic systems in California and the Southwest region of the United States. 2006 *IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2391–2395. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.2006.279690>
3. Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A., & Sopian, K. (2020). A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123187. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123187>
4. Fathi, M., Abderrezek, M., & Grana, P. (2017). Technical and economic assessment of cleaning protocol for photovoltaic power plants: Case of Algerian Sahara sites. *Solar Energy*, 147, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.053>
5. Micheli, L., Fernández, E. F., & Almonacid, F. (2021). Photovoltaic cleaning optimization through the analysis of historical time series of environmental parameters. *Solar Energy*, 227, 645–654. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.081>
6. Yazdani, H., & Yaghoubi, M. (2022). Dust deposition effect on photovoltaic modules performance and optimization of cleaning period: A combined experimental–numerical study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101946. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101946>
7. Shiravi, A. H., et al. (2021). Photovoltaic cleaning frequency optimization under different degradation rate patterns. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.044>
8. Faye, M., et al. (2022). A framework of optimum cleaning schedule and its financial impact in a large-scale PV solar plant: A case study in Senegal. *EPJ Photovoltaics*, 13, 29. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2022019>
9. Shiravi, A. H., et al. (2021). Global analysis of optimal cleaning cycle and profit of soiling affected solar panels. *Applied Energy*, 285, 116436. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116436>
10. Shahzad, N., Hussain, N., Umar, S., Azam, M. F., Yousaf, T., & Waqas, A. (2025). Impacts of soiling on solar panel performance and state-of-the-art effective cleaning methods: A recent review. *Journal of Cleaner Production*, 497, 145119. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145119>